

Modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois pour la conception mécanique

BURGERS Agnès^{1,2}, MONTERO Cédric¹, ARNOULD Olivier¹, BRANCHERIAU Loïc², VINCHES Marc³, MARCHAL Rémy²

¹LMGC, Université de Montpellier, CNRS,

² Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), BioWooEB UPR CIRAD 114

³Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (LGEI), IMT Mines Alès
agnes.burgers@mines-ales.org

Mots clés : caractérisation mécanique ; comportement hygroscopique ; modèles prédictifs ; NIRS ; pins ; variabilité.

Contexte et objectifs

Dans un contexte mondial de développement durable, les matériaux de structure (bâtiment, construction mécanique, emballage, etc.) représentent en tonnage la plus grande part des enjeux de substitution de matériaux « énergivores » par des matériaux biosourcés (Sathre et O' Connor, 2010). Pour ces usages non alimentaires, les bois apparaissent comme la principale source de biomasse utilisable et leur disponibilité potentielle est très grande dans les forêts françaises (Alexandre et al., 2012).

En prenant une logique de valorisation en cascade, au sein des bois massifs, des pièces de bois « sans défauts », peuvent être utilisées en génie mécanique en substitution à d'autres matériaux comme les métaux et les polymères.

Pour ce faire il faudrait être en mesure de fournir aux concepteurs une « fiche technique du matériau » précisant les caractéristiques physico-mécaniques nécessaires à la conception mécanique. À la différence des matériaux industriels, la variabilité due à l'origine naturelle des bois impose d'établir cette fiche technique « a posteriori », pour chaque pièce de bois, à partir de connaissances disponibles (espèce, origine, etc.) et de mesures adaptées non-destructives.

L'objectif de ce travail est de proposer des modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois « sans défaut » à partir de mesures facilement reproductibles dans l'industrie.

Matériel et méthode

La démarche employée (Fig. 1) est la construction de modèles statistiques, permettant de prédire des données caractéristiques mesurées en laboratoire, à partir d'indicateurs facilement mesurables dans l'industrie.

Mesures de propriétés physico-mécaniques utiles aux concepteurs

Dans cette étude les propriétés suivantes ont été mesurées :

- la densité ;
- les modules d'élasticité et de cisaillement (suivant R,T et L), par mesures vibratoires (BING[®]) et par contact direct, afin de caractériser le comportement élastique ;
- la contrainte de rupture en compression dans le sens longitudinal par essai normalisé, comme indicateur de limite d'élasticité ;

- les variations dimensionnelles en fonction de l'humidité dans les directions radiale et tangentielle.

Les mesures de certaines propriétés élastiques et hygroscopiques étant destructives et/ou difficilement reproductibles dans le milieu industriel à ce jour, des modèles prédictifs ont été construits à partir d'indicateurs rapides à mesurer par des moyens non destructifs.

Mesures des indicateurs

Quatre indicateurs ont été retenus, car ils sont a priori représentatifs des processus d'adaptation de la genèse du bois aux conditions environnementales :

- la densité ;
- la largeur de cernes ;
- le module spécifique longitudinal mesuré par BING[®], bien corrélé à l'angle des microfibrilles (Cave, 1968) paramètre clé de l'anisotropie du bois ;
- une empreinte spectrale en proche infrarouge (NIRS), comme indicateur de la chimie.

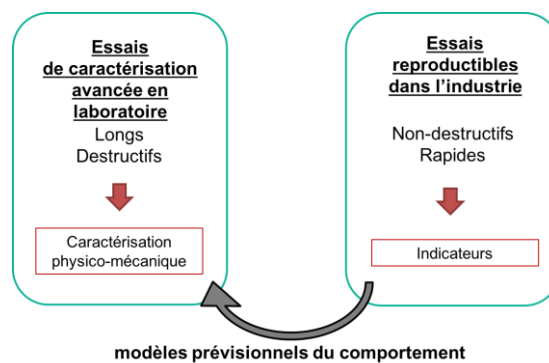


Fig. 1 : La démarche générale

Modèles statistiques

Dans un premier temps, les modèles prédictifs ont été réalisés seulement à partir des indicateurs physico-mécaniques. Ces modèles ont été élaborés par des régressions linéaires multiples, pas à pas (stepwise).

La deuxième étape s'est concentrée sur les prédictions à partir des spectres proche-infrarouge mesurés. Des modèles prédictifs ont été construits, selon une méthode de régression des moindres carrés partiels, couramment nommée par son abréviation anglaise, régression PLS (Bertrand 2005).

Enfin, des modèles globaux ont été élaborés. Afin de combiner les indicateurs physico-mécaniques et ceux issus de la NIRS, les indicateurs physico-mécaniques ont été ajoutés comme colonnes supplémentaires de la matrice des spectres de la NIRS.

Le matériel végétal

L'étude a été réalisée sur quatre espèces de pins parmi les six espèces les plus présentes en France métropolitaine : le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), le pin laricio (*Pinus nigra* subsp. *laricio* Maire), le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) et le pin à crochets (*Pinus mungo* subsp. *uncinata* (Ramond ex DC.) Domin). Elles représentent 88 % du volume total des pins sur pied en France (Inventaire forestier national, campagnes de relevés entre 2005 et 2012).

Ces bois ont été récoltés dans trois départements de la région Occitanie sous forme de plateaux directement en scierie ou par l'intermédiaire du CIRAD.

Résultats et discussions

La construction des modèles prédictifs avec les indicateurs physico-mécaniques (densité, module spécifique longitudinal, et largeur de cerne), confirme que la densité est un bon prédicteur (Guitard et El Amri, 1987). Sa combinaison avec le module spécifique offre une meilleure prédiction. En revanche, il apparaît que la largeur de cerne apporte peu dans l'amélioration des modèles prédictifs (sauf pour le module de cisaillement RT). Le point de saturation des fibres (PSF) n'est pas du tout prédit, avec les indicateurs utilisés (Fig. 2).

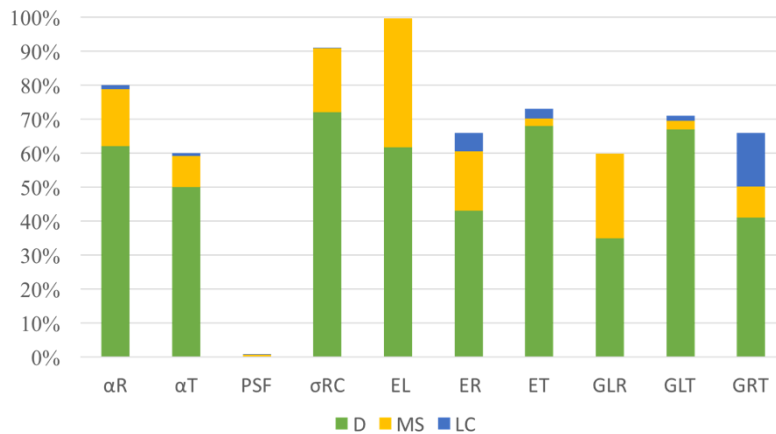


Fig. 2: Coefficients de détermination R^2 des modèles physico-mécaniques (Légende : D : Densité, MS : Module spécifique longitudinal, LC : Largeur de cerne, α_R : Coefficient de retrait radial, α_T : Coefficient de retrait tangentiel, PSF : Point de saturation des fibres, σ_{RC} : Contrainte de rupture en compression, EL : Module d'élasticité longitudinal, ER : Module d'élasticité radial, ET : Module d'élasticité tangentiel, GLR : Module de cisaillement LR, GLT : Module de cisaillement LT, GRT : Module de cisaillement RT)

Les modèles élaborés à partir des spectres proche infra-rouge donnent de meilleures prédictions que les indicateurs physico-mécaniques pour toutes les propriétés hygroscopiques.

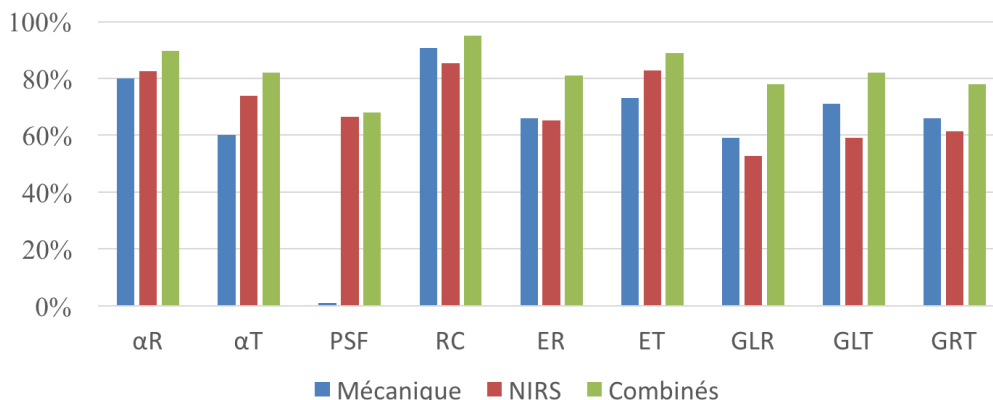


Fig. 3 : Coefficients de détermination R^2 des modèles (légende identique à Fig. 2)

Comme cela était attendu, les modèles construits en combinant les deux méthodes affichent de meilleurs coefficients de détermination pour l'ensemble des propriétés (Fig. 3). On constate dans les modèles combinés que la largeur de cerne n'apporte quasiment aucune amélioration. Il est permis de discuter de l'intérêt de garder ce paramètre assez coûteux à

mesurer.

L'analyse de la dispersion des résidus pour les modèles construits, par des tests d'hypothèses (test de Bartlett et test de Levene) ne révèle pas d'effet « essence » significatif (dans notre échantillonnage). Ceci signifie qu'il n'est pas nécessaire de bâtir des modèles pour chaque espèce de pin et qu'il est possible d'utiliser les modèles construits pour tous pins confondus.

Conclusion et perspectives

La combinaison de mesures physico-mécaniques simples et d'une mesure de spectrométrie proche infra-rouge donne de bons résultats dans la prédiction des propriétés élastiques (ainsi que la contrainte à la rupture en compression) et hygroscopiques des bois de pin « sans défauts ».

Si l'étude et la prédiction des propriétés élastiques linéaires et hygroscopiques apparaissent comme une première étape logique dans la caractérisation des bois « sans défauts », pour répondre aux besoins des concepteurs de composants structurels, il faut envisager de compléter leur caractérisation mécanique.

Remerciements

This work has been carried out thanks to the support of the LabEx NUMEV project Digital and Hardware Solutions and Modeling for the Environment and Life Sciences (n° ANR-10-LABX-20) funded by the «Investissements d'Avenir» French Government program, managed by the French National Research Agency (ANR), along with the support of the École des Mines d'Alès.

The experiments forming the body of this work have been conducted in CIRAD and IES (Institut d'Électronique et des Systèmes) laboratories as well as the LMGC (Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil).

Références

Alexandre, S., Gault, J., Guerin, A.-J., Lefebvre, E., de Menthiere, C., Rathouis, P., Texier, P.- H., Thibault, H.-L., Toussaint, X., et Attali, C. (2012) Les usages non alimentaires de la biomasse. Technical report.

Bertrand, D. (2005) Étalonnage multidimensionnel : application aux données spectrales. Technical report, Techniques de l'Ingénieur.

Cave, I. D. (1968) The anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Science and Technology*, 2 (4) :268–278.

Guitard, D. et El Amri, F. (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annals of Forest Science*, 44(3) :335–358.

Sathre, R. et O' Connor, J. (2010) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science and Policy*, 13 :104–114.