

ProPinLam : conception d'un bois lamellé-collé en Pin maritime d'aujourd'hui et de demain

BIGAY Pierre^{1,2}, GALIMARD Philippe² et Laurent CASTETS¹

¹Gascogne Bois- <https://www.gascognebois.com>

²Université de bordeaux, laboratoire I2M

pierre.bigay@u-bordeaux.fr

Mots clefs : Pin maritime ; modélisation ; lamellé-collé ; optimisation

Contexte et objectifs

Le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) est l'une des principales essences forestières françaises, représentant environ un quart de la surface des résineux. Un programme d'amélioration génétique, initié dans les années 1960 par l'INRA et l'AFOCEL (Association Forêt-Cellulose, devenue FCBA en 2007 après sa fusion avec le CTBA), a permis de sélectionner des variétés améliorées pour la croissance et la rectitude du tronc (Vidal 2016). Les Pin maritimes qui seront exploités dans les années à venir : 2030-2050, sont issus de ce programme d'amélioration génétique. Dans ce contexte, plusieurs acteurs industriels et centres techniques de la filière — Lamécol, Alliance Forêt Bois et le FCBA, sous l'impulsion de Gascogne Bois — ont lancé le projet ProPinLam afin de développer la construction en pin maritime en tirant parti de cette ressource en évolution. Dans un premier temps, des pins maritimes représentatifs de la ressource actuelle et de celle attendue dans les prochaines décennies sont caractérisés afin d'analyser l'évolution de la ressource et d'anticiper ses performances en construction. Pour cela, une base de données regroupant plus de 3 500 planches, avec leurs origines et les résultats de différents tests (analyse vibratoire, radiographie X, essais destructifs, etc.), est constituée.

En parallèle, une partie de ce projet fait l'objet d'une thèse menée au Laboratoire I2M, intitulée : « Optimisation topologique de poutre en lamellé-collé de pin maritime ». L'optimisation, dans ce cadre, vise à obtenir le meilleur rendement mécanique et économique d'un lot de bois « tout-venant », sans recourir au classement traditionnel des lamelles. Elle consiste à déterminer la configuration maximisant les performances du produit final en rigidité et résistance, tout en limitant les pertes de matière en qualité. La méthodologie proposée repose sur la modélisation du comportement mécanique du pin maritime à partir de données expérimentales. Pour commencer les propriétés mécaniques issues du programme ProPinLam serviront à calibrer le modèle mécanique développé par I2M (Rebhi 2024) au pin maritime. Ensuite, une fois paramétré, ce modèle offre la possibilité d'estimer, de manière non destructive, les caractéristiques mécaniques propres à chaque planche. Une fois le modèle paramétré pour le pin maritime, il sera appliqué à l'échelle d'un élément complet de lamellé-collé. L'objectif est de réaliser une série de simulations numériques qui explorent différentes variables de conception : par exemple la répartition des classes mécaniques, l'ordre d'empilement des lamelles, ou encore l'effet de variations locales des propriétés élastiques. Ces simulations permettront de comparer l'influence de chaque scénario sur la rigidité globale, la résistance en flexion et le comportement à la rupture. À partir de ces analyses, nous définirons des règles d'affectation des lamelles (choix et positionnement en fonction de leurs caractéristiques mesurées ou estimées) et des principes d'agencement optimisés. Ces règles visent à améliorer les performances structurelles du lamellé-collé, tout en contournant les catégories de classement conventionnelles habituellement utilisées dans l'industrie.

Base de données et échantillons

Dans l'attente des données sur le pin maritime de la première partie du projet Propinlam. Nous utiliserons la base de données du projet TreeTrace Douglas (Longuetaud et al 2022). Au total, 346 planches de douglas ont été caractérisées par différentes méthodes : radiographie X, analyse vibratoire, cartographies de pentes de fils (pdf) et essais destructifs (flexion 4 point).

Ces informations détaillées serviront à caler le modèle mécanique pour du douglas. Une attention particulière sera portée aux défauts internes, notamment les nœuds. En effet, des études antérieures, notamment celle de (Guindos et Guaita 2014), ainsi que d'autres travaux (Grazide 2014, Hackspiel et al 2014), ont montré que la position et le diamètre des nœuds influencent fortement les valeurs du MOE et du MOR. Dans l'optique de comparer ces deux paramètres, les planches ont été regroupées en trois catégories selon la position de leurs nœuds critiques, indépendamment de leur taille :

- Nœuds en zone de traction : planches 1, 3 et 8
- Nœuds en zone de compression : planches 7, 16 et 18
- Nœuds situés sur la fibre neutre : planches 2, 5 et 9

Modélisation

La modélisation est réalisée en deux dimensions selon une approche bi-matériau, distinguant le bois parfait (sans défaut) et des zones de nœuds. Cette distinction repose sur le Knot Depth Ratio (KDR) (Oh et al 2009, Viguer et al 2017), calculé à partir des cartographies locales de densité obtenues par rayons X. le KDR est une valeur comprise entre 0 et 1, représentant la « probabilité » que notre pixel appartienne à un nœud. Un seuil fixé à 0,95 permet de distinguer les zones considérées comme « bois parfait », des zones « nœuds ». Les domaines ainsi définis sont ensuite associés à deux modèles mécaniques différents :

- Bois parfait : matériau orthotrope endommageable.
- Nœuds : matériau isotrope élastique.

Le modèle bi-matériau retient les propriétés suivantes :

- Nœuds : $E = 650 \text{ MPa}$, $v = 0,4$, $G = 143 \text{ MPa}$.
- Bois parfait : voir Tab. 1.

Tab. 1 : Caractéristiques mécaniques issues de Rebhi (2024) et ajustées à partir des données vibratoires obtenues avec TreeTrace (*valeur pour une densité de 530 kg/m^3)

	Bois parfait
$E_L (\text{MPa})$	13 202*
$E_T (\text{MPa})$	545*
$E_R (\text{MPa})$	233*
v_{LT}	0.37
v_{LR}	0.44
v_{RT}	0.47
$G_{LT} (\text{MPa})$	852*
$G_{LR} (\text{MPa})$	852*
$G_{RT} (\text{MPa})$	114
$E_L (\text{MPa})$	13 202*

	Bois parfait
$f_{t,L} (\text{MPa})$	68.2
$f_{t,T} (\text{MPa})$	3
$f_{t,R} (\text{MPa})$	4
$f_{c,L} (\text{MPa})$	47
$f_{c,T} (\text{MPa})$	5
$f_{c,R} (\text{MPa})$	3
$Gf_I (\text{J/m}^2)$	273
$Gf_H (\text{J/m}^2)$	979

Les cartographies de densité servent également à ajuster, éléments par éléments du maillage, les propriétés élastiques : (E_L , E_T , E_R , G_{LT} , G_{LR}) selon une relation affine définie par l'équation 1, comme précédemment proposé par (Guitard 1987, Chevalier 2024, Viguer et al 2017).

$$E_L = g_1 + g_2 * (\rho_{(x,y)} - g_3) \quad (1)$$

De plus, les cartographies de pente de fil sont intégrées : à chaque élément du maillage, une matrice de changement de base est appliquée en fonction de la valeur locale de la pente. Comme seule la cartographie surfacique est disponible pour chaque face, la rigidité associée à chaque face est d'abord calculée, puis une moyenne est effectuée afin d'obtenir la rigidité finale de la planche. La Fig. 8 montre sa variation selon l'axe principal de la planche : x.

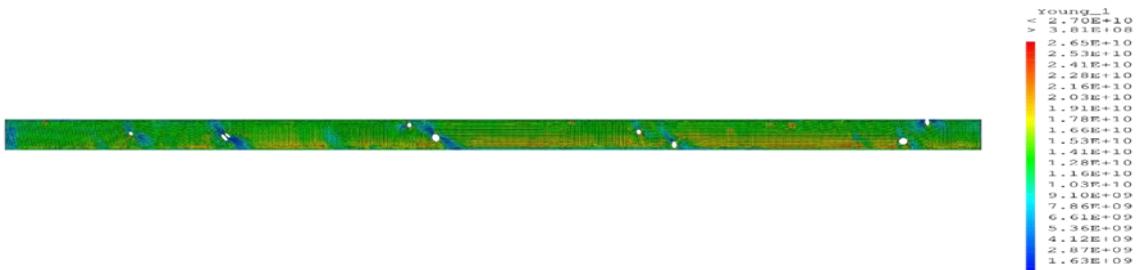


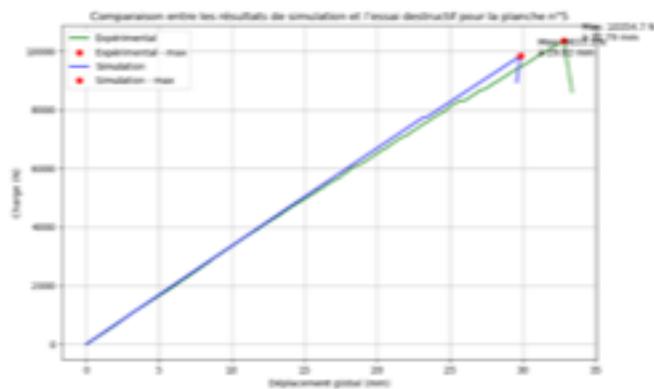
Fig. 9 : Modélisation de la planche n°1, représentation de la distribution locale du module d'élasticité E_x

Les valeurs de résistances mécaniques locales sont estimées à l'aide par la formule de Hankinson (1921).

Résultats

Dans un premier temps, les valeurs de MOE_{global} (calculés selon la norme EN 408 2012) ont été extraits à la fois des simulations et des essais expérimentaux. Ces valeurs permettent de corriger la matrice de rigidité du bois issue de la littérature (Tab. 1). Les modules ($E_L, E_T, E_R, G_{LT}, G_{LR}$) sont ainsi rectifiés pour chaque planche à l'aide d'un coefficient α , défini comme : $\frac{MOE_{global,experimental}}{MOE_{global,simulation}}$.

Une 2nd simulation est ensuite effectué avec ces nouvelles rigidités.



La Fig. 2 illustrant un exemple de comparaison entre les résultats de simulation et l'essai destructif après l'application du coefficient α (2nd simulation) pour la planche n°5.

Le Tab. 2 résume les résultats des simulations après cette correction. Les valeurs de rupture issues de la simulation sont exprimées en pourcentage de force de rupture expérimentale :

$$\frac{Force simulation}{Force Expérimentale} * 100$$

Tab. 2 : Valeurs des coefficients correctifs et des forces de rupture (kN) pour chaque poutre.

	Coefficients correctifs de la rigidité(α)	Force à la rupture (kN) Expérimentale	Force à la rupture Simulation en % de la force Expérimentale	Ecart en % des Force à la rupture entre la 1ère et 2 nd simulation
Poutre 1 (traction)	1,26	17,8	36,2 %	-3,2 %
Poutre 3 (traction)	0,94	6,3	50,0 %	+0,0%
Poutre 8 (traction)	1,17	16,7	52,1 %	-2,7 %
Poutre 7 (compression)	0,90	9,9	102,5 %	+2,1 %
Poutre 16 (compression)	1,11	21,9	38,8 %	+0,2 %
Poutre 18 (compression)	1,09	20,915	77,9 %	-0,0 %
Poutre 2 (fibre neutre)	1,17	13,6	64,3 %	+0,9 %
Poutre 5 (fibre neutre)	0,98	10,4	78,5 %	+0,3 %
Poutre 9 (fibre neutre)	0,98	11,5	72,8 %	+0,1 %

Conclusion et perspectives

Cette première étude a été menée sur un petit lot de poutres en douglas ($n = 9$) afin de disposer rapidement d'un jeu de données expérimentales pour tester la méthodologie, en attendant les résultats spécifiques du programme ProPinLam sur le pin maritime. Elle doit donc être considérée avant tout comme un travail exploratoire de validation de la pertinence du modèle mécanique, et non comme une analyse statistiquement représentative.

Les premiers résultats confirment la faisabilité de la démarche, mais soulignent la nécessité de vérifications complémentaires sur les données d'entrée (mesures, hypothèses de modélisation) et d'un calibrage précis des paramètres avant toute généralisation.

Dans cette optique, la prochaine étape consistera en une étude de sensibilité paramétrique pour identifier l'influence relative de chaque paramètre du modèle et repérer ceux qui sont critiques pour la précision des simulations. Différentes approches peuvent être mobilisées, telles que : les indices de Sobol, les polynômes du chaos, ou encore les méthodes de krigage (Garcia-Cabrejo et Valocchi 2014, Le Gratiet et al 2017, Tsokanas et al 2021).

L'objectif final est de valider le calibrage sur l'ensemble des 346 planches de la base TreeTrace Douglas, avant de transposer la méthodologie aux données ProPinLam dès leur disponibilité, afin de garantir un modèle robuste et représentatif de la future ressource en pin maritime.

Remerciements

Nous remercions l'ADEME pour son soutien financier dans le cadre de l'appel de cette thèse CIFRE avec Gascogne Bois.

Références

Chevalier R (2024) Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique et étude de la stabilité dimensionnelle de structures composites lamellées collées aboutées en *Pinus pinaster* (Ait.). Thèse de l'université de Bordeaux.

EN 408 (2012) Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.

Garcia-Cabrejo O, Valocchi A (2014) Global Sensitivity Analysis for multivariate output using Polynomial Chaos Expansion, Reliability Engineering & System Safety, 126, p. 25-36.

Grazide C (2014) Une modélisation de la résistance en flexion du pin maritime utilisé en construction. Thèse de l'université de Bordeaux.

Guindos P, Guaita M (2014) The analytical influence of all types of knots on bending, *Wood Science and Technology*, 48(3), p. 533-552.

Guitard (1987) Mécanique du matériau bois et composites. Toulouse: Cépaduès-Editions (Collection Nabla).

Hackspiel C, De Borst K, Lukacevic M (2014) A numerical simulation tool for wood grading: model validation and parameter studies, *Wood Science and Technology*, 48(3), p. 651-669.

Hankinson RL (1921) Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain, *Air Force Information Circular No. 259*, U.S. Air Service.

Le Gratiet L, Marelli S, Sudret B (2017) Metamodel-Based Sensitivity Analysis: Polynomial Chaos Expansions and Gaussian Processes, in R. Ghanem, D. Higdon, et H. Owhadi (éd.) *Handbook of Uncertainty Quantification*. Cham: Springer International Publishing, p. 1289-1325.

Longuetaud F et al (2022) Traceability and quality assessment of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) logs: the TreeTrace_Douglas database, *Annals of Forest Science*, 79(1), p. 46.

Oh J-K et al (2009) Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-ray radiation », *Journal of Wood Science*, 55(4), p. 264-272.

Rebhi A (2024) Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé: application au bois massif, thèse de l'université de Bordeaux

Tsokanas N, Pastorino R, Stojadinović B (2021) A Comparison of Surrogate Modeling Techniques for Global Sensitivity Analysis in Hybrid Simulation, Machine Learning and Knowledge Extraction, 4(1), p. 1-21.

Vidal M (2016) Optimisation des stratégies d'amélioration génétique du pin maritime grâce à l'utilisation de marqueurs moléculaires. Thèse de l'université de Bordeaux.

Viguier J et al (2017) Modelling mechanical properties of spruce and Douglas fir timber by means of X-ray and grain angle measurements for strength grading purpose, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(4), p. 527-541.