

# Apport de la mesure de pente de fil au classement mécanique des bois de structures

A. JEHL<sup>a, b</sup>, L. BLERON<sup>a</sup>, F. MERIAUDEAU<sup>c</sup>, R. MARCHAL<sup>a</sup>

a. Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP), Arts et Métiers ParisTech, F-71250 CLUNY (FRANCE)

b. Luxscan Technologies Sarl, Weinig Group, L-4384 EHLERANGE (LUXEMBOURG)

c. Laboratoire Electronique, Informatique et Image (Le2i), IUT du Creusot, 12 rue de la Fonderie, F-71200 LE CREUSOT (FRANCE)

## Résumé :

*Si la plupart des machines de classement mécanique des bois de structures se basent sur le module élastique et la densité des planches, peu sont capables de prendre en compte leurs singularités locales. Le Knot Area Ratio, cependant, permet d'améliorer le classement mécanique en considérant la distribution des nœuds au sein du bois. A travers cette étude, nous avons pu évaluer l'influence de la pente de fil locale, mesurée grâce à un scanner optique, dans la qualité de la prédiction du module élastique et de la contrainte de rupture des sciages.*

## Abstract :

*If most of the lumber strength grading machines are based on the boards' elastic modulus and densities, few of them are able to take in account their local singularities. However, the Knot Area Ratio allows improving strength grading by considering the knots distribution inside the wood. Across this study, we have evaluated the influence of the local slope of grain, measured by means of an optical scanner, in the quality of the elastic modulus and strength prediction.*

**Mots clefs :** bois, classement, mécanique, fibres, anisotropie

## 1 Introduction

Depuis mars 2010 au sein de l'Union Européenne, le calcul des structures comprenant des éléments en bois (bâtiments et ouvrages d'Art) est réglementé par l'Eurocode 5 et l'ensemble de ses normes annexes. Avant tout destiné à harmoniser les méthodes de calcul des différents pays de l'UE, il possède également la particularité de généraliser ces méthodes pour tous les matériaux de construction usuels : béton, acier et bois. Ce code de calcul impose d'utiliser des bois classés mécaniquement afin de garantir les valeurs de densité, de module élastique (MOE) et de contrainte de rupture (MOR) de différentes classes mécaniques définies dans la norme EN338 [1]. Si les deux premiers paramètres peuvent être correctement estimés de manière non destructive, le verrou scientifique majeur réside dans l'estimation du module de rupture.

En effet, à la différence des aciers et des bétons dont les processus de fabrication sont contrôlés, la croissance des arbres est régie par de nombreux facteurs sur lesquels les sylviculteurs n'ont que peu d'influence. Par ailleurs, le bois présente diverses singularités qui sont soit intrinsèques au matériau (nœuds et déviation des fibres autour des nœuds, bois juvénile) ou dues aux conditions de croissance de l'arbre (bois de réaction, largeur de cernes, etc.). Ces singularités, leurs géométries, leurs positions, ont un impact direct sur les propriétés mécaniques des sciages, tout autant que les propriétés du bois sain. Il en résulte une très forte variabilité au sein d'une même essence, d'une même origine géographique, et très souvent au sein d'un même arbre.

Cependant, il se trouve que les propriétés mécaniques citées ci-dessus sont assez bien corrélées entre elles, c'est pourquoi la plupart des machines de classement mécanique procèdent à une estimation de la contrainte de rupture par régression linéaire du module élastique. Ce dernier est habituellement mesuré par analyse acoustique, ou par essai de flexion non-destructif. Cette méthode, en revanche, reste limitée car elle ne

permet pas de tenir compte des singularités locales du matériau. On peut toutefois prendre en considération l'influence des nœuds grâce au calcul du Knot Area Ratio (KAR) ou de ses variantes [2, 3]. La prise en compte de la variation de l'angle entre la direction des fibres et la direction de sollicitation [4], aussi appelé pente de fil (Pdf), constitue également un autre critère local très important dans l'estimation du MOR. Celle-ci étant principalement localisée autour des nœuds, on pourrait dès lors penser que cette information est indirectement prise en compte par le modèle du KAR, et n'apporterait donc pas une amélioration des performances des machines de classement mécanique.

L'objectif de cette étude vise donc à quantifier l'incidence de la prise en compte de la déviation des fibres du bois sur l'estimation du MOE et du MOR des sciages à l'aide d'un scanner optique, couplé ou non à une analyse acoustique.

## 2 Matériels et Méthodes

### 2.1 Echantillon

L'ensemble des mesures ont été effectuées sur un lot de 350 pièces d'épicéa commun (*Picea abies*) provenant d'Europe Centrale, séchées à environ 12% d'humidité relative, de longueur d'environ 4m et de différentes sections : 36x210, 44x110, 45x150, 45x195 (mm).

### 2.2 Dispositifs de mesure

#### 2.2.1 Mesure du module élastique

Le MOE des sciages a pu être mesuré grâce au E-Scan produit par la société LuxScan Technologies. Cette machine se compose de deux parties : une station de pesée permettant une mesure de la densité globale des pièces, et un système de mesure de la fréquence propre de ces mêmes pièces.

$$E_{\text{dyn}} = \rho \cdot (2Lf_0)^2 \quad (1)$$

Ce dernier est constitué d'un marteau, venant percuter une extrémité de la pièce parallèlement à son axe, et provoquant la propagation d'une onde de traction/compression. Les déplacements en bout de pièce sont mesurés grâce à un interféromètre laser, puis une transformation de Fourier est appliquée au signal de sortie de l'interféromètre afin d'en déterminer la fréquence fondamentale  $f_0$ . L'équation (1) définit la relation liant cette fréquence au module d'élasticité dynamique  $E_{\text{dyn}}$  de la pièce, à sa densité  $\rho$ , et à sa longueur  $L$  [5].

#### 2.2.2 Mesure locale de densité

Une mesure locale de densité a été réalisée pour chaque pièce grâce à un scanner CombiScan+ produit par la société LuxScan Technologies. Plus précisément, ces scanners sont équipés d'une source et d'une caméra à rayons X qui permettent, à partir de l'image en niveaux de gris ainsi obtenue (figure 1) et transformée par l'équation de Beer-Lambert, d'obtenir une cartographie des densités moyennes sur l'épaisseur des sciages.



FIG. 1 – Cartographie des densités obtenues par transmission des rayons X

Outre une mesure très précise et rapide de la densité moyenne des planches, les cartographies des densités permettent également le calcul, pixel par pixel, de la fraction de l'épaisseur occupée par un nœud [6], appelée Knot Depth Ratio (KDR) : une première étape de traitement d'image permet de séparer les zones contenant des nœuds des zones de bois sain. On peut alors calculer la densité moyenne du bois sain  $\rho_{\text{BS}}$ , et définir la densité des nœuds  $\rho_{\text{N}}$  comme environ le double de celle du bois sain, ce qui en est une bonne approximation. Le KDR, compris entre 0 et 1, peut alors être calculé à partir de l'équation (2). Cette valeur sera utilisée par la suite dans la prise en compte des nœuds dans l'estimation du MOE et du MOR.

$$KDR(x, y) = \frac{\rho(x, y) - \rho_{BS}}{\rho_N - \rho_{BS}} \quad (2)$$

### 2.2.3 Mesure de la déviation des fibres

Le scanner CombiScan+ utilisé au cours de cette étude dispose d'un système de mesure de pente de fil locale utilisant l'effet trachéides [7]. Celui-ci consiste à projeter, sur les faces supérieures et inférieures des sciages, une ligne de lasers points. Une partie de la lumière incidente est diffusée de manière anisotrope dans le matériau, ce qui fait apparaître à la surface du bois une tache lumineuse elliptique, orientée parallèlement aux fibres (figure 2).

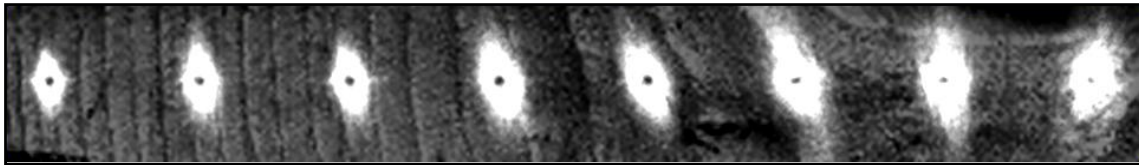


FIG. 2 – Mesure de la direction des fibres par effet trachéides

L'angle  $\theta$  entre la direction des fibres et l'axe du sciage possède deux composantes que nous appellerons  $\varphi$  et  $\psi$ . L'angle  $\varphi$  entre l'axe du sciage et la projection de la direction des fibres sur la face observée correspond également à l'orientation de l'ellipse de diffusion du laser au point correspondant. Du point de vue du traitement numérique, cet angle est mesuré grâce à une Analyse en Composantes Principales (ACP) appliquée à une image seuillée de cette ellipse.

$$a^2 = \frac{b^2}{1 - e_0^2 \cos^2(\psi)} \quad (3)$$

L'angle  $\psi$  entre la direction des fibres et le plan défini par la face observée, est quand à lui lié au facteur de forme de l'ellipse [7]. Les dimensions de chaque ellipse ont été obtenues au cours de l'ACP réalisée précédemment, et l'excentricité  $e_0$  d'une ellipse correspondant à un angle  $\psi = 0$  peut être déduite d'une observation globale de la planche. La valeur de  $\psi$  est alors obtenue à partir de l'équation (3), correspondant à l'équation d'une ellipse en coordonnées polaires, où  $a$  et  $b$  sont les longueurs respectives du grand axe et du petit axe de l'ellipse.

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi) \quad (4)$$

Les angles de projection  $\varphi$  et de plongée  $\psi$  sont enfin combinés suivant l'équation (4) afin de calculer l'angle  $\theta$ , qui permettra par la suite de prendre en compte la pente de fil dans la modélisation mécanique.

## 2.3 Estimation des propriétés mécaniques

### 2.3.1 Prise en compte des nœuds

A partir des densités locales mesurées grâce aux rayons X, nous avons pu déterminer pour chaque pixel la valeur de KDR correspondante. Dans sa définition originale, le KAR représente la fraction de chaque section transversale correspondant à des nœuds [2], ce qui revient dans notre cas à effectuer les moyennes des valeurs de KDR sur la largeur  $L$  de la pièce.

Nous utiliserons par la suite le profil de Clear Wood Area Ratio (CWAR), qui est défini globalement par l'équation (5) :

$$CWAR(x) = \frac{1}{L} \int 1 - KDR(x, y) dy \quad (5)$$

### 2.3.2 Prise en compte de la pente de fil

Afin de pouvoir prendre en compte la pente de fil dans l'estimation du MOE et du MOR, l'équation (5) a été modifiée en introduisant une fonction  $A$  des angles  $\theta_1(x, y)$  et  $\theta_2(x, y)$  mesurés sur les faces supérieures et inférieures des sciages :

$$CWAR(x) = \frac{1}{L} \int [1 - KDR(x, y)] \cdot A(\theta_1, \theta_2) dy \quad (6)$$

Afin de définir la fonction A, on suppose que la pente de fil varie linéairement dans l'épaisseur des pièces. Pour chaque valeur de z comprise entre 0 et l'épaisseur des sciages, on est donc en mesure d'estimer la valeur de la pente de fil correspondante  $\theta(x,y,z)$ . Le pas de calcul choisi dans cette étude est de 1mm.

A chaque valeur de pente de fil correspond une réduction des propriétés mécaniques. Cette relation est définie par la formule de Hankinson (7), où X représente le module élastique local ou la contrainte de rupture locale [4]. La valeur du paramètre A(x,y) est alors définie comme la moyenne des valeurs de X sur l'épaisseur du sciage.

$$\frac{X(\theta)}{X(0)} = \frac{0,05}{\sin^{1,5}(\theta) + 0,05 \cdot \cos^{1,5}(\theta)} \quad (7)$$

### 2.3.3 Estimation du MOE et du MOR

La première étape de l'estimation des propriétés mécaniques d'un sciage est la définition des propriétés mécaniques du bois sain sollicité selon l'axe de ses fibres. Son module élastique est ainsi considéré comme fonction affine de la densité du bois sain [8], tandis que sa contrainte de rupture est définie comme proportionnelle au MOE du sciage, mesuré par analyse acoustique ou estimé précédemment.

Enfin, le MOE global du sciage est défini comme le produit du module élastique du bois sain par la moyenne du CWAR sur la partie de la pièce située entre les mors de la machine de traction. Son MOR, quand à lui, est le produit de la contrainte de rupture par la valeur minimale du CWAR sur cette même partie.

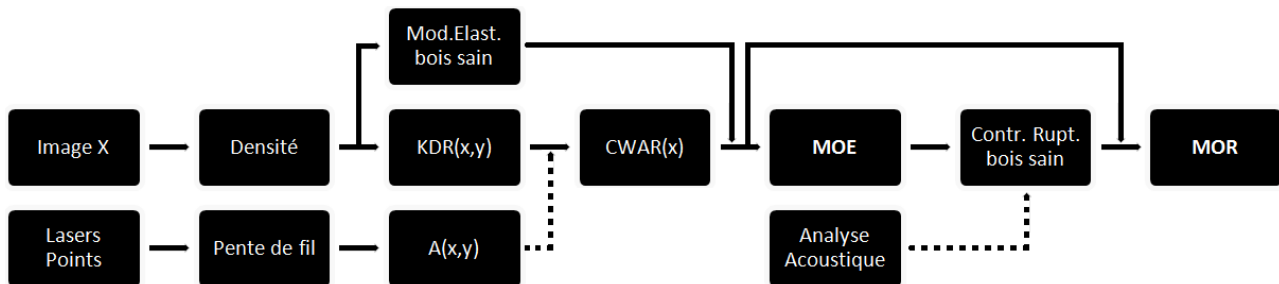


FIG. 3 – Processus d'estimation du MOE et du MOR

## 3 Résultats

La figure 4 représente les résultats obtenus par trois combinaisons de machines de classement mécaniques actuellement utilisées dans l'industrie. La première correspond à une analyse acoustique combinée à une pesée des sciages (E-Scan) permettant de mesurer la densité et le MOE, et d'estimer le MOR. La deuxième correspond à un scanner optique seul (CombiScan+) estimant à la fois le MOE et le MOR. Enfin, la troisième correspond à la combinaison des deux premières (E+C) : le MOE est mesuré par le E-Scan tandis que le MOR est estimé à partir des données issues du E-Scan et du Combiscan+.

Dans le cas des combinaisons Combiscan+ et E+C, une comparaison est faite entre les résultats obtenus sans l'information de pente de fil (Sans PdF), les résultats prenant uniquement en compte l'angle de projection ( $\varphi$ ), et ceux obtenus en considérant également l'angle de plongée  $\psi$  ( $\varphi+\psi$ ). Tous les résultats sont exprimés comme coefficient de détermination  $R^2$  entre les valeurs prédites par le modèle et celles mesurées par essais destructifs.

		MOE	MOR
<b>E-Scan</b>	-	90.7%	58.1%
<b>Combiscan+</b>	Sans PdF	67.7%	60.6%
	$\varphi$	72.3%	65.2%
	$\varphi + \psi$	72.4%	69.4%
<b>E + C</b>	Sans PdF	90.7%	69.3%
	$\varphi$	90.7%	70.7%
	$\varphi + \psi$	90.7%	72.7%

FIG. 4 – coefficients  $R^2$  entre les paramètres estimés et mesurés par essais destructifs

## 4 Discussion

Les essais réalisés au cours de cette étude ne concernent que des pièces issues d'espèce commune. Cependant, cette essence est aujourd'hui massivement utilisée dans la construction, ce qui préserve l'intérêt des résultats présentés ci-dessus. De même, malgré la forte variabilité de ce matériau, on considère généralement qu'un nombre de 350 éprouvettes d'une même essence, pour une origine géographique donnée, permet d'obtenir des résultats représentatifs de la population d'arbres qu'elles ont pour origine. Néanmoins, il serait illusoire de penser que les valeurs des coefficients de détermination présentés par la figure 4 puissent être reproduites pour des sciages issus d'autres populations d'arbres. Seule une tendance peut être dégagée de ce tableau.

Les résultats de la figure 4 montrent une amélioration significative des performances du scanner optique après prise en compte de la pente de fil, aussi bien dans l'estimation du MOE que du MOR. En revanche, quand celui-ci se trouve combiné à l'analyse acoustique, cette amélioration est légèrement moins marquée. Il convient, pour expliquer ceci, de rappeler que le MOE estimé par le scanner optique seul est également utilisé dans l'estimation du MOR : une amélioration des performances dans l'estimation du MOE profitera également à l'estimation du MOR.

On constate également que le modèle prenant en compte l'angle de plongée  $\psi$  est bien plus performant dans l'estimation du MOR que celui qui ne considère que l'angle projeté  $\phi$ . L'intégration de  $\psi$  dans le modèle présente donc un intérêt malgré la forte incertitude liée à la mesure de cet angle [7]. Par ailleurs, cette incertitude est probablement la raison pour laquelle l'angle  $\psi$  ne permet pas d'améliorer significativement l'estimation du MOE.

Malgré tout, on peut remarquer qu'il existe environ 30% de la variabilité des propriétés mécaniques (MOE sans analyse acoustique, et MOR) qui ne peuvent être expliqués par le modèle mis en place. Cette incertitude résiduelle peut s'expliquer notamment par les mesures de KDR et de pente de fil, car celles-ci se basent sur des hypothèses fortes. Une autre explication serait que le modèle d'estimation de ces propriétés mécaniques n'exploite pas les mesures de manière adéquate. Enfin, ce modèle ne tient pas compte de singularités telles que le bois de compression et le bois juvénile, qu'aucun équipement industriel actuel ne peut caractériser.

## 5 Conclusions

Les propriétés mécaniques des bois de structures dépendent fortement de leur nodosité. On sait par ailleurs que la pente de fil est principalement liée à la présence d'un ou plusieurs nœuds à proximité, ce qui pourrait limiter son influence sur les propriétés mécaniques des sciages.

Les résultats de cette étude montrent que, bien au contraire, la prise en compte de l'information de pente de fil, au travers du modèle exposé précédemment, permet d'améliorer de manière significative les performances des machines de classement mécanique, constituées soit de scanners optiques seuls, soit combinées à un système d'analyse acoustique. En raison de la forte variabilité du matériau bois, il convient de confirmer cette tendance par des études similaires portant sur d'autres populations d'espèce commune, d'autres essences, et même d'autres modes de sollicitation, notamment la flexion.

## Références

- [1] AFNOR, NF EN 338, Bois de structure - Classes de résistance, 1995
- [2] Tredwell T, (1973). Visual Stress Grading of Timber, Explanation and practical interpretation of the visual grading elements of BS 4978:1973. Timber grades for structural uses - Timber Research and Development Association, 1973
- [3] Roblot G, Bléron L, Mériaudeau F, Marchal R, Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber, EJECE 14, 1317-1332, 2010
- [4] US Dept. of Agriculture, Wood Handbook : Wood as an Engineering Material, chap. 4, p. 29, 1999
- [5] Brancheriau L, Expertise mécanique des sciages par analyse des vibrations dans le domaine acoustique, Thèse de Doctorat, Univ. Aix Marseille II, 2002
- [6] Oh J-K, Shim K, Kim K-M, & Lee J-J, Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-ray radiation, Journal of Wood Science 55, 264-272, 2009
- [7] Simonaho S-P, Palviainen J, Tolonen Y, & Silvennoinen R, Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern, Optics and Lasers in Engineering 41, 95-103, 2004
- [8] Guitard D, Mécanique du Matériau Bois et Composites, Cepadues, 1987