

## Reconstruction 3D de l'orientation des fibres autour d'un nœud de Douglas

PENVERN Hélène<sup>1</sup>, POT Guillaume<sup>1</sup>, VIGUIER Joffrey<sup>1</sup>, COLLET Robert<sup>1</sup>, DÉMOULIN Leyne<sup>1</sup>, ROUX Benjamin<sup>1</sup>, OLSSON Anders<sup>2</sup>, HU Min<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

<sup>2</sup> Department of Building Technology, Linnaeus University  
351 95 Växjö, SWEDEN  
[helene.penvern@ensam.eu](mailto:helene.penvern@ensam.eu)

**Mots clefs :** déviation des fibres ; cernes de croissance ; mesure ; classement machine ; angle de plongée

### Contexte et Objectifs

Pour pouvoir utiliser le bois comme bois d'œuvre, il est nécessaire de certifier ses propriétés mécaniques. Or, le bois étant issu du vivant, l'histoire de l'arbre est inscrite dans la matière. Chaque branche naissante, chaque coup de vent que l'arbre subit, le sol qui l'a nourri... tous ces éléments vont impacter les propriétés mécaniques du bois. Le bois est un matériau fortement anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la direction de sollicitation. De fait, le bois possède de bien meilleures propriétés mécaniques (>10 fois) dans le sens de ses fibres, que transversalement à celles-ci, si bien que la résistance d'un élément structurel en bois dépend très fortement de l'orientation des fibres en son sein, et a fortiori, du nombre, de la taille et de la configuration des nœuds présents, à l'origine de déviation des fibres par rapport à l'axe principal du bois scié.

Les machines de classement actuelles, qui permettent de certifier la classe de résistance des bois sciés, déterminant les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques utiles au dimensionnement des structures, peuvent être équipées de rayons X, pour mesurer la densité, de caméra couleurs, pour repérer les défauts, et de lasers, pour mesurer l'angle des fibres (Olsson 2018). Les lasers projettent un point lumineux en surface qui se diffuse dans le sens des fibres par effet trachéide, de sorte que l'analyse de la forme des points laser permet de connaître l'orientation des fibres en surface. Mais c'est bien là qu'est la limite de cette mesure qui ne permet que de mesurer l'angle projeté des fibres en surface des bois, et non l'orientation réelle, en 3D, des fibres. Des recherches en cours cherchent à utiliser la tomographie aux rayons X des billons à cette fin (Huber 2022, Hu 2023). Malheureusement, si cette technologie permet bien d'observer les cernes de croissance à l'échelle d'une planche, elle reste coûteuse, et la résolution est telle qu'il n'est pas envisageable d'observer simultanément les fibres. Dès lors, une idée serait d'estimer l'orientation réelle des fibres en utilisant un modèle de déviation des fibres ajusté à partir des mesures des angles de surface. Cette option a été explorée par Lukacevic et al. dans un article de 2019. Ces auteurs ont choisi d'utiliser le modèle détaillé par Christiana Foley dans son manuscrit de thèse (2003) et qui décrit l'angle des fibres dans le plan longitudinal-tangentiel par analogie avec un écoulement de fluide ("Flow-grain analogy" (Philipps et al. 1981)), et sur l'hypothèse logique que les fibres doivent suivre les cernes de croissance, dont elle fournit un modèle mathématique (équations polynômiales d'ordre 2 pour décrire la position du centre du nœud et le diamètre du nœud, équation exponentielle pour décrire la courbure des cernes de croissance à proximité des nœuds), en se basant sur des vues en coupe de 11 nœuds d'épicéas.

Grâce à un algorithme de reconstruction des nœuds, combiné au modèle de déviation des fibres de Foley (2003), Lukacevic et al. (2019) ont démontré qu'il était possible par éléments finis d'obtenir des profils de raideur effectifs des bois sciés, mais également, que le résultat était fortement impacté par les paramètres du modèle de déviation des fibres autour des nœuds (zone grise Fig. 1), et la position supposée de la moelle du tronc, d'où la nécessité de mieux maîtriser ces derniers. Suite aux conclusions de cette étude, faible influence des paramètres de l'ovale de Rankine, impact fort de la géométrie du nœud, Habite et al. (202x) ont souhaité simplifier le modèle de Foley, en ne définissant la géométrie des fibres qu'à partir de la définition des cernes de croissance, en supposant que les fibres suivent le chemin le plus court depuis la base jusqu'au sommet du tronc. Malheureusement, il conclut de cette tentative qu'il lui manque des données d'orientation 3D des fibres qui puissent lui permettre de juger de la qualité de son modèle. Ce constat est partagé par Min Hu (2023) suite à une modélisation des fibres à partir de données tomographiques d'un bois scié.

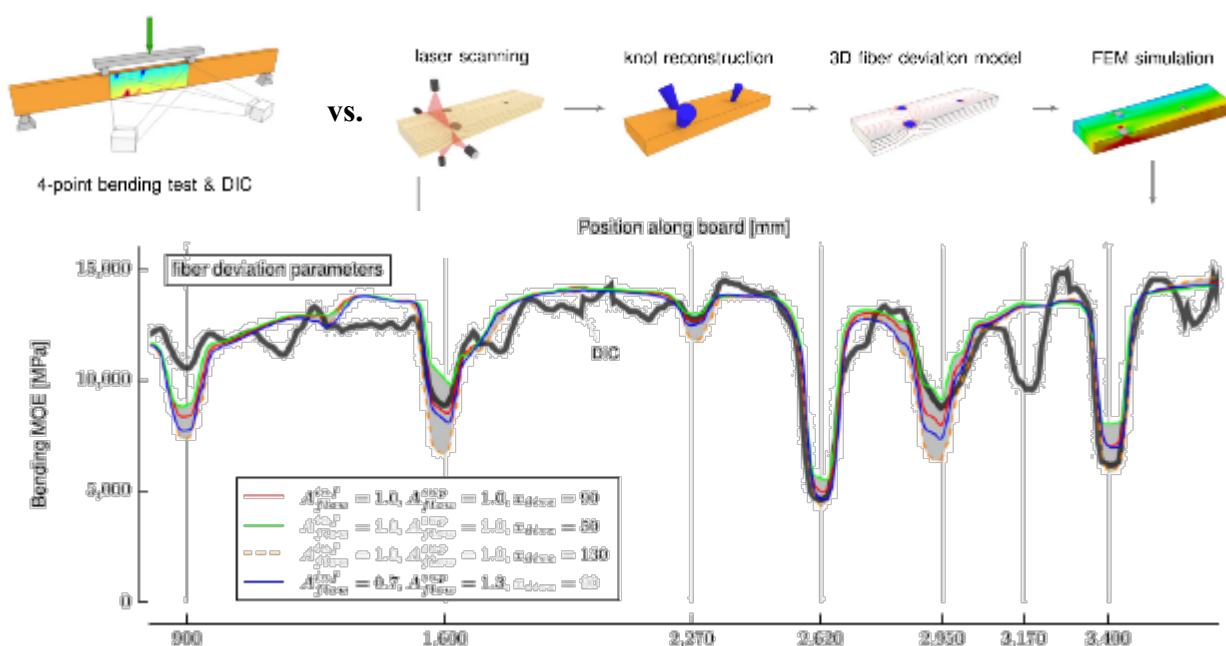


Fig. 1 : Extrait du résumé graphique et résultats des simulations éléments finis suite au modèle combiné Foley + reconstruction des nœuds comparés aux résultats de la corrélation d'image issus d'un test de flexion 4 points réalisés par Lukacevic (2019)

L'objectif du travail présenté est donc de répondre à ce besoin, en développant une méthode de laboratoire permettant d'évaluer l'orientation 3D réelle des fibres.

## Matériel et méthode

Un bloc de bois avec un nœud plat complet, isolé, sain et partiellement adhérent a été coupé à partir d'un échantillon de sapin Douglas. Ce bloc a d'abord été raboté dans la direction tangentielle, jusqu'au centre du nœud. Après chaque rabotage, des scans couleur ont été effectués ; puis, une mesure par points lasers des angles projetés des fibres de la dernière face visible présentant la coupe du nœud, réalisée. Le bloc a ensuite été raboté dans la direction radiale, depuis la naissance du nœud, c'est-à-dire depuis l'emplacement approximatif de la moelle, jusqu'à l'écorce (Fig. 2a), tous les 2 millimètres. Après chaque rabotage, un scan couleur et une mesure par points laser ont été effectués de manière à obtenir une cartographie complète de l'angle des fibres dans le plan LR et des couleurs de l'ensemble de l'échantillon (Fig. 2b,2c).

A l'aide de segmentation morphologique sur les scans couleur (Fig. 2d), les cernes de croissance du bloc de bois ont pu être reconstruits et les normales aux cernes déterminées (Fig. 2e). Puis, en utilisant les angles de fibres projetés dans le plan LR, nous avons pu déterminer l'orientation des fibres en 3D pour l'ensemble de l'échantillon, utilisant le fait que les fibres doivent rester tangent aux limites de cernes (Fig. 2f). La formule (encadré vert) utilisée est la suivante :

$$\vec{v} = \vec{u} - \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{n_z} \vec{z} \rightarrow d\vec{v} = d\vec{u} + \left( d\vec{u} \cdot \frac{\vec{n}}{n_z} \right) \vec{z} + \frac{\vec{u} \cdot (n_z d\vec{n} - dn_z \vec{n})}{n_z^2} \vec{z} = \delta_{du} + \delta_{ndu} + \delta_{udn} \quad (\text{Eq.1})$$

où  $\vec{v}$  est la direction de la fibre,  $\vec{u}$  la direction mesurée de la fibre dans le plan de rabotage, et  $\vec{n}$  est la direction normale au cerne (on obtient bien  $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$ ).

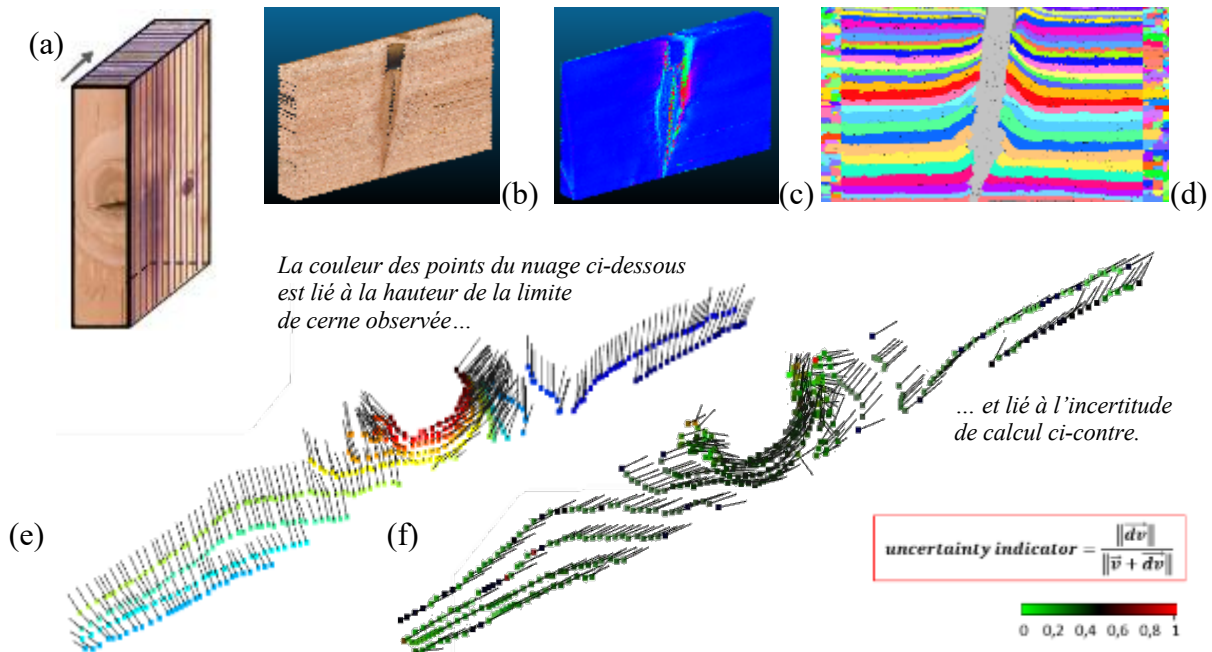


Fig. 2 : (a) Illustration des plans de rabotages successifs de l'échantillon de Douglas ayant permis un cartographie couleur (b) et d'angle projeté longitudinal-tangentiel (c) de l'échantillon. Les scans couleurs ont ensuite été segmentés de manière à identifier les différents cernes de croissance (d). Des limites de cernes détectées est extrait un nuage de points sur lequel une estimation de la normale est réalisée (e) permettant le calcul de l'orientation 3D.

### Résultats, Conclusions et Perspectives

En différenciant l'équation (Eq.1) il est possible de faire apparaître trois termes, dont les deux premiers (encadrés rouges) sont liés à l'incertitude de mesure, et le troisième (encadré bleu) à l'incertitude sur la direction normale aux cernes. On obtient que ce dernier terme est largement dominant et tend vers l'infini lorsque  $n_z$  tend vers 0, c'est-à-dire lorsque les plans de rabotages sont perpendiculaires aux cernes. Néanmoins, on peut observer que les résultats obtenus (Fig. 3) semblent satisfaisants pour des valeurs d'angle de plongée  $\beta$  dans le plan LT allant jusqu'à 50 degrés.

Cette méthode nous a donc permis d'obtenir une mesure véritable de l'angle des fibres réels d'un échantillon de douglas. Nous espérons la reproduire afin de créer de nouvelles données et ainsi permettre d'évaluer les modèles actuels de déviation des fibres du douglas ou d'autres essences.

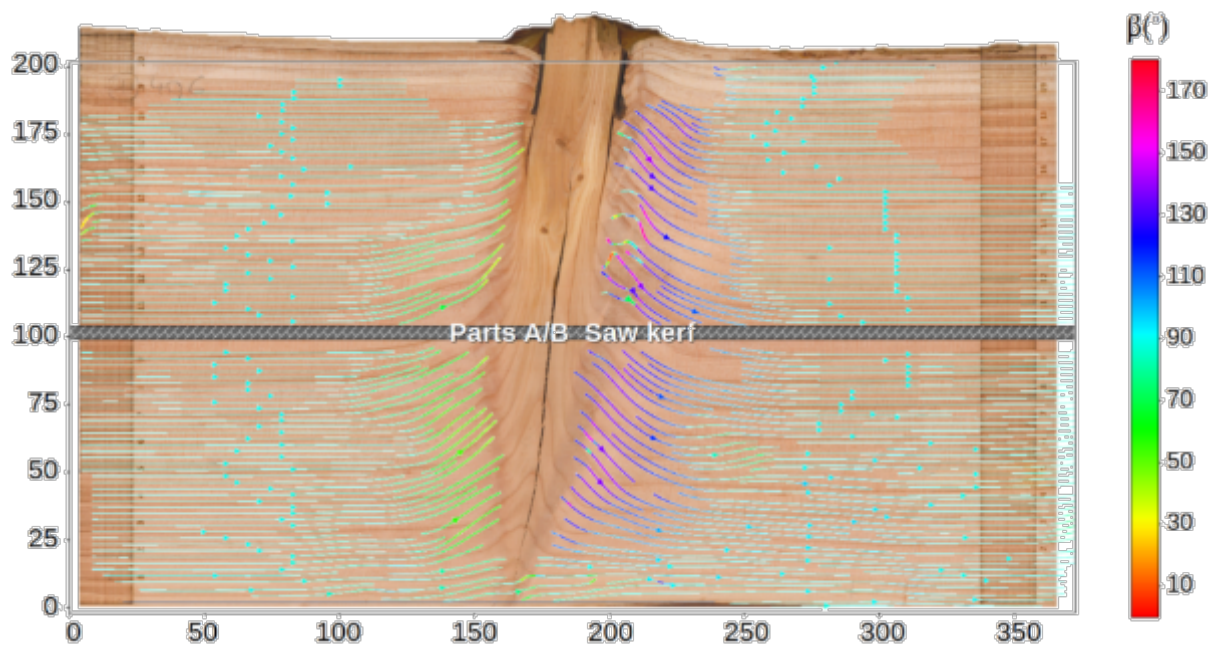


Fig. 3 : Streamplot de l'orientation des fibres déterminées par le calcul superposé au scan couleur de face rabotée correspondante par symétrie.

### Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet EffiQuAss ANR-21-CE10-0002-01).

### Références

- Olsson, A., Pot, G., Viguier, J., Faydi, Y., & Oscarsson, J. (2018). Performance of strength grading methods based on fibre orientation and axial resonance frequency applied to Norway spruce (*Picea abies* L.), Douglas fir and European oak. *Annals of Forest Science*, 75(4), 1-18.
- Huber, J. A., Broman, O., Ekevad, M., Oja, J., & Hansson, L. (2022). A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans. *Computers & Structures*, 260, 106702.
- Hu, M., Olsson, A. (2023). Application of data from X-ray CT scanning and optical scanning to adjust model parameters for growth surfaces geometry surfaces and fibre directions in Norway spruce, In 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Wood Mechanics (CompWood 2023), September 5-8, 2023, Dresden, Germany (pp. 143-144).
- Lukacevic, M., Kandler, G., Hu, M., Olsson, A., & Füssl, J. (2019). A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards. *Materials & Design*, 166, 107617.
- Foley, C. (2003). Modeling the effects of knots in structural timber. PhD Dissertation at Lund Institute of Technology.
- Habite, Tadios Sisay, and Anders Olsson. "Modelling of Knots and 3d Fibre Orientation within Timber Boards Based on Information Obtained from Optical Scanning." Available at SSRN 4110671.
- Philipps, G. E., Bodig, J., Goodman, J. R. (1981) Flow-grain analogy, *Wood Science* 14(2) ; p55-64.