

Identification de la variabilité des propriétés thermo-hydriques et mécaniques des feuillus en climat extérieur - Adaptation à l'Eurocode 5

Maximin Varnier, Nicolas Sauvat, Cédric Montero, Frédéric Dubois, Joseph Gril

▶ **To cite this version:**

Maximin Varnier, Nicolas Sauvat, Cédric Montero, Frédéric Dubois, Joseph Gril. Identification de la variabilité des propriétés thermo-hydriques et mécaniques des feuillus en climat extérieur - Adaptation à l'Eurocode 5. 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Jun 2018, Saint-Etienne, France. hal-01939537

HAL Id: hal-01939537
https://hal.science/hal-01939537

Submitted on 29 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Identification de la variabilité des propriétés thermo-hydriques et mécaniques des feuillus en climat extérieur - Adaptation à l'Eurocode 5

Maximin VARNIER [1], Nicolas Sauvat [1], Cédric Montéro [2], Frédéric Dubois [1], Joseph Gril [3]

[1] Univ. Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France ([*]@ : nicolas.sauvat@unilim.fr)

[2] LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

[3] Institut Pascal, CNRS, Univ. Clermont-Auvergne

RÉSUMÉ. Le bois est un matériau de construction souple et hygroscopique. La maîtrise des déformations différées sous charges des structures bois est nécessaire dans une approche d'ingénierie. La diffusion de l'eau dans le bois, comme l'influence des conditions hygrothermiques sur ses propriétés viscoélastiques, ont fait l'objet de nombreuses études. Cependant, ces développements expérimentaux ou de simulation sont aujourd'hui principalement limités aux bois de résineux. Ce travail de thèse, réalisé dans le cadre du projet ANR EFEUR5, a pour objectif de proposer une caractérisation complète de la sensibilité aux conditions d'ambiance d'essences de feuillues très présentes en France : chêne, hêtre, peuplier. Une identification par essence des propriétés de diffusion, et des essais de comportement différé à l'échelle métrique permettent d'alimenter des modèles mécaniques de comportement long terme implémentés dans le logiciel de calcul éléments finis tel que Cast3M.

ABSTRACT. Wood is a flexible and hygroscopic building material. The control of creep under loads of wood structures is necessary in an engineering approach. Diffusion of bound water into wood, as influence of hygrothermal conditions on its viscoelastic properties, have been subject of many studies. However, these experimental or simulation developments are today mainly limited to Softwoods. This PhD work, task of EFEUR 5 ANR project, aims to propose a complete characterization of sensitivity to ambient conditions of very present hardwood species in France: oak, beech, and poplar. An identification by essence of diffusion properties, and tests of creep behavior at metric scale make it possible to feed long-term mechanical models implemented under Castem

MOTS-CLÉS : Couplage thermo-hydrique, Comportement différé, Diffusion thermo-hydrique, Feuillus, Hygro-verrou, Viscoélasticité,

KEY WORDS: Creep behavior, Hardwoods, Mechanosorption, Thermo-Hydric Diffusion, Variable Atmosphere, Viscoelasticity,

1. Contexte et objectifs

L'Eurocode 5 [1] est la norme de dimensionnement des structures en bois en Europe. Elle propose la vérification d'Etats Limites de résistance (Ultimes) et de confort (en Service) par une approche semi probabiliste. Tous les développements, lois de comportement et valeurs des paramètres ont jusqu'à présent été majoritairement conduits à partir de l'étude des bois de résineux, sans réelle considération des potentielles spécificités des bois de feuillus [2] alors que la ressource forestière française est au deux tiers constituée de feuillus. La prise en compte des déformations différées se fait au travers d'un coefficient nommé k_{def}, qui traduit une augmentation forfaitaire de la déformation instantanée, en prenant en compte les conditions d'environnement, et la durée de chargement. Il couvre les effets de plusieurs phénomènes mécaniques : viscoélasticité hygro-activée, déformations hygro-thermiques ou encore couplages mécanosorptifs [3]–[5]. L'objectif de ces travaux de thèse est de montrer si les différences anatomiques, chimiques ou mécaniques des différentes essences de bois provoquent des effets différés notablement différents. Ce travail est une partie du projet ANR EFEUR5, qui étudie particulièrement les principaux bois de feuillus de la ressource forestière française (chêne, hêtre et peuplier) en vue de l'adaptation de l'Eurocode 5.

Pour quantifier les déformations hygro-thermiques, il est nécessaire de disposer d'un modèle de comportement permettant de prédire l'évolution du champs hydrique tri-dimensionnel au sein d'une poutre en bois de feuillus anisotrope soumise à une ambiance variable de température et d'humidité relative. Une approche analytique de la diffusion est ici présentée, avec les développements nécessaires à la prise en compte des effets induits par les variations de la température. Pour valider ce modèle une méthodologie de calibration expérimentale est proposée. Ce modèle est ensuite associé à un modèle mécanique intégrant l'ensemble des effets différés dans le bois [3]–[5]-[25]-[26]. L'association de ces deux modèles est utilisée par la suite pour déduire les propriétés mécaniques à long terme. Enfin afin de fournir une approche comparative, des essais de fluage sur des poutres de dimensions d'emploi sont présentés. Ils sont conduits sur différentes essences de feuillus et de résineux dans différentes ambiances climatiques.

2. Identification des coefficients de diffusion

Les matériaux hygroscopiques ont la capacité d'adsorber ou de désorber des molécules d'eau lorsqu'ils sont placés dans des ambiances humides ou sèches. Cela se traduit par des échanges entre eau liée et vapeur d'eau présente dans l'air environnant. En surface du matériau, ce processus est la cause des échanges surfaciques. Cette propriété est très liée à la vitesse du vent avoisinante [6]. Ensuite, au sein du matériau, ce processus est la cause de l'échange de molécules d'eau entre les cavités et le matériau induisant des perturbations énergétiques liées à la création ou la rupture de liaisons hydrogènes et de Van der Waals entre eau et molécules constitutives du matériau.

La majorité des modèles de transfert thermo-hydrique [4-6] sont établis à partir d'études en phase de séchage et réalisés sur des essais en ambiance contrôlée souvent isotherme. Mener des essais dans une enceinte climatique par exemple à température constante permet de négliger ou de simplifier l'influence de la température sur les paramètres de diffusion. La détermination des paramètres des isothermes de sorption et de diffusion par cette approche expérimentale est longue et couteuse. Cependant la modélisation des ouvrages en service impose de prendre en compte les effets couplés de la température sur l'état hygroscopique du bois. Nous proposons une méthode d'identification des paramètres de diffusion en ambiance de température et d'humidité variable, où les effets expérimentaux sont corrigés, et l'influence de la température prise en compte analytiquement.

2.1. Essai en ambiance non contrôlée

Les essais consistent à suivre la masse de deux éprouvettes, une pour la direction parallèle au fil et l'autre pour la direction perpendiculaire. La température et l'humidité relative sont mesurées. Les essais sont réalisés en extérieur dans des conditions avoisinant la classe de service 2 de l'Eurocode 5 (climat extérieur protégé des intempéries). Les éprouvettes de diffusion sont issues des mêmes pièces que les poutres utilisées pour les essais de fluage. Des échantillons de douglas complètent le plan d'expérience. Sur une même période de mesure, les deux éprouvettes permettent de mesurer la diffusion respectivement dans le sens transverse (Radial-Tangentiel), et dans le sens du fil du bois (Longitudinal). Les faces des autres directions sont isolées comme montré en Figure 1. Ces essais sont doublés en période estivale et hivernale.



Figure 1 . *Eprouvettes de dimension longitudinale (50 x 50 x 200 mm^3) et transversale (50 x 50 x 50 mm^3)*

Après un étalonnage de la mesure des balances pour corriger des effets de la température extérieure, et après détermination de la masse sèche des éprouvettes par séchage à 103,5°C, l'évolution de la prise de masse est obtenue pour chacune de ces éprouvettes (Figure 2). Ces évolutions sont conformes aux ratios de prise de masse trouvés dans la littérature [12], et sont utilisées pour le calage inverse des propriétés de diffusion.

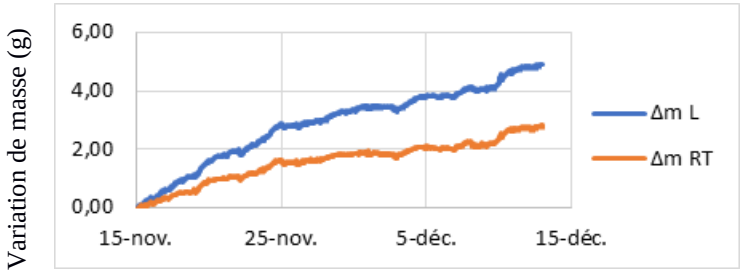


Figure 2 . *Evolution de la prise de masse pour des éprouvettes de chêne L et RT*

2.2. Les paramètres de diffusion hydrique en ambiance variable

La durée de l'essai sur un mois permet de déterminer les propriétés de diffusion de l'essence étudiée sur deux semaines. Le champ hydrique initial étant inconnu la première semaine sert au calage du modèle mais n'est pas utilisée pour l'identification numérique des paramètres de diffusion. Finalement une extrapolation sur la dernière semaine permet de tester la validité du protocole. La modélisation du transfert de masse et de chaleur est implémentée dans un code aux éléments finis (Cast3M) selon le modèle utilisé dans Laou et al. [7]. Une comparaison des résultats expérimentaux et du modèle est proposée en Figure 3.

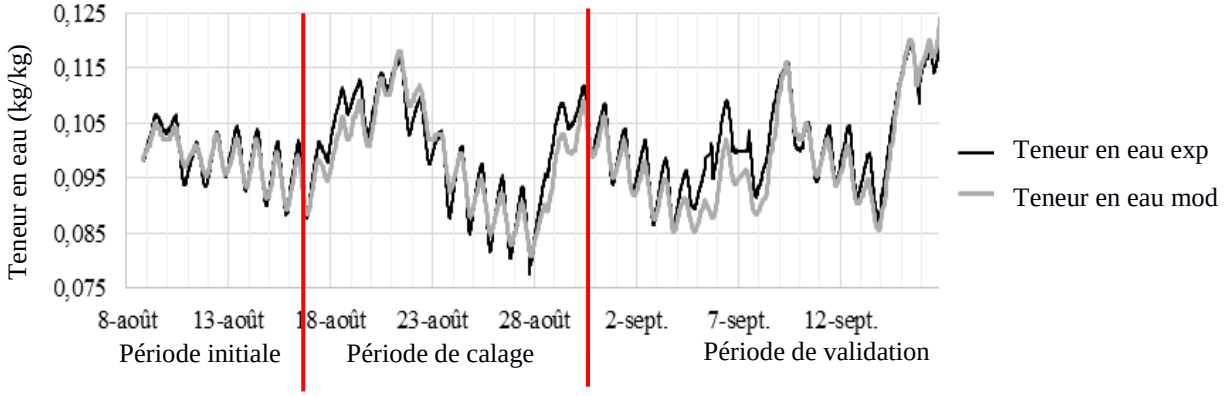


Figure 3 . *Evolution du w expérimental et modèle*

2.2.1. Coefficient de perméabilité apparente

Dans le domaine hygroscopique, l'eau peut se déplacer sous deux états : l'eau sous forme gazeuse au niveau des lumens et l'eau sous forme liée, c'est-à-dire par déplacement de molécules d'eau dans les parois cellulaires, pour le cas du bois [9]. Ainsi, dans ce domaine-là, l'équation de transfert hydrique a pour potentiel l'humidité relative HR en relation avec la loi de Fick (1).

$$\left(\rho_{anh}\cdot\frac{\partial w}{\partial HR}\right)\cdot\frac{\partial HR}{\partial t}=\vec{\nabla}\left(\delta^{*}\cdot p_{VS}\cdot\vec{\nabla}HR\right)+\vec{\nabla}\left(\delta_{V}\cdot Rh\cdot\vec{\nabla}p_{VS}\right) \quad (1)$$

Avec p_{vs} la pression de vapeur saturante, ρ_{anh} la masse volumique du bois anhydre, et δ_v et δ^* le coefficient de perméabilité vapeur et de perméabilité apparente respectivement.

La perméabilité apparente intègre la perméabilité vapeur et une correction dépendant de la teneur en eau [10], [11]. Pour traduire la non linéarité du comportement diffusif, Rosen [12] a proposé la forme mathématique suivante de la perméabilité apparente en condition isotherme :

$$\delta^* = \delta_V \cdot \exp(k \cdot w) \tag{2}$$

Cependant cette approche présente deux inconvénients majeurs :

- elle ne prend pas en compte l'influence de la température sur le coefficient de perméabilité
- les deux paramètres δ_v et k sont indépendants, mais ont une influence opposée [7].

Plusieurs travaux montrent que le coefficient de perméabilité était une fonction croissante de la température [9], [13]. Cette augmentation est reliée à la loi d'Arrhenius. De façon générale, cette loi permet de décrire l'influence de la température sur la variation de vitesse d'une réaction chimique. Dans notre cas, l'analogie de la fonction d'Arrhenius permet d'exprimer la perméabilité apparente du milieu sous la forme suivante :

$$\delta^* = \delta_O \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \tag{3}$$

Nelson [14] propose une méthode de détermination de l'énergie d'activation E_a, présentée sur la **Figure 4**

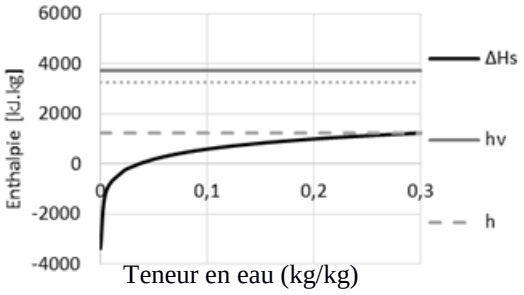


Figure 4 : *Décomposition des enthalpies lors du processus de sorption*

L'énergie d'activation E_a est égale à la différence entre la chaleur de sorption ΔHs et l'enthalpie de vaporisation de l'eau h_v, à laquelle il est retranché l'énergie interne caractérisée par le produit $C_{pv}.T$. Dans ces conditions, l'énergie d'activation s'exprime par :

$$E_a = L - \left(C_{pV} \cdot T\right) - H_S \tag{4}$$

Avec H_s l'enthalpie de sorption : $$H_s = L + \Delta H_s = L + A.\ln\left(\frac{w}{w_s}\right) \tag{5}$$

L représente la chaleur latente de vaporisation et ΔH_s la chaleur de sorption. Quant à A c'est un coefficient de calage qui dépend du cycle de sorption (respectivement en adsorption A_{ad} et en désorption A_{de}), w la teneur en eau et w_s la teneur en eau de saturation (aussi appelé Point de Saturation des Fibres).

Par simplification, [15] propose une forme linéaire en fonction de la teneur en eau telle que, pour une température de 20°C, et pour une ten8ur en eau allant de 5 à 25%:

$$E_a = 2266 - 2368.w \tag{6}$$

Finalement, les expressions (3),(4) et (5) permettent d'écrire la dépendance de la perméabilité en fonction de la teneur en eau et de la température comme ci-dessous, et représenté sur la Figure 5:

$$\delta^* = \delta_O \cdot \exp\left(\frac{\left(C_{pV} \cdot T\right) + \Delta H_S}{R \cdot T}\right) \tag{7}$$

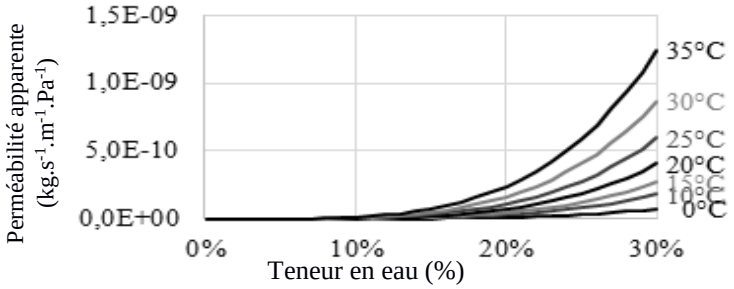


Figure 5 : *Perméabilité apparente en fonction de T et w*

Cette approche présente deux avantages majeurs : tout d'abord elle permet de prendre en compte l'influence de la température sur la perméabilité apparente, et elle permet de différencier les essences à travers la chaleur de sorption.

2.2.2. *Isotherme de sorption*

Les isothermes de sorption représentent l'équilibre de l'humidité interne du matériau en fonction de l'humidité relative environnante HR. Il existe dans la littérature plusieurs explications phénoménologiques permettant de déterminer la teneur en eau d'équilibre pour un couple de température et d'humidité [9], [16] ou thermodynamiques [17]. Cette dernière approche propose une relation logarithmique entre la teneur en eau et l'humidité relative :

$$\ln\left(\frac{w}{w_S}\right) = \phi \cdot \ln(HR) \cdot \exp(\alpha \cdot HR) \tag{8}$$

Cependant la plupart des travaux réalisés sur les isothermes de sorption sont réalisés à température constante (souvent proche de 20°C). Or l'équilibre hygroscopique est dépendant de la température, on parle alors de diagramme d'équilibre hygroscopique. C'est ainsi que l'Eurocode 5 propose un diagramme d'équilibre hygroscopique basé sur des essais de séchages de résineux [18].

Plusieurs travaux [18], [19] ont proposé une première correction touchant particulièrement l'humidité d'équilibre w_s à 100% d'humidité relative. A partir d'une approche phénoménologique, Perré propose une relation linéaire entre la teneur en eau de saturation et la température :

$$w_S = 0{,}598 - 10^{-3} \cdot (T + 273) \text{ avec T exprimé en °C} \tag{9}$$

En accord avec les travaux de Frandsen (2007), nous abordons cette question sous l'angle des échanges thermodynamiques dont la température représente un catalyseur selon le principe de Le Chatelier. Ainsi l'équilibre énergétique entre la variation d'énergie, lors d'une fluctuation de température, et l'énergie induit par la chaleur de sorption permet d'écrire la relation suivante :

$$w_S(T) = \left(w_S^o + \frac{C_{anh}}{C_w}\right) \cdot \exp\left(-\frac{C_w}{L} \cdot T\right) - \frac{C_{anh}}{C_w} \tag{10}$$

w_s^0 représente la teneur en eau de saturation à la température T = 0°C. Enfin, pour des applications du Génie Civil, nous supposons que, dans les plages hydriques et thermiques, les capacités calorifiques du bois anhydre C_{anh} et de l'eau C_w ainsi que la chaleur latente de vaporisation de l'eau L sont des propriétés insensibles à la température du milieu.

En prenant en compte les propriétés thermodynamiques de chaque essence, le modèle proposé intègre la dépendance de w_s à la température pour chaque essence. La Figure 6 illustre la comparaison entre la fonction linéarisée par Perré, le modèle thermodynamique proposé, et à la relation de w_s à la température déduite de l'abaque de l'EC5 pour HR = 100%. Ainsi, la relation étant similaire, le modèle proposé permet de construire les diagrammes d'équilibre hygroscopique pour chaque essence, résineuse ou feuillue, et selon le cycle de sorption.

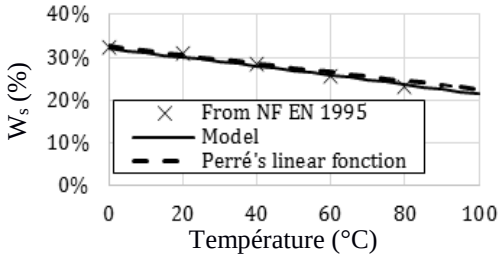


Figure 6 : *Teneur en eau de saturation vs température*

2.3. Méthodologie d'identification des paramètres

L'identification des paramètres de diffusion se fait à partir d'un algorithme d'optimisation de type Simplexe [21]. Afin de réduire leur nombre, une simplification des isothermes de sorption enveloppe est proposée. De nombreuses données sont proposées dans la littérature, que ce soit pour des essences de bois, ou d'autres matériaux hygroscopiques [22], [23]. Plusieurs phénomènes physiques vont différencier ces isothermes, le premier étant la teneur en eau de saturation w_s, puis l'aire d'hystérésis, et enfin la forme de l'isotherme comme le décrit Skaar [22]. Le bois est un matériau hygroscopique qui présente une faible hystérésis. Cependant, la teneur en eau de saturation varie de 17% à 34% en fonction des essences. En représentant l'évolution de la teneur en eau normée par la teneur en eau de saturation de l'essence étudiée, en fonction de l'humidité relative, deux isothermes ressortent, une par famille : résineux et feuillus. Ainsi d'un feuillus à un autre, seule sa teneur en eau de saturation différencie son isotherme. Or cette donnée est disponible dans la littérature [24]. Ainsi il ne reste plus que trois paramètres à identifier : δ_0, A_{ad} et A_{de} des équations (5) et (7).

3. Comportement mécanique long terme des feuillus

La prédiction de la déformation long terme U_{LT} d'une poutre en flexion est nécessaire pour éviter des dysfonctionnements de service (ELS). Cependant, seul le comportement instantané U_{inst}, c'est-à-dire au moment du chargement Q de l'élément de structure, est connu. Le comportement mécanique du bois des résineux est décrit dans l'Eurocode 5 à travers le coefficient k_{def}, selon l'équation suivante :

$$U_{LT} = U_{inst}.(1+k_{def}) \quad \textbf{(11)}$$

Ainsi, la norme retient trois classes de services, représentatives des conditions d'environnement de l'élément en flexion, avec trois valeurs de k_{def} pour les résineux : 0,6 ; 0,8 et 2. Le coefficient k_{def} dépend des caractéristiques viscoélastiques du matériau, et de son environnement thermo-hydrique. A l'instar des différences visibles au sein du comportement hydrique entre les essences de résineux et de feuillus, il est possible que ces derniers présentent aussi un comportement différé différent. Une approche expérimentale a été réalisée, à l'échelle 1, dans trois environnements différents.

3.1. Présentation des bancs d'essais

Le dispositif expérimental conçu pour ce projet consiste en un banc de flexion 4 point, simple et robuste. Il a été conçu en extérieur pour une classe de service 3 à Egletons (alt. 600 m, climat de moyenne montagne) et à Montpellier (alt. 27 m, climat méditerranéen) et en intérieur non chauffé pour une classe de service 1-2 à Egletons.

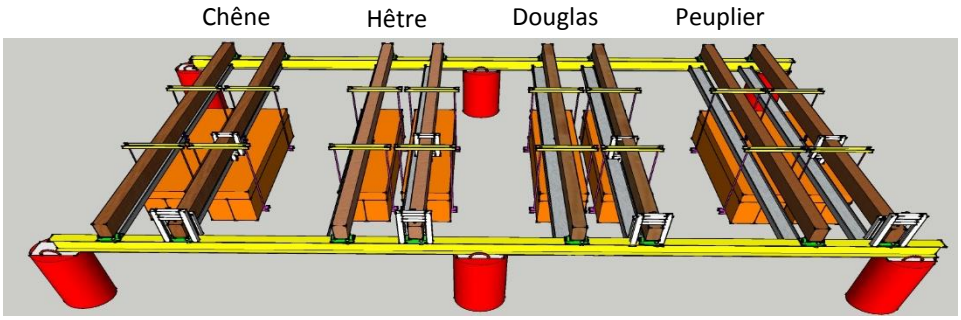


Figure 7: *Banc de fluage de la classe de service 1*

Pour des raisons de durabilité, les essences de hêtre et peuplier n'ont pas été utilisées en classe de service 3. Après un classement visuel de chacune des poutres selon la norme NF B 52-001, les poutres, de dimension 3000x150x75 mm^3, sont chargées individuellement par des lests en béton. La masse de ces derniers a été déterminée selon un ratio de flèche. La flèche maximale à long terme retenue est de L/250. Enfin les appuis ont été optimisé afin d'éviter les blocages parasites, et s'assurer ainsi un système parfaitement isostatique (Figure 7). Les variations de section sont mesurées à différents points, mais dans cet article seules les mesures de flèche centrale sont exploitées. L'évolution de k_{def} pour les deux environnements d'Egletons est présentée sur la Figure 8.

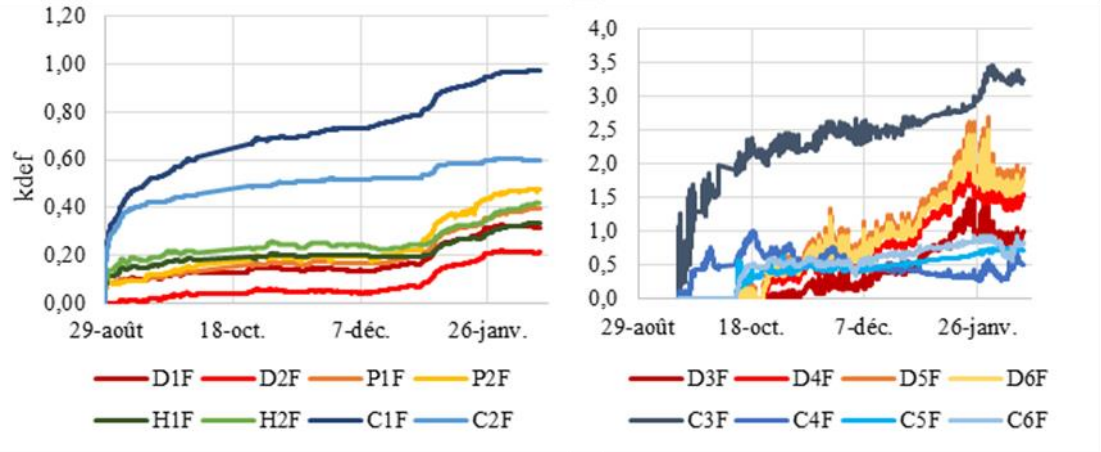


Figure 8 : *Evolution de k_{def} pour la classe de service 1 (à gauche) et 3 (à droite) à Egletons*

Les essais ont débuté en août et septembre 2017. Comme attendu les poutres en classe de service 3 présentent une flèche différée beaucoup plus importante et irrégulière. L'état initial (humidité, qualité) influe fortement sur le comportement long terme, notamment pour C1F à C3F. A ce stade, il n'y a pas de différence majeure de comportement différé entre feuillus et résineux.

3.2. Développement d'un modèle thermo-hygro-mécanique par éléments finis

Dans le cadre de cette thèse, tous les phénomènes hydriques et mécaniques cités plus haut sont en cours d'implémentation dans un code aux éléments finis (Cast3M). Pour un millage à l'échelle métrique, la succession des résolutions thermo-hydrique et mécanique pose encore des problèmes de temps de calcul. Cependant, les modèles dissociés permettent de rendre compte des phénomènes indépendamment les uns des autres.

4. Conclusion

La prise en compte de la température sur les différents paramètres de diffusion a permis une remise en question du nombre de paramètre à identifier par méthode inverse. Cette approche a également permis de mettre en avant l'influence de la température sur l'isotherme de sorption, et plus particulièrement sur la teneur en eau de saturation. Ainsi, de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique du bois peuvent être proposés pour chaque essence, et selon le sens de sorption. Il est proposé une simplification de la forme des isothermes de sorption par famille, séparant ainsi le comportement des résineux et des feuillus aux conditions environnantes. Une campagne expérimentale de détermination des paramètres de diffusion en ambiance variable pour différentes essences est en cours et permettra de justifier la proposition.

Le suivi du fluage des poutres des différentes essences, ainsi que les phénomènes de retrait gonflement, permettent dans un premier temps d'observer le comportement mécanique différé. La maitrise du profil hydrique au cours du temps permet de déterminer le comportement mécanique différé des poutres de feuillus soumis à de la flexion 4 points. La modélisation des phénomènes mécaniques mis en jeu durant un essai de fluage permettra une meilleure compréhension des observations expérimentales. Enfin par analyse inverse, les résultats de ces essais permettront une identification, et une différenciation des comportements mécaniques de chaque essence de feuillu. Une proposition de modification du coefficient k_{def} de l'Eurocode 5 sera envisagé si cette démarche montre un comportement différent entre les essences de feuillus ou de résineux.

5. Remerciements

Ce projet est financé par l'ANR projet EFEUR5 (ANR-15-CE08-0027-04).

6. Bibliographie

[1] AFNOR, « NF EN 1995-1-1/NA », 2010. .
[2] AFNOR, « FD P 21-502_Structures en bois - Utilisation des bois massifs feuillus en structure - Propositions de compléments à l'Eurocode 5 ». .
[3] F. Dubois, H. Randriambololona, et C. Petit, « Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation », *Mech. Time-Depend. Mater.*, vol. 9, nº 2, p. 173–202, 2005.
[4] J. Gril, « Une modélisation du comportement hygro-rheologique du bois à partir de sa microstructure », 1988.
[5] J.-M. Husson et F. Dubois, « Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire : application à la mécanosorption dans le bois », 2009.
[6] T. Defraeye, G. Houvenaghel, J. Carmeliet, et D. Derome, « Numerical analysis of convective drying of gypsum boards », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, nº 9‑10, p. 2590‑2600, avr. 2012.
[7] L. Laou, « Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation », 2017.
[8] A. J. Stamm, *Wood and cellulose science*. Ronald Press Co., 1964.
[9] K. Kulasinski, « Physical and mechanical aspects of moisture adsorption in wood biopolymers investigated with atomisitic simulations », ETH Zurich, 2015.
[10] A. J. Stamm, « Bound water diffusion into wood in the fiber direction », *For. Prod. J.*, vol. 9(1), p. 27‑32, 1959.
[11] H. N. Rosen, « Exponential dependency of moisture diffusion coefficient », *Wood Sci.*, vol. 8, nº 3, p. 174‑179, 1976.
[12] A. Jamaaoui, « Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique », Egletons, 2017.
[13] E. T. Choong, « Movement of moisture through a softwood in the hygroscopie range », 1963.
[14] R. M. Nelson, « Diffusion of bound water in wood-part 3-A model for nonisothermal diffusion », *Wood Sci. Technol.*, vol. 20, nº 4, p. 309–328, 1986.
[15] J. F. Siau, *Transport Processes in Wood*, vol. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984.
[16] R. W. Dent, « A sorption theory for gas mixtures », *Polym. Eng. Sci.*, vol. 20, nº 4, p. 286‑289, mars 1980.
[17] S. Merakeb, « Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois », 2006.
[18] AFNOR, « NF EN 1995-1-1/NA », 2010. .
[19] S. Merakeb, F. Dubois, et C. Petit, « Modeling of the sorption hysteresis for wood », *Wood Sci. Technol.*, vol. 43, nº 7‑8, p. 575‑589, nov. 2009.
[20] P. Perré et B. K. May, « A Numerical Drying Model That Accounts for the Coupling Between Transfers and Solid Mechanics. Case of Highly Deformable Products », *Dry. Technol.*, vol. 19, nº 8, p. 1629‑1643, août 2001.
[21] J. A. Nelder et R. Mead, « A simplex method for function minimization », *Comput. J.*, vol. 7, nº 4, p. 308–313, 1965.
[22] C. Skaar, *Wood water relations*. 1988.
[23] J. F. Rijsdijk, *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994.
[24] J. Gérard *et al.*, « Tropix ». CIRAD, 2011.
[25] J. M. Génevaux, « Le fluage à température linéairement croissante : Caractérisation des sources de viscoélasticité anisotrope du bois Génevaux », 1989.
[26] J. M. Husson, F. Dubois, et N. Sauvat, « A finite element model for shape memory behavior », *Mech. Time-Depend. Mater.*, vol. 15, nº 3, p. 213‑237, août 2011.