

Modélisation du comportement différé d'éléments en bois massif

QUEIDAT Nour El Hoda, COUREAU Jean-Luc, CHAPLAIN Myriam

Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux

nour-el-hoda.oueidat@u-bordeaux.fr

Mots clés : bois massif ; nodosité ; caractérisation ; modélisation ; comportement viscoélastique ; hygromécanique ; endommagement ; durée de vie

Contexte et objectifs

Le bois, matériau naturel largement utilisé en construction pour son caractère renouvelable, sa résistance, sa légèreté et sa durabilité. Il présente un comportement mécanique complexe en raison de son anisotropie et de ses propriétés variables. Les défauts tels que les nœuds et la déviation des fibres augmentent les difficultés à le modéliser.

L'hétérogénéité des matériaux et leurs performances différées doivent être intégrées dans les modélisations pour l'estimation des performances. L'endommagement des éléments structuraux en matériaux fibreux et hétérogènes, qu'il s'agisse de fissurations en surface, près de singularités ou au niveau des assemblages, affecte la performance des structures. Les risques de création ou de propagation de fissures augmentent lors des phases de séchage ou de changements rapides des conditions environnementales. Ces situations surviennent fréquemment lors de canicules (en lien avec le changement climatique), de chauffage ou de forte climatisation des bâtiments. La transition entre l'état humide et sec peut entraîner des variations dimensionnelles et des endommagements prématurés et localisés, réduisant la durée de vie des ouvrages, en particulier la tenue des éléments bois assemblés ou collés.

Ce travail vise à modéliser par une approche multiphysique l'endommagement du bois en tenant compte de leur teneur en eau sous chargement mécanique, afin d'estimer leur tenue dans le temps. Nous nous concentrerons particulièrement sur la modélisation des effets des variations des sollicitations extérieures sur la performance différée des constructions en bois. Le développement de ce modèle, associé à des essais de durée de vie en ambiance climatique maîtrisée, devra permettre de quantifier les cinétiques de ruptures et les choix des propriétés mécaniques et en lien avec l'hétérogénéité les plus influentes.

Méthodologie

La première étape consiste à développer un modèle viscoélastique orthotrope pour le bois parfait. La deuxième étape vise ensuite à adapter ce modèle au bois de construction en intégrant les variations des pentes de fils (induits par les nœuds) dans le modèle initial. La troisième étape consiste à développer un modèle d'endommagement anisotrope à long terme pour le bois de construction, basé sur le modèle d'endommagement de Rebhi (2024) et des modèles viscoélastiques. Des essais expérimentaux spécifiques seront développés pour valider le modèle. L'effet de la teneur en eau sera aussi intégré dans le modèle d'endommagement. Le développement d'un modèle viscoélastique orthotrope est abordé dans le chapitre suivant.

Modélisation viscoélastique orthotrope

Dans le domaine élastique, le comportement du bois peut être représenté par la loi de Hook généralisé. Pour un matériau homogène élastique orthotrope, la relation est donnée par l'équation (1) :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L^e \\ \varepsilon_T^e \\ \varepsilon_R^e \\ \gamma_{LT}^e \\ \gamma_{LR}^e \\ \gamma_{TR}^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L^0} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T^0} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R^0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T^0} & \frac{1}{E_T^0} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R^0} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^0} & \frac{1}{E_R^0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}^0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}^0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}^0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \end{Bmatrix} = [C^e] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Le comportement visqueux linéaire du bois peut être modélisé en utilisant des modèles rhéologiques à partir de deux éléments, le ressort (solide élastique) et l'amortisseur (fluide visqueux). Les deux modèles les plus utilisés sont le modèle de Kelvin Voigt plus particulièrement utilisé pour les essais de fluage-recouvrance, et le modèle de Maxwell pour les essais de relaxation-effacement.

Dans notre étude, pour représenter le comportement visqueux, le modèle rhéologique retenu par direction d'orthotropie est une cellule de Kelvin-Voigt (Fig. 1). Dans la première phase de l'étude, seule l'influence de la teneur en eau sera prise en compte, pas ses variations.

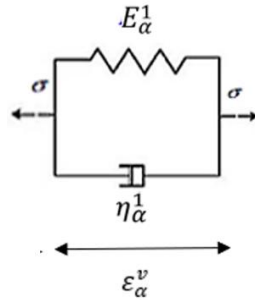


Fig. 1 : Représentation du modèle de Kelvin-Voigt selon la direction α (avec $\alpha=L, T$ ou R)

La déformation visqueuse selon la direction α (avec $\alpha=L, T$ ou R) sous une charge constante σ_α s'écrit suivant l'équation (2) et donc la déformation totale en fluage suivant l'équation (3).

$$\varepsilon_\alpha^v(t) = \sigma_\alpha \cdot \left[\frac{1}{E_\alpha^1} \cdot (1 - e^{-t/\tau_\alpha^1}) \right] \quad \text{avec} \quad \tau_\alpha^1 = \frac{\eta_\alpha^1}{E_\alpha^1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\alpha(t) = \varepsilon_\alpha^e + \varepsilon_\alpha^v = \sigma_\alpha \cdot \left[\frac{1}{E_\alpha^0} + \frac{1}{E_\alpha^1} \cdot (1 - e^{-t/\tau_\alpha^1}) \right] \quad (3)$$

La détermination des paramètres viscoélastiques pour le matériau orthotrope représente une tâche complexe, par manque de données dans la littérature. À partir des résultats expérimentaux de la thèse de Cariou (1987), les paramètres viscoélastiques dans la direction longitudinale du pin maritime pour une humidité de 12% sont obtenus. La méthode d'ajustement repose sur une approche de moindres carrés, visant à minimiser la somme des carrés des écarts entre les données de Cariou (1987) et l'équation 2 (Fig. 2). Les valeurs obtenues, $1,069 \cdot 10^4$ MPa et $1,387 \cdot 10^4$ MPa.h correspondent respectivement à E_L^1 et η_L^1 .

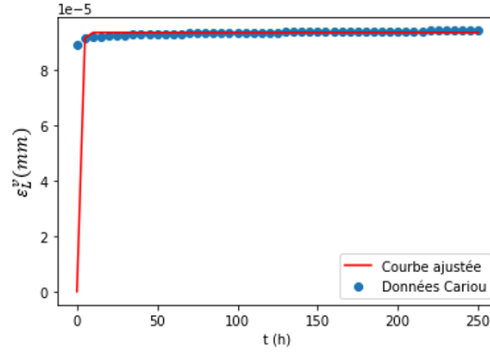


Fig. 2 : Évolution de la déformation viscoélastique longitudinale en fonction du temps

Nous ne connaissons que très peu les paramètres viscoélastiques pour les autres directions. Selon Guitard (1987), nous supposons dans un premier temps que les facteurs d'orthotropie (C_i , Eq. 4) restent constants au cours du temps selon les directions, en considérant les degrés d'anisotropie connus en élasticité. Sur la base de ces hypothèses, les modules de Young ainsi que les modules de cisaillement seront exprimés en fonction de E_L^0 ou E_L^1 comme présenté équation (4).

$$\frac{E_R^0}{E_L^0} = \frac{E_R^1}{E_L^1} = C_1 ; \frac{E_T^0}{E_L^0} = \frac{E_T^1}{E_L^1} = C_2 ; \frac{G_{TR}^0}{E_L^0} = \frac{G_{TR}^1}{E_L^1} = C_3 ; \frac{G_{LR}^0}{E_L^0} = \frac{G_{LR}^1}{E_L^1} = C_4 ; \frac{G_{LT}^0}{E_L^0} = \frac{G_{LT}^1}{E_L^1} = C_5 \quad (4)$$

avec C_i : constantes dépendantes du bois étudié.

Également par manque de données, le rapport τ_α^1 du modèle de Kelvin Voigt est considéré dans cette première phase comme constant et identique dans toutes les directions ($\tau_\alpha^1 = \tau_L^1$), τ_L^1 étant le seul déterminé suivant la direction longitudinale. La matrice de complaisance viscoélastique pour le cas orthotrope peut s'écrire de façon simplifiée suivante :

$$[C^v] = \left(1 - e^{-t/\tau_L^1}\right) \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L^1} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T^1} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T^1} & \frac{1}{E_T^1} & \frac{-\nu_{TR}}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R^1} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^1} & \frac{1}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{LT}^0 \cdot E_L^1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{LR}^0 \cdot E_L^1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{TR}^0 \cdot E_L^1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cette matrice de complaisance viscoélastique $[C^v]$, avec les hypothèses de l'équation (4), s'exprime alors en fonction de la matrice de complaisance élastique par la relation suivante :

$$[C^v] = \frac{\left(1 - e^{-t/\tau_L^1}\right) \cdot E_L^0}{E_L^1} [C^e] \quad (6)$$

Cette proposition de modèle sera implémentée sous Cast3M développeur. L'extension du modèle viscoélastique au bois de construction consiste à intégrer la variation locale des propriétés élastiques due à la présence des nœuds (variation de l'orientation des fils du bois). La distribution de ces propriétés est déterminée à l'aide des formules de Guitard (1987). Le modèle géométrique d'une poutre en bois avec ses nœuds est créé sur Cast3M (Rebhi, 2024). Une fois le maillage réalisé, nous pourrions étudier le comportement macroscopique des poutres de structures idéalisées. Le modèle sera ensuite testé sur plusieurs configurations d'hétérogénéités.

Protocole expérimental

Avant les essais de fluage, la variation de la pente de fils est mesurée à l'aide d'un dispositif laser (Xyloprofil) qui projette une ligne de points laser perpendiculaire à l'axe longitudinal du bois, tout en déplaçant le faisceau longitudinalement (Fig. 3). Ensuite, la poutre sera modélisée en intégrant les pentes des fils dans le modèle viscoélastique, à l'aide du modèle développé par Rebhi dans le cadre de sa thèse (Rebhi 2024). Ce modèle permet de déterminer la variation locale des propriétés élastiques due à des nœuds (Fig. 4).



Fig. 3 : Scan du bois avec le Xyloprofil et mesure de la variation de la pente de fil (Rebhi et al 2023)

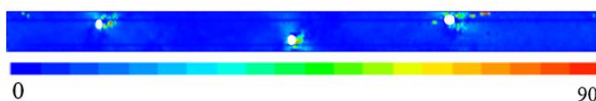


Fig. 4 : Exemple de cartographies d'angles d'orientations des fils d'une face d'une poutre de pin maritime

Pour valider les estimations par simulation numérique, des essais sous charge constante seront effectués sur des éléments en bois massif. Ces essais seront réalisés sous un environnement contrôlé, dans une enceinte climatique de 20 m², où la température et l'humidité relative de l'air seront contrôlées. La charge appliquée correspondra à 85% de la contrainte à la rupture, déterminée à partir du modèle d'endommagement. Ce niveau de charge a été choisi afin de réduire la durée des essais de fluage. L'analyse post essais des champs de déformation avec le modèle numérique sera réalisée au niveau de la nodosité pour étudier la pertinence des modèles implémentés qui seront ensuite modifiés si non convergence modèle-essais.

Conclusion

Cette recherche représente la première phase de la thèse dédiée à la modélisation du comportement viscoélastique du bois massif qui présente des défauts. Elle met en évidence les données essentielles et propose une loi de comportement ainsi que le protocole expérimental nécessaire pour réaliser et valider les simulations. En conclusion, un modèle d'endommagement anisotrope à long terme pour le bois massif sera développé, apportant une contribution originale dans le domaine de bois de construction, puisque le sujet de l'endommagement-fluage du bois massif avec des défauts est traité que très rarement.

Références

- Rebhi A (2024) Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : Application au bois massif, thèse de l'université de Bordeaux.
- Cariou J-L (1987) Caractérisation d'un matériau viscoélastique anisotrope : le bois, thèse de l'université Bordeaux 1.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, édition Cépaduès, 238p.
- Rebhi A, Chaplain M, Coureau J-L, Perez C (2023) Damage model for a biosourced heterogeneous material: application to timber, World Conference on Timber Engineering 19-22.06.23, Oslo, Norway, p. 209–215.