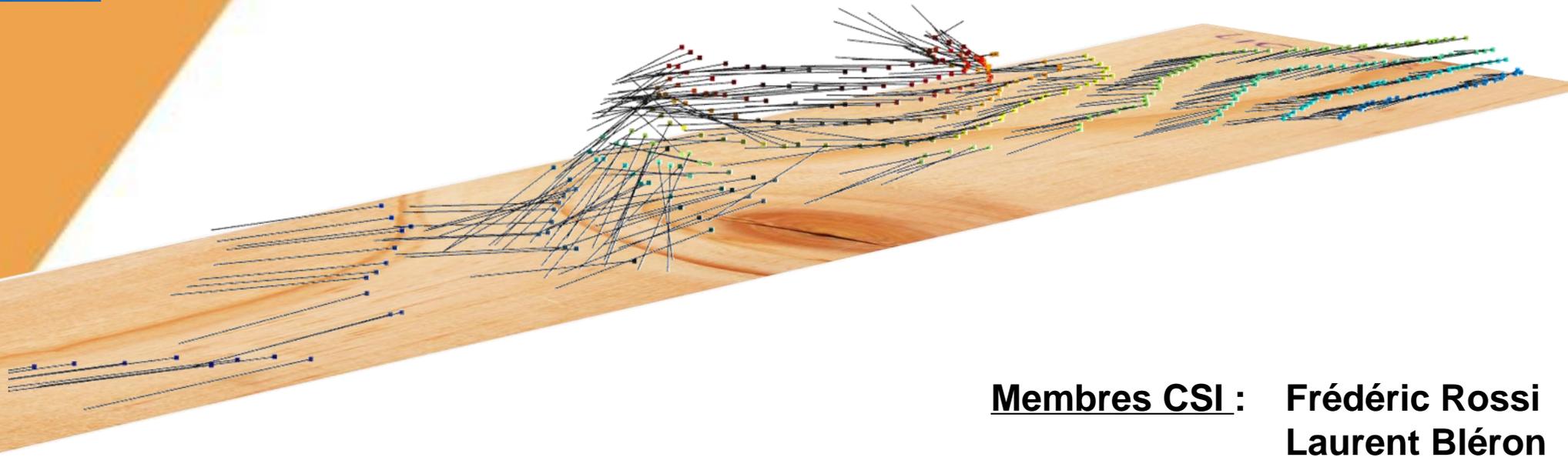


Soutenance de CSI de première année

# Caractérisation non-destructive des propriétés mécaniques des bois sciés par modélisation 3D de l'angle des fibres

Hélène Penvern, encadrée par Guillaume Pot, Joffrey Viguier et dirigée par Robert Collet

[helene.penvern@ensam.eu](mailto:helene.penvern@ensam.eu)



**Membres CSI :** Frédéric Rossi  
Laurent Bléron

# Le projet EffiQuAss

*Il était une fois, le projet TreeTrace..*



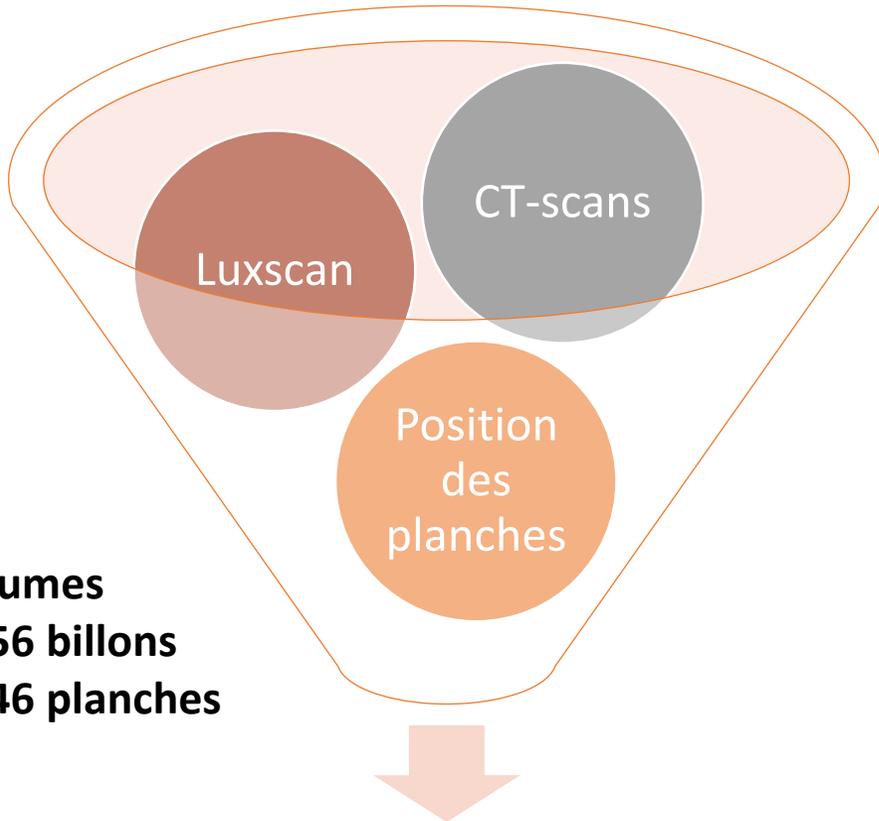
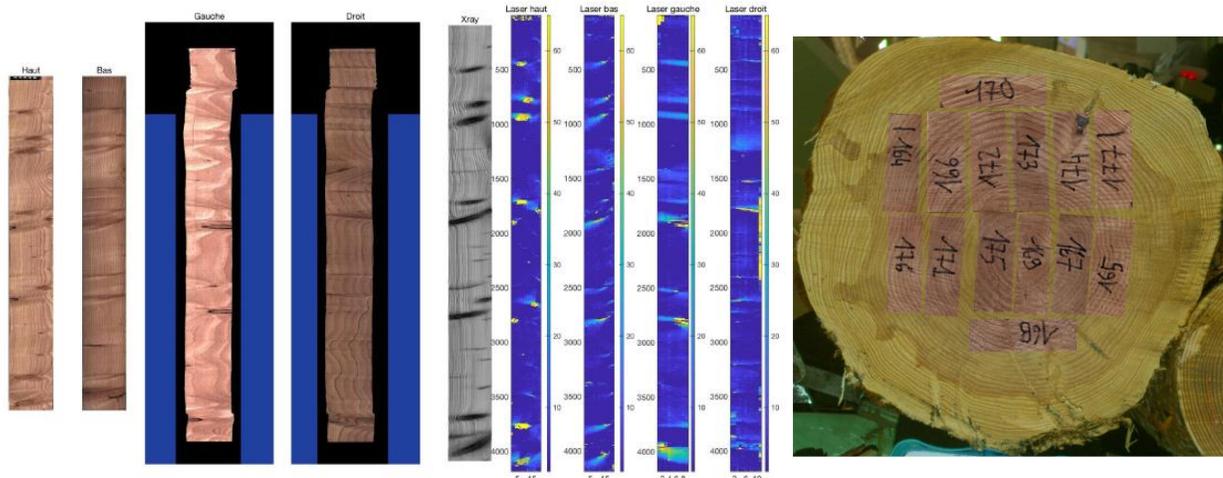
Traceability and quality assessment of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) logs: the TreeTrace\_Douglas database

Fleur Longuetaud<sup>a,\*</sup>, Guillaume Pot<sup>b</sup>, Frédéric Mothe<sup>a</sup>, Alexis Barthelemy<sup>c,\*a</sup>, Rémi Decelle<sup>c,\*a</sup>, Florian Delconte<sup>c,\*a</sup>, Xihe Ge<sup>b</sup>, Grégoire Guillaume<sup>b</sup>, Théo Mancini<sup>b</sup>, Tojo Ravoajanahary<sup>a</sup>, Jean-Claude Butaud<sup>b</sup>, Robert Collet<sup>b</sup>, Isabelle Debled-Rennesson<sup>c</sup>, Bertrand Marcon<sup>b</sup>, Phuc Ngo<sup>c</sup>, Benjamin Roux<sup>b</sup>, Joffrey Viguiet<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, Silva, 54000 Nancy, France

<sup>b</sup> LaBoMaP, Arts et Metiers Institute of Technology, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250, Cluny, France

<sup>c</sup> Université de Lorraine, CNRS, LORIA, F-54000 Nancy, France



52 grumes  
→ 156 billons  
→ 346 planches

**Améliorer le classement mécanique des bois sciés, en particulier de douglas**

# Classes de résistances selon l'EN 338

Recourt aux normes de classement et à des propriétés indicatrices (IPs) obtenues par mesures non-destructives de densité, d'angle de fibre, de fréquence de vibration... dont les seuils définiront quels sciages appartiendront à une classe considérée.

Trois propriétés à garantir pour le dimensionnement d'une structure :

- Masse volumique  
*fractile à 5%*
- Module élastique, MOE *moyen*
- Module à rupture, MOR *fractile à 5%*

[Marlene Cramer (6 oct 2021)]



Les critères visuels de classement sont :

- La largeur des cernes,
- La pente de fil,
- Les nœuds,
- Les fentes, les poches de résines, les altérations biologiques, flaches et entre écorce..

EN 338	$f_{m,k}$ [MPa]	$E_{0,mean}$ [MPa]	$\rho_k$ [kg m <sup>-3</sup> ]	NF
C 35	35.0	13000	400	-
C 30	30.0	12000	380	ST1
C 27	27.0	11500	370	-
C 24	24.0	11000	350	ST2
C 20	20.0	9500	330	-
C 18	18.0	9000	320	ST3
C 16	16.0	8000	310	-
C 14	14.0	7000	290	ST4



# Classement par machine selon l'EN 14081

Principe :

- Pour une essence donnée ;
- Pour une ou plusieurs IP donnée(s) ;
- Pour une combinaison de classe.

A partir d'un lot (900 planches pour du douglas), on définit la valeur minimale de l'IP déterminant l'appartenance d'un sciage à la classe choisie.

- **Mesure de la fréquence propre de la planche, bon indicateur du MOE ;**
- **Moins bon indicateur du MOR, pour lesquels les effets des singularités sont fortes ! => IP améliorée par la prise en compte de l'angle des fibres**



[Viguier (2015)] – *Facteurs de Corrélation obtenues pour différentes IP*

Machine de classement	Type de données	chêne		douglas	
		MOE	MOR	MOE	MOR
Balance	masse volumique $\rho$	0.19	-	0.53	0.23
Combiscan	$\rho$ + pente de fil	-	-	0.75	0.53
Sylvatest	onde ultrasonore	0.72	0.18	0.68	0.34
E-scan	mesure vibratoire $E_{dyn}$	0.74	0.22	0.80	0.44
E-scan	$E_{dyn}$ + pente de fil	-	-	0.84	0.58

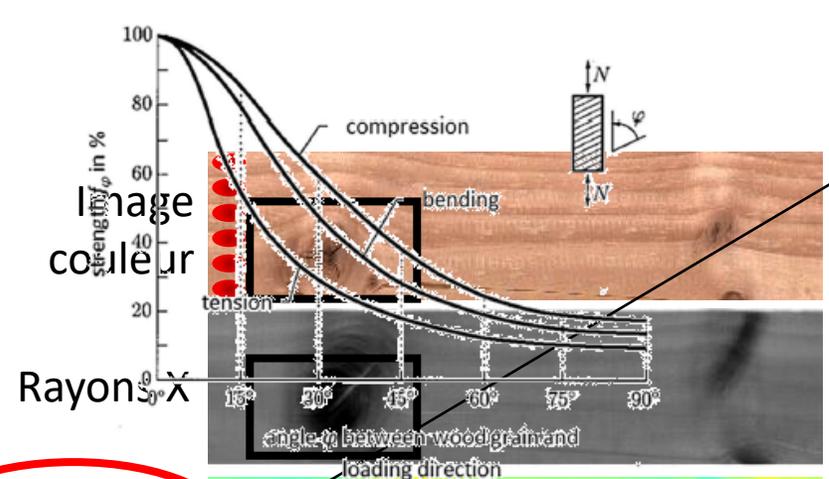
# Prise en compte de l'angle des fibres dans le classement machine



<https://www.microtec.us/en/products/goldeneye>  
<https://easyscansmart.weinig.com/en/>

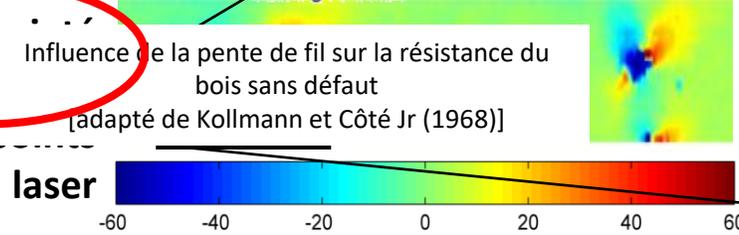
Illustration de l'effet trachéide  
 Formule de Hankinson:

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 f_{90}}{f_{90} \cos^2(\alpha) + f_0 \sin^2(\alpha)}$$

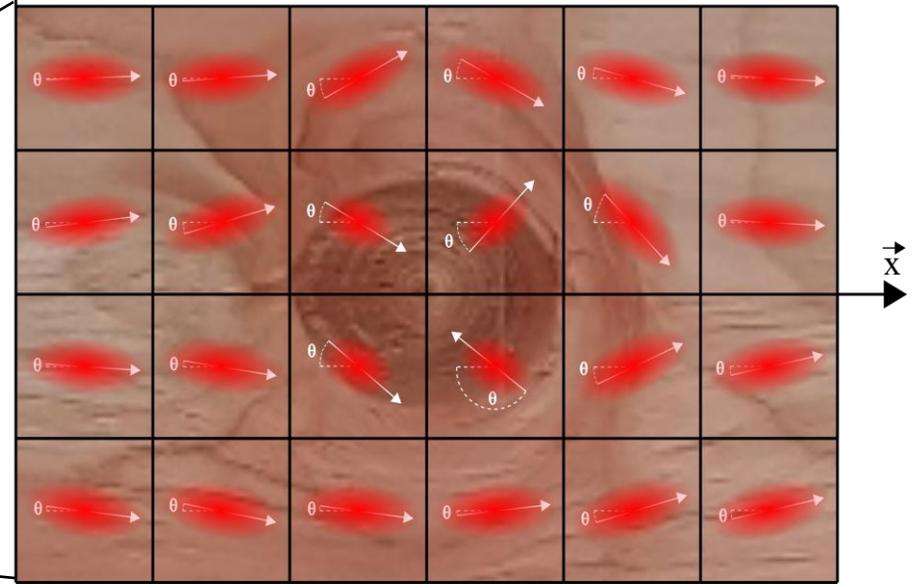


Angle  $\rho$  des fibres en surface par mesure de laser

Influence de la pente de fil sur la résistance du bois sans défaut  
 [adapté de Kollmann et Côté Jr (1968)]



## Cartographie 2D de l'angle projeté des fibres en surface



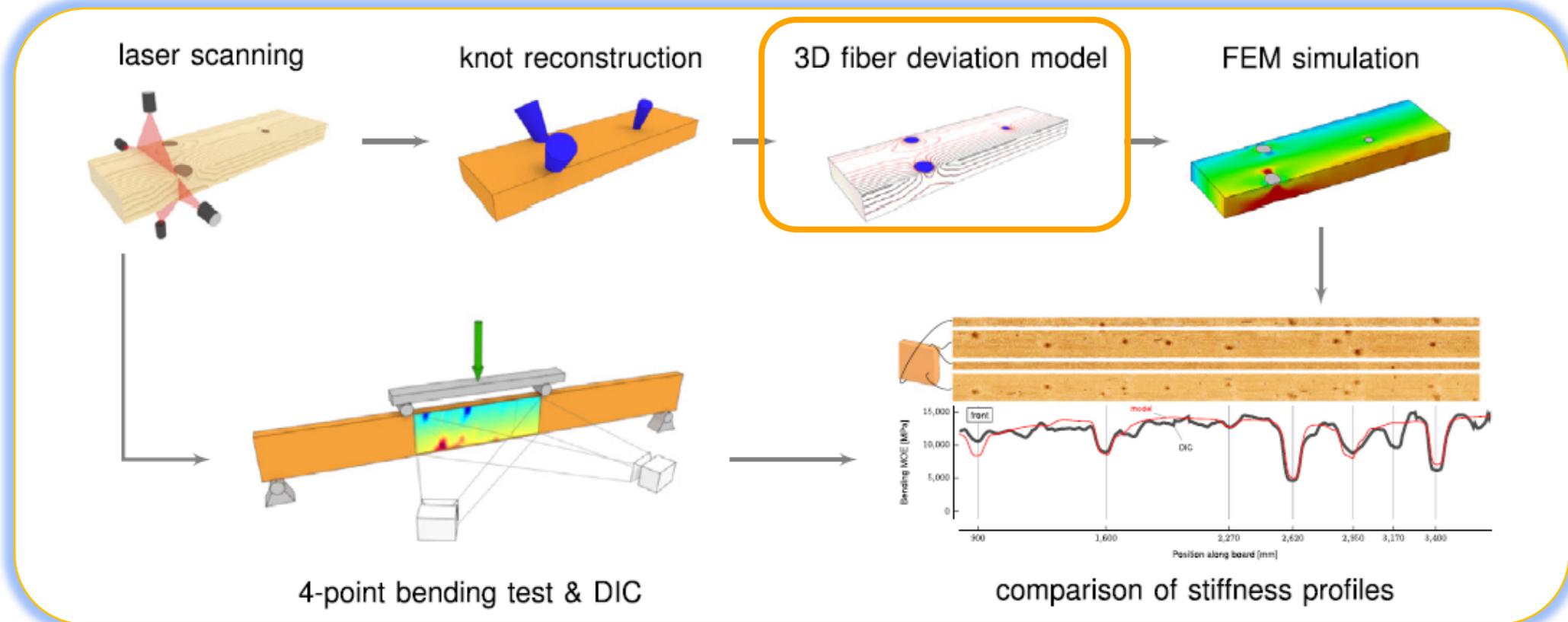
(taille de grille exagérée - résolution réelle ~1 mm)

Les mesures donnent un angle projeté, comment prendre en compte la direction « réelle » 3D des fibres pour améliorer les IP ?

# Modélisation de l'angle des fibres en 3D pour mieux prédire les propriétés mécaniques des bois

[Lukacevic M. et al. (2019) ] – Graphical abstract

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107617>



**Pourrions-nous alors mettre en place un modèle de déviation de la fibre pour prendre en compte l'angle de la fibre de plongée ?**

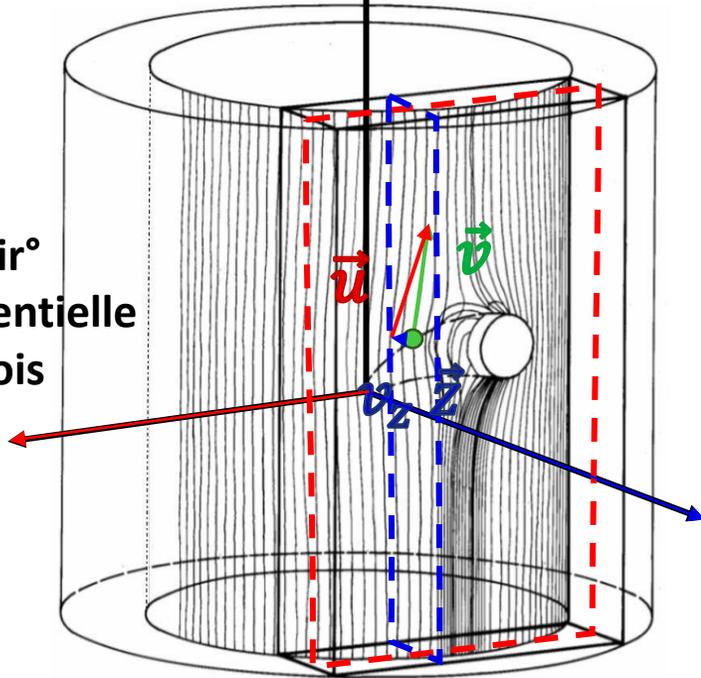
# Le modèle de Foley

[Foley, C. (2003)] – [manuscrit de thèse](#)

Chaînes de fibres fictives  
autour d'un nœud selon le  
paradigme de Foley.

**L = direction  
longitudinale  
du bois**

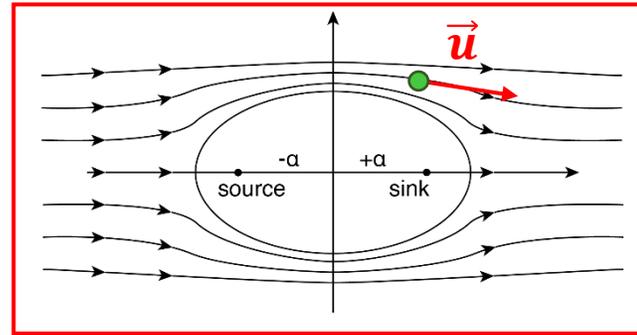
**T = dir°  
tangentielle  
du bois**



**R = dir°  
radiale  
du bois**

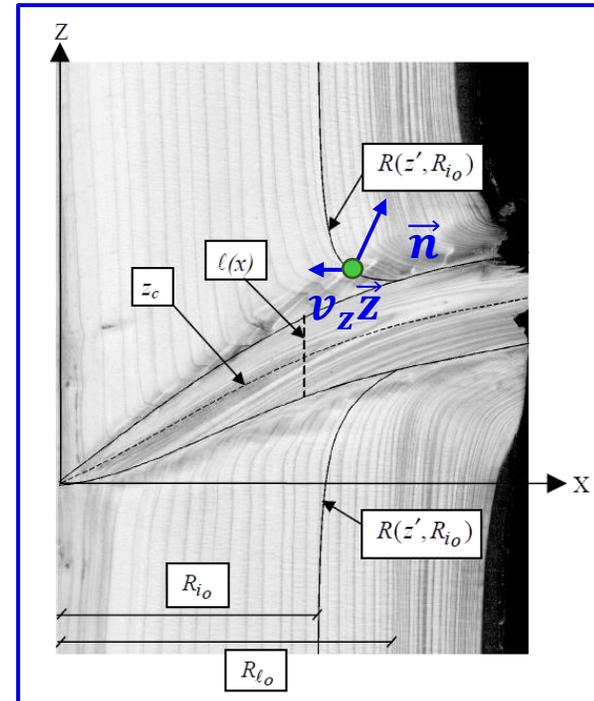
**Ce modèle  
est-il idéal ?**

RANKINE OVAL



l'orientation 3D des fibres

$\vec{u}$  composante **LT** de la direction des fibres  
selon une analogie fluidique (flow-grain)



$v_z$  composante radiale R de la direction des  
fibres obtenues de manière à ce que les  
fibres soient parallèles aux cernes :

Foley choisît de représenter :

- les cernes par une équation exponentielle :

$$R(p, R_{i0}) = R_{i0} + A_{bump} \cdot R_{i0}^{A_{exp}} \cdot p^{-B_{bump}}$$

- Les nœuds et le centre du nœud par des équations polynomiales d'ordre 2 :

$$l(x) = -10^{-7} \cdot x^4 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + D_{\ell} x$$

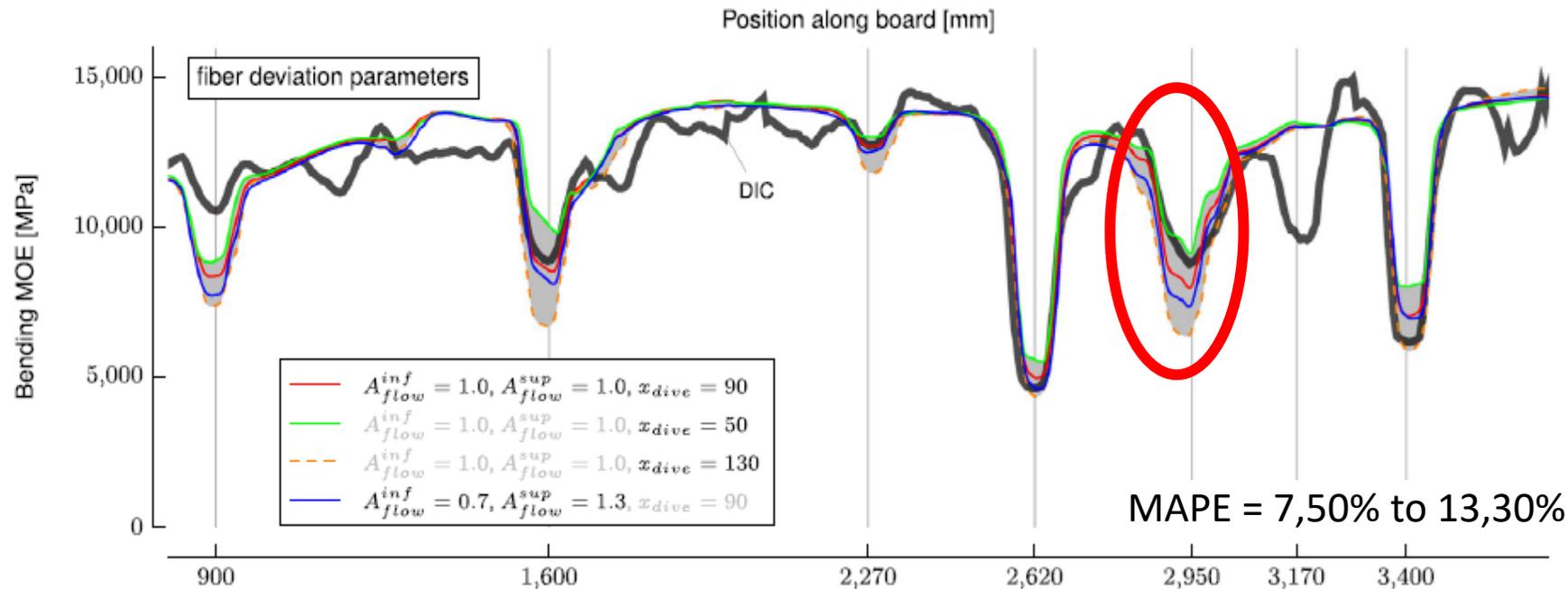
$$z_c(x) = -1.458 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + C_{ax} \cdot x$$

Illustration des paramètres de deviation des fibres  
selon le modèle de Foley

# Prédiction des propriétés mécaniques

en implémentant le modèle de Foley dans une simulation par éléments finis

[Lukacevic M. et al. (2019) ] – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107617>

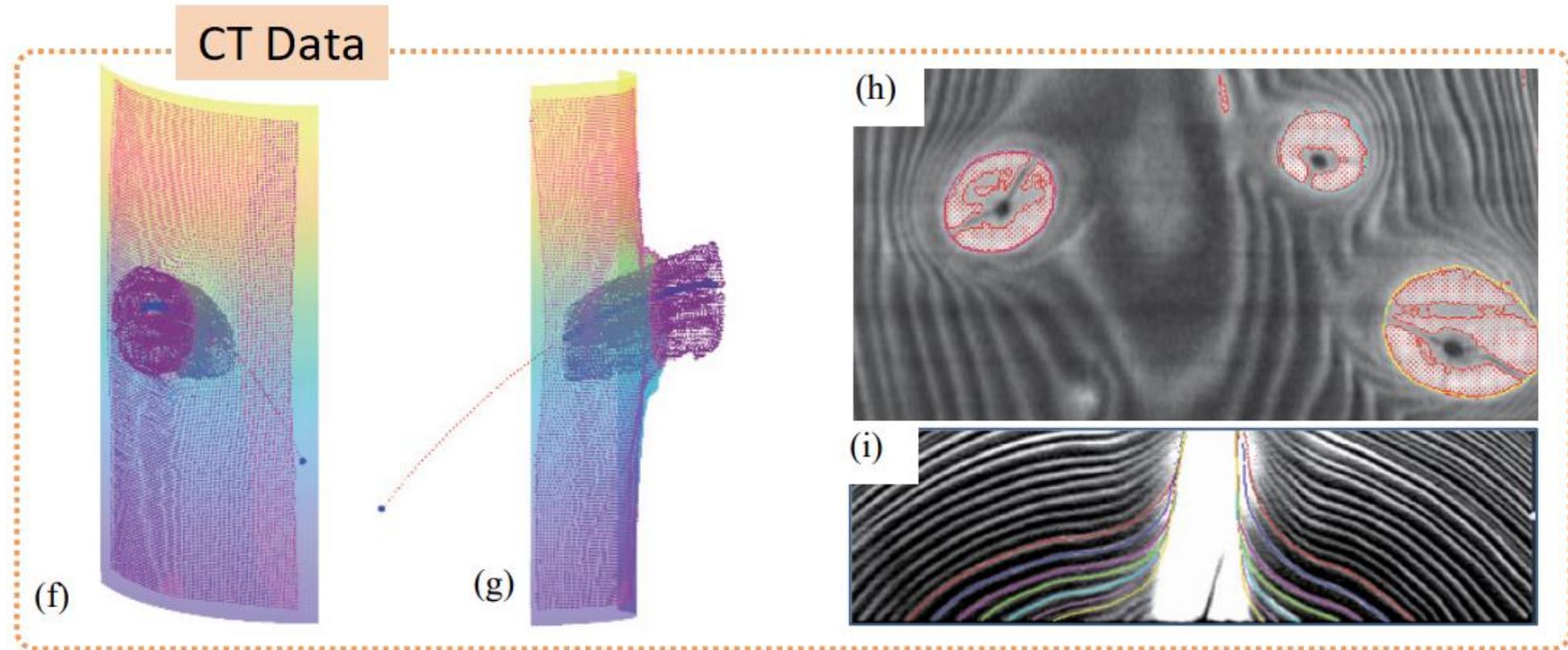


- Très sensibles aux paramètres du modèle de Foley, en particulier à la géométrie des cernes, des nœuds et à la position de la moelle (centre du tronc)

Assez peu de littérature ne donne une gamme classique des paramètres de régression de Foley, dont les paramètres et la méthode ont été calibrés sur seulement 11 nœuds d'épicéa...

# Calibrage du modèle de Foley

[M. Hu (2023)] – [https://congressarchive.cimne.com/compwood\\_2023/assets/book\\_of\\_abstracts\\_compwood\\_2023.pdf](https://congressarchive.cimne.com/compwood_2023/assets/book_of_abstracts_compwood_2023.pdf)



Comment fournir des données réelles d'orientation 3D des fibres afin de proprement évaluer les différents modèles de déviation des fibres (Foley ou autre), les calibre, ou les améliorer ?

# Développement de la méthode proposé par M. Hu

[Hu M. et al. (2017) ] – <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0952-3>

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z = \vec{u} + \vec{v}_z$$

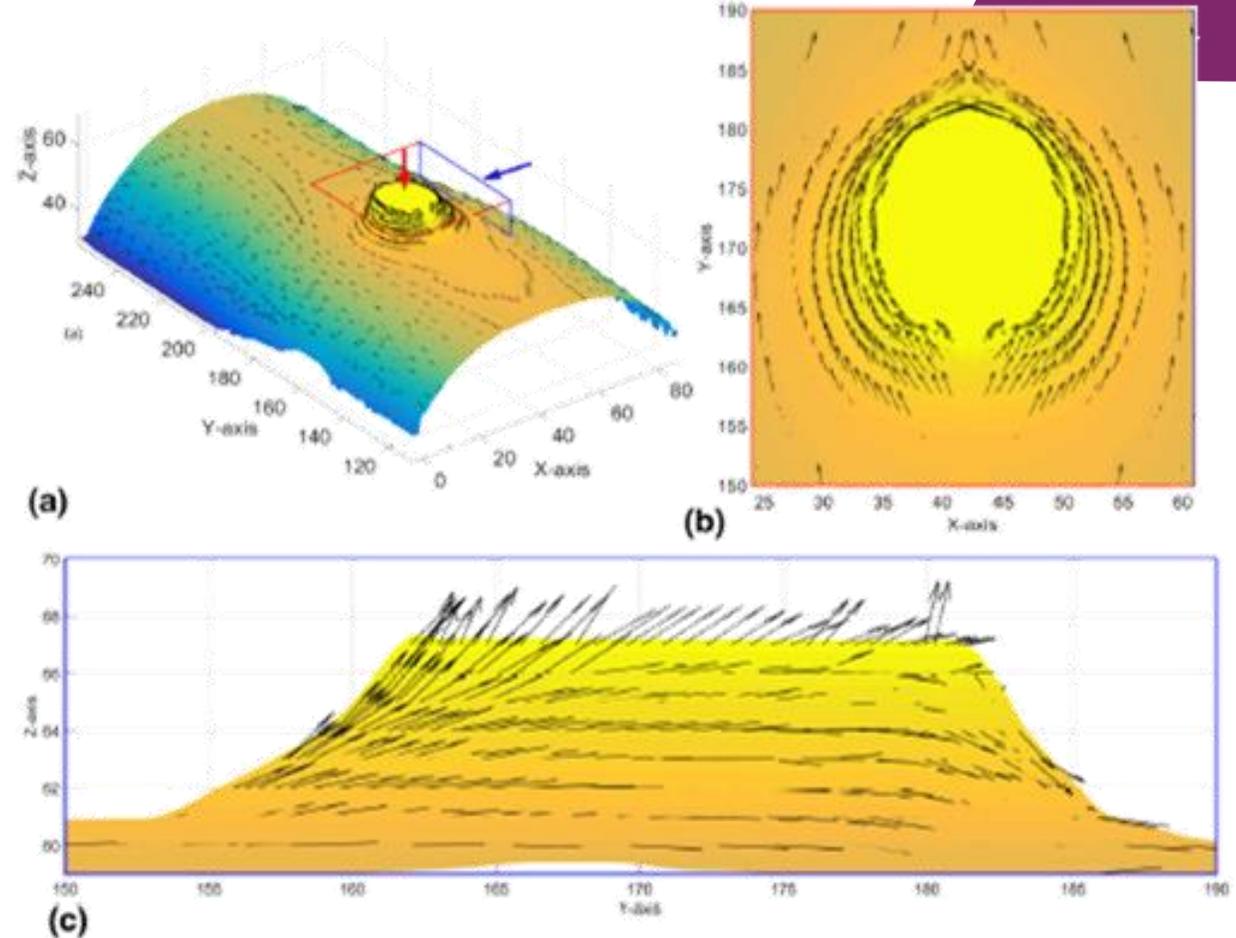
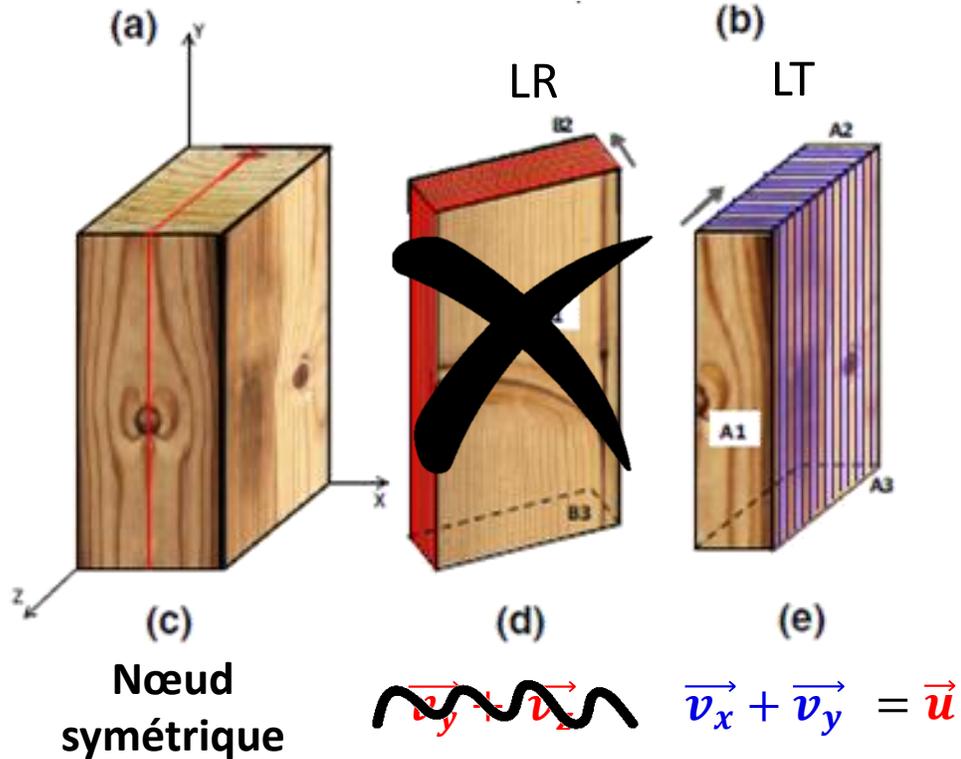


Illustration des directions de fibres 3D obtenues par M.Hu le long d'une cerne de croissance à proximité de la zone vivante d'un noeud.

Pouvons-nous utiliser le fait que les fibres suivent la couche de croissance pour faciliter la mesure de l'orientation des fibres en 3D et la rendre admissible pour les planches complètes ?

# Formule mathématique

Soit  $\vec{u} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix}$  la mesure d'orientation des fibres dans le plan LT

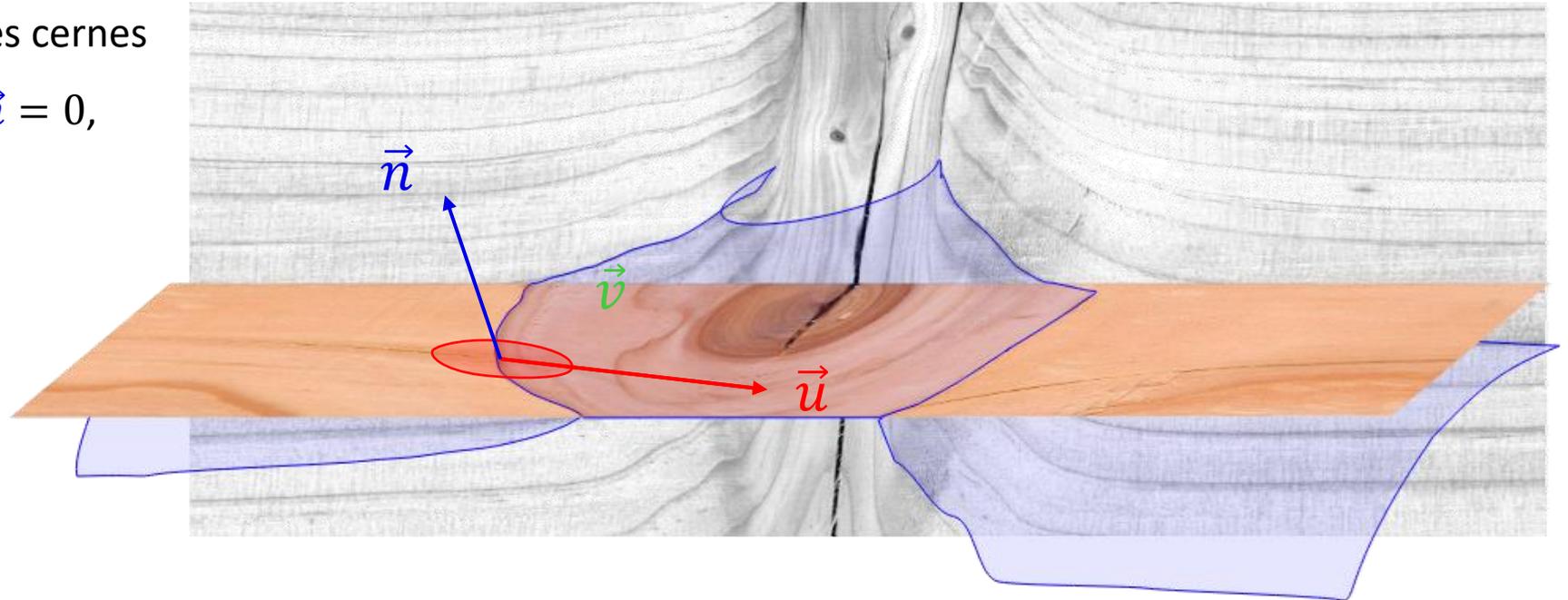
Soit  $\vec{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}$  la direction normale au cerne, et  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \vec{u} + v_z \vec{z}$  la direction réelle de la fibre en 3D,

Comme les fibres doivent suivre les cernes de croissance, on a :

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0,$$

D'où  $\vec{u} \cdot \vec{n} + v_z \vec{z} \cdot \vec{n} = 0,$

Et 
$$\vec{v} = \vec{u} - \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{n_z} \vec{z}$$

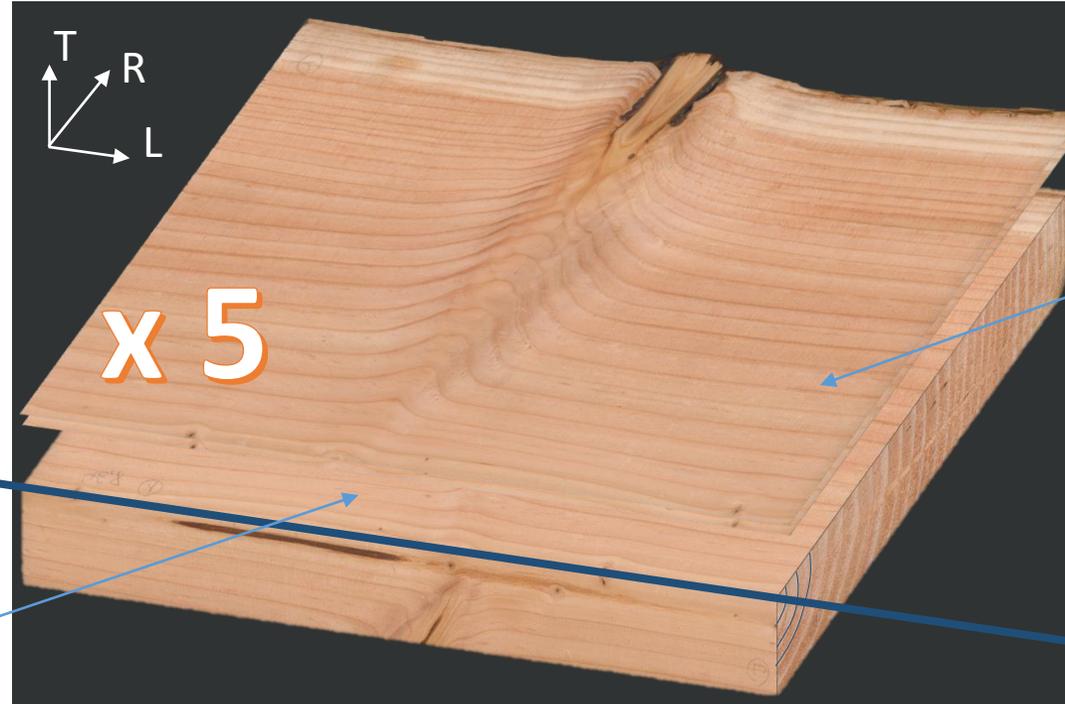


# Protocole expérimental

Le spécimen sélectionné est un échantillon de **douglas** présentant un **nœud complet isolé**, et partiellement adhérent.



Raboteuse SCM S520 :  
**2 mm par passe**

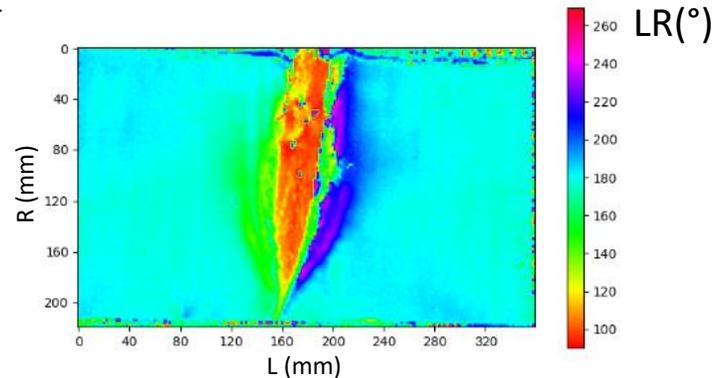


Imprimante multi-fonction  
Toshiba e-STUDIO2515AC :  
**600 dpi colour scans**

Position  
approximative de la  
moelle



Scanner de points lasers  
**Joruk** (Laser 5 mW , Camera Basler  
Ace acA2000-165um + Optical lens  
25 mm, 18 px/mm resolution) :  
**Ellipse photographiée  
tous les 2mm x 2mm**



# Protocole expérimental

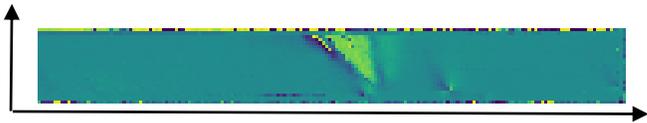
Le spécimen sélectionné est un échantillon de **douglas** présentant un **nœud complet isolé**, et partiellement adhérent.



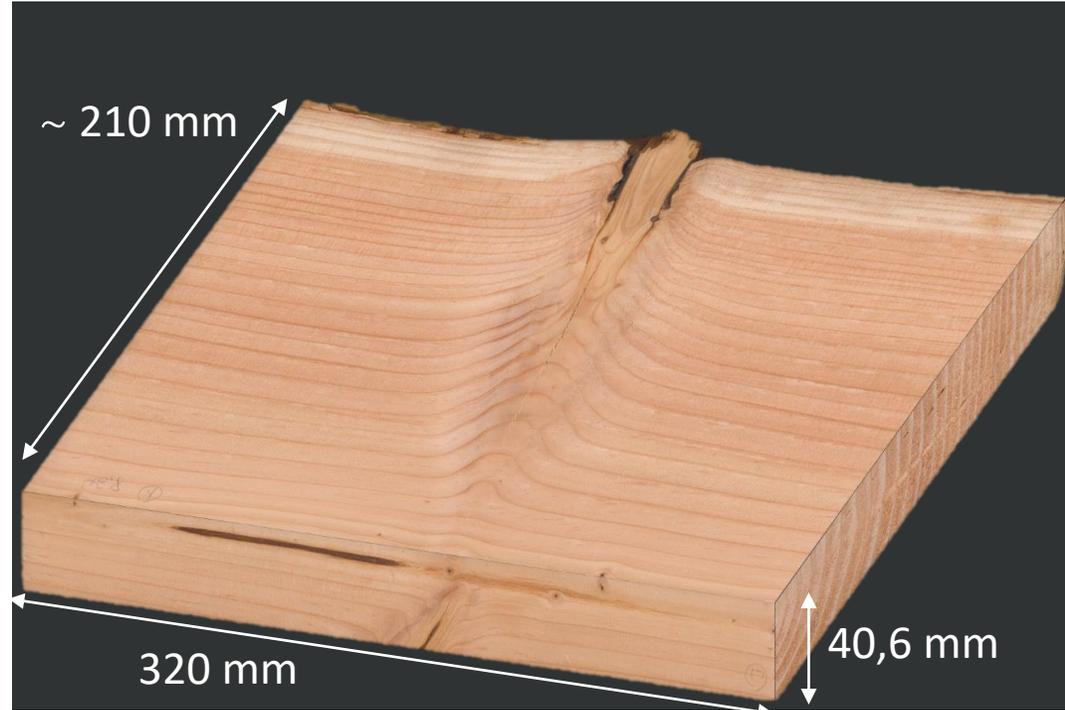
Raboteuse SCM S520 :  
**2 mm par passe**

Scanner de points laser :  
**Une mesure tous les 2mm x 2mm**

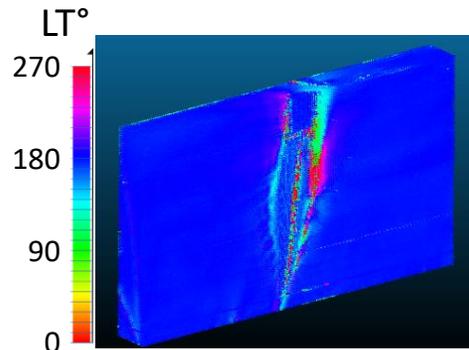
T : direction tangentielle du spécimen



L : direction longitudinal du spécimen

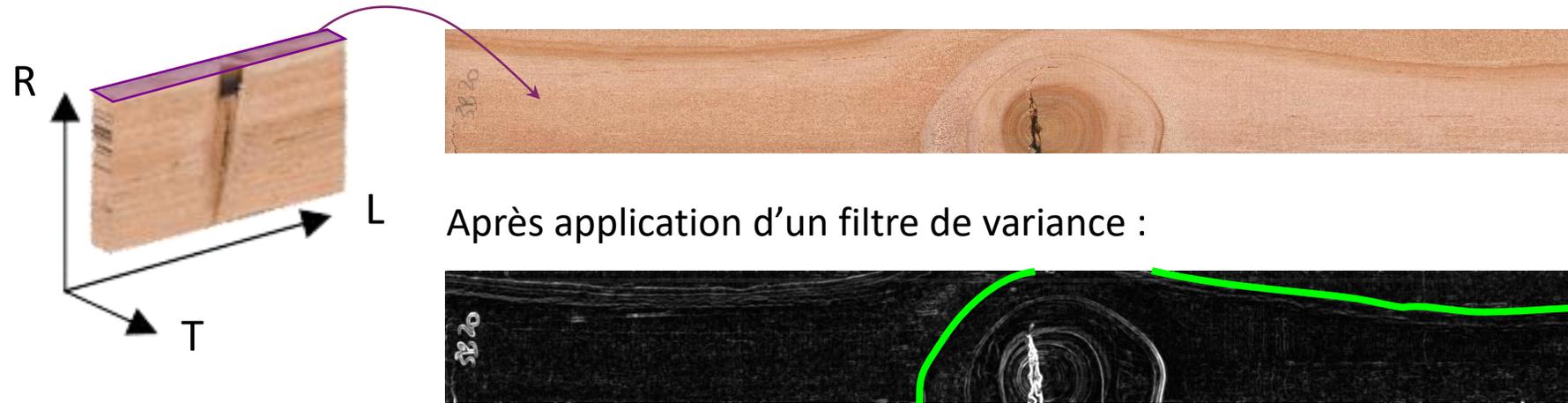


Multifonction printer  
e-STUDIO2515AC :  
**600 dpi colour scans**



Nous avons  $\vec{u}$  la composante LT  
de la direction de la fibre ;  
il nous manque  $\vec{n}$   
à obtenir des scans couleurs !

# Détection des cernes de croissance



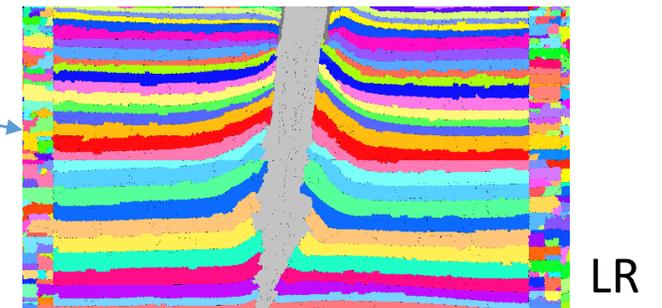
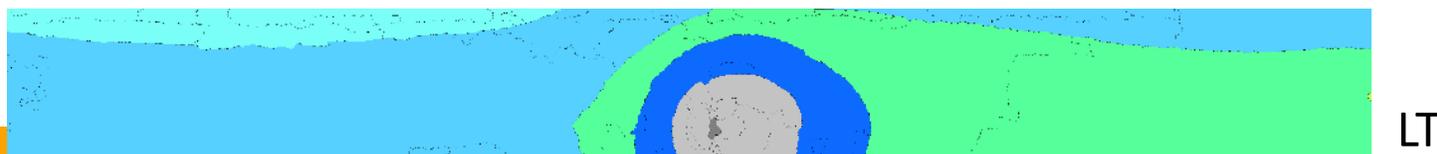
Problèmes :

- Lignes discontinues
- Non-paramétriques
- Nuances variables dans le bois
- Cernes doubles lors d'éventuelles reprise de croissance
- Données bruitées

1 Résultat du prétraitement automatique de la segmentation watershed

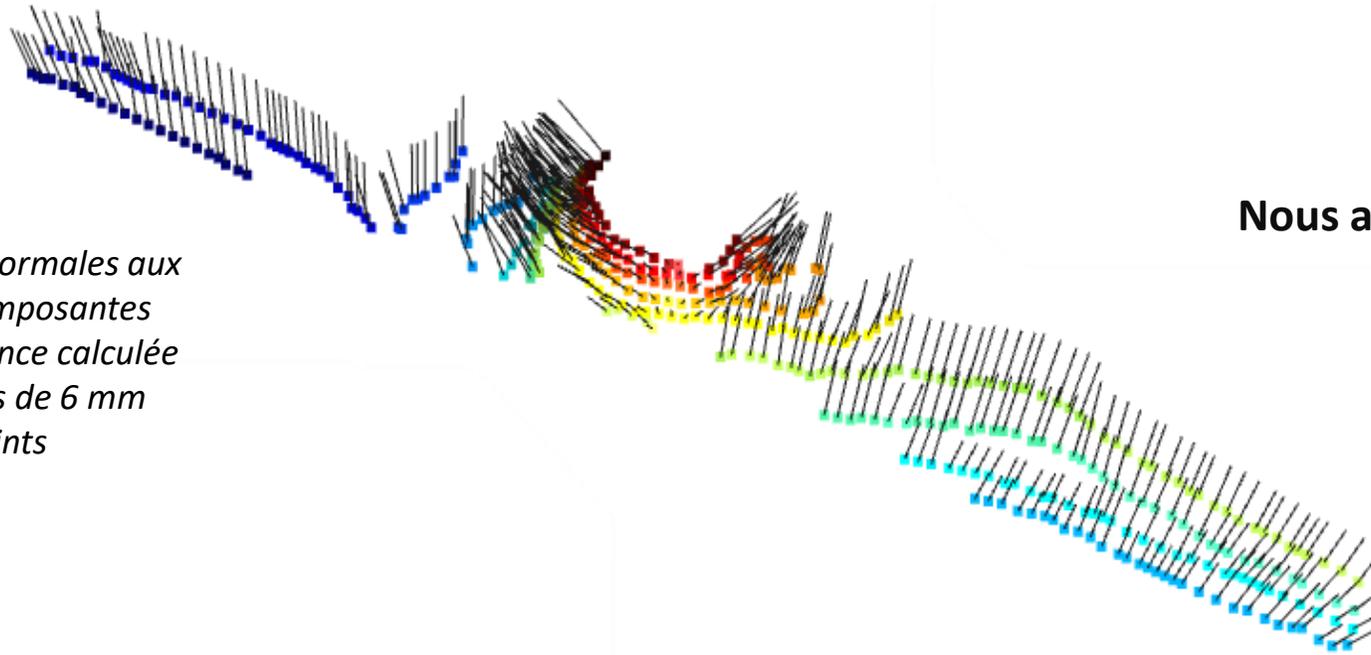


3 Fusion manuelle des segments selon la carte couleurs définie sur la face LR de vue en coupe du noeud



# Détection des cernes de croissance

- 3 [REDACTED] La limite de cerne de croissance est définie par l'intersection des cernes de croissance voisines après dilatation
- 4 Un nuage de point régulier est extrait des limites de cernes
- 5 Les normales aux limites de cernes sont estimées par un algorithme de la bibliothèque Open3D de Python. ([open3d.geometry.estimate\\_normals](https://open3d.org/docs/python_api/geometry/estimate_normals.html))



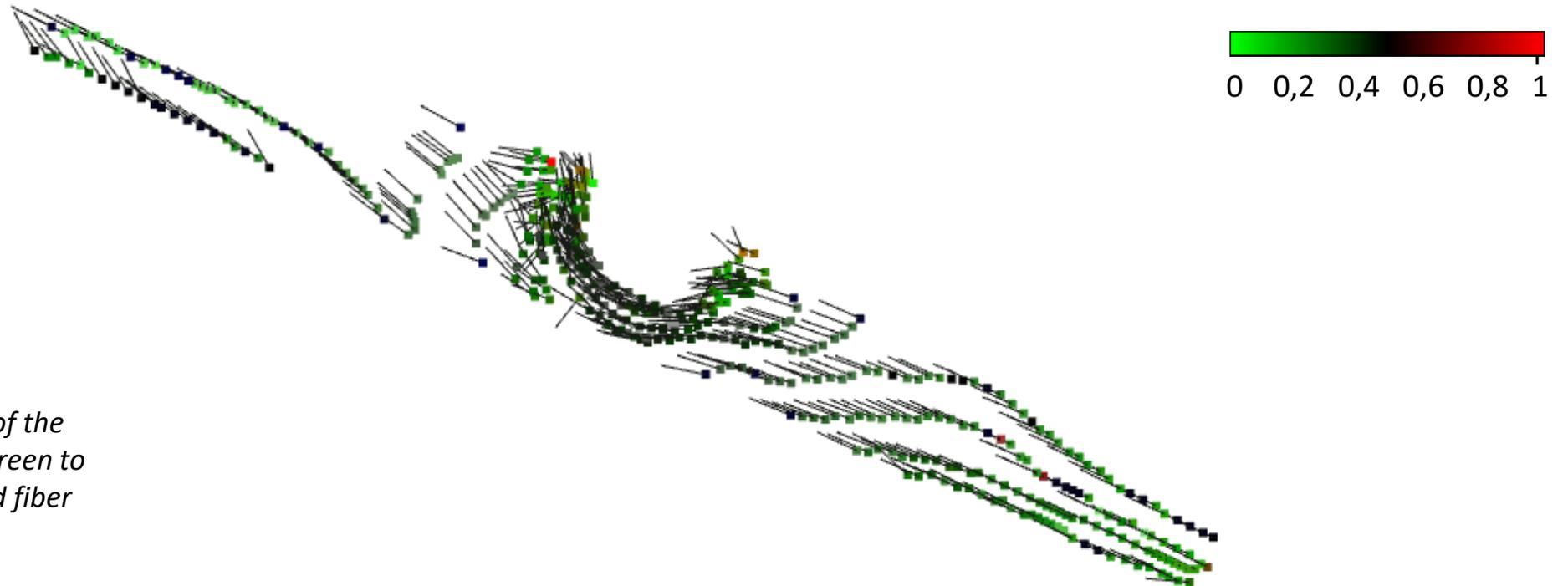
Nous avons désormais  $\vec{n}$  !

Visualisation via l'API open3D des normales aux cernes estimées par analyse des composantes principales de la matrice de covariance calculée sur les  $k$ -plus proche voisins à moins de 6 mm du point observé. La couleur des points correspond au niveau de la tranche.

# Détermination de l'orientation des fibres en 3D

- 6 Appliquant la formule  $\vec{v} = \vec{u} - \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{n_z} \vec{z}$  il est possible de calculé en chaque point du nuage des cernes la direction 3D de fibre correspondante... ... avec une certaine incertitude :

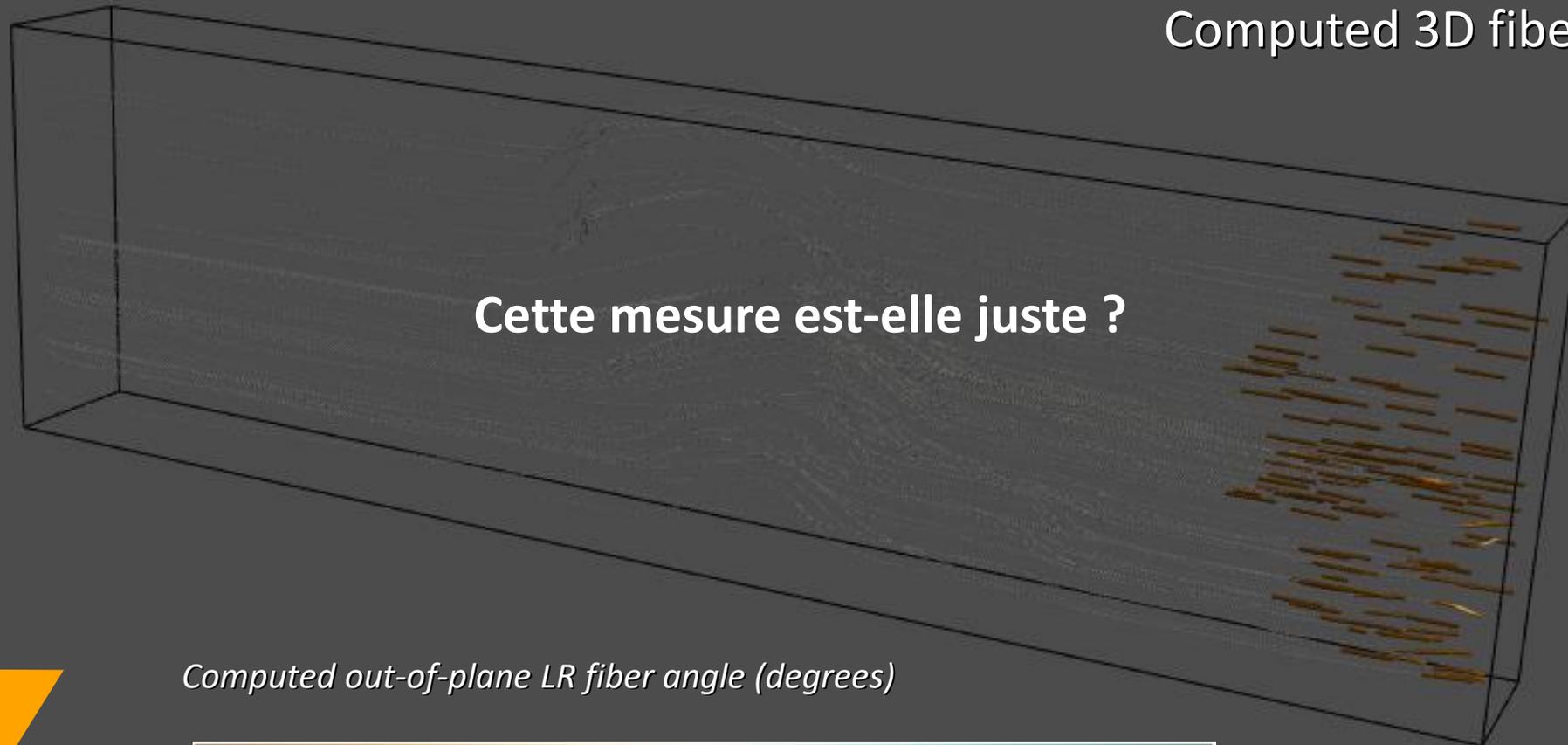
$$\text{uncertainty indicator} = \frac{\|\vec{dv}\|}{\|\vec{v} + \vec{dv}\|}$$



*Visualisation via the open3D API of the calculated fiber direction. Points green to red shade correspond to computed fiber direction result uncertainty.*

# Détermination de l'orientation des fibres 3D sur le volume entier

- Après interpolation de la direction normale aux cernes  $\vec{n}$  dans le volume entier du spécimen ([scipy.interpolate.griddata](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.griddata.html)),  $\vec{v}$  est calculé à partir de la mesure des angles LT de sorte à obtenir une cartographie complète de l'angle des fibres.



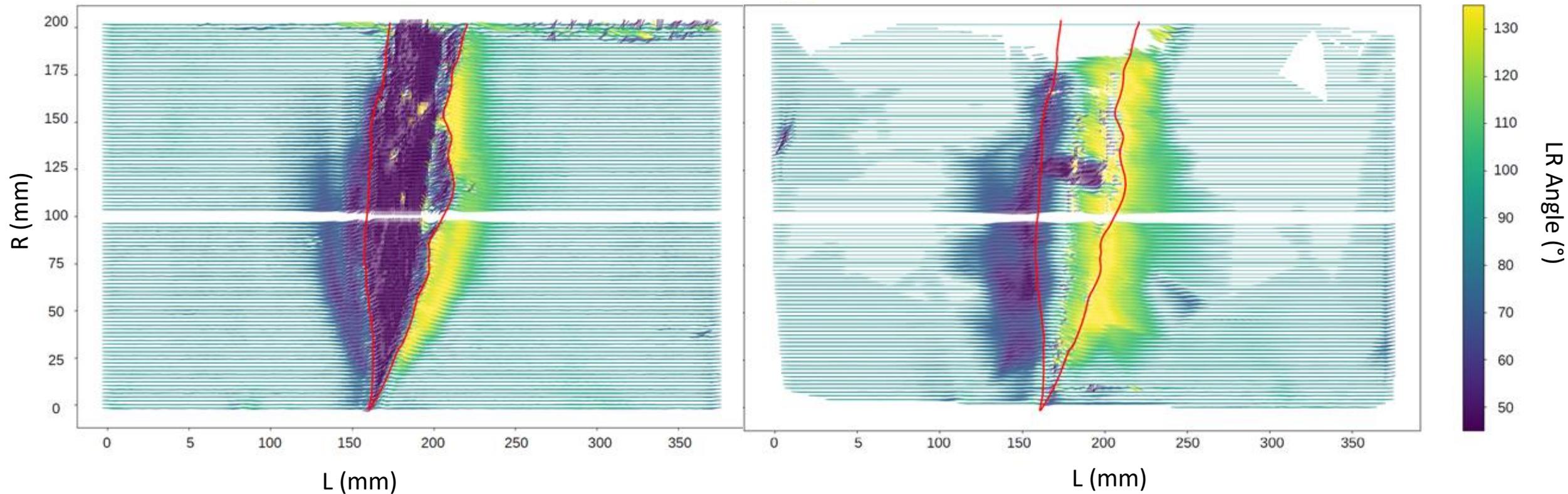
# Comparaison de angles LR calculés et mesurés

## Quiver plots

des angles LT mesurés

vs.

angles LT calculés

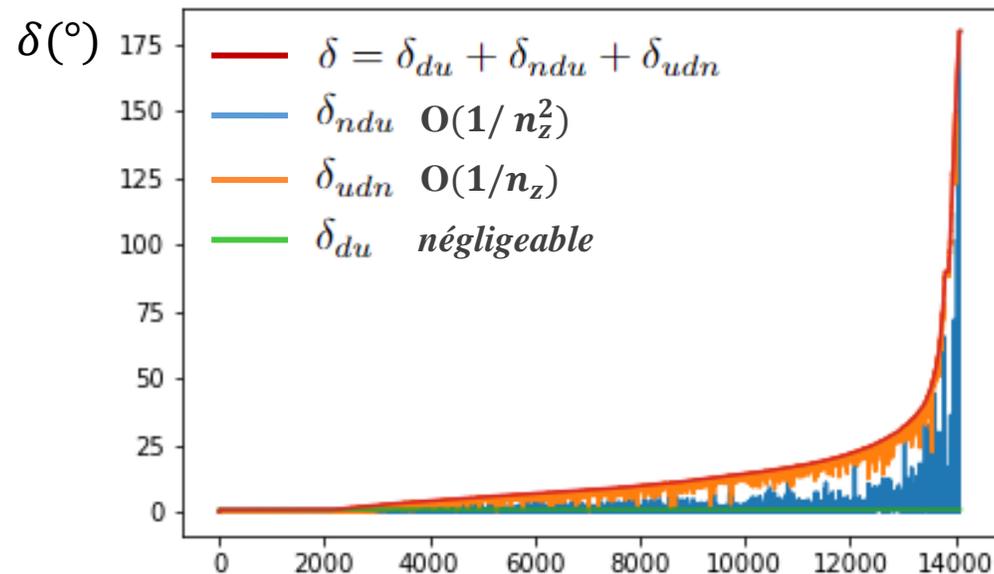


Alors que la déviation réelles des fibres a « une forme en bulbe d'oignon », la déviation calculée des fibres autour du nœud, bien que présentant une variation similaire, **est globalement plus étalée que la déviation réelle, notamment à l'origine du nœud.**

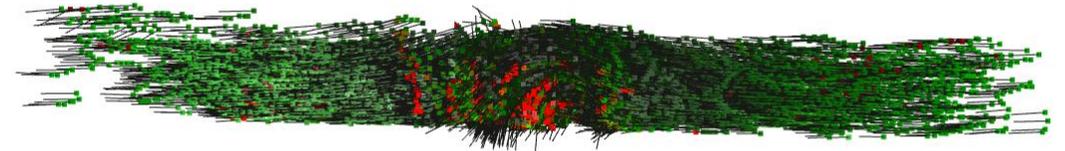
# Incertitude sur le calcul de l'orientation des fibres

$$\vec{v} = \vec{u} - \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{n_z} \vec{z} \quad \rightarrow \quad d\vec{v} = d\vec{u} + \left( d\vec{u} \cdot \frac{\vec{n}}{n_z} \right) \vec{z} + \frac{\vec{u} \cdot (n_z \cdot d\vec{n} - dn_z \cdot \vec{n})}{n_z^2} \vec{z}$$

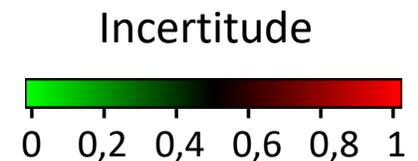
$$\begin{cases} \delta_{du} = (\vec{v}, \vec{v} + d\vec{u}) \\ \delta_{ndu} = \left( \vec{v}, \vec{v} + \left( d\vec{u} \cdot \frac{\vec{n}}{n_z} \right) \vec{z} \right) \\ \delta_{udn} = \left( \vec{v}, \vec{v} + \frac{\vec{u} \cdot (n_z \cdot d\vec{n} - dn_z \cdot \vec{n})}{n_z^2} \vec{z} \right) \end{cases}$$



Valeur de l'incertitude (en terme d'angle) pour l'ensemble des points des limites de cernes classée par ordre croissant d'incertitude globale.



Visualisation via l'API open3D de la direction des fibres.



Valeurs incertaines quand les cernes sont perpendiculaires au plan de rabotage ( $n_z = 0$ ), ici à proximité du nœud, et aux alentours de la moelle

# Comparaison de l'orientation LT des fibres calculée aux limites de cernes visibles

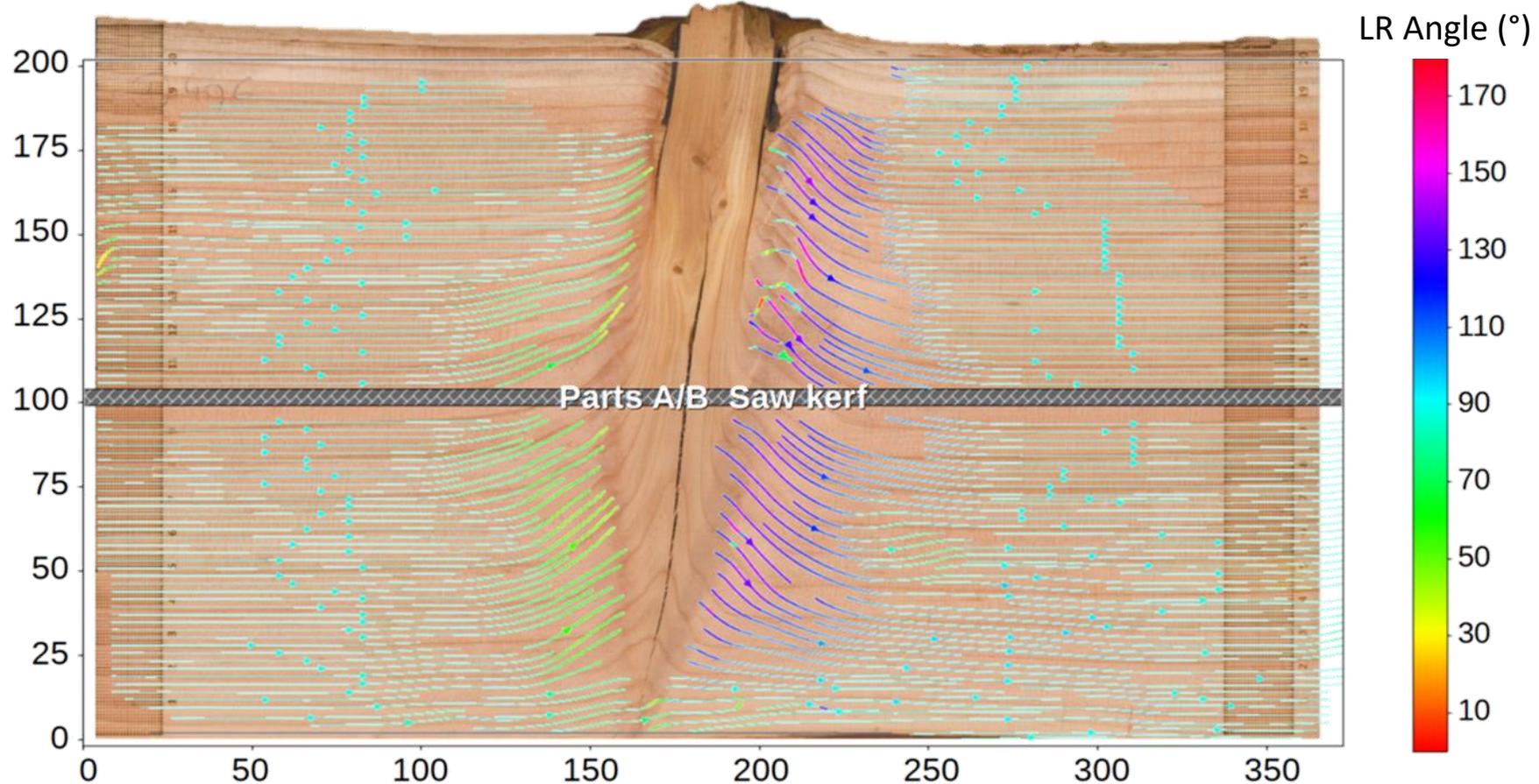
Streamplot de l'orientation dans le plan LT des fibres obtenue par calcul superposée à la vue en coupe du nœud correspondante



précis et exact



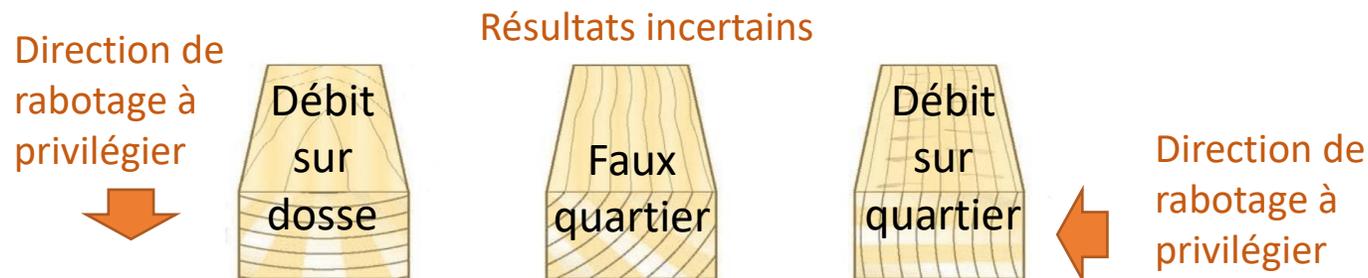
toujours exact  
mais peu précis



# Conclusion

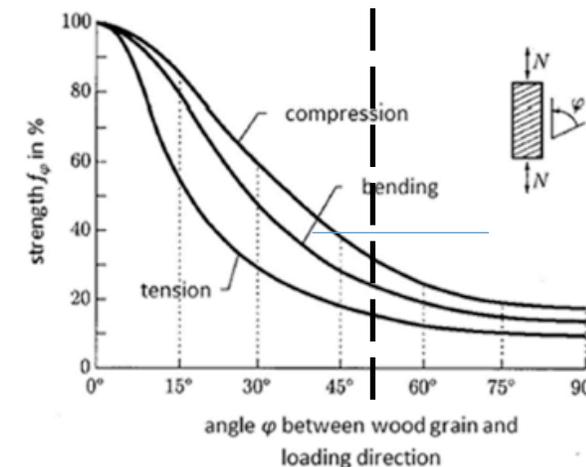
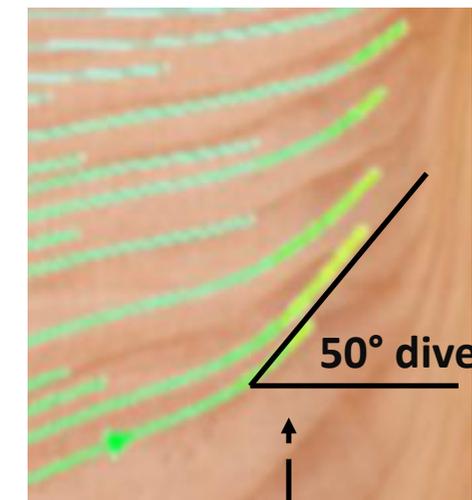
Cette méthode permet d'obtenir des données expérimentales de déviation des fibres du bois en 3D :

- **quelles que soient les géométries des nœuds,**
- **peut être mis en œuvre à l'échelle d'une planche entière ;**
- **tant que les plans de rabotages ne sont pas trop inclinés par rapport aux cernes**



A proximité du nœud, la déviation obtenue apparaît **précise jusque 50° de plongée des fibres**, où la résistance est déjà divisée par 3 !

On retient néanmoins que la **déviati on obtenue par cette méthode est globalement plus étalée que la déviation réelle.**



**Comment utiliser ces données pour évaluer et améliorer le modèle de déviation des fibres et ainsi la prédiction de la résistance des bois sciés ?**