

Analyse de la complaisance du bois dans des essais de fluage multi-paliers

BONTEMPS Arthur^{1,2}, GODI Gaël¹, MOUTOU PITTI Rostand^{1,3}, FOURNELY Eric¹,
GRIL Joseph^{1,4}

¹Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

²Univ Lyon, ECAM LaSalle, LabECAM, 40 Montée Saint Barthélémy, Lyon Cedex 05, 69321, France

³CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

⁴Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000, Clermont-Ferrand, France
arthur.bontemps@ecam.fr

Mots clefs : Fluage du bois, complaisance, Eurocode 5

Contexte et objectifs

Le fluage des éléments de structure en bois est un élément déterminant de la construction bois dans la mesure où il impacte drastiquement le dimensionnement et la durée de vie de la structure. Néanmoins, le fluage du bois est encore imprévisible tant il dépend de nombreux paramètres : teneur en eau initiale, variation d'humidité relative ou de température, niveau de chargement, angle de fil, etc. (Morlier et al. 2007).

Le dimensionnement des structures bois en France est défini par certaines dispositions de l'Eurocode 5, qui se sert essentiellement de deux facteurs pour inclure le fluage dans le calcul de flèche et de la résistance à long-terme : le k_{def} et le k_{mod} (AFNOR 2005). Autant ces facteurs sont relativement simples à utiliser pour des bureaux d'étude, autant ils sont très approximatifs et inadaptés dans certaines situations. Par exemple, lorsqu'un élément de structure en bois est chargé à une teneur en eau initiale supérieure à 20% et soumis à une classe de service 3, le k_{def} est augmenté de 1. Cette augmentation est critiquée et jugée arbitraire par la communauté des charpentiers traditionnels, qui s'accommode et même recherche encore le bois vert pour la construction (Bontemps 2023). Également, le choix du k_{def} est indépendant d'une éventuelle exposition au soleil ou de l'angle de fil, alors que ces éléments influent considérablement le fluage (Granello et Palermo 2019). Enfin, le facteur k_{def} ne tient pas compte des éventuelles réservations dans le bois, qui pourrait coupler le fluage et la fissuration (Jockwer et al. 2014).

Dans ce contexte, il paraît donc pertinent de réaliser des essais de fluage sur des poutres entaillées à l'échelle d'élément de structure en environnement variable, cas de figure où le k est lacunaire. Cet article présente l'analyse d'essais de fluage multi-paliers dans laquelle une tentative d'estimation de k_{def} est proposée.

Matériel et méthode

Essais de fluage multi-paliers sur des poutres entaillées soumises à un environnement variable

Des essais de fluage en flexion 4 points ont été réalisés dans le cadre d'une campagne expérimentale visant à déterminer le comportement à long-terme de poutres entaillées en sapin pectiné, soumises à un environnement extérieur et à différentes teneurs en eau initiales. Les poutres ont été chargées à des états partiellement séchés, dont à des teneurs en eau supérieures au point de saturation des fibres. Elles sont en dimensions d'emploi : $4000 \times 175 \times 63\text{mm}^3$. Le dispositif expérimental est montré en Fig. 1. Il est en environnement extérieur semi-abrité,

c'est-à-dire abrité de la pluie mais pas du rayonnement solaire. Le chargement appliqué consiste en des blocs de béton imperméables de 350 kg, incrémentés de 30 kg chaque mois pendant 5 mois puis chaque jour, de sorte que la durée d'un essai ne dépasse jamais 7 mois. On parle ainsi d'essais de fluage multi-paliers. 18 essais ont été réalisés : 6 en hiver et 12 en été.

Les poutres étant entaillées, ces essais impliquent du fluage et de la fissuration, le but premier de cette campagne expérimentale étant d'observer et analyser le couplage entre ces deux processus physiques pour des teneurs en eau initiales variables.

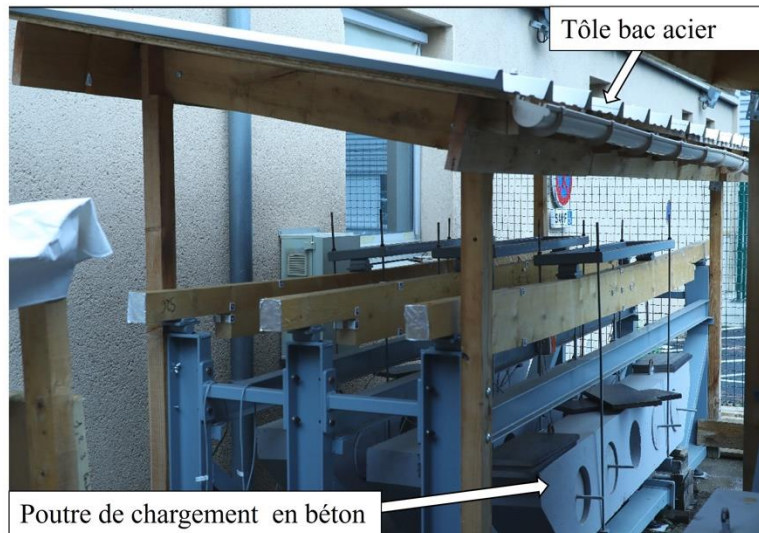


Fig. 1 : Photo de trois poutres chargées en fluage multi-paliers.

Analyse de la complaisance et estimation d'un k_{def}

Des capteurs LVDT mesurent la flèche centrale au cours de ces essais, et une méthode de suivi de marqueurs mesure les propagations de fissure et les retrait-gonflements (Bontemps et al. 2023). L'équation reliant la flèche centrale et la complaisance apparente découle de l'équation d'Euler-Bernoulli en théorie des poutres :

$$\frac{d^2u}{dx^2} = J^* \times \frac{M_z(x)}{I_z(x)} \quad (1)$$

Avec u la flèche, x la variable dimensionnelle, J^* la complaisance apparente, M_z le moment fléchissant autour de l'axe z et I_z le moment quadratique autour de l'axe z . Un schéma du chargement en flexion 4 points d'une poutre entaillée est illustré en Fig. 2. L'évolution du moment fléchissant et d'éventuelles propagations de fissures y sont représentés : C_{Ll} , C_{Hl} , C_{Lr} , C_{Hr} correspondent aux longueurs et hauteurs de fissures à gauche et à droite, respectivement.

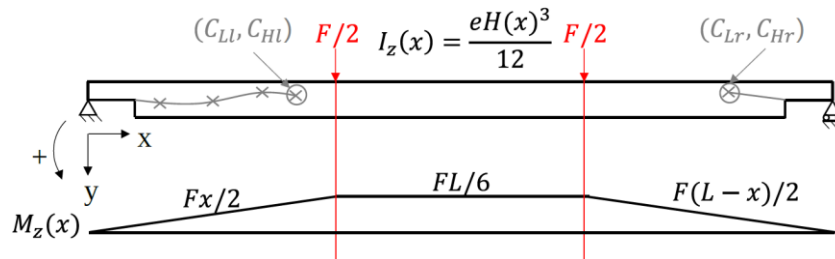


Fig. 2 : Schéma d'une poutre entaillée chargée en flexion 4-points et subissant une propagation de fissure asymétrique.

En considérant les propagations de fissure comme de simple réduction de hauteur, il est possible de les prendre en compte dans le calcul de flèche en actualisant la hauteur de la poutre dans le calcul de l'inertie I_z . Cette dernière devient dépendante de x . Dans ce travail l'équation (1) est résolue par approximation à l'aide de la méthode des différences finies. La complaisance apparente ainsi obtenue $J^*(t) = \varepsilon(t)/\sigma(t)$, avec ε et σ respectivement la déformation normale et la contrainte normale, ne correspond pas à la complaisance réelle J définie dans l'équation :

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 + \sum_{i=1}^N J(t - t_i) \Delta \sigma_i \quad (2)$$

Dans le cas d'un chargement complexe, comme c'est le cas en construction ou en chargement multi-paliers, cette complaisance J doit être modélisée. Les seules complaisances calculables par des mesures sont la complaisance apparente J^* et $J^{**} = \varepsilon(t)/\sigma_0$. Toutefois, J^* est inférieure à la complaisance réelle car le temps écoulé entre chaque incrément de charge est plus faible que le temps écoulé depuis le début de l'essai, or le fluage ralentit au moins jusqu'à la fin de la phase 2 (Granello et Palermo 2019). A l'inverse, J^{**} est supérieure à J car la contrainte réelle est supérieure à σ_0 en fluage multi-paliers. Il vient l'inégalité suivante :

$$J^*(t) < J(t) < J^{**}(t) \quad (3)$$

La loi de comportement viscoélastique d'un bois en fluage, décrivant la complaisance J , peut être représentée par des modèles rhéologiques (Bardet 2001), des lois puissances ou des relations linéaires entre complaisance et logarithme du temps (Holzer et al. 1989). Cette dernière représentation est choisie ici. Une évolution logarithmique de la complaisance est en accord avec des résultats expérimentaux à long terme (Hunt 2004) :

$$J_m(t) = J_0 \left(1 + \beta \log \left(\frac{t}{\alpha} \right) \right) \quad (4)$$

La complaisance apparente peut-être estimée par :

$$J_m^*(t) = \frac{\varepsilon_m(t)}{\sigma(t)} = \frac{J_m(t) \cdot \sigma_0 + \sum_i J_m(t - t_i) \cdot \Delta \sigma_i}{\sigma_0 + \sum_i \Delta \sigma_i} \quad (5)$$

Les paramètres α et β sont ajustés en minimisant l'erreur entre J^* expérimental et J_m^* . A partir de là, k_{def} peut être estimé par $k_{def} = \beta \left(\log \left(\frac{t}{\alpha} \right) \right)$.

Résultats et discussion

En Fig. 3a sont représentées les évolutions de J^* et J_m^* pour une poutre chargée en été. Bien qu'approximatif, le modèle de complaisance suit la même évolution que les mesures expérimentales. En Fig. 3b est représentée l'évolution du k_{def} modélisé et il est comparé à la complaisance relative expérimentale $J_{rel}^*(t) = (J^*(t) - J_0)/J_0$.

En Fig. 4 est représentée le k_{def} estimé maximal atteint en fonction de la teneur en eau initiale pour les 18 poutres chargées en fluage. En théorie, une haute teneur en eau initiale accélère le fluage. La corrélation est mauvaise ($R^2 = 0,2$) bien que visible. Dans cette situation, le k_{def} proposé par l'Eurocode 5 est fixé à 3. La figure montre que celui-ci n'a jamais cette valeur, suggérant un surdimensionnement notamment pour le bois vert.

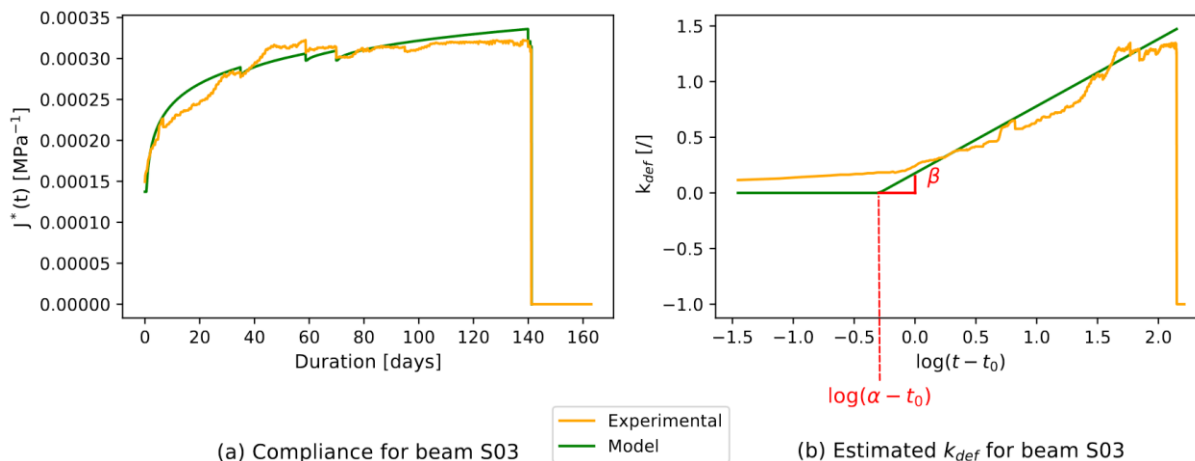


Fig. 3 : Pour une poutre, résultats de (a) la complaisance expérimentale et modélisée en fonction du temps écoulé ; (b) le k_{def} estimé et la complaisance relative expérimentale.

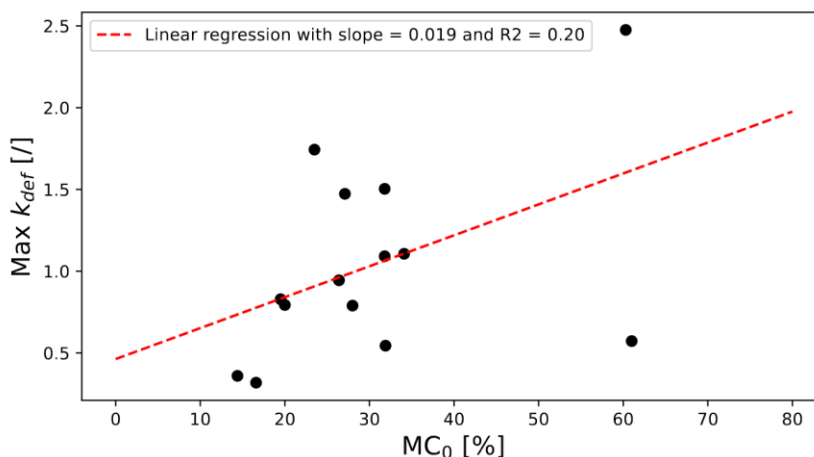


Fig. 4 : Evolution du k_{def} en fonction de la teneur en eau initiale des poutres MC_0 .

Conclusion et perspectives

Cet article propose une estimation du k_{def} pour des essais de fluage à chargement complexe et impliquant une propagation de fissure asymétrique. La méthode est appliquée à une campagne d'essais de fluage multi-paliers sur des poutres entaillées en dimensions d'emploi, en environnement extérieur et chargées à différentes teneurs en eau initiales.

La modélisation montre une bonne cohérence avec les mesures expérimentales et les k_{def} finaux obtenus sont tracés en fonction de la teneur en eau initiale de l'essai. La corrélation est mauvaise mais de nombreux autres facteurs influent sur le fluage (angle de fil, exposition au soleil ...). Il est notamment intéressant d'observer que les k_{def} obtenus sont toujours inférieurs à ceux proposés par l'Eurocode 5, encore plus pour des bois à haute teneur en eau initiale fortement pénalisés par cette norme.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Auvergne Rhône-Alpes pour la bourse CPER et les fonds du programme Hub-Innovergne de l'Université Clermont Auvergne.

Références

- AFNOR (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.
- Bardet S (2001). Comportement thermoviscoélastique transverse du bois humide : application à une essence tropicale dense, thèse de doctorat, Université de Montpellier, 232 p.
- Bontemps A (2023). Comportement mécanique des éléments de structure en bois de sapin pectiné soumis à un environnement variable., thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne, 263 p.
- Bontemps A, Godi G, Fournely E, Moutou-Pitti R, Gril J (2023). Implementation of an optical measurement method for monitoring mechanical behaviour, *Experimental Techniques*.
- Granello G, Palermo A (2019). Creep in timber: research overview and comparison between code provisions. *New Zealand Timber Design Journal*. 27(1). 6-22.
- Holzer M. S, Loferski R. J, Dillard A. D (1989), A review of creep in wood: concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures, *Wood and Fiber Science*, 21(4), 376-392 pp.
- Hunt D. G. (2004) The prediction of long-time viscoelastic creep from short-time data, *Wood Science and Technology*, 38: 479-492.
- Jockwer R, Steiger R, Frangi A (2014). State of the art review of approaches for the design of timber beams with notches, *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013068 (13 pp.).
- Morlier P et al. (2007). Creep in Timber Structures. RILEM report 8.