

**Optimisation de la performance des orienteurs en vue de
maximiser les propriétés mécaniques des panneaux OSB**

Mémoire de recherche

Thomas Legendre

Sous la direction de :

M. Alain Cloutier, directeur de recherche
M. Ahmed Koubaa, codirecteur de recherche

Résumé

La résistance et la rigidité en flexion des panneaux de lamelles orientées (Oriented Strand Board; OSB) dépend fortement de l'orientation des lamelles des couches couvrantes, puisque la flexion génère des contraintes maximales en surface. Si une proportion significative des lamelles des couches couvrantes n'est pas alignée sur l'axe longitudinal des panneaux, ceci peut diminuer la rigidité du produit. L'objectif de l'étude est de resserrer la distribution de l'orientation des lamelles des couches couvrantes afin d'augmenter les propriétés mécaniques en flexion des panneaux pour éventuellement en réduire la masse volumique tout en respectant les normes de performance en vigueur.

Une méthodologie d'analyse de l'orientation des lamelles à l'aide d'outils d'analyse d'image a été développée. Des essais en laboratoire ont révélé une relation cubique entre l'orientation des lamelles et les propriétés mécaniques ($R^2 = 0,958$ pour le module d'élasticité), avec une chute marquée des performances au-delà de $\pm 20^\circ$. Une simulation numérique a validé la méthodologie d'analyse basée sur le logiciel OrientationJ. La modélisation selon la loi de Cauchy a montré une forte corrélation ($R^2 = 0,933$) entre les distributions angulaires de lamelles programmées et celles mesurées sur les images de panneaux simulés.

Des essais industriels réalisés dans une usine canadienne d'OSB ont permis d'identifier et d'optimiser les paramètres des orienteurs rapidement ajustables. L'angle de déflexion du déflecteur de la conformatrice positionné à 0° et une vitesse des disques de 60 tours par minute ont permis d'augmenter la rigidité en flexion de 10,2 %. Cette amélioration permettrait une réduction de la masse volumique des panneaux de 11 mm d'épaisseur de 2,1 % ($14,8 \text{ kg/m}^3$) tout en maintenant la rigidité en flexion exigée selon la norme CSA O325, se traduisant par des économies annuelles potentielles de 466 200 \$CAD pour cette usine type.

La méthodologie proposée dans cette étude offre à l'industrie un outil pratique d'optimisation de l'orientation des lamelles, en soutien aux objectifs de durabilité économique et environnementale du secteur forestier québécois.

Abstract

The mechanical strength and stiffness of oriented strand board (OSB) panels strongly depend on strands orientation, particularly in the face layers, since bending generates maximum stresses at the surface. If a significant proportion of strands of the face layers is misaligned with the panels' longitudinal axis, it can reduce the product's stiffness. The objective of this study was to tighten the strand orientation distribution to increase bending mechanical properties and subsequently reduce panel density while meeting current performance standards.

A methodology for analyzing strand orientation using image analysis tools was developed. Laboratory tests revealed a cubic relationship between strand orientation and mechanical properties ($R^2 = 0.958$ for the modulus of elasticity), with a pronounced drop in performance beyond $\pm 20^\circ$. A numerical simulation validated the methodology based on the OrientationJ plugin: modeling analysis using the Cauchy distribution showed a strong correlation ($R^2 = 0.933$) between programmed angular distributions and distributions measured on simulated panel images.

Industrial trials conducted at a Canadian OSB mill enabled the identification and optimization of easily adjustable orientation parameters. A deflector angle of the forming machine set at 0° and a disk speed of 60 revolutions per minute increased bending stiffness by 10.2%. This improvement would allow a of 2.1% density reduction (14.8 kg/m^3) for 11 mm-thick panels while maintaining the bending stiffness required by the CSA O325 standard, resulting in potential annual savings of CAD \$466,200 for this typical mill.

The methodology proposed in this study provides the industry with a practical tool for optimizing strand orientation, supporting the economic and environmental sustainability objectives of the forestry sector.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iii
Table des matières	iv
Liste des figures, tableaux, illustrations	vi
Figures	vi
Tableaux.....	ix
Liste des abréviations, sigles, acronymes	x
Acronymes	x
Remerciements.....	xi
Introduction	1
Chapitre 1 Revue de littérature	3
1.1 Principe de fonctionnement d'un orienteur d'OSB.....	3
1.2 Influence des caractéristiques des lamelles sur les propriétés mécaniques	4
1.3 Méthodes de mesure de l'orientation des lamelles et études connexes.....	7
Chapitre 2 Objectifs et hypothèses	22
2.1 Objectif général	22
2.2 Objectifs spécifiques.....	22
2.3 Hypothèse de recherche	22
2.4 Hypothèses statistiques.....	23
Chapitre 3 Méthodologie.....	24
3.1 Matériel d'essai et équipements	24
3.1.1 Matériel d'essai	24
3.1.2 Essais en laboratoire.....	24
3.1.3 Essais en usine	26
3.2 Dispositif expérimental	28
3.3 Traitement des images.....	30
3.4 Modélisation du matelas de lamelles en langage Python.....	34
Chapitre 4 Résultats et discussion.....	35
4.1 Profils de masse volumique des éprouvettes testées en laboratoire.....	35
4.2 Évaluation de <i>Fiji</i> et <i>OrientationJ</i> à partir d'ébauches d'OSB simulées.....	45
4.3 Analyse d'ébauches d'OSB de l'industrie	47

4.4 Essais de flexion sur les panneaux industriels	51
4.4.1 Essais de flexion expérimentaux.....	51
4.4.2 Analyse économique de la réduction potentielle de la masse volumique des panneaux.....	54
4.5 Perspectives de recherche et applications industrielles	56
Conclusion	57
Bibliographie.....	58
Annexe A Résultats d'analyses statistiques	60
Analyse Chi-carré combinée des expériences 1 & 2	60
Analyse de flexion industrielle ANCOVA	61
Annexe B Code <i>Fiji</i> et <i>Python</i>	62
Code <i>Fiji</i> d'analyse d'un dossier d'image au format CSV	62
Code <i>Python</i> d'ajustement de courbe des fichiers CSV	62
Code <i>Python</i> de simulation d'ébauche d'OSB	65

Liste des figures, tableaux, illustrations

Figures

Figure 1 Consommation de panneaux OSB et de contreplaqué (million et milliard de m ³) (a) au Canada et (b) aux États-Unis de 2020 à 2024 (Forest Economic Advisors 2023).....	1
Figure 2 Schéma d'une conformatrice standard pour la fabrication d'OSB (Grant 2002)	3
Figure 3 a) Disposition des disques dans un orienteur à disques rotatifs b) Espacement entre les disques centrés et côte à côte (adapté de Barnes 2002a).....	4
Figure 4 Effet de l'angle du grain sur les propriétés mécaniques du bois sans défauts selon la formule de Hankinson (adapté de Forest Products Laboratory 2021)	5
Figure 5 Application de l'équation de Hankinson aux panneaux OSB et son effet sur le MOE en flexion statique selon l'angle des lamelles et leur épaisseur (adapté de Barnes 2000)	6
Figure 6 Module d'élasticité en flexion de panneaux OSB en fonction de l'angle de charge par rapport à l'orientation de l'axe des lamelles des couches couvrantes : Résultats de calcul et d'expérimentation (adapté de Fan et Enjily 2009).....	7
Figure 7 Image d'un panneau OSB à gauche et son image filtrée à droite (Nishimura et Ansell 2002a)	8
Figure 8 Relation entre l'intensité relative (pourcentage de points dans l'intervalle de 15°; divisé par le nombre de points total) et l'orientation des lamelles (adapté de Nishimura et Ansell 2002).....	9
Figure 9 Résistance en flexion parallèle (MOE et MOR) selon l'orientation moyenne des lamelles de panneaux OSB (adapté de Nishimura et Ansell 2002)	9
Figure 10 Histogramme de la distribution de l'orientation des lamelles (adapté de Chen et al. 2008).....	10
Figure 11 Influence de la longueur et la largeur sur l'orientation des lamelles (adapté de Chen et al. 2008)...	11
Figure 12 Photo de chaque type de lamelles (adapté de Nishimura et al. 2004).....	11
Figure 13 Résistance en flexion parallèle selon le type de lamelles (Type 1 : Longue et très large Type 2 : Longue et large Type 3 : Longue et mince Type 4 : Courte et mince Type 5 : Petite) (adapté de Nishimura et al. 2004).....	12
Figure 14 Relation entre le MOR et trois variables de fabrication des panneaux OSB : a) la masse volumique, b) l'orientation moyenne des lamelles, et c) l'aire moyenne des lamelles (adapté de Nishimura et al. 2001) ..	12
Figure 15 Effet d'alignement des lamelles (a) sur le MOE et (b) sur le MOR en flexion pour différents types de lamelles de bois asiatique (cèdre japonais, sapin chinois, palownia de Taiwan) (Wang et Chen 2001).....	13
Figure 16 Boîte de formation vibrante utilisée pour la fabrication de panneaux OSB à orientation prédéterminée en laboratoire (Alldritt et al. 2014).....	14
Figure 17 Relations entre l'écart type des angles des lamelles et l'écart-type de la fonction de distribution von Mises (Kappa), tel qu'évalué par la simulation Monte-Carlo et les données expérimentales (a) Ébauches simulées avec des lamelles de 50 mm (haut) et (b) 70 mm (bas) alignés avec une distance de chute libre de 20 mm (adapté de Suzuki et Takeda 2000).....	15
Figure 18 Écart-type (SD) de l'angle mesuré pour trois longueurs de lamelles avec diverses conditions de distance de chute libre (adapté de Suzuki et Takeda 2000)	16
Figure 19 Influence de l'angle moyen et du paramètre de concentration sur la fonction de densité de probabilité de la distribution de von Mises (adapté de Shaler 1991)	17
Figure 20 Module de rupture en flexion selon l'orientation des lamelles et la masse volumique des panneaux (adapté de Shiraishi et al. 1993).....	18

Figure 21 Images des lamelles sur la ligne de production (à gauche) et lamelles distinguées par la méthode automatique (à droite) (Hong et al. 2025).....	19
Figure 22 Illustration de l'utilisation des tenseurs de structure. (1) Image d'entrée : motif d'ondes à longueur constante. (2) Carte de cohérence : les valeurs de cohérence sont proches de 1,0 comme prévu. (3) La représentation en couleur reflète les différentes orientations. (adapté de Püspöki et al. 2016).....	20
Figure 23 Balais et disque rotatifs d'une conformatrice industrielle.	21
Figure 24 a) Éprouvette sur le banc d'essai de flexion (b) Chargement du tomodensitomètre à rayons X	24
Figure 25 Schéma de découpe d'OSB 1,22 x 2,44 m des éprouvettes de 60-70-80 degrés	26
Figure 26 Conformatrice Schenck Streukof L25 (Arbec 2024).	27
Figure 27 Caméra Sony A7 IV à niveau, sécurisée à la plateforme de mesure.....	28
Figure 28 (a) Sources de variation et degrés de liberté associés et (b) exemple d'un bloc aléatoire	28
Figure 29 (a) Nombre de blocs requis selon la taille d'effet désiré, (b) puissance statistique qui varie en fonction de la taille d'effet (delta), (c) puissance selon le nombre de blocs répétés	30
Figure 30 Photographie brute d'une ébauche.....	31
Figure 31 Analyse des orientations des pixels, de cyan (0°) à rouge (90°), sur un matelas recadré.	32
Figure 32 Effets du paramètre gamma sur la distribution d'orientation des pixels lorsque tous les autres paramètres sont constants.....	33
Figure 33 Courbe Cauchy ajustée selon l'orientation des pixels de l'ébauche.	34
Figure 34 Ébauche de panneau générée avec Python fait de 18000 trapézoïdes de 4 couleurs avec ombrage	35
Figure 35 Diagramme en boîte des masses volumiques des échantillons par angle de découpe en ordre croissant.	36
Figure 36 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm de 0°, 5°, 10° et 20° obtenus par rayons X.....	37
Figure 37 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm de 30°, 45°, 60° et 70° obtenus par rayons X.....	38
Figure 38 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm de 80° et 90° obtenus par rayons X.....	39
Figure 39 Rigidité EI selon l'angle de découpe des neuf éprouvettes pour les 10 groupes d'angles de découpe et selon l'angle d'orientation de surface moyen des pixels de l'éprouvette mesuré par analyse d'image.....	40
Figure 40 Module d'élasticité en flexion selon la masse volumique pour chaque groupe d'angle	41
Figure 41 Module d'élasticité spécifique en flexion selon l'angle de découpe et selon l'angle moyen des pixels de la couche de surface.....	42
Figure 42 Module de rupture en flexion selon l'angle de découpe des éprouvettes	44
Figure 43 Module de rupture spécifique en flexion selon l'angle de découpe des éprouvettes	44
Figure 44 Nuage de points comparant les valeurs mesurées de γ aux valeurs réelles de γ (8 valeurs différentes avec 10 répétitions chacune), avec la droite de régression linéaire et la ligne de référence 1:1. ...	46
Figure 45 a) Simulation informatique de matelas b) et l'analyse d'orientation de pixel visuelle.....	47
Figure 46 Ébauche d'OSB sur la ligne de production 4,88 m x 2,44 m.....	49
Figure 47 Effets de l'angle de déflexion et de la vitesse de rotation des disques orienteurs sur le paramètre de distribution gamma permettant de quantifier l'orientation des lamelles de surface de l'expérience combinée .	50
Figure 48 ANCOVA de l'effet de l'angle de déflexion et la masse sur le MOE·Inertie avec intervalle de confiance 95% sur 20 éprouvettes.....	54
Figure 49 a) Interface Python intuitive b) Exemple d'analyse graphique	56

Figure 50 Résidus chi-carré combinée des expériences 1 & 2.....	60
Figure 51 Résidus de l'ANCOVA de flexion industrielle.....	61
Figure 52 Ébauche de panneau générée avec Python fait de 18000 trapézoïdes de 4 couleurs avec ombrage	67

Tableaux

Tableau 1 Ajustement de courbe selon différentes fonctions	33
Tableau 2 Moyenne du paramètre a de la courbe Cauchy des expériences 1 & 2 combinées selon la combinaison de paramètres.....	48
Tableau 3 Résultat de l'ANOVA de type III sur le modèle mixte	51
Tableau 4 Résultat de l'ANOVA de type II de l'expérience 1 excluant le point 16 du jeu de donnée	51
Tableau 5 Résultats des essais de flexion statique sur panneaux de 1,22 m x 2,44 m.....	52

Liste des abréviations, sigles, acronymes

Acronymes

PLO: Panneau à lamelles orientées

OSB: Oriented strand board

RPM: tours par minute

MOE: Module d'élasticité en flexion

MOR: Module de rupture en flexion

ANOVA : Analyse de variance (Analysis of variance)

COREPAN : Consortium de recherche sur les panneaux composites à base de bois

Remerciements

Merci à l'équipe du CRMR, Produits forestiers Arbec - OSB, Shawinigan, en particulier M. Sébastien Coulombe, le Comité d'encadrement de maîtrise – composé de M. Aziz Laghdir du SEREX, M. Ahmed Koubaa de l'UQAT, M. Alain Cloutier de l'Université Laval et M. Fabrice Roussière de FPInnovations – ainsi que notre collaborateur M. Baptiste Giard de l'EPFL pour leur soutien indéfectible, leur collaboration précieuse et leur contribution à ce projet. Chacune de ces organisations a apporté son expertise unique, ses ressources et son engagement, permettant la réalisation de ce mémoire de recherche. Leur confiance, leur professionnalisme et leur implication ont été essentiels au succès de notre démarche scientifique.

Sans oublier le personnel technique et les chercheurs du CRMR : M. Normand Paradis, Mme Rosilei A.Garcia, M. Rolando A. Montenegro Muro, Mme. Flore Simon, M. Daniel Bourgault, M. Paul Desaulnier, M. Jean Ouelette et M. Benoît Saint-Pierre.

Ce document a été préparé dans le cadre des activités de recherche du Consortium de recherche sur les panneaux composites à base de bois (Corepan-Bois) à l'Université Laval. Cette recherche a été financée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) [subvention ALLRP 571660-21], le Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF), le Conseil de l'industrie forestière du Québec (CIFQ) [subvention PIP-2019-12], ainsi que les partenaires de Corepan-Bois : FPInnovations, Produits forestiers Arbec, Sacopan, Tafisa Canada et Uniboard Canada.

Introduction

Les panneaux OSB ont connu une ascension inégalée dans le secteur de la construction depuis leur émergence en 1960. Ils occupent aujourd'hui une part majeure du marché des panneaux composites (Figure 1). Cette transition a été motivée par leur faible coût, leurs propriétés structurelles, ainsi qu'une matière première abondante. Au Québec, l'utilisation primaire du peuplier faux-tremble et l'utilisation secondaire du bouleau à papier et de bois résineux à faible valeur commerciale font des panneaux OSB un produit polyvalent et écologique à haute valeur ajoutée. Ceci permet de valoriser une essence autrement sans preneur : le peuplier faux-tremble, ce qui constitue un avantage pour le consommateur comme pour la forêt.

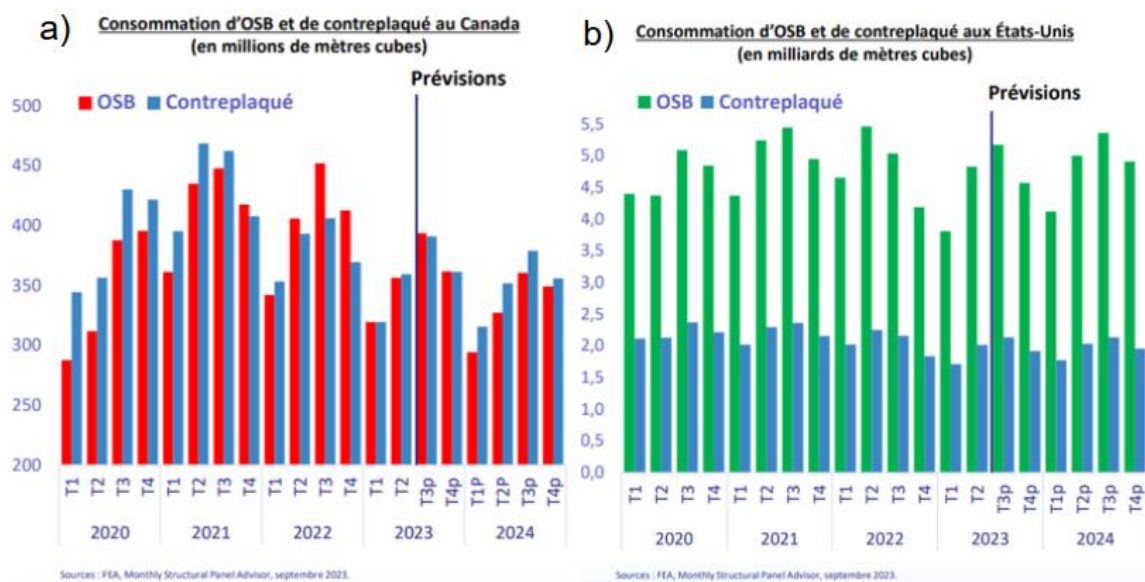


Figure 1 Consommation de panneaux OSB et de contreplaqué (millions et milliards de m³) (a) au Canada et (b) aux États-Unis de 2020 à 2024 (Forest Economic Advisors 2023)

Le processus manufacturier de l'OSB commence par l'arrivée des tiges à l'usine de transformation. Dû à sa masse volumique faible et homogène, à sa disponibilité ainsi qu'à ses fibres droites et compressibles, le peuplier faux-tremble est l'essence prisée (Mackes et Lynch 2021). Les billes sont triées, tronçonnées, puis trempées dans un bassin d'eau pour dégeler et réchauffer le bois. Une fois écorcées, les billes se dirigent vers les gaufriers où des couteaux tranchent les rondins parallèlement à la fibre de bois pour obtenir de fines lamelles (Alipraja et al. 2022). La qualité des lamelles dépend de plusieurs facteurs, tels que la température, la densité et la teneur en humidité du bois, le type de gaufrier, la géométrie des couteaux, etc. Les lamelles sont souvent triées selon leur longueur et leur largeur. Les petites lamelles seront placées au centre des panneaux tandis que les longues lamelles seront utilisées pour les couches de surface. Les lamelles sont séchées, puis encollées avec un adhésif, généralement le phénol-formaldéhyde. Après l'encollage, les lamelles sont disposées en couches croisées sur la ligne de formation. Les lamelles des couches couvrantes sont orientées parallèlement à la ligne

de production tandis que celles de la couche médiane, généralement plus courtes et plus épaisses, sont orientées perpendiculairement ($0^\circ/90^\circ/0^\circ$). Cette configuration en couches croisées, combinée à l'ajout de longues lamelles en couches couvrantes, optimise la rigidité et la résistance à la flexion du panneau. L'ébauche est consolidée par une presse hydraulique à haute température et à haute pression. La chaleur polymérise l'adhésif thermodurcissable et fusionne les lamelles en un panneau solide. Les panneaux sont découpés et finis, prêts à l'utilisation. Ce procédé allie robustesse et polyvalence, faisant des panneaux OSB un choix privilégié.

L'orientation des lamelles a un impact majeur sur la résistance mécanique des panneaux, notamment en flexion, en raison de l'anisotropie des lamelles de bois. La théorie des poutres démontre que les contraintes dues à un effort en flexion sont maximales en surface. Pour optimiser les performances des panneaux OSB, il est donc primordial de contrôler l'orientation des lamelles des couches couvrantes.

L'usage structurel des panneaux OSB exige des propriétés mécaniques conformes aux normes de construction telles que la norme CSA O86:19. Une amélioration significative de l'orientation des lamelles de surface permettrait de réduire la densité des panneaux tout en conservant leurs propriétés en flexion. Cela entraînerait une diminution de la quantité de bois nécessaire à leur fabrication, réduisant ainsi les coûts de production, puisque la matière ligneuse représente 50 à 60 % de ces coûts (Tasdemir et Hiziroglu 2019). Une réduction de quelques kg/m^3 permettrait d'économiser des centaines de tonnes de bois chaque année.

L'usine partenaire s'intéresse à cette recherche dans la perspective d'un éventuel investissement dans une nouvelle conformatrice. Concrètement, la recherche vise à optimiser l'orientation des lamelles afin d'accroître la qualité des panneaux OSB traditionnels. L'approche a consisté à optimiser deux paramètres clés du processus de formation des matelas, soit l'angle du déflecteur et la vitesse de rotation des disques de la conformatrice. Ces paramètres influencent directement la trajectoire et l'alignement des lamelles sur la ligne de formation. L'analyse d'image a ensuite été utilisée pour quantifier l'orientation des lamelles en surface et évaluer l'effet de chaque combinaison de paramètres.

Chapitre 1 Revue de littérature

1.1 Principe de fonctionnement d'un orienteur d'OSB

Les lamelles de bois arrivent aux orienteurs par des convoyeurs à bande. Elles tombent alors dans une conformatrice (Figure 2) où un déflecteur redirige l'écoulement. Des balais rotatifs sont positionnés entre le déflecteur et les disques orienteurs pour répartir l'écoulement de lamelles et empêcher les blocages sur la première rangée de disques.

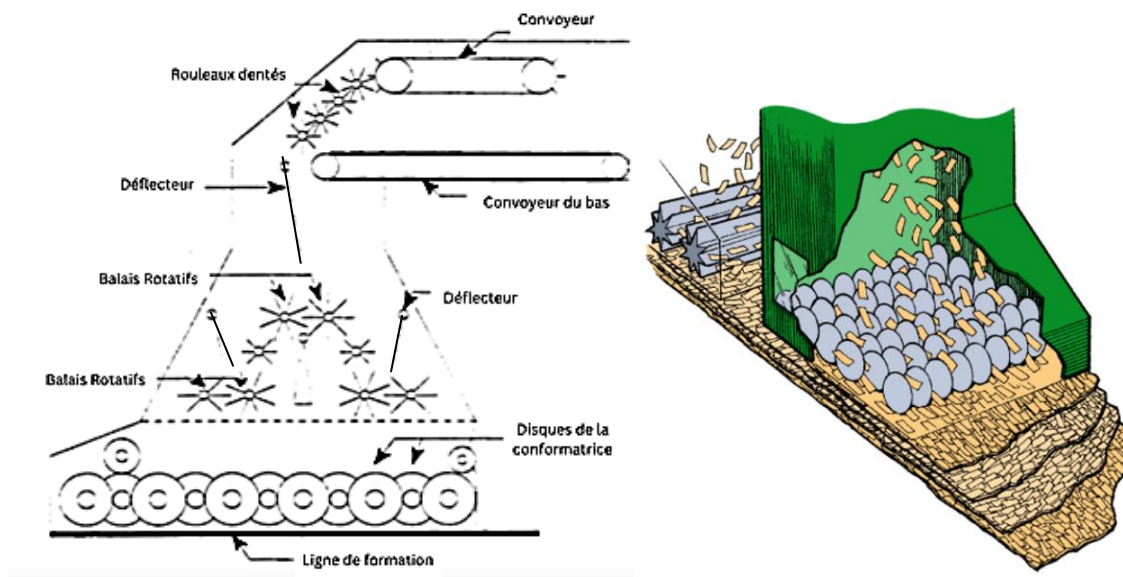


Figure 2 Schéma d'une conformatrice de couches couvrantes standard pour la fabrication d'OSB (Grant 2002) et illustration de rouleaux orienteurs à couches médianes suivis d'une conformatrice à disque en vue isométrique (Arbec 2024).

Le fonctionnement global des conformatrices reste similaire d'un modèle à l'autre, mais les performances peuvent varier considérablement. Typiquement, les lamelles d'OSB des couches couvrantes sont orientées en passant à travers un ensemble de disques rotatifs. Des volets vibrants peuvent aussi être utilisés si le débit de lamelles est assez faible.

Les lamelles sont disposées au hasard lorsqu'elles passent à travers les disques en se rendant vers l'ébauche (Barnes 2002a). L'espace latéral entre les disques est généralement plus étroit dans les premières rangées et s'élargit le long de l'orienteur pour garantir que toutes les lamelles atteignent la ligne de formation (Figure 3-a). Le diamètre des disques est généralement choisi pour permettre aux lamelles de longueur maximale de passer entre les arbres des disques sans entrave. Les rangées alternées de disques se chevauchent et sont décalées en divisant l'espace latéral entre les disques en deux espaces égaux ou en plaçant les disques adjacents l'un à l'autre (Figure 3-b).

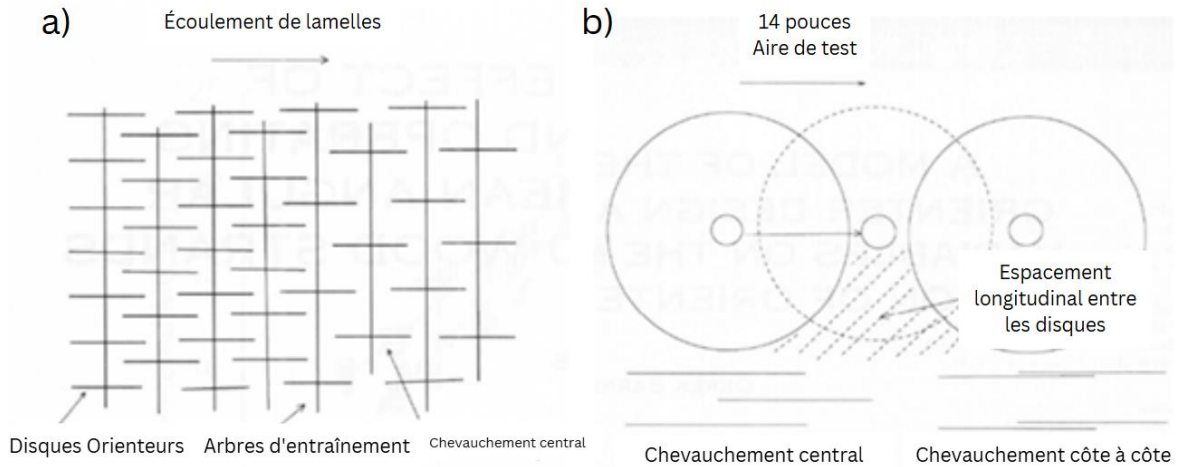


Figure 3 a) Disposition des disques dans un orienteur de couches couvrantes à disques rotatifs b) Espacement entre les disques centrés et côte à côte (adapté de Barnes 2002a).

1.2 Influence des caractéristiques des lamelles sur les propriétés mécaniques

La formule de Hankinson (1), développée pour le bois massif sans défauts, établit un lien entre la résistance et l'orientation du grain. La direction perpendiculaire du bois est 5 à 20 fois plus faible que l'orientation parallèle (Figure 4).

$$E_{\theta} = \frac{E_{//} * E_{\perp}}{E_{//} \sin(\theta) + E_{\perp} \cos(\theta)} \quad (1)$$

E_{θ} : MOE selon l'angle d'orientation des fibres

$E_{//}$: MOE parallèle

E_{\perp} : MOE perpendiculaire

θ : Angle d'orientation des fibres

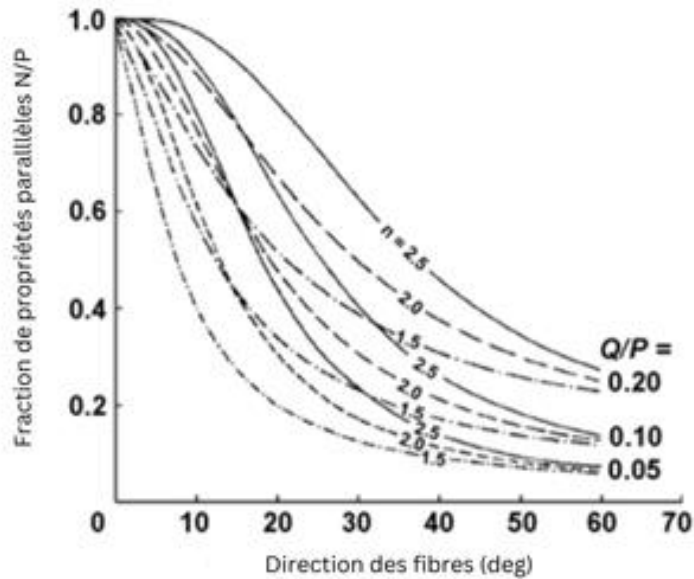


Figure 4 Effet de l'angle du grain sur les propriétés mécaniques du bois sans défauts selon la formule de Hankinson (adapté de Forest Products Laboratory 2021).

Barnes (2002) s'est basé sur ce principe pour développer un modèle applicable aux composites de bois. Son modèle prédit le MOE des panneaux selon l'espacement entre les disques, la longueur des lamelles et la hauteur de chute. Plus les lamelles sont longues, plus l'espacement des disques est serré et plus la hauteur de chute est faible, meilleure est l'orientation des lamelles. Cela se traduit par de meilleures performances mécaniques des panneaux. L'équation empirique MGLH (2) synthétise les résultats de cette étude.

$$Mglh = \frac{\arcsin((g - t)/l)}{2} + h * (4.86 - 0,3341l) \quad (2)$$

Mglh : Déviation d'orientation moyenne selon : l'espacement, la hauteur et la longueur des lamelles

g : espacement des disques

h : Hauteur de chute

t : épaisseur des lamelles

l : longueur des lamelles

Barnes (2000) a constaté que la résistance et la rigidité des panneaux en flexion diminuent lorsque l'angle d'orientation des lamelles augmente. La rapidité de la perte s'atténue plus les lamelles sont minces. Le MOE diminue rapidement lorsque l'orientation augmente au-dessus de 12° pour les lamelles de 0,635 mm (0.025") (Figure 5).

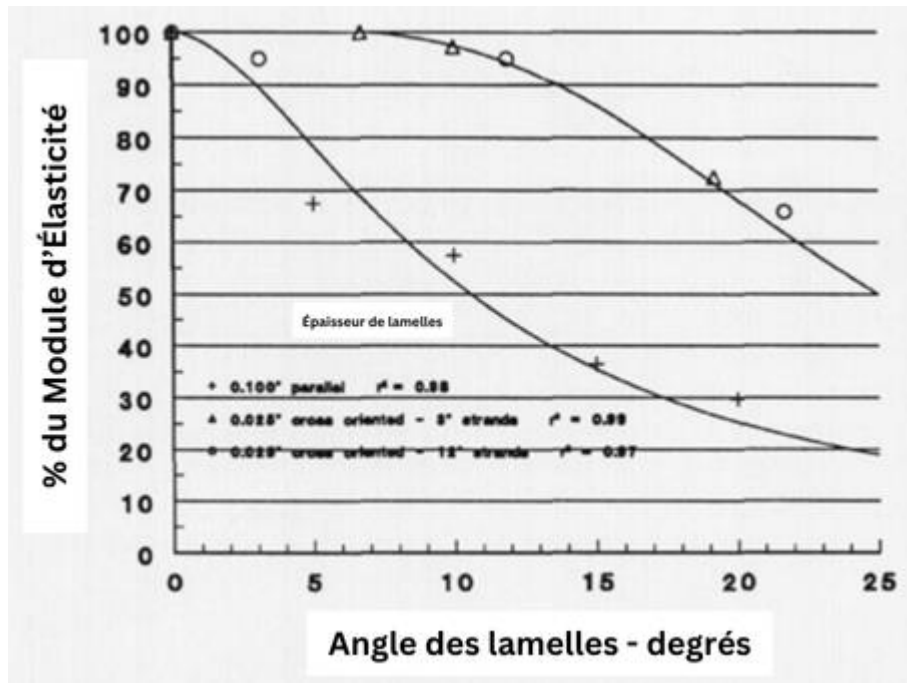


Figure 5 Application de l'équation de Hankinson aux panneaux OSB et son effet sur le MOE en flexion statique selon l'angle des lamelles des couches couvrantes et leur épaisseur (adapté de Barnes 2000).

Plusieurs autres scientifiques ont cherché à modéliser les propriétés structurelles de l'OSB (Fan et Enjily 2009). Ces auteurs présentent l'effet de l'orientation des lamelles sur le MOE et le MOR en flexion. Les résultats démontrent que les propriétés en flexion des panneaux sont étroitement liées à l'orientation des lamelles, particulièrement des lamelles des couches couvrantes. En effet, la rigidité en flexion diminue plus l'angle de charge appliqué dévie de l'axe longitudinal des panneaux. L'étude a utilisé une technique d'analyse d'image pour examiner la structure des panneaux OSB et l'orientation des lamelles des couches couvrantes.

Des modèles théoriques ont été développés pour prédire la résistance et la rigidité de l'OSB sous différents angles de charge, en s'appuyant sur les résultats numériques et l'analyse d'image. Ces modèles ont été validés expérimentalement (Figure 6) et la courbe obtenue présente une forme similaire à celle décrite par la formule de Hankinson.

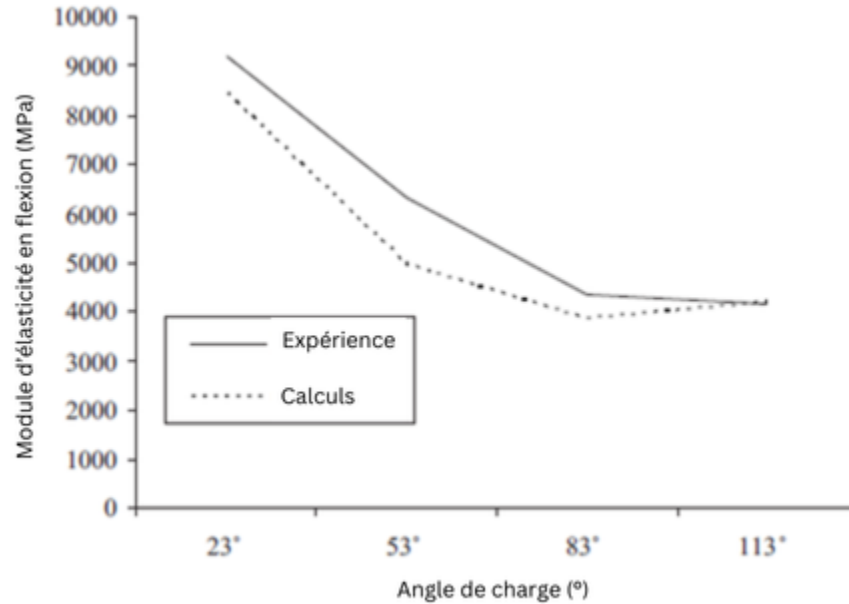


Figure 6 Module d'élasticité en flexion de panneaux OSB en fonction de l'angle de charge par rapport à l'orientation de l'axe des lamelles des couches couvrantes : Résultats de calcul et d'expérimentation (adapté de Fan et Enjily 2009).

1.3 Méthodes de mesure de l'orientation des lamelles et études connexes

Plusieurs méthodes ont déjà été étudiées pour mesurer l'orientation des lamelles de panneaux OSB. Ces recherches sont présentées ci-dessous.

- Analyse d'image filtrée (Nishimura et Ansell 2002a)
- Script d'analyse d'image MATLAB (Chen et al. 2008)
- Transformations de Fourier rapides (Nishimura et Ansell 2002b)
- Microscope électronique (Fan et Enjily 2009)
- Mesure de la vitesse des ultrasons (Wang et Chen 2001)
- Modèle d'apprentissage automatisé (Hong et al. 2025)
- Mesures manuelles

Nishimura et Ansell (2002a) ont réalisé une étude sur l'orientation des lamelles des couches couvrantes d'OSB au cours du procédé de fabrication, en utilisant une méthode d'analyse d'images. Les photos des ébauches ont été prises à une distance de 2 m sur la ligne de production. Les images ont été filtrées avec le logiciel Pro Plus

pour réduire le bruit et rehausser les détails (Figure 7). Une ellipse fut ajustée aux sections blanches de l'image, puis l'orientation des ellipses fut calculée en fonction de l'axe de la ligne de formation.

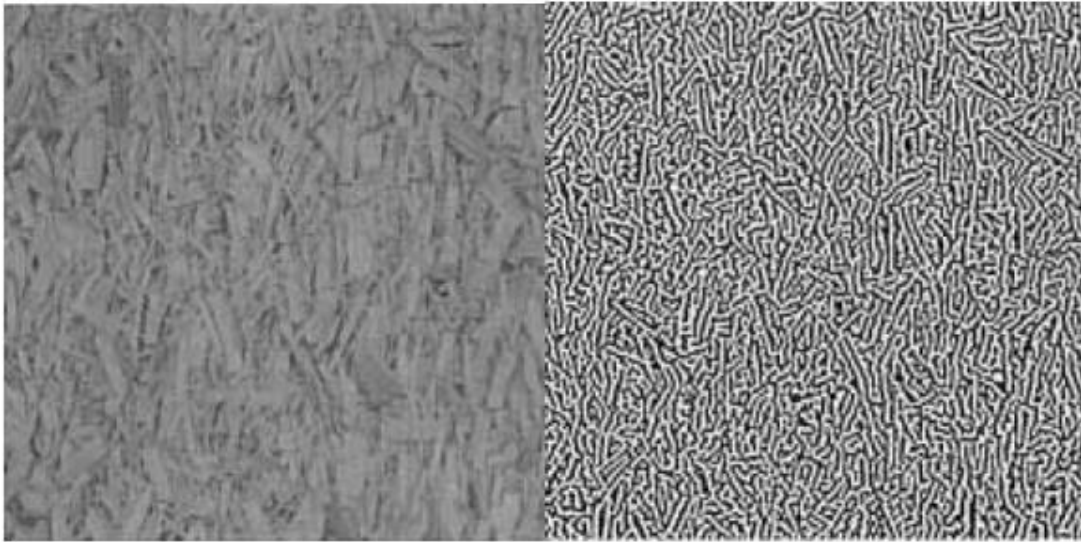


Figure 7 Image d'un panneau OSB à gauche et son image filtrée à droite (Nishimura et Ansell 2002a).

Les résultats démontrent que l'orientation des lamelles des couches couvrantes sur la ligne de production est constante, indépendamment de la position des lamelles selon la largeur du panneau, du moment de la journée au moment des mesures, et de la vitesse de la ligne de production. En moyenne, l'angle d'orientation des lamelles se situait entre 25 et 30°. La distribution de l'orientation des lamelles suivait une distribution normale plus pointue, indiquant une concentration plus marquée autour de la moyenne (Figure 8).

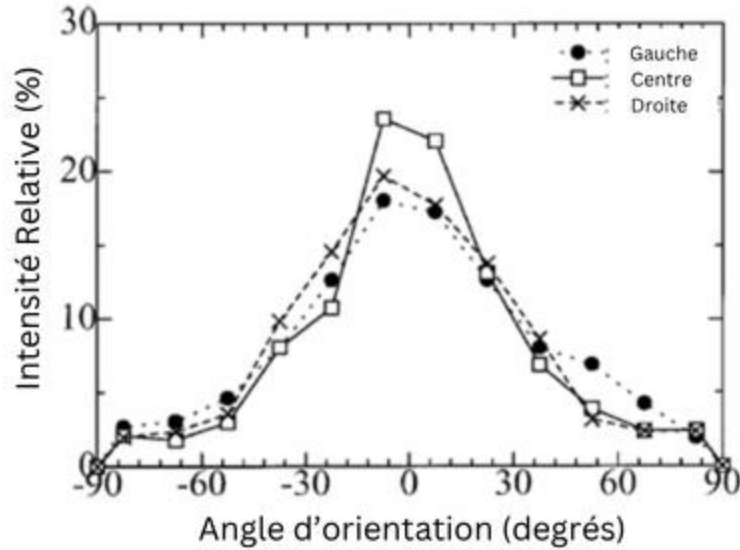


Figure 8 Relation entre l'intensité relative (pourcentage de points dans l'intervalle de 15°; divisé par le nombre de points total) et l'orientation des lamelles des couches couvrantes (adapté de Nishimura et Ansell 2002).

Les auteurs ont également examiné l'effet de l'orientation des lamelles sur les propriétés mécaniques en effectuant des essais de flexion à trois points sur des échantillons d'OSB coupés à différents angles. Ils ont constaté qu'un meilleur alignement longitudinal des lamelles augmentait le MOE et le MOR en flexion (Figure 9). Les auteurs suggèrent qu'en optimisant l'angle d'orientation des lamelles lors de la production d'OSB, il est possible d'améliorer la résistance maximale et la rigidité en flexion des panneaux, sans compromettre les propriétés en direction perpendiculaire.

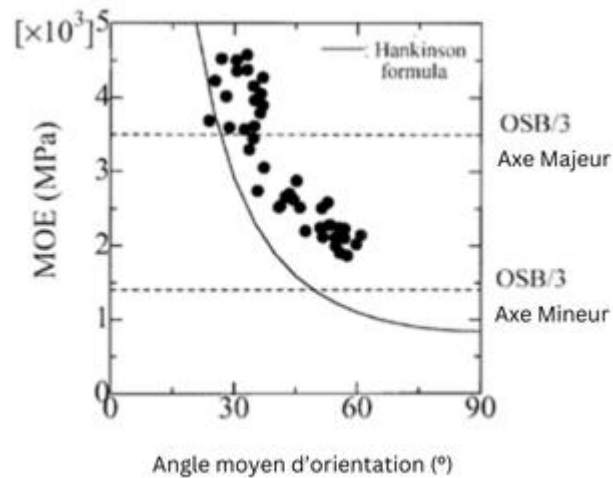


Figure 9 Résistance en flexion parallèle (MOE et MOR) selon l'orientation moyenne des lamelles de panneaux OSB (adapté de Nishimura et Ansell 2002).

Sommairement, cette étude démontre l'efficacité de la méthode d'analyse d'image filtrée pour mesurer l'orientation des lamelles des couches couvrantes en temps réel sur la ligne de production et souligne l'importance de cette orientation pour les propriétés mécaniques des panneaux OSB.

Chen et al. (2008) ont analysé les caractéristiques et l'alignement des lamelles de panneaux OSB commerciaux. Ils ont évalué l'influence de la géométrie des lamelles sur leur orientation moyenne. Ces chercheurs ont utilisé une technique combinant l'analyse d'images et l'identification manuelle pour mesurer l'angle spécifique de chaque lamelle. Leurs analyses révèlent que 43 % des lamelles présentent une orientation déviée de 20° ou moins (Figure 10). Selon les auteurs, ceci montre un potentiel majeur d'amélioration. Ils mentionnent que la formule de Hankinson prédit une résistance trois fois supérieure pour le grain orienté entre 0 et 20 degrés, comparativement à celui orienté entre 20 et 40 degrés.

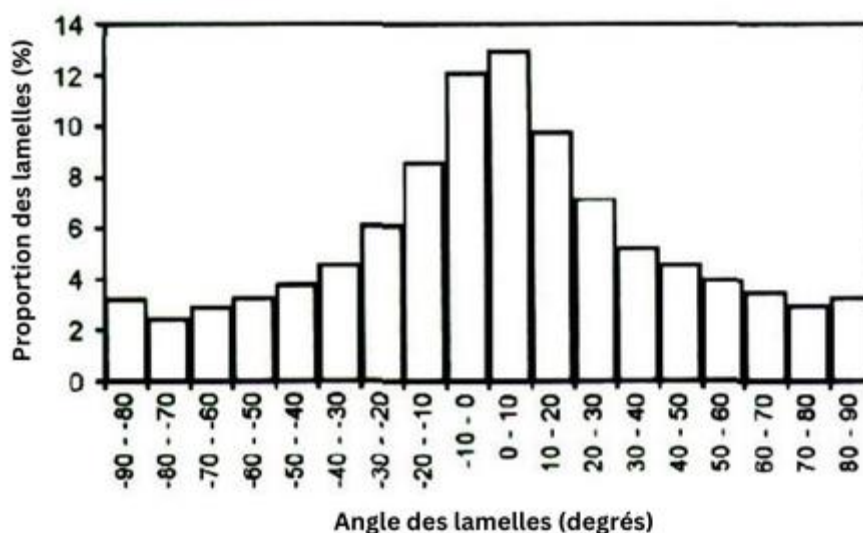


Figure 10 Histogramme de la distribution de l'orientation des lamelles des couches couvrantes (adapté de Chen et al. 2008).

Quant à l'aspect géométrique des lamelles, l'étude révèle que la longueur est le principal facteur influençant l'orientation (Figure 11). La largeur, l'élanement et l'aire affectent l'orientation des lamelles de manière indirecte. Ceci s'explique par le fait que les longues lamelles ont tendance à s'aligner selon leur longueur grâce aux disques orienteurs. La largeur des lamelles affecte également leur orientation, mais de manière moins directe que la longueur. Les lamelles étroites ont tendance à se désorienter plus facilement, car elles ont plus d'espace pour pivoter entre les disques. D'autre part, les lamelles très larges peuvent être difficiles à orienter en raison d'un espacement insuffisant entre les disques.

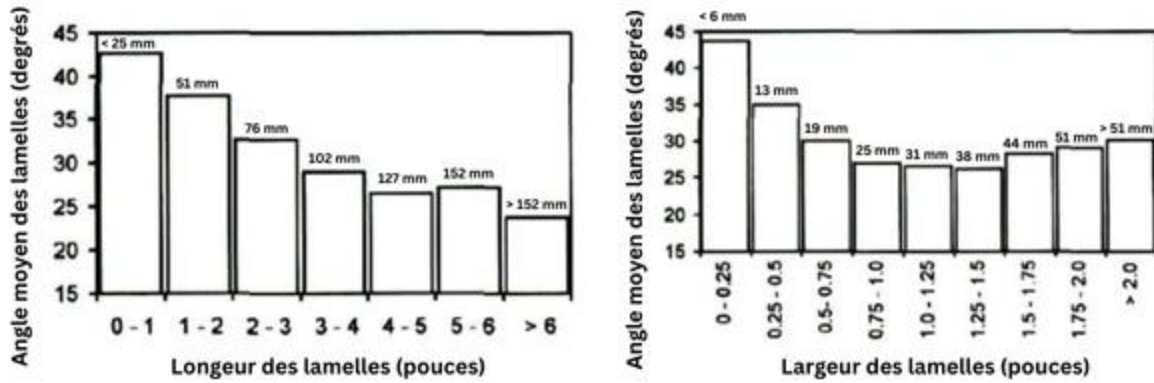


Figure 11 Influence de la longueur et de la largeur sur l'orientation des lamelles des couches couvertantes (adapté de Chen et al. 2008).

Nishimura et al. (2004) ont aussi analysé les propriétés en flexion de panneaux OSB en fonction de la géométrie des lamelles. Ils ont établi cinq catégories selon la taille et l'élanement des lamelles d'OSB industrielles (Figure 12). Des panneaux OSB ont été fabriqués en laboratoire en disposant manuellement les lamelles de chaque type sur un tapis formant, puis en les pressant à chaud. L'orientation et la forme des lamelles ont été évaluées par analyse d'image et les panneaux ont été testés en flexion trois points.

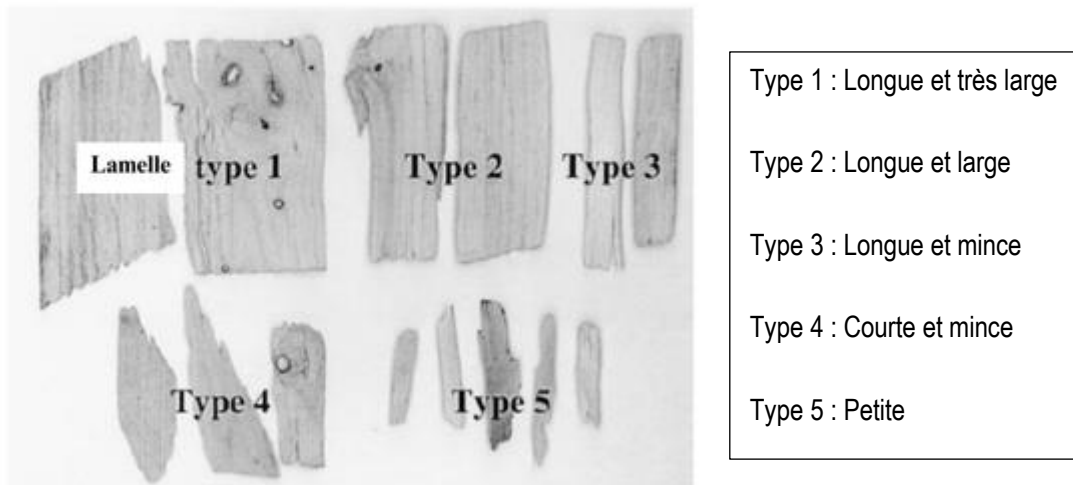


Figure 12 Photo de chaque type de lamelles (adapté de Nishimura et al. 2004).

L'étude révèle que les lamelles de grande surface, à élanement élevé (longues et minces), produisent des panneaux présentant une orientation optimale et de meilleures propriétés mécaniques (Figure 13).

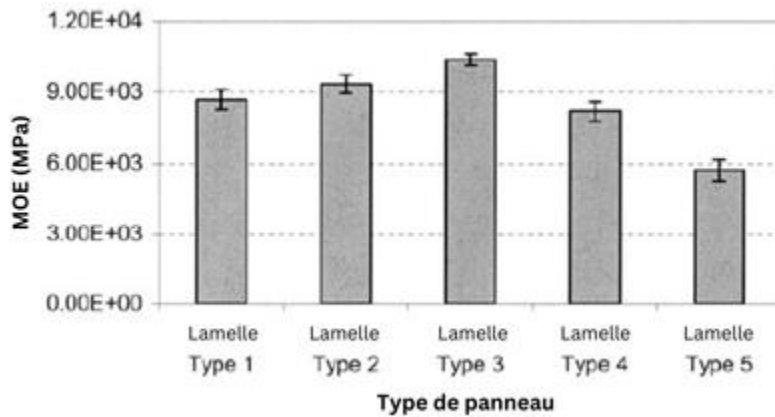


Figure 13 Résistance en flexion parallèle selon le type de lamelles (Type 1 : Longue et très large Type 2 : Longue et large Type 3 : Longue et mince Type 4 : Courte et mince Type 5 : Petite) (adapté de Nishimura et al. 2004).

Une expérience supplémentaire a démontré que l'augmentation de la hauteur de chute désorientait les lamelles, ce qui réduisait les propriétés mécaniques en flexion des panneaux.

Nishimura et al. (2001) ont approfondi leur recherche en étudiant la relation entre l'orientation des lamelles à la surface de l'OSB et le MOR en flexion. Ils mentionnent que le coefficient de variation de la masse volumique des panneaux est limité à 4 %, alors que celui du MOR est de 17 %. Ils en concluent que la masse volumique ne suffit pas à expliquer les variations du MOR. Ils démontrent ensuite qu'il y a une faible corrélation négative entre l'orientation moyenne des lamelles et le MOR ($r=-0.44$), mais qu'il n'y a pas de corrélation avec l'aire moyenne des lamelles (Figure 14).

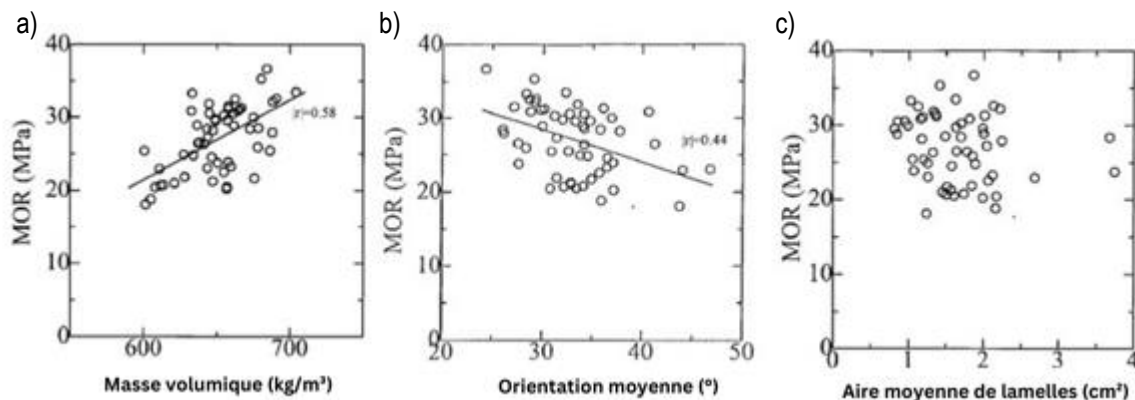


Figure 14 Relation entre le MOR et trois variables de fabrication des panneaux OSB : a) la masse volumique, b) l'orientation moyenne des lamelles, et c) l'aire moyenne des lamelles (adapté de Nishimura et al. 2001)

Wang et Chen (2001) ont étudié l'efficacité de l'alignement des lamelles sur les propriétés orthotropes de l'OSB. Les auteurs ont utilisé une méthode d'ondes ultrasonores pour mesurer la vitesse de propagation à travers les panneaux OSB pour différents alignements de lamelles. Différentes espèces de bois ont été étudiées. Les

ébauches ont été formées à l'aide d'un orienteur mécanique, avec un espacement des plaques de 2,5 cm et une hauteur de chute des lamelles de 2,0 cm. Une presse conventionnelle a été utilisée pour fabriquer les panneaux. Les angles d'alignement des lamelles sur les panneaux ont été préalablement mesurés, et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les panneaux a également été mesurée. Les résultats de l'étude démontrent que l'angle d'alignement des lamelles a un impact significatif sur la vitesse de propagation, qui diminue à mesure que l'angle augmente. Le rapport des vitesses ultrasonores dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'alignement des lamelles variait entre 2,4 et 3,2. Des relations linéaires proportionnelles ont été trouvées entre la vitesse des ultrasons, le MOE dynamique, le MOR et le MOE en flexion statique (Figure 15). La recherche indique que l'efficacité d'alignement des lamelles est supérieure sur la couche couvrante supérieure des panneaux OSB que sur la couche couvrante inférieure. En effet, pour la face supérieure, la probabilité de maintenir une orientation entre 0 et 30 degrés était de 93-97% comparée à 76-85% pour la face inférieure. En conclusion, la méthode des ondes ultrasonores s'avère un outil efficace pour évaluer l'alignement des lamelles et les propriétés mécaniques des panneaux OSB.

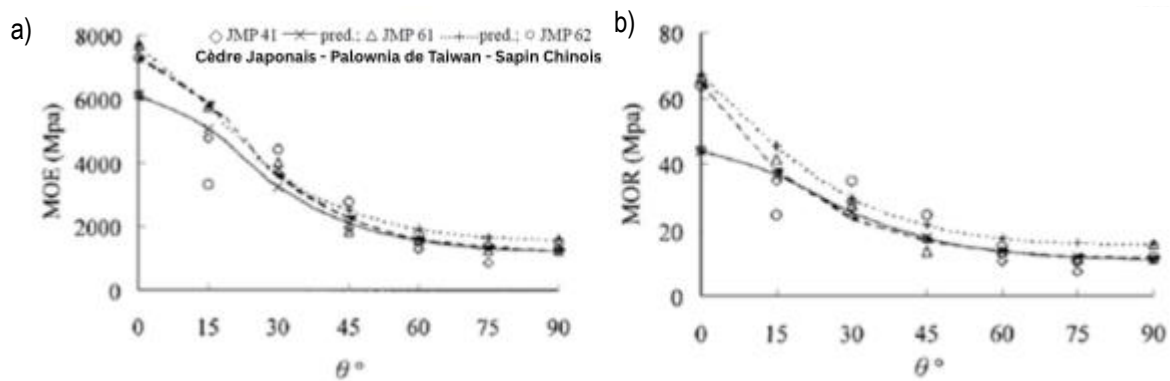


Figure 15 Effet d'alignement des lamelles (a) sur le MOE et (b) sur le MOR en flexion pour différents types de lamelles de bois asiatique (cèdre japonais, sapin chinois, palownia de Taiwan) (Wang et Chen 2001).

Barnes (2002b) a étudié l'effet de différents types d'orienteurs sur l'orientation des lamelles et les propriétés mécaniques des panneaux. En ajoutant des volets ou en multipliant les étages de disques rotatifs, il a réussi à réduire la déviation angulaire moyenne des lamelles. L'auteur présente les différentes configurations considérées ainsi que la déviation des lamelles mesurée. Il y a une différence de 5° entre la configuration la plus performante et la moins performante. Pour un orienteur à disques conventionnel, il y a une différence de 1,5° entre une hauteur de chute de 25,4 mm et 76,2 mm.

Différentes vitesses de rotation des disques orienteurs ont été testées. Pour une vitesse de 25 RPM à l'étage inférieur, 39% des lamelles passent à travers les disques, alors que pour les vitesses de 50 et 75 RPM, 80% le sont. Le reste fut récolté au bout de l'orienteur.

Alldritt et al. (2014) ont étudié la conception d'un motif d'orientation de lamelles pour améliorer les propriétés de cisaillement de l'OSB (Alldritt et al. 2014). L'étude prédit que des couches de lamelles avec des angles d'alignement à $\pm 45^\circ$ pourraient produire un module de cisaillement et une résistance supérieure par rapport à l'orientation typique $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ de l'OSB à trois couches. Les panneaux ont été formés à l'aide d'un grillage et d'une boîte de formation vibrante (Figure 16). Les résultats montrent une augmentation de 24 % du module de cisaillement pour l'alignement $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ$ par rapport à l'alignement $0^\circ/90^\circ/0^\circ$. En revanche, une réduction de 10 % du module d'élasticité en flexion dans la direction parallèle a été observée. L'étude démontre que l'alignement des lamelles dans les panneaux OSB peut être modifié afin d'améliorer spécifiquement les propriétés de cisaillement.



Figure 16 Boîte de formation vibrante utilisée pour la fabrication de panneaux OSB à orientation prédéterminée en laboratoire (Alldritt et al. 2014).

Suzuki et Takeda (2000) ont étudié les propriétés des panneaux de lamelles orientées fabriqués à partir d'espèces japonaises. L'étude s'est concentrée sur les effets de la longueur des lamelles et de la structure des couches de panneaux OSB. Les résultats démontrent que l'orientation des lamelles est fortement influencée par la distance de chute libre et la longueur des lamelles. Quatre types de panneaux différents ont été fabriqués pour cette étude; UD : "panneau homogène à orientation unidirectionnelle", OOO: "panneau à trois couches à orientation croisée", ORO: "panneau à trois couches orientées avec une couche centrale aléatoire" et RD: "panneau homogène à orientation aléatoire".

Le panneau le plus résistant en flexion parallèle est le panneau homogène à orientation unidirectionnelle (UD). Les panneaux à lamelles de 70 mm sont plus résistants qu'avec des lamelles de 30 mm. Les auteurs n'observent pas de différence significative des propriétés en flexion entre le panneau à trois couches croisées (OOO) et le panneau à trois couches orientées avec une couche centrale aléatoire (OR). Le panneau OOO semble quand même plus résistant en flexion perpendiculaire, en raison de sa couche médiane alignée.

Des simulations Monte-Carlo ont été employées par Suzuki et Takaneda (2000) pour caractériser la distribution des lamelles selon la hauteur de chute et la longueur des lamelles selon une fonction von Mises modifiée. La distribution von Mises est une distribution couramment utilisée en statistiques directionnelles pour modéliser les données circulaires. Les résultats (Figure 17) démontrent que la fonction von Mises produit une distribution de lamelles qui ressemble fortement à une distribution réelle observée lors de la formation d'ébauches. $\log k$ est un paramètre de la distribution von Mises et l'équation 2 est utilisé pour relier l'écart type d'orientation de lamelles à la distribution von Mises. L'idée modéliser l'orientation de lamelles selon un paramètre de distribution pour quantifier l'orientation de lamelles d'un matelas et la modélisation graphique de ceux-ci sont intéressants d'un point de recherche appliquée. C'est d'ailleurs un des axes étudiés plus loin dans le document avec la modélisation Cauchy et la génération graphique avec Python et Fiji.

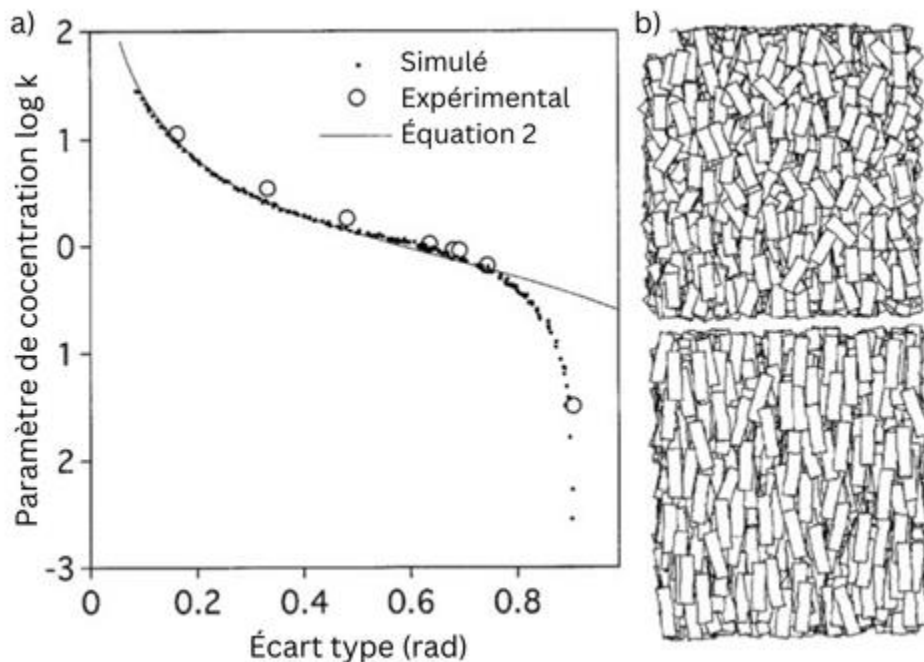


Figure 17 Relations entre l'écart type des angles des lamelles et l'écart-type de la fonction de distribution von Mises (κ), tel qu'évalué par la simulation Monte-Carlo et les données expérimentales (a) Ébauches simulées avec des lamelles de 50 mm (haut) et (b) 70 mm (bas) alignés avec une distance de chute libre de 20 mm (adapté de Suzuki et Takeda 2000)

Les auteurs ont constaté que l'écart-type d'alignement des lamelles diminue plus la distance de chute est faible et plus les lamelles sont longues (Figure 18).

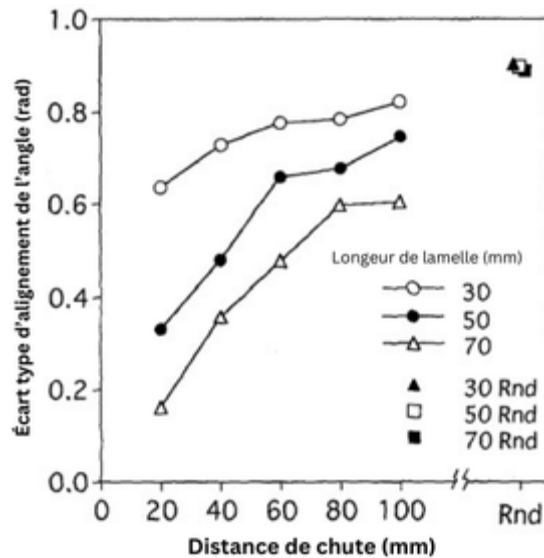


Figure 18 Écart-type (SD) de l'angle mesuré pour trois longueurs de lamelles avec diverses conditions de distance de chute libre où Rnd est une orientation aléatoire selon la longueur de lamelles en mm (adapté de Suzuki et Takeda 2000).

Shaler (1991) a étudié deux méthodes pour mesurer l'orientation des lamelles de panneaux OSB. Il a comparé la méthode du pourcentage d'alignement (Équation 3) à la méthode de la densité de probabilité continue de la distribution von Mises (Équation 4).

$$Align(\%) = \frac{45 - \theta}{45} 100 \quad (3)$$

Align(%) : Pourcentage d'alignement des lamelles

$$\theta : \frac{\sum |Angles Mesurés|}{n} \quad n : \text{Taille de l'échantillon}$$

Shaler (1991) mentionne que la description de l'alignement des lamelles sous forme de distribution offre de nombreux avantages par rapport au pourcentage d'alignement. La distribution permet de trouver la véritable moyenne de l'angle des lamelles et celle-ci donne une mesure de la variabilité de l'orientation.

Les paramètres μ et $1/k$ sont analogues aux μ et σ^2 (moyenne et variance) de la loi normale (Figure 19).

$$f(\theta|\mu, k) = \frac{\exp(k \cos(\theta - \mu))}{2\pi I_0(k)} \quad (4)$$

θ : Angle (radians) ($0 < \theta < \pi$)

k : mesure de la concentration (adimensionnel)

μ : mesure de localisation, orientation moyenne (radians)

$I_0(k)$: fonction Bessel modifiée d'ordre 0 (adimensionnel)

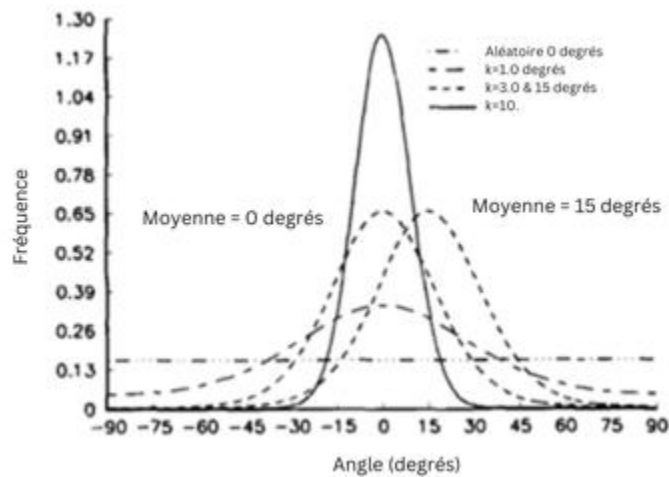


Figure 19 Influence de l'angle moyen et du paramètre de concentration sur la fonction de densité de probabilité de la distribution de von Mises (adapté de Shaler 1991).

Shiraishi et al. (1993) ont étudié les panneaux OSB et les panneaux de fibres. Les chercheurs ont testé différentes méthodes de formation d'ébauches d'OSB, utilisant des techniques mécaniques et électrostatiques pour aligner les lamelles fines. Pour cette étude, les lamelles ont été orientées mécaniquement à l'aide d'un ensemble de plaques parallèles espacées de 10 mm. Les auteurs démontrent qu'il est plus difficile d'aligner les particules lorsque la hauteur de chute augmente. Lorsque les particules sont petites, l'alignement mécanique devient moins efficace. C'est pourquoi une méthode électrostatique est proposée. La méthode électrostatique

aligne les fibres ou les particules qui tombent librement à travers un champ électrostatique. Les particules deviennent polarisées et s'alignent dans la direction des lignes de force électrostatiques. Trois configurations d'électrodes ont été étudiées pour le système d'orientation électrostatique. Les chercheurs ont découvert que l'intensité du champ électrostatique et la teneur en humidité des particules sont des facteurs importants pour leur alignement. Leurs essais de flexion statique (Figure 20) montrent qu'une meilleure orientation des lamelles et une masse volumique supérieure permettent d'augmenter le MOR des panneaux.

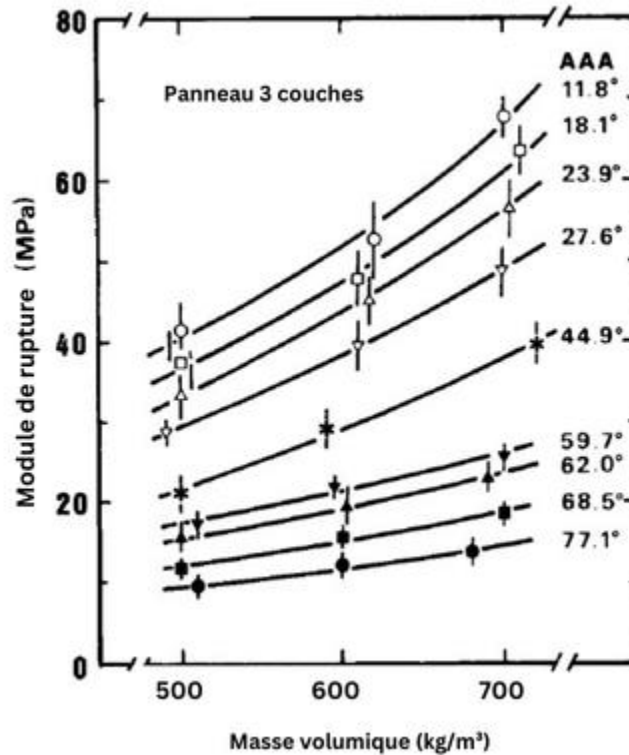


Figure 20 Module de rupture en flexion selon l'orientation des lamelles et la masse volumique des panneaux (adapté de Shiraishi et al. 1993).

Hong et al. (2025) ont développé une méthode automatique pour mesurer en temps réel les caractéristiques des lamelles dans la production de panneaux OSB, incluant l'orientation, la longueur, la largeur et la surface. En utilisant les modèles d'apprentissage SAM et YOLOv5, leur méthode a permis de distinguer et d'analyser efficacement jusqu'à 80 % des lamelles sur une ligne de production (Figure 21). Les résultats montrent une corrélation positive entre la taille des lamelles et leur alignement.



Figure 21 Images des lamelles sur la ligne de production (à gauche) et lamelles distinguées par la méthode automatique (à droite) (Hong et al. 2025).

Gadek-Moszczak et al. (2020) ont utilisé le logiciel Fiji pour analyser l'orientation spatiale de fibres de verre dans une matrice de polyamide (Gadek-Moszczak et al. 2020). La détection des fibres et l'analyse de leur direction ont été réalisées à l'aide de ce logiciel à code ouvert et de plugiciels complémentaires. Leur méthode d'analyse à l'aide d'ellipsoïdes a permis de détecter les différences d'orientation. Les informations obtenues ont été utiles pour décrire les composites et évaluer leurs propriétés mécaniques. Les auteurs mentionnent que le logiciel Fiji leur a permis d'obtenir des résultats fiables.

En détails, *Fiji* (anciennement *ImageJ*) est un logiciel du domaine public destiné au traitement et à l'analyse d'images scientifiques. En développement continu depuis 1997, des milliers de plugiciels font aujourd'hui de ce logiciel un pilier de la recherche scientifique (Schneider et al. 2012). Une centaine d'articles combinant les mots « wood et *ImageJ* » sont disponibles sur la base de données multidisciplinaires Web of Science. Identification des espèces, analyse de particules et analyse cellulaire sont quelques-uns des sujets abordés. Fiji n'est mentionné qu'une seule fois dans la littérature scientifique pour le domaine des panneaux.

Quant aux multiples plugiciels disponibles, l'un d'eux se démarque pour caractériser l'orientation et les propriétés d'isotropie d'une région d'intérêt dans une image. *OrientationJ* dispose d'un outil de calcul de l'orientation dominante et de cohérence. Le plugiciel détermine l'orientation des pixels selon l'environnement avoisinant (Figure 22) et produit une distribution au format CSV de l'orientation des pixels.

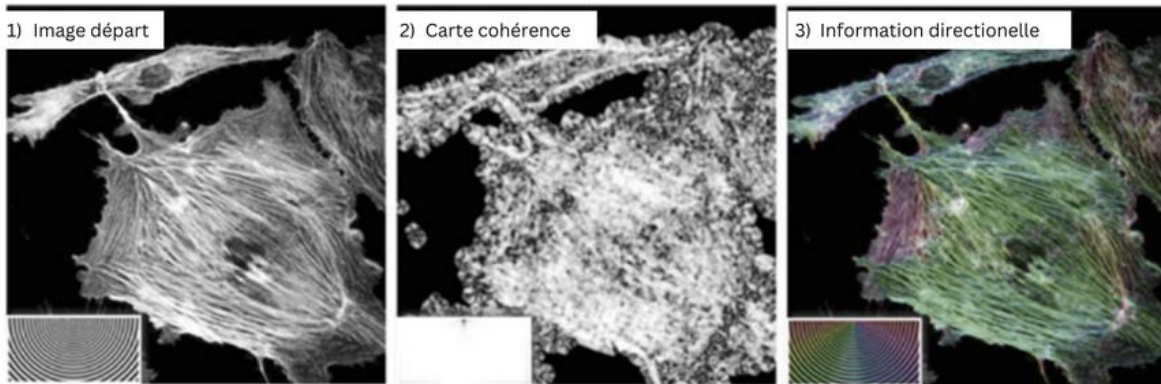


Figure 22 Illustration de l'utilisation des tenseurs de structure. (1) Image d'entrée : motif d'ondes à longueur constante. (2) Carte de cohérence : les valeurs de cohérence sont proches de 1,0 comme prévu. (3) La représentation en couleur reflète les différentes orientations. (adapté de Püspöki et al. 2016).

1.4 Conclusion de la revue de littérature

La revue de littérature nous a permis d'établir que pour fabriquer des panneaux OSB rigides, il est primordial de favoriser un bon alignement des lamelles. D'après la littérature il est clair que les lamelles doivent être orienté dans le sens longitudinal du panneau, la question qui se pose est plus centrée sur la mesure de l'orientation de chaque lamelle et la réduction de la variation. Par exemple, seulement 43 % des lamelles de PLO présentent une orientation déviée de 20° et moins, alors qu'une orientation longitudinale est optimale pour les couches de surface des panneaux OSB (Chen et al. 2008).

En usine, l'alignement des lamelles est réalisé par une conformatrice. Les lamelles arrivent dans l'orienteur par un tapis roulant et se font éjecter. Un déflecteur redirige les lamelles sur les disques orienteurs et les balais rotatifs (Figure 23). Les lamelles avancent sur les disques jusqu'à ce qu'elles tombent sur la ligne de formation. Si la vitesse de rotation des disques est trop élevée, les lamelles se grouperont au bout de la conformatrice sans s'aligner (Barnes 2002a). Si elle est trop faible, les lamelles ne pourront pas se déplacer. Il existe donc une vitesse idéale permettant aux lamelles de passer à travers l'ensemble des disques sans provoquer de blocage.



Figure 23 Balais et disques rotatifs d'une conformatrice industrielle.

L'orientation des lamelles est traditionnellement déterminée par des mesures manuelles. Cependant, l'analyse d'image s'impose comme la méthode la plus couramment utilisée dans la littérature scientifique pour évaluer l'orientation des fibres ou des particules et présente l'avantage d'être très rapide, ce qui permet d'avoir un retour direct pour la production. Le logiciel Fiji s'avère particulièrement adapté à l'analyse d'image dans un contexte de recherche scientifique. Son module *OrientationJ* permet de mesurer l'orientation locale des pixels ainsi que leur cohérence, offrant ainsi des résultats précis et reproductibles. L'utilisation d'une plateforme à code ouvert, largement reconnue au sein de la communauté scientifique, constitue un avantage considérable pour le partage des connaissances. La disponibilité gratuite du logiciel facilite la poursuite de cette recherche par d'autres équipes et ouvre la voie à son intégration en milieu industriel, notamment pour des applications de contrôle de la qualité ou d'optimisation des procédés.

Chapitre 2 Objectifs et hypothèses

2.1 Objectif général

L'objectif général de cette recherche est d'optimiser l'alignement des lamelles afin d'améliorer les propriétés mécaniques des panneaux OSB et de permettre une diminution de la masse volumique nécessaire pour atteindre les seuils de performance normatifs.

2.2 Objectifs spécifiques

Quantifier l'orientation des lamelles de surface des panneaux OSB

Le développement d'une méthodologie fiable pour mesurer l'orientation des lamelles est essentiel afin d'identifier les paramètres optimaux permettant d'améliorer leur alignement. Le développement d'une méthodologie robuste permettra à d'autres chercheurs de répéter l'étude et de bâtir sur ces résultats.

Valider l'utilisation du logiciel à code ouvert Fiji

Compte tenu de son caractère novateur dans ce domaine, Fiji sera évalué en termes de précision et de fiabilité au moyen d'expériences de laboratoire et d'une modélisation de matelas de lamelles .

Analyser l'effet des paramètres d'orientation sur l'alignement des lamelles de couches couvrantes et les propriétés des panneaux

Cette étude se concentre sur deux variables principales : l'angle du déflecteur à l'entrée de l'orienteur et la vitesse de rotation des disques à sa sortie. Ces paramètres ont été sélectionnés en raison des contraintes opérationnelles imposées par le contexte industriel et la possibilité de les modifier facilement.

Explorer la possibilité de réduire la masse volumique des panneaux

Si l'amélioration de la résistance en flexion est confirmée, cette recherche examinera les gains potentiels en réduisant la masse volumique des panneaux OSB sans compromettre les autres propriétés mécaniques.

2.3 Hypothèse de recherche

L'optimisation des paramètres d'orientation des lamelles, notamment l'angle du déflecteur et la vitesse de rotation des disques, permettrait d'améliorer significativement l'alignement des lamelles. Ce meilleur alignement contribuerait à améliorer les propriétés mécaniques des panneaux OSB, notamment le MOE et le MOR en flexion. La résistance à la charge statique concentrée pourrait également être améliorée.

2.4 Hypothèses statistiques

Hypothèse statistique 1 : Effet des paramètres sur la distribution de l'orientation des lamelles

Le paramètre d'orientation gamma des lamelles reste constant indépendamment des variations de l'angle du déflecteur et de la vitesse de rotation des disques.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

Hypothèse statistique 2 : Amélioration de la résistance en flexion

Les panneaux produits avec une distribution optimale de l'orientation des lamelles présentent une résistance et une rigidité en flexion supérieures par rapport aux panneaux actuels.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

Chapitre 3 Méthodologie

3.1 Matériel d'essai et équipements

3.1.1 Matériel d'essai

Un banc d'essai d'une capacité de 5 kN (MTS QTest/5, MTS Systems Corporation) a été utilisé pour réaliser des essais de flexion à trois points, conformément à la norme CSA-O325-21. Les éprouvettes ont été découpées à partir de trois panneaux d'OSB de 11 mm (7/16") de l'usine Arbec Shawinigan, dimensionnées à 115 x 355 mm et conditionnées à 12% de teneur en humidité. Les essais ont été effectués à une vitesse de chargement de 7,9 mm/min et une portée de 267 mm. La face texturée a été placée vers le haut (Figure 24-a).

Pour garantir la qualité et l'intégrité des panneaux testés, un échantillon additionnel de 50 x 50 mm a été prélevé à l'extrémité de chaque éprouvette. Ceci nous a permis de mesurer le profil de masse volumique au densitomètre à rayons X (XQMS Quintek Measurement Systems Inc., model QDP-01X) (Figure 24- b).

3.1.2 Essais en laboratoire

Les éprouvettes destinées aux essais de flexion ont été découpées à différents angles : 0°,

10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° et 90° pour simuler l'effet de différentes orientations de lamelles et observer leur effet sur les propriétés mécaniques de l'OSB.

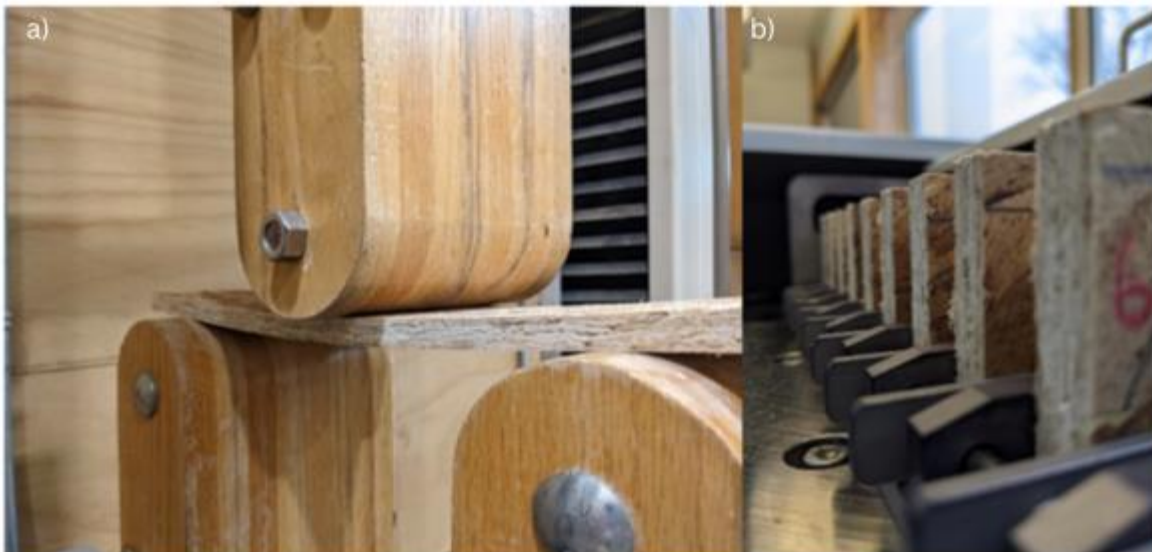


Figure 24 a) Éprouvette sur le banc d'essai de flexion (b) Chargement du densitomètre à rayons X.

Le MOE et le MOR en flexion ont été déterminés à partir du graphique contrainte/déformation de chaque éprouvette. La zone de calcul pour mesurer le MOE a été prise entre 10 et 40% de la charge maximale, en

s'assurant que les points soient dans la zone de déformation élastique. La rigidité (EI) et le module d'élasticité (E) ont été obtenus selon la méthode de calcul décrite dans la norme CSA O325 :21 :

$$EI = \frac{(P2 - P1) * \lambda^3}{K * b * (D2 - D1)} \quad (5)$$

où

EI = Rigidité, N·mm² / mm

P1 = Précharge, N

P2 = Charge finale appliquée, N

λ = Portée, mm

b = largeur, mm

D1 = Flèche après précharge, mm

D2 = Flèche après la charge finale, mm

K = Constante (48 lorsque b est mesuré en mm)

Si l'on isole l'inertie de l'éprouvette à l'aide de l'équation (6), on peut obtenir la valeur de E.

$$I = \frac{b * d^3}{12} \quad (6)$$

où

b = largeur, mm

d = épaisseur, mm

Le profil de masse volumique selon l'épaisseur obtenu par rayons X a été mesuré en débutant du côté texturé des échantillons. La prise de mesure du profil de masse volumique a été effectuée à chaque 0,02 mm. Les éprouvettes ont été découpées sur un banc de scie. Neuf répétitions ont été choisies afin de maximiser la matière. Un exemple de schéma de découpe est présenté ci-dessous (Figure 25).

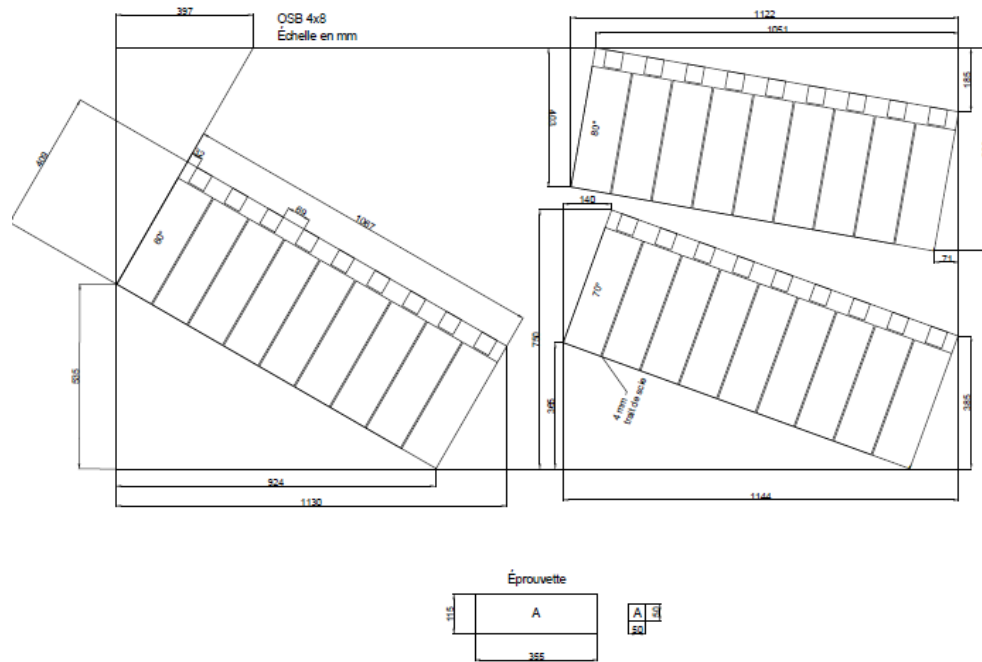


Figure 25 Schéma de découpe d'OSB 1,22 x 2,44 m des éprouvettes de 60-70-80 degrés.

3.1.3 Essais en usine

La conformatrice de couches couvrantes Schenck Streukof L25 utilisée pour les essais en usine chez Arbec à Shawinigan est présentée ci-dessous (Figure 26). Deux balais rotatifs distribuent l'écoulement des lamelles sur cinq rangées de disques rotatifs. La quantité de lamelles qui atteignent les balais est ajustée qu'en fonction de l'angle de déflexion (θ) d'une plaque d'acier. Aucune lamelle n'est dirigée vers les balais lorsque l'angle est trop faible, tandis que toutes les lamelles y sont dirigées lorsque l'angle est élevé. Il existe donc un juste milieu qui assure une répartition uniforme des lamelles. Lorsque le déflecteur est complètement vertical, l'angle est considéré comme étant positionné à zéro degré.

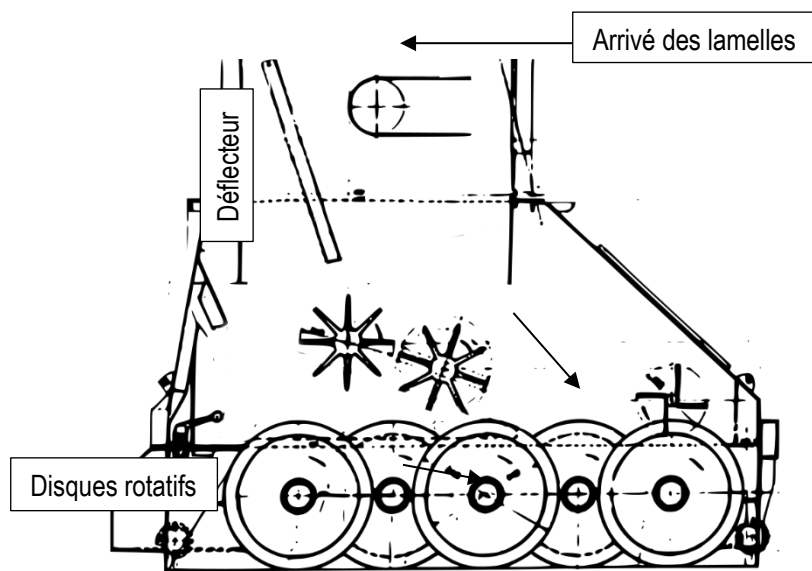


Figure 26 Conformatrice Schenck Streukof L25 (Arbec 2024).

L'angle du déflecteur est ajusté en serrant des écrous de chaque côté de la conformatrice. La longueur exposée de la tige directionnelle assurant le mouvement nous permet de déterminer la position du déflecteur, soit 150 mm pour un angle de 0° (vertical) et 140 mm pour un angle de 4° . La vitesse de rotation des disques est contrôlée par l'opérateur en modifiant la fréquence électrique des arbres rotatifs. La plage de valeurs varie de 30 Hz à 65 Hz. Nous avons couvert cette gamme de fréquences en choisissant des valeurs de 32, 48 et 65 Hz (respectivement 30, 45, 60 RPM).

Une caméra Sony A7 IV (24,2 MP, résolution de 6000×4000 pixels) munie d'un objectif de 28-75 mm a été utilisée pour capter les images à haute résolution des matelas $2,44 \text{ m} \times 4,88 \text{ m}$ ($8' \times 16'$). Une plateforme fabriquée sur mesure (Figure 27) nous a permis d'installer la caméra à niveau dans une nacelle située à 4 m immédiatement après l'orienteur de lamelles de la couche couvrante. Les paramètres d'acquisition étaient une ouverture de $f/2,8$, une vitesse d'obturation de $1/640 \text{ s}$, une sensibilité ISO de 2000 et un enregistrement au format RAW.



Figure 27 Caméra Sony A7 IV à niveau, sécurisée à la plateforme de mesure.

3.2 Dispositif expérimental

La Figure 28 illustre les sources de variation ainsi que les degrés de liberté associés au dispositif expérimental choisi pour les tests en usine. Un bloc aléatoire y est illustré.

a) Sources de variation	Degrés de liberté	b) Exemple d'un bloc aléatoire		
Bloc	3	45 RPM	30 RPM	30 RPM
Vitesse de rotation	2	0°	-4°	4°
Angle de déflexion	2	30 RPM	60 RPM	45 RPM
Interaction V*A	4	0°	-4°	-4°
erreur	24	45 RPM	60 RPM	60 RPM
		4°	0°	4°
Total	35			

Figure 28 (a) Sources de variation et degrés de liberté associés et (b) exemple d'un bloc aléatoire

Le dispositif expérimental a été conçu et randomisé à l'aide du logiciel R. Un dispositif en blocs aléatoires a été retenu afin d'optimiser l'utilisation des ressources, de réduire le temps d'exécution et de bloquer les déplacements potentiels de l'objectif de la caméra pendant la prise d'images. Le dispositif expérimental a été élaboré pour respecter les trois principes de Fisher soit le blocage, la répétition et la randomisation, nous permettant ainsi de concevoir un plan expérimental robuste et rigoureux.

Initialement, l'étude prévoyait trois niveaux de déflexion (-4° , 0° , 4°) et trois vitesses de rotation (30, 45, 60 RPM). Toutefois, l'angle de -4° a entraîné des blocages dans la conformatrice, ce qui a conduit à restreindre l'analyse aux angles de 0° et 4° . Le plan d'expérience initial, conçu avec trois angles de déflexion, nécessitait quatre blocs afin d'assurer une puissance statistique de $1 - \beta = 0,8$ pour un seuil de signification $\alpha = 0,05$. Cependant, avec seulement deux angles de déflexion et trois vitesses de rotation, le maintien de cette puissance aurait nécessité six blocs. L'expérience a donc été répétée une deuxième fois.

L'unité expérimentale considérée est l'ébauche maîtresse d'OSB ($2,44 \times 4,88$ m). Pour chaque combinaison de paramètres, trois mesures ont été effectuées. Par exemple, pour la combinaison $0^\circ/60$ RPM du bloc 1, trois images ont été prises à partir de trois ébauches consécutives. La moyenne des paramètres de distribution est calculée pour chaque répétition. Cette procédure a été appliquée aux six combinaisons des quatre blocs, générant un total de 72 images (2 angles de déflexion x 3 vitesses de rotation x 4 blocs x 3 répétitions).

L'équation 5 présente le modèle linéaire mixte utilisé. Les variables y sont définies ci-dessous. On suppose qu'il n'y a pas d'interaction entre les blocs et les variables aléatoires. Le modèle suppose une distribution normale des erreurs aléatoires.

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + V_j + A_k + (V * A)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (7)$$

Y_{ijk} : Paramètre de distribution observé au Bloc i pour les niveaux de Vitesse j et d'Angle k

μ : Moyenne générale de la population

B_i : Effet de bloc au niveau i

V_j : Effet fixe au niveau j (30, 45, 60 RPM) du facteur de la vitesse de rotation

A_k : Effet fixe au niveau k (0° , 4°) du facteur d'angle de déflexion

$(V*A)_{jk}$: Effet d'interaction entre les facteurs V_j et A_k .

ε_{ijk} : Effet d'erreur résiduelle aléatoire (avec hypothèse de distribution normale centrée à 0 : $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$)

Le nombre de blocs requis a été estimé à l'aide de la librairie BDEsize du logiciel R, en utilisant la fonction Size.Bloc. Nous avons assumé un ordre de grandeur d'effet d'un écart-type pour les effets principaux, les interactions

et les erreurs aléatoires. À titre explicatif, plus l'effet à détecter (Δ) est faible, plus le nombre de blocs nécessaires pour atteindre une différence significative augmente. Ce principe est illustré à la Figure 29 (a), où l'on observe que le nombre de blocs requis croît à mesure que la valeur de delta diminue.

La Figure 29 (b) montre quant à elle que plus l'effet attendu (Δ) est important, plus la puissance statistique de l'analyse s'accroît. En d'autres termes, la probabilité de détecter un effet réel et de rejeter l'hypothèse nulle augmente avec l'amplitude de l'effet observé.

La Figure 29 (c) démontre l'impact du nombre de blocs sur la puissance statistique. On y constate qu'une augmentation du nombre de blocs améliore la puissance, jusqu'à atteindre un plateau autour de six blocs pour les effets principaux (courbes noires et orange). En revanche, pour l'interaction (courbe bleue), une douzaine de blocs sont nécessaires avant d'atteindre ce plateau.

Ainsi, avec seulement six blocs, la probabilité de détecter un effet d'interaction demeure limitée. Toutefois, la probabilité de mettre en évidence un effet significatif des paramètres principaux sur l'orientation des lamelles est élevée.

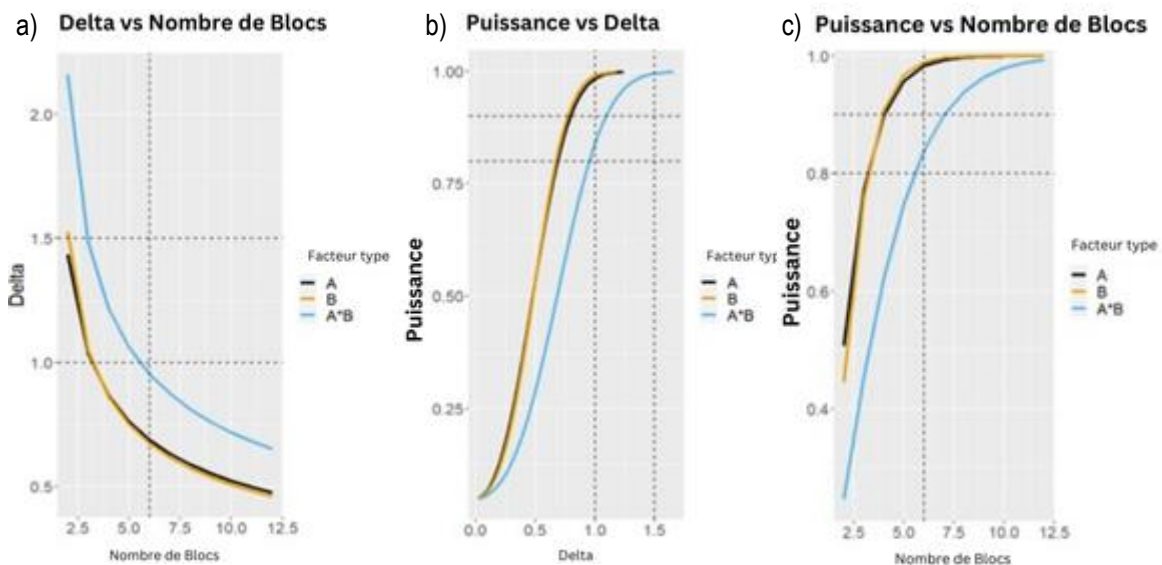


Figure 29 (a) Nombre de blocs requis selon la taille d'effet désiré, (b) puissance statistique qui varie en fonction de la taille de l'effet à détecter (delta), (c) puissance selon le nombre de blocs répétés.

3.3 Traitement des images

Les images prises ont permis d'analyser l'effet des paramètres de l'orienteur sur l'orientation des lamelles, grâce à leur qualité, à un éclairage adéquat et constant, et à un positionnement précis (Figure 30). Afin de garantir des mesures fiables, la prise de photos a été effectuée après la cinquième ébauche, une fois les paramètres de

la conformatrice ajustés. Le cadrage a été réalisé de manière à inclure les côtés de la ligne de production, permettant ainsi des ajustements ultérieurs en cas de problèmes d'alignement.



Figure 30 Photographie brute d'une ébauche.

L'alignement des images a été corrigé à l'aide de l'outil de rectification automatique d'Adobe Lightroom, avant d'être recadré pour ne conserver que l'ébauche de lamelles. Les images semblent présenter une distorsion « en barillet » qui n'a pas été rectifiée. L'analyse de l'orientation des pixels a ensuite été réalisée avec *OrientationJ*. Mesurant l'angle des pixels de $-89,5^\circ$ à $89,5^\circ$ par incréments de 1° (Figure 31). Les paramètres d'analyse sélectionnés sont un gradient spline cubique et un horizon local de deux pixels. Les résultats ont été exportés au format CSV. L'analyse avec *Excel* et avec notre programme *Python* (Annexe B) est ensuite facilement produite.

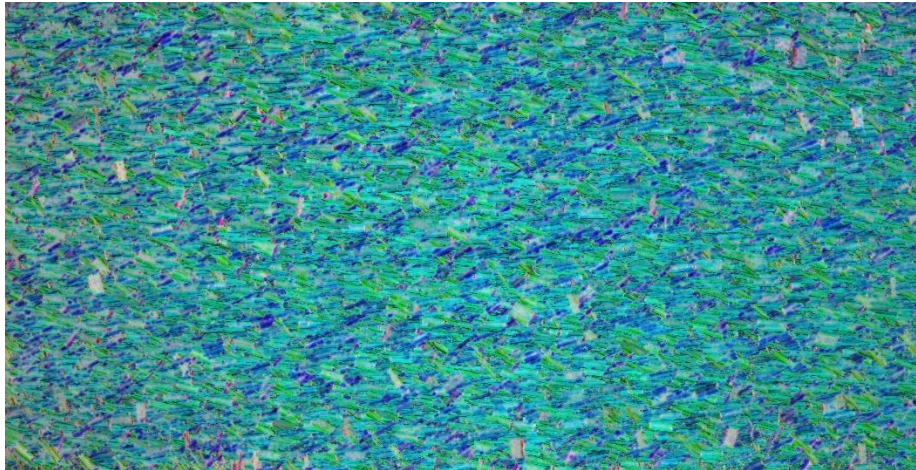


Figure 31 Analyse des orientations des pixels, de cyan (0°) à rouge (90°), sur un matelas recadré.

Pour quantifier la distribution des orientations des pixels, des courbes de Cauchy (distribution conique à valeurs extrêmes plus fréquentes), de Gauss (distribution normale) et de von Mises (de la littérature) ont été ajustées aux données. La probabilité de densité de la fonction de Cauchy est décrite par l'équation (8) suivante :

$$Y = \frac{I}{1 + \left(\frac{x - a}{\gamma}\right)^2} + C \quad (8)$$

Y : variable réponse

I : mesure d'intensité, point le plus haut de la courbe

x : variable indépendante

a : localisation de la courbe

γ : mesure de dispersion

C : constante

Le paramètre γ permet de comparer la performance des différentes combinaisons de paramètres (Figure 32).

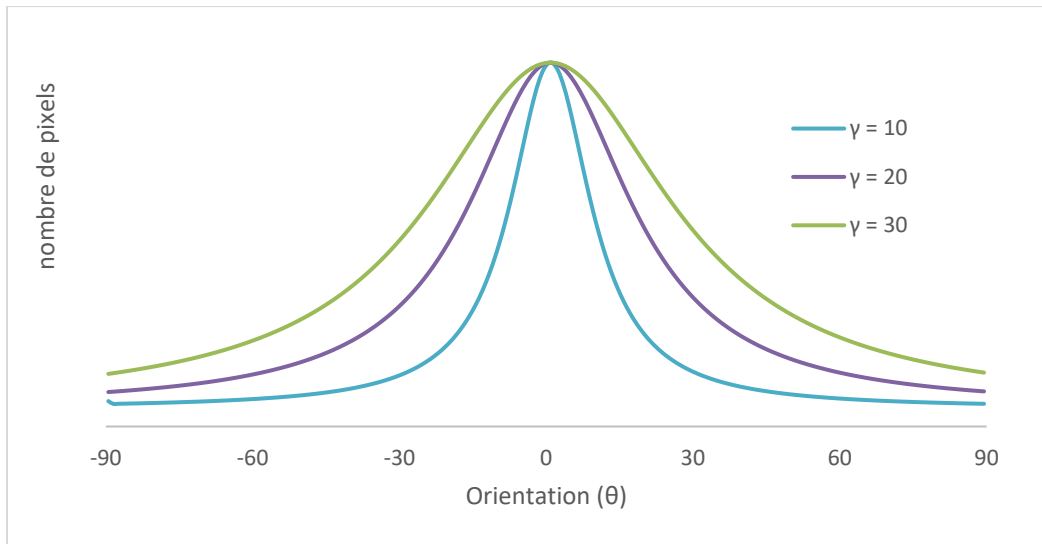


Figure 32 Effets du paramètre gamma sur la distribution d'orientation des pixels obtenue avec la fonction de Cauchy lorsque tous les autres paramètres sont constants.

Le solveur *Excel* et l'algorithme de gradient réduit généralisé ont permis de minimiser les différences absolues entre la courbe ajustée (RSS) et les données expérimentales. Les résultats montrent que la courbe de Cauchy offre un ajustement supérieur à celui des fonctions de Gauss ou de von Mises selon cette démarche (tableau 1). Les paramètres A, Mu et Mu représente la tendance centrale, le sommet de la courbe, ce qui correspond aussi à la moyenne étant donné la symétrie de ces fonctions. Le gamma, sigma et kappa sont une mesure de dispersion communément appelé écart-type pour une distribution normale. Le I, F et F représente l'intensité ou le sommet de la courbe (figure 33). Pour une loi normale l'intensité serait d'un, puisque les données sont normalisées. Le C est une constante qui déplace de bas en haut la courbe sur l'axe verticale. Le RSS est la mesure de gradient réduit permettant de comparer l'ajustement de courbe. Graphiquement nous avons aussi regardé la qualité de l'ajustement pour s'assurer que la meilleure fonction serait choisie pour quantifier la distribution d'orientation de pixels d'un matelas de lamelles de panneaux OSB.

Tableau 1 Ajustement de courbe selon différentes fonctions

Cauchy	Gamma	A	I	C	RSS
	16,5	-1,6	304257	397	486765
Gauss	Sigma	Mu	F	C	RSS
	15,8	-1,8	10072635	20373	1139509
Von-Mises	Kappa	Mu	F	C	RSS
	14,6	-1,3	174218	22805	1145297

Graphiquement, nous pouvons voir que l'ajustement de courbe avec la fonction de Cauchy est excellent pour quantifier l'orientation des lamelles d'ébauches de panneaux maîtres (Figure 33). En plus d'analyser une ébauche au complet, il serait intéressant d'analyser les résultats sur des sections plus petites. Par exemple diviser une ébauche en 4,8,16,32... pour voir si l'orientation est similaire sur l'ensemble du panneau. Ou bien commencer l'analyse de l'orientation dans un coin sur une petite section (10X10 cm par exemple) et augmenter la section en partant du même coin (20X20, 40X40...) et voir quand la valeur d'orientation se stabilise. Cela permettrait de déterminer la section minimum pertinente pour l'analyse.

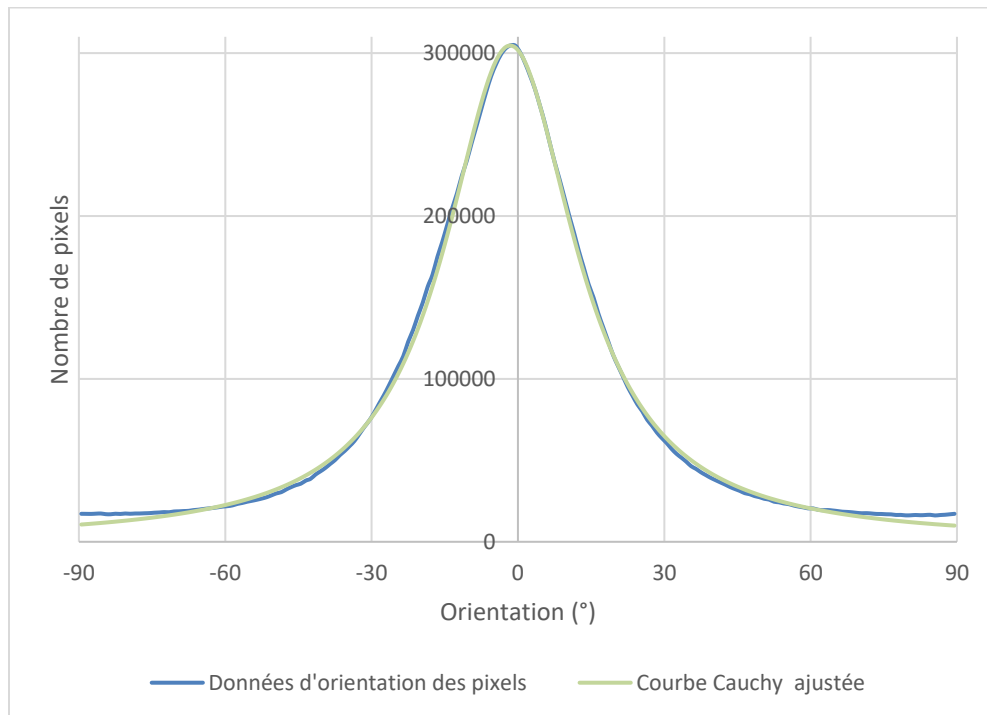


Figure 33 Courbe de Cauchy ajustée selon l'orientation des pixels de l'ébauche.

3.4 Modélisation du matelas de lamelles en langage Python

Afin de s'assurer que la distribution des pixels ajustée à une courbe de Cauchy représente fidèlement l'orientation réelle des lamelles, une modélisation numérique a été réalisée (Annexe B). Cette simulation, basée sur la fonction de Cauchy, visait à valider la cohérence visuelle entre la répartition simulée des lamelles et celle observée sur les images expérimentales. Les ébauches générées ont également été analysées à l'aide du

module OrientationJ, afin d'évaluer la sensibilité de l'outil aux différents paramètres de distribution et de vérifier sa capacité à produire des résultats cohérents avec les mesures réelles.

Dans un premier temps, des rectangles de 100 mm x 20 mm ont été générés et placés aléatoirement sur une surface de 1219 mm x 2438 mm. Une orientation a été attribuée à chaque lamelle selon des paramètres de distribution définis par une fonction de densité de probabilité de type Cauchy.

À la suite des premiers résultats obtenus avec MATLAB, une version optimisée du simulateur a été développée en langage Python. Ce nouvel outil a permis d'automatiser la génération et la sauvegarde des ébauches, tout en augmentant considérablement le nombre de lamelles modélisées. Des améliorations ont également été apportées au réalisme de la simulation, notamment par la randomisation des dimensions, l'ajout de teintes de bois variées et l'intégration d'un ombrage simulé. Ces ajustements ont permis d'accroître la fidélité visuelle des ébauches, tel qu'illustré à la Figure 34.



Figure 34 Ébauche de panneau générée avec le langage Python fait de 18000 trapézoïdes de 4 couleurs avec ombrage.

Chapitre 4 Résultats et discussion

4.1 Profils de masse volumique des éprouvettes testées en laboratoire

Les profils de masse volumique selon l'épaisseur des panneaux industriels ont été mesurés afin de vérifier l'homogénéité de la masse volumique des éprouvettes testées en flexion. La Figure 35 présente la masse volumique moyenne des éprouvettes. Il y a une grande variabilité de la masse volumique de l'OSB testé. On

observe un facteur deux entre la masse volumique minimale (373 kg/m^3) et maximale (739 kg/m^3) sur les 90 échantillons. Le groupe de 90° possède la médiane la plus élevée et le groupe de 70° la médiane la plus faible. La masse volumique moyenne globale des échantillons est de 600 kg/m^3 et l'écart-type est de 70 kg/m^3 .

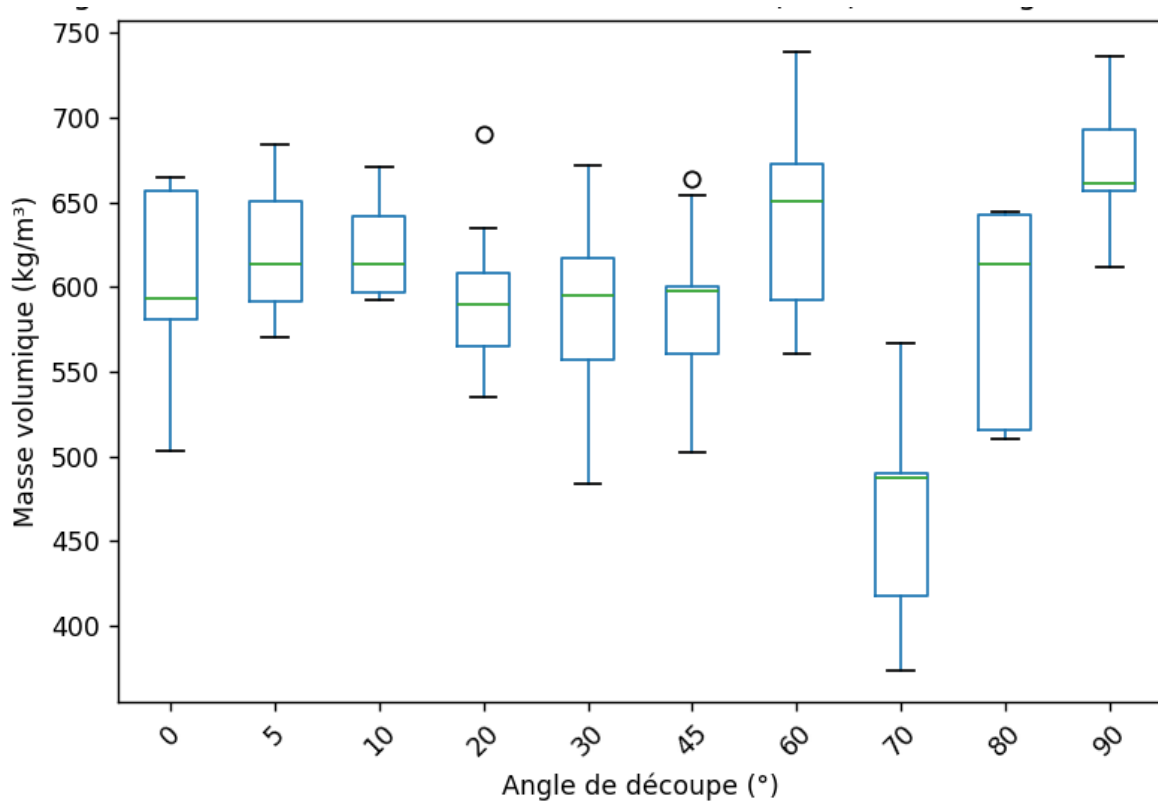


Figure 35 Diagramme en boîte des masses volumiques des échantillons par angle de découpe en ordre croissant.

Les Figures 36, 37 et 38 présentent le profil de masse volumique pour l'ensemble des échantillons. On observe que la masse volumique est supérieure du côté lisse des éprouvettes (à la droite des graphiques) comparé au côté texturé. La différence de surface survient lorsque les ébauches sont pressées, puisqu'elles reposent sur une grille métallique permettant leur chargement et leur déchargement dans la presse. Ceci ralentit le transfert de chaleur lors de la fermeture de la presse, ce qui défavorise le pressage à chaud. Le contact direct de la presse au-dessus des ébauches favorise une densification élevée et une polymérisation rapide du liant. La masse volumique atteint son minimum au centre des panneaux, ce qui s'explique aussi par le transfert de chaleur plus faible au centre des ébauches. La vitesse de fermeture de la presse, la température des plateaux et la pression appliquée influencent la masse volumique des panneaux produits. Il est nécessaire de laisser s'échapper la vapeur d'eau lors du pressage et d'assurer une vitesse de polymérisation adéquate, sans quoi les panneaux seraient inutilisables.

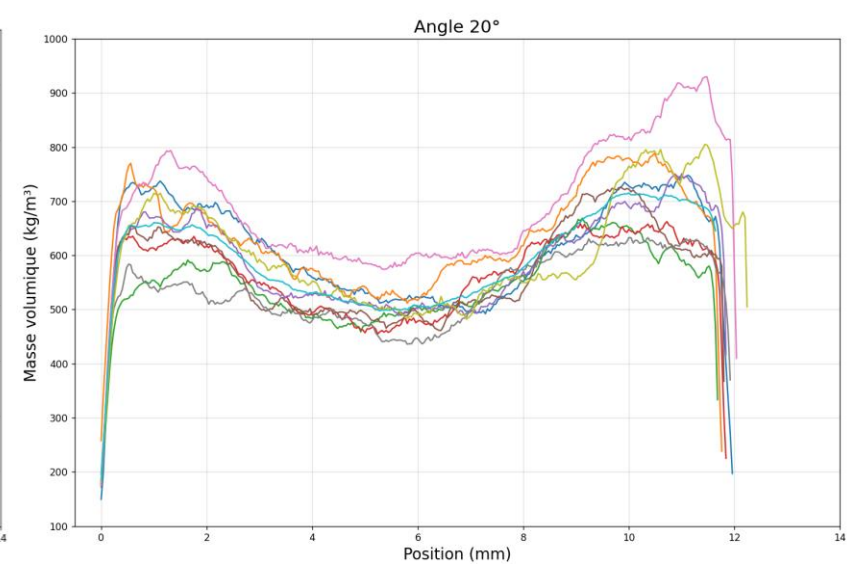
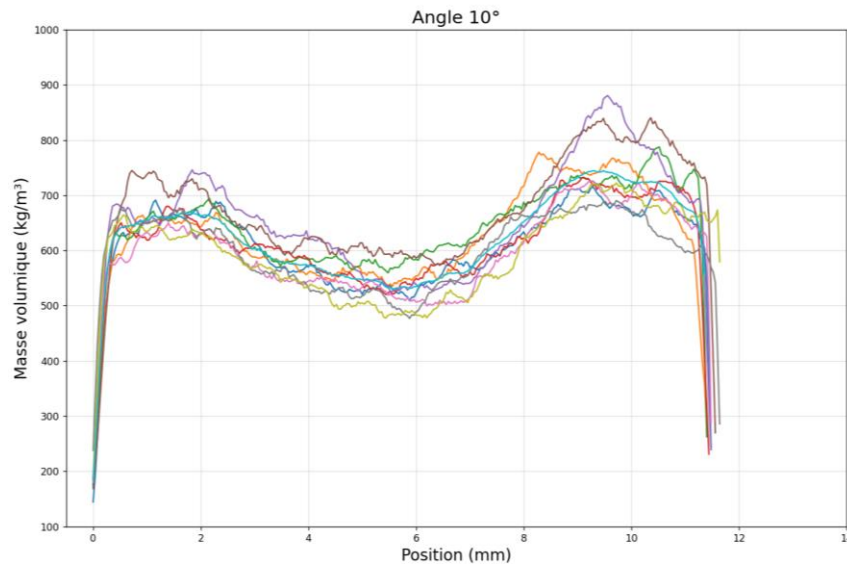
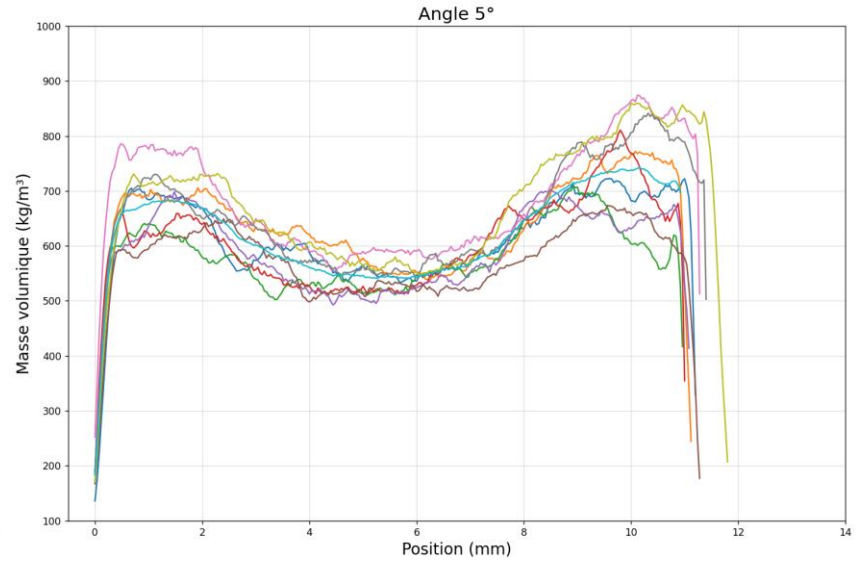
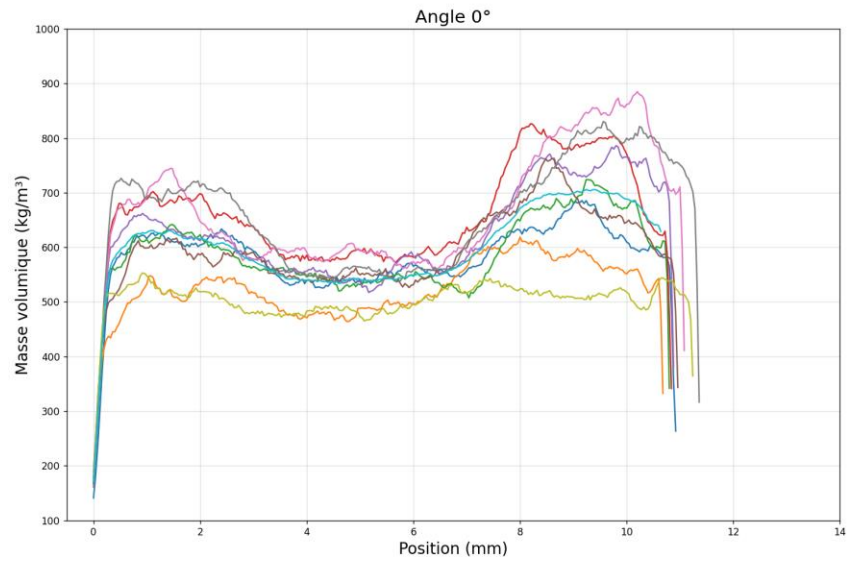


Figure 36 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm x 50 mm avec des angles de découpe de 0°, 5°, 10° et 20° obtenus par rayons X

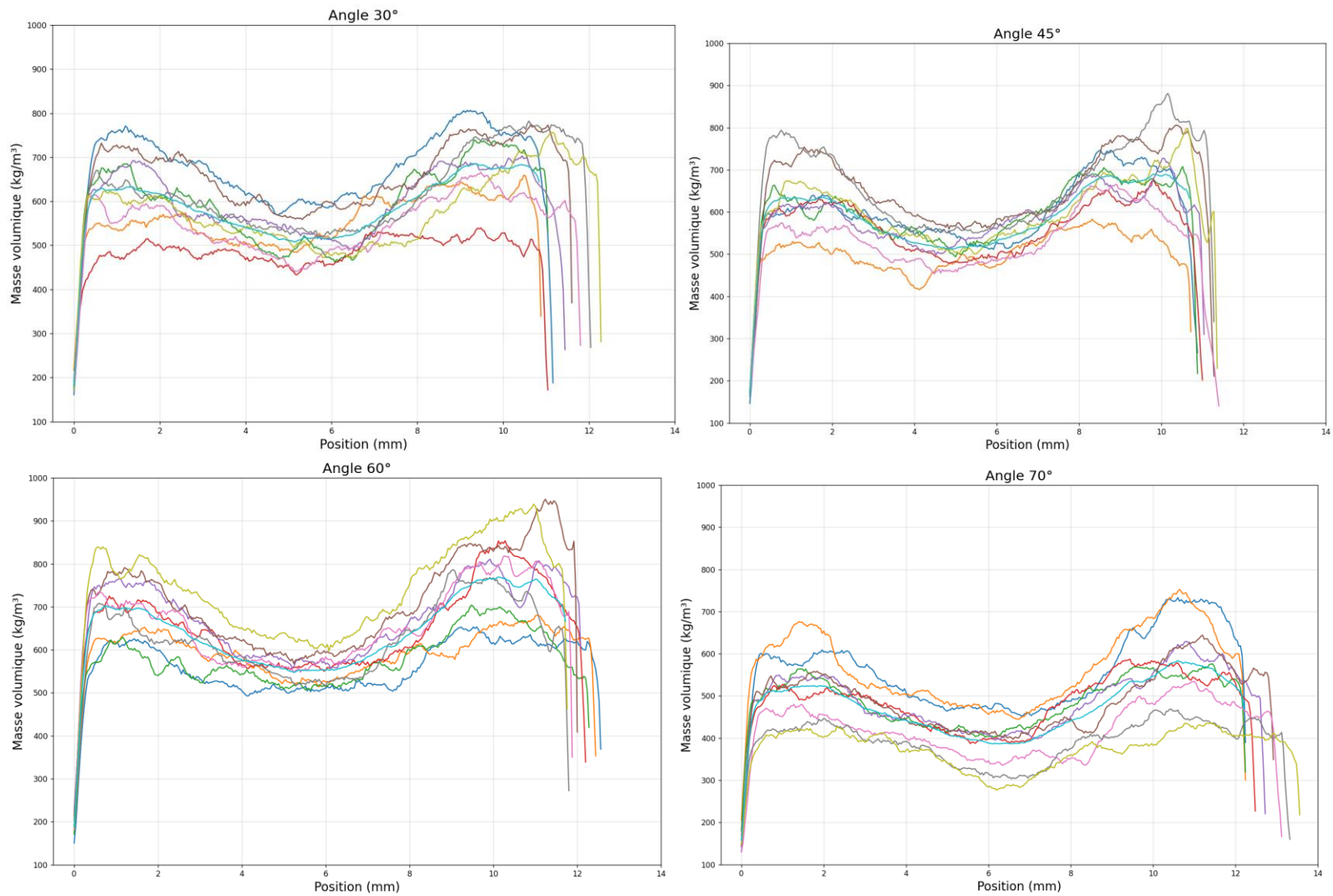


Figure 37 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm x 50 mm pour les angles de découpe de 30°, 45°, 60° et 70° obtenus par rayons

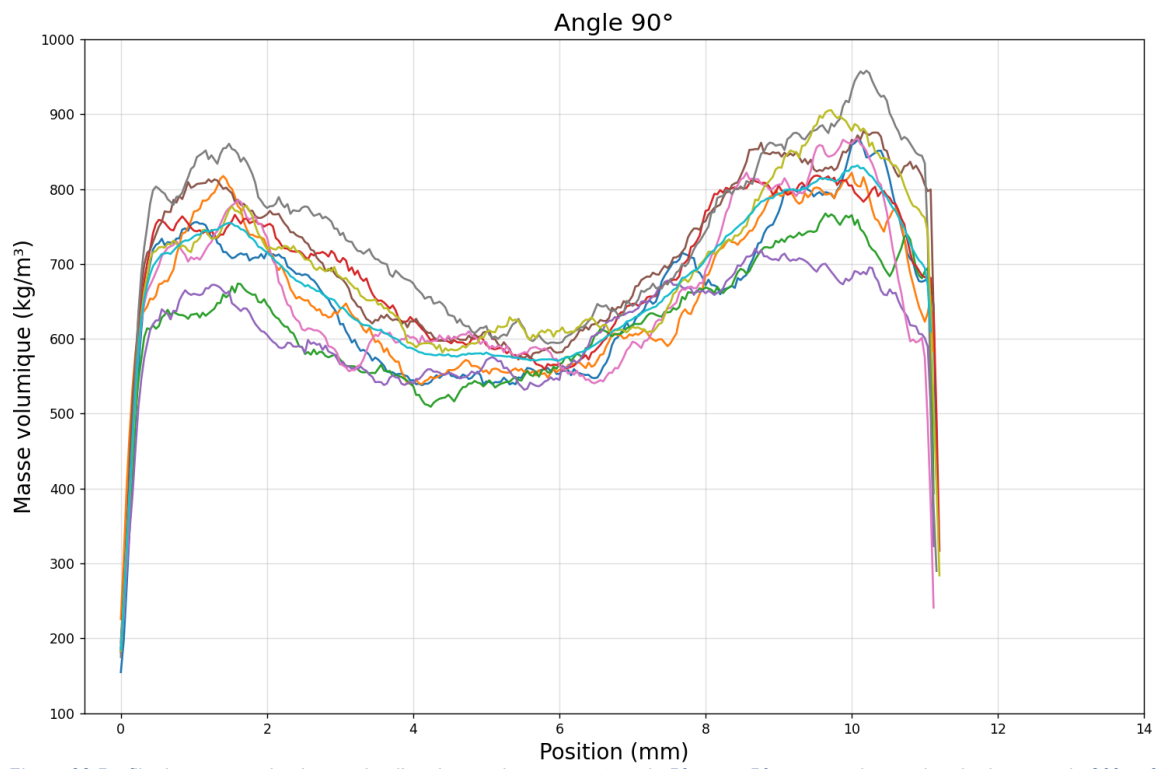
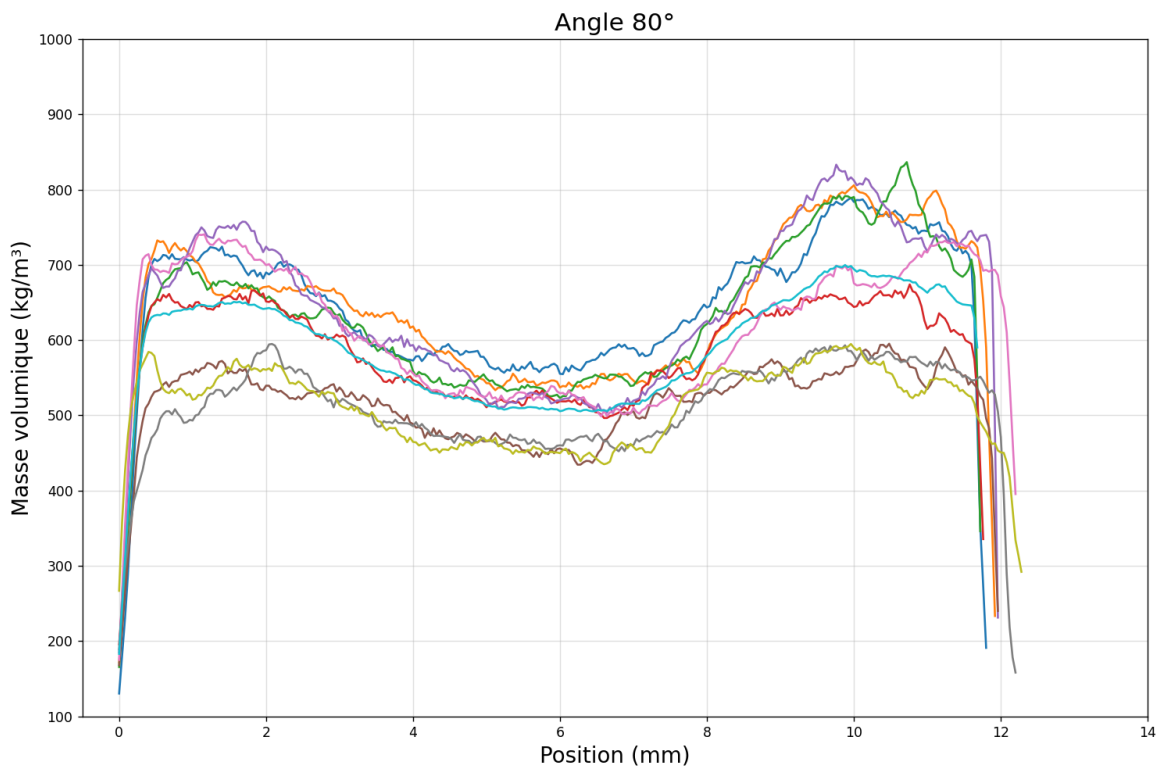


Figure 38 Profils de masse volumique selon l'épaisseur des éprouvettes de 50 mm x 50 mm pour les angles de découpe de 80° et 90° obtenus par rayons X.

Les profils de masse volumique nous permettent de constater qu'ils sont variables, mais que leur forme reste assez constante.

La Figure 39 présente les résultats obtenus pour le module d'élasticité (MOE) en flexion statique multiplié par l'inertie selon l'angle de découpe des éprouvettes dans le PLO et l'orientation des lamelles de surface mesurée selon *OrientationJ*. On constate que les deux orientations sont similaires.

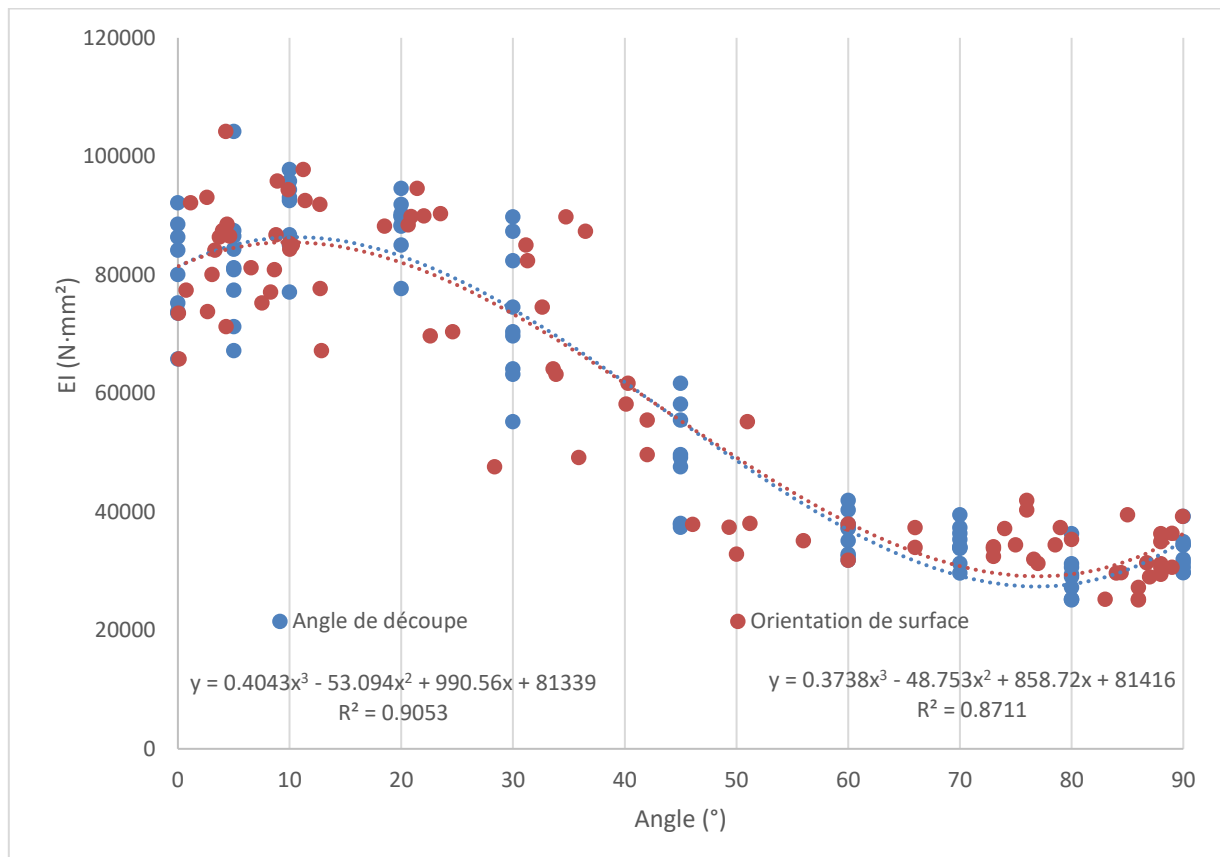


Figure 39 Rigidité EI selon l'angle de découpe des neuf éprouvettes pour les 10 groupes d'angles de découpe et selon l'angle d'orientation de surface moyen des pixels de l'éprouvette mesuré par analyse d'image.

L'effet de l'angle de découpe et l'orientation des lamelles de surface influencent la rigidité des éprouvettes en flexion. Un facteur d'environ quatre sépare le EI des éprouvettes les plus rigides à 5° des moins rigides à 85°. Une courbe polynomiale de degré 3 est idéale pour modéliser la résistance du MOE selon l'angle des lamelles (figure 39). La courbe possède la même forme que la loi d'Hankinson utilisée pour modéliser le comportement d'une éprouvette de bois sans défauts avec un ratio de MOE en flexion perpendiculaire/parallèle (Q/P) de 0.25. Elle dévie des résultats de Barnes (2002) qui a mesuré une diminution de 30% lorsque des lamelles de 0,635 mm d'épaisseur sont orientées à 20°. La courbe polynomiale de notre essai démontre une diminution de 30% du MOE maximal à 37° pour une même épaisseur cible de lamelles de 0,635 mm.

La figure 40 montre un effet globalement linéaire de la masse volumique moyenne des éprouvettes sur le MOE. Pour tous les angles, le MOE tend à augmenter avec la masse volumique, mais certains R² faibles indiquent que cette relation n'est pas systématique. Les valeurs se regroupent selon l'angle : les angles de 0°, 5° et 10° se trouvent dans la partie supérieure du graphique, tandis que ceux de 70° à 90° apparaissent dans la partie inférieure.

Il faut tenir compte de la masse volumique si l'on veut modéliser la résistance en flexion en fonction de l'angle des lamelles, étant donné sa grande variabilité et son impact sur le MOE. Bien qu'une corrélation positive soit observée globalement, elle n'est pas toujours statistiquement robuste pour tous les angles. Le MOE spécifique (équation 9) est utilisé pour calculer l'équation de la courbe de régression polynomiale et réduire l'effet de masse volumique sur le MOE puisque l'effet est clair dans la littérature, quoique inconsistant à la figure 40.

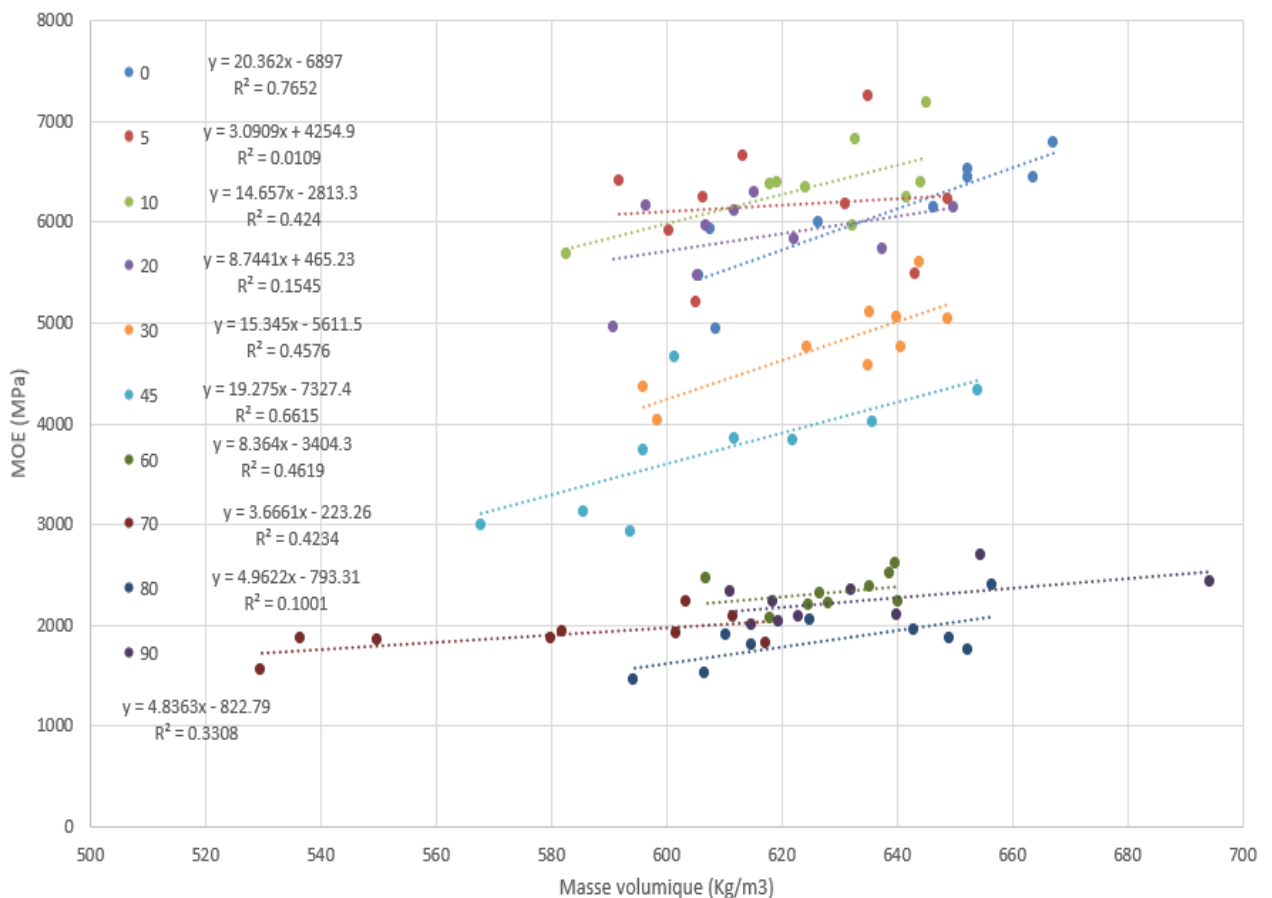


Figure 40 Module d'élasticité en flexion selon la masse volumique pour chaque angle de découpe.

$$MOE_S = \frac{MOE}{Masse\ volumique} \quad (9)$$

MOE_s : MOE Spécifique

MOE : Module d'élasticité mesuré (MPa)

Masse volumique : Masse volumique calculée (kg/m³)

Étant donné que la densité exerce une grande influence sur le MOE, il est intéressant de normaliser cette variable. L'interprétation des données devient plus abstraite (10⁶·m²/s²), néanmoins l'uniformisation de la masse volumique permet de mieux isoler l'influence de l'orientation des lamelles sur la rigidité du matériau. Le graphique suivant (Figure 41) présente la variation du MOE_s en fonction de deux types d'orientations : l'orientation de découpe (bleu) et l'orientation des pixels (rouge).

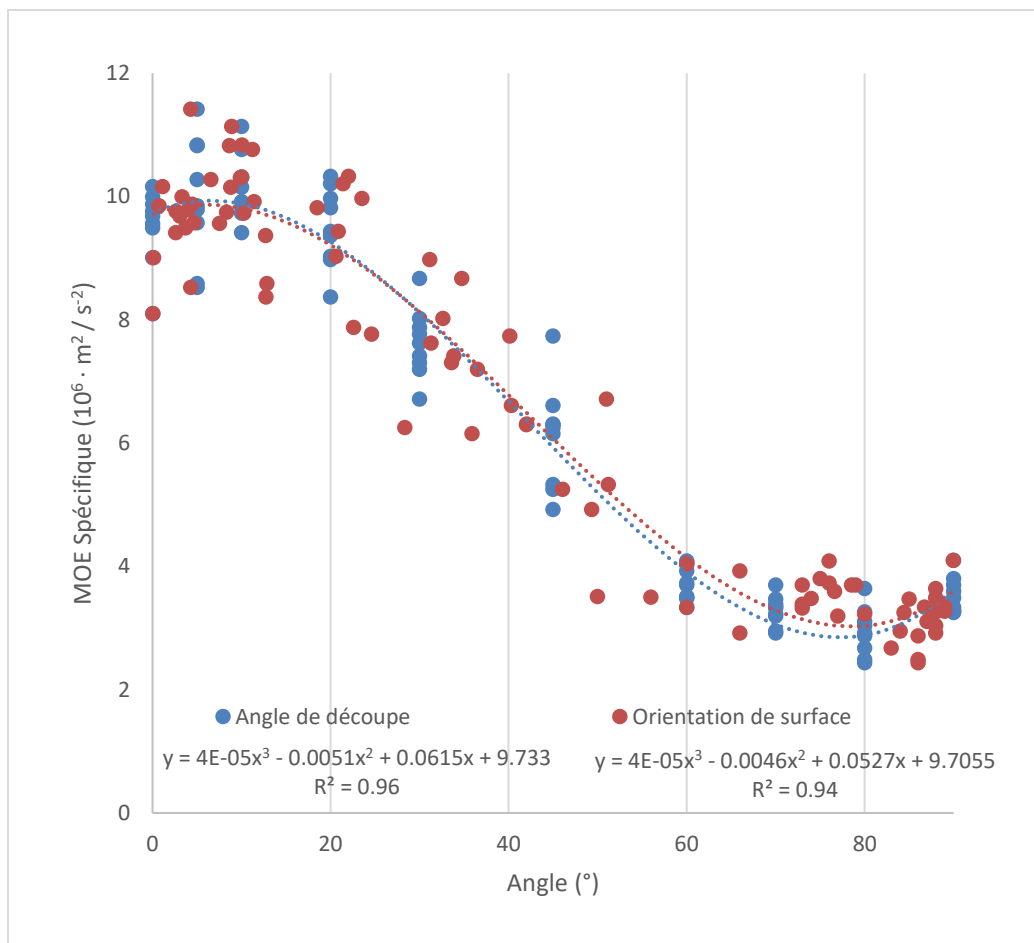


Figure 41 Module d'élasticité spécifique en flexion selon l'angle de découpe et selon l'angle moyen des pixels de la couche de surface.

Les courbes suivent une tendance polynomiale du troisième degré, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 \approx 0,96$ pour l'angle de découpe et $R^2 \approx 0,94$ pour l'orientation des lamelles de surface). Une courbe sigmoïde serait peut-être mieux adaptée aux données considérant l'équation de Barnes. Le MOE spécifique

commence à une valeur élevée d'environ 10,0 à 0° et diminue progressivement pour atteindre 2,5 à 80°. Cette tendance indique une perte importante de MOE_s lorsque l'orientation des lamelles s'éloigne de l'axe longitudinal du panneau. Les deux courbes montrent une décroissance marquée qui débute aux alentours de 20° avec un plateau à partir de 60°. Cette zone : [20°, 60°], représente la transition où l'alignement des lamelles a un impact critique sur les propriétés mécaniques jusqu'à ce que l'effet s'atténue.

Ceci illustre l'effet marqué de l'anisotropie de ce matériau composite. Les angles proches de 0° maximisent la rigidité en alignant les fibres dans l'axe principal des éprouvettes. En revanche, les angles proches de 90° se traduisent par une orientation perpendiculaire où les propriétés mécaniques sont principalement dominées par la cohésion des lamelles, entraînant une diminution du MOE spécifique. Les fibres alignées sont plus efficaces pour supporter les charges en flexion que la matrice de colle et les lamelles mal orientées. Cette réduction reflète également une limitation au transfert de contraintes entre les lamelles lorsque leur orientation est perpendiculaire à l'axe d'application de la charge.

Le module de rupture en flexion (MOR) est également intéressant à étudier. Il découle de la charge maximale atteinte lors des essais. Il se situe après la zone de déformation élastique de la courbe effort-déformation où les déformations deviennent permanentes, résultant de charges excessives. En pratique, le module d'élasticité est le plus utilisé, mais le MOR doit également satisfaire aux exigences normatives. La Figure 42 présente le MOR en fonction de l'angle de découpe. On observe une diminution constante de la médiane du MOR entre 0 et 70°, et une diminution marquée à partir de 20°.

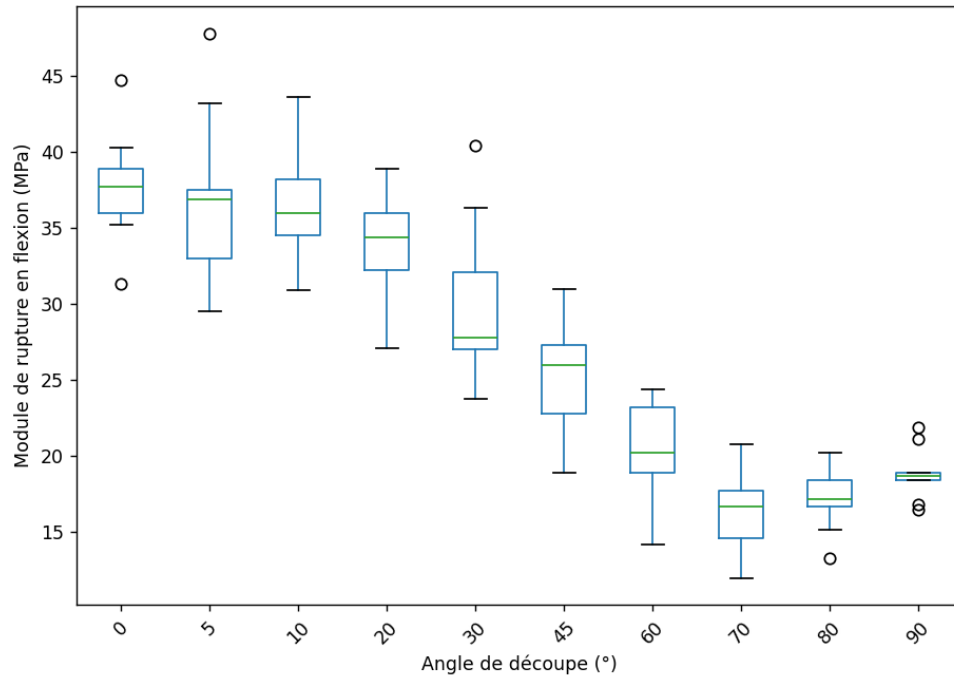


Figure 42 Module de rupture en flexion selon l'angle de découpe des éprouvettes.

Le MOR_s montre que la densité joue également un rôle dans la contrainte maximale que peut supporter une éprouvette. On observe maintenant la médiane minimale à 90° (Figure 43).

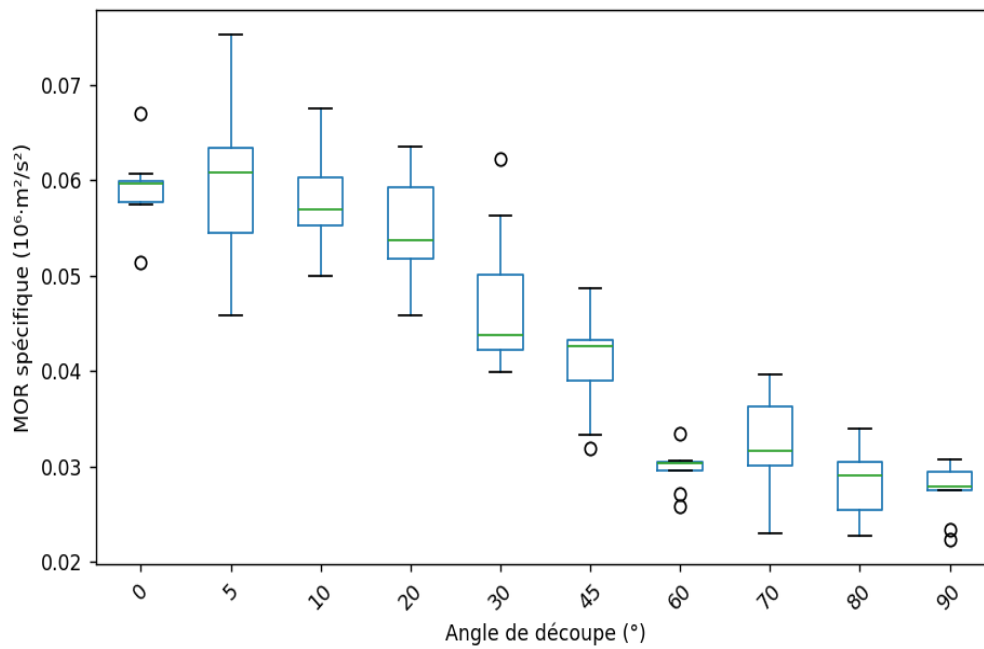


Figure 43 Module de rupture spécifique en flexion selon l'angle de découpe des éprouvettes.

4.2 Évaluation de *Fiji* et *OrientationJ* à partir d'ébauches d'OSB simulées

Une analyse graphique approfondie a été réalisée en Python. Des matelas de lamelles de PLO ont été générés graphiquement avec des paramètres de courbe Cauchy préétablis. La géométrie des lamelles, la couleur et l'ombrage ont été modifiés pour s'approcher d'une photo d'ébauche réelle. L'analyse par régression linéaire a révélé une relation significative ($R^2 = 0,933$, $p < 0,001$, $n = 80$) entre les paramètres d'échelle de Cauchy programmés et mesurés (Figure 44). Le script *Fiji* a été utilisé pour déterminer l'orientation des pixels et l'ajustement de courbe Cauchy fut codé en Python (Annexe B). La simulation présentée à la figure 44 présente la mesure du paramètre gamma en fonction du gamma utilisé pour générer le matelas de lamelle. On voit les résultats d'analyse de 80 ébauches (8 valeurs de gamma différentes avec 10 répétitions).

Bien que la méthodologie d'analyse d'image ne produise pas de valeurs de γ identiques à celles programmées, elle a permis d'identifier avec une grande sensibilité les variations relatives dans la distribution des orientations. Une analyse de discrimination statistique a confirmé la capacité de la méthode à détecter des différences aussi faibles que $\Delta\gamma = 0,5$ unité ($p = 0,011$), ce qui confirme son utilisation possible dans un contexte réel.

La modélisation nous permet de conclure qu'il y a une forte corrélation entre l'angle d'orientation des lamelles et l'angle d'orientation des pixels. A priori, il n'est pas évident qu'un outil qui mesure la similitude des pixels avoisinants pour déterminer l'orientation d'une image permette de mesurer l'orientation des lamelles d'ébauches d'OSB adéquatement.

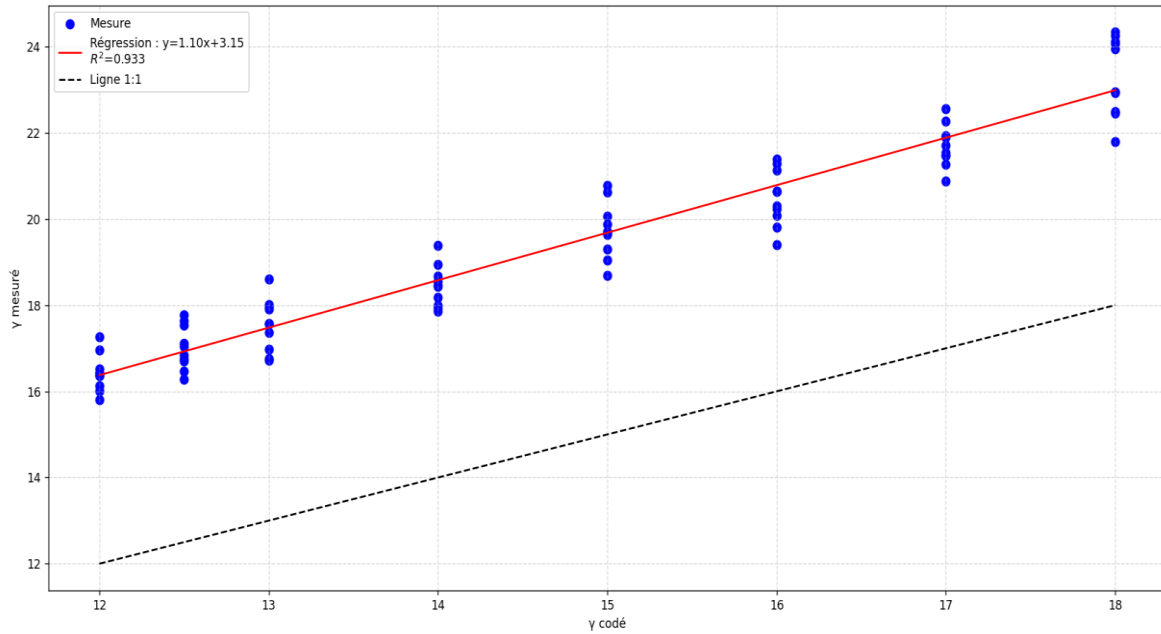


Figure 44 Nuage de points comparant les valeurs mesurées de γ aux valeurs réelles de γ (8 valeurs différentes avec 10 répétitions chacune), avec la droite de régression linéaire et la ligne de référence 1:1.

Le décalage systématique observé entre les valeurs mesurées et réelles (ordonnée à l'origine = 3,15) reflète l'influence de la définition des bords des lamelles, du contraste des images et des caractéristiques morphologiques sur l'analyse de l'orientation des pixels (Figure 45). Il est possible de constater cette affirmation en générant différent matelas avec des valeurs paramétriques différentes. Ce décalage est constant sur l'ensemble des paramètres testés, ce qui permet de calibrer si une quantification absolue est nécessaire.

a)



b)

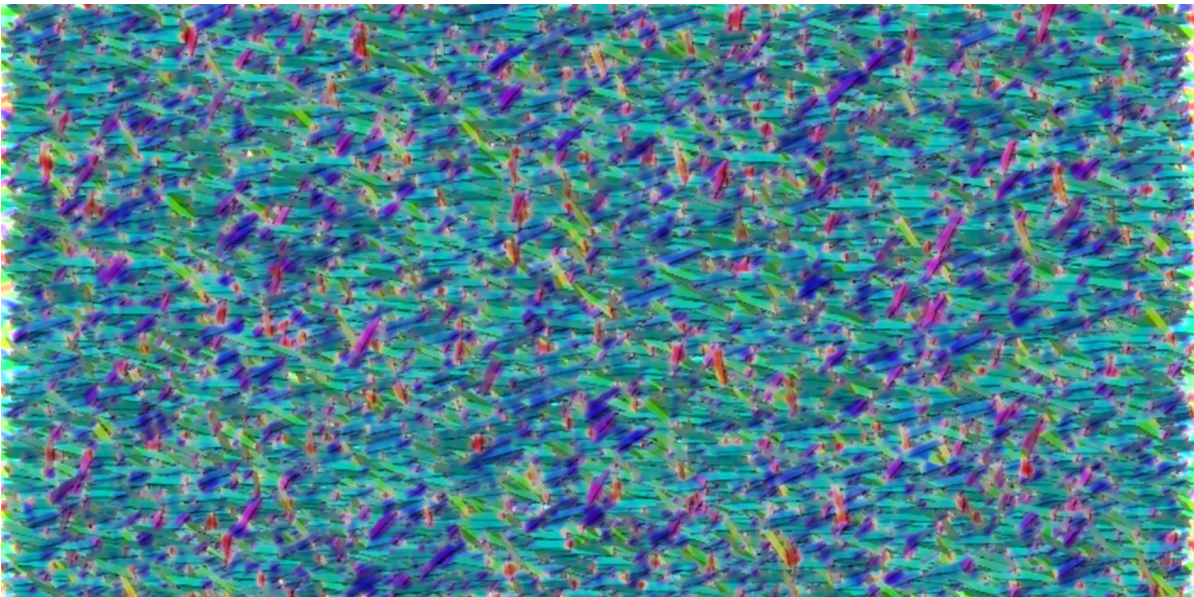


Figure 45 a) Simulation informatique d'une ébauche b) et analyse d'orientation visuelle des pixels.

4.3 Analyse d'ébauches d'OSB de l'industrie

Cette section porte sur l'étude de l'orientation des lamelles de la couche de surface supérieure des ébauches maîtresses de panneaux OSB en usine (Figure 46). L'hypothèse nulle est que la distribution d'orientation des lamelles resterait inchangée, peu importe la vitesse de rotation des disques et de l'angle du déflecteur. Une courbe de Cauchy a été ajustée aux données d'orientation de pixels *Fiji* pour chaque photo de matelas. Un

algorithme de gradient réduit généralisé a permis de minimiser la différence absolue entre le nombre de pixels mesuré et la courbe de Cauchy.

Le paramètre étudié est la valeur de gamma et non la moyenne, puisque le but est de maximiser l'alignement des lamelles près de 0 et non d'avoir une moyenne de 0. Les valeurs du paramètre « a » qui représente la valeur moyenne d'une courbe Cauchy sont présentées au Tableau 2 à titre informatif. La valeur de gamma est moins sensible à l'alignement expérimental de la caméra comparé au paramètre « a », ce qui rend l'analyse statistique plus robuste. Le pourcentage de lamelles entre -20° et 20° aurait été aussi un bon paramètre d'étude, puisque la résistance en flexion est maximisée sur cette étendue. Le script *Python* utilisé pour l'analyse des images et l'orientation des pixels calcule la valeur de chacun de ces trois paramètres et l'ajoute au fichier d'analyse CSV produit.

Tableau 2 Moyenne du paramètre a de la courbe Cauchy des expériences 1 & 2 combinées selon la combinaison de paramètre (voir équation 8)

Déflexion (°)	Rotation (rpm)	a (°)
4	30	-0,5
	45	-0,2
	60	-0,4
0	30	-0,1
	45	-0,3
	60	-0,3

L'expérience a été réalisée à deux reprises. Certaines difficultés ont eu lieu : un léger déplacement de la caméra lors de la prise de données du troisième groupe de l'expérience, un blocage de la conformatrice lorsque l'angle du déflecteur était de -4° ou que la vitesse de rotation était de 30 RPM. Nous nous sommes adaptés en conséquence et n'avons retenu que les niveaux présentant un ensemble complet de données d'ébauche pour l'analyse statistique.



Figure 46 Ébauche d'OSB sur la ligne de production 4,88 m x 2,44 m.

Le diagramme en boîte (figure 47) présente les résultats des analyses de l'orientation des pixels des ébauches de panneaux OSB. À cause d'un problème technique, une seule donnée est disponible pour la vitesse de 30 RPM de l'expérience 2. Le débit de lamelles trop élevé de la conformatrice a causé des agglomérats sur le dessus des ébauches. Nous avons donc décidé d'exclure la vitesse de 30 RPM du reste de l'expérience. Cette exclusion repose donc sur une décision d'ingénierie, et non sur des résultats statistiques. Inclure ce niveau nous aurait certainement permis de rejeter l'hypothèse nulle à cause des agglomérats orientés aléatoirement. La vitesse de 30 RPM n'était ni réaliste ni suffisante pour le débit de production.

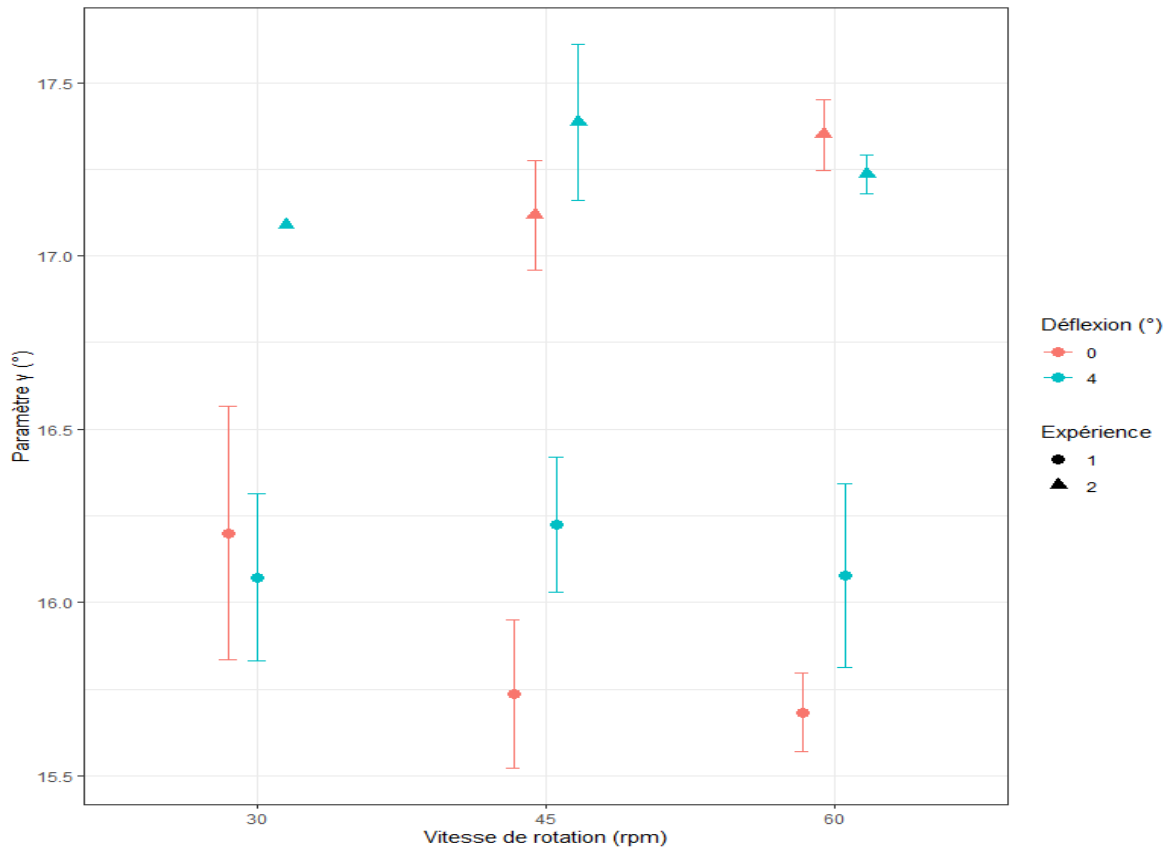


Figure 47 Effets de l'angle de déflexion et de la vitesse de rotation des disques orienteurs sur le paramètre de distribution gamma permettant de quantifier l'orientation des lamelles de surface de l'expérience combinée.

La Tableau 3 présente les résultats de l'analyse de variance combinés (excluant la vitesse de rotation de 30 RPM puisqu'il n'y a pas assez de données pour l'inclure). Nous observons une différence significative entre les expériences due au positionnement de la caméra. La vitesse de rotation des disques n'a pas d'effet significatif. L'analyse de variance de type III a été choisie étant donné le déséquilibre du jeu de données causé par le traitement avec un angle de déflecteur de -4° et le traitement avec 30 RPM qui ont été abandonnés respectivement lors de la première et deuxième expérience. L'effet de l'angle de déflexion ($Pr > 0,05161$) est à la limite d'être significatif au niveau de probabilité $\alpha = 0.05$.

Tableau 3 Résultat de l'ANOVA de type III sur le modèle mixte

Source	Chi carré	DDL	Pr > Chi-carré	
(Intercept)	7813,0515	1	<2,2e-16	***
Angle de déflexion	3,7883	1	0,05161	.
Vitesse de rotation	0,0435	1	0,83481	
Expérience	25,8177	1	3,75E-07	***
Déflexion x Rotation	0,0712	1	0,7896	
Déflexion x Expérience	0,3578	1	0,54972	
Rotation x Expérience	0,595	1	0,44051	
Déflexion x Rotation x Expérience	0,3148	1	0,57474	

En interprétant de manière objective tous les résultats d'analyse d'image, nous concluons qu'il n'y a pas d'influence des paramètres orienteurs sur le paramètre de distribution de lamelles gamma. Cependant, étant donné les imprévus expérimentaux lors des deux essais en usine, la puissance statistique prévue n'a pas été atteinte. Dans le futur, une méthodologie plus robuste et un choix judicieux de niveaux à étudier nous permettraient certainement de déceler une différence significative.

En regardant l'ensemble des données sous un angle critique, les résultats de l'analyse sans le point 16 de l'expérience 1 (dont le résidu dévie de la normalité) montrent qu'il est raisonnable de conclure que l'angle de déflexion a un impact significatif sur l'angle des lamelles de panneaux OSB (Valeur P : 0,01819 (Tableau 4)) au niveau alpha 0,05. L'angle de déflexion de 0° oriente mieux les lamelles que 4°. Le point 16 n'a pas été exclu de l'analyse de l'expérience 1 et 2 considérant le faible nombre de données déjà présent (tableau 3).

Tableau 4 Résultat de l'ANOVA de type II de l'expérience 1 excluant le point 16 du jeu de données.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur F	Pr (>F)	
Bloc	3	1,23066	0,41022	3,5404	0,04273	*
Angle de déflexion	1	0,82793	0,82793	7,1453	0,01819	*
Vitesse de rotation	2	0,04027	0,2014	0,1738	0,84227	
Déflexion x Rotation	2	0,06434	0,03217	0,2776	0,76166	
Résidus	14	1,62218	0,11857			

4.4 Essais de flexion sur les panneaux industriels

4.4.1 Essais de flexion expérimentaux

Les essais de flexion ont été réalisés selon la norme PS 2-18 (APA 2019) qui se réfère à la norme ASTM D3043 (D07 Committee 2025) (1,22 m x 2,44 m) - Méthode C. Les propriétés en flexion obtenus pour les panneaux

produits avec la combinaison 4° et 60 RPM (utilisée en production actuelle) fut comparée à la combinaison 0° et 60 RPM (combinaison la plus performante lors du 1^{er} essai) sur 20 échantillons. Les résultats sont présentés au tableau 5.

Tableau 5 Résultats des essais de flexion statique obtenus pour des panneaux de 1,22 m x 2,44 m.

Angle de déflexion (°)	Masse (kg)	EI (N·mm ²)	Moyenne (N·mm ²)	Écart-type (N·mm ²)
0	23,5	100940		
0	24,0	109567		
0	22,9	81331		
0	24,0	99649		
0	23,5	98043	92587	9850
0	23,3	85479		
0	23,1	86945		
0	23,5	96362		
0	22,4	78439		
0	24,0	89112		
4	24,6	110111		
4	23,3	82257		
4	22,7	73084		
4	23,3	85222		
4	22,9	74145	85503	12365
4	23,3	72422		
4	23,5	80019		
4	24,4	96617		
4	23,8	97661		
4	23,3	83495		

Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée afin de tester l'effet de la déflexion (0° vs 4°) sur la rigidité EI, tout en contrôlant l'influence de la masse en l'incluant comme covariable. L'ANCOVA repose sur un modèle de régression linéaire, et les p-values associées aux coefficients ont été évaluées à l'aide de tests t. Le modèle linéaire est présenté ci-dessous (équation 8).

$$EI = \beta_0 + \beta_1 \times M + \beta_2 \times Angle [1 \text{ ou } 0] + \varepsilon \quad (8)$$

EI : Module d'élasticité multiplié par l'inertie (N·mm²)

β_0 : Intercept (N·mm²)

β_1 : Pente commune (N·mm²/kg)

M : Masse (kg)

β_2 : Effet de l'angle de déflexion (à poids égal) (N·mm²)

Angle : Valeur binaire (1 si l'angle de déflexion est à 0°, 0 autrement)

ε : Erreur aléatoire (N·mm²)

Les valeurs des paramètres de la régression sont présentées à l'équation 9.

$$EI = -306147 + 17025 \times M + 8616 \times Angle [1 \text{ ou } 0] + \varepsilon \quad (9)$$

Il y a une augmentation de 10 % (8616 N·mm²) de EI lorsque l'angle de déflexion est à 0 degré comparativement à 4 degrés. Ceci équivaut à un effet de masse de 0,5 kg (17025 N·mm² kg⁻¹ divisé par 8616 N·mm²) de bois pour un panneau de 11 mm. Ceci représente 2.1% de la masse moyenne des panneaux testés. La valeur P de l'angle de déflexion est de 0.00462, donc l'effet est significatif (Annexe A).

L'amélioration des performances mécaniques permet une réduction calculée de la densité des panneaux de **14,8 kg/m³** (de 650 à 635 kg/m³) tout en conservant des propriétés structurales équivalentes. Cette réduction est fondée sur la relation empirique entre la masse et EI, établie à partir des résultats de l'ANCOVA.

La Figure 48 présente les données des essais de flexion. Un intervalle de confiance à 95% est calculé pour chacune des droites. Le R² ajusté est de 0,736, donc le modèle explique bien la variance observée. Le test Shapiro-Wilk et le test de Levene n'ont pas de différence significative donc la normalité et l'homogénéité des variances sont respectées. Les pentes ne sont pas parfaitement parallèles sur la figure (l'effet de la masse semble avoir un plus grand impact pour le groupe à 4°), donc un test de Fisher a été fait pour s'assurer qu'il n'y a pas d'interaction entre la masse et l'angle de déflexion. La valeur P de 0.444 nous permet d'affirmer que les pentes sont statistiquement parallèles. Le graphique présente la régression expérimentale pour chaque groupe de données.

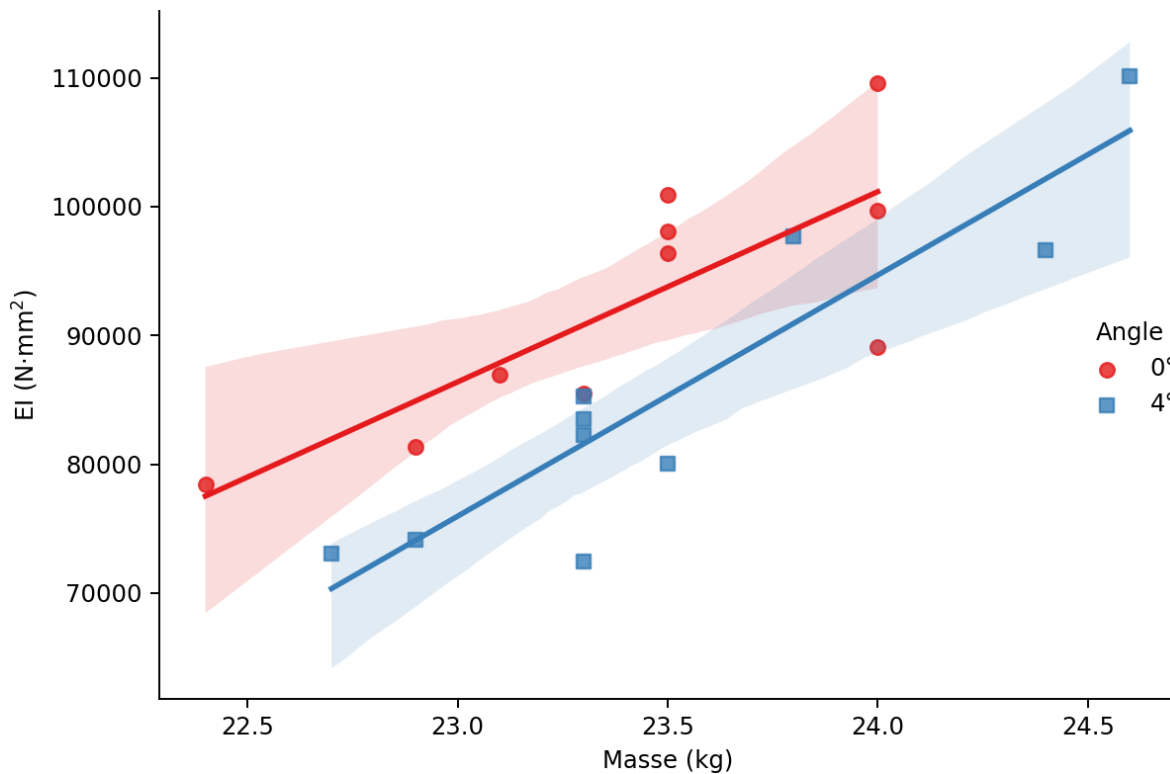


Figure 48 ANCOVA de l'effet de l'angle de déflexion et la masse sur le MOE-Inertie avec intervalle de confiance 95% sur 20 éprouvettes

L'hypothèse pour expliquer ce gain de EI est le meilleur alignement des lamelles de surface. Le meilleur alignement est dû à l'angle du déflecteur qui permet à plus de lamelles d'arriver au tout début de l'orienteur tout en redirigeant une quantité significative aux balais rotatifs sans quoi la conformatrice se bloquerait. En ayant plus de lamelles tombant au début de la conformatrice, elles ont plus de temps et d'espace pour s'aligner.

4.4.2 Analyse économique de la réduction potentielle de la masse volumique des panneaux

Ici nous présentons le calcul des économies potentielles engendrées par un changement de l'angle du déflecteur de la conformatrice à 0 ° considérant une réduction de la masse volumique des panneaux de 2,1%. L'analyse économique est effectuée avec les chiffres de volume annuel et de coût du bois issu de l'usine partenaire de Produits forestiers Arbec - Shawinigan. Le facteur d'utilisation qui établit une corrélation entre le volume de bois acheté et la production de panneaux finale est estimé de manière conservatrice à 0,6. Le pourcentage de matière réduite provient du gain de performance calculé.

Économies annuelles :

$$\text{Économies} = Va * Cm * Pr * Fu \quad (10)$$

Va : Volume annuel de bois acheté (m³ / année)

Cm : Coût du bois (\$ / m³)

Pr : Réduction de la consommation de bois (%)

Fu : Facteur d'utilisation

$$\text{Économies} = \frac{370\,000\,m^3}{\text{année}} * \frac{100\,\$}{m^3} * \frac{2,1}{100} * 0,60 = 466\,200\,\$/\text{année}$$

Densité de panneaux :

$$\Delta\rho = \frac{m}{V} (1 - Pr) \quad (11)$$

$\Delta\rho$: Réduction de densité (kg / m³)

m : Masse moyenne des panneaux testés (kg)

V : Volume d'un panneau 11 mm (m³)

Pr : Pourcentage de matière réduite (%)

$$\Delta\rho = \frac{23,465}{0,03318} (0,021) = 14,85 \frac{kg}{m^3}$$

Les données de volume, la masse et le pourcentage de matière réduite mentionnés ci-haut sont basés sur les 20 échantillons testés. Des bénéfices additionnels comprennent une réduction de la consommation d'adhésif, une diminution de l'usage de cire, ainsi qu'un potentiel d'optimisation des temps de cycle par une formation de

matelas plus homogène. Les impacts environnementaux incluent une réduction de la consommation de bois et une baisse marginale des émissions liées au transport, attribuable au poids inférieur des panneaux.

D'un point de vue industriel, une réduction de la masse des panneaux de 1,22 m x 2,44 m (4'x8') de 11 mm de 0,5 kg (soit 14,8 kg/m³) combinée à un ajustement de l'angle de déflexion permettrait de maintenir les propriétés mécaniques constantes. Ceci pourrait représenter des économies substantielles, estimées à environ 0,5 million de dollars par an.

4.5 Perspectives de recherche et applications industrielles

Les résultats obtenus soulignent l'importance de suivre l'orientation des lamelles dans les panneaux OSB afin de garantir la qualité des produits finis et d'optimiser les paramètres de la conformatrice en production. À cette fin, un pipeline de traitement d'images a été développé avec *Python* et *Fiji* (Figure 49) (détails en Annexe B).

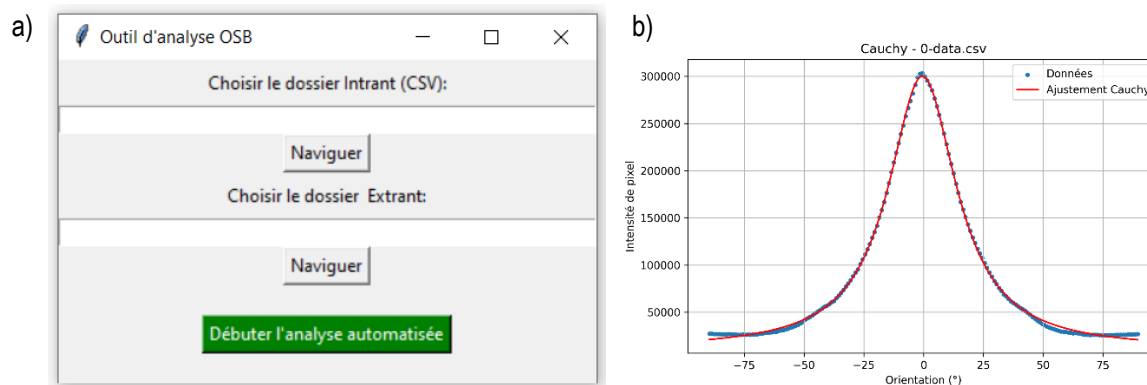


Figure 49 a) Interface Python intuitive b) Exemple d'analyse graphique

Des travaux complémentaires seront nécessaires pour évaluer l'impact de ces ajustements d'angle sur d'autres épaisseurs de panneaux OSB. De plus, la réduction de la masse volumique des panneaux 11 mm (7/16") devra être validée en production afin de confirmer le maintien des performances mécaniques.

Certaines limitations, notamment le faible nombre de blocs expérimentaux et les variations inattendues des conditions de mesure, soulignent la nécessité de modifier le protocole expérimental en adoptant un plan d'échantillonnage élargi et une méthode de prise d'image stable et constante. Dans de prochains essais, la caméra pourrait être fixée aux solives de la toiture de l'usine et l'application mobile de *Sony* pourrait être utilisée pour déclencher l'appareil à distance. Ces efforts supplémentaires permettraient d'affiner les conclusions et de valider les hypothèses formulées. Aussi, il devrait être relativement simple pour la compagnie d'installer une caméra permanente et de suivre l'évolution de l'orientation des lamelles en continu (moyenne ou gamma).

Conclusion

Le but de cette étude était d'optimiser la performance des conformatrices de panneaux en quantifiant leur influence sur l'orientation des lamelles de surface et les propriétés mécaniques des panneaux OSB. Les essais de flexion en laboratoire sur de petites éprouvettes ont révélé une corrélation claire entre une meilleure orientation des lamelles et une augmentation du module d'élasticité et du module de rupture. Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle rigoureux des paramètres de production pour maximiser la rigidité et la durabilité des panneaux. L'utilisation du logiciel *Fiji* et du plugiciel *OrientationJ* s'est avérée efficace pour quantifier l'orientation des lamelles. Cette approche a fait ses preuves en analysant des panneaux simulés prouvant la corrélation entre l'orientation des pixels et l'orientation des lamelles, ouvrant la voie à des applications industrielles ou à des recherches futures.

L'analyse a montré que l'optimisation de la vitesse de rotation des disques, en tenant compte du fait qu'une vitesse trop faible peut bloquer la conformatrice ou entraîner des agglomérats ponctuels de lamelles, ainsi que l'ajustement de l'angle du déflecteur de la conformatrice peuvent améliorer l'alignement des lamelles. Toutefois, les résultats statistiques n'ont pas tous été significatifs en raison de contraintes expérimentales. Par ailleurs, les essais ont démontré que la modification de l'angle de déflexion a un impact significatif sur la résistance en flexion.

Les essais de flexion sur des panneaux de 1,22 m x 2,44 m ont démontré qu'il est possible d'optimiser le procédé de fabrication à l'étape de la fabrication d'ébauche en réduisant la masse volumique visée des panneaux de 11 mm x 1,22 m x 2,44 m de 2,1% lorsque l'angle du déflecteur à l'entrée des lamelles dans la conformatrice est positionné à 0° au lieu de 4°. À une masse volumique constante, les panneaux fabriqués à 0° possédaient une rigidité EI 10% plus élevée. Ceci indique qu'il serait possible de baisser de masse volumique de 14,8 kg/m³ tout en maintenant une rigidité acceptable si l'angle du déflecteur de la conformatrice est maintenu à 0°. Le gain économique potentiel s'élève à 466 200\$/année.

Notre recherche contribue non seulement à l'amélioration des procédés industriels de fabrication de panneaux OSB, mais également au développement de méthodologies robustes pour le contrôle de la qualité et l'optimisation des matériaux. C'est un système ouvert, existant qui pourrait être utilisé rapidement par l'industrie. L'investissement peut-être relativement faible avec une caméra et une intégration dans le système de contrôle de l'usine. Ces avancées soutiennent l'objectif d'une production plus durable et compétitive de l'industrie québécoise sur les marchés nord-américains et mondiaux.

Bibliographie

- Alipraja, I., Hernández, R.E., Cáceres, C.B., and Koubaa, A. 2022. Towards strand production in primary log breakdown: Effects of the counter-knife and temperature on size distribution of Jack pine strands. *BioRes* **17**(2): 2632–2651. doi:10.15376/biores.17.2.2632-2651.
- Alldritt, K., Sinha, A., and Miller, T.H. 2014. Designing a Strand Orientation Pattern for Improved Shear Properties of Oriented Strand Board. *J. Mater. Civ. Eng.* **26**(7): 04014022. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001033.
- Barnes, D. 2000. An integrated model of the effect of processing parameters on the strength properties of oriented strand wood products. *Forest Products Journal* **50**(11/12): 33–42. Forest Products Society, Madison, United States. Available from <https://www.proquest.com/docview/214648020/abstract/EED212D98AEA4E42PQ/11> [accessed 21 February 2024].
- Barnes, D. 2002a. A model of the effect of orienter design and operating variables on the mean angular deviation of oriented wood strands. *Forest Products Journal* **52**(7/8): 63–71. Forest Products Society, Madison, United States. Available from <https://www.proquest.com/docview/214636342/abstract/EED212D98AEA4E42PQ/7> [accessed 21 February 2024].
- Barnes, D. 2002b. Orientation of OSB and particleboard strands for high-strength oriented strand lumber and panel products. *Forest Products Journal* **52**(9): 31–39. Forest Products Society, Madison, United States. Available from <https://www.proquest.com/docview/214634679/abstract/EED212D98AEA4E42PQ/6> [accessed 21 February 2024].
- Chen et al. 2008. Analysis of strand characteristics and alignment of commercial OSB panels. *Forest Products Journal* **58**(6): 94–98. Forest Products Society.
- ASTM International. (2025). *ASTM D3043–17 (Reapproved 2025): Standard test methods for structural panels in flexure*. ASTM International. <https://compass.astm.org/content-access?contentCode=ASTM%7CD3043-17R25%7Cen-US>
- Fan, M., and Enjily, V. 2009. Structural Properties of Oriented Wood Strand Composite: Effect of Strand Orientation and Modeling Prediction. *J. Eng. Mech.* **135**(11): 1323–1330. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1323).
- Forest Economic Advisors. 2023, September. *Monthly Structural Panel Advisor*. Available from <https://getfea.com/> [accessed 22 January 2024].
- Forest Products Laboratory. 2021. *Wood handbook: Wood as an engineering material*. : 144. Available from <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/62200>.
- Hong, W., Shi, Y., Huo, Z., Li, W., and Mei, C. 2025. Real-time tracking of the characteristics of strands in OSB production lines. *Wood Sci Technol* **59**(1): 16. doi:10.1007/s00226-024-01619-1.
- Mackes, K.H., and Lynch, D.L. 2021. *The Effect of Aspen Wood Characteristics and Properties on Utilization*. USDA Forest Service Proceedings.
- Nishimura, T., Amin, J., and Ansell, Martin P. 2004. Image analysis and bending properties of model OSB panels as a function of strand distribution, shape and size. *Wood Sci Technol* **38**(4). doi:10.1007/s00226-003-0219-z.
- Nishimura, T., and Ansell, M.P. 2002a. Monitoring fiber orientation in OSB during production using filtered image analysis. *Wood Science and Technology* **36**(3): 229–239. doi:10.1007/s00226-001-0126-0.
- Nishimura, T., and Ansell, M.P. 2002b. Fast Fourier Transform and Filtered Image Analyses of Fiber Orientation in OSB. *Wood Science and Technology* **36**(4): 287–307. doi:10.1007/s002260100114.
- Nishimura, T., Ansell, M.P., and Ando, N. 2001. The relationship between the arrangement of wood strands at the surface of OSB and the modulus of rupture determined by image analysis. *Wood Science and Technology* **35**(6): 555–562. doi:10.1007/s002260100118.

- APA – The Engineered Wood Association. (2019). Voluntary Product Standard PS 2-18: Performance standard for wood structural panels. U.S. Department of Commerce / NIST. <https://tolko.com/wp-content/uploads/2019/11/APA-PS-2-18-Performance-Standard-for-Wood-Structural-Panels.pdf>
- Püspöki, Z., Storath, M., Sage, D., and Unser, M. 2016. Transforms and Operators for Directional Bioimage Analysis: A Survey. *In Focus on Bio-Image Informatics. Edited by W.H. De Vos, S. Munck, and J.-P. Timmermans.* Springer International Publishing, Cham. pp. 69–93. doi:10.1007/978-3-319-28549-8_3.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., and Eliceiri, K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* **9**(7): 671–675. doi:10.1038/nmeth.2089.
- Shaler, S.M. 1991. Comparing two measures of flake alignment. *Wood Sci. Technol.* **26**(1). doi:10.1007/BF00225691.
- Shiraishi, N., Kajita, H., and Norimoto, M. (*Editors*). 1993. Recent research on wood and wood-based materials. Elsevier Applied Science, London ; New York.
- Suzuki, S., and Takeda, K. 2000. Production and properties of Japanese oriented strand board I: effect of strand length and orientation on strength properties of sugi oriented strand board. *J Wood Sci* **46**(4): 289–295. doi:10.1007/BF00766219.
- Tasdemir, C., and Hiziroglu, S. 2019. Achieving cost efficiency through increased inventory leanness: Evidences from oriented strand board (OSB) industry. *International Journal of Production Economics* **208**: 412–433. doi:10.1016/j.ijpe.2018.12.017.
- Wang, S.-Y., and Chen, B.-J. 2001. The Flake's Alignment Efficiency and Orthotropic Properties of Oriented Strand Board1). *Holzforschung* **55**(1). Available from <https://doi.org/10.1515/HF.2001.016> [accessed 6 November 2023].

Annexe A Résultats d'analyses statistiques

Analyse Chi-carré combinée des expériences 1 & 2

Source	Chi carré	DDL	Pr >Chi-carré
(Intercept)	7813.0515	1	<2.2e-16 ***
Déflexion	3.7883	1	0.05161 .
Rotation	0.0435	1	0.83481
Expérience	25.8177	1	3.75E-07 ***
Déflexion:Rotation	0.0712	1	0.7896
Déflexion:Expérience	0.3578	1	0.54972
Rotation:Expérience	0.595	1	0.44051
Déflexion:Rotation:Experience	0.3148	1	0.57474

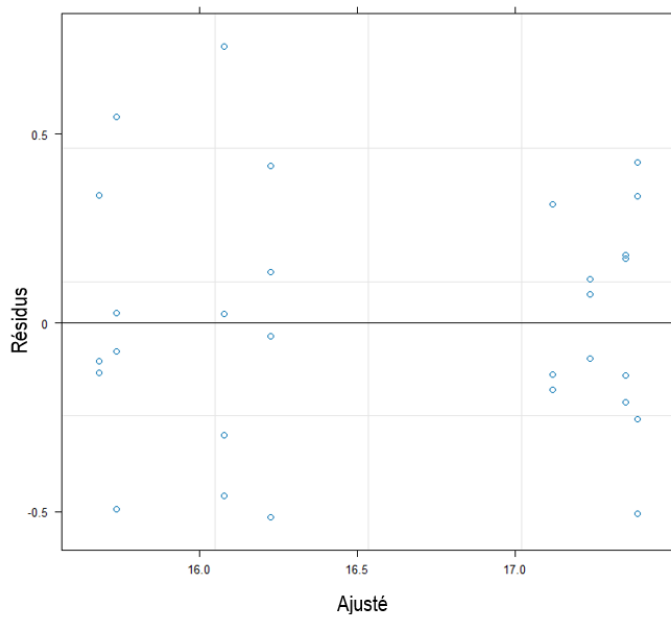


Figure 50 Résidus chi-carré combinée des expériences 1 & 2

Analyse de flexion industrielle ANCOVA

Source	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur F	Pr > F
Angle	1	250872778	250872778	7.2312	0.01552 *
Masse	1	1659459694	1659459694	47.8328	2.50E-06 ***
Residuals	17	589780318	34692960		

Coefficient	Estimé	Erreur-type	Valeur t	Pr > t
(Intercept)	-306147	57683	-5.307	5.79E-05 ***
Angle 4°	-8616	2643	-3.259	0.00462 **
Masse	17025	2462	6.916	2.50E-06 ***

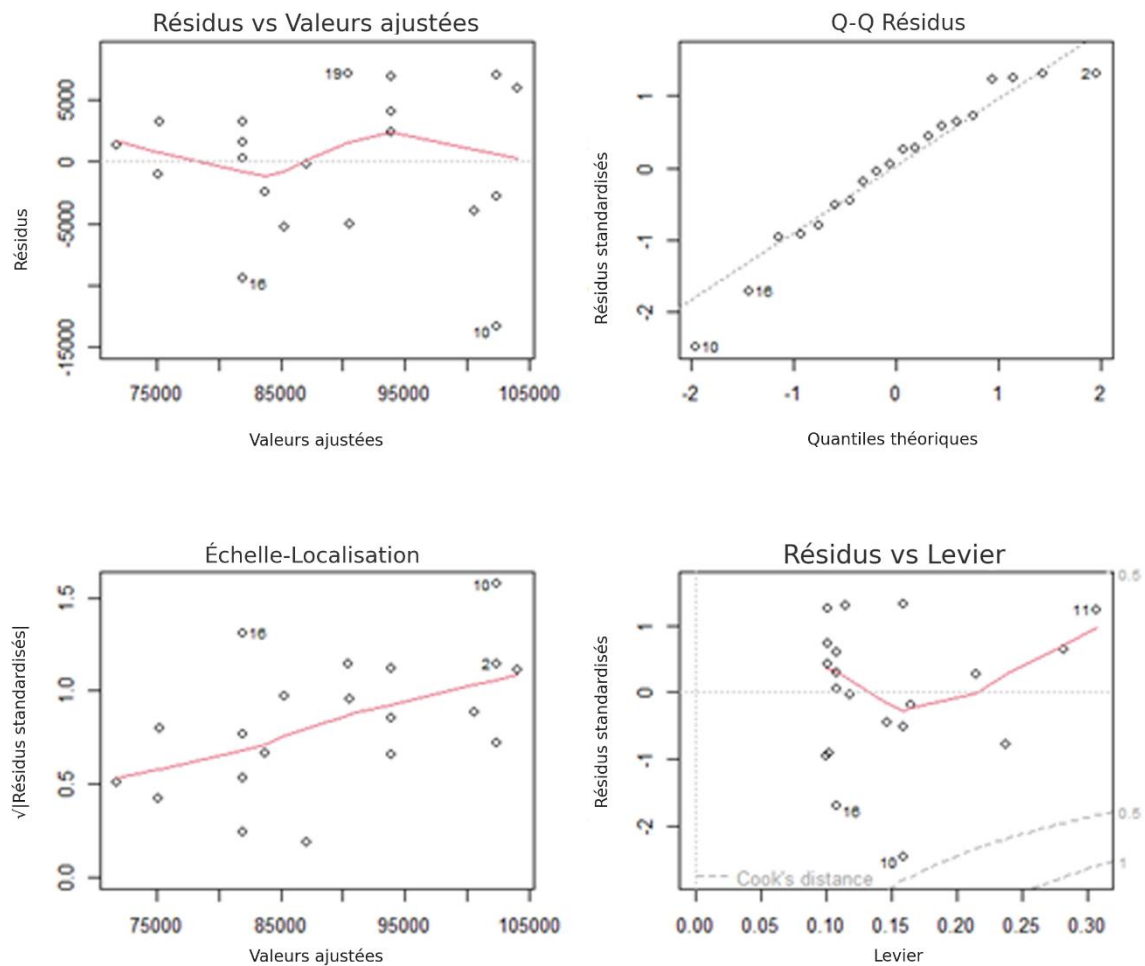


Figure 51 Résidus de l'ANCOVA de flexion industrielle

Annexe B Code *Fiji* et *Python*

Code Fiji d'analyse d'un dossier d'image au format CSV

```
//ouvre une boîte de dialogue pour la sélection du répertoire d'image
input = getDirectory("input folder where images are stored");

//ouvre une boîte de dialogue pour la sélection du fichier de sauvegarde
output = getDirectory("output folder for results");

//list l'ensemble des images dans le dossier dans une matrice
list = getFileList(input);
setBatchMode(true);
for (i = 0; i<list.length; i++) {
open(input+list[i]);

//analyse des images
run("8-bit");
run("OrientationJ Distribution", "tensor=1.0 gradient=0 radian=on
histogram=on table=on min-coherency=0.0 min-energy=0.0 ");
selectWindow("OJ-Distribution-1");
orientation = Table.getColumn("Orientation");
slice1 = Table.getColumn("Slice1");

//sauvegarde des results Fit
selectWindow("OJ-Distribution-1");
saveAs("Results", output+i+"-data.csv");

close("");
close("Log");
close("OJ-Distribution-1");
}
```

Code Python d'ajustement de courbe des fichiers CSV

```
import os
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, messagebox
import threading
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
import matplotlib.pyplot as plt

def cauchy_excel(x, intensity, x0, gamma, constant):
```

```

    return intensity / (1 + ((x - x0) / gamma) ** 2) + constant

def process_folder_with_plots(folder_path, output_csv, plot_folder):
    os.makedirs(plot_folder, exist_ok=True)
    results = []

    for file in os.listdir(folder_path):
        if file.endswith('.csv'):
            try:
                df = pd.read_csv(os.path.join(folder_path, file),
encoding='ISO-8859-1')
                x_data = df.iloc[:, 0].values
                y_data = df.iloc[:, 1].values

                # Cauchy fit with bounds
                params_bounded, _ = curve_fit(
                    cauchy_excel, x_data, y_data, p0=[200000, 0, 17, 25000],
                    bounds=([0, -np.inf, 0, -np.inf], [np.inf, np.inf,
np.inf, np.inf]),
                    maxfev=10000
                )

                # Absolute Error
                y_fitted = cauchy_excel(x_data, *params_bounded)
                abs_error = np.sum(np.abs(y_data - y_fitted))

                # Percentage in range -20.5 to +20.5
                mask = (x_data >= -20.5) & (x_data <= 20.5)
                pct_in_range = (np.sum(y_data[mask]) / np.sum(y_data)) * 100

                # Plot and Save Figure
                plt.figure(figsize=(8, 5))
                plt.scatter(x_data, y_data, s=10, label='Data')
                plt.plot(x_data, y_fitted, 'r-', label='Cauchy Fit')
                plt.xlabel('Orientation (°)')
                plt.ylabel('Pixel Intensity')
                plt.legend()
                plt.title(f'Cauchy Fit - {file}')
                plt.grid(True)
                plot_filename = os.path.join(plot_folder,
os.path.splitext(file)[0] + '_fit.png')
                plt.savefig(plot_filename, dpi=300)
                plt.close()

                # Store results

```

```

        results.append({
            'Filename': file,
            'Intensity': params_bounded[0],
            'X0 (Center)': params_bounded[1],
            'Gamma': params_bounded[2],
            'Constant': params_bounded[3],
            'Absolute Error': abs_error,
            '% Pixels (-20.5 to +20.5)': pct_in_range,
        })

    except Exception as e:
        print(f"Failed to process {file}: {e}")

# Export CSV
results_df = pd.DataFrame(results)
results_df.to_csv(output_csv, index=False)
return results_df

def run_batch_fit():
    input_folder = input_folder_var.get()
    output_folder = output_folder_var.get()

    if not input_folder or not output_folder:
        messagebox.showerror("Error", "Please select both input and output
folders.")
        return

    output_csv = os.path.join(output_folder, 'cauchy_fit_summary.csv')
    plot_folder = os.path.join(output_folder, 'plots')
    os.makedirs(plot_folder, exist_ok=True)

    def process():
        try:
            process_folder_with_plots(input_folder, output_csv, plot_folder)
            messagebox.showinfo("Success", f"Processing complete!\nResults
saved to:\n{output_csv}")
        except Exception as e:
            messagebox.showerror("Error", f"An error occurred:\n{e}")

    threading.Thread(target=process).start()

# Build the Tkinter interface
root = tk.Tk()
root.title("Batch Cauchy Fit Tool")

```

```

tk.Label(root, text="Select Input Folder (CSV files):").pack(pady=5)
input_folder_var = tk.StringVar()
tk.Entry(root, textvariable=input_folder_var, width=60).pack()
tk.Button(root, text="Browse", command=lambda:
input_folder_var.set(filedialog.askdirectory())).pack()

tk.Label(root, text="Select Output Folder:").pack(pady=5)
output_folder_var = tk.StringVar()
tk.Entry(root, textvariable=output_folder_var, width=60).pack()
tk.Button(root, text="Browse", command=lambda:
output_folder_var.set(filedialog.askdirectory())).pack()

tk.Button(root, text="Run Batch Fitting", command=run_batch_fit, bg="green",
fg="white").pack(pady=20)

root.mainloop()

```

Code Python de simulation d'ébauche d'OSB

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os

# Paramètres de simulation
num_strands = 18000
strand_length = 100
strand_width = 20
xlim_range = [-1220, 1220]
ylim_range = [-610, 610]
gamma = 12.25
a = 0

# Répertoire de sortie
output_dir = "osb_images"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# Fonction pour générer une seule image
def generate_image(index):
    fig = plt.figure(figsize=(12, 6))
    ax = fig.add_subplot(111)
    ax.set_xlim(xlim_range)
    ax.set_ylim(ylim_range)
    ax.set_aspect('equal')
    ax.axis('off') # Enlève les axes

```

```

for _ in range(num_strands):
    # Choisir type de lamelle : grande (70%) ou petite (30%)
    if np.random.rand() < 0.7:
        l, w = strand_length, strand_width # grande
    else:
        l, w = strand_length / 2, strand_width / 2 # petite

    x_pos = np.random.uniform(xlim_range[0] + l / 2, xlim_range[1] - l /
    y_pos = np.random.uniform(ylim_range[0] + w / 2, ylim_range[1] - w /

    theta = a + gamma * np.tan(np.pi * (np.random.rand() - 0.5))
    theta_rad = np.deg2rad(theta)

    R = np.array([[np.cos(theta_rad), -np.sin(theta_rad)],
                  [np.sin(theta_rad), np.cos(theta_rad)]])

    corner1 = R @ np.array([-l / 2, -w / 2])
    corner2 = R @ np.array([ l / 2, -w / 2])
    corner3 = R @ np.array([ l / 2,  w / 2])
    corner4 = R @ np.array([-l / 2,  w / 2])
    corners = [corner1, corner2, corner3, corner4]

    shrink_indices = np.random.choice(4, 2, replace=False)
    for idx in shrink_indices:
        shrink_factor = 0.3 + 0.5 * np.random.rand()
        corners[idx] = corners[idx] * shrink_factor

    polygon = np.array([corners[0], corners[1], corners[2], corners[3],
    corners[0]]) + [x_pos, y_pos]

    # Ombre
    shadow_offset = [3, -3]
    shadow_color = (0, 0, 0, 0.2)
    shadow_polygon = polygon + shadow_offset
    ax.fill(shadow_polygon[:, 0], shadow_polygon[:, 1],
    color=shadow_color, edgecolor=None, linewidth=0)

    wood_colors = ['#d7c6a5', '#e8d9b0', '#cab88f', '#b49e7a']
    fill_color = np.random.choice(wood_colors)
    ax.fill(polygon[:, 0], polygon[:, 1], color=fill_color,
    edgecolor='black', linewidth=0)

    output_path = os.path.join(output_dir, f"osb_strands_tt{index}.png")

```

```
plt.savefig(output_path, dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0,
transparent=True)
plt.close()
print(f"Image {index} enregistrée : {output_path}")

# Génération des 10 images
for i in range(1, 2):
    generate_image(i)
```

Exemple:



Figure 52 Ébauche de panneau générée avec Python fait de 18000 trapézoïdes de 4 couleurs avec ombrage