

# Point sur la caractérisation mécanique des performances structurelles du chêne

Guillaume Pot  
ENSAM  
Cluny, France



## 1. Contexte

En France comme en Europe, la grande majorité des bois destinés à un usage structurel sont issus d'essences résineuses. La surface forestière métropolitaine étant peuplée à 71% de feuillus (IGN 2017) l'utilisation de feuillus pour des applications structurelles apparaît évidente. Le chêne représente à lui seul 22% du volume total de la ressource métropolitaine (IGN 2017). Les chênes des plus hautes qualités n'ayant aucun de problème de valorisation, l'enjeu est de mobiliser pour des usages structurels la ressource en chêne de qualités actuellement mal valorisées, que l'on appellera « chêne de qualité secondaire ». Il existe un certain nombre de défis techniques, réglementaires et économiques à relever pour parvenir à cet objectif. Cette communication a pour but de faire le point sur nos capacités actuelles à caractériser les performances mécaniques des sciages de chêne, condition *sine qua none* pour pouvoir envisager l'utilisation de chêne de qualité secondaire en structure. Il résume en particulier les travaux du LaBoMaP de l'ENSAM de Cluny lors du programme de recherche « CDuBoBi » (pour construction durable bois et bioressources), financé par la région Bourgogne-Franche-Comté de 2014 à 2017.

## 2. Classement selon la résistance du chêne par méthode visuelle

L'origine naturelle du bois est source d'une grande variabilité des propriétés du matériau bois. Afin de garantir aux différents acteurs du marché que le bois peut répondre aux mêmes exigences que tout autre matériau de construction, le marquage CE des sciages à usage structurel est obligatoire en Europe. Ce marquage impose d'avoir recours au classement selon la résistance par méthode visuelle (NF B-52-001-1, AFNOR 2016) ou par machine (PR NF EN 14081-2 2017).

Les études concernant le classement du chêne pour un usage structurel sont encore rares. Lanvin *et al.* (2007) ont montré que le classement par méthode visuelle sous-estime fortement les caractéristiques mécaniques du chêne (tableau 1). Cette étude était réalisée sur pas moins de 2 000 sciages.

Ans le cadre du programme de recherche CDuBoBi, 316 sciages de chênes ont été sélectionnés pour correspondre aux qualités secondaires disponibles dans les scieries de chêne et potentiellement valorisables en matériaux pour la construction. La sélection des sciages a été réalisée par classement d'aspect (norme NF EN 975-1 (AFNOR 2009) relative au feuillus et notamment au chêne). Les planches du lot correspondaient majoritairement à un classement d'aspect QF3 (avant-dernière classe d'aspect pour des frises de chêne). Les dimensions nominales des sciages étaient de 2 000 x 100 x 22 mm<sup>3</sup>, ce qui correspond aux dimensions cibles à valoriser (petites sections).

Les résultats (tableau 1) montrent que le lot du programme CDuBoBi présentait des performances mécaniques similaires au lot de Lanvin *et al.* (2007), alors que ce lot de chêne de qualité secondaire était encore moins bien classé par méthode visuel. A titre d'exemple, 31 % du lot était classé D18, contre 90 % dans la réalité. Ces résultats montrent que, si le classement pouvait être fait à partir des essais destructifs, le chêne, même de qualité secondaire, présenterait des propriétés suffisantes pour qu'il puisse être utilisé en structure. Le classement visuel constitue cependant un frein à la valorisation du chêne de par ses médiocres performances.

Tableau 1 : Confrontation du classement visuel et du classement destructif dans le cas du chêne selon Lanvin *et al.* (2007) et dans le programme CDuBoBi.

	Nb de sciages	>D18 visuel	>D18 réel	>D24 visuel	>D24 réel	>D30 visuel	>D30 réel
Lanvin <i>et al.</i> (2007)	2 000	82 %	90 %	56 %	90 %	0 %	83 %
CDuBoBi (2017)	316	31 %	90 %	13 %	84 %	1 %	78 %

### 3. Classement selon la résistance du chêne par machine

Les mauvais résultats du classement visuel sur le chêne de qualité secondaire sont probablement dus à la mauvaise corrélation entre les paramètres utilisés dans la norme NF B-52-001-1 (AFNOR 2016) (principalement la taille des nœuds), et les propriétés mécaniques. Cette mauvaise corrélation implique que, pour des raisons sécuritaires, le classement visuel sous-classe largement le chêne. Ceci suggère que les défauts sont mal appréciés visuellement. Il semble alors nécessaire, pour valoriser au mieux la ressource, d'avoir recours à des machines pour réaliser un classement plus précis, mais aussi adapté à des cadences industrielles. Les conclusions de deux études récentes sur le classement par machine du chêne sont présentées dans les parties suivantes.

#### 3.1. Matériels et méthodes de deux études récentes sur le chêne

Lors du programme de recherche ClaMeB (Classement Mécanique du Bois – programme ANR de 2012 à 2016), des lots d'épicéa (437 sciages), de douglas (805 sciages) et de chêne (400 sciages) ont été testés de manière non-destructive par des machines industrielles. Il s'agissait de machines basées sur la mesure du module élastique par méthode vibratoire longitudinale (figure 1a), par méthode ultrasonore, et d'un scanner optique mesurant aussi localement la densité par rayons X, et, sur les résineux seulement, l'orientation des fibres par lasers points.

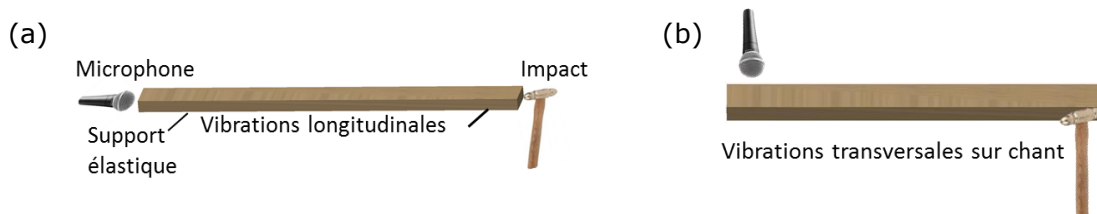


Figure 2 : Représentation d'un essai vibratoire longitudinal (a) et transversal (b).

Lors du programme de recherche CDuBoBi, les mêmes 316 sciages faisant l'objet du classement visuel décrit au §2 ont été testés de manière non-destructive par des machines de laboratoire. Il s'agissait d'une machine vibratoire longitudinale, d'une machine vibratoire transversale sur chant (figure 1b), et d'un scanner de l'orientation des fibres spécialement développé dans le cadre du projet par une collaboration entre le LaBoMaP et le LE2I (laboratoire spécialisé en vision industrielle) (figure 2a).

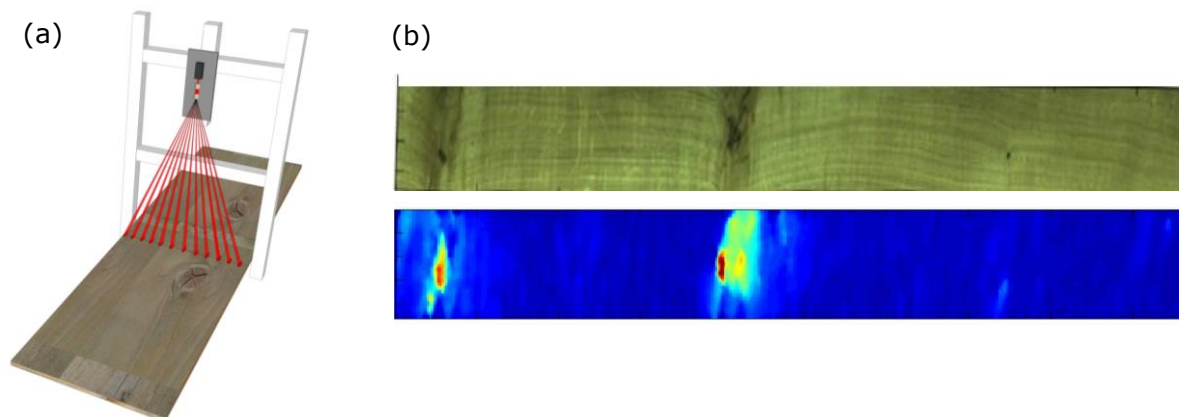


Figure 2 : (a) Représentation schématique du fonctionnement d'un scanner mesurant l'orientation des fibres ; (b) cartographie d'orientation des fibres obtenue sur une planche de chêne.

#### 3.2. Classement par machine basée sur une mesure vibratoire longitudinale

Les machines basées sur une mesure vibratoire longitudinale (figure 1a) sont très employées dans le domaine du classement des essences résineuses. Elles présentent des avantages en termes de cadence (convoyage transversal) et de coût.

Ce type de machine a été utilisé dans le programme ClaMeB. 92 % des sciages de chêne testés devaient, selon les tests destructifs, être classés D24 alors que pour une machine basée sur la mesure vibratoire longitudinale du module élastique, le taux de D24 n'était que de 22 %. Autrement dit, si l'on calcule le taux de sciages « correctement classés » par la machine, celui-ci n'était que de 24 % ( $22/92 \times 100$ ). A titre de comparaison, toujours dans la campagne ClaMeB, 58 % des sciages d'épicéa étaient C24 dans la réalité (donc un lot de moins bonne qualité mécanique que le chêne), et la machine détectait 53 % des sciages en C24, soit un taux de sciages bien classés de 91 %. Il convient donc de bien différencier l'efficacité de classement d'une machine qui peut être évaluée avec ce taux de sciages correctement classés, du taux direct de sciages dans une classe qui dépend de la qualité du lot, de l'essence, etc...

La campagne CDuBoBi a confirmé les faibles résultats de l'étude ClaMeB, et sont présentés figure 3, en termes de taux de sciages bien classés, pour les trois classes D18, D24 et D30. Ces taux se révèlent en effet comparables à ceux du classement visuel.

L'explication avancée pour expliquer ces résultats est que ce type de machine ne peut être efficace que pour les bois présentant une certaine homogénéité. En effet, le calcul du module élastique des sciages est réalisé en faisant l'hypothèse que le matériau étudié est homogène, et il ne peut en être autrement car ces machines « aveugles » ne disposent pas d'information sur la présence de nœuds ou fentes. Le chêne, et en particulier celui des qualités visées, présente de plus grandes hétérogénéités que l'épicéa pour lequel ces machines ont été principalement développées. De ce fait, les résultats de classement ne peuvent qu'être décevants pour le chêne.

### **3.3. Classement par machine basée sur des mesures de densitométrie (RX)**

Si la détection des hétérogénéités, c'est-à-dire principalement des nœuds, apparaît comme une nécessité, on se tournera naturellement vers une technologie de type scanner, qui fournit des images en 2 dimensions des sciages, et en particulier vers des systèmes à rayons X qui permettent d'obtenir une cartographie de la densité dans toute l'épaisseur du sciage, avec des résolutions spatiales de l'ordre du millimètre.

Lors du programme ClaMeB, ce type de machine a montré son efficacité pour les résineux, en particulier pour le douglas, possédant de plus gros nœuds que l'épicéa. Elle est d'ailleurs proposée par les principaux fabricants de machines de classement. Pour le chêne, la densitométrie par rayons X fait face à un problème majeur : contrairement aux résineux, de contraste de densité entre les nœuds et le bois sans défaut est faible, ce qui ne permet donc pas de bien identifier les zones de faibles performances mécaniques.

En appliquant les méthodes employées pour les résineux sur le chêne, l'exploitation de cartographies de densité locale ne donne pas de résultats exploitables. Il faut cependant remarquer que l'information obtenue demeure riche, et qu'une utilisation différente de ces données reste possible, bien que demandant un effort de recherche conséquent sans assurance de résultat.

### **3.4. Classement par machine basée sur la mesure de l'orientation des fibres**

La détermination des propriétés mécaniques à partir de l'analyse des cartographies de l'orientation des fibres (ODF) est une technique récemment développée pour les résineux (Jehl *et al.* 2011, Olsson *et al.* 2013). Elle consiste en la projection d'un faisceau laser sur la surface de bois, et l'observation de la diffusion de la lumière qui se traduit visuellement sous la forme d'une ellipse orientée suivant la direction des fibres. En utilisant un ensemble de lignes de points et de caméras (figure 2a), et en réalisant un traitement d'image adapté pour détecter l'orientation des ellipses, il est possible de scanner les 4 faces d'un sciage et d'obtenir des cartographies de l'orientation des fibres en surface.

Lors du programme ClaMeB, les cartographies d'ODF ont démontrés leur efficacité pour le classement des résineux, grâce à l'utilisation de modèles mécanique prenant en compte l'orientation et la position des fibres (Viguié *et al.* 2015). Les résultats semblent même

meilleurs que les machines basées sur la mesure locale de la densité (Faydi *et al.* 2015). Ceci peut s'expliquer par le fait que le matériau bois étant hautement anisotrope avec une direction transversale aux fibres bien plus faible mécaniquement que la direction longitudinale, c'est vraiment l'orientation des fibres qui conditionne les propriétés mécaniques d'un sciage.

Le scanner d'ODF utilisé pour le programme ClaMeB se révélant inefficace sur le chêne, les efforts du programme CDuBoBi se sont portés sur la conception d'un scanner fonctionnel pour cet essence, grâce à un Post-Doc financé par la région Bourgogne-Franche-Comté (Daval *et al.* 2015). Un exemple de cartographie d'ODF obtenu sur du chêne est présenté figure 2b, témoignant de la capacité de la machine à détecter la déviation des fibres autour des nœuds.

En exploitant ces données via un modèle mécanique (Faydi 2017a), les résultats de classement se sont avérés beaucoup plus performants que la méthode vibratoire longitudinale, avec des taux de sciages correctement classés compris entre 81 % et 86 % selon que la classe étudiée est D30 ou D18 (voir figure 3).

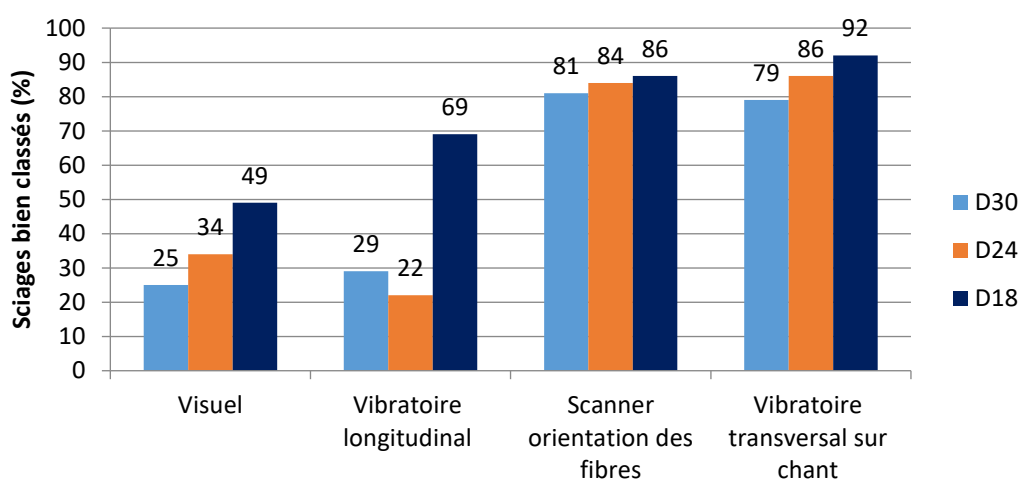


Figure 3 : Résultats de quatre méthodes utilisées lors du programme de recherche CDuBoBi pour classer du chêne de qualité secondaire, en termes de taux de sciages correctement classés.

### 3.5. Classement par machine basée sur une mesure vibratoire transversale sur chant

Si le scanner mesurant l'ODF et son exploitation permettent d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de classement du chêne de qualité secondaire, le LaBoMaP a tout de même voulu exploiter au maximum le comportement vibratoire du bois dans le programme CDuBoBi. Plutôt que d'utiliser le comportement vibratoire sous un impact longitudinal (figure 1a), c'est le comportement vibratoire sous impact transversal, en flexion sur chant (figure 1b), qui a été étudié. Ceci a été réalisé avec une machine de laboratoire, le BING, pour « Beam Identification by Non-Destructive testing », développée par le CIRAD (Brancheriau *et al.* 2007), et à l'utilisation plutôt manuelle.

Les résultats, toujours présentés figure 3, sont très concluants puisque le taux de sciages bien classés en D30 est le plus important de toutes les machines (93 %), et les résultats en D24 et D18 sont de niveau comparable aux résultats du scanner d'ODF (respectivement 86 % et 79 %).

Ce comportement s'explique par le fait que le signal obtenu en vibrations transversales de flexion est bien plus riche que celui relatif aux vibrations longitudinales de traction-compression. Plusieurs harmoniques de vibration peuvent être prises en compte, et chacune peut être impactée parfois très significativement par un défaut, ce qui permet sa « détection » (Faydi *et al.* 2017b).

## 4. Conclusions

Le classement selon la résistance par méthode visuelle fait clairement preuve de son inefficacité pour le chêne de qualité secondaire. Pourtant, ce matériau a témoigné, lors des essais destructifs des lots étudiés, d'une proportion élevée de sciages classés (seulement 10 % de rejet), qui peut être bien plus importante que ses homologues résineux. Il existe donc un réel intérêt à utiliser cette ressource sous-valorisée pour des raisons esthétiques en usage de structure.

Le classement par machine semble seul capable de répondre à la problématique du classement du chêne de qualité secondaire. Cependant, le programme de recherche ANR ClaMeB a montré qu'une utilisation directe des machines existantes, développées pour les résineux, n'est pas possible, et que certaines technologies mènent à des impasses (vibratoire longitudinal, densitométrie).

Le programme CDuBoBi a permis de développer des prototypes de machines de classement adaptées au chêne de qualité secondaire et surtout des méthodes d'exploitation des données de ces machines. Les résultats en termes d'efficacité de classement sont similaires entre les deux technologies employées, avec des taux de sciages correctement classés de l'ordre de 80 % à 90 % dans les trois classes D18, D24 ou D30, là où le classement visuel varie de 25 % à 50 % (il est toujours plus facile de bien classer des sciages de bonne qualité, les taux des sciages correctement classés sont donc plus élevés sur les classes les plus hautes).

Les deux machines utilisées par le programme CDuBoBi restent cependant des machines de laboratoire. La machine basée sur la mesure vibratoire transversale fait intervenir un essai vibratoire réalisé manuellement, où l'opérateur traite les résultats et peut donc réagir au cas par cas. Si le fonctionnement de la méthode est prouvé, les résultats sont peut-être surestimés par rapport à une version industrielle. Le scanner mesurant l'orientation des fibres, lui, a au contraire une certaine marge de progression : des développements sont encore en cours sur le modèle mécanique permettant l'exploitation des données, et, de plus, le scanner utilisé ne permet encore que de scanner les deux faces les plus larges, l'information des chants pourrait améliorer significativement les résultats.

Quoi qu'il en soit, sur les 5 dernières années, les recherches sur le classement par machine du chêne sont passées du stade de machines très peu efficaces à des machines classant correctement plus de 80 % des sciages, ce qui ouvre donc la voie à la valorisation en structure des qualités de chênes dites « secondaires ».

## 5. Références

AFNOR. Norme NF B 52-001-1 (2016) Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif.

AFNOR. Projet de norme NF EN 14081-2 (2017) Structures en bois - Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance - Partie 2 : Classement mécanique par machine; exigences supplémentaires concernant les essais de type initiaux.

AFNOR. Norme NF EN 975-1 (2009). Bois sciés - Classement d'aspect des bois feuillus - Partie 1 : chêne et hêtre.

Brancheriau, L., Paradis, S., Baillères, H. (2007). Bing: Beam identification by non-destructive grading (Cirad). <http://ur-biwooeb.cirad.fr/en/products/bing/what-is-it>.

Daval V, Pot G, Belkacemi M, Meriaudeau F, and Collet R (2015) Automatic measurement of wood fiber orientation and knot detection using an optical system based on heating conduction. *Optics Express*, 23(26), 33529–33539.

Faydi Y, Viguier J, Pot G, Daval V, Collet R, Bléron L, and Brancheriau L (2015) Modélisation des propriétés mécaniques du bois à partir de la mesure de la pente de fil. Congrès Français de Mécanique, Lyon.

Faydi Y. (2017a). Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. Thèse Arts et Metiers ParisTech, Cluny.

Faydi Y., Brancheriau L., Pot G., and Collet R. (2017b). Prediction of oak wood mechanical properties based on the statistical exploitation of vibrational response. *BioResources*, 12(3), 5913–5927.

IGN (2017) Memento de l'inventaire forestier. <http://www.ign.fr/institut/actus/lign-publie-memento-linventaire-forestier-2017> (consulté le 08/03/2017).

Jehl A, Bleron L, Meriaudeau F, and Collet R (2011) Contribution of slope of grain information in lumber strength grading. Presented at the 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, Hungary.

Lanvin JD, Reuling D, Costrel Y, and Ducerf J (2007) Evaluation of the french oak for structural use International Scientific Conference on Hardwood Processing (Quebec).

Olsson A., Oscarsson J., Serrano E., Källsner B., Johansson M., Enquist B. (2013). Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation. *European Journal of Wood and Wood Products* 71:319–333.

Viguier J, Jehl A, Collet R, Bleron L, and Meriaudeau F (2015) Improving strength grading of lumber by grain angle measurement and mechanical modeling. *Wood Material Science and Engineering*, 10(1), 145–156.

## 6. Remerciements

Les travaux du projet de recherche CDuBoBi ont été soutenus financièrement par le conseil régional de Bourgogne Franche-Comté et l'institut Carnot-ARTS et ceux du projet de recherche ClaMeB par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet CLAMEB ANR-11-RMNP-0015).