

## Modélisation de l'effet trachéide

BOIVIN Juliette<sup>1</sup>, FROEHLI Luc<sup>2</sup>, GIRARDON Stéphane<sup>1</sup>, TEYSSIEUX Damien<sup>2</sup>,  
DENAUD Louis<sup>1</sup>

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

[Juliette.Boivin@ensam.eu](mailto:Juliette.Boivin@ensam.eu), [Louis.Denaud@ensam.eu](mailto:Louis.Denaud@ensam.eu), [Stephane.Girardon@ensam.eu](mailto:Stephane.Girardon@ensam.eu)

<sup>2</sup>Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies (FEMTO – ST) – UMR 6174

[Luc.Froehly@univ-fcomte.fr](mailto:Luc.Froehly@univ-fcomte.fr), [Damien.Teyssieux@femto-st.fr](mailto:Damien.Teyssieux@femto-st.fr)

**Mots clés :** optique, effet trachéide, diffusion de la lumière

### Contexte et objectifs

Le contrôle non destructif du bois permet de mieux connaître ses propriétés et ainsi le valoriser au mieux. On peut par exemple mesurer la densité locale, le taux d'humidité et les propriétés chimiques du bois grâce à différentes technologies comme les rayons X (Wei 2011), ou la spectroscopie proche infrarouge (Tsuchikawa 2015). Parmi les propriétés importantes à connaître, on trouve également l'orientation des fibres du bois. Celle-ci peut être mesurée localement à l'aide de l'effet trachéide, qui désigne la diffusion anisotrope de la lumière dans et à la surface du matériau bois (Fig. 1). Cet effet est déjà utilisé pour mesurer l'orientation de fibres à la surface du bois et ainsi en estimer les propriétés mécaniques (Hankinson 1921).

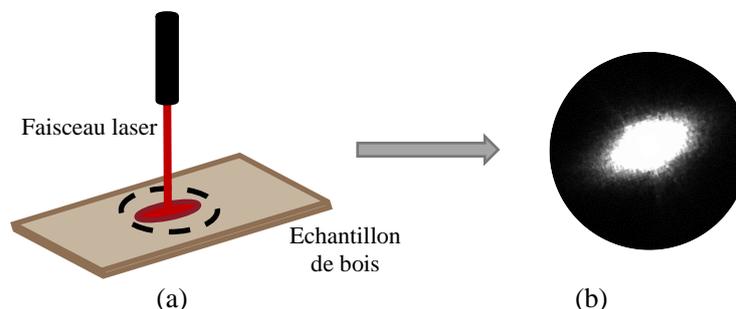


Fig. 1 : (a) Schéma de la projection d'un laser sur du bois (b) Image de la surface du bois sur laquelle on voit l'ellipse lumineuse obtenue par effet trachéide

Ce phénomène est simple à mettre en œuvre mais est influencé par de nombreux facteurs de variation dépendants de la microstructure du bois que l'on souhaite caractériser ou de la source utilisée. Purba et al. (2020) ont par exemple montré que l'aspect des ellipses obtenues (notamment l'aire) variait selon l'essence utilisée et les conditions d'humidité de l'échantillon (Fig. 2). L'utilisation de la simple information de la valeur de l'angle de l'ellipse surfacique est déjà très riche. Elle a permis à de nombreux auteurs de détecter les nœuds ou de prédire les performances mécaniques de l'échantillon caractérisé (Jolma et al. 2008, Brännström et al. 2008). Peu d'auteurs ont cherché à exploiter d'autres paramètres liés au phénomène lui-même car les facteurs d'influence sont nombreux et difficiles à séparer.

L'exploitation de l'ellipse obtenue dépend donc des paramètres de sa formation, et plus les facteurs exerçant une influence dessus seront identifiés plus l'ellipse sera exploitable pour un traitement numérique permettant de relier ses propriétés à des propriétés physiques ou structurelles du bois.

Le projet présenté par la suite consiste à modéliser l'effet trachéide afin de mieux comprendre le rôle des différents facteurs sur le phénomène de diffusion dans le but d'en déduire d'autres informations sur le bois que l'orientation des fibres.

### Matériel et méthodes

Afin de réaliser des simulations de trajectoires lumineuses, le logiciel OpticStudio a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel permettant de faire de la conception et de l'analyse de systèmes optiques.

Le bois a été représenté à l'aide de deux structures :

- Une structure théorique composée d'une matrice de fibres plus ou moins espacées, et dotées de propriétés de diffusion et d'absorption différentes. Cette structure possède l'avantage de contrôler et faire varier facilement les paramètres de la matrice (taille des fibres, espacement, taille de la matrice, forme des fibres...) en se basant sur des données déjà existantes (Ban et al. 2018) (Fig. 2a)
- Une structure réalisée à partir de photographies de coupes de microscope de différentes essences qui sont ensuite extrudées. Avec ce mode opératoire, le modèle est plus proche de la réalité mais on ne dispose que d'un contrôle réduit sur la structure du bois (Fig. 2b)

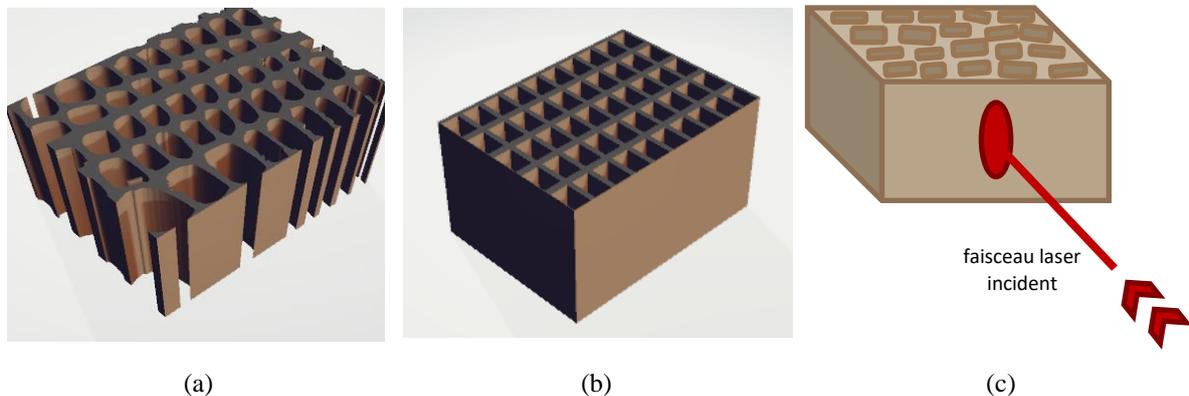


Fig. 2 : (a) Coupe microscopique de douglas extrudée (b) Matrice théorique extrudée (c) Représentation schématique du faisceau laser incident

Le logiciel OpticStudio permet de placer des détecteurs décomptant les rayons lumineux les traversant. Ils sont placés à la surface et à l'intérieur du bois afin de cartographier le parcours des rayons au sein du bois.

On se place dans un modèle de diffusion Henyey-Greenstein, car l'absorption du bois est négligeable par rapport à la diffusion (D'andrea et al. 2008).

Dans le modèle développé, les éléments composant le bois sont considérés comme homogènes et sont caractérisés par deux coefficients : le chemin de libre parcours moyen (CLPM), qui représente la distance parcourue par un photon avant de rencontrer un obstacle, et la transmission, qui varie selon la capacité du matériau à absorber de la lumière. Ces deux paramètres sont définis comme suit :

$$CLPM = \frac{1}{\mu_a + \mu_s} \quad (1)$$

$$Transmission = \frac{\mu_s}{\mu_a + \mu_s} \quad (2)$$

où  $\mu_a$  et  $\mu_s$  sont respectivement le coefficient d'absorption et de diffusion du bois. Ceux-ci ont été déterminés dans des études précédentes, dans différents types de bois à l'aide de méthodes variées (Konagaya et al. 2016, Kitamura et al. 2016). Ces coefficients issus de la littérature servent dans un premier temps à calibrer le modèle.

## Résultats et discussions / Premiers résultats

Les premières simulations ont été menées à l'aide du bois « théorique » (Fig. 3). Celles-ci ont donné des résultats en adéquation avec la diffusion mesurée de la lumière dans le matériau bois car elles font apparaître un effet trachéide. Les simulations mettent également en avant un effet trachéide plus marqué sur du bois type résineux (fibres parallélépipédiques) que sur du bois type feuillus (fibres cylindriques), en concordance avec les constats empiriques.

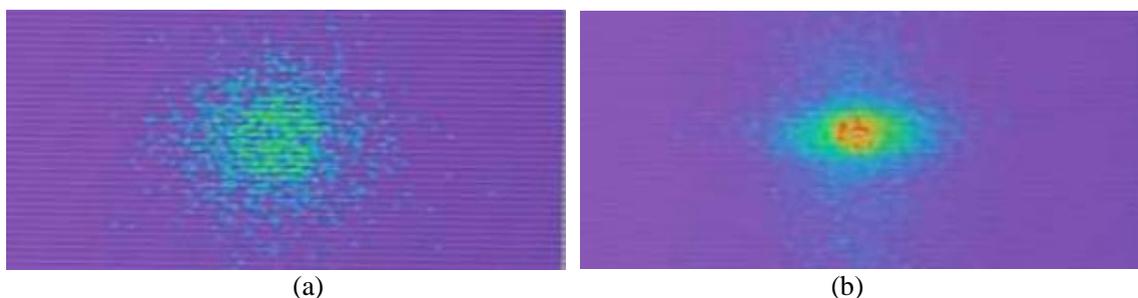


Fig 3 : Effet trachéide obtenu à la surface du bois « théorique » avec des fibres  
(a) cylindriques (b) parallélépipédiques

Néanmoins, l'intérêt de l'utilisation de ce bois synthétique doté de fibres parallélépipédique est limité : sa forme trop parfaite et la présence de bords parfaits conduit à obtenir des effets qui n'existent pas dans la réalité.

Les études suivantes ont donc été menées sur des coupes de microscope extrudées afin de se rapprocher de la réalité (Fig. 4). Les ellipses obtenues par effet trachéide sont qualitativement proches de ce qui a déjà été réalisé dans la littérature (Kienle et al. 2008). Mais ils n'y correspondent pas quantitativement. Des ajustements dans le choix des facteurs donnés au modèle vont devoir être trouvés.

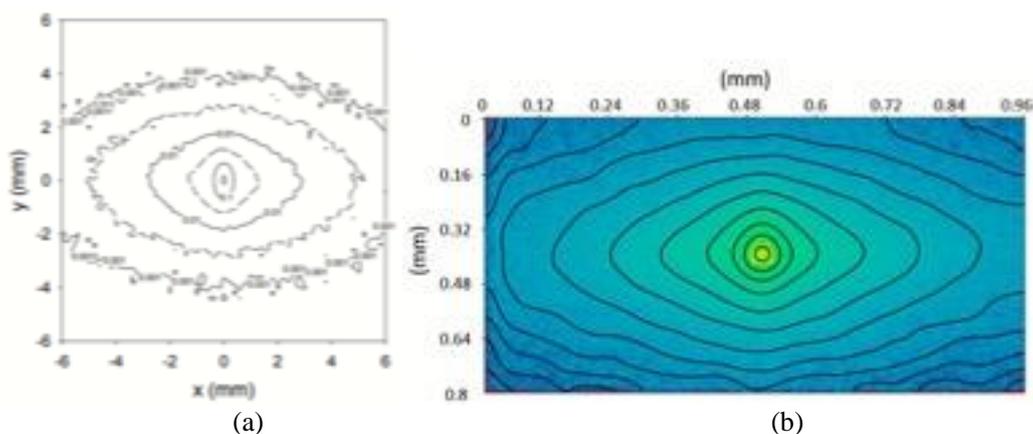


Fig. 4 : Effet trachéide : (a) simulé, obtenu par Kienle et al. (2008) ; (b) obtenu lors des simulations réalisées avec OpticStudio

Des simulations plus riches en informations vont être menées en prenant en compte la diffusion de la lumière dans l'épaisseur des éprouvettes virtuelles, comme sur la Fig. 5. Cela permettra de voir l'influence des éléments de la microstructure du bois sur cette diffusion.

## Conclusion et perspectives

Le modèle développé permet de retrouver un effet trachéide qualitativement comparable à des modélisations précédemment effectuées. Il est donc prometteur mais nécessite des améliorations. A l'avenir, le but sera d'obtenir des résultats quantitatifs plus convaincants, en comparant des données expérimentales et simulées.

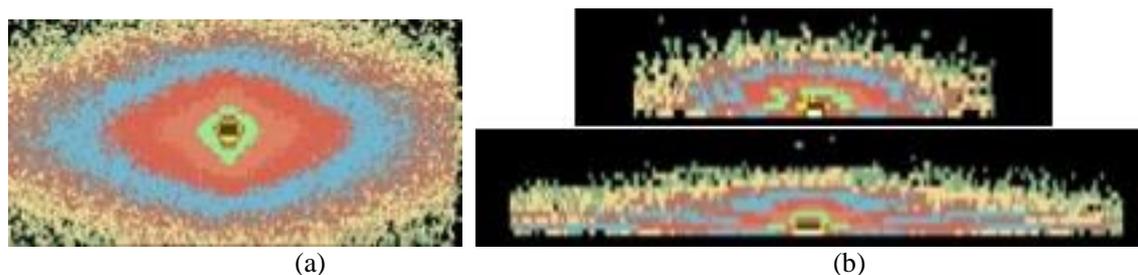


Fig. 5 : Effet trachéide obtenu (a) à la surface du bois et (b) en coupe dans l'épaisseur selon le grand axe et le petit axe

## Remerciements

Ce travail est soutenu par le Conseil Régional Bourgogne-Franche-Comté.

## Références

- Ban M., Inagaki T., Ma T., Tsuchikawa S. (2018) Effect of cellular structure on the optical properties of wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 53-60.
- Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J. (2020) Influence of wood anatomy on fiber orientation measurement obtained by laser scanning on five European species. *Journal of Wood Science*, 66(1), 74.
- Brännström M., Manninen J., Oja J. (2008) Predicting the strength of sawn wood by tracheid laser scattering. *BioResources*, 3(2), 437-451.
- D'andrea C., Farina A., Comelli D., Pifferi A., Taroni P., Valentini G., ... Kienle A. (2008) Time-resolved optical spectroscopy of wood. *Applied spectroscopy*, 62(5), 569-574.
- Hankinson R.L. (1921) Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. *Air service information circular*, 3(259), 130.
- Jolma I.P., Mäkyänen A.J. (2008) The detection of knots in wood materials using the tracheid effect. In *Advanced Laser Technologies 2007* (Vol. 7022, pp. 143-151). SPIE.
- Kienle A., D'Andrea C., Foschum F., Taroni P., Pifferi A. (2008) Light propagation in dry and wet softwood. *Optics Express*, 16(13), 9895-9906.
- Kitamura R., Inagaki T., Tsuchikawa S. (2016) Determination of true optical absorption and scattering coefficient of wooden cell wall substance by time-of-flight near infrared spectroscopy. *Optics Express*, 24(4), 3999-4009.
- Konagaya K., Inagaki T., Kitamura R., Tsuchikawa S. (2016) Optical properties of drying wood studied by time-resolved near-infrared spectroscopy. *Optics Express*, 24(9), 9561-9573.
- Purba C.Y.C., Viguier J., Denaud L., Marcon B. (2020) Contactless moisture content measurement on green veneer based on laser light scattering patterns. *Wood Science and Technology*, 54(4), 891-906.
- Tsuchikawa S., Kobori H. (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61(3), 213-220.
- Wei Q., Leblon B., La Rocque A. (2011) On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. *Canadian journal of Forest Research*, 41(11), 2120-2140.