

JEAN-FRÉDÉRIC GRANDMONT

**ANALYSE STRUCTURALE DU SYSTÈME ÂME-
SEMELLES DE POUTRELLES EN BOIS À
CONFIGURATION EN I**

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

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

UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

La recherche et le développement effectué sur les poutrelles en I à base de bois a souvent eu recours aux essais expérimentaux et à des méthodes empiriques. Le panneau OSB (oriented strand board – panneau de lamelles orientées) s’est révélé être adapté lorsqu’il est utilisé comme âme dans ces poutrelles. Cependant, notre compréhension du comportement de cette âme en OSB pourrait être améliorée afin de mieux comprendre le comportement de ces poutrelles et d’en optimiser le design.

L’objectif général de cette étude était de développer un modèle numérique permettant de simuler le comportement des poutrelles en I à base de bois afin d’avoir une meilleure compréhension de l’impact des propriétés de l’âme sur l’ensemble du système. Cet objectif a été poursuivi en spécifiant les trois objectifs spécifiques suivants :

- Identifier les propriétés mécaniques de l’âme qui devraient être déterminées de manière expérimentale en fonction de leur impact sur la déflexion des poutrelles et sur les déplacements relatifs causés par le cisaillement dans l’âme.
- Déterminer les propriétés mécaniques requises pour l’âme en OSB, ainsi que leur variabilité, dans le développement d’un modèle numérique simulant les poutrelles en I en flexion.
- Déterminer l’impact de la variabilité des propriétés mécaniques de l’âme en OSB sur le comportement en flexion des poutrelles en I.

Pour identifier les propriétés mécaniques de l’âme importantes à être déterminées, une étude de sensibilité d’un modèle numérique basé sur la méthode par éléments finis (MEF) a été effectuée. Les propriétés mécaniques de l’âme ont été changées tour à tour dans le modèle, passant de 50% à 200% d’une valeur de référence pour déterminer leur impact sur la déflexion de la poutrelle et sur le déplacement relatif en cisaillement dans l’âme. Le modèle s’est révélé être avant tout sensible au module de cisaillement dans le plan du panneau en modifiant la déflexion de la poutrelle jusqu’à 23%. Le modèle s’est aussi montré sensible aux modules d’élasticité en tension de l’âme en OSB en directions parallèle

et perpendiculaire à la longueur des poutrelles. La déflexion de la poutrelle a respectivement été modifiée de 2% et 1% lorsque ces propriétés ont été modifiées.

Pour déterminer les propriétés mécaniques de l'âme en OSB requises et précédemment identifiées comme importantes ou sensibles du modèle pour l'âme en OSB, une méthodologie a été élaborée afin de déterminer les relations qui relient certaines propriétés mécaniques de l'OSB en fonction de la masse volumique de petits échantillons. Des panneaux OSB (n=40) ont d'abord été scannés par rayons X afin de mesurer la masse volumique et d'en cartographier la variation dans le plan du panneau. Des échantillons ont été découpés à partir de zones de masse volumique homogène selon trois orientations différentes (parallèle, perpendiculaire et à 45° par rapport à l'axe fort du panneau) afin de mesurer trois propriétés mécaniques requises pour un modèle élastique simulant l'âme en OSB d'une poutrelle en I : Les modules d'élasticité (MOE) parallèle et perpendiculaire à l'axe fort du panneau et le module de cisaillement (G). Étant donnée la faible taille des échantillons, le module de cisaillement a été déterminé suivant une équation de la mécanique des solides en utilisant une combinaison de MOE en tension dans le plan, incluant le MOE à 45°. Les résultats ont montré une forte relation entre la masse volumique de l'OSB et les propriétés mécaniques : les coefficients de détermination (R^2) variant de 0,57 à 0,79. Cela a fourni les informations nécessaires pour inclure les propriétés mécaniques de l'OSB en fonction de la masse volumique dans un modèle simulant l'âme des poutrelles en I. Basé sur les équations de régression linéaire entre les propriétés mécaniques et la masse volumique, des augmentations de 207% du MOE en tension dans la direction parallèle, de 187% dans la direction perpendiculaire et de 172% à 45° ont été obtenues en passant de 600 à 900 kg/m³. L'équation utilisée pour déterminer le module de cisaillement s'est révélée juste et fiable.

Finalement, pour déterminer l'impact de la variabilité des propriétés mécaniques de l'âme en OSB sur le comportement en flexion des poutrelles en I, plusieurs séries de simulations ont été effectuées. En premier lieu, la flèche et les déplacements relatifs en cisaillement dans l'âme ont été comparés à des résultats de simulation considérant une âme homogène et

des résultats d'essais en laboratoire. Les résultats de simulation se sont révélés être près de ceux du laboratoire avec des différences de déflexion se situant entre 9 et 24%. Les déplacements relatifs en cisaillement ont cependant été surestimés par le modèle. Les différences étaient potentiellement dues à la variabilité locale de masse volumique et des propriétés physiques et mécaniques l'OSB. Cette variabilité a été spécifiée dans le modèle en se basant sur les relations entre la masse volumique et les propriétés mécaniques de l'OSB préalablement établies. Les résultats de simulation considérant la variabilité des propriétés ont été comparés avec d'autres considérant l'OSB comme étant homogène. La distribution des déplacements relatifs en cisaillement a été modifiée dans tous les cas et la flèche a en moyenne légèrement augmenté (moins de 1%). En se basant sur la relation entre la masse volumique et les propriétés mécanique des panneaux OSB, l'effet du profil de masse volumique selon l'épaisseur du panneau OSB a été considéré dans la simulation. Une augmentation de la flèche de l'ordre de 1% a été observée ainsi qu'un déplacement latéral de la semelle inférieure lorsque le profil de masse volumique vertical a été pris en compte.

Il ressort de cette étude que l'OSB, en tant que matériau, a des propriétés mécaniques grandement variables à une échelle relativement petite. Ces propriétés, dont la plus influente est le module de cisaillement dans le plan du panneau, n'ont cependant pas un impact majeur sur le comportement des poutrelles en I en flexion dans le domaine élastique.

Abstract

Research and development of wood I-joist design has often relied on laboratory testing and on empirical approach. Oriented strand board (OSB) has been used successfully as web material but its behavior within the I-joist needs to better be defined in order to improve wood I-joist design.

The overall objective of this study is to develop a model that would simulate the deflection and shear strain of a wood I-joist in bending and to develop a better understanding of the web properties impact on the overall I-joist bending behavior. This was pursued by specifying three specific objectives:

- Identify web mechanical properties that should be determined experimentally due to their impact on I-joist deflection and shear strain.
- Determine the OSB web mechanical properties, including their variability, required to develop a finite element model of wood I-joist bending behavior.
- Determine the impact of OSB physical and mechanical properties variability on I-joists bending behavior.

To determine which OSB properties have higher impact on I-joist shear strain and deflection, a sensitivity study was performed with a finite element method (FEM) based model. The OSB mechanical properties were changed in a numerical model from 50% to 200% of the reference value to determine their impact on web shear strain and I-joist deflection. The model was primarily sensitive to in-plane web shear stiffness, which changed I-joist deflection up to 23%. The model was also sensitive to the web tensile modulus of elasticity parallel and perpendicular to joist length. These properties changed I-joist deflection up to 2% and 1%, respectively.

The important or sensitive OSB web mechanical properties were determined by a methodology developed to obtain reliable mechanical properties of I-joists OSB web,

including variability. OSB panel samples were scanned by X-rays to measure in-plane density variation. Specimens were cut from pre-defined homogeneous density areas in three different orientations (parallel, perpendicular, and diagonal to the strong axis) to measure three basic elastic properties required for an elastic model of I-joists OSB web: modulus of elasticity (MOE) parallel and perpendicular to the panel's strong axis and shear modulus (G). Given the required small specimen size, shear modulus was determined using a combination of in-plane tensile MOEs, including MOE at 45 degrees. The results showed a strong relationship between OSB density and small-scale mechanical properties: coefficients of determination (R^2) varied between 0.57 and 0.79. This provided information on I-joist OSB web mechanical properties as a function of density for input into a numerical model. Properties showed considerable variability in the 600–900 kg/m³ density range, with a 207% increase in tensile modulus of elasticity in the parallel direction, 187% in the perpendicular direction, and 172% at 45°. The mechanics-based OSB shear modulus equation used proved to be reliable.

Finally, to determine the impact of OSB mechanical properties variability on I-joists bending behaviour, a series of simulations were performed. The inclusion OSB web heterogeneous properties over wood I-joist behavior in bending was investigated. The shear strain in the web and the I-joist deflection from full scale experimental results were first compared with model output considering homogeneous OSB web. Results showed a good correlation between simulated and full scale experimental bending test results values with deflection differences ranging from 9 to 24%. However, the model overestimated the shear strain. These differences were potentially due to the OSB local variability of density and mechanical properties. Based on a previously established density/properties relationship and on web OSB in-plane density mapping, OSB property heterogeneity was considered in the model. Simulation results including heterogeneous OSB properties (n=100) were then compared with those considering homogeneous properties (n=100). Shear strain distribution was altered in the web and a small (less than 1%) increase in deflection was observed. Based on density measured across the OSB web thickness and on the established density/properties relationship, simulations were performed to evaluate the effect of the

vertical density profile on the simulated I-joist. A 1% deflection increase was observed as well as a lateral displacement of the bottom flange.

Avant-Propos

Ce projet a prit naissance avec Richard Desjardins dans les bureaux de FPInnovations qui s'appelait alors Forintek Canada Corp. Au fil de nos discussions et vu l'intérêt que je portais à continuer à travailler avec lui, les bases de ce projet ont été jetées. J'ai eu la chance et l'honneur de me faire proposer un projet qui me motivait à poursuivre dans le domaine de la recherche.

Alain Cloutier et Guy Gendron avaient précédemment eu l'occasion d'agir à titre de directeur et co-directeur dans un projet ayant certaines similarités aussi leur a-t-il été demandé de reprendre le collier une fois de plus dans les mêmes rôles. Par chance, ces derniers ont accepté et le projet fut lancé.

Sans ces trois précieuses personnes, ce projet n'aurait pas vu le jour. Merci Richard pour ton support, ta franchise et ta confiance. Merci Alain pour l'aide considérable et précieuse pour la réalisation de ce projet, en particulier en ce qui concerne la rédaction de cette thèse. Merci Guy pour ton support qui m'aura permis dans un premier temps à me dépêtrer dans le dédale de certaines notions relatives à la modélisation puis à l'amélioration des articles.

Bien d'autres gens ont permis la réalisation de ce projet. De chez FPInnovations, merci aussi à : Anes Omeranovic, Constance Thivierge, Olivier Baes, Jean-Claude Garant, Lin Hu et bien d'autres membres du personnel. De l'Université Laval, merci à : Sylvain Auger, Aziz Laghdir et les autres membres du personnel du Centre de recherche sur le bois (CRB).

Évidemment, un tel projet n'aurait pu avoir lieu sans ressources financières. Au cours de l'ensemble du projet, deux bourses du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ont été obtenues. Ces bourses étaient à incidence industrielles et FPInnovations participait à chacune d'entre elles. FPInnovations a aussi assumé la majorité des frais reliés au matériel ainsi qu'à l'expérimentation. Je remercie sincèrement FPInnovations ainsi que le CRSNG pour leur support. Le CRSNG par le biais des subventions de MM Cloutier et Gendron ont aussi contribué financièrement à ce projet pour qu'il voit le jour : merci encore. Une certaine quantité de matériel était aussi nécessaire à la

réalisation d'essais de laboratoire. Boise Cascade, Norbord ainsi que Bois d'Ingénierie Abitibi LP ont permis d'effectuer ces essais en fournissant du matériel.

Merci à ma famille. Dominique, Zachary et Mathilde : je ne sais pas où j'en serais sans vous.

Cette thèse inclut trois articles scientifiques dont le premier auteur est l'auteur de cette thèse. Ces derniers sont présentés dans les chapitres II, III et IV. Ceux-ci sont respectivement :

Grandmont, J.-F., A. Cloutier, G. Gendron, R. Desjardins. 2010. *Wood I-joist model sensitivity to oriented strandboard web mechanical properties*, Wood Fiber Sci 42(3):352-361.

Grandmont, J.-F., A. Cloutier, G. Gendron, R. Desjardins. 2011. *Effect of Density on the Properties of Oriented Strandboard Web Stock Used in Wood I-Joists*. Forest Prod. J. 60(7/8):592–598.

Grandmont, J.-F., A. Cloutier, G. Gendron, R. Desjardins. 2011. *Effect of density on the properties of OSB web stock used in wood I-joists. À soumettre.*

Le rôle des auteurs pour chacun de ces articles s'établit de la façon suivante. Le premier auteur est l'auteur principal ayant fait la rédaction et établissant le contenu de la première version de l'article. Le second auteur a réalisé une première révision portant tant sur le fond que sur la forme de l'article et est le principal collaborateur dans la rédaction. Les autres auteurs ont commenté les articles en vue d'en bonifier la forme et le fond.

*Si je n'ai jamais été séduit par un grade, le
cheminement et la manière m'auront toujours
tenu à cœur. À ma famille.*

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract	iv
Avant-Propos	vii
Table des matières.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Liste des figures	2
Introduction.....	4
Chapitre 1 : Revue de littérature, objectifs et rétrospective méthodologique	6
1.1 Considérations pratiques et théoriques	6
1.2 Principe de base des poutrelles en I et utilisation	7
1.3 Fabrication des poutrelles en I	12
1.4 Historique.....	13
1.5 Travaux antérieurs, objectifs et méthodologie	14
1.6 Objectifs et originalité de l'étude.....	27
1.7 Rétrospective méthodologique.....	28
1.7.1 Modélisation et calcul.....	28
1.7.2 Chronologie de l'étude.....	35
Chapitre 2 : WOODI-JOIST MODEL SENSITIVITY TO OSB WEB MECHANICAL PROPERTIES	37
2.1 Abstract / résumé	37
SENSIBILITÉ D'UN MODÈLE DE POUTRELLES EN I EN BOIS AUX PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ÂME EN OSB.....	37
2.2 Résumé :	37
2.3 Introduction.....	38
2.4 MATERIAL AND METHODS	41
2.4.1 I-Joist Web to Flange Joint	41
2.4.2 Finite Element Model	43
2.5 RESULTS AND DISCUSSION	49
2.5.1 Web-to-Flange Joint Testing.....	49
2.5.2 Simulation Results	49
2.6 Conclusions	55
Chapitre 3 : Effect of density on the properties of OSB web stock used in wood I-joists ...	56
3.1 Abstract	56
EFFETS DE LA MASSE VOLUMIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE DES PANNEAUX OSB UTILISÉS DANS LA FABRICATION DES POUTRELLES EN I EN BOIS	56
3.2 Résumé.....	56
3.3 Introduction.....	57
3.4 Materials and methods	62
3.4.1 Phase 1: Determination of global I-joists OSB web properties	62
3.4.2 Phase 2: Determination of local I-joists OSB web properties	64
3.5 Results and discussion	66
3.5.1 Phase 1: Determination of global I-joists OSB web properties	66

3.5.2 Phase 2: Determination of local I-joist OSB web properties	68
3.6 Conclusion	73
Chapitre 4 : Simulation of wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability	75
4.1 Abstract	75
SIMULATION DE POUTRELLES EN BOIS À CONFIGURATION EN I CONSIDÉRANT LA VARIABILITÉ LOCALE DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'OSB	75
4.2 Résumé	75
4.3 Introduction	76
4.3 Material and Methods	79
4.3.1 Phase 1. Comparison of wood I-joist bending experimental and model results assuming an homogeneous OSB web	79
4.3.2 Phase 2. Modeling wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability	83
4.4 Results and discussion	85
4.4.1 Phase 1. Comparison of wood I-joist bending experimental results with model results for a homogeneous OSB web	85
4.4.2 Phase 2. Modeling wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability	89
4.5 Conclusion	95
Chapitre 5 : Conclusion générale et travaux futurs	97
Bibliographie	102
Annexe 1 : Photos additionnelles	107
Annexe 1 : Exemple de fichier de commande ABAQUS	109

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Résistance et rigidité de l'OSB (MPa) (entre parenthèses pour les essais de compression) (adapté de Zhu, 2003).....	20
*MOR : Module de rupture.....	20
Tableau 1.2 : Coefficients de Poisson (entre parenthèses pour les essais de compression) (adapté de Zhu, 2003)	20
Tableau 1.3 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais par vibration (adapté de Chui et al. 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.....	24
Tableau 1.4 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en flexion sur la rive (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.	24
Tableau 1.5 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en tension (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.	25
Tableau 1.6 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en compression (adapté de Chui et al, 2005).....	25
Tableau 1.7 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en cisaillement (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.	25
Table 2.1. Elastic engineering properties of I-joist wood flanges (black spruce).....	48
Table 2.2. Elastic engineering properties nominal values for the OSB web.	48
Table 2.3. Effect of element type and size on OSB web shear strain and I-joist deflection.	50
Table 2.4. Effect (%) of OSB web properties variation on the shear critical I-joist maximum deflection for 50 – 200% of the nominal value.....	52
Table 2.5. Effect (%) of OSB web properties variation on the shear critical I-joist shear strain for 50 – 200% of the nominal value.....	52
Table 2.6. Effect (%) of OSB web properties variation on the moment critical I-joist maximum deflection for 50 – 200% of the nominal value.	53
Table 2.7. Effect (%) of OSB web properties variation on the moment critical I-joist shear strain for 50 – 200% of the nominal value.....	54
Table 3.1. — Poisson's ratio of OSB panels determined according to ASTM D1037 and using an optical displacement measurement device. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation.	66
Table 3.2. — I-joists OSB web in-plane tension MOE obtained following ASTM D1037 in phase 1. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation.	67
Table 3.3. — I-joists OSB web in-plane shear modulus obtained following ASTM D2719-C. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation; n: sample size.	68
Table 3.4. — Average mechanical properties of I-joists OSB web using ASTM D1037.	72
Table 4.1: Moment critical I-joist shear strain and deflection results without considering web OSB density variation. Coefficients of variation are given in parenthesis.	86
Table 4.2 : Shear critical I-joist shear strain and deflection results without considering web OSB density variation. Coefficients of variation are given in parenthesis.	88

Liste des figures

Figure 1.2 : Section d'une poutrelle en I fléchiée (gauche, dimensions en pouces illustrées), répartition de la contrainte de cisaillement (haut droite) et répartition de la contrainte normale (bas droite) (MDSolids, 1999)	8
Figure 1.3 : Utilisation possible par remplacement des solives traditionnelles dans un immeuble résidentiel (courtoisie de FPIinnovations)	11
Figure 1.4 : Méthode de fabrication des poutrelles en I (CWC, 1996).....	12
Figure 1.5 : Assemblages typiques de l'âme et des semelles (CWC, 1996).....	13
Figure 1.6 : Relation entre la résistance en tension et la masse volumique de l'OSB (tiré de Zhu, 2003).....	21
Figure 1.7 : Relation entre la masse volumique et la rigidité de l'OSB en tension (tiré de Zhu, 2003).....	22
Figure 1.8. Système de coordonnées utilisé pour les simulations et détails du modèle simulé	33
Figure 1.9 Poutrelle longue sensible au moment fléchissant et conditions limites tel qu'utilisé pour l'étude de sensibilité	34
Figure 1.10 Poutrelle courte sensible au cisaillement et conditions limites	35
Figure 2.1. Reference coordinate system and finite element mesh.	42
Figure 2.2. Web-to-flange joint test setup.	43
Figure 2.3. Simulated moment critical I-joist.	45
Figure 2.4. Simulated shear critical I-joist.....	46
Figure 2.5. Test configuration and dimensions (m) for a) the moment critical I-joist and b) the shear critical I-joist.....	47
Figure 2.6. OSB web-to-flange joint test specimen damaged in the web.	49
Figure 2.7. Three-meter-long I-joist typical simulation results for a) shear strain and b) deflection.....	51
Figure 3.1. — Reference coordinate system.	58
Figure 3.2. — ASTM D1037 Tension test setup with optical displacement measurement device.	63
Figure 3.3. — ASTM D1037 in-plane tension test setup with two DCDTs.	65
Figure 3.4. — Average vertical density profile for the three density groups. A: 800–900 kg/m ³ , B: 700–800 kg/m ³ , C: 600–700 kg/m ³ (n=105 for each profile).....	69
Figure 3.5. — Tension MOE in I-joists OSB web in the parallel direction (E_1) as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.	70
Figure 3.6. — Tension MOE of I-joists OSB web in the perpendicular direction (E_2) as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.	70
Figure 3.7. — Tension MOE of I-joists OSB web at 45° as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.....	71
Figure 3.8. — Calculated tension MOE of I-joists OSB web in relation to average local apparent density. A: parallel (E_1), B: 45°, C: perpendicular (E_2), D: calculated in-plane shear modulus of the panel (G_{12}).	71
Figure 4.1: Reference coordinate system	78

Figure 4.2 : Pure shear deformation illustration (Roy and Craig, 2000)	81
Figure 4.3: I-joist test setup for a) moment critical and b) shear critical (drawing not to scale) where X drawings represent the different shear sections and shear strain measurement locations.	81
Figure 4.4: I-joist finite element mesh (phase 1, considering homogeneous web).....	82
Figure 4.5: I-joist finite element mesh (Phase 2, considering heterogeneous web).	84
Figure 4.6: Shear critical test setup and web-to-web joint location for sample Par04 (drawing not to scale) where X drawings represent shear strain measurement locations and the bold vertical line is a web to web joint.	88
Figure 4.7: Horizontal (in-plane) density mapping of I-joist web OSB (web #31).....	90
Figure 4.8: Shear stress of shear critical I-joist (3m) with homogeneous web properties (properties calculated based on the average density of the 50 simulated webs).....	91
Figure 4.9: Shear stress of shear critical I-joist (3m) I-joist with heterogeneous web properties (with simulated web #31 shown in Fig. 4.5).....	91
Figure 4.10: Shear critical (3m) I-joist with homogeneous / heterogeneous web properties deflection comparison based on the average density of the I-joist web	92
Figure 4.11: Moment critical I-joist (6 m) with homogeneous / heterogeneous web properties deflection comparison based on the average density of the I-joist web	93
Figure 4.12 : Density profile effect over shear stress (Pa) on a) the lower density side and b) the higher density side	94
Figure 4.13 : Vertical density profile effect on lateral displacement (m).	95
Figure A1.1: Dispositif d'essai en flexion pour poutrelle longue sensible aux moments fléchissant à huit points de chargement.	107
Figure A1.2: Dispositif d'essai en flexion pour poutrelle courte sensible au cisaillement à un point de chargement central.	107
Figure A1.3: Transducteur d'extension à câble PT 101 d'Intertechnology utilisé pour mesurer les déformations axiales à 45 ° dans l'âme des poutrelles en I lors d'essais en flexion.	108
Figure A1.4 : Panneau OSB recouvert de la cartographie horizontale de sa masse volumique . Des échantillons à être découpés ont été dessinés dans des zones de masse volumique homogène.	108

Introduction

Les poutrelles en bois à configuration en « I », produit toujours en évidence et exemple même de l'ingénierie du bois en raison de son ancienneté et de sa réussite commerciale, sont aujourd'hui rendues à la croisée des chemins. Ce produit a montré ses qualités au fil des années. Les attributs de mise en place telles les grandes portées, la flexibilité à y faire des ouvertures et sa grande stabilité dimensionnelle par rapport au bois massif ont fait de ce produit un meilleur choix dans l'esprit de beaucoup de consommateurs nord-américains. La grande industrialisation de son procédé de fabrication ainsi que sa meilleure utilisation de la fibre par rapport au bois massif ont aussi été des atouts. Sa croissance fut spectaculaire au cours des années 1990 en raison de l'offre plus importante, d'un prix plus stable sur les marchés et des qualités énumérées précédemment.

Ces solives sont dites d'ingénierie en raison du concept structural de la poutrelle. Bien que l'ingénierie faite sur les poutrelles ne se limite pas exclusivement à cet aspect, il n'en demeure pas moins que l'empirisme a largement été utilisé pour leur développement, particulièrement en ce qui concerne la contribution de l'âme.

Maintenant que les solives en I sont devenues des produits plus matures, de nouveaux défis s'imposent. La différenciation d'une poutrelle par rapport à une autre, ainsi que l'utilisation de ces produits dans de nouvelles applications à grande échelle, telles que les bâtiments industriels, imposent le recours à une ingénierie plus poussée.

Le projet proposé répond d'abord à une demande industrielle visant à étendre les connaissances que nous avons des poutrelles en I étudiées en se concentrant sur le comportement de l'âme et l'impact de ses propriétés mécaniques. Les industriels en question s'interrogeaient à savoir pourquoi des lots de poutrelles ne passaient pas les normes en raison de l'utilisation d'un lot X de panneaux OSB alors que ces derniers passaient les normes exigées, tout comme ceux d'autres lots de poutrelles passant les normes. La situation était visiblement générée par les panneaux mais aucun des indicateurs,

ou mesures, disponibles ne pouvaient expliquer la contre performance des poutrelles.

L'intérêt de mieux connaître les poutrelles en I afin d'en optimiser les caractéristiques est donc partagé et répandu du côté scientifique dans l'optique d'une meilleure prédiction de son comportement structural. L'impact des différentes propriétés mécaniques de l'âme en OSB et l'influence de leurs variabilités sont les aspects abordés afin de répondre à la demande industrielle.

Chapitre 1 : Revue de littérature, objectifs et rétrospective méthodologique

Ce chapitre couvre une revue de littérature portant sur les études scientifiques dont les sujets sont liés à l'étude des poutrelles en I faites de bois. Cette revue de littérature a permis de cibler les objectifs du projet qui sont présentés à la suite de cette dernière. Finalement, une rétrospective méthodologique vient apporter des éléments non discutés dans le corps de cette thèse.

1.1 Considérations pratiques et théoriques

Pour l'ensemble du document, les directions utilisées sont :

- 1 ou x : la direction de la longueur d'une poutrelle et, pour un panneau d'OSB pris à part d'une poutrelle, la direction de l'axe fort (la direction longue des panneaux standards),
- 2 ou y : la direction de la profondeur d'une poutrelle et, pour un panneau d'OSB pris à part d'une poutrelle, la direction de l'axe faible ou transversale (la direction large des panneaux standards),
- 3 ou z : la direction au travers de l'épaisseur d'une poutrelle et, pour un panneau d'OSB pris à part d'une poutrelle, la direction au travers de l'épaisseur du panneau.

Lorsqu'il est question des panneaux, l'orientation de ces derniers est donnée par rapport à son axe principal (i.e. axe fort ou axe parallèle à l'orientation préférentielle des lamelles des couches externes du panneau). La figure 1.1 illustre ces directions.

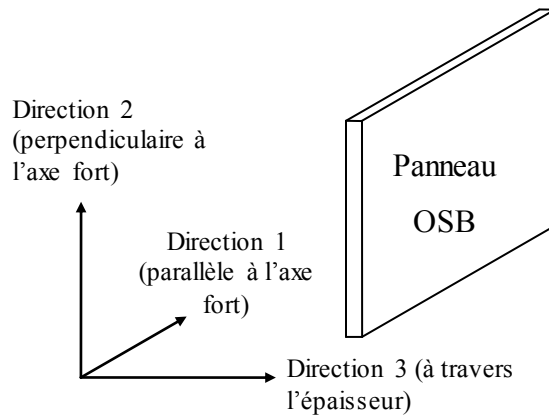


Figure 1.1 : Système de coordonnées de référence pour l'OSB

1.2 Principe de base des poutrelles en I et utilisation

La poutrelle en I à base de bois a une forme, ou section, très répandue. Ce type de structure peut être fait de différents matériaux. On retrouve des poutres en I en acier dans les structures de bâtiments alors que d'autres, faites d'aluminium, se retrouveront dans l'aéronautique.

Le principe de base de la forme de la structure est de faire en sorte qu'un maximum de matière rigide se retrouve le plus loin possible de l'axe neutre de flexion afin d'augmenter l'inertie et la rigidité apparente de la pièce. Ainsi, les efforts se distribueront différemment par rapport à une solive traditionnelle en bois dont la section est rectangulaire. La figure 1.2 permet d'apprécier un schéma d'une poutrelle en I standard telle qu'on les retrouve souvent avec des semelles en bois plein (usuellement de l'épinette noire aboutée et classée mécaniquement) et une âme en OSB (Oriented Strand Board) ayant une épaisseur réelle de 9,5 ou 11,1mm (épaisseur nominale de 3/8 ou 7/16 de pouce).

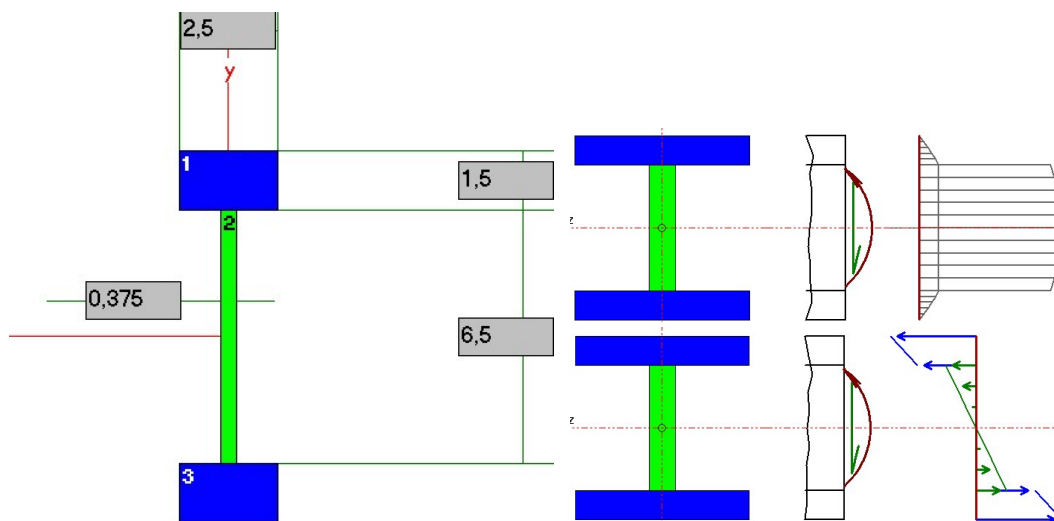


Figure 1.2 : Section d'une poutrelle en I fléchie (gauche, dimensions en pouces illustrées), répartition de la contrainte de cisaillement (haut droite) et répartition de la contrainte normale (bas droite) (MDSolids, 1999)

On remarque que la structure permet une distribution optimisée des différents efforts engendrés par une flexion. Tout d'abord, les efforts de cisaillement sont repris presque entièrement par l'âme et deviennent presque nuls aux semelles. C'est le contraire qui se produira pour les moments. Les contraintes engendrées par un moment seront très faibles dans l'âme et seront beaucoup plus intenses dans les semelles. La semelle supérieure, dans le cas d'un moment positif, sera soumise à une contrainte de compression alors que la semelle inférieure sera soumise à une contrainte de tension. Les matériaux utilisés dans ce type d'élément de structure devront donc être choisis en conséquence de la répartition des contraintes.

Les semelles sont en bois massif ou en LVL (Laminated Veneer Lumber). Le bois massif sera habituellement classé en fonction de ses propriétés mécaniques (classement MSR – Machine Stress Rated). Il s'agira souvent d'épinette noire pour les poutrelles produites au Québec. Pour ce qui est du LVL, il s'agit d'un composite de bois où des placages ont été collés les uns sur les autres en gardant la même orientation des fibres. Les deux produits ont des propriétés mécaniques légèrement différentes mais dans les deux cas, l'orientation de la

fibres de bois permet d'avoir de bonnes propriétés mécaniques en tension et en compression. L'utilisation de ces produits pour les semelles est donc appropriée.

Pour ce qui est de l'âme, elle est généralement composée d'OSB. Au début de la commercialisation des poutrelles en I, l'âme était faite de contreplaqué. L'OSB est un panneau qui est obtenu par le collage de lamelles de bois sous pression et à haute température à l'aide d'une colle thermosensibilisable et résistante à l'eau. Les lamelles sont disposées afin d'avoir une orientation préférentielle. Le panneau qui est utilisé pour l'âme des poutrelles en I possède généralement trois couches de lamelles. Les couches extérieures sont parallèles (direction 1) alors que celles de la couche du milieu sont perpendiculaires (direction 2). Ce principe est le même que pour le contreplaqué qui est obtenu par collage sous pression de placages de bois en faisant varier leur orientation de manière successive suivant un angle de 90°. Il y a deux raisons majeures pour lesquelles l'industrie a opté pour l'utilisation de l'OSB par rapport au contreplaqué. Premièrement, l'OSB est moins coûteux en raison de son procédé de fabrication. Il est plus facile de faire des lamelles que de faire des placages (Fisette, 2000). La production de placage demande des billes de bois de plus grande dimension et de plus grande qualité. L'OSB présente aussi l'avantage d'être souvent produit à partir d'espèces de bois moins utilisées traditionnellement. Au Québec, les panneaux sont produits à partir de peuplier avec l'ajout d'autres espèces de bois tel le bouleau à papier. La deuxième raison qui pousse les producteurs de poutrelles à utiliser l'OSB est que sa résistance et sa rigidité en cisaillement sont plus grandes que pour le contreplaqué (Fisette, 2000). Comme mentionné, l'âme reprend principalement les efforts de cisaillement alors que l'OSB est plus performant suivant ces caractéristiques en raison du taux de recouvrement des lamelles dans le panneau. La poutrelle en I telle qu'on la connaît actuellement est donc un produit bien pensé qui suit les principes d'ingénierie dans l'utilisation des différents matériaux composants sa structure.

Les poutrelles en I à base de bois sont des produits polyvalents. La première utilisation pour le marché de la construction a été de produire de longues poutrelles remplaçant les solives traditionnelles pour avoir des planchers qui n'auraient pas besoin de soutien

intermédiaire (Fisette 2000). Les poutrelles disponibles actuellement servent encore à cette application mais on les retrouve aussi dans d'autres applications. Elles sont incluses dans la fabrication de certaines charpentes de toit aussi bien que dans des structures plus imposantes (commerciales) en raison des portées possibles de ces produits. La figure 1.3 montre l'endroit où une utilisation serait possible, ainsi que l'élément de structure qui serait ainsi évité dans une maison.

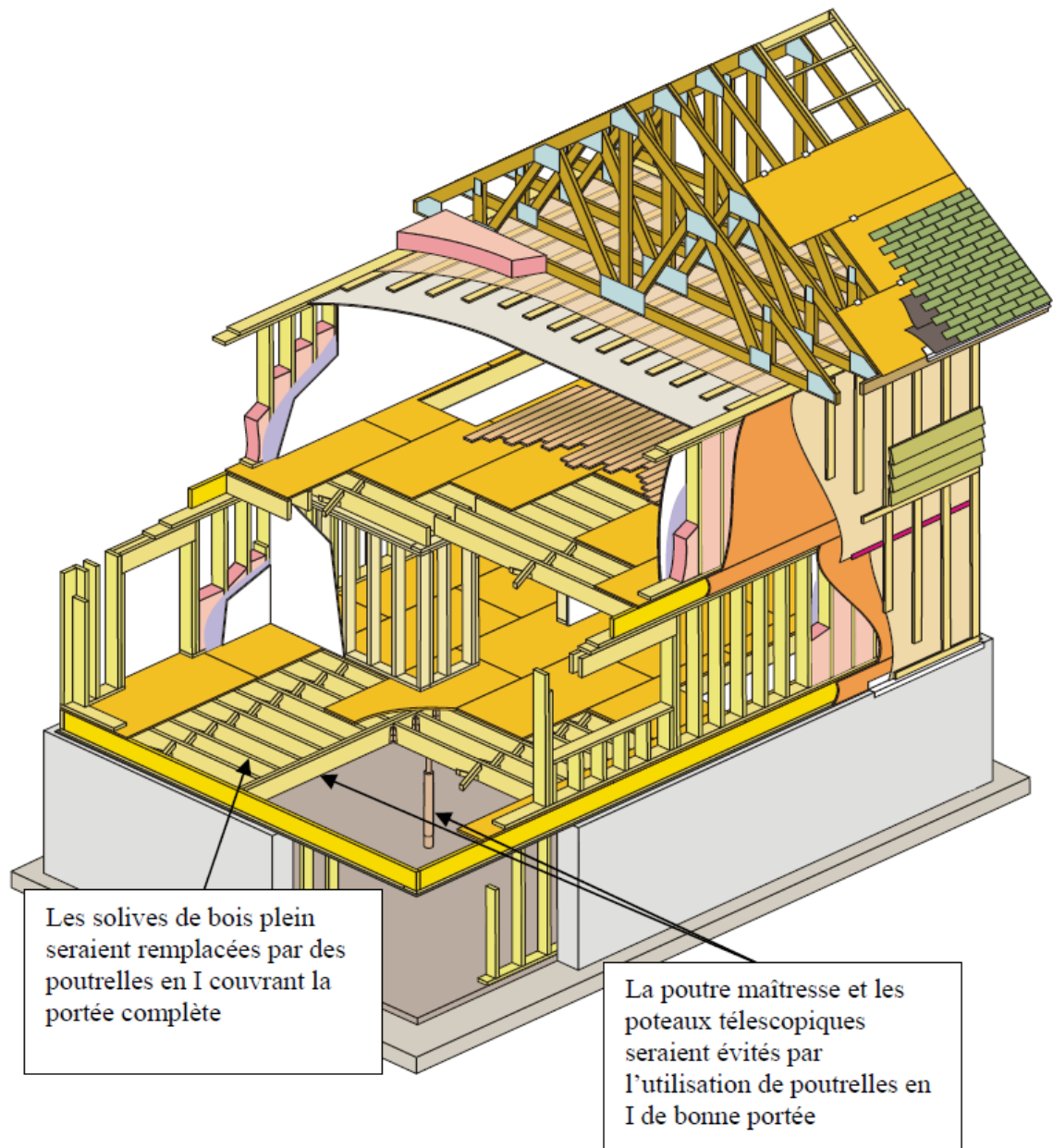


Figure 1.3 : Utilisation possible par remplacement des solives traditionnelles dans un immeuble résidentiel (courtoisie de FPInnovations)

1.3 Fabrication des poutrelles en I

La fabrication des poutrelles est un procédé relativement simple qui est normalement effectué complètement à part de la production de ses composants, tel que l'illustre la figure 1.4.

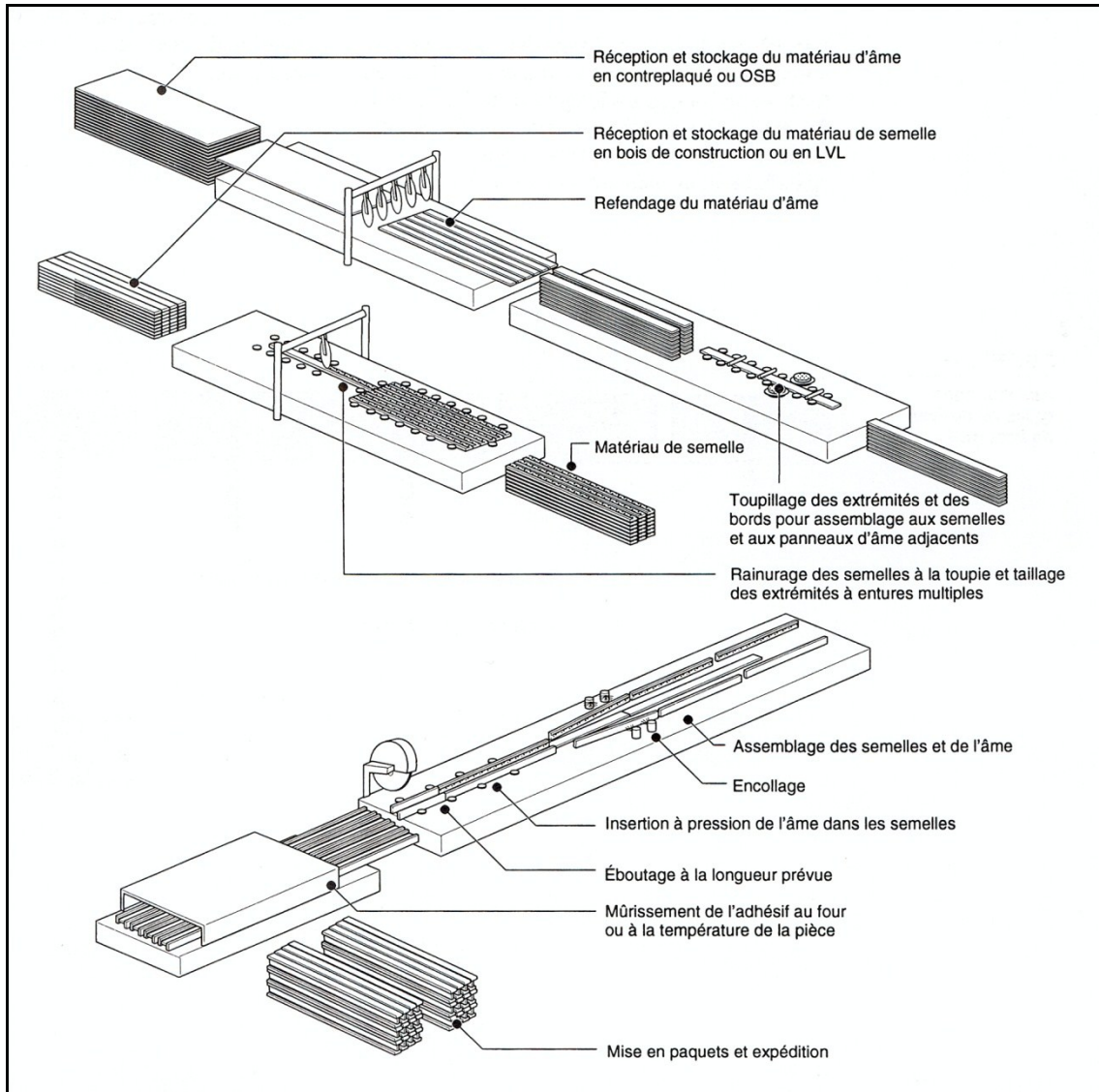


Figure 1.4 : Méthode de fabrication des poutrelles en I (CWC, 1996)

La chaîne de production commence de manière séparée pour les semelles et l'âme. Des panneaux servant à la fabrication de ces dernières empruntent la ligne illustrée dans le haut de la figure 1.4. Les panneaux seront refendus afin de leur donner les dimensions voulues avant que les rives soient usinées afin de permettre leur assemblage. Le matériel servant à produire les semelles emprunte une autre ligne afin de le rendre conforme aux exigences. Le bois de dimension est normalement classé mécaniquement en plus de subir un contrôle de teneur en humidité avant de le transformer de quelque manière que ce soit. Suite à ce classement, le bois est façonné afin de pouvoir assembler l'âme et de pouvoir abouter les semelles. L'assemblage de l'âme et des semelles peut prendre différents aspects même si les différences ne sont parfois pas très grandes. La figure 1.5 illustre différents types d'assemblages communs.

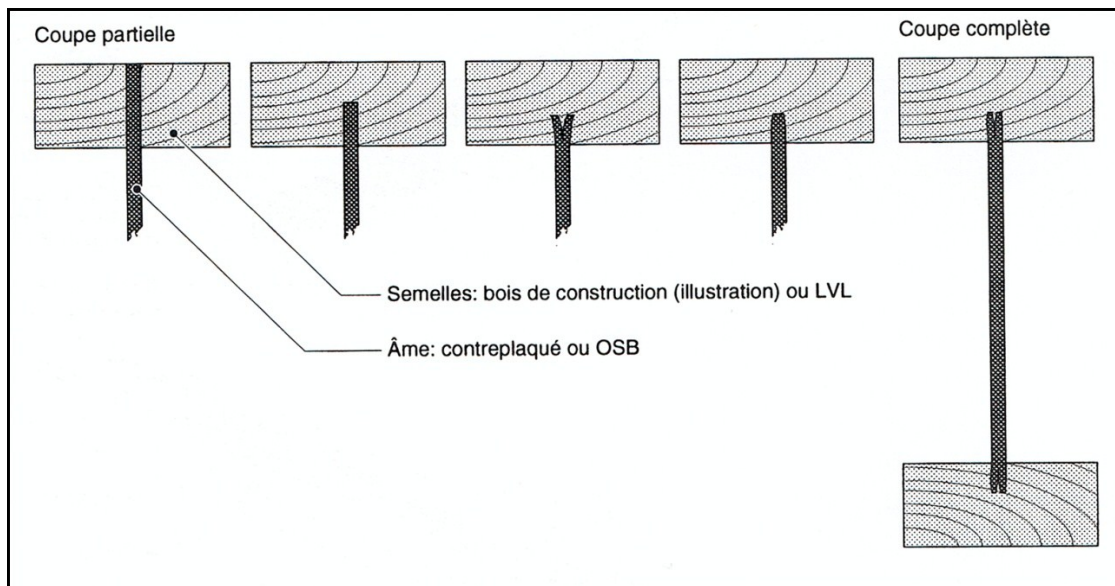


Figure 1.5 : Assemblages typiques de l'âme et des semelles (CWC, 1996)

1.4 Historique

Leichti (1989) a effectué une revue de littérature (Prefabricated wood composite I-Beam : A literature review) dans laquelle il relate l'historique de ce produit. Il rapporte qu'on en aurait fait l'utilisation dès les années 1920. Ces poutrelles en I ont servi dans le domaine

aéronautique. Dans ces années, le bois était une composante structurale importante des avions, ce qui explique l'exploitation de cette structure d'ingénierie.

L'exploitation de ce type de structure a été poursuivie dans les années 1930. Dans le milieu de cette décennie, on a utilisé des poutrelles en I avec une âme en panneau de fibre à haute masse volumique pour la construction d'édifices (Leichti, 1989). Du côté des Etats-Unis, le Forest Product Laboratory (FLP) s'est intéressé aux poutrelles en I dès 1943 en étudiant le flambement de l'âme (Leichti, 1989).

La compagnie Trus Joist Corporation est une des premières sinon la première à s'être lancée dans le marché des poutrelles en I de manière intensive. De ce fait, ils auraient pratiquement inventé et développé ce secteur économique. La lancée officielle de la production chez TJ s'est faite en 1969 (Fisette 2000). Les poutrelles d'alors étaient relativement semblables à ce qui se fait aujourd'hui. Le produit était fabriqué avec du bois solide de bonne qualité pour les semelles, alors que l'âme était faite de contreplaqué. En 1977, la compagnie a changé sa manière de faire les semelles en les remplaçant par du LVL (leur LVL portant le nom de Microlam).

Aux alentours de l'année 1990, l'industrie a presque complètement abandonné l'âme en contreplaqué pour utiliser l'OSB en raison de son coût plus bas et plus stable ainsi que sa meilleure résistance au cisaillement (Fisette 2000).

1.5 Travaux antérieurs, objectifs et méthodologie

Fergus (1979) est l'auteur d'un ouvrage souvent cité concernant les poutrelles en I et leur simulation. Ce dernier a rédigé une thèse portant sur les poutrelles en I. Fergus (1979) pensait que l'élaboration d'un modèle qui pourrait être suffisamment précis permettrait des économies substantielles au niveau de la recherche et du développement. Cela, par une diminution de la quantité de tests à effectuer sur des poutres pleine grandeur et par la réduction des données obtenues de manière expérimentale. C'est pourquoi malgré les moyens limités de l'époque en ce qui concerne les simulations par ordinateur, il avait tout

de même élaboré un modèle simulant la flexion des poutrelles en I sous charge et utilisant la méthode des éléments finis.

Le modèle a été développé sur SAP IV (1976) par Fergus (1979). Les poutres en I ont été considérées comme des poutres composites à parois minces. Il a utilisé plusieurs paramètres pour développer son modèle. Pour les semelles, il a utilisé un élément isoparamétrique de poutre adapté à une analyse en deux dimensions. Une loi de comportement élastique a été utilisée avec les propriétés suivantes :

- Les modules d'élasticité
- Les modules de cisaillement
- Les coefficients de Poisson
- La masse et la masse volumique lorsque désiré

Pour l'âme, il n'a pas autant simplifié son modèle. Il a utilisé des éléments quadrilatéraux dont les propriétés étaient orthotropiques. Les modules élastiques dans toutes les directions principales du panneau devaient être fournis au modèle (toujours en deux dimensions). Deux modèles ont été utilisés pour l'étude soit une poutre longue et peu profonde (7,320 m par 0,254 m, pour un ratio de profondeur/longueur de 1/28 approximativement) sensible aux moments fléchissants et une poutre courte et haute (2,440 m par 0,559 m, pour un ratio de profondeur/longueur de 1/5 approximativement) sensible au cisaillement. Cela donne donc des ratios de longueur par rapport à la profondeur qui diffèrent de ce que l'on peut généralement trouver en pratique courante. Weyerhaeuser (Weyerhaeuser 2009) recommande par exemple une portée maximale d'environ 4.6m pour une poutre ayant une profondeur de 0,254 m (pour un ratio de profondeur/longueur de 1/18 approximativement).

Fergus (1979) a aussi effectué une analyse de sensibilité des prédictions de son modèle. Pour se faire, certaines propriétés ont été changées individuellement à plus ou moins deux fois l'écart-type des propriétés mesurées. Une seule propriété était modifiée à la fois. Pour ce qui est de la modélisation des poutres élancées (critique pour des moments), la seule propriété sensible du modèle était le module d'élasticité en tension des semelles. En ce qui

concerne les poutres profondes et plus courtes (critiques en cisaillement), la situation s'est avérée différente. Une des conclusions de l'auteur est que l'utilisation de panneaux OSB est avantageuse par rapport au contreplaqué en raison du plus grand module de cisaillement dans le plan du panneau. Cela aurait une influence sur la rigidité des poutres mais pas sur leur résistance ultime. Pour ce qui est du modèle, le cisaillement dans le plan du panneau, le module d'élasticité du panneau en direction perpendiculaire à la longueur de la poutrelle ainsi que le module d'élasticité en tension des semelles ont donné des résultats indiquant une sensibilité du modèle à ces caractéristiques. Une validation des modèles utilisés pour chaque type de poutre a par la suite eu lieu. Les différences de mesure de flèche entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle sur la poutrelle critique aux moments fléchissants ont varié entre 0 et 5%. La variation pour les poutrelles critiques au cisaillement a été de 0 à 20%. L'usage de semelles en LVL classées mécaniquement et ayant des propriétés mécaniques présentant peu de variation a contribué à avoir peu de différence entre les deux sources de résultats. Les matériaux utilisés, soit le LVL et les panneaux OSB à partir d'essence ne se retrouvant pas au Québec, sont différents de ce que les industriels québécois utilisent. La comparaison n'est donc pas directement possible. Les portées utilisées dans le cadre de cette étude excèdent par ailleurs ce que les industriels recommandent pour les poutrelles longues, limitant encore une fois une comparaison directe dans l'application des résultats pour ces derniers. Concernant les propriétés mécaniques de l'OSB, Karacabeyli et al. (1996) ont effectué une étude exhaustive qui a permis d'établir puis d'inclure des valeurs pour l'OSB standardisées dans les normes canadiennes. Certains essais utilisés ne sont pas communément utilisés par l'industrie. Ceux-ci sont :

- Norme ASTM D-3500-B pour les essais de tension
- Norme ASTM D-3501 pour les essais de compression
- Norme ASTM D-2718 pour les essais de cisaillement dans l'épaisseur du panneau
- Norme ASTM D-2719-C pour les essais de cisaillement dans le plan du panneau

Ces tests, bien que standardisés, ne sont pas utilisés par les industries qui emploient plutôt une série de tests servant au contrôle de la qualité. L'avantage de ces tests normalisés est

que les résultats obtenus peuvent être utilisés directement dans un modèle par éléments finis puisqu'ils donnent des modules de rupture et d'élasticité dans les directions utilisées dans une définition orthotropique des propriétés du panneau. Les dimensions relativement grandes des échantillons utilisés dans les tests énumérés permettent par ailleurs l'obtention de valeurs moins variables. L'étude a porté sur plusieurs épaisseurs nominales de panneaux, permettant un plus large spectre de comparaison. Pour des panneaux de 9,5mm d'épaisseur, des valeurs de 4860 et 3850 MPa ont été déterminées pour E_1 et E_2 respectivement en suivant la norme ASTM D3500 Test Method B. En utilisant la méthode ASTM D2719 Test Method C, les modules d'élasticité en cisaillement dans le plan du panneau G_{12} et G_{21} ont respectivement été calculés à 1190 et 1210 MPa. En utilisant la norme ASTM D2718, G_{23} et G_{32} ont été calculés à 180 et 200 MPa, respectivement. Il est cependant à noter que Karacabeyli et al. (1996) n'ont pas considéré des panneaux d'OSB destinés à faire des poutrelles en I spécifiquement. Les panneaux OSB spécifiquement fabriqués pour les poutrelles en I répondent à des normes suivant une entente entre le producteur de poutrelle et le fabricant de panneau OSB au lieu de répondre à une norme spécifique.

Les coefficients de Poisson sont sans doute les propriétés les plus méconnues pour l'OSB. W.H. Thomas (2003) a déterminé ces propriétés afin de combler le vide et pour répondre aux besoins de simulation et de calculs d'ingénierie. Les essais en traction ont été effectués sur des panneaux européens en pin écossais d'une épaisseur nominale de 18 mm répondant à la norme CEN 1997 et servant normalement pour les planchers ou les murs. Afin d'effectuer ces mesures, des échantillons relativement grands ont été découpés. Les essais étaient réalisés en tension et les mesures étaient prises à l'aide d'une jauge d'extension analogue ayant un extenseur peu sensible aux variations thermiques (en invar). La distance de référence était de 0,203m pour les mesures dans les deux directions. La distance relativement grande entre les points de référence tend à uniformiser les propriétés de l'OSB qui sont hétérogènes à petite échelle mais peuvent être considérées homogènes à grande échelle. Les valeurs obtenues pour les coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{21} , sont de 0,23 et 0,16 respectivement.

Zhu (2003) a publié une these intitulée « Modelling the structural behaviour of OSB webbed timber I-beams ». Plusieurs articles ont par ailleurs été publiés à partir de cette étude. Zhu (2003) a séparé son travail de la manière suivante :

- Recherche et établissement des propriétés des constituants des poutrelles en I
- Recherche du comportement des poutrelles en I à l'aide d'essais sur ces dernières
- Définition du modèle et validation de ce dernier
- Étude sur l'effet des ouvertures dans l'âme
- Étude du flambement des poutrelles

La recherche des propriétés mécaniques s'est effectuée en deux étapes, soit une première pour l'OSB et une deuxième pour les semelles. L'ensemble des résultats a été obtenu à partir de panneaux commerciaux de la compagnie de poutrelles James Jones & Sons Limited (Angleterre). Les résultats présentés ci-après ne pourraient donc servir directement de référence dans la présente étude en raison de la provenance et des essences de bois différentes mais ils fournissent un bon outil de comparaison.

Afin de déterminer les propriétés orthotropiques de l'OSB, Zhu (2003) a aussi réalisé une série d'essais selon trois directions (parallèle, perpendiculaire et à 45°) a été effectuée. Les essais ont été réalisés en tension et en compression. Les essais en tension étaient effectués sur des échantillons simples tandis que les essais en compression ont été réalisés sur des échantillons collés l'un à l'autre afin d'en augmenter les dimensions et aussi pour éviter une rupture en flambement. Des mesures furent prises sur les éprouvettes avec des LVDT et des jauges de déformation. Pour ce faire les instruments de mesure étaient positionnés afin de mesurer les déformations axiales et transversales. De cette manière, ils ont déterminé les valeurs de résistance et d'élasticité de l'OSB.

Les propriétés qui pouvaient être mesurées et calculées directement à partir des essais de tension étaient déterminées directement. L'équation 1.1 (Zhu 2003), de la mécanique des solides, a cependant été utilisée pour le calcul des propriétés en cisaillement.

$$E_D = \left[\frac{l^4}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) l^2 m^2 + \frac{m^4}{E_2} \right]^{-1} \quad (1.1)$$

Où l et m sont les cosinus des angles entre la direction diagonale et les directions longitudinale et transversale respectivement. E_1 , E_2 , E_D sont les modules d'élasticité dans les directions longitudinale, transversale et diagonale. Finalement, G_{12} est le module de cisaillement et ν_{12} le coefficient de Poisson. En substituant la valeur du cosinus de 45° et en réarrangeant la formule précédente de manière à isoler G_{12} , on obtient l'équation 1.2 :

$$G_{12} = \left(\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1-2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

Les résultats des essais de tension ainsi que des valeurs calculées sont présentés dans les tableaux 1.1 et 1.2.

Tableau 1.1 : Résistance et rigidité de l'OSB (MPa) (entre parenthèses pour les essais de compression) (adapté de Zhu, 2003)

Orientation de l'essai	MOR* (MPa)	Écart type	MOE** (MPa)	Écart type
Longitudinal (1)	11,94 (14,10)	1,84 (0,93)	3770 (3647)	603,8 (263,5)
Transverse (2)	7,55 (12,62)	1,61 (0,92)	2563 (2765)	230,6 (211,0)
45°	9,14 (13,87)	2,69 (1,07)	3168 (3097)	448,8 (286,1)
Épaisseur (3)	(6,22)	(0,16)	(130)	(9,1)

*MOR : Module de rupture

**MOE : Module d'élasticité

Tableau 1.2 : Coefficients de Poisson (entre parenthèses pour les essais de compression) (adapté de Zhu, 2003)

Orientation de l'essai	ν_{12}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{31}	ν_{23}	ν_{32}
Longitudinal (1)	0,184 (0,183)		(0,364)			
Écart type	0,079 (0,064)		(0,220)			
Transverse (2)		0,127 (0,161)			(0,312)	
Écart type		0,039 (0,082)			(0,111)	
Épaisseur (3)				(0,013)		(0,019)
Écart type				(0,010)		(0,018)

En utilisant l'équation 1.2, le module de cisaillement (G_{12}) obtenu est de 1370 MPa. Le coefficient de Poisson ν_{21} peut aussi être calculé à partir de la formule 1.3 :

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} \quad (1.3)$$

En utilisant l'équation 1.3 ainsi que des valeurs de 3770 MPa, 2563 MPa et 0,18 pour E_1 , E_2 et ν_{12} respectivement, on obtient une valeur de 0.12 pour ν_{21} . Cette valeur concorde avec les valeurs expérimentalement déterminés par Zhu (2003). Les coefficients de Poisson sont aussi comparables avec ceux déterminés par Thomas (2003). En plus d'avoir déterminé ces éléments, Zhu (2003) a vérifié si les caractéristiques trouvées avaient une relation avec la masse volumique des panneaux. Les figures 1.6 et 1.7 illustrent les résultats obtenus.

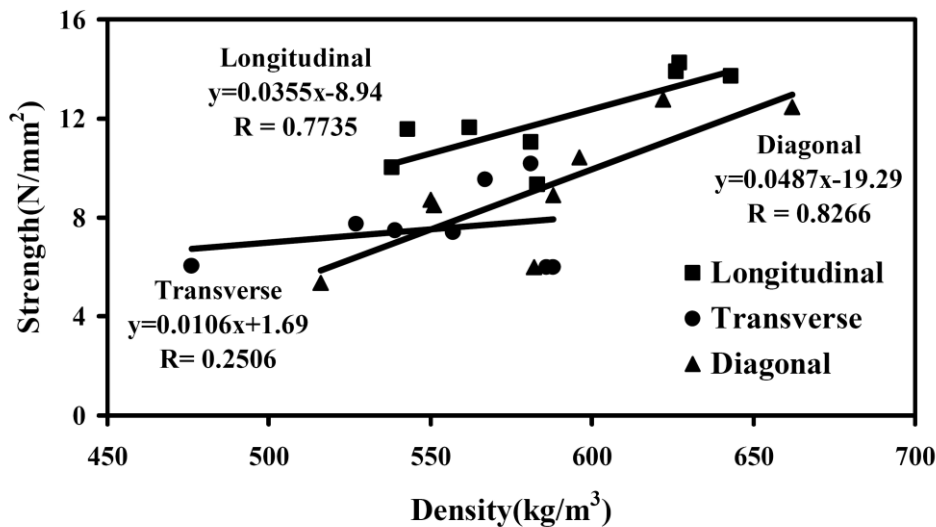


Figure 1.6 : Relation entre la résistance en tension et la masse volumique de l'OSB (tiré de Zhu, 2003)

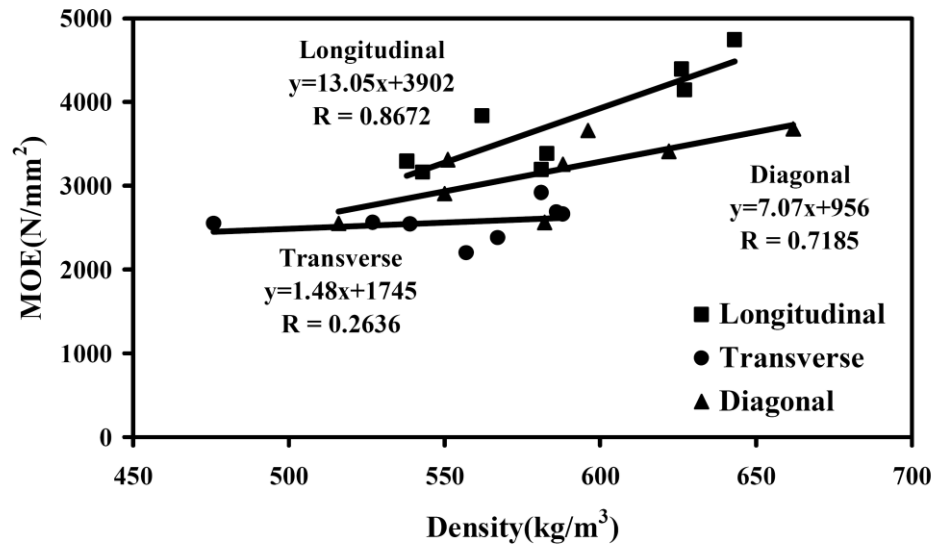


Figure 1.7 : Relation entre la masse volumique et la rigidité de l'OSB en tension (tiré de Zhu, 2003)

On constate des relations intéressantes, illustrée par les différentes régressions linéaires, entre la masse volumique et les résistances ou rigidités. La masse volumique était prise en découpant la partie testée des échantillons et en la mesurant à l'aide d'un pied à coulisse et d'une balance.

Le modèle développé par Zhu (2003) en utilisant le logiciel commercial Abaqus CAE 6.4.1 a été soumis à une validation sur une poutrelle de 5 m de longueur par 0,4 m de profondeur (soit un ratio de profondeur sur longueur d'environ 1/12). Les résultats simulés et réels se sont avérés relativement près l'un de l'autre, le modèle sous estimant la flèche d'environ 9% à la fin de la zone élastique. Tout comme dans le cas du modèle de Fergus (1979), une seule série de propriétés mécaniques par matériau a été utilisée.

Chui et al. (2005) ont réalisé une étude qui avait comme objectif d'améliorer la capacité des poutrelles en I faites de bois lors du chargement. L'étude a été séparée suivant deux axes :

- l'étude et l'optimisation du profil âme-semelles visant la réduction des bris occasionnés par le passage de l'âme à travers la semelle.
- l'étude et l'optimisation de la disposition des trous dans l'âme

Une étude expérimentale a été conduite, puis les résultats ont été comparés à ceux obtenus à partir de simulations par éléments finis effectuées à l'aide du logiciel SAP 2000. Afin d'effectuer ces recherches, une étude des propriétés des matériaux utilisés a été réalisée. Les propriétés de l'OSB et du bois ont été déterminées. Les propriétés du bois ont été évaluées principalement en suivant la norme ASTM D143 (tension perpendiculaire au grain, compression perpendiculaire au grain, rigidité et résistance en flexion et résistance en cisaillement). Il était important pour ces auteurs d'effectuer ces tests sur le bois afin d'avoir des données exactes sur le bois utilisé pour l'étude spécifique du joint âme-semelles en écrasement.

Les propriétés de l'OSB ont été examinées en utilisant d'autres tests. Les tests utilisés visaient à déterminer :

- Le MOE en flexion sur la rive (analyse des modes vibratoires et ASTM D3043)
- Les MOE en tension dans le plan suivant les deux directions principales (ASTM D3500)
- La rigidité et la résistance en cisaillement dans le plan suivant ses deux directions principales (analyse des modes vibratoires et ASTM D3044)
- Le MOR en compression dans le plan suivant l'axe fort
- L'énergie de fissuration dans le plan suivant ses deux directions principales

Afin de déterminer à la fois le module d'élasticité en flexion sur la rive et l'élasticité en cisaillement dans le plan, une technique par vibration a été utilisée. La méthode consiste à suspendre un panneau (1200 x 75 mm) à l'aide de deux ressorts puis de donner un impact à l'aide d'un marteau instrumenté. Les fréquences lues par un accéléromètre sont enregistrées par un analyseur de spectre. De la première et de la deuxième fréquences naturelles sont calculés la rigidité en flexion sur le chant et le module de cisaillement. Les résultats sont présentés au tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais par vibration (adapté de Chui et al. 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

Orientation de l'OSB	MOE (MPa)	Module de cisaillement (MPa)
Parallèle (1) G_{12}	5787 (372)	1402 (424)
Perpendiculaire (2) G_{21}	3101 (113)	1074 (527)

Chui et al. (2005) ont ensuite mesuré les modules et la résistance en flexion sur la rive en suivant la norme ASTM D3043-2003b. Les échantillons avaient les mêmes dimensions que pour le test par vibration. Les résultats pour les modules en direction parallèle et perpendiculaire dans le plan du panneau sont similaires tels qu'on peut le voir au tableau 1.4 :

Tableau 1.4 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en flexion sur la rive (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

Orientation de l'OSB	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Parallèle	5281 (223)	29.61 (4.51)
Perpendiculaire	3020 (337)	14.87 (1.18)

Des essais ont aussi été faits en tension afin de déterminer les modules et la résistance dans le plan. Ces essais ont suivi la norme ASTM D3500-2003c avec des échantillons ayant des dimensions de 0,500 x 0,050 m et la mesure du déplacement était effectuée à l'aide d'un LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Les résultats ne montrent pas beaucoup de différence par rapport à ce qui a été mesuré à l'aide d'autres techniques et sont présentés au tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en tension (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

Orientation de l'OSB	MOE en tension (MPa)	MOR en tension (MPa)
Parallèle	5201 (686)	15,87 (2.68)
Perpendiculaire	3459 (306)	4,47 (0.59)

Des essais en compression ont aussi été effectués pour en connaître la rigidité et la résistance. Les essais ont été effectués sur des échantillons formés par collage de 3 épaisseurs de panneaux afin d'éviter le flambement et cela donnait des dimensions de 177 x 46 x 29mm. Les déformations étaient mesurées à l'aide de deux LVDT. Les résultats sont présentés au tableau 1.6.

Tableau 1.6 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en compression (adapté de Chui et al, 2005)

Orientation de l'OSB	MOE en compression (MPa)	MOR en compression (MPa)
Parallèle	5243	18,02
Perpendiculaire	3895	11,60

Cela est suivi des essais de résistance en cisaillement suivant la norme ASTM D3044 (2003d) dont les résultats sont présentés au tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Propriétés de l'OSB calculées à partir des essais en cisaillement (adapté de Chui et al, 2005). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

Orientation de l'OSB	MOR en cisaillement (MPa)
Parallèle	9,70 (0,40)
Perpendiculaire	6,67 (0,55)

Chui et al (2007) ont étudié l'influence de l'âme en OSB des poutrelles en I sur les performances du produit final. Une comparaison a été effectuée entre des essais de laboratoire, une méthode analytique proposée par Ozelton et Baird (1976) ainsi qu'avec les résultats d'une simulation effectuée par ordinateur suivant la méthode des éléments finis et bâti dans SAP 2000. Les essais, calculs et simulations étaient basés sur des poutrelles de 0,241 et 0,356 m avec des ratios de profondeur sur longueur de 1/18. Pour les deux profondeurs étudiées, la méthode analytique s'est avérée moins précise mais les deux méthodes d'estimation étaient conservatrices. Une sous-estimation de la flèche a été constatée pour une différence d'environ 22 et 14% pour la méthode analytique et le modèle par éléments finis respectivement. Tout comme les premiers auteurs (Fergus 1979, Zhu 2003, Chui et al. 2005), une seule série de propriété mécanique a été utilisée pour chaque matériau lors de la simulation.

Chui et al. (2007) ont aussi effectué une étude de sensibilité de leur modèle. Les deux mêmes formats de poutrelles (0,241 m et 0,356 m de profondeur avec un ratio de profondeur sur longueur de 1/18) ont été utilisés à cette fin. Chaque propriété a vu sa valeur changée entre 10 et 20 fois sa valeur originale, les autres propriétés restant à leur valeur de base. Par exemple, les propriétés en flexion de l'âme sont passées de 1000 à 10000 MPa et son module de cisaillement de 100 à 2000 MPa. Les auteurs concluaient que le MOE en flexion de l'âme n'avait pas vraiment d'impact sur les poutrelles peu profondes alors que cela avait un faible impact sur les poutrelles plus profondes. La flèche pour les poutres ayant une profondeur de 0,241m a changé de moins de 1 mm (passant d'environ 8 à 7mm) en faisant varier le MOE en flexion de l'âme. Pour les poutres de 0,356 m, la variation a été un peu plus importante dépassant le millimètre en passant d'environ 15 à 14mm. Le module de cisaillement (G_{12}) a quant à lui eu une plus grande influence, particulièrement dans la plage de valeurs passant de 100 à 500 MPa. Dans cette étendue, la flèche est passée de 15 à 8mm pour les poutrelles de 0,241 m et de 27 à 16mm pour les poutrelles de 0,356 m. Pour la plage de valeur passant de 500 à 2000 MPa, la flèche est passée de 7 à 8mm pour les poutrelles de 0,241m et de 14 à 16mm pour les poutrelles de 0,356 m. Il a été jugé qu'au

dessus de 500 MPa, le module de cisaillement n'avait pas d'influence significative sur les résultats du modèle.

Dans le cas de l'industrie, le travail pour l'établissement des valeurs de design, les calculs et les procédures sont définis par la norme ASTM D5055-2002. Cette méthode permet le calcul de la valeur de design théorique des poutrelles en I de manière analytique et empirique. Cependant, l'utilisation de cette méthode dans un but de recherche peut être limitée. Cette méthode empirique est certes fiable, mais coûteuse en temps et en argent. Les fabricants y sont cependant confrontés inévitablement puisque l'impact des trous et ouvertures dans l'âme doit être déterminé ainsi. Les poutrelles n'étant pas un produit standardisé, chaque entreprise doit fournir ses propres spécifications sur l'emplacement et l'aire des ouvertures possibles.

Un des éléments que nous n'avons pas trouvé dans la littérature et qui est important pour ce projet est l'impact de la variabilité naturelle du panneau OSB sur la performance des poutrelles. L'OSB est un matériau qui, tel qu'il a déjà été mentionné, présente un comportement homogène à grande échelle et hétérogène à petite échelle. Ce comportement vient du fait que l'OSB présente de grandes variations locales de masse volumique. Cet aspect n'a pas été traité dans la littérature consultée.

1.6 Objectifs et originalité de l'étude

L'objectif général du projet est donc de développer un modèle permettant de simuler le comportement des poutrelles en I à base de bois afin d'avoir une meilleure compréhension de l'impact des propriétés de l'âme et de leur variabilité sur le comportement structural des poutrelles.

Trois objectifs spécifiques distincts ont été poursuivis.

- Le premier objectif était de déterminer quelles étaient les propriétés mécaniques de l'âme des poutrelles en I qui avaient une influence sur le comportement de l'âme et sur le comportement de la poutrelle en général.

- Le deuxième objectif était de déterminer les propriétés mécaniques des poutrelles en I ayant une grande influence sur leur comportement, ainsi que de parvenir à établir un lien permettant d'intégrer la variabilité locale du matériau OSB dans un modèle.
- Le dernier objectif était de simuler le comportement en flexion des poutrelles en I à base de bois, de comparer les résultats à des essais de laboratoire et d'intégrer les notions de variabilité des propriétés mécaniques locales afin d'en évaluer l'impact.

L'emphase mis sur l'étude de l'âme en OSB vient différencier cette étude des travaux antérieurs. La considération de la variabilité locale des propriétés mécaniques et l'étude de son impact sur le comportement en flexion des poutrelles en I est un aspect original des travaux.

1.7 Rétrospective méthodologique

1.7.1 Modélisation et calcul

La simulation par éléments finis a été utilisée dans le cadre du projet. Plusieurs hypothèses ont été posées en ce qui concerne les propriétés du bois et celles-ci ont des répercussions sur la manière dont les simulations sont effectuées. Le bois des semelles et l'âme en OSB, sont considérés comme étant des matériaux orthotropes. Pour le bois, les directions qui forment le système orthotropique sont les directions longitudinale (L ou 1), radiale (R ou 2) et tangentielle (T ou 3) (Bodig et Jane, 1993). Le panneau, pour sa part, est aussi considéré comme étant orthotrope dans ses propriétés (Fergus 1979, Zhu 2003). Les directions utilisées dans ce cas sont la longueur (1, parallèle à l'orientation préférentielle des lamelles externes), la largeur (2, dans le plan mais perpendiculaire à l'orientation préférentielle des lamelles externes) et l'épaisseur (3, à travers l'épaisseur). Les indices numérotés sont généralement utilisés dans le reste de l'étude pour faire référence à ces directions au lieu des indices alphabétiques qui peuvent davantage porter à confusion.

Le modèle considère des matériaux parfaitement élastiques. Le raisonnement suivant est basé sur Blanchet (2004) qui effectuait des travaux de modélisation par éléments finis sur le

bois. L'équation de base qui définit (sous deux formes différentes aux équations 1.4 et 1.5) une loi de comportement élastique, selon Bodig et Jane (1993) :

$$\gamma_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1.4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \gamma_{kl} \quad (1.5)$$

où

γ : tenseur des déformations

S : tenseur de souplesse

σ : tenseur des contraintes

C : tenseur de rigidité

Comme les matériaux traités dans ce travail sont considérés comme étant orthotropes, c'est une matrice de souplesse ou de rigidité à 36 constantes qui les définissent. Cependant, en appliquant l'hypothèse d'homogénéité à l'échelle macroscopique (théorème de Maxwell) qui donne $S_{ij}=S_{ji}$, on passe à 21 coefficients. En plus, en considérant les axes de symétrie du système orthotropique, on passe à 9 coefficients (Bodig et Jane 1993, Laforest et Goulet 2001). L'équation 1.4 s'écrit alors comme présenté à l'équation 1.6 :

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Dans le contexte de l'étude, les propriétés d'ingénierie sont utilisées. Cela veut dire que les modules d'élasticité dans les trois directions principales (E_1, E_2, E_3) et celles des modules

de cisaillement (G_{12}, G_{13}, G_{23}) sont les propriétés recherchées et utilisées dans le modèle. Les équations suivantes définissent ces valeurs aux équations 1.7 et 1.8.

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\gamma_1} = \frac{1}{S_{11}}, E_2 = \frac{\sigma_2}{\gamma_2} = \frac{1}{S_{22}}, E_3 = \frac{\sigma_3}{\gamma_3} = \frac{1}{S_{33}} \quad (1.7)$$

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{1}{S_{66}}, G_{13} = \frac{\sigma_{13}}{\gamma_{13}} = \frac{1}{S_{55}}, G_{23} = \frac{\sigma_{23}}{\gamma_{23}} = \frac{1}{S_{44}} \quad (1.8)$$

Ces valeurs ne sont pas les seules utilisées. Les coefficients de Poisson sont aussi à mesurer et à introduire dans le modèle. La formule 1.9 définit le coefficient de Poisson.

$$\nu_{ij} = -\frac{\gamma_j}{\gamma_i} \quad (1.9)$$

L'application d'une contrainte résulte en des déformations dans toutes les directions, tel que définit à l'équation 1.10.

$$\text{Direction 1 } \gamma_1 = S_{11}\sigma_1, \gamma_2 = S_{21}\sigma_1, \gamma_3 = S_{31}\sigma_1$$

$$\text{Direction 2 } \gamma_1 = S_{12}\sigma_2, \gamma_2 = S_{22}\sigma_2, \gamma_3 = S_{32}\sigma_2 \quad (1.10)$$

$$\text{Direction 3 } \gamma_1 = S_{13}\sigma_3, \gamma_2 = S_{23}\sigma_3, \gamma_3 = S_{33}\sigma_3$$

En substituant l'équation 1.9 dans l'équation 1.10, on obtient les équations 1.11 :

$$\text{Direction 1 } \nu_{12} = -\frac{S_{21}}{S_{11}}, \nu_{13} = -\frac{S_{31}}{S_{11}}$$

$$\text{Direction 2 } \nu_{21} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}, \nu_{23} = -\frac{S_{32}}{S_{22}} \quad (1.11)$$

$$\text{Direction 3 } v_{31} = -\frac{S_{13}}{S_{33}}, v_{32} = -\frac{S_{23}}{S_{33}}$$

En utilisant les formules 1.7 et 1.8 avec les équations de 1.11, on obtient :

$$S_{12} = \frac{-v_{21}}{E_2}, S_{13} = \frac{-v_{31}}{E_3}, S_{23} = \frac{-v_{32}}{E_3}, S_{21} = \frac{-v_{12}}{E_1}, S_{31} = \frac{-v_{13}}{E_1}, S_{32} = \frac{-v_{23}}{E_2} \quad (1.12)$$

Cela permet finalement d'en arriver à l'équation 1.13 qui permet d'utiliser les constantes d'ingénierie (E_i , G_{ij} et v_{ij}). Cette équation est à la base des simulations faites dans ce projet.

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-v_{21}}{E_2} & \frac{-v_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-v_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{13}}{E_1} & \frac{-v_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Les équations d'équilibre gouvernant le modèle sont exprimées par les équations 1.14.

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = F_1$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} = F_2 \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_3}{\partial x_3} = F_3$$

Dans le cas présent, les forces F_1 , F_2 et F_3 sont nulles. Finalement, les déformations γ sont liées aux déplacements u par l'équation 1.15.

$$\gamma = \frac{1}{2} (u\vec{\nabla} + \vec{\nabla}u) \quad (1.15)$$

Le modèle a été bâti à l'aide du logiciel Abaqus CAE 6.4.1. Ce logiciel a été utilisé avec succès pour modéliser des composites de bois laminés (Blanchet et al 2005) et des poutrelles en I en bois (Zhu 2003, 2005, 2007; Guan 2004). La figure 1.8 illustre le maillage utilisé pour l'étude de sensibilité du modèle ainsi que le système de coordonnées utilisé et le bloc de la réaction d'appui. Afin que le modèle reflète la réalité du dispositif expérimental, un bloc d'acier isotropique ($E = 210$ GPa) a été ajouté pour simuler la hauteur par rapport au point de pivot. La masse propre des poutrelles n'a pas été prise en compte pour les simulations.

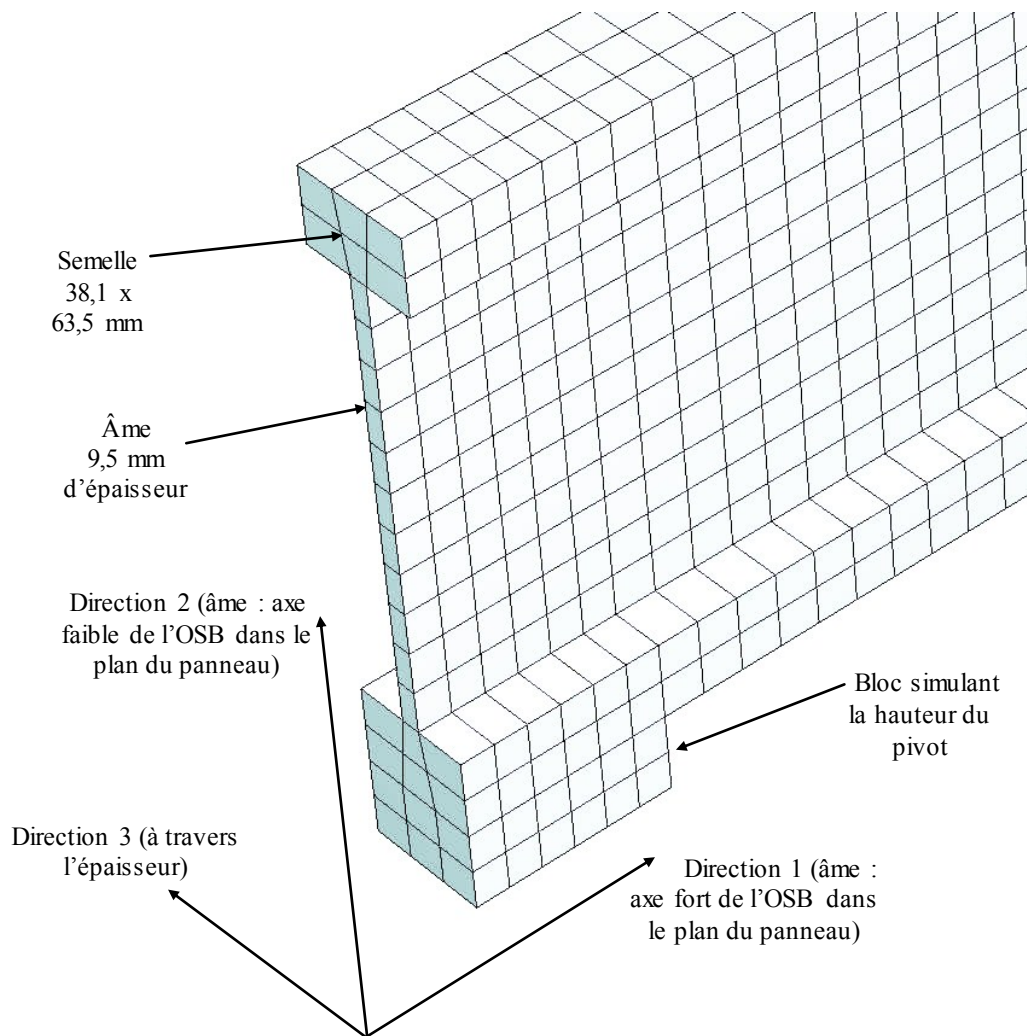


Figure 1.8. Système de coordonnées utilisé pour les simulations et détails du modèle simulé

Les figures 1.9 et 1.10 montrent les conditions limites utilisées pour les modèles développés pour les poutrelles longues et courtes, respectivement sensibles aux moments et au cisaillement. Une contrainte de symétrie a été employée afin de ne simuler que la moitié des poutrelles. La contrainte de symétrie impose une restriction des mouvements de translation en direction 1 ainsi qu'une restriction sur les rotations autour des axes 2 et 3. La réaction d'appui est soumise à des conditions limites au centre du bloc où les déplacements verticaux (direction 2) et latéraux (direction 3) sont nuls. Un exemple de fichier de commande « .inp » Abaqus est présenté en annexe 2.

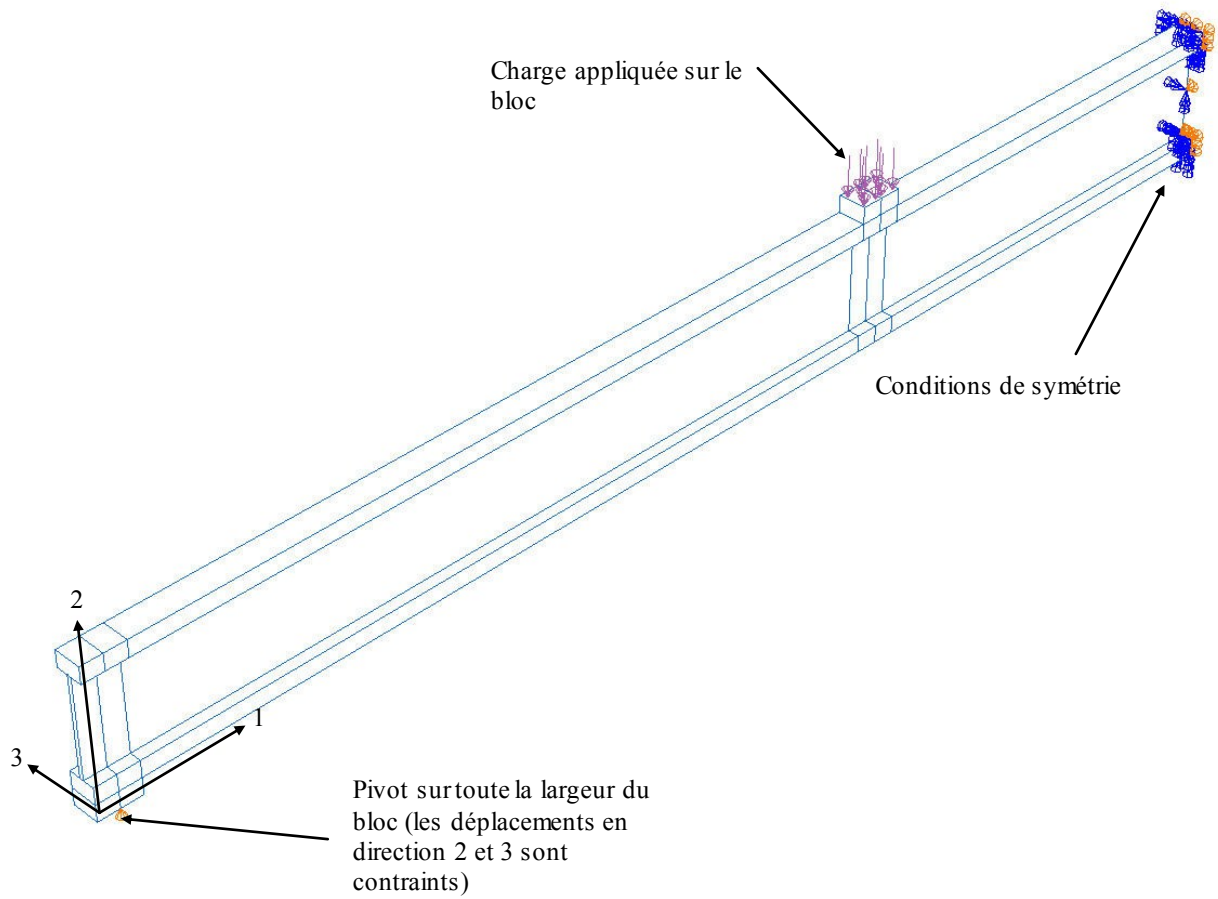


Figure 1.9 Poutrelle longue sensible au moment fléchissant et conditions limites tel qu'utilisé pour l'étude de sensibilité

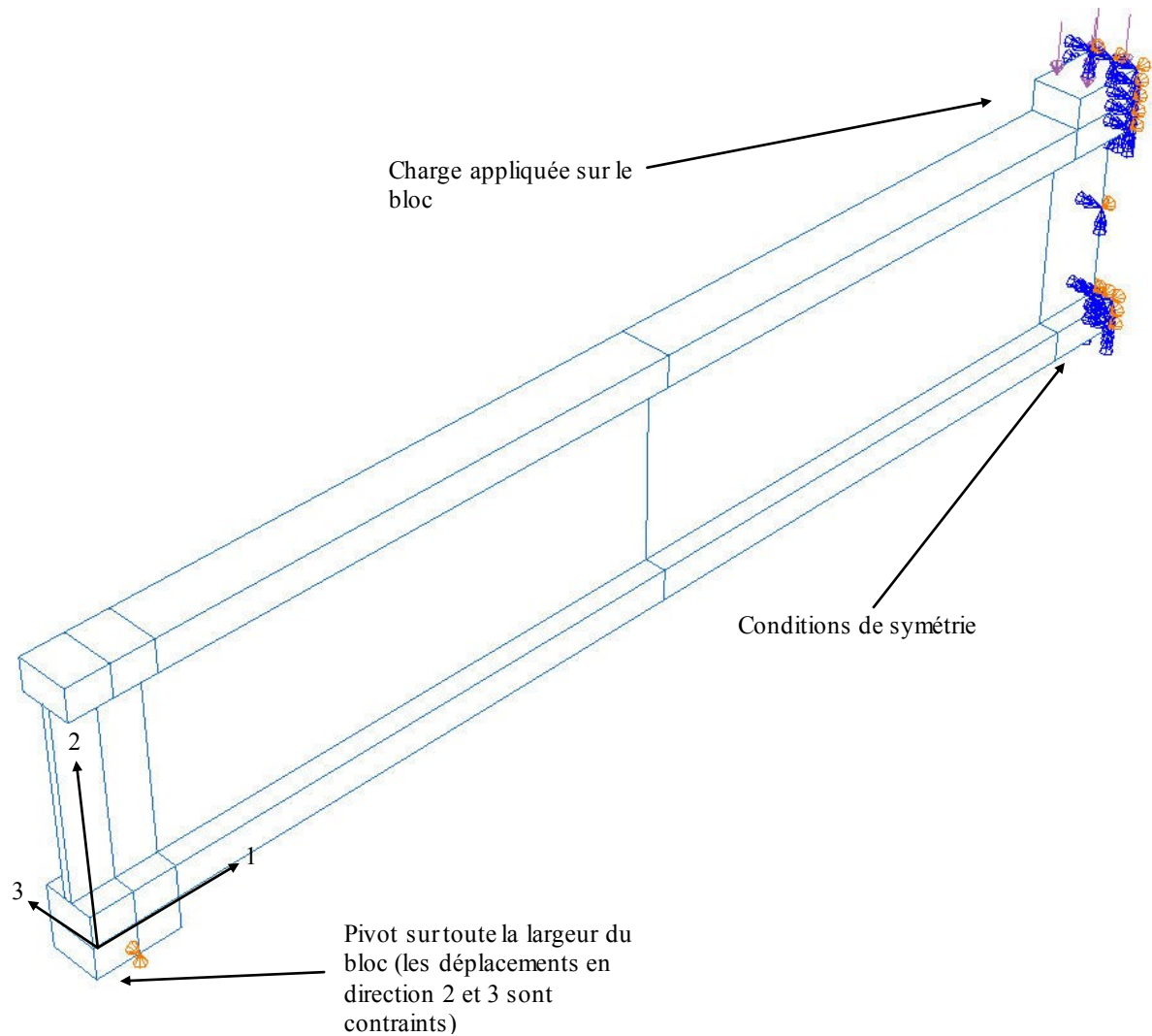


Figure 1.10 Poutrelle courte sensible au cisaillement et conditions limites

1.7.2 Chronologie de l'étude

La présente étude ne s'est pas déroulée comme un tout mais est plutôt la somme de deux phases distinctes. Une maîtrise a d'abord été effectuée sur le sujet mais, en constatant que le projet aurait avantage à être bonifié, un passage direct au doctorat a été effectué pour en faire un projet plus complet.

Le projet de maîtrise ne tenait pas compte de certaines particularités abordées au doctorat. Ainsi, certains détails n'ont pas été pris en compte lors de la réalisation d'essais. Bien que n'influençant pas les conclusions de ce travail, les essais expérimentaux sur les poutrelles en I auraient, par exemple, été effectués en s'assurant de connaître la dispersion de la densité des panneaux utilisés afin de pouvoir faire une plus large gamme de comparaisons.

Chapitre 2 : WOOD I-JOIST MODEL SENSITIVITY TO OSB WEB MECHANICAL PROPERTIES

2.1 Abstract / résumé

Research on wood I-joist design has often used laboratory testing. Simulation using the finite element method (FEM) offers advantages over experimental testing, including the possibility to separately study different joist components. The objective of this project was to perform a sensitivity analysis using FEM to determine which OSB properties have higher impact on I-joist shear strain and deflection. OSB mechanical properties were changed from 50% to 200% of their reference value to determine their impact on web shear strain and I-joist deflection. The model was primarily sensitive to in-plane web shear stiffness, which changed I-joist deflection by up to 23%. The model was also sensitive to the web tensile modulus of elasticity parallel and perpendicular to joist length. These properties changed I-joist deflection up to 2% and 1%, respectively. These findings will be used to plan future work to experimentally determine sensitive OSB web properties required to develop a finite element model of the mechanical behavior of wood I-joists.

SENSIBILITÉ D'UN MODÈLE DE POUTRELLES EN I EN BOIS AUX PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ÂME EN OSB

2.2 Résumé :

La recherche et le développement des poutrelles en I a souvent eu recours aux essais expérimentaux. Les simulations utilisant la méthode des éléments finis (MEF) offrent des avantages par rapport aux essais empiriques, incluant la possibilité d'étudier de manière isolée des parties ou paramètres des composantes de la poutrelle. L'objectif de ce projet était de procéder à une étude de sensibilité d'un modèle basé sur la MEF pour déterminer les propriétés mécaniques de l'OSB (panneau de lamelles orientées – Oriented Strand Board) utilisé pour l'âme qui ont le plus d'impact sur la déflexion de la poutrelle et la déformation en cisaillement dans l'âme. Les propriétés mécaniques de l'âme ont été changées tour à tour, passant de 50% à 200% d'une valeur de référence pour déterminer leur impact sur la déflexion de la poutrelle et sur le déplacement relatif en cisaillement dans l'âme. Le modèle s'est révélé être avant tout sensible au module de cisaillement dans le plan du panneau en modifiant la déflexion de la poutrelle jusqu'à 23%. Le modèle s'est aussi montré sensible au module d'élasticité en tension de l'âme en OSB en direction parallèle et perpendiculaire à la longueur des poutrelles. La déflexion de la poutrelle a respectivement été modifiée de 2% et 1% pour ces propriétés. Ces observations seront ultérieurement utilisées pour déterminer expérimentalement les propriétés mécaniques de l'OSB s'étant révélées sensibles dans le modèle pour rendre ce dernier plus représentatif de la réalité.

2.3 Introduction

Wood I-joists are widely used in construction and sold in a competitive market. Therefore, there is a compelling need to optimize I-joist design and manufacturing processes. Most of the research and development has focused on design and service performance (e.g., web openings, stiffeners, and creep) using empirical approaches. The use of solid wood flanges has a strong impact on I-joist behavior. However, the optimization of web properties is challenging because it is difficult to isolate the web's contribution to I-joist performance for proper evaluation.

Fergus (1979) was the first to use the finite element method (FEM) to investigate wood I-joist behavior. This author studied many aspects of wood I-joist design, including web material properties and web openings. He considered I-joists made with laminated veneer lumber (LVL) flanges and oriented strandboard (OSB) webs, developed an FEM model of I-joist deflection, and performed a sensitivity analysis. In the sensitivity analysis, the I-joist properties considered were flange longitudinal modulus of elasticity (MOE) in tension, flange Poisson's ratio, web MOE in tension in the I-joist longitudinal direction, web transverse MOE in tension, in-plane web shear modulus, and web Poisson's ratio.

Properties were changed one at a time to ± 2 standard deviations from the nominal value while all other properties remained at their original values. The sensitivity analysis was performed on FEM models developed for two wood I-joist configurations: a shear critical I-joist and a moment critical I-joist. The moment critical I-joist was 0.254 m deep by 7.32 m long and the shear critical I-joist was 0.559 m deep by 2.44 m long. Web thickness was 9.5 mm for the OSB web stock. Fergus (1979) found that results on the moment critical I-joist were sensitive only to flange material MOE in tension along the longitudinal axis of the wood flange. Results on the shear critical I-joist were sensitive to flange MOE in tension, shear modulus in the web plane, and web transverse MOE.

In a more recent study, Chui et al (2007) experimentally determined the influence of certain web material properties on I-joist behavior. They focused on the correlation between OSB

web properties and I-joist performance in a shear test. Shear tests were performed on two different joist configurations with depths of 0.241 m and 0.356 m, respectively. Both used 38 mm x 63 mm lumber flanges. I-joists were 1.130 m and 1.473 m in length for 0.241 m and 0.356 m deep I-joists, respectively. The authors found that I-joist shear capacity is mainly determined by OSB web shear strength. Coefficients of determination of 0.19 and 0.21 were found between joist shear capacity and web shear strength for 0.241 m and 0.356 m deep I-joists, respectively. They also found that results were not sensitive to OSB web bending MOE. They noted that the use of stiff, high quality wood flanges might have had an impact on their findings.

A sensitivity analysis of wood I-joist component properties was also performed by Chui et al (2007). The analysis was based on the two experimental setups described above. Modeling was used to determine the influence of OSB web bending MOE and shear modulus on I-joist deflection. Properties were varied from 10 to 20 times, with web bending MOE ranging from 1000 MPa to 10000 MPa and web shear stiffness from 100 MPa to 2000 MPa. Numerical results showed that web bending MOE had almost no impact on deflection of the shallower joist, and only a small impact on the deeper joist. The mid-span bending deflection variation was less than one mm over the OSB bending MOE range for the 0.241 m deep I-joist (approximately 7 to 8 mm). The deflection variation was slightly higher than one millimeter over the OSB bending MOE range for the 0.356 m deep I-joist (approximately 14 to 15 mm). When lower than 500 MPa, OSB web shear modulus had a significant impact on shear deflection. In the 100 – 500 MPa range, deflection varied from 16 to 27 mm for the 0.356 m deep I-joist and from 8 to 15 mm for the 0.241 m deep I-joist. When OSB web shear modulus was in the 500 – 2000 MPa range, deflection varied from 14 to 16 mm for the 0.356 m deep I-joist and from 7 to 8 mm for the 0.241 m deep I-joist. Over 500 MPa, the influence of shear modulus was not significant. The model results were primarily sensitive to OSB web shear modulus.

It would be relevant to investigate properties other than web bending MOE and shear stiffness when considering OSB as an orthotropic material characterized by a set of

engineering properties. Among others, Zhu (2003, 2005, 2007) and Guan (2004) worked on I-joist modeling, but they did not perform a sensitivity analysis. Zhu (2003) experimentally determined most of the OSB mechanical properties except for shear stiffness in the board plane (G_{12}). Zhu (2003) and Morris (1996) determined G_{12} based on Eq. (1) using three measured MOE values as follows:

$$G_{12} = \left(\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1 - \nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

where G_{12} is shear stiffness in the board plane, E_1 is MOE in tension along the strong axis in the board plane, E_2 is MOE in tension along the weak axis in the board plane, E_{45° is MOE at 45° between E_1 and E_2 in the board plane, and ν_{12} is Poisson's ratio in the board plane (see figure 2.1 for directions). The joints between the I-joist flanges and the web are usually considered rigid (Fergus 1979, Chui et al 2007, Zhu 2003), except when the joint itself is the element studied (Chui et al 2005). The last authors analyzed joints for bearing capacity in order to reduce knife-through failure.

Most studies on wood I-joist modeling have demonstrated the strong impact of the mechanical properties of wood flanges on deflection. However, questions remain about the impact of web OSB mechanical properties on deflection. Sensitivity analyses of the impact of web properties were not based on the same property set, and none considered a set of engineering properties that adequately described OSB as an orthotropic material. Fergus (1979) evaluated most, but not all, of these properties. Moreover, the moment critical I-joist considered was longer than the currently allowable span for the depth used, and the shear critical I-joist was too deep for the span used. Furthermore, local variations in web mechanical properties due to OSB density variation in the plane and the rigidity of web-to-flange joints were not considered. Therefore, the objective of this research was to identify which of the web mechanical properties should be determined experimentally due to their impact on I-joist deflection and shear strain. To achieve this, a model sensitivity analysis was performed, focusing on the impact of OSB web mechanical properties. The current

study is the first step in a larger project aimed at developing a model to simulate the deflection of a loaded wood I-joist in the elastic domain while considering the impact of web local properties and their variation.

2.4 MATERIAL AND METHODS

2.4.1 I-Joist Web to Flange Joint

A series of tests was performed to determine whether the web could slip in the flange joint when loaded. Figure 2.1 shows direction used and figure 2.2 shows the test setup used. To prevent crushing, the OSB web was reinforced on both sides with 15.6 mm thick plywood glued and screwed onto the OSB. This allowed to compensate for the web slenderness and to generate stress in the joint. A mortizing machine was used to remove the web material from the bottom of the joist, including the material glued in the flange grooves. The purpose was to allow the web OSB to slide in the flanges if slippage occurred when loaded. The compression load was applied to the reinforced part of the web using an 890 kN capacity Riehle universal testing machine at a crosshead speed of 5 mm/min. Tests were conducted until OSB web failure, and the failure mode was recorded.

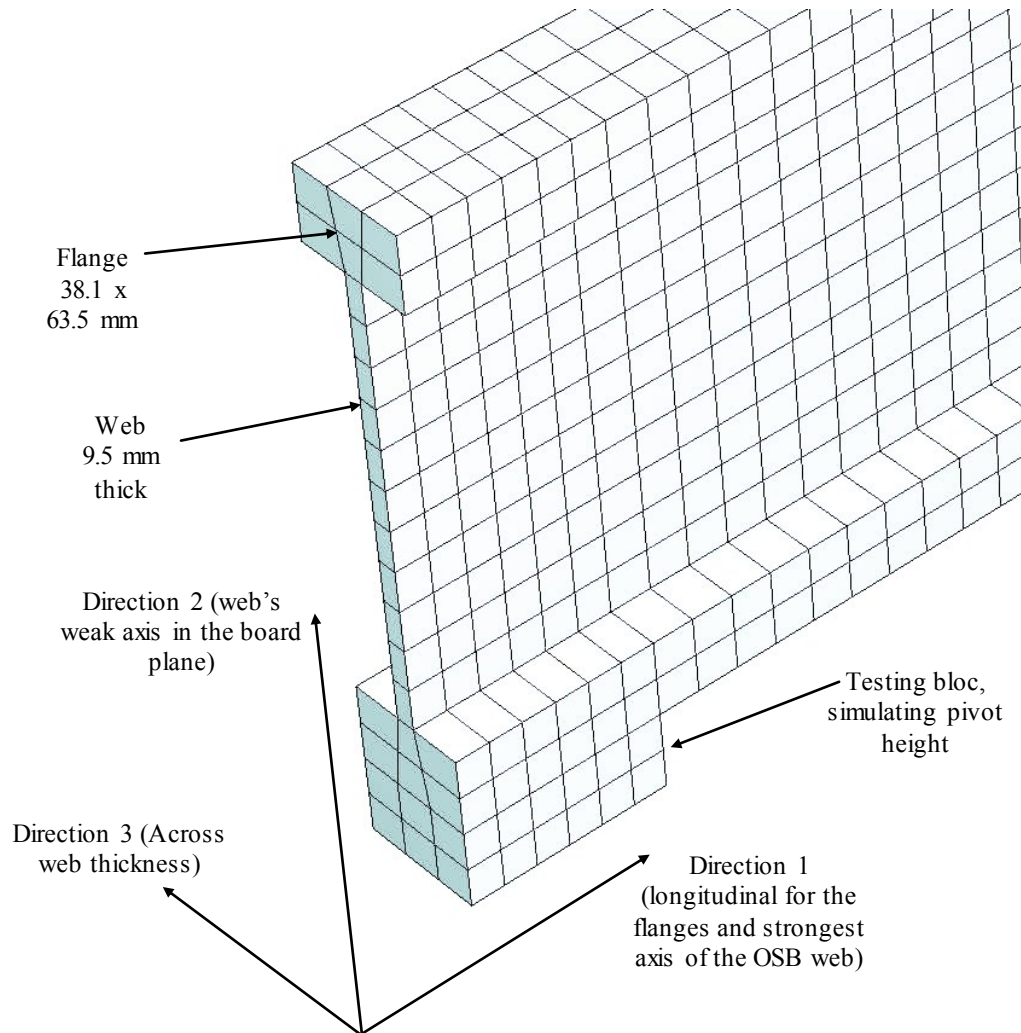


Figure 2.1. Reference coordinate system and finite element mesh.

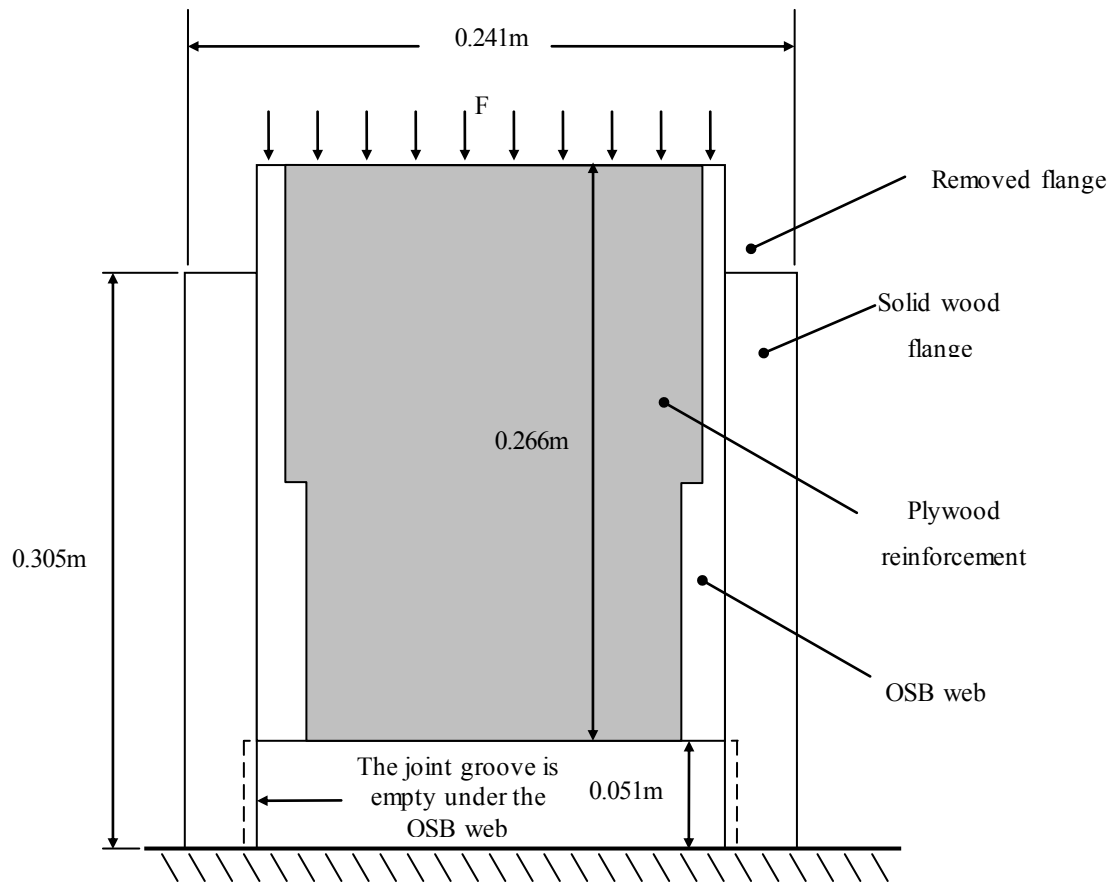


Figure 2.2. Web-to-flange joint test setup.

2.4.2 Finite Element Model

Theoretical considerations. The FEM model was developed using Abaqus/CAE 6.4.1. This software has been used successfully in studies on layered wood composites (Blanchet et al 2005) and wood I-joists (Zhu 2003, 2005, 2007; Guan 2004). The OSB web and the wood flanges were considered orthotropic (Zhu 2003). Figure 2.1 shows the reference coordinate system used for the I-joist and its components. For the OSB web, direction 1 stands for the strong axis in the board plane, direction 2 for the weak axis in the board plane, and direction 3 for the direction along board thickness. The OSB web and the wood flanges were considered elastic. The strain–stress relationship was described as follows (Eq. 2).

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where the left-hand side of the equation is the strain tensor, the right-hand side first term is the compliance tensor, and the last term is the stress tensor. The material is described by its engineering properties ($E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}$, and $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$) in the compliance tensor. The stiffness or compliance tensor for orthotropic material would normally be described by a 36- component matrix. Assuming material homogeneity at the macroscopic level (Maxwell's theorem) results in $S_{ij}=S_{ji}$, we are left with 21 components.

Convergence analysis. A convergence analysis was performed to determine the appropriate finite element mesh size. Abaqus/CAE automatically generates a mesh with a typical element size when seeding is not done manually. The proposed element size of 0.030 m was used as a reference value. The mesh size was then gradually reduced until the I-joist deflection converged. A brick element was used to suit the joist geometry. Two element types were studied: quadratic and linear bricks (20-node quadratic brick: C3D20R element type in Abaqus; 8-node linear brick: C3D8R element type). Typical element sizes considered were 0.030 m, 0.020 m, 0.015 m, and 0.0075 m. Abaqus/CAE was used for pre-processing, processing, and post processing. All elements were designed for orthotropic and elastic materials. The 0.020 m mesh is presented in Fig 2.1. Figures 2.3 and 2.4 show applied loads, symmetry, and physical constraints for 0.030 m mesh. A distributed load was applied to the top surface of a block on the upper flange. To prevent deformation, the load

block and reaction block were modeled as a homogenous isotropic elastic material with tensile MOE of 3×10^{11} MPa and Poisson's ratio of 0.3. Support depth matches the height over the pivot of the corresponding experimental setup. Block length is the same as for the experimental setup. The effect of element size and type were monitored for their impact on web and joist deflection behavior. Web behavior was determined by shear strain at a specific web node, and deflection was determined by the vertical displacement under the bottom flange.

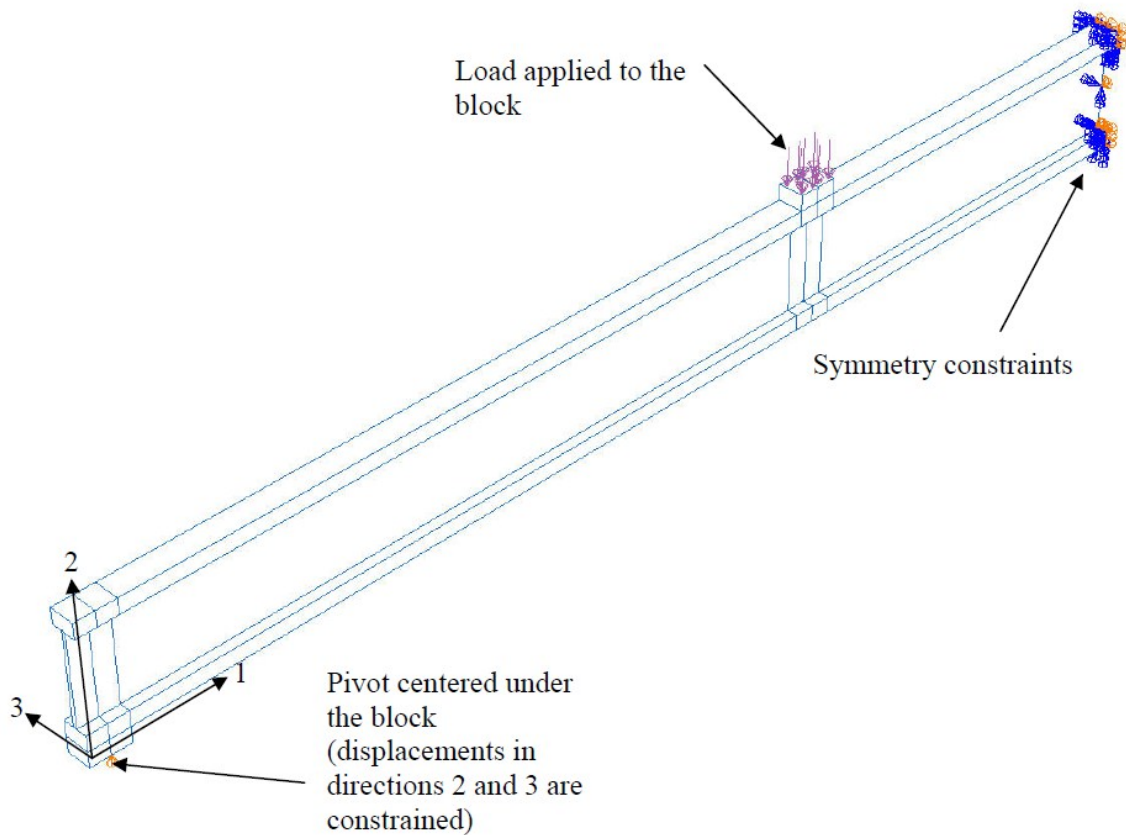


Figure 2.3. Simulated moment critical I-joist.

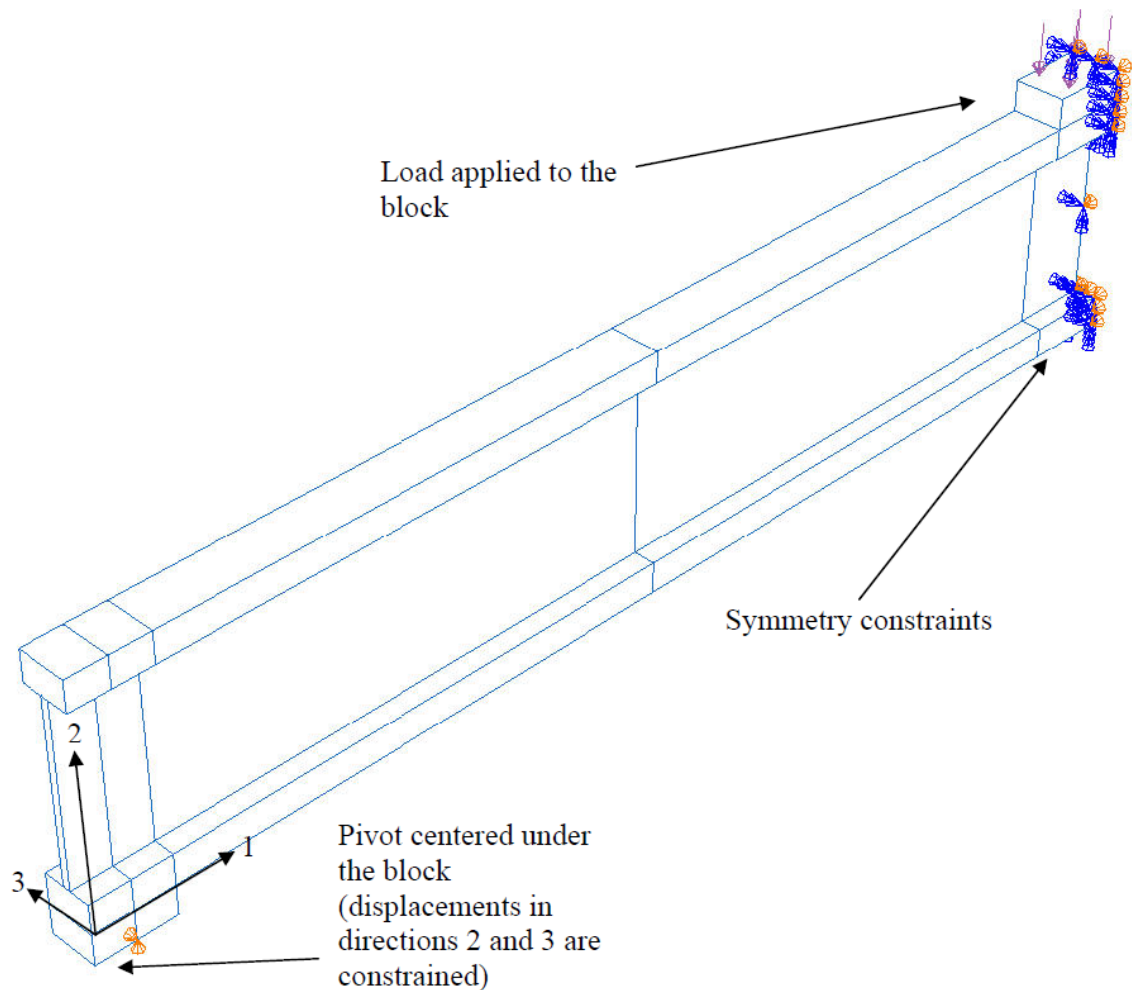


Figure 2.4. Simulated shear critical I-joist

Physical considerations. Wood I-joists are mainly subjected to shear stress or axial stress caused by the bending moment. Two models were developed to cover both cases. The first model, called “shear critical,” has a high depth-to-length ratio. The second model, called “moment critical,” has a low depth-to-length ratio. The purpose was to cover potential variation in sensitivity induced by variation in depth-to-length ratio. This approach was also used by Fergus (1979), but the moment and shear critical I-joist depth-to-length ratio studied did not correspond to current practice. For instance, the moment critical I-joist was 7.32 m long but the current maximum allowable span should be about 4.6 m (Weyerhaeuser 2009). A 0.559 m deep joist with a 2.44 m span was also used, but these dimensions are not

likely to be used in practice. In the present study, the shear critical I-joist had a 0.10 m central loading and the moment critical joist had two-point loading. Figure 2.5 shows the two different cases. Only one I-joist depth was used with two different lengths representative of current practice. The 0.302 m deep I-joist (11" 7/8) is a commonly used I-joist depth. The flange section was 38.1 mm x 63.5 mm (nominal 2" x 3" lumber). Web nominal thickness was 9.5 mm. The length of the two I-joists considered was 3.0 m and 6.0 m, with corresponding spans of 2.8 m and 5.8 m for the shear and moment critical I-joists, respectively (Fig 2.5). The 5.8 m span was selected, as it roughly represents the maximum allowed span for the selected I-joist section (Boise Cascade 2009).

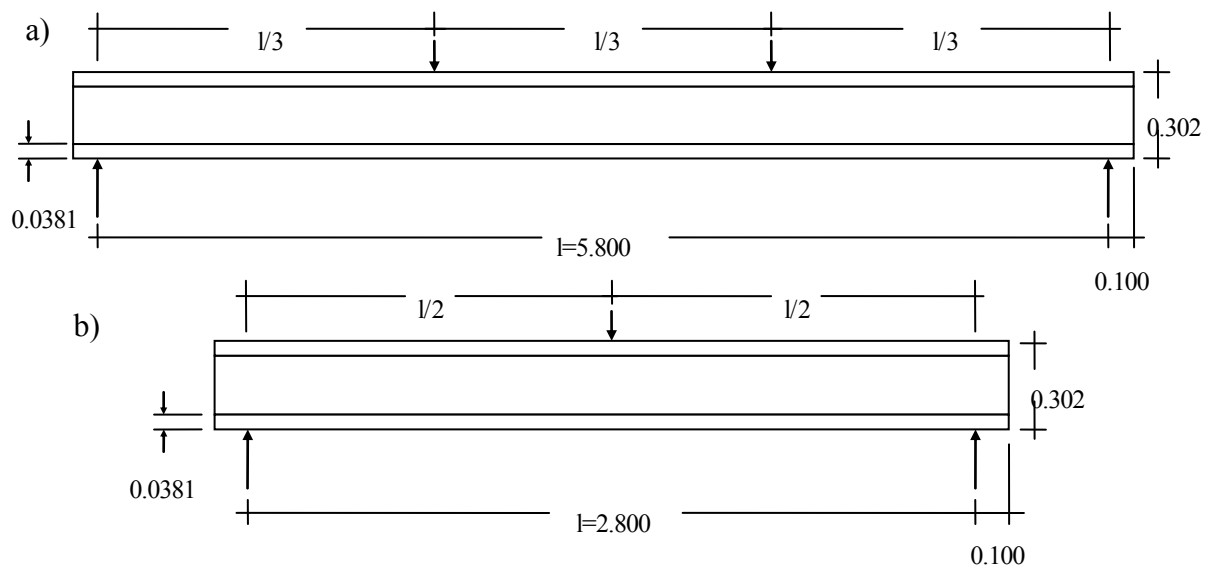


Figure 2.5. Test configuration and dimensions (m) for a) the moment critical I-joist and b) the shear critical I-joist.

Mechanical properties variation. The imposed variations in engineering properties of the OSB web for the model sensitivity analysis were 50%, 100%, 150%, and 200% of the nominal value. It is generally recognized that OSB properties are highly variable at small scale and almost homogeneous at larger scale. The 50 – 200% variation range was chosen based on available data and the literature (Fergus 1979; Karacabeyli et al 1996; Zhu 2003; Chui et al 2005; Chui et al 2007). Flange properties (Table 2.1) were taken from the

literature and kept constant (Bodig and Jane 1993; Jessome 1995; Menard 1999). Tension MOE of flanges along I-joist length (direction 1) is the most important property. Direction 1 for flanges also corresponds to the wood longitudinal direction. The principal radial (direction 2) and tangential (direction 3) directions of wood in flanges depend on the sawing pattern, and are unknown in an actual I-joist. As this sensitivity analysis focuses on the web, flange properties in directions 2 and 3 were simply averaged from the properties in the radial and tangential directions, as per Menard (1999).

Table 2.1. Elastic engineering properties of I-joist wood flanges (black spruce).

Property	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)	v ₁₂	v ₁₃	v ₂₃	G ₁₂ (MPa)	G ₁₃ (MPa)	G ₂₃ (MPa)
Value	¹ 11528	^{1,2} 662	^{1,2} 662	¹ 0.21	¹ 0.23	¹ 0.41	^{1,2} 666	^{1,2} 666	100

¹ Bodig and Jane (1993), ² Averaged values in transverse direction from Bodig and Jane (1993).

OSB web engineering properties were also taken from the literature (Karacabeyli et al 1996; Zhu 2003; Chui et al 2005; Grandmont et al 2006; Chui et al 2007). Table 2.2 shows the nominal OSB web properties set prior to the variation imposed for the sensitivity analysis.

Table 2.2. Elastic engineering properties nominal values for the OSB web.

Property	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)	v ₁₂	v ₁₃	v ₂₃	G ₁₂ (MPa)	G ₁₃ (MPa)	G ₂₃ (MPa)
Value	¹ 3650	¹ 2600	¹ 130	² 0.18	³ 0.30	³ 0.30	¹ 1370	¹ 240	¹ 240

¹ Rounded values from Zhu (2003), ² Grandmont et al (2006), ³ estimated value.

2.5 RESULTS AND DISCUSSION

2.5.1 Web-to-Flange Joint Testing

The web-to-flange joint did not slip during the 10 tests performed. In all cases, the OSB web tore in shear along the joint. Figure 2.6 shows no web movement in the joint groove. The same behavior was observed for all tests, demonstrating higher strength and stiffness in the web-to-flange than in the OSB. The web-to-flange joint was therefore considered rigid in the model, in line with Fergus (1979), Zhu (2003), and Chui et al (2007).

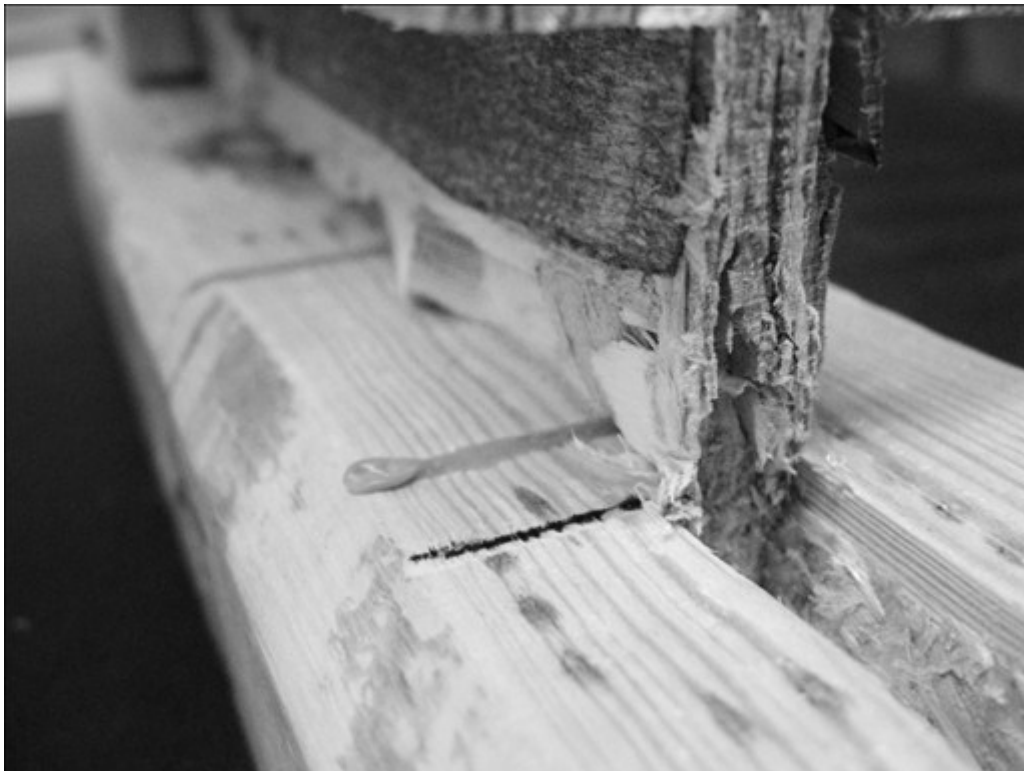


Figure 2.6. OSB web-to-flange joint test specimen damaged in the web.

2.5.2 Simulation Results

Convergence analysis. Table 2.3 shows the OSB web shear strain and I-joist deflection results for different mesh sizes (0.030 to 0.0075 m) for quadratic and linear element types.

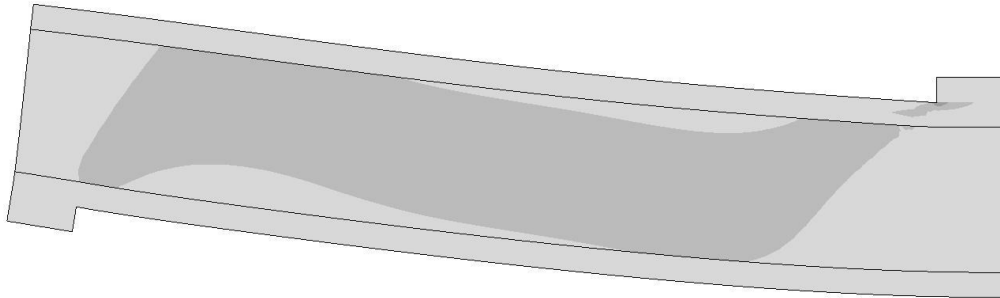
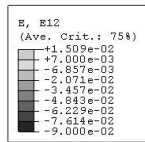
Results show that the element size proposed by Abaqus/CAE (0.030 m) is sufficiently small for use with quadratic brick elements, and that reducing element size barely affects the results. As the required computational time was not significantly longer, 0.020 m quadratic elements were used.

Table 2.3. Effect of element type and size on OSB web shear strain and I-joist deflection.

Typical element size (m)	Element type	OSB web max. shear strain	Joist max. deflection (m)
0.030	Linear	-0.00722	-0.0352
0.030	Quadratic	-0.00719	-0.0337
0.020	Linear	-0.00719	-0.0337
0.020	Quadratic	-0.00718	-0.0339
0.015	Linear	-0.00718	-0.0339
0.015	Quadratic	-0.00718	-0.0338
0.0075	Linear	-0.00718	-0.0338
0.0075	Quadratic	-0.00718	-0.0339

Sensitivity analysis results for the shear critical I-joist. Figure 2.7 shows typical OSB web shear strain and I-joist deflection simulation results. The impact of web properties variation on shear critical I-joist deflection is shown in Table 2.4, and the impact on shear strain is shown in Table 2.5.

a)



b)

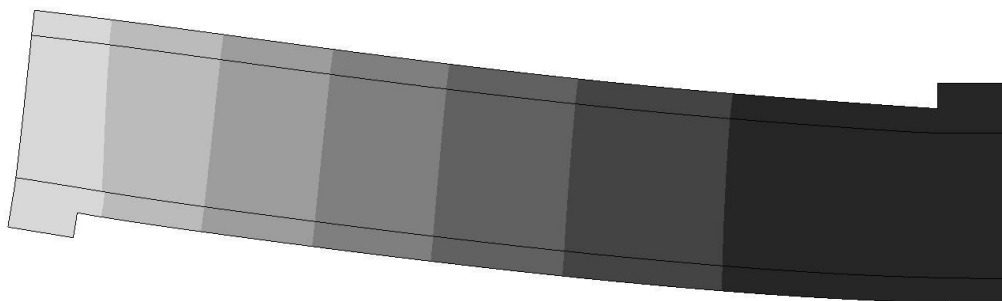
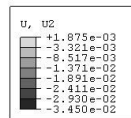


Figure 2.7. Three-meter-long I-joist typical simulation results for a) shear strain and b) deflection.

Table 2.4. Effect (%) of OSB web properties variation on the shear critical I-joist maximum deflection for 50 – 200% of the nominal value.

Properties	E ₁	E ₂	E ₃	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
0.5 x Nominal value	1.2	0.8	0.0	0.1	0.0	0.0	22.9	0.0	0.0
Nominal value	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5 x Nominal value	-1.1	-0.3	-0.01	-0.1	0.0	0.0	-7.7	0.0	0.0
2.0 x Nominal value	-2.2	-0.4	-0.01	-0.2	0.0	0.0	-11.6	-0.1	0.0

Table 2.5. Effect (%) of OSB web properties variation on the shear critical I-joist shear strain for 50 – 200% of the nominal value.

Properties	E ₁	E ₂	E ₃	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
0.5 x Nominal value	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
Nominal value	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5 x Nominal value	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-33.3	0.0	0.0
2.0 x Nominal value	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-50.0	0.0	0.0

According to these results, the model was primarily sensitive to G₁₂ for the shear critical I-joist. A 23% increase in the maximum deflection was calculated when G₁₂ was set to 50%

of its nominal value. For the same G_{12} value, a 100% increase in shear strain was obtained. The results are less sensitive to other properties, although variations in E_1 and E_2 have a small impact. When E_1 or E_2 are set at 200% of their nominal value, the maximum deflection and shear strain change remain under 3%. These findings on the impact of E_1 and E_2 are in agreement with the results reported by Chui et al (2007) and Fergus (1979). It was also found that variations in E_3 , ν_{13} , ν_{23} , G_{13} , and G_{23} have almost no impact on maximum deflection and shear strain of the shear critical I-joist. These results provide additional information on mechanical properties to that found by Chui et al (2007) and Fergus (1979).

Sensitivity analysis results for the moment critical I-joist. According to the results shown in Tables 2.6 and 2.7, the model's sensitivity to web properties is almost the same as for the shear critical I-joist.

Table 2.6. Effect (%) of OSB web properties variation on the moment critical I-joist maximum deflection for 50 – 200% of the nominal value.

Properties	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
0.5 x Nominal value	1.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0
Nominal value	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5 x Nominal value	-1.6	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	0.0	0.0
2.0 x Nominal value	-3.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	0.0	0.0

Table 2.7. Effect (%) of OSB web properties variation on the moment critical I-joist shear strain for 50 – 200% of the nominal value.

Properties	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
0.5 x Nominal value	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
Nominal value	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5 x Nominal value	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-33.3	0.0	0.0
2.0 x Nominal value	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-50.0	0.0	0.0

The model's results are most sensitive to shear modulus G_{12} , although they are less sensitive than for the moment critical I-joist. A 5.9% increase in maximum deflection was recorded when G_{12} was set at 50% of its nominal value. This is only about 25% of the change observed for the shear critical I-joist. In fact, for the same G_{12} value, a 100% increase in shear strain was recorded. Fergus (1979) did not find G_{12} to be sensitive for the moment critical I-joist. No gains or losses were recorded for mid-span maximum deflection. Fergus' (1979) use of high-tension MOE flanges (LVL) and a lower depth-to-length ratio could explain these differences. The calculated deflection is more sensitive to E_1 and less sensitive to E_2 compared to the shear critical I-joist. When E_1 or E_2 are set at 200% of their nominal value, maximum deflection decreases by 3% and 0.1%, respectively, and shear strain increases by 2.4% and 0% respectively. Variation in E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{13} , and G_{23} had almost no impact on maximum deflection or shear strain of the moment critical I-joist, as was the case for the shear critical I-joist. The effect of shear modulus on maximum deflection was not linear, as observed by Chui (2007). At lower value than 1000 MPa, deflection becomes much more sensitive to variation in G_{12} . From these results, it

appears that G_{12} and E_1 must be determined experimentally to properly model shear strain and I-joist deflection. This is in agreement with the results obtained by Chui et al (2007) on the effect of G_{12} , but not with those obtained by Fergus (1979). It appears that E_2 , E_3 , ν_{13} , ν_{23} , G_{13} , and G_{23} of the OSB web have no significant impact on I-joist maximum deflection or shear strain. These results also provide additional information on mechanical properties to that found in the studies by Chui et al (2007) and Fergus (1979).

The above-presented results and Eq (1) imply that Poisson's ratio in the board plane ν_{12} might also be considered important for the simulation of I-joist behavior. The sensitivity results show that Poisson's ratio has almost no effect on shear strain or I-joist deflection. However, the use of Eq (1) to determine G_{12} (Zhu 2003 and Morris 1996) implies the use of ν_{12} . When determining shear modulus in this manner, the model can be considered sensitive to G_{12} , E_1 , E_2 , E_{45° , and ν_{12} . These properties must be experimentally determined for I-joist simulation purposes.

2.6 Conclusions

A sensitivity analysis was performed to determine which OSB web mechanical properties must be precisely known for purposes of simulating wood I-joist deflection and shear strain. Results show that the finite element I-joist model is mainly sensitive to shear modulus in the OSB web plane (G_{12}). Sensitivity is stronger for the shear critical than the moment critical I-joist. Longitudinal and perpendicular tensile MOE (E_1 and E_2) of the web have a slight impact on calculated I-joist deflection. Over the 50% to 200% variation range of G_{12} , deflection changed from 23 to -12% and from 6 to -3% for the shear and moment critical I-joists, respectively. Over the same variation range, E_1 changed deflection only, from 1.2 to -2.2% and from 1.6 to -3.0% for the shear and moment critical I-joists, respectively. Deflection change was even smaller for E_2 , ranging from 0.8 to -0.4% and from 0.2 to 0.1% for the shear and moment critical I-joists, respectively. Finally, if G_{12} is determined by solid mechanics equations, E_1 , E_2 , E_{45° , and ν_{12} are the properties that must be determined experimentally among a set of engineering properties.

Chapitre 3 : Effect of density on the properties of OSB web stock used in wood I-joists

3.1 Abstract

Numerical simulation of structural member behavior requires knowledge of mechanical properties. This study proposes a methodology to obtain reliable mechanical properties of I-joists OSB web, including variability. OSB panel samples were scanned by X-ray densitometry to measure in-plane density variation. Specimens were cut from pre-defined homogeneous density areas in three different orientations (parallel, perpendicular, and diagonal to the strong axis) to measure three basic elastic properties required for an elastic model of I-joists OSB web: modulus of elasticity (MOE) parallel and perpendicular to the panel's strong axis and shear modulus (G). Given the required small specimen size, shear modulus was determined using a combination of in-plane tensile MOEs, including MOE at 45 degrees. Results showed a strong relationship between OSB density and small-scale mechanical properties: coefficients of determination (R^2) varied between 0.57 and 0.79. This provided information on I-joist OSB web mechanical properties as a function of density for input into a numerical model. Properties showed considerable variability in the 600–900 kg/m³ density range, with a 207% increase in tensile modulus of elasticity in the parallel direction, 187% in the perpendicular direction, and 172% at 45°. The mechanics-based OSB shear modulus equation used proved to be reliable.

EFFETS DE LA MASSE VOLUMIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE DES PANNEAUX OSB UTILISÉS DANS LA FABRICATION DES POUTRELLES EN I EN BOIS

3.2 Résumé

Les simulations numériques d'éléments structuraux requièrent une connaissance des propriétés mécaniques des matériaux qui les composent. Cette étude propose une méthodologie pour déterminer les propriétés mécaniques de l'âme en OSB (panneau de lamelles orientées – Oriented Strand Board) utilisée dans les poutrelles en I, incluant leur variabilité. Des panneaux OSB ont été scannés par rayon X afin d'y cartographier la masse volumique dans le plan du panneau. Des échantillons ont été découpés à partir de zones de masses volumiques homogène selon trois orientations différentes (parallèle, perpendiculaire et à 45° par rapport à l'axe fort du panneau) afin de mesurer trois propriétés mécaniques requises pour un modèle élastique simulant l'âme en OSB d'une poutrelle en I : Les modules d'élasticité (MOE) parallèle et perpendiculaire à l'axe fort du panneau et le module de cisaillement (G). Étant donné la faible taille des échantillons, le module de cisaillement a été déterminé en utilisant une combinaison de MOE en tension dans le plan, incluant le MOE à 45°. Les résultats ont montré une forte relation entre la masse volumique de l'OSB et les propriétés mécaniques : les coefficients de détermination (R^2) variant de 0.57 à 0.79. Cela a fourni les informations nécessaires pour inclure les propriétés

mécaniques de l'OSB en fonction de la masse volumique dans un modèle simulant l'âme des poutrelles en I. Les propriétés mécaniques de l'OSB se sont montrées assez variables pour l'étendue de masse volumique observée, donnant une augmentation de 207% du MOE en tension dans la direction parallèle, de 187% dans la direction perpendiculaire et de 172% à 45° en passant de 600 à 900 kg/m³. L'équation basée sur la mécanique pour déterminer le module de cisaillement s'est révélée juste et fiable.

3.3 Introduction

Oriented strandboard (OSB) is a commonly used wood-based composite product. It is widely employed across North America for residential construction and home remodeling. It also plays a structural role in engineered wood products such as wood I-joists, where it is used for the web. Because OSB is used mainly for structural purposes, it has to meet performance standards to ensure public safety. Oriented strand board web I-joists (commonly referred to as web-stock OSB) are proprietary products designed to meet specific I-joist manufacturer standards. Therefore, I-joist OSB web properties are not available to the public. Consequently, they could vary depending on the manufacturer's needs, and might differ from OSB produced to a specific standard.

Information on material mechanical properties must be developed and used as input into numerical models to simulate the performance of this material. Oriented strand board is commonly assumed to be an orthotropic material, and is described by a set of engineering properties. The literature contains extensive information on solid wood flanges, for which the material properties are readily available (Bodig and Jane 1993, Forest Product Laboratory 2010). However, this is not the case for I-joists OSB web stock. Furthermore, the quality control tests that OSB panel manufacturers run do not cover all the mechanical properties required to fully characterize the material for simulation. It is also generally recognized that OSB has homogeneous properties at large scale and heterogeneous properties at small scale. Thus, global or local properties should be determined if the OSB is considered to have homogeneous or heterogeneous properties, respectively.

Consequently, extra care should be taken when determining the test protocol and specimen size to measure the required engineering properties. If global OSB properties are studied, testing to obtain mechanical properties should preferably be performed at large scale to be

representative. To consider local OSB properties, these should be determined on small-scale specimens.

Grandmont et al. (2010) considered global OSB properties and described this orthotropic material with a set of engineering properties: modulus of elasticity (MOE) in tension in the three principal directions (E_1 , E_2 , and E_3 ; see Fig. 3.1 for the reference coordinate system), Poisson's ratios (ν_{12} , ν_{23} , and ν_{13}), and shear modulus (G_{12} , G_{23} , and G_{13}) in the three principal planes. Grandmont et al. (2010) found that the most important properties of the OSB web for wood I-joist bending simulation purposes are G_{12} , E_1 , E_2 , and ν_{12} , with G_{12} by far the most significant. Because OSB properties are highly variable at small scale, the specimen size must be adapted to the finite element mesh size used in the model. Previous work (Grandmont et al. 2010) suggests that mesh size should be less than 30 mm. The variation in properties could then be considered in the model, using information on OSB panel local density, for instance.

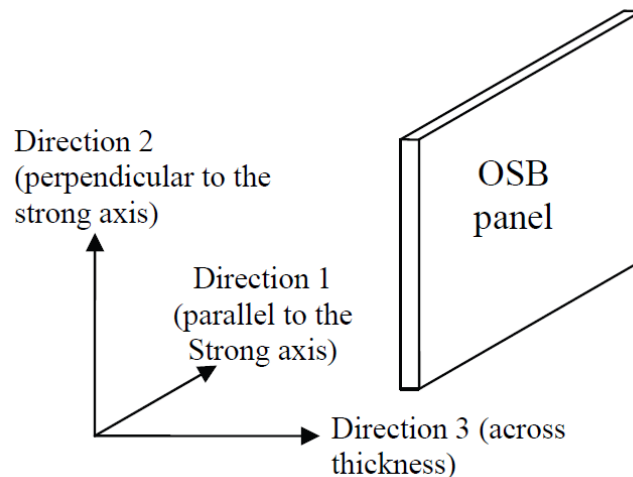


Figure 3.1. — Reference coordinate system.

Karacabeyli et al. (1996) conducted an extensive study on OSB panels, including the results of tests performed to develop Canadian standards for structural grade OSB. The objective was to determine design values for OSB graded according to CSA O452 standard and to include these values in the CSA O86.1 standard. Series of tests were performed on medium- to large-scale specimens of different thicknesses and from different plants to

determine OSB properties. The results provide information on engineering properties variability and distribution. For one group of 9.5 mm thick panels, E_1 and E_2 were determined at 4860 and 3850 MPa, respectively, using ASTM D3500 Test Method B. Calculated in-plane shear stiffness was 1190 MPa for G_{12} and 1210 MPa for G_{21} using ASTM D2719 Test Method C. As the test setup creates near pure shear stress, the obtained G_{12} and G_{21} were almost identical. Calculated rolling shear stiffness (using ASTM D2718) G_{23} and G_{32} were 180 and 200 MPa, respectively. Notably, Karacabeyli et al. (1996) did not consider specific I-joists OSB web for which results could differ. Poisson's ratio is a less documented OSB property. For instance, Thomas (2003) calculated in-plane OSB Poisson's ratio by measuring deformations in the two principal directions while applying a load in one of them. Deformations were measured over a 0.203 m span. The values of Poisson's ratios ν_{12} and ν_{21} were 0.23 and 0.16, respectively. As these values were obtained from tests performed on medium-size specimens, they are not representative of the local property variability that characterizes OSB.

Zhu (2003) also determined OSB mechanical properties to provide input for a finite element model of wood I-joists in order to study the influence of web openings and buckling up to failure (Guan and Zhu 2004, Zhu et al. 2005, Zhu et al. 2007). Elasticity matrix components were determined experimentally using six small specimens, as suggested by Guitard (1987). Properties in tension and compression were determined to identify differences. Tension tests were performed on bone-shaped specimens according to the British standard BS EN 789 (BSI 1996). Outer specimen size was 400 mm x 90 mm with a narrower center section of 100 mm x 60 mm. Compression tests were performed according to the same standard. Specimens were made by gluing together five rectangular 240 mm x 50 mm OSB panels. Prior to testing, specimens were reduced to 40 mm x 240 mm. Longitudinal and transverse displacements were measured on each specimen using strain gages. Average E_1 and E_2 values obtained in tension were 3770 MPa and 2563 MPa, respectively, and 3647 MPa and 2765 MPa, respectively, in compression. Given the similarity of the values obtained in tension and compression, Zhu (2003) used the same OSB properties in the elastic zone for both cases in his model, but considered them different beyond the elastic zone. The wood I-joist bending deflection simulation results correlated well with experimental results. As the study was performed on British OSB

considering global properties, the bending deflection might differ for OSB manufactured elsewhere using other wood species. Morris (1996) borrowed Zhu's (2003) use of six specimens to determine properties, based on the following solid mechanics equation (Zhu 2003):

$$E_D = \left[\frac{l^4}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) l^2 m^2 + \frac{m^4}{E_2} \right]^{-1} \quad (3.1)$$

where E_D is the MOE on a diagonal at a specific angle between directions 1 and 2, and l and m are the cosine of the angle between the diagonal and direction 1 and between the diagonal and direction 2, respectively. When using a diagonal at 45° (thus E_D becomes E_{45°) and when G_{12} is isolated, Eq. (3.1) is simplified as follows:

$$G_{12} = \left(\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1-2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

Zhu (2003) obtained a calculated G_{12} value of 1419 MPa using tension test results and 1323 MPa using compression test results. He used an average value of 1370 MPa because tension and compression properties were considered equal in the elastic zone. Zhu (2003) also calculated Poisson's ratio from the tension and compression test results: in-plane Poisson's ratios ν_{12} and ν_{21} were 0.18 and 0.13, respectively. Poisson's ratio ν_{21} can also be calculated using Equation (3.3).

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} \quad (3.3)$$

When computing ν_{21} from Equation (3.3) using average E_1 and E_2 values obtained by Zhu (2003) of 3770 MPa and 2563 MPa respectively, with ν_{12} of 0.18, the result is 0.12, which is in line with Zhu (2003) experimental result of 0.13. These values are similar to those reported by Thomas (2003). Zhu (2003) also investigated the correlation between OSB local density and measured properties. He showed that OSB engineering properties were strongly related to density in some cases (R^2 ranged from 0.26 to 0.86).

Chui et al (2005) developed a model to improve OSB web design to reduce knife-through failure and studied the impact of multiple web openings on stress distribution in the web. Vibration and static tests were performed on medium- to small-scale specimens. Vibration tests were conducted flatwise on 75 x 1200 mm specimens to determine bending MOE and shear stiffness. The authors found 1402 and 1074 MPa for G_{12} and G_{21} respectively, in the same range as the results of Karacabeyli et al. (1996) but with a greater difference between G_{12} and G_{21} . Both E_1 and E_2 were determined from tension and compression tests. Tension tests were performed following ASTM D-3500 Test Method B using smaller than prescribed specimens (50 x 500 mm instead of 152 x 1219 mm). Values of 5201 and 3459 MPa were obtained for E_1 and E_2 in tension, respectively. Compression tests were performed on 46 x 177 mm specimens made of three layers of laminated OSB. Values of 5243 and 3895 MPa were obtained for E_1 and E_2 in compression, respectively. It is generally recognized that the elastic properties of OSB are similar in tension and compression, as the previous results show. Interestingly, the elastic properties obtained by Chui et al. (2005) for Canadian I-joists OSB web are in the same range as those obtained by Karacabeyli et al. (1996) for structural grade OSB not intended for use in I-joists and by Zhu (2003) for British I-joists OSB web stock.

Chui et al. (2007) investigated the impact of OSB web properties on wood I-joist bending stiffness and shear capacity performance. Vibration and static tests were used to determine OSB web mechanical properties. Edgewise bending and vibration tests were used to determine bending E and G_{12} . Specimen sizes were 76.2 mm x 558.8 mm for vibration tests and 76.2 mm x 279.4 mm for edgewise bending tests. Flatwise bending tests were also performed in accordance with CAN/CSA O325.1 (CSA 1988). Test sample density was found to be a poor indicator of OSB mechanical properties: the coefficient of determination ranged from 0.11 to 0.46. The coefficients of determination between properties and density were lower than those found by Zhu (2003). The larger specimen size used by Chui et al (2007) could explain this difference.

The objective of the present study was to determine the OSB web mechanical properties required to develop a finite element model of wood I-joist bending behavior. In order to develop a realistic model, the OSB was considered as an orthotropic material with variable

local properties. In order to capture heterogeneity, the simulated OSB web of the I-joist was divided into small parts, each with its own properties. Properties were then determined on small specimens to capture local variation and consider it in the model. Density information obtained by density mapping was related to OSB properties to further assign local properties in the model. The mechanical properties to be determined (G_{12} , E_1 , E_2 , and ν_{12}) were selected based on a model sensitivity study by Grandmont et al. (2010).

3.4 Materials and methods

OSB web mechanical properties were determined in two phases. In the first phase, OSB was considered homogeneous and having global properties. The mechanical properties were then obtained using standard testing procedures and the results were compared with the literature. Special care was taken to obtain reliable data from large-scale tests to determine G_{12} , which is known to be the most important OSB web property (Grandmont et al. 2010). Results of phase one provided benchmark values to determine the impact of horizontal density variation on mechanical properties of I-joist OSB web. In the second phase, OSB was considered heterogeneous with variable local properties. Therefore, all tests were performed on small specimens. The measured properties were then related to local average density across panel thickness.

3.4.1 Phase 1: Determination of global I-joists OSB web properties

Poisson's ratio (ν_{12}), in-plane tension moduli (E_1 and E_2) and shear stiffness (G_{12}) were determined. All tests were performed on 9.5, 9.8, and 10.0 mm thick OSB panels from Norbord (Val d'Or, Quebec, Canada). Panels ($n=4$ for each of the three thicknesses) were conditioned in a climate chamber at 20°C and 50% relative humidity (RH) prior to testing giving a 6.2% equilibrium moisture content. Average density (air dry mass / air dry volume) of 650 kg/m³, 620 kg/m³, and 620 kg/m³ was determined after conditioning for the 9.5, 9.8, and 10.0 mm thick panels, respectively.

Series of tension tests were performed according to ASTM D1037-06a (ASTM 2006) to determine in-plane tension E and Poisson's ratio. Prescribed bone-shaped tensile specimens ($n=10$) of 250 mm x 50 mm with a narrower center section of 50 mm x 38 mm were tested.

Two types of measuring devices were used. An optical system (Averna Technology, Montreal) (Fig. 3.2) was used in a first test series to measure surface strains. This measuring device allowed multiple strain measurements at once on a large surface, reducing the impact of local heterogeneity of OSB.

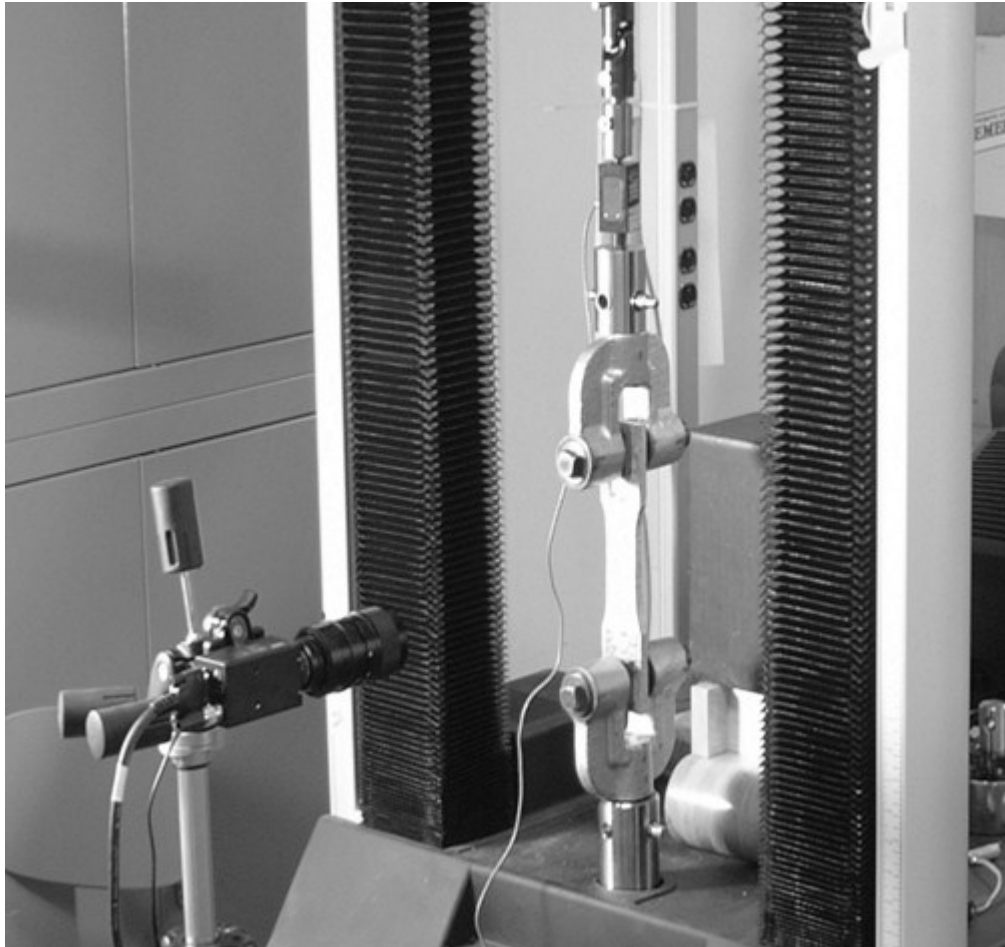


Figure 3.2. — ASTM D1037 Tension test setup with optical displacement measurement device.

The system is equipped with a black-and-white digital camera tracking the movement of pre-defined points on the specimen in a two axes coordinate system. Tension E values thus obtained were validated against results obtained with a standard extensometer from a sample taken in the same 9.5mm thick panel. A second test series was carried out to determine strains, using the same standard as for the previous tension tests but with a Hewlett-Packard 6.35 mm direct current differential transformer (DCDT). Tension tests

were performed parallel (1) and perpendicular (2) to strands orientation on 9.5 mm, 9.8 mm, and 10.0 mm thick panels. Fifteen specimens were tested for each direction and for each of the three thicknesses considered. The 9.5 mm thick specimens used for both tension test series were cut from the same OSB panel to allow validation of the optical measurement results.

In-plane shear modulus was determined according to ASTM D2719-89-C (ASTM 2007) using large-scale 0.609 m by 0.406 m specimens. Five tests were performed for both directions (G_{12} and G_{21}) and for each of the three thicknesses. Shear modulus was determined in both directions, although they are considered equal for an orthotropic material.

3.4.2 Phase 2: Determination of local I-joists OSB web properties

Small specimens are used to determine OSB properties in order to relate the material mechanical properties to local horizontal density. This allows integrating local OSB mechanical properties into a finite element simulation model. Small specimens in the range of a prescribed finite element model mesh size of approximately 20 mm (Grandmont et al. 2010) were therefore used. Given this specimen size, shear modulus was not determined directly, but instead with a procedure used by Morris (1996) and Zhu (2003) (Eq. 3.2). Properties in compression and tension were considered equal because the model was limited to the elastic domain. This reduced the number of required test specimens from six to three. Zhu (2003) used six specimens to test both tension and compression, but found similar properties for both directions in the elastic zone.

Test material was provided by Abitibi-LP (Larouche, Quebec, Canada). Panels ($n=40$) were 10 mm thick and conditioned in a climate chamber at 20°C and 50% RH prior to testing. Average density obtained in these conditions was 720 kg/m³. Series of tension tests were performed according to a modified ASTM D1037-06a (ASTM 2006) protocol to determine tension MOE in three directions (Fig. 3.3). Bone-shaped tensile specimens were 250 mm long by 50 mm wide with a narrower center section of 50 mm x 30 mm. Specimens were narrower than in phase 1 (30 mm instead of 38.1 mm) for a closer match to the finite element model mesh (Grandmont et al. 2010). Tests were performed on an MTS Alliance

RT/50 universal testing machine. DCDT extensometers were installed on both sides of the specimen to measure displacement (Fig. 3.3). Typical OSB has an asymmetrical density profile through thickness that causes a heterogeneous deformation between specimen faces. The average of both deformation measurements was used to limit the impact of this potential heterogeneous deformation on the properties measured.



Figure 3.3. — ASTM D1037 in-plane tension test setup with two DCDTs.

Standard size ($n=40$, 1.22 x 2.44m) OSB web panels sampled from Abitibi-LP's (Larouche, Quebec, Canada) I-joist plant were scanned for horizontal density measurement using the Alberta Research Council's (Edmonton, Alberta, Canada) X-ray densitometer. Density-contour lines were drawn horizontally on the panels for density mapping. Specimens were then cut from three homogeneous horizontal density range areas: 600–700 kg/m³, 700–800 kg/m³, and 800–900 kg/m³. This was done to ensure sampling in the low and high end of the horizontal density range (600–900 kg/m³). A total of 315 specimens were tested for E (E_1 , E_2 and E_{45}) in tension (35 x 3 directions x 3 thicknesses =315). Central sections of

tested specimens were cut after testing to measure their vertical density profile and apparent average density. A QMS QDP-01X density profiler was used to measure the vertical density profile.

3.5 Results and discussion

3.5.1 Phase 1: Determination of global I-joists OSB web properties

The Poisson's ratios determined from tension tests using optical displacement measurement are presented in Table 3.1. The average ratios of 0.23 and 0.15 for ν_{12} and ν_{21} , respectively are in line with Thomas (2003) and Zhu (2003) even though the OSB was made from another wood species. The missing values in Table 3.1 can be explained by point tracking problems in the transverse direction with the measurement device.

Table 3.1. — Poisson's ratio of OSB panels determined according to ASTM D1037 and using an optical displacement measurement device. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation.

Sample	ν_{12}	ν_{21}
1	0.12	0.15
2	0.18	-
3	0.33	-
4	0.16	-
5	0.26	-
6	0.27	0.28
7	0.23	-
8	-	0.08
9	0.31	0.15
10	0.23	0.11
Average	0.23	0.15
SD	0.07	0.08
COV	30%	50%

Tension E values were calculated from measured displacement. Table 3.2 shows the tension E values obtained using optical measurement and using a DCDT extensometer. Average results for E_1 and E_2 using optical measurement were 3495 and 2815 MPa, respectively. Results using the DCDT extensometer were 2919 and 2582 MPa for E_1 and E_2 , respectively. The coefficients of variation are in the 20–40% range, which was expected given the small specimen size. No significant difference at the 95% confidence level was

found between the two strain measurement techniques. Optical displacement measurement could be useful to determine the mechanical properties of non-homogeneous material such as OSB. The optical strain measurement system gave accurate results in the longitudinal axis.

Table 3.2. — I-joists OSB web in-plane tension MOE obtained following ASTM D1037 in phase I. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation.

		Tension MOE (MPa)	
		E ₁	E ₂
Optical measurement device	Average	3495	2815
	Min	2332	1754
	Max	4651	4898
	SD	757	803
	COV %	22	29
DCDT	Average	2919	2582
	Min	2063	1518
	Max	4938	4639
	SD	788	973
	COV %	27	38

In-plane shear modulus was also investigated. Results obtained following ASTM D2719-89-C are presented in Table 3.3. Average results for the 9.5 mm thick panels were 1319 and 1295 MPa for G_{12} and G_{21} , respectively. These values are in the same range as those found by Karacabeyli et al. (1996). Three different nominal thicknesses were tested. Results were similar in both directions, as the test specimens were large enough to develop near pure shear stress. The coefficient of variation ranged from 4–8% for these large 0.406 x 0.610 m specimens. The coefficients of variation were lower than for the above-discussed tension test results because OSB properties tend to be homogeneous at large scale.

Table 3.3. — I-joists OSB web in-plane shear modulus obtained following ASTM D2719-C. SD: Standard deviation; COV: Coefficient of variation; n: sample size.

Tested property (n=5)	Nominal thickness (mm)	G (MPa)	SD	COV (%)
G ₁₂	9.5	1319	86	6
G ₂₁	9.5	1295	56	4
G ₁₂	9.8	1164	56	5
G ₂₁	9.8	1225	98	8
G ₁₂	10	1150	47	4
G ₂₁	10	1314	87	7

These results show that the tested I-joist OSB web has engineering properties comparable to those found by Chui (2005) for similar material, by Karacabeyli et al. (1996) for structural grade Canadian OSB, and by Zhu (2003) for British I-joists OSB web. These similarities were unexpected, considering the three different products evaluated. High coefficients of variation were obtained for tension tests on small-scale specimens. This suggests that local OSB web properties should be considered for simulation purposes. Phase 1 tests allowed comparison with the literature and provided reference values for phase 2.

3.5.2 Phase 2: Determination of local I-joist OSB web properties

Density

OSB apparent density and vertical density profiles were measured on all tension test specimens (35 for each of the three directions and each of the three density groups, for a total of 315). Figure 3.4 shows the average vertical density profiles obtained for different density groups. The higher the density group, the greater is the difference between surface and core densities. Differences between surface and core density were roughly 275, 250, and 170 kg/m³ for the 800–900, 700–800, and 600–700 kg/m³ density group, respectively. The density profile was also asymmetrical, one surface layer presenting a higher density than the other. This pattern can be explained by the manufacturing process. Gravity combined with vibration of the mat on the conveyors causes fine strands to reach the bottom of the mat before hot pressing.

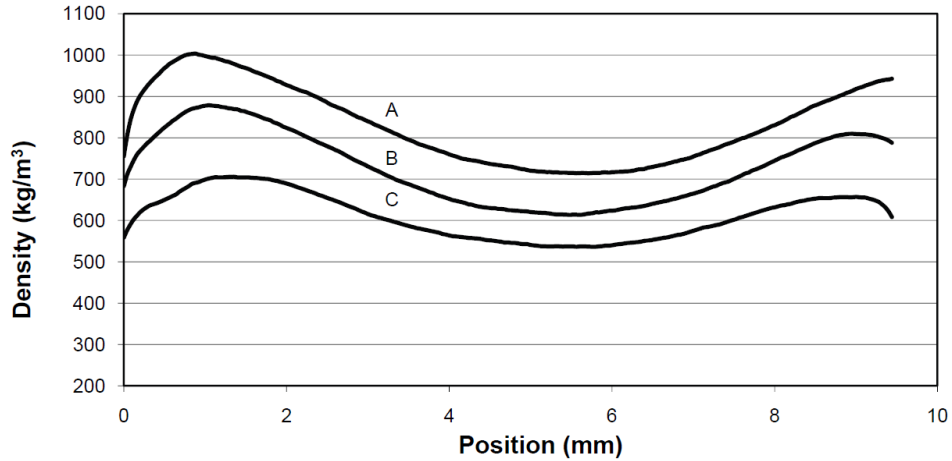


Figure 3.4. — Average vertical density profile for the three density groups. A: 800–900 kg/m^3 , B: 700–800 kg/m^3 , C: 600–700 kg/m^3 ($n=105$ for each profile).

These results confirm that the tension test setup used in phase 1 could be improved. Only one measurement device was used on one side of the specimen. The measured deformation appeared to be sensitive to the chosen measurement side. It was then assumed that the asymmetrical vertical density profile could cause the specimen to bend while loaded in tension. In this regard, two measurement devices were then used in phase 2 to measure the displacement from both sides of the specimen.

Mechanical properties

Figures 3.5 to 3.7 show the tension MOE results as a function of the specimen apparent density for each tested direction (parallel, perpendicular, and at 45°).

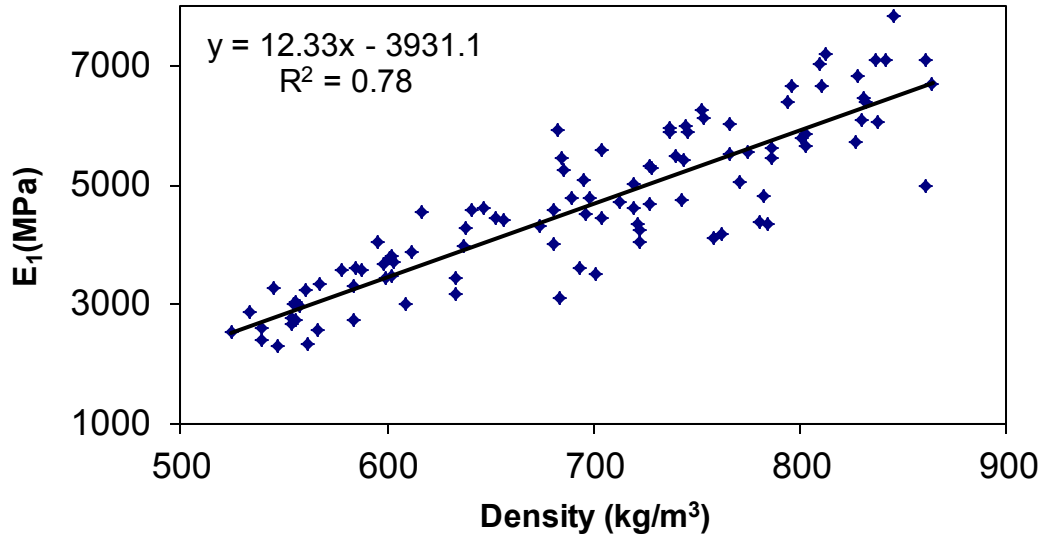


Figure 3.5. — Tension MOE in I-joists OSB web in the parallel direction (E_1) as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.

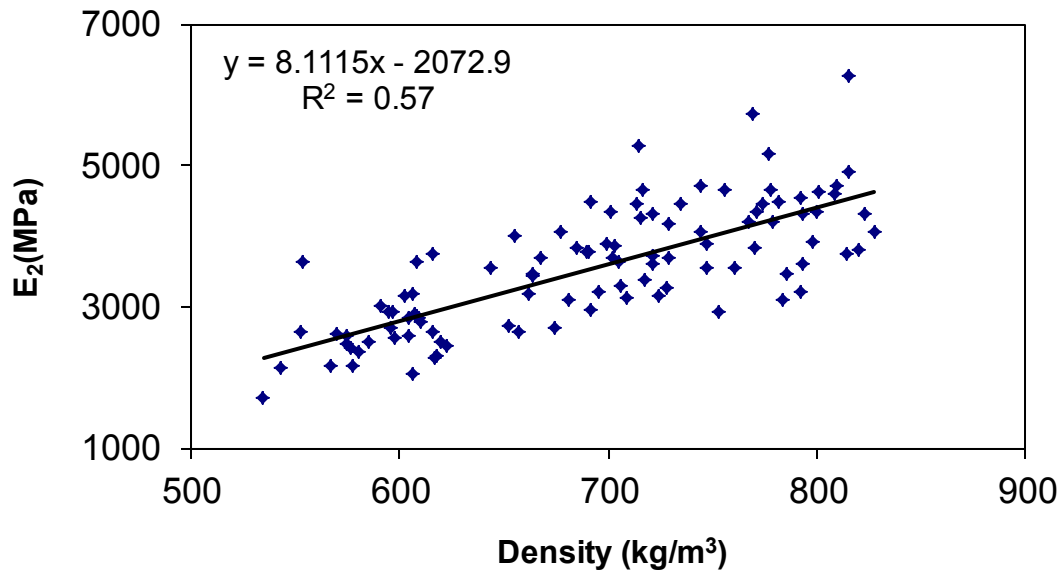


Figure 3.6. — Tension MOE of I-joists OSB web in the perpendicular direction (E_2) as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.

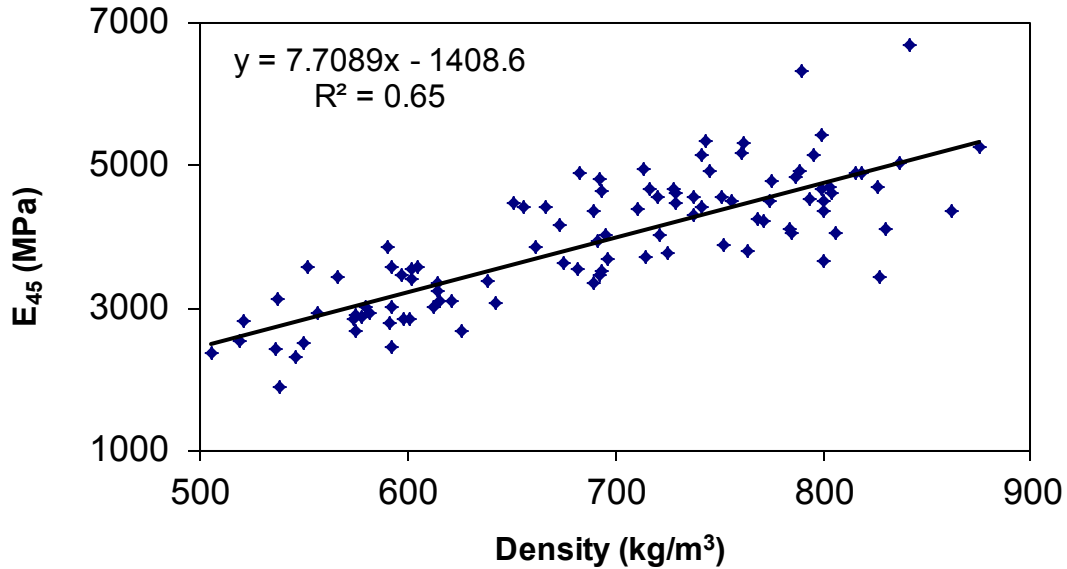


Figure 3.7. — Tension MOE of I-joists OSB web at 45° as a function of average local apparent density determined following ASTM D1037.

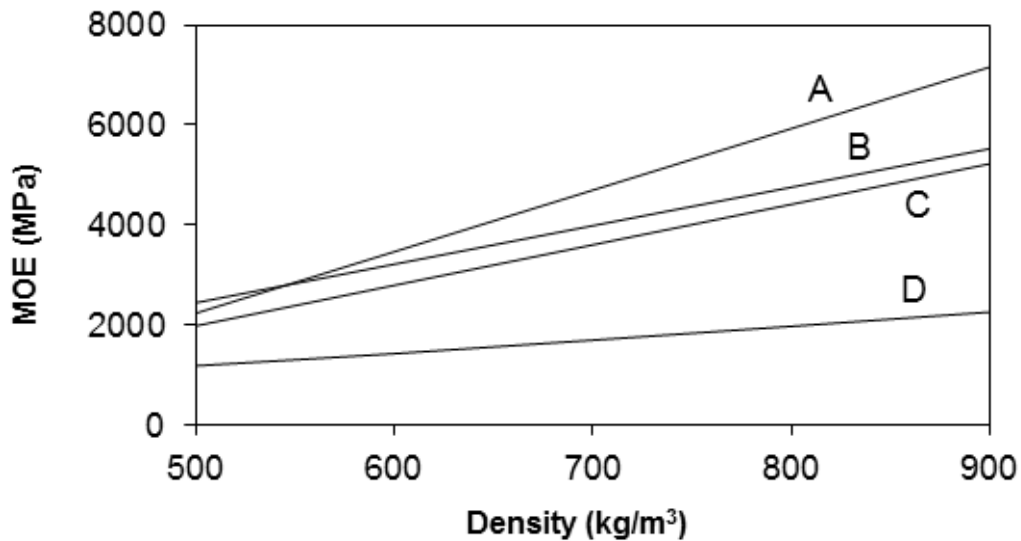


Figure 3.8. — Calculated tension MOE of I-joists OSB web in relation to average local apparent density. A: parallel (E_1), B: 45°, C: perpendicular (E_2), D: calculated in-plane shear modulus of the panel (G_{12}).

A linear regression plotted for each data set gave the following equations:

$$E_1 = 12.33D - 3931 \quad (3.4)$$

$$E_{45} = 7.71D - 1409 \quad (3.5)$$

$$E_2 = 8.11D - 2073 \quad (3.6)$$

where D is the apparent density (kg/m^3) of the test sample. Equations (3.4) to (3.6) relate the material mechanical properties to local apparent density. Knowing these relationships and the horizontal density distribution obtained from density mapping, a specific property set can be assigned to a given density in the model. A specimen with an apparent density equal to the measured average apparent density of the OSB panels (694 kg/m^3) would have 4621, 3938, and 3553 MPa for E_1 , E_{45} , and E_2 , respectively. Referring to Equation (3.2) and considering a ν_{12} of 0.18, this OSB panel would have a shear stiffness (G_{12}) of 1679 MPa. These values are in agreement with the average measured properties shown in Table 3.4. Figures 3.5 to 3.7 show that for a density range of 600–900 kg/m^3 , E_1 , E_2 , and E_{45} would increase from 3467 to 7166 MPa, from 2794 to 5227 MPa, and from 3217 to 5530 MPa, respectively. These increases represent 207, 187, and 172% in the 600–900 kg/m^3 density range, showing high variability of both local density and local mechanical properties.

Table 3.4. — Average mechanical properties of I-joists OSB web using ASTM D1037.

Property	Average tension MOE (MPa) (n= 315)
E_1	4657
E_2	3548
E_{45°	3948
G_{12}^*	1684

* Calculated based on E_1 , E_2 , and E_{45°

A strong relationship was found between OSB apparent density and all tested properties: R^2 ranged from 0.57 to 0.78. The relationship between local density and mechanical properties was stronger than that found by Chui (2007) and similar to that found by Zhu (2003). This was attributable to specimen size and the large number of specimens tested. The coefficient of determination (R^2) of the linear regression was higher for the parallel direction (E_1). The coefficient of determination obtained for E_{45} and E_2 followed in descending order. This shows the lower variability of E in the strands principal direction.

Figure 3.8 shows the values calculated from the linear regression equations presented in Figures 3.5, 3.6, and 3.7. Shear modulus G_{12} was calculated from Equation (2) using a Poisson's ratio of 0.18, obtained from the literature (Thomas 2003, Zhu 2003) and from phase 1 results. Calculated results obtained for G_{12} give consistent results over the density range. The predicted tensile E are showing unexpected results in the 500–600 kg/m³ with an inversion between E_1 and E_2 . Thus, Equation 3.4, 3.5 and 3.6 should be used in the 600–900 kg/m³ density range. Results in the 500–600 kg/m³ density range are due to the difference between horizontal density mapping and the measured apparent density of the specimen central section. The results obtained in phases 1 and 2, in which E_1 and E_2 were determined using a similar protocol with slightly different specimen sizes, were then compared. The shear stiffness (G_{12}) calculated with Eq. (2) and presented in Table 3.4 has a value of 1684 MPa and represents 36% and 47% of E_1 and E_2 , respectively. Phase 1 G_{12} obtained on large specimens in accordance with ASTM D2719-89-C was 1307 MPa, representing 37% and 46% of E_1 and E_2 , respectively. The proportions obtained were almost the same in both cases, which confirms the use of Equation (3.2) to determine G_{12} for OSB panels using small specimens.

3.6 Conclusion

Global and local mechanical properties of I-joists OSB web were determined for simulation purposes. When global OSB properties were considered, a shear modulus of about 1300 MPa was obtained for 9.5 mm thick web stock OSB. Poisson's ratios were in line with the literature, at an average of 0.18 for ν_{12} and ν_{21} . An optical displacement measurement device was used and found promising for future studies.

When testing OSB in tension, it was found that the displacement should be measured on both sides of the specimen because it varied depending on the chosen measurement side. The asymmetrical density profile observed for the OSB web could have caused the specimen to bend under axial load. The measured vertical density profiles tended to support this idea, especially for higher density zones, which showed steeper vertical density profiles.

A solid mechanics equation was used when considering local in-plane shear modulus (G_{12}), and tests were conducted on small-scale specimens. An average shear modulus of 1684 MPa was determined. Results were in line with those from large-scale mechanical testing following ASTM D2719-89-C (ASTM 2007). The results on small specimens showed that web stock OSB properties varied with average local panel density. A strong relationship was found between average density and tensile modulus of elasticity. The coefficient of determination varied from 0.79 to 0.57 for the tensile modulus of elasticity E_1 and E_2 , respectively. In the apparent local density range of the test specimens (600–900 kg/m^3), the modulus of elasticity in tension increased by 207% in the parallel direction (E_1), by 187% in the perpendicular direction (E_2), and by 172% at 45° (E_{45}). This high variability shows that a model simulating I-joists made with OSB web material would be more realistic if properties were considered heterogeneous and strongly related to average local density. Based on the measured horizontal density distribution and on the regression equations determined in the current study, local properties could be introduced in a finite element simulation model. This will be the purpose of a further study.

Chapitre 4 : Simulation of wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability

4.1 Abstract

Numerical simulation is commonly used in product development. This study investigates the impact of simulating OSB web heterogeneous properties on wood I-joist behavior in bending. Shear strain in the web and I-joist deflection from full scale experimental results were first compared with model output considering homogeneous OSB web. Results showed a good correlation between simulated and full scale experimental bending tests, deflection differences ranging from 9 to 24%. However, the model overestimated the shear strain. These differences were potentially due to the local variability of OSB. Based on a previously established density/mechanical properties relationship and on web OSB density mapping, OSB property heterogeneity was considered in the model. Simulation results obtained considering heterogeneous OSB properties (n=100) were then compared with analogue results obtained considering homogeneous properties (n=100). Shear strain distribution was altered in the web and a small (less than 1%) increase in deflection was observed when heterogeneous properties were used in the model. Based on the density across the OSB web thickness and on the established density/mechanical properties relationship, simulations were performed to evaluate the effect of the vertical density profile on the simulated I-joist. A 1% increase in deflection was then observed as well as a lateral displacement of the bottom flange.

SIMULATION DE POUTRELLES EN BOIS À CONFIGURATION EN I CONSIDÉRANT LA VARIABILITÉ LOCALE DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'OSB

4.2 Résumé

Le recours aux simulations numériques dans le développement de produits est maintenant chose courante. Cette étude aborde le potentiel à inclure la variabilité locale des propriétés mécaniques de l'âme en OSB dans une simulation de poutrelles en I en flexion. En premier lieu, la flèche et les déplacements relatifs en cisaillement dans l'âme ont été comparés entre des résultats de simulation considérant une âme homogène et des résultats d'essais en laboratoire. Les résultats de simulation se sont révélés être près de ceux de laboratoire avec des différences de déflexion se situant entre 9 et 24%. Les déformations en cisaillement ont cependant été surestimées. Les différences étaient potentiellement dues à la variabilité locale de l'OSB. Cette variabilité a été introduite dans le modèle en se basant sur une relation entre la masse volumique et les propriétés mécaniques de l'OSB préalablement établie. Les résultats de simulation considérant la variabilité des propriétés (n=100) ont été comparés avec d'autres considérant l'OSB comme étant homogène (n=100). La distribution des déplacements relatifs en cisaillement a été modifiée dans tous les cas et la flèche a en moyenne légèrement augmenté (moins de 1%) lorsqu'on a considéré la

variabilité des propriétés. En se basant sur la relation entre la masse volumique et les propriétés mécanique de l'OSB, l'effet du profil de masse volumique à travers l'épaisseur du panneau d'OSB a été simulé. Une augmentation de la flèche de l'ordre de 1% a été observée ainsi qu'un déplacement latéral de la semelle inférieure.

4.3 Introduction

Today's engineering products development and improvement are often based on numerical models that can predict their behavior fairly accurately. However wood I-joists were not initially developed following that approach. Analytical calculations and experimental testing were instead widely used for the development and improvement of this product.

One of the methods for determining engineering properties of wood I-joists is given by the ASTM D5055 standard which specifies analytical equations and experimental testing methods. The use of this standard is mandatory for establishing and monitoring structural capacities of prefabricated wood I-joists. However, empirical testing is not the only option for product optimization and research. A potential drawback to empirical testing is that the impact of a change in the I-joist design could not be noticeable with a limited number of test I-joist specimens. Material variability could easily hide small improvements that would only be noticeable by comparing very large groups of specimens. Another potential drawback of the empirical approach commonly used for wood I-joist development is the high cost involved.

Numerical simulations allow studying the impact of given parameters on the bending behavior of the I-joists while keeping all other parameters constant. That would be one of the reasons why most recent research projects on wood I-joist design and performance were performed using that approach (Zhu 2003, Chui et al. 2005, Chui et al. 2007, Grandmont et al. 2010). Simulation might be a sound approach but it could be difficult to develop a reliable simulation model. One of the reasons is that wood I-joists are made out of materials of variable physical and mechanical properties, especially at small scale level.

Fergus (1979) developed a model using the commercial software SAP IV considering the I-joist web as a homogeneous material. The flanges were simulated using 3D beam elements modified for plane stress analysis. The web was simulated using plane stress quadrilateral elements specifying orthotropic material properties. Comparison between actual I-joist and

simulation for deflection showed model results to be valid and close to reality for shear critical and moment critical I-joists (high and low depth to length ratio respectively). The moment critical I-joists were 7.32 m long by 0.254 m deep and the shear critical I-joists were 2.44 m long by 0.559 m deep. Depth to length ratio roughly correspond to 1/29 and 1/5 respectively. Fergus (1979) found deflection differences between simulated and test results ranging from 0 to 5% for moment critical I-joist and from 0 to 20% for shear critical I-joist. Such close results when comparing simulated and tested I-joists deflection were obtained using laminated veneer lumber (LVL) flanges tested independently for bending modulus of elasticity (E). As it was demonstrated by Fergus (1979), I-joist deflection is mainly controlled by the flanges tensile E (modulus of elasticity).

Chui et al (2007) studied the influence of I-joist web OSB (also commonly referred to as web stock OSB) properties on the performance of wood I-joists. A comparison was made between different ways of predicting I-joist structural performance. Simulation results, obtained with a model developed with the commercial software SAP 2000, were compared with analytical and experimental results. The study showed that analytical solutions, including that proposed by Ozelton and Baird (1976) were more conservative than the simulated results while the later were more accurate. Bending tests with I-joist depth to span of 1/18 for 0.241m and 0.356m depth were performed with loading points at third points of the span. For both depths, analytical and simulated results underestimated deflection by approximately 22 and 14% respectively. Again, web properties were considered to be homogeneous in the model.

Zhu (2003) has developed a model of wood I-joist bending deflection using the commercial software Abaqus CAE 6.4.1. The model was used extensively for a wide variety of comparisons with experimental results. In the case of an I-joist without hole of 5m long and 0,4m deep (about 1/12 depth to length ratio) the predicted deflection were in good agreement with experimental results. The model underestimated deflection by approximately 9%. The I-joist flanges and web materials were considered to have homogeneous properties as was the case for studies previously cited. Zhu (2003) also demonstrated a relatively strong relationship between OSB density and mechanical properties.

Previous studies (Fergus 1979, Chui et al. 2007, Chui et al. 2005, Zhu 2003) demonstrated that a finite element model of wood I-joist based on an elastic constitutive law performed well in predicting deflection. However, none of these studies considered web properties variability which might influence I-joist behavior under bending load.

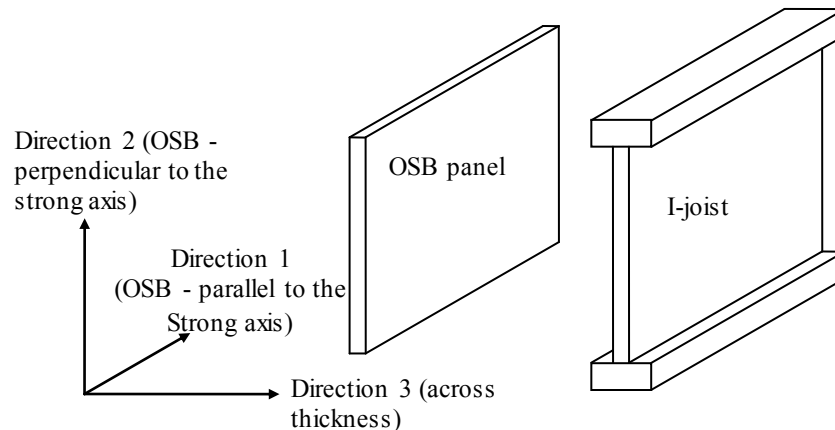


Figure 4.1: Reference coordinate system.

Grandmont et al. (2010) performed a sensitivity study of the impact of I-joist web properties on bending deflection to provide guidance for further model development. The results show that the finite element I-joist model is mainly sensitive to shear modulus in the OSB web plane (G_{12} – see Fig. 4.1 for reference coordinate system). The sensitivity is stronger for shear critical than moment critical I-joist. Longitudinal and perpendicular tensile modulus of elasticity (E_1 and E_2) of the web have a slight impact on calculated I-joist deflection. Following that study, Grandmont et al. (2011) determined I-joist web OSB properties (E_1 , E_2 and G_{12}) as a function of OSB web local density. The relationship with local density was found to be strong.

The objectives of this study are to develop a model that would simulate the deflection and shear strain of a wood I-joist in bending and to develop a better understanding of the impact of web mechanical properties variability on the overall I-joist bending behavior.

4.3 Material and Methods

The experimental program took place in two phases. In the first phase, model results considering a homogeneous OSB web was compared to experimental results. A second phase took place to consider OSB properties variability in the model and determine its impact on I-joist behavior.

4.3.1 Phase 1. Comparison of wood I-joist bending experimental and model results assuming an homogeneous OSB web

4.3.1.1 Experimental

Two types of I-joist were tested, corresponding to the approach used by Fergus (1979):

- Short span (shear critical, high depth to length ratio of about 1/5)
- Long span (moment critical, low depth to length ratio of about 1/18)

The two configurations used are representative of current practices (Boise Cascade 2009, Weyerhaeuser 2009). Short joists were 3.048m long with a 2.438m span. The long joists were 6.096m long with a span of 5.486m. Both configurations had the same 0.302m deep section. A total of 8 long span and 8 short span I-joists were tested. Four of them had the main axis of the web OSB panel parallel (Par) to the joist length and four had the main axis perpendicular (Per) to the joist length.

The long I-joists were loaded at eight points to simulate uniform loading (Fig. 4.3)(see Annexe 1, Figure A1.2 for additional image). The short I-joists were loaded at a single point (Fig. 4.3, additional image is presented in the). Both test setups were done on a Systech FLX 900 bending test machine. A set of two 50.8 mm Shaewitz linear variable differential transformers (LVDT) was used to measure deflection at the mid span. The loading rates were 10 mm/min and 6mm/min for the long and short configurations respectively. Shear strain was not directly measured. Two pairs of cable extension position transducer (PT101 from Intertechnology)(see Annexe 1, figure A1.3 for additional), were used to measure web shear deformations at 45° on each side. Shear strains were calculated from these deformations. Shear is almost constant between the two loading points.

Considering symmetry at mid span, it gives one shear section for the short span I-joist in the single point loading setup and four shear sections for the long span I-joist in the eight loading points setup. Measurements were made in the middle of each shear section for the long span I-joists while two measurements were made in the main shear section of the short span I-joists. The I-joists were loaded more than one time to cover every shear section since only four potentiometers were available. Loading was kept in the elastic zone. The shear strain γ_{12} is calculated based on equation 4.1.

$$\gamma_{12} = \frac{\pi}{2} - \theta^* \quad (4.1)$$

Where $\pi/2$ is the angle at a given point and θ^* is the angle at the same point after deformation. Since shear strain are small in magnitude, the small-angle approximations of equations 4.2 and 4.3 can be used.

$$\tan(\gamma) \approx \gamma \quad (4.2)$$

$$\sin(\gamma) \approx \gamma \quad (4.3)$$

The shear strain can then be computed following equation 4.4.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta^* \approx \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta^*\right) = \frac{\delta_s}{L_s} \quad (4.4)$$

Where δ_s and L_s are defined in figure 4.2. In this equation, δ_s is calculated by trigonometry from the 45° measurements.

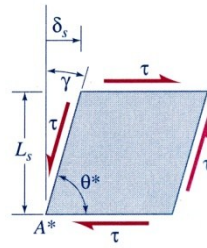


Figure 4.2 : Pure shear deformation illustration (Roy and Craig, 2000)

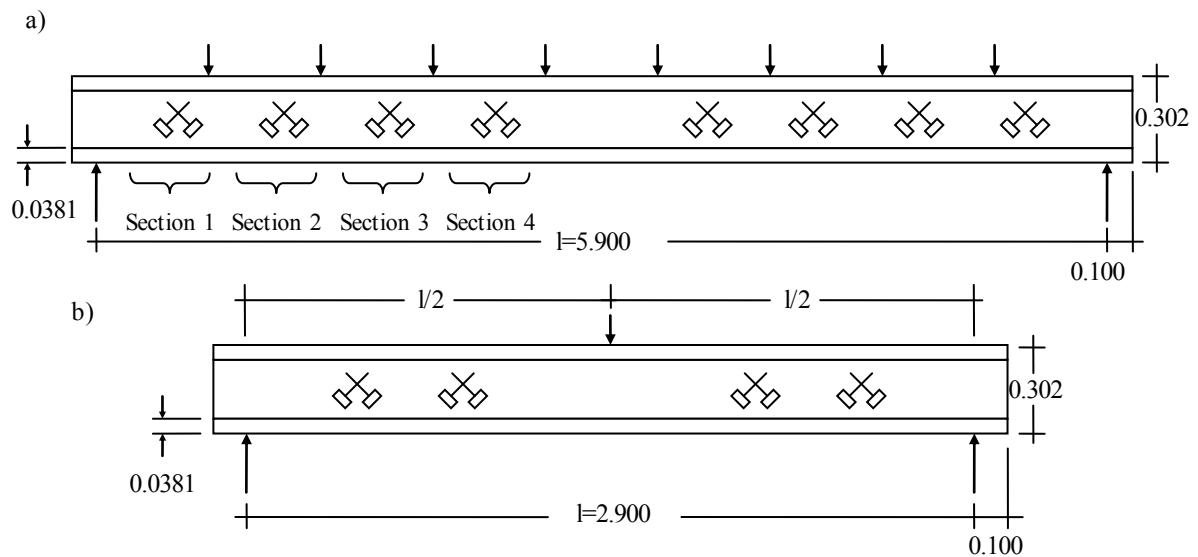


Figure 4.3: I-joist test setup for a) moment critical and b) shear critical (drawing not to scale) where X drawings represent the different shear sections and shear strain measurement locations.

Flanges of each I-joist were tested using a Metriguard E-computer to determine their tension E for them to be used as input in the model. The E-computer is a device that gives E based on density and resonant vibration frequency. As E in tension or compression is the most important property, and the only I-joist flanges sensitive properties (Fergus 1979), other flanges mechanical properties were taken from the literature (Bodig and Jayne 1993, Guitar 1987).

4.3.1.2 Finite Element Modeling

A finite element model simulating a wood I-joist in bending was developed using the commercial software Abaqus 6.4.1 to compare predicted and experimental results. The model is detailed in Grandmont et al. (2010). The OSB web and solid wood flanges were considered as elastic orthotropic materials with homogeneous elastic properties. Web-to-web and web-to-flange glued joints were not considered in the model. Both materials were described by a set of 9 engineering properties (E_1 , E_2 , E_3 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , and ν_{12} , ν_{13} , ν_{23}) as described in Grandmont et al. (2010). As shown in Fig. 4.4, the domain was meshed with 15 nodes quadratic triangular prism elements to adequately mesh the web to flange joint. The base simulates the height of the reaction point over the pivot of the experimental test setup.

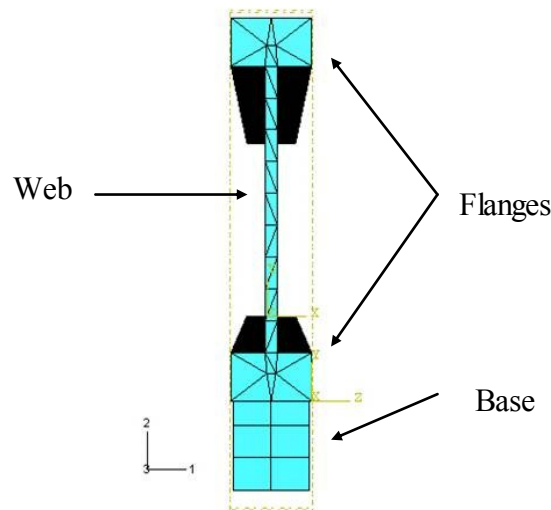


Figure 4.4: I-joist finite element mesh (phase I, considering homogeneous web)

Oriented strand board elastic properties (G_{12} , E_1 and E_2) were partially determined by Grandmont et al. (2011) (see chapter 3) and used as input in the finite element model. Other studies such as Zhu (2003) provide such properties but for other types of OSB (i.e. different wood species, etc.). Properties were determined in the two in-plane panel axes (directions 1 and 2). Experimental determination of E_3 , G_{13} , G_{23} , ν_{13} and ν_{23} have not been conducted since the behavior of the I-joist is not too sensitive to these properties

(Grandmont et al., 2010)(see Chapter 2). The procedure followed to determine the OSB mechanical properties is detailed in Grandmont et al (2011) (See Chapter 3).

4.3.2 Phase 2. Modeling wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability

4.3.2.1 Experimental

The second phase was intended to determine the impact of OSB properties variability on I-joist behavior based on the relationships established between density and elastic properties for G_{12} , E_1 and E_2 by Grandmont et al (2011) (chapter 3). Therefore, the horizontal density distribution of web stock OSB panels (i.e. in-plane density or density mapping)(see Annexe 1, Figure A1.4 for additional image) was determined following the procedure described by Wang et al. (2007). Standard size web stock OSB panels ($n=40$) sampled in an I-joist plant (Bois d'ingénierie Abitibi-LP Inc, Larouche, Québec, Canada) were scanned for density mapping using an X-ray densitometer available at the Alberta Research Council, Edmonton, Alberta, Canada. X-ray densitometry measurements were performed using a grid size of 25.4 x 25.4mm, approximately matching the FEM model elements size recommended by Grandmont et al. (2010) (chapter 2) in a sensitivity study as well as the specimen width used for OSB property determination by Grandmont et al (2011) (chapter 3).

4.3.2.2 Finite Element Modeling

A wood I-joist finite element model, considering web OSB in-plane local density variation was used in Phase 2. Based on the relationship between density and OSB properties determined by Grandmont et al. (2011) (chapter 3), local density was used to determine OSB properties variability (G_{12} , E_1 and E_2) in the model. Phase 2 model is similar to phase 1 but it considers the web as a heterogeneous material. The I-joists considered are the same as in Fig. 4.3 using the same joist depth (0,302m). Lengths are slightly different with 3 m and 6 m long joists for simplification. The FE mesh (Fig. 4.5) is also different from phase 1. Twenty nodes quadratic brick elements were used to geometrically match the OSB web horizontal density scanning information and grid size. Typical element size was 0.0254 m x 0.0254 m. The resulting meshing density remains under the critical size of 0.03m when

using quadratic bricks as determined in a previous sensitivity study (Grandmont et al. 2010) (chapter 2) (see Annexe 2 for an example of Abaqus “.inp” command file)

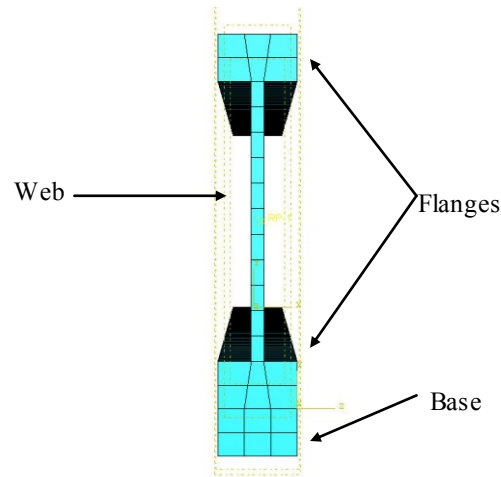


Figure 4.5: I-joist finite element mesh (Phase 2, considering heterogeneous web).

Oriented strand board elastic properties variability was introduced in the FEM model based on horizontal density mapping information. The elastic properties (G_{12} , E_1 and E_2) were then calculated based on their relationship with density (Grandmont et al, 2011) and assigned to each element of the mesh based on the horizontal density mapping of the OSB web panels. A total of 100 simulations were performed. Half of them ($n=50$) were made on the shear critical I-joist model while the other half were made on the moment critical I-joist model. The in-plane X-ray horizontal density scan results of the 40 standard size OSB panels were used to get different density patterns. The 40 panels were virtually cut in strips of dimensions corresponding to I-joists web considered in the two different I-joist models. The fifty strips were randomly chosen to be used as reference for each I-joist dimension.

Further modeling work was performed to consider the impact of the I-joist OSB web vertical density profile (through thickness) on deflection and shear strain. Grandmont et al. (2011) measured the vertical density profile of tension test samples obtained from the OSB considered in the current study. The samples vertical density profiles were determined using a X-ray densitometer (QMS QDP-01X density profiler). The elastic properties were

calculated on the basis of the compiled vertical density profiles. These properties were then used to characterize the OSB web in the shear critical I-joist model previously used to introduce property variability. A smaller mesh size was used (0,00635m compared to 0,0254m) to have three layers of homogeneous brick elements across the OSB web thickness. Therefore, the vertical density profile was discretized in three average density values: 800, 641 and 727 kg/m³ (Grandmont et al. 2011).

4.4 Results and discussion

4.4.1 Phase 1. Comparison of wood I-joist bending experimental results with model results for a homogeneous OSB web

Tables 4.1 and 4.2 present model and experimental results obtained for I-joist deflection and shear strain without considering OSB web density variation in-plane and across thickness. Shear strain is presented for each shear section of the I-joists. Table 4.1 presents the results obtained for the moment critical I-joist where there were four shear strain measurement locations for one-half of a joist (Fig. 4.3).

Table 4.1: Moment critical I-joist shear strain and deflection results without considering web OSB density variation. Coefficients of variation are given in parenthesis.

	I-Joist*	Shear Strain $\times 10^{-4}$				Deflection mm
		Section 1 (near left reaction point)	Section 2	Section 3	Section 4 (close to center)	
Simulation (n=4)	Par 01	9.56	7.21	4.81	2.42	14.80
	Par 02	9.50	7.19	4.80	2.39	16.49
	Per 03	9.43	7.13	4.76	2.37	15.59
	Per 04	9.44	7.14	4.79	2.38	16.09
Experimental (n=4)	Par 01	14.63 (34%)	11.00 (52%)	5.26 (44%)	2.90 (48%)	13.38
	Par 02	11.54 (15%)	10.95 (24%)	4.75 (31%)	2.59 (46%)	14.52
	Per 03	12.68 (26%)	7.99 (60%)	2.79 (60%)	2.14 (70%)	14.09
	Per 04	12.06 (36%)	10.06 (50%)	6.88 (56%)	3.79 (37%)	14.50
Difference % **	Par 01	-35	-34	-9	-17	11
	Par 02	-18	-34	1	-8	14
	Per 03	-26	-11	70	11	11
	Per 04	-22	-29	-30	-37	11

*Orientation of the web OSB major axis to the joist length (par=parallel, per=perpendicular)

** Difference between simulated results and experimental results.

Moment critical I-joist deflection differences between simulated and experimental results (Table 4.1) are consistent, varying from 11 to 14%. These differences can be considered small and in line with the literature, especially considering the wooden flange inherent variability (Chui et al 2007, Zhu 2003, Fergus 1979). Shear strain experimental results are averaged from measurements made on both sides of the web and on each side of the I-joist centreline, meaning that there were four measurements for each experimental shear strain result presented. Table 4.1 presents the average shear strains and their coefficients of variation (COV). The results show how variable was the shear strain measurements with COVs ranging from 15 to 70%). The shear strain differences for section 1 (near the reaction point) and section 2 are fairly stable (Table 4.1) which indicates that a systematic error might be involved. The differences between simulated and experimental results are varying from 11 to 35% which remains in an acceptable range given the high variability of the

experimental shear strains. Following sections 1 and 2 from reaction point to the center, sections 3 and 4 strain differences are more variable although some simulation results are close to experimental results with differences as low as 1%. Despite some close results, it does not allow a valuable comparison since differences for sections 3 and 4 are in the range of -37% to 70%. The differences are believed to be due to difficulties to measure very small shear deformations near the I-joist center. Other possible issues will be discussed below.

Table 4.2 presents results for the shear critical I-joist for which there was only one shear section. It shows again that the differences between the simulation and experimental deflection results are fairly stable although they are larger than for the moment critical I-joists. Those larger differences (from -9% to -24%) might be attributed to a difficulty to simulate the OSB web since shear stress has more impact on deflection for shear critical I-joists than for moment critical I-joists. The differences in shear strain were much higher ranging from -5 to 198%. Moreover, measurement showed high variability similarly to what was observed with the moment critical I-joist resulting in high COV (ranging from 32 to 72%). That particular variability could be due to the assumption that the web is an homogeneous material which might not be appropriate for OSB.

Table 4.2 : Shear critical I-joist shear strain and deflection results without considering web OSB density variation. Coefficients of variation are given in parenthesis.

I-Joist* (n=8)	Simulation		Experimental		Difference % **	
	Shear strain $\times 10^{-4}$	Deflection (mm)	Shear strain $\times 10^{-4}$	Deflection (mm)	Shear strain	Deflection
Par 01	9.58	2.84	3.22 (62%)	3.31	198	-14
Par 02	9.59	2.83	4.80 (44%)	3.12	100	-9
Par 03	9.60	2.89	5.07 (72%)	3.47	89	-17
Par 04	9.58	2.89	10.04 (41%)	3.73	-5	-22
Per 01	9.55	2.70	8.75 (59%)	3.54	9	-24
Per 02	9.55	2.69	6.29 (35%)	3.39	52	-21
Per 03	9.50	2.73	6.29 (32%)	3.21	51	-15
Per 04	9.52	2.72	9.79 (57%)	3.53	-3	-23

*Orientation of the web OSB major axis to the joist length (par=parallel, per=perpendicular)

** Difference between simulated results and experimental results.

Fig. 4.6 shows the short span test configuration including its web-to-web joint location for sample Par04. The shear strain measured was twice as much (13.5×10^{-4} compared to 6.57×10^{-4} , average values are presented in Table 4.2) on the left hand side of the joint (vertical bar on the web) than on the right hand side. That particular case was not unique. It is thus believed that a web to web joint can introduce a shear distribution discontinuity into the web. Obviously, that type of joint is not always at the same place and thus does not always have the same impact on the I-joist behavior.

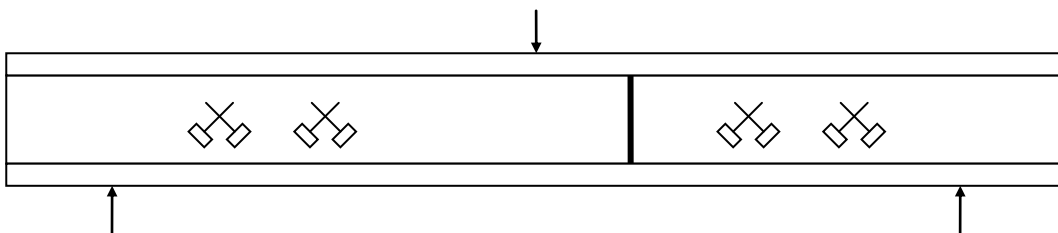


Figure 4.6: Shear critical test setup and web-to-web joint location for sample Par04 (drawing not to scale) where X drawings represent shear strain measurement locations and the bold vertical line is a web to web joint.

Overall, phase 1 shows that the model considering homogeneous material properties for the OSB web gives good deflection results. Differences between predicted and measured

deflection results are in an acceptable range and are in line with data available in the literature (Zhu, 2003, Chui et al. 2007). Simulation of moment critical I-joist gave more accurate results than shear critical I-joists. As shear critical I-joist deflection is more influenced by shear stiffness of the web, it's likely that a better OSB web simulation could improve the results. Overall, the quality of the comparison between modelled and measured shear deformation is not clear. Experimentally measured shear deformation are good when near the reaction point (section 1). That section is mainly affected by shear stress and shear deformations are larger, thus easier to measure. When moving to section 3 or 4, not only shear deformation are smaller, but there is more tensile stress. It is then likely that the 45° measurement was then measuring the effect of a mixed stress. Despite of that, when shear is clearly the main stress, comparison could be adequate as shown by the results near the reaction point for moment critical I-joists. It was shown that in this situation, shear strain differences were constant. In this situation, the shear strain was underestimated by the model and deflection was slightly overestimated. This is leading to believe that the web simulated behavior could be improved although the I-joist simulated deflection behavior might not be improved by much since it is already good. Therefore, OSB web density and elastic properties variability were considered in phase 2 to improve the model.

4.4.2 Phase 2. Modeling wood I-joist bending considering OSB web density and elastic properties variability

Web OSB elastic properties variability was introduced in the model using regression equations between density and elastic properties (G_{12} , E_1 and E_2) previously established by Grandmont et al. (2010b). Fig. 4.7 shows an in-plane density mapped web OSB panel. The panel size is the same as the shear critical I-joist web. The I-joist web considered for simulation is 0.225m deep by 1.5m long since half of the 3m long I-joist is simulated due to symmetry. The I-joist section considered is shown in Fig. 4.5 with element size of approximately 25.4mm x 25.4mm in-plane of the OSB web panel, matching the scanner grid size used for the in-plane (horizontal) density measurement. The elastic properties were calculated for each web element based on its corresponding density. A reference simulation using homogeneous web properties was first run in Abaqus CAE 6.4.1.

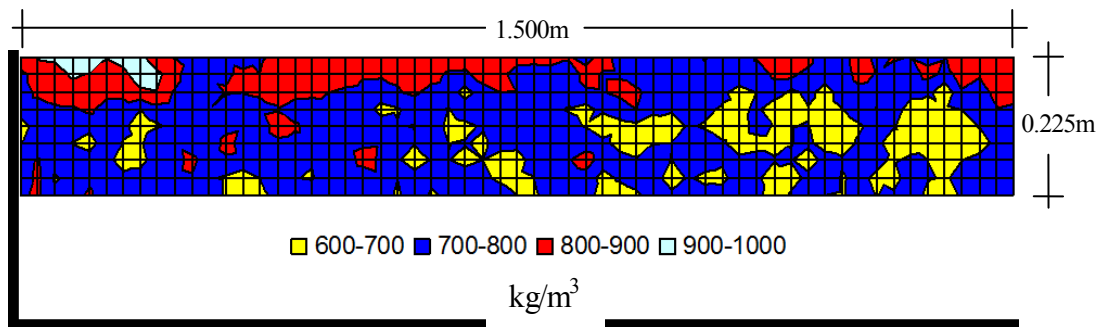


Figure 4.7: Horizontal (in-plane) density mapping of I-joist web OSB (web #31)

Simulation results of the wood I-joist based on the web section shown in Fig. 4.7 are presented in Figs. 4.8 and 4.9. Fig. 4.8 I-joist was simulated with homogeneous properties based on the average density of the web (718.89 kg/m^3) and shows a uniform web shear stress distribution as expected. Fig. 4.9 shows a more variable shear stress distribution due to the web OSB density and elastic properties variability. In this particular case, properties variability does not add concentrated stress zones in a significant way. On the other hand it clearly changes the stress distribution pattern. Higher stress levels occur in the OSB web. Concentrated stress zones might affect the elastic behavior of the I-joist as well as the behavior in the plastic domain. On the contrary to the elastic behavior, the plastic behavior is not considered in this study. On the other hand, concentrated stress zones might initiate fracture which could initiate a plastic behavior as well as modifying the fracture mode for I-joist.

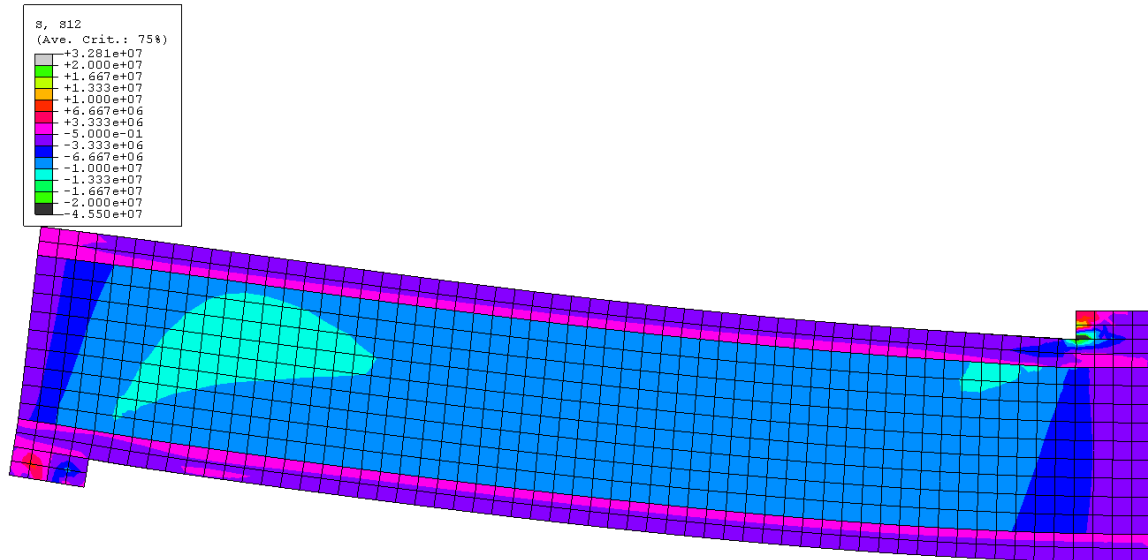


Figure 4.8: Shear stress of shear critical I-joist (3m) with homogeneous web properties (properties calculated based on the average density of the 50 simulated webs)

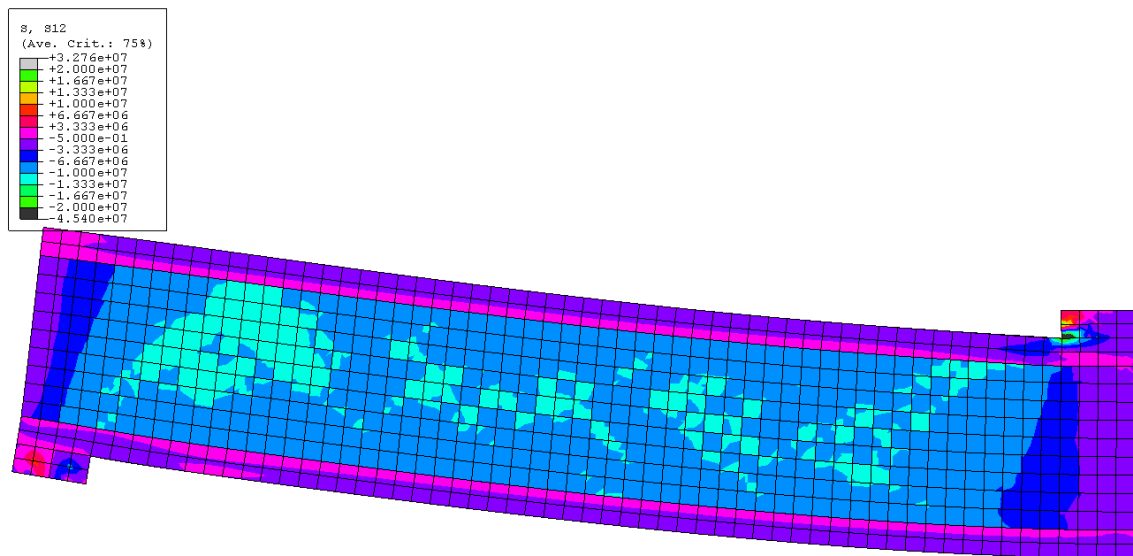


Figure 4.9: Shear stress of shear critical I-joist (3m) I-joist with heterogeneous web properties (with simulated web #31 shown in Fig. 4.5)

Fig. 4.9 shows a typical shear distribution although all the other 49 simulated joists with heterogeneous web properties have slightly different shear stress patterns due to their different density distribution patterns.

The results obtained for moment critical I-joist shear stress (6m long with 10 points loading) are similar, leading to the same conclusions. If the web shear stress distribution is slightly affected, the joist deflection barely changes. Fig. 4.10 and Fig. 4.11 show deflection results relative to the average web density for the 50 simulated short and the 50 simulated long joists respectively. The assumption of heterogeneous web OSB elastic properties does affect I-joist deflection but in a very limited way (Fig. 4.10 and Fig. 4.11). In both cases though, it barely increases deflection. On the other hand, when the OSB web density pattern shows a lot of variability such as web section #31 (which is represented in Fig. 4.7 and pointed out in Fig. 4.10), the effect on deflection seems to increase. Further work shall include the impact of web holes combined with heterogeneous web properties to see if the combination of these two elements would increase I-joists deflection and shear strain.

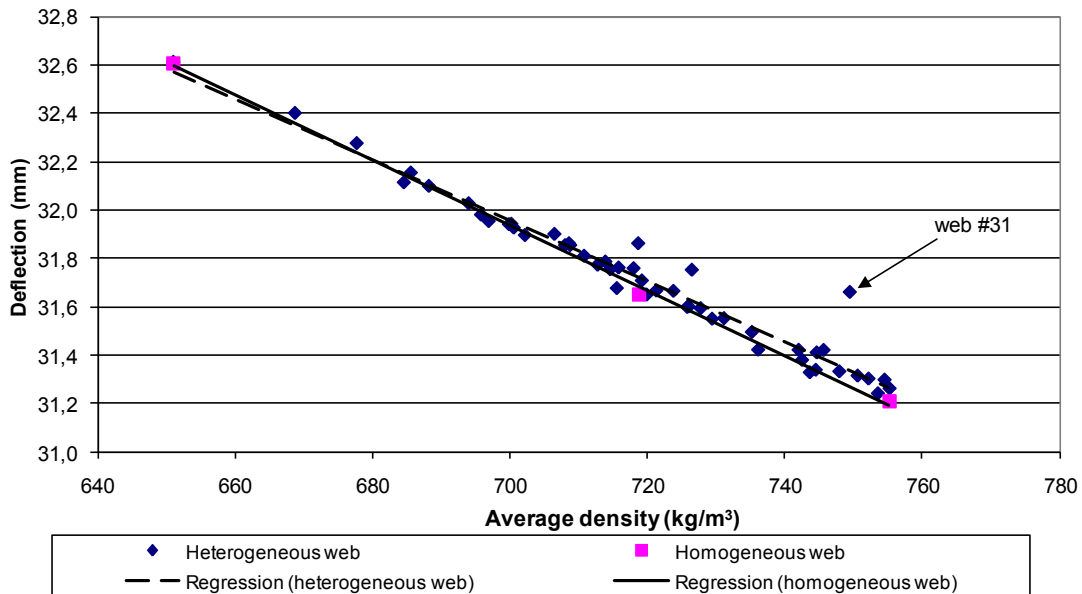


Figure 4.10: Shear critical (3m) I-joist with homogeneous / heterogeneous web properties deflection comparison based on the average density of the I-joist web

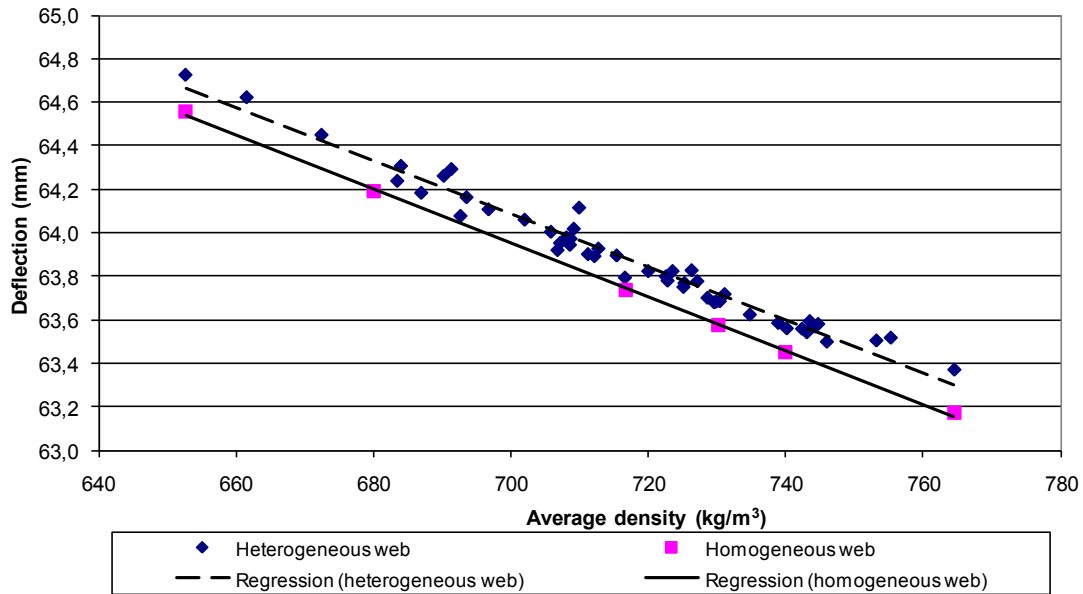


Figure 4.11: Moment critical I-joist (6 m) with homogeneous / heterogeneous web properties deflection comparison based on the average density of the I-joist web

Finally, the impact of web stock OSB vertical density profile was investigated. The results in terms of shear stress and I-joist lateral displacement are shown in Figs. 4.12 and 4.13. As expected, Fig. 4.12 shows that shear stress is lower on the lower density side (a) than on the higher density side (b). This leads to a lateral displacement of the I-joist shown in Fig. 4.13. Such behavior could lead to structural instability due to buckling of the joist. The introduction of the density profile also affected joist deflection. When calculated at the center of the bottom flange, it changes from 31,76 mm to 32,07 mm (1% increase) when considering the vertical density profile. The OSB mechanical properties variability across the thickness of the panel has then a similar influence over the maximum deflection than the variability in the plane of the panel. As the variability across the thickness would more easily be changed in the manufacturing process of the OSB panels, it could be addressed before the horizontal variability.

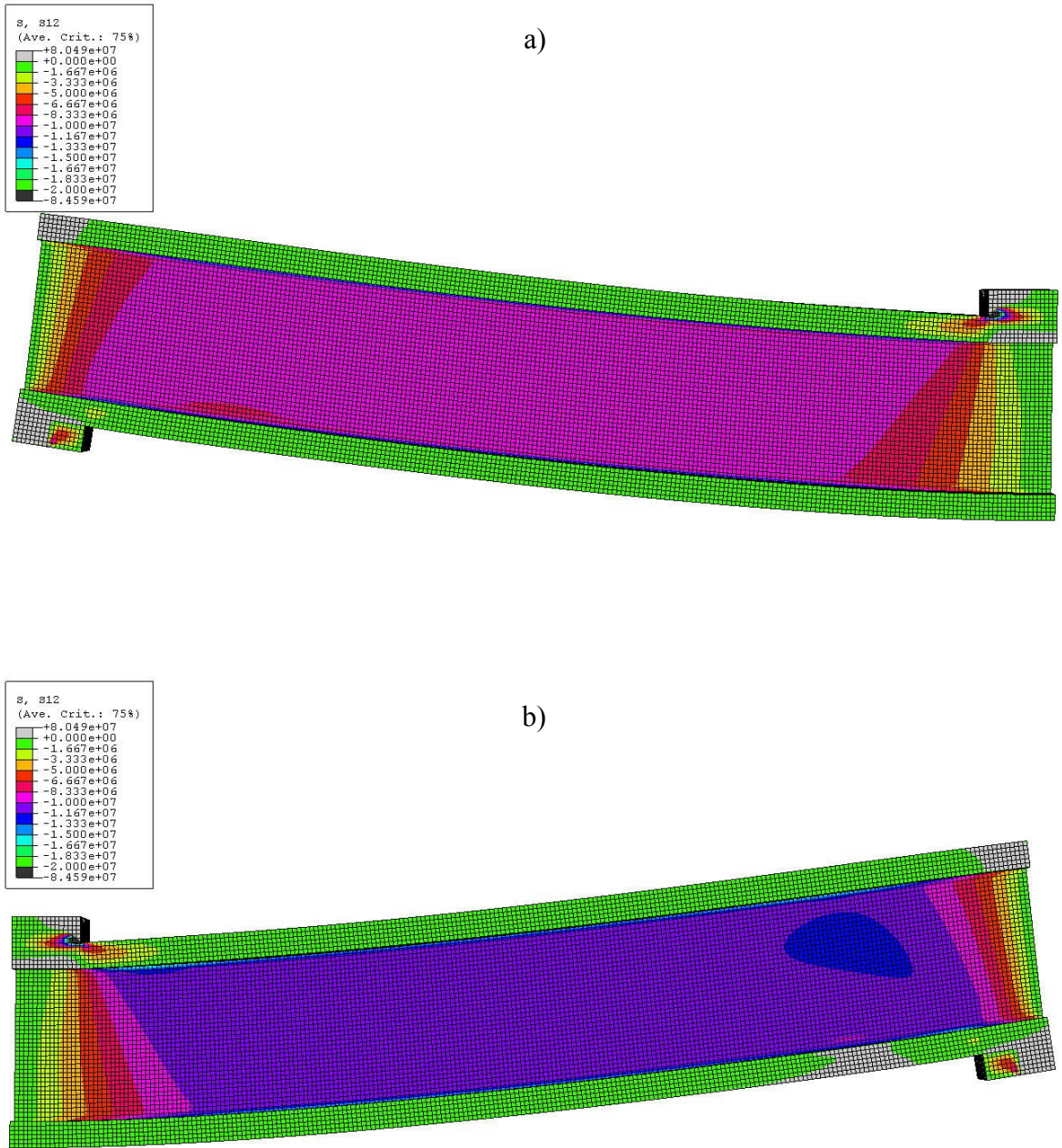


Figure 4.12 : Density profile effect over shear stress (Pa) on a) the lower density side and b) the higher density side

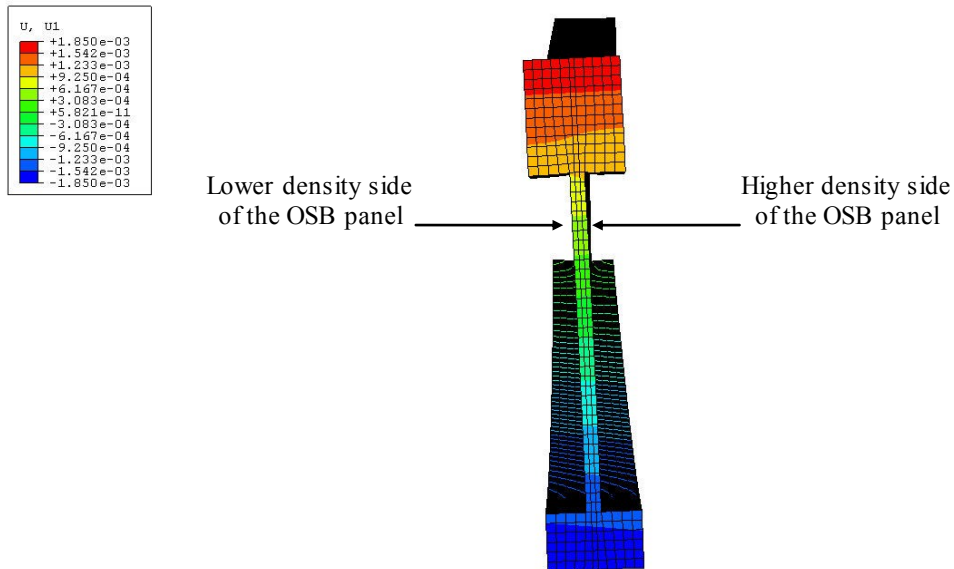


Figure 4.13: Vertical density profile effect on lateral displacement (m).

4.5 Conclusion

A model that simulates wood I-joist deflection was developed to get a better understanding of the impact of the OSB web elastic properties. A comparison of a first model assuming homogeneous elastic properties was performed. It was followed by the introduction of the OSB web elastic properties variability in the plane and across thickness.

A comparison of a simulated and experimental I-joist deflection results was performed. Good agreement for wood product was obtained between predicted and experimental deflection results with differences between 9 to 24% which is in agreement with the literature. However, moment critical I-joists showed better agreement than shear critical I-joists. As shear critical I-joist deflection is more sensitive to the OSB web mechanical properties. A second part of the study was then done to develop a more realistic web simulation, considering heterogeneous OSB properties to potentially improve shear critical I-joist simulation results. Regarding shear strains, accurate measurements were difficult to obtain in the web sections resulting in high variability of the shear strain data. It is then

impossible to draw clear conclusions about model performance in simulating shear strain development.

The consideration of OSB web elastic properties variability was done using previously determined density-mechanical properties relationships and horizontal density distribution (density mapping) of OSB panels obtained from X-ray densitometry. Density variation and the resulting mechanical properties variation in the plane of the board clearly alters shear stress distribution in the web, but it had a limited impact on joist deflection which generally increased by less than 1% when considering in-plane elastic properties variability. The consideration of the density profile across the OSB web thickness did affect lateral displacement of the web but had a limited impact on I-joist deflection which increases by only 1%. OSB panel's improvement considering the variability shall then start by addressing the variability across the thickness as it would be more easily achieved considering the manufacturing process. As it would be difficult to greatly reduce the horizontal variability, it would simply be recommended to try not exaggerate it as it has a very limited influence over the elastic behavior.

Overall, the consideration of the OSB web density and mechanical properties variability in the model does not entirely compensate for the differences obtained between the model and experimental results observed. However, further work on I-joists with web holes could benefit from the introduction of OSB variability since it is believed that their combination might have a greater effect on I-joist deflection than when considered separately. The plastic behavior of OSB was not investigated but the variability of the OSB mechanical properties could change the plastic and rupture behavior of the wood I-joist. Further work shall then include an extension of the model to explore the plastic domain.

Chapitre 5 : Conclusion générale et travaux futurs

Les poutrelles en I faites à partir de semelles de bois massif aboutées en longueur et d'une âme en panneaux de lamelles orientées (OSB) sont un des symboles du renouveau des produits du bois. C'est un des nombreux produits classés sous la bannière des bois d'ingénierie qui a connu un important succès commercial. Bien que développées sous des principes d'ingénierie, les poutrelles en I présentent un potentiel d'amélioration lié à une meilleure connaissance du comportement des matériaux qui la composent. L'étude du comportement des poutrelles peut être faite de diverses manières suivant deux catégories principales : les méthodes expérimentales et les estimations via des simulations ou calculs analytiques.

Une revue de littérature portant sur l'utilisation de simulations numériques pour estimer le comportement des poutrelles en I a été effectuée afin d'en évaluer le potentiel. Cela a démontré que des modèles basés sur les éléments finis permettaient de simuler adéquatement le comportement des poutrelles en bois à configuration en I lorsqu'elles sont soumises à un effort de flexion. Le comportement de l'âme en OSB ainsi que l'impact de ses caractéristiques intrinsèques n'ont cependant pas été considérés dans les études relevées. Il était dès lors possible que les différences observées entre les résultats de simulation et expérimentaux soient dus à une simulation pas assez réaliste des caractéristiques de l'âme.

L'objectif général du projet était conséquemment de développer un modèle permettant de simuler le comportement des poutrelles en I à base de bois afin d'avoir une meilleure compréhension de l'impact des propriétés de l'âme sur l'ensemble du système.

Pour parvenir à cet objectif, trois étapes se sont succédées. Une étude sur la sensibilité d'un modèle à différentes propriétés mécaniques de l'OSB a tout d'abord été menée. Cette étude a permis de déterminer les propriétés mécaniques les plus importantes à mesurer de manière précise afin d'adéquatement simuler l'âme en OSB des poutrelles en I. Suite à cela, les propriétés mécaniques les plus importantes ont été déterminées expérimentalement. Étant donnée la nature de l'OSB qui lui confère une grande variabilité locale, ces propriétés mécaniques ont été déterminées localement. Les poutrelles en I ont par la suite été simulées

dans un modèle numérique en intégrant au besoin les notions de variabilité locale des propriétés mécaniques de l'âme en OSB.

L'étude de sensibilité a porté sur les propriétés mécaniques de l'OSB utilisées pour l'âme pour déterminer quels étaient les plus influents pour la déflexion de la poutrelle et les déformations en cisaillement dans l'âme. Le modèle s'est révélé être avant tout sensible au module de rigidité en cisaillement dans le plan du panneau (G_{12}) en modifiant la déflexion de la poutrelle jusqu'à 23%. Le modèle s'est aussi montré sensible aux modules d'élasticité dans le plan de l'âme en OSB en direction parallèle (E_1) et perpendiculaire (E_2) à la longueur des poutrelles. La déflexion de la poutrelle a respectivement été modifiée de 2% et 1% pour ces propriétés.

La suite de l'étude a entre autre fait appel à des essais expérimentaux portant sur les panneaux OSB ainsi que sur le bois. Le bois ainsi que certains produits fabriqués à partir de ce dernier, comme les panneaux OSB, sont hétérogènes. Cette particularité implique une variabilité des propriétés mécaniques certaine, assujettissant les résultats à une marge d'erreur plus grande en comparaison à un matériau tel l'acier. La comparaison d'essais expérimentaux à des résultats de simulation peut donc être problématique dans le cas des poutrelles en I à base de bois puisque la variabilité des propriétés mécaniques n'est pas prise en compte lors de la modélisation.

La détermination des propriétés mécaniques auxquelles le modèle numérique de l'OSB est sensible a ensuite été effectuée suivant une méthodologie basée partiellement sur une équation de la mécanique des solides. Cette équation demandait l'utilisation des modules d'élasticité en tension dans le plan du panneau suivant l'orientation préférentielle des lamelles de surface, perpendiculaire à ces dernières et en diagonale à 45° entre les deux premières directions. Les résultats ont montré une forte relation entre la masse volumique de l'OSB et les propriétés mécaniques pour un produit du bois. Les coefficients de détermination (R^2) de ces relations varient de 0,57 à 0,79. Cela a fourni les informations nécessaires pour ultimement inclure les propriétés mécaniques de l'OSB en fonction de la masse volumique dans un modèle simulant l'âme des poutrelles en I. Les propriétés mécaniques de l'OSB se sont montrées assez variables dans la gamme de masse volumique considérée. On a observé une augmentation de 207% du MOE en tension dans la direction

parallèle à l'axe de formation du panneau OSB, de 187% dans la direction perpendiculaire à cet axe et de 172% à 45° avec cet axe lorsque la masse volumique des panneaux passait de 600 à 900 kg/m³. L'équation basée sur la mécanique pour déterminer le module de cisaillement s'est révélée être justifiée et fiable.

Les simulations et essais de laboratoire ont finalement été effectués. En premier lieu, la flèche et les déplacements relatifs en cisaillement dans l'âme ont été comparés entre des résultats de simulation considérant une âme et des semelles homogène et des résultats d'essais expérimentaux. Les résultats de simulation se sont révélés être près de ceux de laboratoire pour des produits à base de bois avec des différences de déflexion se situant entre 9 et 24%. Une partie de ces écarts peut-être expliquée par la simplification des matériaux simulés en les considérant comme étant homogènes. Les déplacements relatifs en cisaillement ont quant à eux été surestimés par le modèle. Les différences étaient potentiellement dues, elles aussi, à la variabilité locale du matériau. Cette variabilité a ensuite été introduite dans le modèle en se basant sur les équations de régression linéaires déterminées entre la masse volumique et les propriétés mécaniques de l'OSB. Les résultats de simulation considérant la variabilité des propriétés mécaniques (n=100) ont été comparés avec d'autres considérant l'OSB comme étant homogène (n=100). La distribution des contraintes de cisaillement dans le plan du panneau a été modifiée dans tous les cas et la flèche a en moyenne légèrement augmenté (moins de 1%). En se basant sur la relation entre la masse volumique et les propriétés mécaniques de l'OSB, l'effet du profil de masse volumique à travers l'épaisseur du panneau OSB a été simulé. Une augmentation de la flèche de l'ordre de 1% a été observée ainsi qu'un déplacement latéral des semelles.

L'étude de sensibilité, la détermination des propriétés mécaniques, l'établissement d'une relation entre la masse volumique de l'OSB et ses propriétés mécaniques et les différentes simulations ont permis d'atteindre l'objectif général du projet. La compréhension de l'impact des propriétés de l'âme en OSB sur le comportement des poutrelles en I s'en est approfondie. Les conséquences de cette étude portent sur les plans scientifique et industriel.

Du côté scientifique, il a été démontré que seules quelques propriétés mécaniques de l'OSB ont une influence sur le comportement des poutrelles. Une détermination des propriétés mécaniques à petite échelle a été effectuée sur des échantillons de panneau OSB de densité

connue. Cela a permis une meilleure connaissance de la variabilité des propriétés mécaniques de l'OSB en plus de permettre d'établir un lien fort entre ces propriétés et la densité du panneau. Ces contributions scientifiques ont permis ultimement d'intégrer la variabilité des propriétés mécaniques dans un modèle permettant ainsi d'évaluer l'influence restreinte dans le domaine élastique sur les résultats de simulation.

Du côté industriel, cette étude contribue à pouvoir mieux cibler quelles sont les propriétés mécaniques déterminantes à considérer pour le panneau OSB dans le but d'influencer les performances des poutrelles. Le contrôle de la qualité des panneaux OSB utilisés aurait donc avantage à considérer la rigidité en cisaillement dans le plan du panneau, ce qui diminuerait probablement les incertitudes face à la performance des produits finis. Finalement, les résultats de simulation incluant la variabilité des propriétés mécaniques indiquent qu'il serait souhaitable de ne pas augmenter davantage la variabilité des propriétés mécaniques dans le plan du panneau ou à travers son épaisseur. Dans un but d'augmentation des performances des poutrelles, la réduction de la variabilité à travers l'épaisseur du panneau pourrait cependant être envisagée en premier puisque le mode de production des panneaux permet un bien meilleur contrôle à ce niveau en comparaison à la variabilité dans le plan du panneau.

L'ensemble de ces résultats et conclusions ouvre la porte à de nouvelles interrogations menant à suggérer des travaux à réaliser. Les résultats suivant l'intégration de la variabilité nous ont montré que la distribution des contraintes en cisaillement dans le plan du panneau était affectée. Si cela n'a pas eu un impact majeur sur le comportement dans le domaine élastique, il est possible que cela génère des concentrations de contraintes suffisantes dans le domaine plastique pour influencer le comportement ou le mode de rupture. Une extension du modèle au domaine plastique est donc souhaitable à cet effet. Toujours dans le domaine plastique, il serait souhaitable d'étudier l'influence conjointe des ouvertures dans l'âme et de la variabilité des propriétés mécaniques. Il serait possible de valider un tel modèle en fabriquant des poutrelles en I dont la variabilité de la densité dans l'âme en panneau OSB serait connue.

La présente étude s'est aussi limitée à l'étude de certains paramètres en fixant, par exemple, la hauteur de la poutrelle. Il serait souhaitable d'étendre le modèle afin d'inclure plusieurs

profondeurs et épaisseurs d'âme afin d'en étudier l'impact en incluant la variabilité des propriétés mécaniques. Les joints âme-âme ainsi qu'âme-semelles auraient eux aussi avantage à être inclus dans une extension de la présente étude afin d'en isoler l'influence. Finalement, la variation des propriétés mécaniques devrait être intégrée simultanément dans le plan du panneau et à travers l'épaisseur afin de rendre encore plus réaliste le modèle proposé.

Bibliographie

ABAQUS. 2003. *ABAQUS/CAE 6.4.1 — Suite logiciel pour simulation par éléments finis.*

ABAQUS inc. Providence, RI, USA.

American Society for Testing and Materials International (ASTM). 2005. *Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists.* ASTM D5055-05. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials International (ASTM). 2006. *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials.* D1037-06a. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials International (ASTM). 2006-b. *Standard Test Methods for Structural Panels in Planar Shear (Rolling Shear).* D2718 - 00(2006). ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials International (ASTM). 2007. *Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness.* D2719-89. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials International (ASTM). 2009. *Standard Test Methods for Structural Panels in Tension.* ASTM D3500 - 90. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

Blanchet P., 2004, *Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie.* Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada. 116 pp.

Blanchet P., Gendron G., Cloutier A., Beauregard R., 2005, *Numerical prediction of engineered wood flooring deformation.* Wood Fiber Sci 37(3): 484-496.

Bodig, J. and B. A. Jayne. 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites.* Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 712 pp.

- Boise Cascade, 2009, *All-Joist specifier guide*. Products guides and resources, http://www.bc.com/dms/wood/ewp/3_Guide_Resources/canada/alljoist_ca_spec_english_complete0/alljoist_ca_spec_english_complete.pdf (11 mai 2010).
- British Standards Institution (BSI). 1996. Timber structures. *Test methods. Determination of mechanical properties of wood-based panels*. BS EN 789:1996. British Standard Institution, London.
- Chui, Y. H., G. Parade, and L. Shouyong L. 2005. *Enhancing shear and bearing strength of wood I-joists*. Report presented to the Value to Wood Program, Natural Resources Canada, University of New Brunswick. 78 pp.
- Chui, Y. H., Q. Wang, and G. Pirzada. 2007. *Influence of OSB web stock properties on performance of wood I-joists*. Report presented to the Value to Wood Program, Natural Resources Canada, University of New Brunswick. 63 pp.
- Canadian Standard Association (CSA). 1988. *Test methods for construction sheathing*. CAN/SCA-0325.1-88. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario Canada
- Canadian Standard Association (CSA). 1994. *Design Rated OSB: Specification, test methods, quality assurance*. CSA-0452. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario Canada
- Canadian Standard Association (CSA). 1994-2. *Engineering Design in Wood (Limit State Design)*. CSA-086.1. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario Canada
- Canadian Wood Council (CWC), 1996, *Introduction au calcul des charpentes en bois*, Ottawa : Canadian Wood council, 250 p.
- Fisette P., 2000, *The Evolution of Engineering Wood I-Joist*, http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joist.html (2 juillet 2003), University of Massachusetts

- Fergus D.A., 1979, *Effect of web voids and stiffeners on the structural performance of composite beams*. Thèse de doctorat, Purdue University, West Lafayette, IN. 220 pp.
- Forest Products Laboratory. 2010. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.
- Grandmont J.-F., Thivierge C., Cloutier A., Gendron G., 2006, *Determination of engineering properties and modeling of wood I-joists*. Page 269 in WCTE Proceedings, 6-10 August 2006, Portland, Oregon.
- Grandmont, J.-F., A. Cloutier, G. Gendron, R. Desjardins. 2010. *Wood I-joist model sensitivity to oriented strandboard web mechanical properties*, Wood Fiber Sci, 42(3):352-361
- Grandmont, J.-F., A. Cloutier, G. Gendron, R. Desjardins. 2011. *Effect of Density on the Properties of Oriented Strandboard Web Stock Used in Wood I-Joists*, Forest Prod. J. 60(7/8):592–598
- Guan, Z. W., and E. Zhu. 2004. *Nonlinear finite element modeling of crack behavior in oriented strand board webbed wood I-beams with openings*. J. Struct. Eng. 130(10):1562–1569. Guitard, D. G. 1987. *Mechanics of Wood and Wood Composites (in French)*. Cepadues Editions, Toulouse, France. 238 pp. (In French.)
- Jessome A.P., 1995, *Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada*. Forintek Canada Corp, Canada. 37 pp.
- Karacabeyli, E., P. Lau, C. R. Henderson, F. V. Meakes, and W. Deacon . 1996. *Design rated oriented strandboard in CSA standards*. Can. J. Civil Eng. 23(2):431–443.
- Laforest, P. et M. Goulet, 1994, *Notes de cours sur la mécanique du bois*, Université Laval. Sainte-Foy, Canada. 134 p.

- Leichti R.J., Robert H.F., Theodore L.L., 1990, *Prefabricated wood composite I-beam : A literature review*, Wood and fiber science, 22(1),pp.62-79
- Ménard, S., 1999, *Poutrelles triangulées en bois, à membrures parallèles et diagonales aboutés comme système porteur principal de structures horizontales*. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 142 pp.
- MD Solids. 1999. *MDSolids V1.7 — Suite logiciel de calcul d'ingénierie*. Wiley, John Wiley & Sons, inc. Hoboken, NJ, USA.
- Morris, V., P. J. Gustaffson, and E. Serano. 1996. The shear strength of lightweight beams with and without a hole—A preliminary study. In: Wood Mechanics: Workshop on Mechanical Properties of Panel Products, March 22–23, 1995, Watford, Hertfordshire, UK. pp. 199–214.
- Ozelton, E. C., Baird, J. A. 1976. *Timber designers' manual*. Granada Publishing Ltd, London, UK.
- Roy, R., Craig, Jr. 2000. *Mechanics Of Materials – 2nd edition*. John Wiley & sons, New York, United States of America. 752pp.
- SAP IV. 1976. *SAP IV — Logiciel pour simulation par éléments finis*. University of California, Berkeley, California, USA.
- SAP 2000. 2002. *SAP2000 Nonlinear version 8— Suite logiciel pour simulation par éléments finis*. Computers and Structures Inc (CSI), Berkeley, California, USA.
- Thomas, W. H. 2003. *Poisson's ratio of an oriented strand board*. Wood Sci. Technol. 37:259–268.
- United State Department of Agriculture (USDA), 1999, *Wood handbook – Wood as an Engineering Material*, USDA general technical report, 489 p.
- Weyerhaeuser, 2009, *#TJ-4500 Specifier's guide*. Product literature, <http://www.ilevel.com/literature/TJ-4500.pdf> (11 May 2010).

- Xiao Dong Wang. 2007. Designing, modelling and testing of joints and attachment systems for the use of OSB in upholstered furniture frames, Université Laval Ph.D. Thesis.
- Zhu, E. 2003. *Modelling the structural behavior of OSB webbed timber I-beams*. PhD thesis. University of Brighton, Brighton, UK. 159 pp.
- Zhu, E., Z. W. Guan, D. J. Pope, and P. D. Rodd. 2005. *Buckling of oriented strand board webbed wood I-joists*, J. Struct. Eng. 131(10):1629–1636.
- Zhu, E., Z. W. Guan, D. J. Pope, and P. D. Rodd. 2007. *Effect of openings on oriented strand board webbed wood I-joists*. J. Struct. Eng. 133(1):145–149

Annexe 1 : Photos additionnelles



Figure A1.1: Dispositif d'essai en flexion pour poutrelle longue sensible aux moments fléchissant à huit points de chargement.



Figure A1.2: Dispositif d'essai en flexion pour poutrelle courte sensible au cisaillement à un point de chargement central.



Figure A1.3: Transducteur d'extension à câble PT 101 d'Intertechnology utilisé pour mesurer les déformations axiales à 45° dans l'âme des poutrelles en I lors d'essais en flexion.



Figure A1.4 : Panneau OSB recouvert de la cartographie horizontale de sa masse volumique . Des échantillons à être découpés ont été dessinés dans des zones de masse volumique homogène.

Annexe 1 : Exemple de fichier de commande ABAQUS

```

*Heading
** Job name: changing-original-long-joist-8pts Model name: model_sensitivity_long-joist-
8pts
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=pout-long-8pts-pour-pouces
*End Part
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=pout-long-8pts-pour-pouces-2, part=pout-long-8pts-pour-pouces
*Node
    1,    0.03675,    0.225,    0.

[Continuation de l'énumération des nœuds jusqu'à :]

16762,    0.,    0.2125,    0.
*Element, type=C3D20R
    1, 196, 1591, 4361, 1587,    1, 131, 150,    4, 4804, 4803, 4802, 4801, 4805, 4806, 4807,
    4808, 4810, 4809, 4811, 4812

[Continuation de l'énumération des éléments jusqu'à :]

2502, 4360,    150,    4, 1566, 3424,    160,    6, 1543, 16719, 4807, 16761, 16757,
16720, 4897, 16762, 16758, 16718, 4896, 4898, 16760
*Orientation, name=Ori-1
    0.,    0.,    -1.,    0.,    1.,    0.
1, 0.
** Region: (flange:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
    1, 1416,    1
** Section: flange
*Solid Section, elset=_PickedSet2, orientation=Ori-1, material=flange
1.,
** Region: (blocs:Picked), (Material Orientation:Picked)

```

```

*Elset, elset=_PickedSet4, internal, generate
1417, 1440, 1
** Section: blocs
*Solid Section, elset=_PickedSet4, orientation=Ori-1, material=acier
1.,
** Region: (web:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet3, internal, generate
1441, 2502, 1
** Section: web
*Solid Section, elset=_PickedSet3, orientation=Ori-1, material=web
1.,
** Region: (web:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet1000, internal, generate
1417,1417
** Section: web
*Solid Section, elset=_PickedSet1000, orientation=Ori-1, material=web1000
1.,

```

[Continuation de l'énumération des groupe d'éléments, de leur orientation ainsi que du matériau attribué à ce groupe jusqu'à :]

```

** Region: (web:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2061, internal, generate
2478,2478
** Section: web
*Solid Section, elset=_PickedSet2061, orientation=Ori-1, material=web2061
1.,
*End Instance
*Nset, nset=_PickedSet171, internal, instance=pout-long-8pts-pour-pouces-2
125, 128, 1527, 1528, 11688, 11710, 11726
*Elset, elset=_PickedSet171, internal, instance=pout-long-8pts-pour-pouces-2, generate
1417, 1425, 4
*Nset, nset=_PickedSet172, internal, instance=pout-long-8pts-pour-pouces-2
1, 4, 6, 8, 11, 12, 61, 64, 66, 68, 71, 72, 193, 194, 195, 196
887, 888, 889, 890, 1543, 1544, 1545, 1546, 1547, 1548, 1549, 1550, 1559,
1560, 1561, 1562
1563, 1564, 1565, 1566, 1587, 1588, 2043, 2044, 4801, 4808, 4810, 4812, 4893,
4898, 4900, 4951
4956, 4958, 5009, 5014, 5016, 5067, 5071, 5102, 5106, 8240, 8247, 8249, 8251,
8332, 8337, 8339
8390, 8395, 8397, 8448, 8453, 8455, 8506, 8510, 8541, 8545, 16721, 16724, 16725,
16726, 16729, 16730
16731, 16734, 16735, 16736, 16739, 16740, 16741, 16744, 16745, 16746, 16749, 16750,
16751, 16754, 16755, 16756
16759, 16760, 16761, 16762
*Elset, elset=_PickedSet172, internal, instance=pout-long-8pts-pour-pouces-2
1, 12, 23, 34, 45, 56, 709, 720, 731, 742, 753, 764, 2494, 2495, 2496, 2497

```

2498, 2499, 2500, 2501, 2502
 *Elset, elset=__PickedSurf170_S1, internal, instance=pout-long-8pts-pour-pouces-2
 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 367, 368, 369, 370
 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530
 531, 532, 533, 534, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708
 *Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf170, internal
 __PickedSurf170_S1, S1
 *End Assembly
 **
 ** MATERIALS
 **
 *Material, name=acier
 *Elastic
 3e+11, 0.3
 *Material, name=flange
 *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
 1.1528e+10, 6.62e+08, 6.62e+08, 0.21, 0.23, 0.41, 6.66e+08, 6.66e+08
 1e+08,
 *Material, name=web
 *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
 5.73e+09, 4.28e+09, 1.3e+07, 0.18, 0.3, 0.3, 1.8e+09, 2.4e+08
 2.4e+08,
 *Material, name=web1000
 *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
 5144574649.94745, 3897686773.96989, 13000000, 0.18, 0.3, 0.3, 1796110171.13029,
 240000000
 240000000,

[Continuation de l'énumération des propriétés mécaniques des différents matériaux jusqu'à :]

*Material, name=web2061
 *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
 4999627033.89038, 3802330521.9304, 13000000, 0.18, 0.3, 0.3, 1763443821.10797,
 240000000
 240000000,
 ** -----
 **
 ** STEP: Step-1
 **
 *Step, name=Step-1
 *Static
 1., 1., 1e-05, 1.
 **
 ** BOUNDARY CONDITIONS
 **
 ** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation

```
*Boundary
_PickedSet171, 1, 1
_PickedSet171, 2, 2
** Name: sym Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet172, ZSYMM
**
** LOADS
**
** Name: pression Type: Pressure
*Dload
_PickedSurfl70, P, 400000.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=1
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*El Print, freq=999999
*Node Print, freq=999999
*End Step
```