

## Comportement différé des porteurs verticaux aux états limites de service

DUBOIS Frédéric, POP Octavian

Université de Limoges, GC2D, UR 14477, 19 300 Egletons, France

[frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

**Mots clefs :** Essais de fluage, Viscoélasticité, Eurocode 5, Etat Limite de Service, Etat Limite Ultime

### Contexte et objectifs

Ce travail traite du comportement à long terme des éléments en bois dans une approche réglementaire touchant à la fois les états limites de service et ultimes. Les ouvrages en bois en service sont sujets aux effets de fluage dus principalement aux charges de longue durée telles que le poids propre. Ces effets différés s'expriment notamment par un comportement au fluage se traduisant, dans une approche Eurocode, par un coefficient d'amplification des déplacements à long terme (coefficient  $k_{def}$ ) et des coefficients minorateurs prenant en compte la classe de durée de charge. De récents travaux montrent que les effets de fluage à long terme dépendent de la nature de la sollicitation (flexion vs compression par exemple). Il est donc important d'avoir une maîtrise de ces coefficients pour concevoir des constructions innovantes en bois telles que des ouvrages d'art ou des bâtiments de grande hauteur. De plus, les effets de fluage impactent les paramètres de résistance à travers le coefficient  $k_{mod}$ . Il est donc nécessaire de déterminer, à l'aide d'essais de fluage ou à partir de données réglementaires, des valeurs de pondération prenant en compte, non seulement, la classe de service ou la classe de durée de charge mais également la nature de la sollicitation.

### Matériel et méthode

#### *Dispositif de chargement*

Du point de vue expérimental, ce travail repose sur un chargement en fluage de poteaux en bois lamellé-collé à échelle réduite (75 cm de hauteur,  $10 \times 20$  cm<sup>2</sup> de section transversale) de classe GL24h à une valeur de contrainte égale à 30% de la contrainte caractéristique en compression axiale correspondant à un effort de compression de 144 kN. Le banc de fluage, Fig.1 permet d'effectuer 5 répétitions de l'essai. Le chargement passif repose sur un déplacement imposé (vis de chargement) corrigé des effets de relaxation via un capteur de force. Le tout est placé dans une enceinte climatique régulée en température (20 °C) et en humidité relative (65% HR) pour se placer dans une configuration se rapprochant de la classe de service n°1 selon l'Eurocode 5.

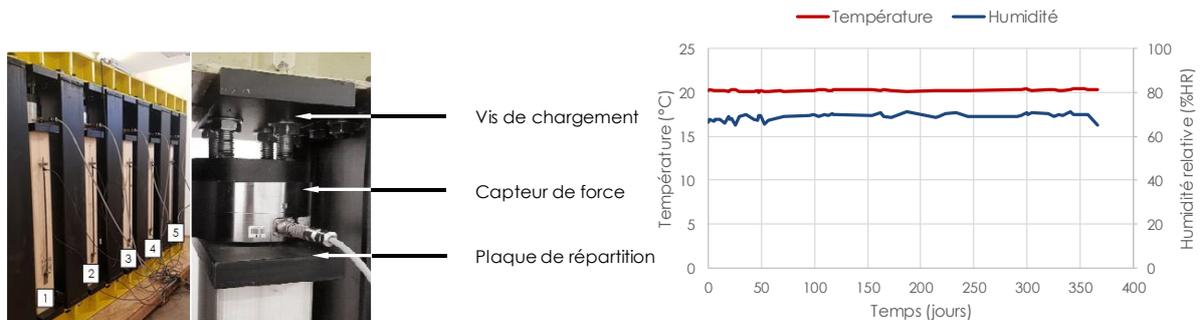


Fig. 1 : Dispositif de fluage, mesure de pression et régulation climatique

La déformation moyenne de fluage axiale est mesurée via un capteur de déplacement résistif sur une longueur de référence de 50 cm afin de moyenner la déformation sans subir les effets de bords dus aux contacts des plaques de répartition. Afin d'éliminer les effets de reprise d'humidité induits par le conditionnement des échantillons avant mise en charge, il a été préféré à un chargement de type fluage-recouvrance, Fig. 2. La temporalité des essais est d'une année.

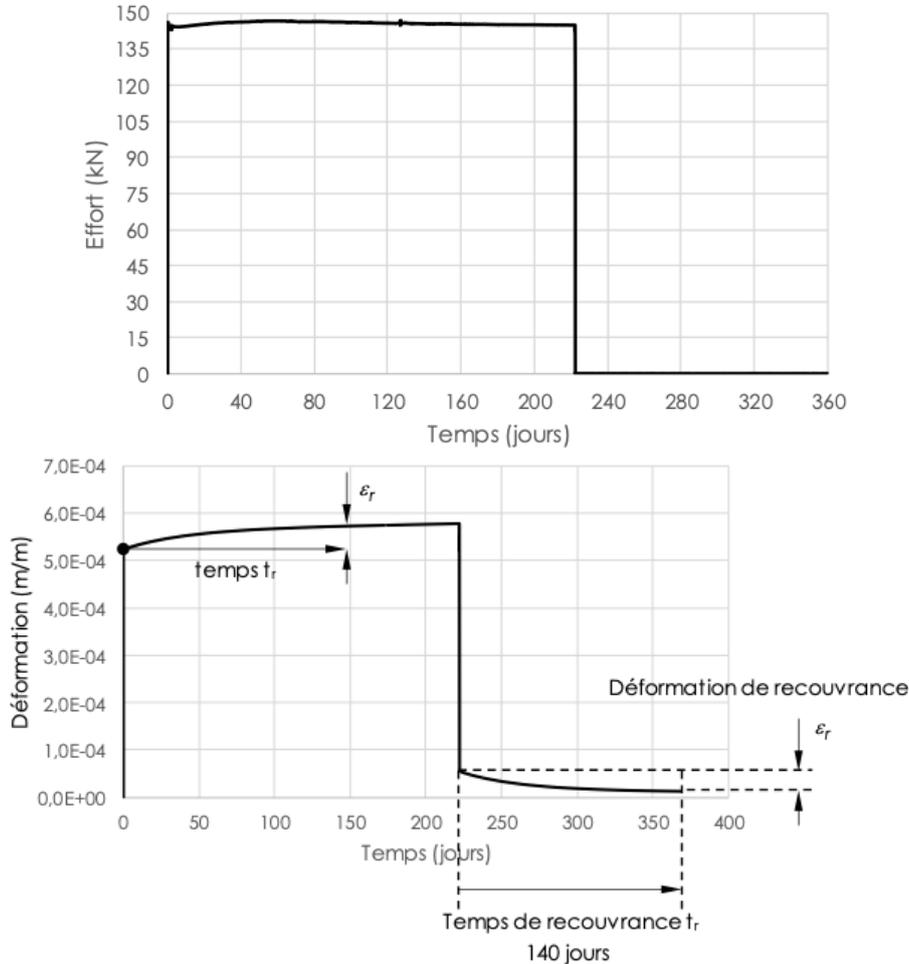


Fig. 2 : Principe de l'essai de fluage-recouvrance

### Analyse des données

Le comportement mécanique en fluage recouvrance repose sur le formalisme de Boltzmann qui permet de relier, dans une vision uniaxiale, la contrainte  $\sigma(t)$  et la déformation  $\varepsilon(t)$  selon l'expression suivante :

$$\varepsilon(t) = J(t-t_0) \cdot \sigma_0 - J(t-t_1) \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

où  $J(t)$  représente la fonction de fluage,  $t_0$  désigne le temps 'théorique' de début de chargement et  $t_1$  le temps de déchargement. La modélisation par décomposition spectrale est bien adaptée pour représenter un essai de fluage recouvrance (Dubois, 1997). Cette décomposition permet de représenter une fonction de fluage par l'expression suivante :

$$J(t) = \frac{1}{E_L} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^3 A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (2)$$

où  $E_L$  représente le module d'Young longitudinal instantané corrigé de l'humidité (Guitard, 1987),  $\lambda_m$  sont des constantes représentatives des temps caractéristiques de chaque terme de la

série fixés à 180, 240 et 360 jours. Dans ces conditions, une optimisation des paramètres des expressions (1) à (2) permet une bonne interpolation et un lissage des données expérimentales, Fig. 3.

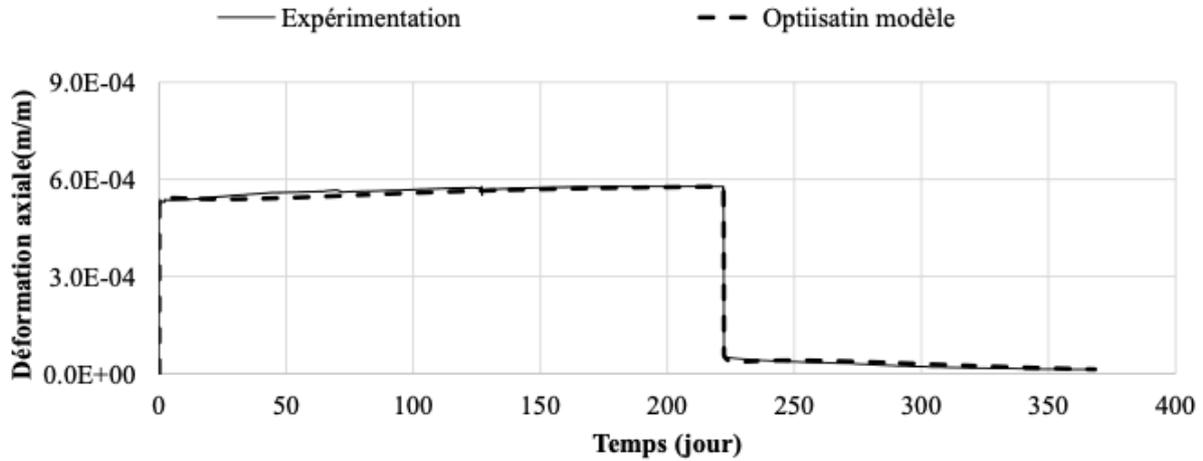


Fig. 3 : Interpolation par optiisatin modèle

Afin d'obtenir des données de fluage à 50 ans correspondant à la durée d'application d'une charge permanente, il est nécessaire d'établir une extrapolation de la fonction de fluage optimisée précédemment après une durée expérimentale d'une année. Pour cela, nous proposons d'utiliser une particularité du comportement viscoélastique linéaire. Pour des temps longs, au-delà du fluage primaire, l'évolution de la déformation en fonction du temps, dans une représentation Log/Log, tend vers une forme linéaire, telle que :

$$\ln(\varepsilon(t)) = a \cdot \ln(t) - b \quad (3)$$

Il est nécessaire, dans un premier temps, de définir la zone de linéarité afin d'en proposer une extrapolation, Fig. 4, ce qui permet de déterminer les valeurs optimales pour les coefficients de régression linéaire  $a$  et  $b$ .

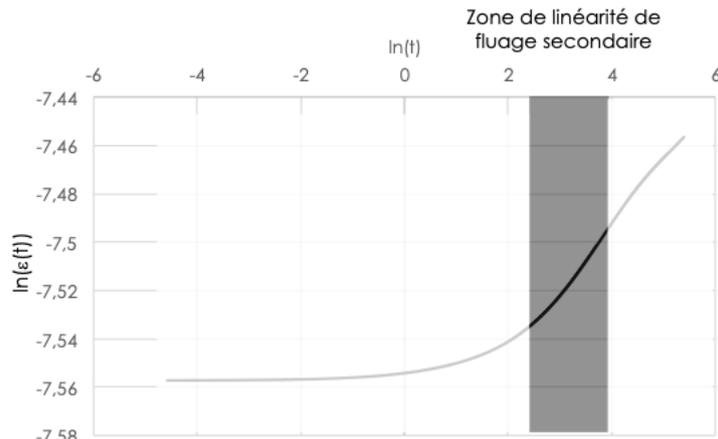


Fig. 4 : Zone de linéarité en phase de fluage secondaire

Une seconde décomposition spectrale repose sur une forme similaire à l'expression (3) en fixant les temps caractéristiques en accord avec les classes de durée de charge, à savoir, 7 jours, 6 mois, 10 ans et 50 ans (Dubois 2012, Varnier 2019) :

$$J(t) = \frac{1}{E_L} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^4 A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (4)$$

L'équation (4) permet de faire le lien avec le coefficient d'amplification de fluage  $k_{def}$ , selon l'expression suivante (équation 5) :

$$k_{def} = \sum_{m=1}^4 A_m \quad (5)$$

Les différents paramètres de l'équation (4) font l'objet d'une optimisation numérique dont les résultats sont présentés en Fig. 5 dans laquelle chaque point correspond au fluage déterminé pour chaque classe de durée de charge.

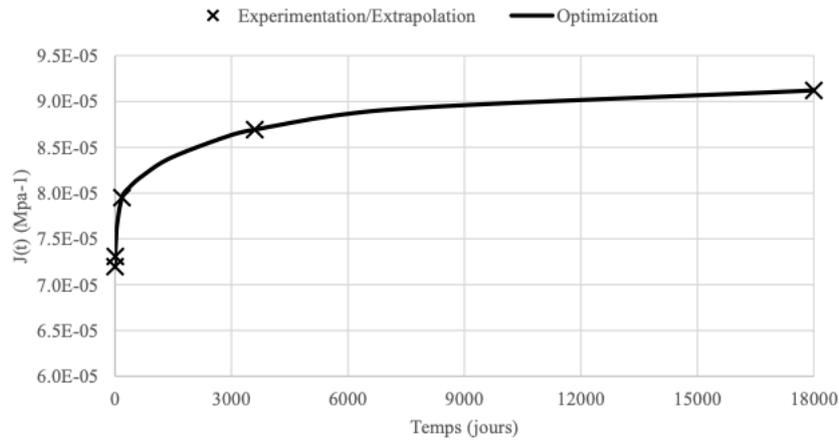


Fig. 5 : Fonction de fluage extrapolée à 50 ans

### Résultats et discussion

L'ensemble du protocole expérimental et d'analyse des données est appliqué au 5 échantillons testés. L'optimisation pilotée par l'équation (4) donne les valeurs de fluage à chaque classe de durée de charge (Tab. 1) permettant d'en déduire, d'une part, les constantes  $A_m$  et, d'autre part le coefficient d'amplification de fluage  $k_{def}$  (Tab. 2).

Tab.1 : Valeurs de fluage données en MPa<sup>-1</sup> selon les classes de durée de charge

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
1 semaine	$7,61 \cdot 10^{-5}$	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$7,31 \cdot 10^{-5}$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	$7,44 \cdot 10^{-5}$
6 mois	$7,90 \cdot 10^{-5}$	$7,70 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-5}$	$8,16 \cdot 10^{-5}$
10 ans	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-5}$
50 ans	$8,56 \cdot 10^{-5}$	$8,95 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-5}$	$9,10 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$

Tab.2 : Paramètres d'optimisation et valeurs de  $k_{def}$

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
$A_1$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$5,64 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$
$A_2$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$9,24 \cdot 10^{-2}$	$9,32 \cdot 10^{-2}$	$8,36 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$
$A_3$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$6,32 \cdot 10^{-2}$	$6,95 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$
$A_4$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$
$k_{def}$	0,16	0,29	0,27	0,28	0,28

Si nous faisons abstraction de l'échantillon n°1, nous observons 4 bonnes répétitions des résultats de l'analyse proposée. Pour des éléments en lamellé-collé de résineux, le coefficient  $k_{def}$  converge vers une valeur de 0.3, contre une valeur de 0.6 fixée pour les éléments en flexion.

## Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'identifier, après un an d'essais de fluage, le comportement à long terme des éléments en bois sous sollicitation de compression axiale. La sollicitation de fluage-recouvrance permet de mieux appréhender la mesure de la déformation instantanée à un mi-temps expérimental garantissant, de plus, une stabilisation de l'humidité interne dans l'enceinte climatique. Ce travail a permis également de montrer le potentiel de l'approche modèle et expérimentale dans l'opération d'extrapolation du comportement différé à 50 ans. Un traitement supplémentaire des données a permis de traiter la question du coefficient  $k_{mod}$  modulant la résistance de calcul en compression en fonction de la classe de durée de charge. Le travail réalisé s'est limité à une classe de service n°1 en relation de l'usage des porteurs verticaux dans des immeubles de grande hauteur. Cependant, pour être exhaustif, ce travail mérite d'être complété par une étude similaire à d'autres niveaux d'humidité (Varnier 2018). Également, les solutions architecturales retenues peuvent placer ces porteurs dans des conditions de faible humidité interne (effet de serre derrière des vitrages).

En termes de perspectives, la limitation des sections des porteurs verticaux (pour les premiers niveaux des immeubles de grande hauteur) demande de choisir des solutions en lamellé-collé avec des résistances caractéristiques plus élevées. Une solution consiste à utiliser des bois de la famille des feuillus. Le travail présenté pourra être employé pour étudier le comportement au fluage de porteurs verticaux de chêne ou de hêtre (Manfoumni 2012). Également, cette étude sera complétée par une étude du transfert hydrique en surface afin de mettre en exergue les risques de fissuration par séchage extrême. Cela fait l'objet des travaux amorcés dans le cadre du projet ADEME France 2030 intitulé « Pot-Eau\_Feu ».

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'association ADIVBOIS qui a financé cette étude et qui a permis d'ouvrir d'autres pistes exploratoires pour la valorisation de l'usage du bois dans de grands ouvrages comme les immeubles de grande hauteur.

## Références

- Dubois F (1997) Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : Application au matériau bois, thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 149 p.
- Dubois F, Husson JM, Sauvat N, Manfoumni N (2012) Modeling of the viscoelastic, mechano-sorptive behavior in wood, *Mechanics of Time Dependent Materials*, 16(4): 439-460.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, éd. Cépadués, 240 p.
- Manfoumni N (2012) Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement, thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 296 p.
- Varnier M, Sauvat N, Monterro C, Dubois F, Gril J (2018) Adaptation of Eurocode 5 standard to French hardwoods - Proposal of new hygroscopic equilibrium charts, 5th INTER meeting, Tallinn, Estonia, 13-16.08.2018.
- Varnier M (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 245 p.