

VERS UNE MEILLEURE VALORISATION DES CHÊNES DE QUALITÉ SECONDAIRE

JEAN CROISEL – ROBERT COLLET

LA FORÊT ET LA VALORISATION DES CHÊNES EN BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ

La région Bourgogne-Franche-Comté totalise près d'1,7 million d'hectares, dont 700 000 hectares de peuplements à base de Chênes sessiles ou pédonculés. Cela représente un volume sur pied de 114 millions de mètres cubes, soit 19 % de la ressource nationale.

Du point de vue qualitatif, il est possible de ventiler ce volume sur pied selon les catégories Q1 (tranchage, déroulage, ébénisterie, menuiserie fine), Q2 (menuiserie courante, charpente, caisserie, coffrage, traverses, etc.) et Q3 (bois industrie ou bois énergie) de l'Inventaire forestier national (cf. tableau I, ci-dessous). Il est aussi possible de trier les arbres selon 3 catégories : les chênes de qualité (avec une part du volume en Q1), les chênes sans qualité (avec tout le volume en Q3) et les chênes de qualité secondaire (volume en Q2 ou Q2/Q3). Un travail exploratoire mené en 2013 à partir des données brutes de l'Inventaire pour les années 2005 à 2011 avait permis d'estimer le volume total des chênes de qualité secondaire à 75 millions de mètres cubes en Bourgogne-Franche-Comté.

TABLEAU I **Évolution du classement de la qualité des bois
par l'Inventaire forestier national**

Ancienne méthode	Nouvelle méthode (à partir de 2014)
Q1 : Tranchage, déroulage, ébénisterie ou menuiserie fine	S+ : Qualité de bois d'œuvre exceptionnelle : tranchage, déroulage, ébénisterie, menuiserie fine ou merrains. S1 : Bois de sciage de première qualité, qualité de bois d'œuvre bonne et courante : charpente ou menuiserie notamment.
Q2 : Menuiserie courante, charpente, coffrage ou traverses	S2 : Bois de sciage de deuxième qualité, qualité bois d'œuvre médiocre mais toujours sciable : caisserie, coffrage ou traverses.
Q3 : Utilisation en industrie ou chauffage	BI : Bois d'industrie et bois énergie
Rebut	Rebut

Les chênes de qualité ne présentent pas de difficultés de valorisation. Au contraire, leur relative rareté fait qu'ils sont très recherchés par les transformateurs. Les chênes sans qualité, du fait des développements récents dans le domaine de la filière bois énergie ou plus anciens dans le domaine de la trituration trouvent eux aussi des débouchés que l'on peut considérer comme satisfaisants au regard des qualités intrinsèques de ces bois. Les chênes de qualité secondaire connaissent par contre un relatif déclin de leurs débouchés traditionnels qui explique en grande partie la baisse de récolte observée ces quinze dernières années.

Pourtant, nonobstant leurs défauts esthétiques, les pièces de bois issues de ces volumes de qualité secondaire présentent un fort potentiel technologique qui leur permettrait d'être intégrées dans des produits d'ingénierie développés ces dernières années dans le domaine de la construction. Des tests destructifs menés sur 215 planches de chêne (section 20 mm x 80 mm) ont ainsi révélé que 77 % d'entre elles pourraient être classées en D30, classe qui présente des caractéristiques mécaniques proches de bois résineux C24 (rigidité équivalente, meilleure résistance à la rupture) largement utilisée pour les produits structurels (APECF et Arts Cluny, 2011).

Dans le contexte d'une utilisation croissante du bois dans la construction pour répondre aux enjeux de durabilité et vu la plus faible proportion de résineux dans les forêts françaises, l'importante ressource en chênes de qualité secondaire pourrait trouver de nouveaux débouchés rémunérateurs dans ce domaine. Cela permettrait non seulement d'améliorer les bilans macro-économiques de la filière bois mais aussi de financer des opérations sylvicoles d'amélioration et de renouvellement des chênaies, trop souvent reportées par manque de recettes.

Pour concrétiser ce potentiel, un premier verrou à lever est celui du classement par machine pour des emplois en structure des pièces de bois de qualité secondaire. En effet, en raison des singularités parfois nombreuses de ces bois, le classement visuel présente un trop faible rendement et n'est pas adapté à des cadences industrielles.

LE CLASSEMENT MACHINE DES FEUILLUS

Le classement mécanique

Les règles de calcul des structures bois (Eurocode 5) imposent aujourd'hui d'utiliser des sciages classés mécaniquement (marquage CE). En effet, il faut connaître le module d'élasticité des pièces utilisées pour les dimensionner aux états limites de service (ELS) d'une part, et d'autre part on a besoin des valeurs des contraintes maximales applicables selon les différents types de sollicitations (compression, traction, flexion, cisaillement...), pour le dimensionnement des pièces aux états limites ultimes (ELU). Les différentes propriétés mécaniques du bois étant très corrélées entre elles, seules trois caractéristiques ont été retenues dans la norme EN 338 comme critères de classement mécanique à partir desquelles toutes les autres peuvent être estimées : il s'agit de la *masse volumique*, du *module d'élasticité longitudinal* et de la *contrainte de rupture en flexion*. Pour prendre en compte les variations de propriétés, la classification s'effectue à partir de valeurs caractéristiques (fractile à 5 %) ou de valeurs moyennes.

Les différentes classes mécaniques sont au nombre de :

- 12 pour les résineux (préfixe C) : C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 et C50,
- 8 pour les feuillus (préfixe D) : D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60 et D70.

Le nombre se trouvant après le préfixe représente la résistance caractéristique en flexion. Un lot de sciages peut être affecté à une certaine classe mécanique si les valeurs caractéristiques de

résistance, de masse volumique et la valeur moyenne du module d'élasticité longitudinal sont simultanément supérieures ou égales aux valeurs requises par la classe et données par la norme EN 338.

Le classement mécanique par machine

Le classement mécanique des sciages par machine fait l'objet depuis une trentaine d'années de nombreuses recherches initiées par les pays où la transformation du bois est la plus industrialisée (Europe du Nord et Amérique du Nord). Les travaux se sont concentrés essentiellement sur les essences résineuses les plus employées en structure (Sapin, Épicéa et Pin) et ont été portés en France par l'institut technologique FCBA. Ils ont déjà permis de développer des technologies de classement par machine mais les rendements obtenus ne permettent pas encore de valoriser tout le potentiel de résistance mécanique des bois. L'équipe « Matériaux et Usinage Bois » du laboratoire bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP) de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM de Cluny) développe des travaux de recherche sur ce thème pour acquérir des connaissances scientifiques sur la prédiction du comportement mécanique des sciages par contrôle non destructif afin d'accompagner le développement de machines de classement adaptées à la ressource forestière nationale ainsi qu'à la taille de nos entreprises de transformation du bois.

Le classement par machine est basé sur l'estimation, directe ou indirecte et de manière non destructive, des trois propriétés précédentes. La résistance (MOR) d'un sciage ne pouvant être mesurée que par un essai destructif, les machines de classement estiment sa valeur de manière indirecte par la mesure non destructive d'autres propriétés comme le module d'élasticité (MOE), la densité, la nodosité ou la pente de fil. Le principe de base du classement par machine est l'existence d'une relation entre des propriétés mesurables de manière non destructive et la résistance. La formulation analytique de cette relation étant trop complexe, on utilise généralement pour l'établir un modèle statistique de régression linéaire simple dont les paramètres sont définis à partir de résultats expérimentaux. Lorsqu'on essaie de coupler les mesures de différentes propriétés pour améliorer la prédiction de la résistance, on utilise alors un modèle de régression linéaire multiple. Ainsi, les coefficients de détermination R^2 permettent d'apprécier la robustesse de la relation et de comparer la qualité de prédiction de différentes méthodes d'estimation.

Le bois est un matériau anisotrope et hétérogène. De nombreuses caractéristiques et singularités liées notamment à sa croissance affectent son comportement mécanique. Développer des technologies capables de toutes les détecter de manière non destructive et à des cadences industrielles n'est pas envisageable pour le moment. Aujourd'hui, la majorité des machines de classement mécanique du bois analyse de façon globale les sciages en mesurant leur densité, leur module élastique par analyse vibratoire ou par essai de flexion dynamique, et estiment leur contrainte de rupture par régression linéaire. Ce type de machines offre de très bonnes prédictions de la mesure du MOE. En revanche, la marge de progression dans l'estimation du MOR reste encore importante. Dans le cas de bois relativement homogènes et à faible nodosité, comme les résineux à croissance lente, on obtient néanmoins des classements avec des rendements relativement corrects ; le classement des sciages par machine se rapproche ainsi de celui qui serait réalisé à partir des propriétés mécaniques des sciages obtenues par des essais destructifs. En effet, pour ces lots de bois de bonne qualité, c'est généralement la valeur du MOE qui limite et détermine la classe mécanique et qui a l'avantage de pouvoir être bien estimée par méthode vibratoire. Pour les bois à plus forte nodosité, c'est davantage la valeur du MOR qui classe les sciages. Une des pistes d'amélioration des machines de classement mécanique est de chercher à prendre en considération la présence des singularités les plus influentes sur le comportement mécanique des sciages comme les nœuds, la pente de fil moyenne, l'inclinaison des fibres au voisinage des nœuds, le bois juvénile et de réaction.

État des travaux de recherche

On considère souvent que la résistance des nœuds est nulle par rapport à celle du bois sain et que leur présence réduit la section du sciage. Ainsi, pour caractériser cette diminution de section, il a été défini un facteur appelé *Knot Area Ratio* (KAR). Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Guillaume Roblot (2010) « *Calcul automatique du Knot Area Ratio appliqué au classement par machine des bois de structure* » ont permis de progresser dans la prédiction du MOR en développant une méthode de calcul automatique du KAR grâce à la détection automatique de la position et de l'agencement des nœuds sur les quatre faces du sciage par un scanner optique.



Photo 1 Scanner d'analyse optique et rayons X de l'ENSAM de Cluny
Photo ENSAM

Les travaux poursuivis dans la thèse d'Arnaud Jehl (2012) « *Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser* » ont pris en compte les nœuds par la mesure de densités locales par rayons X et de l'orientation des fibres à partir d'images lasers. Un nouveau modèle, appelé Profilé Equivalent (PE), a aussi été développé pour la prédiction du MOE et du MOR à partir d'une poutre fictive capable de tenir compte de différentes singularités.

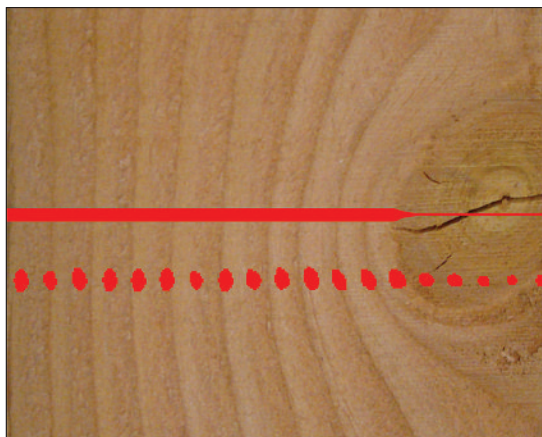


Photo 2 Illustration de la mesure de la pente de fil grâce à un faisceau de plusieurs lasers (Jehl, 2012)
Photo Arnaud Jehl

Les résultats de ces recherches ont permis d'améliorer les possibilités de prédiction par machine des propriétés mécaniques des sciages résineux. Cependant, d'autres singularités influent sur leur comportement, comme la présence de bois juvénile ou de réaction ; pour ces singularités, il n'existe pas encore de solutions de détection adaptées. Par ailleurs, il faut être conscient qu'ajouter différentes techniques pour prendre en compte davantage de singularités augmentera le coût des machines de classement.

Classement mécanique du Chêne par machine

Aujourd'hui il n'existe pas encore de machine homologuée permettant de réaliser le classement mécanique des sciages feuillus. Les méthodes développées et les technologies utilisées pour les bois résineux, comme la densitométrie par rayons X et l'imagerie laser afin de prendre en compte les singularités locales (nœuds, inclinaison des fibres), permettant d'améliorer la prédiction de la résistance des sciages ne donnent pas de bons résultats dans le cas en particulier de sciages de Chêne de qualité secondaire comme cela a pu être vérifié dans le cadre des travaux du projet de recherche CLAMEB financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR-11-RMNP-0015). Le besoin de disposer de solutions de classement mécanique par machine pour pouvoir valoriser efficacement le potentiel de cette ressource justifie la poursuite de recherches en cours à l'ENSAM de Cluny.

LA CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE EN FORÊT

Lanvin et Reuling (2012) ont montré que les caractéristiques mécaniques des sciages de Chêne varient selon l'origine des arbres :

- la structure « futaie régulière » apparaît plus favorable par rapport à la structure « taillis-sous-futaie » ;
- l'écart moyen sur la contrainte à la rupture est d'environ 5 % en faveur du Chêne sessile par rapport au Chêne pédonculé (dans les futaies régulières) ;
- les chênes de chênaies acidiphiles et chênaies-charmaies ont de meilleures propriétés mécaniques que ceux de chênaies hydromorphes.

De plus, le diamètre des arbres et la hauteur à laquelle sont prélevées les pièces de bois ont aussi une importance, les chênes avec les meilleures caractéristiques mécaniques étant les arbres de moins de 40 centimètres de diamètre, et la bille de pied présentant toujours le meilleur potentiel.

Aujourd'hui, les machines de classement mécanique, pour être homologuées (EN 14081), sont réglées pour chaque essence à partir d'un lot composé au minimum de 450 sciages représentatifs de la ressource mobilisée.

La prise en compte de données sylvicoles permettrait de constituer des lots homogènes qui amélioreraient le caractère prédictif des modèles présentés dans la seconde partie et le calage des machines de classement, en obtenant de meilleurs rendements.

PERSPECTIVES : VERS UNE MEILLEURE QUANTIFICATION DE LA RESSOURCE

Depuis 2014, l'estimation de la qualité des bois par l'Inventaire forestier national fait l'objet d'une nouvelle méthode. Le nombre de catégories de qualité a augmenté (on en compte désormais cinq) et la tige de l'arbre n'est plus fractionnée, l'arbre étant intégralement classé dans une seule catégorie de qualité (cf. tableau I, p. 167).

Cette approche permet de subdiviser l'ancienne catégorie Q2 en deux catégories mieux adaptées aux logiques de valorisation industrielle. La catégorie S2, dans les bois moyens, correspond à des chênes aux potentialités structurelles avérées. La nouvelle méthode permettra donc, d'ici quelques années, de mieux quantifier la ressource en chênes de qualité structure, y compris au niveau infranational. Cette information est cruciale pour la définition d'un modèle économique viable et l'éventuelle implantation d'unités de transformation dédiées.

Jean CROISEL
Chargé de mission
CONSEIL RÉGIONAL DE BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ
17 boulevard de la Trémouille
F-21000 DIJON
(jean.croisel@bourgognefranche.comte.fr)

Robert COLLET
Enseignant-Chercheur à Arts et Métiers ParisTech Cluny
Laboratoire bourguignon des Matériaux et Procédés
(LaBoMaP)
Rue Porte de Paris
F-71250 CLUNY
(robert.collet@ensam.eu)

BIBLIOGRAPHIE

- APECF et Arts Cluny. — Étude en vue de la valorisation de la ressource bourguignonne en chênes de qualité secondaire dans de nouveaux usages constructifs. — Paris : APECF, 2011. — 66 p.
- CROISEL (J.), COLLET (R.). — La Ressource française en feuillus de qualité secondaire, le cas des chênes sessiles et pédonculés et du hêtre 2013. — Document de travail, 2013. — 5 p.
- JEHL (A.). — Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser. — Cluny : Arts et Métiers ParisTech, 2012 (Thèse de doctorat).
- LANVIN (J.-D.), REULING (D.). — Caractérisation du Chêne sessile et pédonculé de France en vue de son utilisation en structure. — *Revue forestière française*, vol. LXIV, n° 2, 2012, pp. 151-165.
- ROBLOT (G.). — Calcul automatique de Knot Area Ratio appliqué au classement par machine des bois de structure. — Cluny : Arts et Métiers ParisTech, 2010 (Thèse de doctorat).

VERS UNE MEILLEURE VALORISATION DES CHÊNES DE QUALITÉ SECONDAIRE (Résumé)

La valorisation des chênes de qualité secondaire est une préoccupation constante des politiques forestières. Trouver des débouchés pour cette ressource abondante permet en effet d'améliorer à la fois les bilans de la filière bois et la sylviculture. De nouveaux débouchés dans le domaine structurel suscitent aujourd'hui de l'intérêt, du fait des atouts du bois en matière d'écoconstruction. À cet égard, les chênes de qualité secondaire présentent un fort potentiel technologique, démontré à travers des études de caractérisation. Pour concrétiser ce potentiel, le LaBoMap du centre Arts et Métiers de Cluny travaille sur le classement mécanique non destructif et par machine des sciages, en combinant différentes technologies et à l'aide de différents modèles. L'article conclut sur la prise en compte de données sylvicoles pour améliorer le caractère prédictif des modèles et une meilleure quantification de la ressource en forêt pour la définition d'un modèle économique.

TOWARDS BETTER CONVERSION OF LOW-GRADE OAK (Abstract)

Creating value from low-grade oak is a constant concern of forest policies. Finding markets for this abundant resource can improve the cost-effectiveness of the timber industry and silviculture. New opportunities in the structural area are currently the focus of interest, because of the strong points of wood for green building. In this area, low-grade oak has a strong technological potential, demonstrated through characterization studies. To realize this potential, the LaBoMap of the Arts et Métiers Cluny centre is working on the non-destructive mechanical grading of timber by machine, by combining different technologies and using different models. The article concludes that the inclusion of forestry data would improve the predictive value of models and better quantify the forest resource for the purposes of defining a business model.