

## **Modélisation des déformations au séchage d'avivés de chêne à partir de la mesure de l'orientation des fibres**

BESSEAU Benoît, POT Guillaume, GIRARDON Stéphane, COLLET Robert

Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM Université,  
F-71250 Cluny, France  
[benoit.besseau@ensam.eu](mailto:benoit.besseau@ensam.eu)

**Mots clefs** : séchage ; déformation ; orientation des fibres ; chêne.

### **Contexte et objectifs**

Le bois a un comportement mécanique complexe lié à son comportement hygroscopique. L'humidité du bois (H%) se définit comme le rapport entre la masse d'eau présente dans une pièce de bois et la masse sèche de cette même pièce. Le séchage du bois peut se décomposer en deux phases principales. Dans un premier temps, c'est l'eau libre, présente dans les lumens des cellules et se déplaçant facilement dans le bois, qui s'évacue jusqu'à ce que le bois atteigne le point de saturation des fibres (PSF). Dans un second temps, l'eau liée, qui imprègne les parois cellulaires et dont la migration est lente, s'évacue à son tour en entraînant des retraits dimensionnels très hétérogènes. Ce phénomène génère des contraintes internes qui peuvent provoquer deux catégories de défauts liés au séchage : les fentes et les déformations. La variabilité des caractéristiques du matériau bois de l'échelle macroscopique à l'échelle anatomique rendent la modélisation du séchage très complexe. Les paramètres souvent mis en avant dans ce type de travaux de modélisation sont liés à l'hétérogénéité spatiale et l'anisotropie du matériau à différentes échelles. Les retraits tangentiels, radiaux et longitudinaux étant très différents, l'orientation des fibres par rapport à la direction longitudinale joue un rôle important. Mais face à la variabilité de toutes ces propriétés, elle est souvent considérée comme uniforme (Constant 1995), hypothèse souvent argumentée par la difficulté de modéliser les nœuds et la volonté de simplifier les problèmes de modélisation en n'étudiant que du bois sans défaut.

Or, les travaux récents traitant de la mesure locale de l'orientation des fibres ont montré tout l'intérêt de cette information dans la modélisation des propriétés mécaniques du bois (Viguiier et al. 2015, Faydi 2017). De plus, ces mesures sont possibles sur bois vert, notamment dans le cas du chêne (Besseau et al. 2019).

L'objectif de cette étude est de prendre en compte la mesure de l'orientation des fibres pour modéliser les déformations au séchage d'avivés de chêne à l'aide d'un modèle éléments finis (EF).

### **Matériel et Méthode**

L'échantillonnage est composé de 8 avivés de chêne frais de sciage de section 109 x 30 mm<sup>2</sup> issus de planches de découvert et de cœur de la production de la scierie Ducerf. Ces avivés sont répartis selon leur débit : 4 avivés débités sur dosse et 4 débités sur quartier. Dans les 3h suivant leur débit, les avivés ont été scannés une première fois au LaBoMaP dans un scanner CombiScan de Luxscan (groupe Weinig) afin de mesurer l'orientation des fibres. Ce scanner permet d'effectuer des mesures sur les deux faces d'un avivé en un seul passage. Les avivés ont ensuite été pré-séchés puis séchés jusqu'à une humidité de 10 % pour être à nouveau scannés dans le CombiScan afin de mesurer les déformations provoquées par le séchage.

*Traitement des données*

Le scanner permet d'obtenir différents points de mesure d'orientation des fibres le long de l'avivé avec une résolution de 1 mm dans le sens de défilement ( $\vec{x}$ ) et de 4 mm dans le sens transverse ( $\vec{y}$ ). Ces données sont interpolées sur une grille régulière de 1 x 1 mm<sup>2</sup> décrivant les faces supérieure et inférieure de l'avivé (Fig. 1b et 1c). Afin d'obtenir une représentation plane mono face de l'avivé, les mesures d'orientation des fibres des faces supérieure et inférieures ont été moyennées pour chaque pixel de la grille (Fig. 1d).

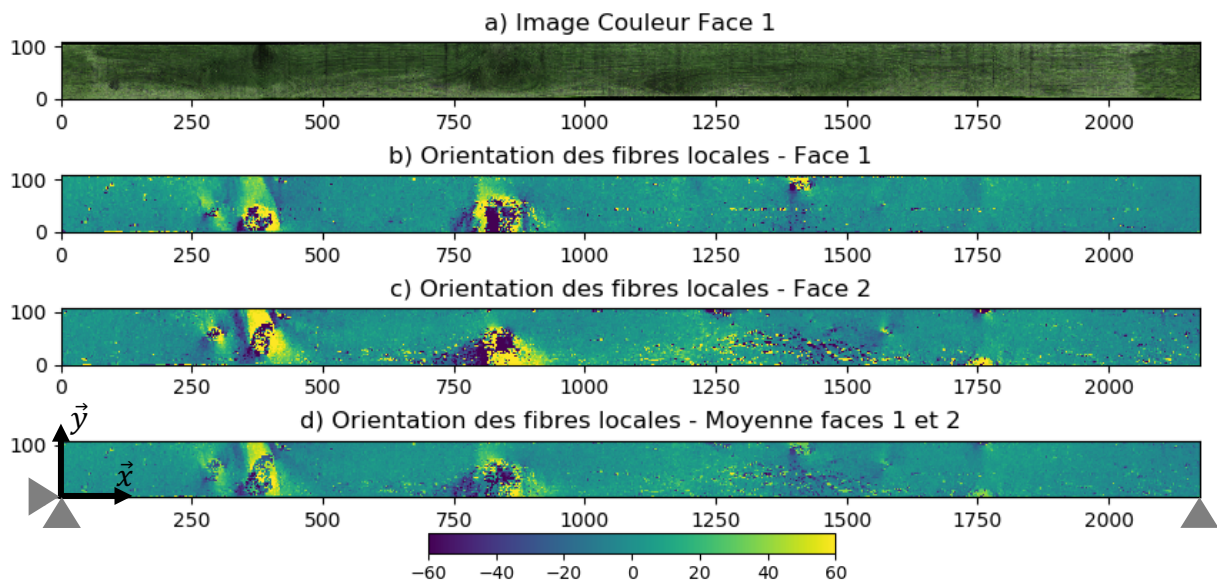


Fig. 1 : Avivé 1. Image couleur (a), grille des orientations des fibres des faces 1 (b) et 2 (c) et de leur représentation plane mono face (d).

*Modèle éléments finis.*

Un modèle EF plan a été mis en place sous Castem19 pour modéliser les déformations au séchage. Les éléments utilisés sont des quadrangles à 4 nœuds (QUA4) de 1 x 1 mm<sup>2</sup>. Le maillage de l'avivé est régulier. Chaque élément est caractérisé par une orientation de fibres moyennée décrite ci-dessus, les propriétés matériau étant modifiées selon cet angle par rotation de la matrice de loi de comportement. Une loi de comportement isotrope transverse a été utilisée avec les paramètres donnés dans le Tab. 1. Les coefficients de retrait ont également été recalculés par rotation de la matrice en fonction de l'orientation des fibres élément par élément, sur la base des retraits donnés dans le Tab. 1 (Kretschmann 2010).

Tab. 1 : Propriétés mécaniques des avivés retenus dans le modèle EF.

Débit	E <sub>L</sub> (GPa)	E <sub>T</sub> (GPa)	G <sub>LT</sub> (GPa)	μ <sub>LT</sub>	R <sub>L</sub> (%/H%)	R <sub>T</sub> (%/H%)
Dosse (LT)	14.0	1.01	1.1	0.428	0.01	0.32
	E <sub>L</sub> (GPa)	E <sub>R</sub> (GPa)	G <sub>LR</sub> (GPa)	μ <sub>LR</sub>	R <sub>L</sub> (%/H%)	R <sub>R</sub> (%/H%)
Quartier (LR)	14.0	2.28	1.2	0.369	0.01	0.15

L'avivé est considéré comme étant sur deux appuis simples sur chaque extrémité inférieure (Fig. 1d). Les conditions aux limites sont les suivantes : l'appui gauche est bloqué en déplacement selon  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$ , et l'appui droit en  $\vec{y}$ . Le séchage est modélisé uniquement par la déformation élastique due aux retraits (qui varient, pour rappel, en fonction de l'angle qui leur est associé). Une variation de l'humidité du bois de 21 % a été appliquée, ce qui correspond typiquement dans la réalité à une variation de teneur en eau lors du séchage de 31 % (PSF) à

10 %. L'application de ce retrait en fonction de l'angle qui diffère d'un élément à l'autre crée des contraintes internes qui se traduisent ensuite par des déplacements. Après une résolution linéaire, la position finale des bords donne la déformation globale de l'avivé suite aux retraits, modélisant ainsi les déformations de séchage dans le plan, c'est-à-dire le voilement longitudinal de rive au sens de l'ISO 2300:1973 (fr). Le modèle est ici élastique, linéaire et ne prend pas en compte la cinétique de séchage.

## Résultats et Discussions

### Déformée

La Fig. 2 donne un exemple de déformation prédite par le modèle EF en comparaison avec la déformation réelle mesurée. La déformée globale apparaît proche de la déformée réelle.

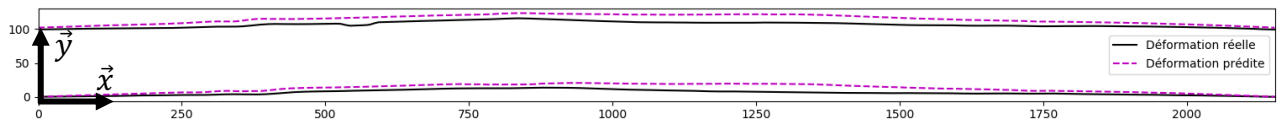


Fig. 2 : Avivé 1. Déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).

### Corrélation entre les flèches prédites et mesurées

La flèche réelle  $f_r(x)$  est définie comme la moyenne des flèches relatives  $f_{r,1}(x)$  et  $f_{r,2}(x)$  des bords  $b_{r,1}(x)$  et  $b_{r,2}(x)$ . Ces flèches représentent respectivement la distance aux droites  $\Delta_{r,1}$  et  $\Delta_{r,2}$ , (Fig. 3) reliant les deux extrémités de chaque bord. La flèche prédite  $f_p(x)$  le long de l'avivé est définie de la même manière à partir des bords déformés du modèle EF.

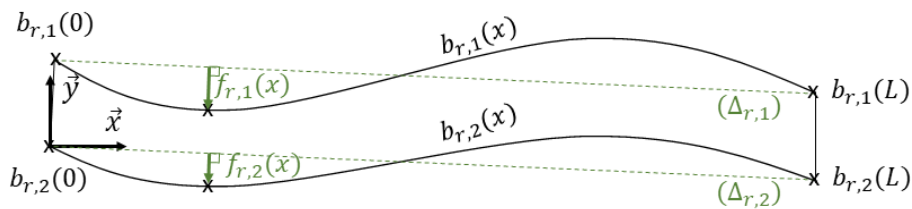


Fig. 3 : Calcul des flèches sur chant d'un avivé déformé.

Ainsi, pour les deux groupes d'avivés,  $f_r(x)$  est tracée en fonction de  $f_p(x)$  sous forme d'un nuage de points donné sur les Fig. 4a et 4b. Le coefficient de corrélation  $R^2$  et le RMSE (eq. 1) sont de 0.92 et 2.6 mm pour les avivés débités sur dosse, et respectivement de 0.79 et 1.9 mm pour ceux débités sur quartier. Pour les flèches maximales, notées  $f_{r,max}$  et  $f_{p,max}$  (Fig. 4c), le  $R^2$  est de 0.78 avec un RMSE de 2.6 mm.

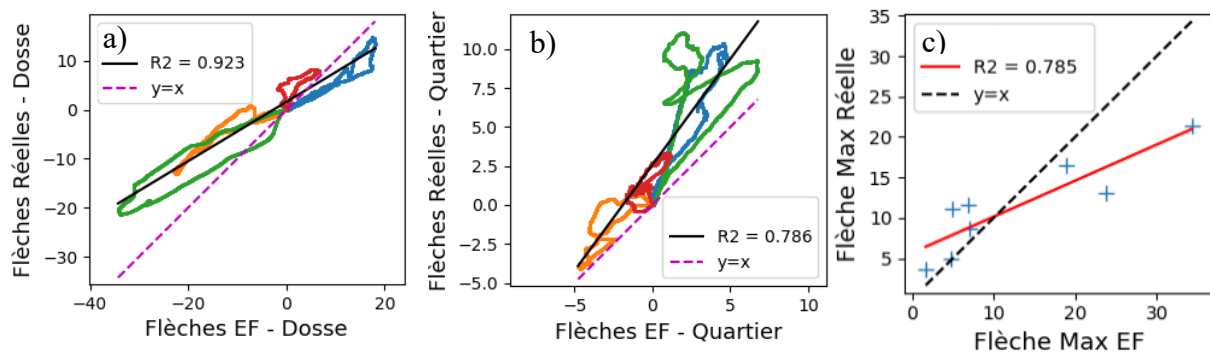


Fig. 4 : Comparaison entre mesures réelles et simulations. Les flèches sont données en mm.  
A Gauche : avivés débités sur dosse. Au centre : avivés débités sur quartiers.  
A droite : Corrélation entre flèches max, dosses et quartiers confondus.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N (f_p(x) - f_r(x))^2} \quad (\text{eq. 1})$$

Ces résultats permettent de valider l'utilisation d'un modèle EF pour déterminer les déformations au séchage d'un avivé nouveau. Ils confirment l'influence et l'importance de la prise en compte de l'orientation des fibres dans les déformations au séchage. Dans le contexte industriel où des bois déformés peuvent bloquer des machines ou générer des défauts d'usinage, ce sont les flèches maximales qui retiennent plus l'attention afin d'apprécier l'amplitude des déformations. Si la corrélation entre les  $f_{r \max}$  et  $f_{p \max}$  est plutôt bonne, des différences locales de flèches jusqu'à 15 mm ont été relevées sur certains avivés.

### Conclusions et perspectives

Ces premiers résultats de modélisation du voilement longitudinal de rive à partir de la mesure de l'orientation des fibres sur bois vert sont encourageants. Il semble donc possible de modéliser convenablement les déformations au séchage dans le plan d'un avivé de chêne uniquement à partir des mesures d'orientation des fibres, générant des variations locales de retrait au sein de l'avivé. Néanmoins, l'hétérogénéité des retraits locaux trouve aussi une cause dans la composition même du bois, indépendamment de l'orientation des fibres. Par exemple, le bois de tension et le bois de réaction jouent un rôle non négligeable dans les déformations de séchage, tout comme la cinétique de séchage. Afin d'améliorer ce modèle EF, les valeurs de retrait propre à chaque avivé pourront être appliquées, prenant ainsi en compte le fait que les avivés ne sont jamais débités parfaitement dans le plan LT ou LR. Une évolution du modèle EF prenant en compte les deux faces séparément est aussi envisagée.

### Remerciements

Les auteurs remercient la région Bourgogne-Franche-Comté, Xyloforest et le groupe Ducerf pour leur soutien financier, technique et humain dans ce projet.

### Références

- Besseau B., Pot G., Collet R. & Viguier J (2019) Measurement of Fiber Orientation by Laser Light Scattering on Dry and Rough Sawn Green Hardwoods. In 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium 225–232 (Wang, Xiping; Sauter, Udo H.; Ross, Robert J., eds).
- Constant T. (1995) Modélisation des déformations des pièces de bois au séchage et influence de la structure interne de l'arbre. Rev. For. Fr. 141 doi:10.4267/2042/26705.
- Faydi Y (2017) Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres.
- Kretschmann D. E. (2010) Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA
- Viguier J, Jehl A, Collet R, Bleron L, Meriaudeau F (2015) Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling. Wood Mat Sci Eng. 10: 145-156. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.951071>.