

Comportement à long terme des porteurs verticaux en bois feuillu : caractérisation expérimentale et modélisation thermo-hygro-mécanique

HOUNDJE Jean-Mario¹, LEMAITRE Romain², POP Octavian¹, DUBOIS Frédéric¹

¹ Université de Limoges, Campus Universitaire d'Egletons, Laboratoire de Génie Civil
Diagnostic et Durabilité, Egletons, France

² Centre d'Essais au Feu du CERIB, Épernon, France

jean-mario.houndje@unilim.fr

Mots clefs : Porteurs verticaux, feuillus, fluage, viscoélasticité, comportement en service, couplage thermo-hygro-mécanique, ingénierie du bois.

Contexte et objectifs

Le recours croissant au bois dans la construction, et en particulier au bois feuillu, répond à la fois à des enjeux environnementaux et à la volonté de valoriser les ressources locales et prospérer l'ingénierie du bois. Cependant, la durabilité et la fiabilité à long terme des structures bois nécessitent une compréhension approfondie des phénomènes différés, notamment le fluage. Sous charge permanente, les porteurs verticaux subissent une déformation progressive liée à la nature viscoélastique du matériau. Ce comportement est fortement influencé par les gradients hydriques et de température qui modifient les propriétés mécaniques et accélèrent ou freinent les déformations différées. Or, en dehors des éléments en flexion de résineux, l'Eurocode 5 n'inclue pas les problématiques de fluage pour les éléments en compression et encore moins pour des feuillus. Si des études ont depuis été réalisées pour les résineux en compression (Dubois et al 2023) dans le cadre d'un financement ADIVbois, il reste à étudier le comportement en compression des feuillus. L'objectif de ce travail est donc de caractériser le comportement au fluage des porteurs verticaux en bois feuillu (chêne et hêtre) tout en le comparant à un bois résineux de référence (épicéa), et d'analyser l'influence des transferts de masse et de chaleur sur ce comportement, en vue d'alimenter un modèle prédictif couplé thermo-hygro-mécanique (Dubois 1997).

Matériel et méthode

Cette étude repose initialement sur la conception et la réalisation de quatre bancs de fluage. Ce dispositif a été étudié afin d'appliquer une force de compression constante de 175 kN (correspondant à 30 % de la contrainte résistante de calcul au sens de l'Eurocode 5 (EC5, 2005) à l'état limite ultime) sur des éléments en lamellé-collé de section réduite (section 80 mm × 250 mm et longueur 750 mm). Les hypothèses initiales reposent sur l'emploi de feuillus de classe D50. Les bancs de fluage, accueilleront 5 échantillons en série. Cinq poteaux de hêtres, dix de chênes ainsi que cinq échantillons d'épicéa seront testés dans une arche climatique régulée à une température de 20 °C et une humidité relative de 65 % afin de se placer dans un contexte de classe de service 1 au sens de l'Eurocode 5 (EC5, 2005) (Fig. 1). Le chargement est généré par un vérin hydraulique garantissant la stabilité de l'effort sur de longues durées.

Les déformations axiales sont mesurées via deux capteurs résistifs de déplacement (base de mesure de 500 mm) connectés à une chaîne d'acquisition Almemo.

Les échantillons fabriqués et usinés dans des conditions standardisées par l'entreprise SIMONIN (Montlebon, 25). Ces échantillons sont ensuite conditionnés dans l'arche climatique afin de stabiliser leur humidité avant mise en charge.



Fig. 1 : Conditionnement des pièces de bois en vue d'une stabilisation de leur état à 65 % d'humidité et 20 °C

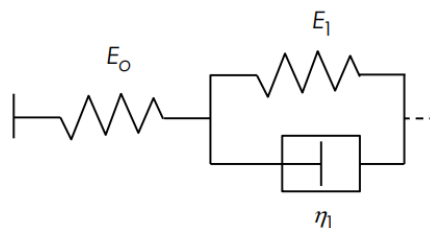


Fig. 2 : Modèle viscoélastique de Kelvin-Voigt Généralisé

Premiers résultats

Un travail bibliographique a été mené pour analyser les approches existantes de modélisation du fluage du bois en s'appuyant sur des publications de référence dans le domaine de la viscoélasticité appliquée aux matériaux anisotropes hygroscopiques. L'expérience du laboratoire dans ce domaine nous a très rapidement conduit vers l'utilisation d'un modèle de Kelvin-Voigt généralisé limité à une représentation unidirectionnelle du fluage (Fig. 2). Ses qualités en font un outil robuste pour l'analyse à long terme des porteurs verticaux en bois feuillu et répondent ainsi à nos besoins d'analyse.

Objectifs de la modélisation

- Décomposer la réponse différée du modèle de Kelvin-Voigt par deux composantes élastiques (E_0 et E_1) et une composante visqueuse (η_1).
- Optimiser les paramètres du modèle sur les phases de fluage et de recouvrance.
- Réaliser des extrapolations fiables au-delà de la durée des essais initiaux pour obtenir une réponse en fluage correspondant à des charges permanentes (au-delà de 50 ans de durée de charge).

Méthodologie de traitement des données

Les résultats expérimentaux en déformations permettent une identification des paramètres du modèle de Kelvin-Voigt généralisé employant 3 cellules de base permettant une interpolation des résultats expérimentaux sur la base d'une durée de chargement de deux années.

Résultats et extrapolations

L'application du modèle Kelvin-Voigt aux données préliminaires permet de :

- Reproduire avec une précision satisfaisante la phase de fluage primaire.
- Reproduire la phase de recouvrance après déchargement, mettant en évidence la part réversible des déformations. Moyennant la fonction de fluage y affectée et selon le nombre de cellule de Kelvin-Voigt (Dubois et al 2023, 2012, Varnier 2019).

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_i} (1 - \exp^{-\lambda_f(t)}) + \frac{1}{E_j} (1 - \exp^{-\lambda_r(t)})$$

$J(t)$: fonction de fluage

E_0 : Paramètre de raideur à l'état initial

E_i : paramètre de raideur calé en zone de fluage à déterminer

E_j : paramètre de raideur calé en zone de recouvrance à déterminer

λ_f : Paramètre de viscosité affecté à une cellule en zone de fluage

λ_r : Paramètre de viscosité affecté à une cellule en zone de recouvrance

Le principe du modèle consiste à partir des données recueillies pour identifier les paramètres du Kelvin-Voigt. En effet, chaque cellule du Kelvin-Voigt conduit et régit les temps de chargement de (t) , de manière à ajuster au mieux la durée des phases de chargement conformément aux classes définies par l'Eurocode 5. A partir des données recueillies, la raideur initiale est retrouvée. Par méthode de décomposition spectrale, les propriétés mécaniques de Kelvin Voigt sont calculées permettant une bonne interpolation des résultats expérimentaux (Fig. 3). Ce n'est qu'après cette étape qu'intervient le processus d'extrapolation logarithmique à long terme (Fig. 4).

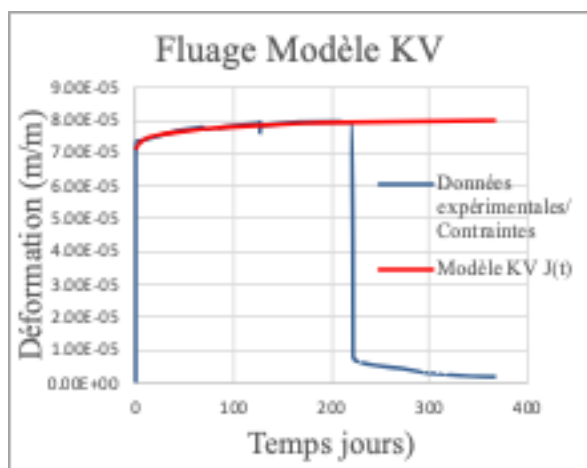


Fig. 3 : Ajustement d'un modèle de fluage aux données expérimentales avec recouvrement

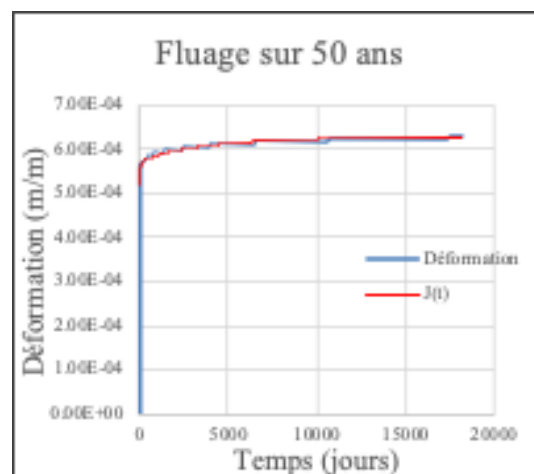


Fig. 4 : Extrapolation d'une expérience de 1 an à 50 ans

Banc de fluage

Pour réduire les coûts tout en conservant la précision des mesures, notre équipe a conçu un banc capable de mettre en charge simultanément cinq échantillons disposés en incluant un système anti-dévers connecté à chaque élément. La charge est appliquée par un vérin hydraulique unique, avec transmission en série via des entretoises assurant la séparation et la répartition uniforme des efforts. Les dimensions ont été calculées pour éviter le flambement des poteaux et limiter le déplacement global du bâti d'une dizaine de millimètres. Ce montage multi-échantillons, instrumenté pour un suivi thermo-hygro-mécanique continu, permet des essais de longue durée à coût réduit et à rendement expérimental élevé (Fig. 5).

Conclusion et perspectives

La mise au point d'un dispositif expérimental capable de reproduire fidèlement les sollicitations réelles et de suivre en continu les paramètres thermo-hygro-mécaniques constitue une avancée majeure pour l'étude à long terme du comportement différé des porteurs verticaux en bois feuillu. Les premiers résultats obtenus avec le modèle de Kelvin-Voigt, implémenté dans un outil de calcul dédié, montrent une capacité à reproduire les phases de fluage primaire et secondaire ouvrant la voie à des prédictions fiables sur plusieurs décennies. Cette approche intégrée, combinant expérimentation à grande échelle et modélisation paramétrique, fournit des bases solides pour optimiser le dimensionnement des structures bois et renforcer leur durabilité en service.

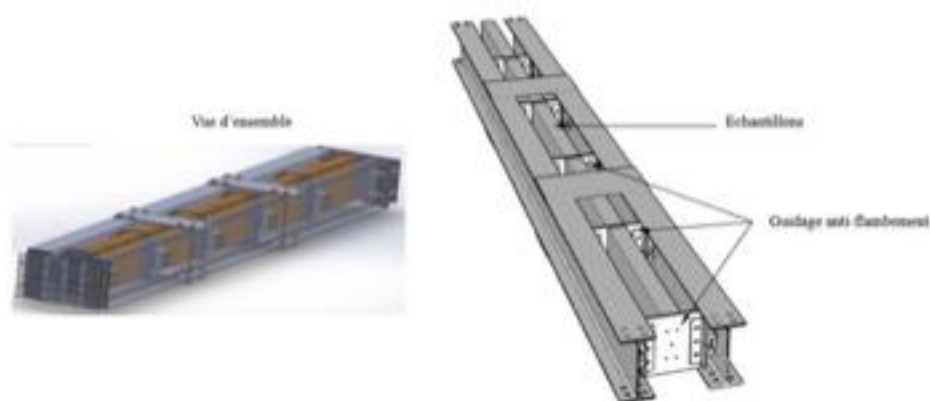


Fig. 5 : Visualisation du banc de fluage

Remerciements

L'ensemble de ce travail expérimental est intégré dans le projet Pot-Eau_Feu soutenu par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet SIC « Soutien à l'innovation dans la construction matériaux bois, biosourcés et géosourcés » du plan d'investissement France 2030. Nous remercions ainsi l'ADEME pour son soutien financier. L'ensemble de la campagne expérimentale est soutenu par l'équipe technique du campus universitaire de Génie Civil d'Egletons.

Références

- Dubois F (1997) Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissures : Application au matériau bois, Thèse de doctorat, Université de Limoges,
- Dubois F, Pop O, Dopeux J, Metrope M. (2023) Long-term behavior of timber columns, Experimental and numerical protocols, Engineering Structures,
- Dubois F., Sauvat N., Manfoumbi N. (2012) Modeling of the viscoelastic, mechano-sorptive behavior in wood, Mechanics of Time Dependent Materials,
- EC5 (2005), NF EN 1995-1-1, Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments
- Varnier M (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus, Thèse de doctorat, Université de Limoges.