

Conception et mesures expérimentales de la stabilité dimensionnelle de structures lamellés collés aboutés en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations hygriques

CHEVALIER Romain¹, CASTETS Laurent², POMMIER Régis³, MONTEMURRO Marco⁴, CATAPANO Anita⁵

¹ Icam Toulouse, F-31300 Toulouse, France, e-mail : romain.chevalier@icam.fr

² Gascogne Bois, F-40210 Escource, France, e-mail : lcastets@gascognebois.com

³ Université de Bordeaux, I2M CNRS UMR 5295, F-33400 Talence, France, e-mail : regis.pommier@u-bordeaux.fr

⁴ Arts et Métiers Institute of Sciences and Technology, I2M CNRS UMR 5295, F-33400 Talence, France e-mail : marco.montemurro@ensam.eu

⁵ Bordeaux INP, Université de Bordeaux, I2M CNRS UMR 5295, F-33400 Talence, France e-mail : anita.catapano@bordeaux-inp.fr

Mots clefs : Lamellés collés aboutés ; *Pinus pinaster* (Ait.) ; Stabilité dimensionnelle ; Corrélation d'Images Numériques ; Séquences d'empilement ; Conception systématique ; Variations climatiques.

Contexte et objectifs

Les Lamellés Collés Aboutés, ou LCAs, sont des structures composites fabriquées à partir du collage et de l'aboutage de multiples lamelles de bois (Fig. 1) qui permettent une flexibilité de dimensions et de formes importante. Le comportement des lamelles de bois constitutives des LCAs, et en particulier le comportement hygro-mécanique, est fortement dépendant de leur typologie en lien avec leur position dans les grumes, comme illustré en Fig. 2. La position de ces lamelles dans leur grume d'origine influence intrinsèquement les déformations des LCAs soumis à chargement de natures différentes (mécanique, hygrique, thermique).

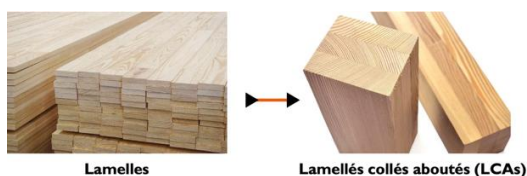


Fig. 1 : Illustration des lamelles et LCAs

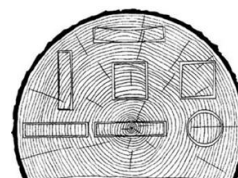


Fig. 2 : Influence de la position dans une grume

L'objectif de cette étude est de proposer une démarche de conception systématique capable d'assurer la stabilité dimensionnelle de LCAs soumis aux variations hygriques. Plus précisément, dans le cadre de ce travail, la conception des LCAs sera abordée en utilisant les principes adoptés dans la conception de structures stratifiées. L'optimisation de structures composites et spécifiquement des composites stratifiés est un domaine de recherche d'importance notable dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile et du naval qui nécessitent des éléments structuraux légers aux propriétés mécaniques performantes.

Dans le cas des produits en bois, deux études se concentrent sur l'optimisation de leur comportement. Pech et al (2019) ont utilisé un algorithme d'optimisation métaheuristique (algorithme génétique) couplé à un métamodèle capable d'approximer le comportement mécanique de poutre lamellée collée soumise à une sollicitation en flexion, avec pour l'objectif la minimisation des déviations résultantes. Tandis que de Vito Jr. et al (2023) ont proposé une optimisation topologique des lamelles du cœur (hors lames extérieures) de produits bois, c'est

à dire LCAs et bois lamellés croisés, dans le but de réduire leur masse totale avec une perte de performances minimale par rapport à une solution de référence donnée. A la connaissance des auteurs, aucune étude ne propose de conceptions de séquences d'empilements de LCAs dans le but de garantir leur stabilité dimensionnelle aux variations climatiques.

Les travaux de cette étude reposent donc sur une conception systématique de séquences d'empilements de LCAs en fonction du nombre de plis ainsi que des typologies (en fonction du motif de cernes) des lamelles constitutives des LCAs. L'étude est réalisée pour l'essence de *Pinus pinaster* (Ait.) et les LCAs ont été conçus à partir des lamelles disponibles sur la chaîne de production de l'entreprise Gascogne Bois (GB).

Conception des LCAs expérimentaux

Typologies de lamelles en fonction de leur orientation

En premier lieu, la classification usuelle en deux typologies en fonction du motif de cernes des scieries pour les lamelles en Dosse (D) et en Quartier (Q) représente une dichotomie limitante pour pouvoir appliquer une conception systématique des LCAs. Des nouvelles typologies de lamelles sont introduites par un classement visuel sur les motifs de cernes. Les lamelles sont définies selon 4 motifs de cernes, à savoir : la dosse (D), la fausse-dosse (FD), le faux-quartier (FQ) et le quartier (Q). Ces motifs correspondent à des orientations de lamelles différentes et permettent leur répartition en classes de comportement plus adaptée à la conception d'empilements de LCAs. La représentation graphique de ces motifs est présentée en Fig. 3.

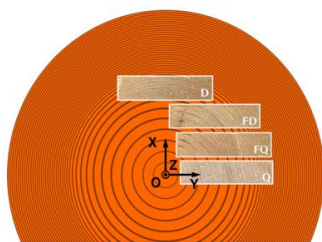


Fig. 3 : Répartition des lamelles en fonction du motif de cernes

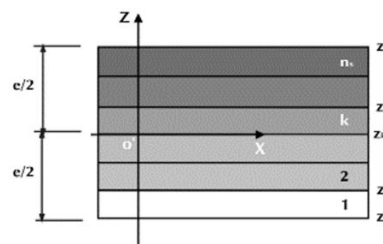


Fig. 4 : Schéma représentatif de l'empilement des stratifiées, adaptée de Izzi (2021)

Le Tab. 1 donne la répartition des typologies de lamelles sur la chaîne de production de l'entreprise GB (données issues à partir de 100 échantillons).

Tab. 1 : Répartition des typologies de lamelles sur la chaîne de production de l'entreprise GB

Entreprise GB	Dosse	Fausse-Dosse	Faux-Quartier	Quartier
Répartition [%]	42	45	11	2

Conception des séquences d'empilement de LCAs

La conception de séquences d'empilement des LCAs repose sur des travaux de littérature (Catapano et Montemurro 2019, Garulli et al 2018, Izzi 2021) qui portent sur l'optimisation de séquences d'empilement de composites stratifiés.

La conception de structures composites reste un problème contemporain majeur et ouvert qui se traduit sous la forme d'une optimisation multi-échelles qui repose sur la maîtrise de deux propriétés inhérentes aux composites – en particulier le matériau bois, à savoir l'hétérogénéité et l'anisotropie, qui influencent respectivement le problème à l'échelle mésoscopique des phases constitutives du composite intra-ply et aux échelles macroscopiques locale et globale du stratifié (Izzi 2021). Lors de la conception de composites stratifiés, l'utilisation d'une structure à strates identiques, c'est à dire une structure composée de plis de propriétés et d'épaisseur identiques, permet de réaliser l'optimisation uniquement selon deux paramètres : le nombre de

plis et leur orientation (Garulli et al 2018), comme indiqué sur le schéma en Fig. 4. L'optimisation combinée de ces deux paramètres n'est pas triviale et requiert parfois l'utilisation d'hypothèses simplificatrices (symétrie des empilements, limitation du nombre d'orientation) pour obtenir des propriétés des stratifiés spécifiques (découplage membrane/flexion, orthotropie de la matrice de rigidité en membrane) mais qui limitent le nombre potentiel de configurations optimal de stratifiés.

En ce qui concerne le couplage hygro-thermo-élastique, grâce à la représentation polaire des matrices hygro-thermo-élastiques de la théorie classique des stratifiés, il a été prouvé que le découplage mécanique assure automatiquement le découplage hygro-thermo-élastique, le détail est fourni dans (Catapano 2021). En conséquence, afin d'obtenir des stratifiés découplés, des solutions quasi-triviales (QT) et leurs règles de superposition présentées dans (Vannucci 2001, Garulli et al 2018) sont exploitées ici. Les solutions QT sont un ensemble de solutions exactes d'empilements satisfaisant aux exigences de découplage et/ou d'homogénéité (Vannucci 2001). Les solutions QT peuvent être trouvées pour des stratifiés avec des plis identiques en agissant uniquement sur la position des couches dans l'empilement, quelle que soit la valeur de l'angle d'orientation attribuée à chaque couche (ici à chaque typologie de lamelle). Ces solutions ont été utilisés pour réaliser la conception d'empilements de LCAs afin d'assurer « théoriquement » leur stabilité dimensionnelle. La stratégie de conception des LCAs proposée dans ce travail se compose de deux étapes consécutives :

1. La première étape du processus de conception consiste à sélectionner les séquences QT d'empilement appropriées. Parmi les solutions QT, des séquences quasi-homogènes ont été adoptées.
2. La deuxième étape du processus de conception consiste à sélectionner les typologies de lamelles à associer à chaque "groupe d'orientation" prévu dans la séquence QT.

Pour plus d'informations sur les empilements QT, le lecteur peut se référer aux études de Montemurro (2015), Catapano et Montemurro (2019), Garulli et al (2018) et Izzi (2021).

Présentation des groupes d'empilement

Quatres groupes d'empilement sont considérés dans cette étude pour étudier l'influence des paramètres de conception (nombre de lames dans la séquence, disposition des lames suivant la direction d'aboutage, séquence d'empilement) :

1. Le **Groupe Tampon (GT)** est constitué par 10 LCAs de 3 plis classiquement produits par l'entreprise GB. La répartition des lamelles est aléatoire aussi bien dans la direction de l'empilement que dans la direction de l'aboutage. Ce premier groupe sert de point de comparaison pour évaluer l'influence des différents paramètres de conception.
2. Le **Groupe Aboutage (GA)** est constitué par 14 LCAs de 3 plis qui respectent la condition de lames « quasi-identiques » où les lamelles aboutées sont de la même classe de comportement et où l'empilement est aléatoire.
3. Le **Groupe Empilement 3 plis (GE3)** est constitué par 8 LCAs de 3 plis qui respectent la condition de lames « quasi-identiques » et où les empilements sont définis selon le concept d'empilement symétriques. Les LCAs sont définis en deux configurations symétriques qui sont respectivement :

GE3-1 : D/Q/D et GE3-2 : FD/Q/FD,

qui définissent les classes des lamelles composant les différents LCAs.

4. Le **Groupe Empilement 5 plis (GE5)** est constitué par 16 LCAs de 5 plis qui respectent la condition de « quasi-identité » des lames et où les empilements sont définis selon le concept d'empilement QT. Les LCAs sont définis en quatre configurations qui sont respectivement :

GE5-1 : FD/D/Q/Q/D/FD, GE5-2 : D/FD/Q/Q/FD/D,

GE5-3 : FD+/FD-/Q/Q/FD+/FD- et GE5-4 : FD/FQ/Q/Q/FQ/FD, qui définissent les classes des lamelles composant les différents LCAs. Seul l'empilement GE5-3 n'est pas symétrique.

Dans l'enceinte de l'entreprise GB, les LCAs ont été produits sous la forme de produits de 1.5 m. Les empilements des groupes GA, GE3 et GE5 sont représentés par 4 échantillons de LCAs. Les configurations des groupes GE5 qui dépendent du concept d'empilement QT ont été choisies en fonction de la répartition des lamelles en classe de comportement du Tab. 1. De plus, toutes les lames des LCAs (sauf GE3-1) ont leur moelle orientée vers l'intérieur du LCA. Les configurations choisies pour GE3 et GE5 sont présentées dans la Fig. 5.

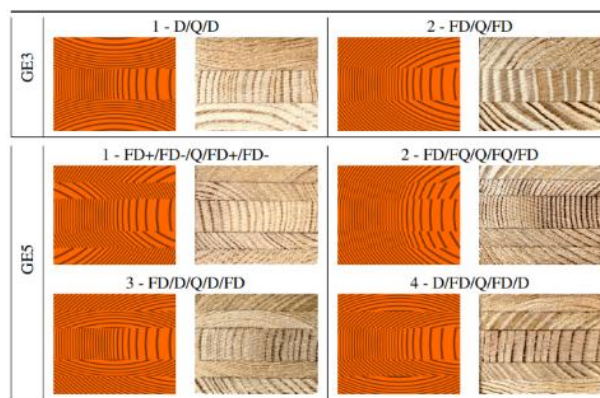


Fig. 5 : Présentation des séquences d'empilement des groupes GE3 et GE5

Présentation de l'expérience

Expérience de variations climatiques des LCAs

Le test expérimental a pour ambition de mesurer l'effet des variations en humidité de LCAs sur leur stabilité dimensionnelle. Pour cela, les LCAs sont introduits dans une enceinte régulée en température et en humidité relative pour pouvoir commander précisément la teneur en eau d'équilibre (EMC). Les normes AFNOR XP P20-650-2 (2009) et ISO 24339 (2006) prévoient respectivement de placer les échantillons dans deux ambiances différentes pendant 3 et 4 semaines, respectivement. La première ambiance simule le cas d'un climat humide avec une température (Temp) égale à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative (h) de $85 \pm 5\%$ tandis que la seconde ambiance simule un climat sec avec une température égale à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $30 \pm 5\%$. La durée de chacun des cycles est considérée de 4 semaines. Dans le cas de l'ambiance sèche, des problèmes sont survenus au cours des essais sur l'enceinte climatique avec une panne du système de déshumidification lors du second cycle climatique. L'expérience réalisée ne mesure donc que les effets hygroscopiques induites après un cycle d'humidification (teneur en eau des LCAs qui fluctuent entre $12\% \rightarrow 18\% \rightarrow 12\%$).

Mesure de l'influence de variations climatiques par corrélation d'images numériques.

Par soucis de clarté, seule la mesure du déplacement de flèches est présentée dans ce résumé. La mesure des flèches est réalisée sur les 4 faces latérales ($l_1/l_2/h_1/h_2$) d'un LCA par la mesure de 3 zones de déplacements par corrélations d'images, comme illustré en Fig. 6. Les valeurs sont ensuite comparées avec les bornes imposées par la norme AFNOR NF EN 13307-1 (2009).

Résultats

Par soucis de concision pour ce résumé, seule une comparaison entre le groupe GT – LCAs originaux de l'entreprise GB – et le groupe de test GE5-4 – empilement D/FD/Q/FD/D est présentée. Le rappel de la séquence d'empilement du groupe GE5-4 est présentée en Fig. 7. Les

résultats sont présentés sous la forme de deux graphiques – pour les moyennes de flèches et pour les écarts-types de flèches (considérant une loi Gaussienne de probabilité). Pour chaque graphique, la couleur noire correspond au groupe tampon GT et les couleurs correspondent aux résultats pour le groupe GE5-4 avec une couleur associée à chacune des faces latérales. L'évolution des flèches est exprimée en fonction de la temporalité de l'expérience ainsi qu'au taux moyen d'humidité des LCAs. Les résultats sont présentés en Fig. 8.

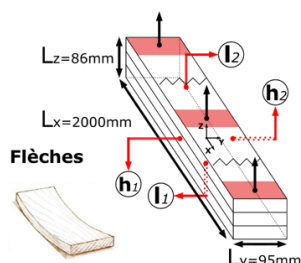


Fig. 6 : Illustration du principe de mesure du déplacement de flèches



Fig. 7 : Rappel de la séquence d'empilement de GE5-4

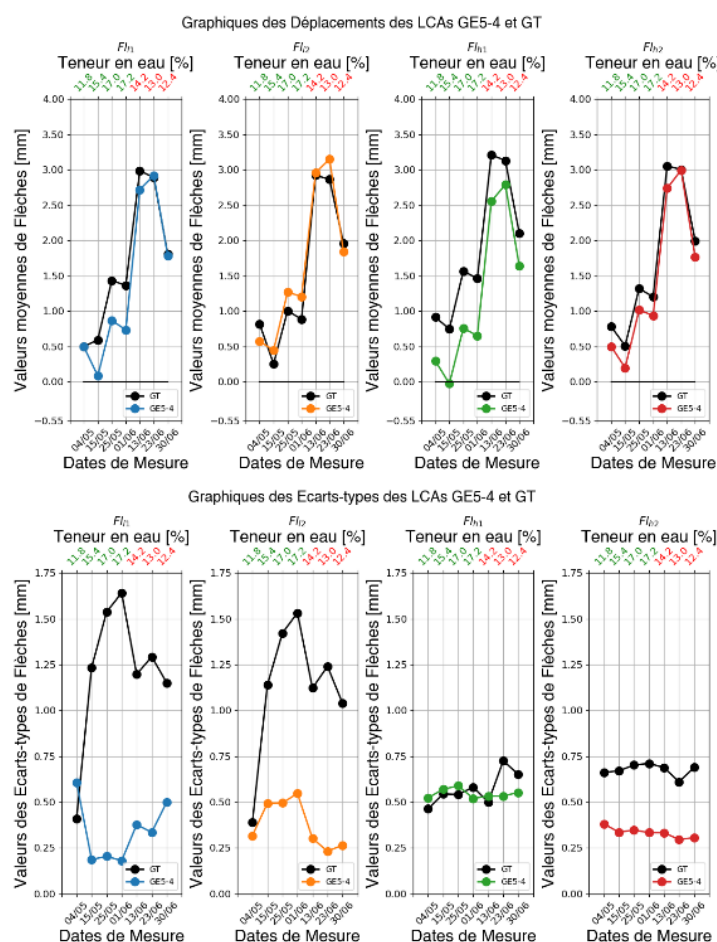


Fig. 8 : Graphique de l'évolution des déplacements de flèches - moyenne (haut) et écart-type (bas)

Les valeurs des flèches en fin d'essai de tous les groupes de LCAs ne respectent pas les limites imposées par la norme AFNOR NF EN 13307-1. De plus, les valeurs de flèches finales sont peu impactées par une conception systématique des LCAs (variation comprise entre [-22.1%, -1.02%]). Les valeurs des écarts-types finales de flèches sont fortement diminuées entre le groupe GT et GE5-4 avec des variations comprises dans l'intervalle [-74.5%, -15.1%].

Discussion et conclusion

Cette étude a permis d'établir des conceptions systématiques de séquences d'empilement pour des LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.). Ces séquences d'empilement reposent sur la notion d'empilements QT pour l'optimisation de stratifiées. Ces solutions d'empilement ont été utilisées dans le cadre des LCAs en établissant une nouvelle typologie de classes de comportement de lamelles de bois reposant sur un classement visuel des motifs de cernes. Plusieurs conceptions de LCAs ont été réalisées et sont comparées aux LCAs « classiques » du groupe GB pour étudier l'influence des paramètres de conception sur la stabilité dimensionnelle qui est estimée à partir de l'évolution des déplacements de flèches – mesurés à partir de corrélation d'images numériques 3D – sur les différentes faces latérales des LCAs. L'influence d'une conception systématique sur les LCAs est négligeable du point de vue de la variation des valeurs moyennes de déplacement de flèches mais est marquée (diminution >15%) sur les valeurs des écarts-types de déplacement.

Ces observations montrent l'utilité d'une conception systématique des LCAs sur les valeurs de déplacements des LCAs afin de limiter la variabilité du comportement des LCAs d'une même classe. Toutefois, l'influence de la conception systématique reste limitée du point de vue de la moyenne des valeurs de déplacement.

Références

- AFNOR XP P20-650-2 (2009) Fenêtres, porte-fenêtres, châssis fixes et ensembles menuisés - Pose de vitrage minéral en atelier, Partie 2 : exigences et méthodes d'essais spécifiques au bois.
- Catapano A, Montemurro M (2019) On the correlation between stiffness and strength properties of anisotropic laminates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(8):651–660.
- Catapano A (2021) Multiscale models to design anisotropic and heterogeneous media Habilitation à diriger des recherches, Université de Bordeaux.
- Garulli T, Catapano A, Montemurro M, Jumel J, Fanteria D (2019) Quasi-trivial stacking sequences for the design of thick laminates. *Composites Structures*, 200:614–623.
- ISO 24339 (2006) Laminate floor coverings - Determination of dimensional variations and stability after exposure to dry and humid conditions.
- Izzi MI (2021) Multi-scale optimisation of thin-walled composite structures integrating a global-local modelling strategy. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Montemurro M (2015) An extension of the polar method to the first-order shear deformation theory of laminates. *Composite Structures*, 127:328–339.
- Pech S., Kandler G., Lukacevic M. et Füssel J. (2019) Metamodel assisted optimization of glued laminated timber beams by using metaheuristic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79:129–141.
- Vito Jr AF, Vicente WM, Xie MX (2023) Topology optimization applied to the core of structural engineered wood product. *Structures*, 48:1567–1575.
- Vannucci P, Verchery G (2001) A special class of uncoupled and quasi-homogeneous laminates. *Composites Science and Technology*, 61(10):1465–1473.
- Verchery G (2001) Les invariants des tenseurs d'ordre 4 du type de l'Élasticité. In J.-P. BOEHLER, éditeur : *Restoring the urban forest ecosystem*, pages 93–104. Springer Netherlands, Dordrecht. URL www.doi.org/10.1007/978-94-009-6827-1_7.