
Diffusion de l'eau dans le bois en extérieur :

Des résineux aux feuillus

**Maximin VARNIER¹, Nicolas SAUVAT¹, Cédric MONTERO², Frédéric DUBOIS¹,
Joseph GRIL³**

¹ GC2D, Univ. Limoges, EA 3178, F-19300 Egletons, France (@ : nicolas.sauvat@unilim.fr)

² LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, F-34090 Montpellier, France

³ Institut Pascal, CNRS, Univ. Clermont-Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand

RÉSUMÉ. *La détermination du profil hydrique dans le bois au cours du temps permet de comprendre et de prédire les phénomènes liés au séchage, le comportement mécanique du bois, et les risques d'attaques fongiques. En effet ces quelques pourcentages d'eau situés au sein des parois cellulaires vont avoir une forte influence notamment sur les caractéristiques mécaniques de celles-ci. Aujourd'hui l'Eurocode 5 propose un abaque d'équilibre hygroscopique unique, basé sur le séchage de résineux uniquement. Nous proposons de référencer les phénomènes physiques mis en jeu lors du transfert hydrique dans un élément en bois soumis à un environnement variable en humidité et température, afin de d'identifier des propriétés de diffusion des essences de bois. De nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique pour les essences de feuillus sont proposés en vue d'une meilleure valorisation de ces derniers dans la construction.*

....
....
....
....
....
....
....
....

ABSTRACT. *Determination of water distribution in wood over time is necessary to understand and predict phenomena related to drying, mechanical behaviour, and the risk of fungal attacks. Indeed, these few percentages of water located within the cell walls will have an important influence including the mechanical characteristics thereof. Today Eurocode 5 propose a unique hygroscopic equilibrium abacus, only based on the drying of softwood. We propose to reference the physical phenomena involved into water transfer in a timber element subjected to a real variable humidity and temperature environment, in order to identify diffusion properties of wood species. New hygroscopic equilibrium charts for hardwood species can be proposed for better valuation of these species.*

....
....
....
....
....
....
....
....

MOTS-CLÉS : *abaque d'équilibre hygroscopique, couplage thermo-hydrique, hygroscopique, feuillus, paramètres de diffusion*

KEY WORDS : *diffusion parameters, hardwoods, hygroscopic, hygroscopic equilibrium abacus, thermo-hydric coupling*

1. Introduction

L'abaque d'équilibre hygroscopique normatif proposé dans l'Eurocode 5 représente la teneur en eau du matériau en équilibre avec son environnement, c'est-à-dire en fonction de l'humidité relative et de la température environnante. Cependant, cette propriété ne suffit pas à caractériser l'évolution hydrique dans le temps, ni même le champ hydrique d'équilibre à l'instant t dans tout le volume. Tout d'abord, les courbes d'équilibre hygroscopique sont déterminées à partir des isothermes de sorption, présentant l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative et cela pour une température donnée. Cette courbe présente une hystérésis, due à la différence d'énergie nécessaire pour le phénomène d'adsorption et de désorption [MER 09], [RAW 96]. Ainsi le diagramme d'équilibre hygroscopique du séchage des résineux proposé par l'Eurocode 5 ne serait-il pas trop simplifié pour être utilisé pour toutes les essences de bois, quel que soit le champ hydrique ? Enfin, la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau permet de déterminer l'évolution du profil hydrique dans un élément massif. Cette dernière rend compte de l'évolution d'une quantité d'eau dans l'épaisseur de l'élément hygroscopique, soumis à un gradient d'humidité relative. Cependant, cette propriété est aussi bien sensible à la teneur en eau qu'à la température. Nous proposons dans un premier temps une simplification des isothermes de sorption adaptée à la variabilité des bois de construction, et ensuite une justification de l'évolution de la perméabilité apparente par la température.

2. Les isothermes de sorption

Dans la littérature plusieurs explications phénoménologiques permettant de déterminer la teneur en eau d'équilibre pour un couple de température et d'humidité [DEN 80], [STA 64] ou thermodynamiques [MER 06]. Ce dernier propose une relation logarithmique entre la teneur en eau w et l'humidité relative R_h , avec w_s la teneur en eau de saturation, et φ et α deux coefficients de calage différents selon le cycle de sorption :

$$\ln\left(\frac{w}{w_s}\right) = \varphi \cdot \ln(R_h) \cdot \exp(\alpha \cdot R_h) \quad [1]$$

2.1. Identification des paramètres de l'isotherme de sorption

La littérature propose de nombreuses isothermes de sorptions que ce soit pour des essences de bois, ou d'autres matériaux hygroscopiques. Plusieurs phénomènes physiques vont différencier ces isothermes, le premier étant la teneur en eau de saturation w_s , l'aire d'hystérésis, et enfin la forme de l'isotherme comme le décrit Skaar [SKA 88]. Le bois est un matériau hygroscopique qui présente une faible hystérésis par rapport à d'autres végétaux [RIJ 94], ou autres matériaux hygroscopiques [TOU 15], [MED 16]. La teneur en eau de saturation varie de 14% à 34% en fonction des essences, valeur bien documentée dans la littérature [GER 11]. A travers les nuages de points obtenus pour l'adsorption et la désorption, l'expression d'une isotherme moyenne toutes essences confondues amène à un coefficient de détermination de 0,969 à partir de l'équation 1. Il est donné en Figure 1 une proposition de séparation entre feuillus et résineux.

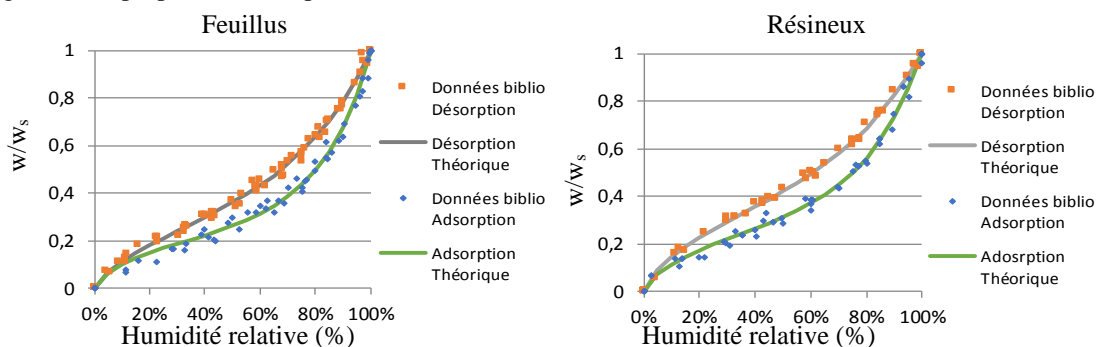


Figure 1 : Simplification des isothermes de sorption en deux familles

Ainsi, seule la teneur en eau de saturation distingue les essences.

2.2. Influence de la température sur le point de saturation des fibres

De nombreuses mesures d'isothermes de sorption à plusieurs températures ont permis de montrer l'influence de la température sur la teneur en eau. Ainsi, Perré [PER 01] et Merakeb [MER 09] ont proposé une première

correction touchant particulièrement l'humidité d'équilibre w_s à 100% d'humidité relative. D'une approche phénoménologique, elle prend la forme d'une dépendance linéaire à la température telle que :

$$w_s = 0,598 - 10^{-3} \cdot (T + 273) \text{ avec } T \text{ exprimé en } ^\circ\text{C} \quad [2]$$

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 induite par la chaleur de sorption permet d'écrire la relation suivante :

$$w_s(T) = \left(w_s^0 + \frac{C_{anh}}{C_w} \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_w}{L} \cdot T \right) - \frac{C_{anh}}{C_w} \quad [3]$$

w_s^0 représente la teneur en eau de saturation à la température $T = 0^\circ\text{C}$. Enfin, pour une application en construction, 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. Notre modèle analytique aux données bibliographiques et la fonction linéarisée proposée par Perré sont comparés Figure 2, avec une très bonne corrélation.

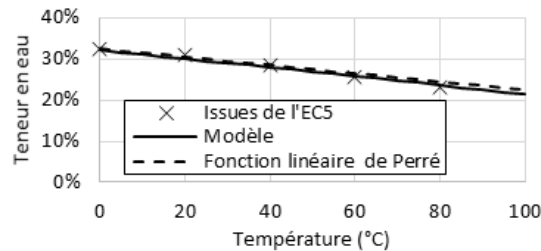


Figure 2 : Teneur en eau de saturation vs température

En plus de prendre en compte l'influence de la température sur l'équilibre hygroscopique, ces deux approches permettent de créer de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique en fonction de la famille Résineux/Feuillus, et en fonction de la teneur en eau de saturation des fibres de l'essence. Par exemple sont proposés en Figure 3 les abaques du hêtre, et des résineux selon l'Eurocode 5. Le couple 65%/20°C du résineux indique une teneur en eau d'équilibre de 12,5%, alors que l'abaque d'équilibre du hêtre donne une teneur en eau d'équilibre de 14,5%.

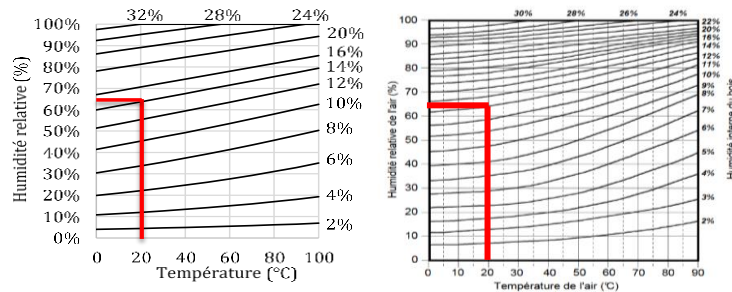


Figure 3 : Abaque d'équilibre hygroscopique du hêtre (à gauche) et des résineux selon la NF EN 1995 1-1 (à droite)

Enfin, la dernière question concerne la position au sein de l'hystérésis : l'histoire hydrique nous rapproche-t-elle de la désorption ou de l'adsorption, ou bien d'une moyenne des deux ?

3. Perméabilité, fonction de la teneur en eau et de la température

Dans le domaine hygroscopique, le flux de masse est sous deux états : gazeux, avec la vapeur d'eau dans les lumens, et liée, pour les molécules d'eau dans les parois cellulaires. On parlera alors de perméabilité vapeur pour le premier cas et de perméabilité apparente pour le second, c'est-à-dire l'influence de la teneur en eau sur la perméabilité vapeur [MED 16]. Par analogie à la propriété de non linéarité du comportement diffusif, plusieurs auteurs ont proposé la forme mathématique suivante de la perméabilité apparente en condition isotherme:

$$\delta^* = \delta_v \cdot \exp(k \cdot w) \quad [4]$$

Cependant afin de prendre en compte l'influence de la température sur la perméabilité apparente, des travaux ont montré que le coefficient de perméabilité suit une augmentation selon la loi d'Arrhenius [STA 64], [CHO 63] où E_a représente l'énergie d'activation, R la constante des gaz parfaits, T la température en $^\circ\text{C}$ et δ_0 un coefficient de calage:

$$\delta^* = \delta_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad [5]$$

Finalement, à partir de la définition de l'énergie d'activation [NEL 86], mettant en jeu la chaleur de sorption, et d'une loi semi empirique de Merakeb [MER 06], l'équation [5] devient :

$$\delta^* = \delta_o \cdot \exp\left(\frac{(C_{pV} \cdot T) + \Delta H_s}{R \cdot T}\right) \quad [6]$$

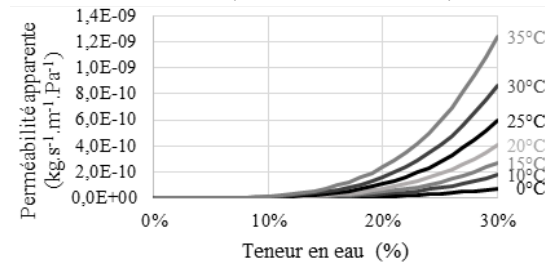


Figure 4 : Perméabilité apparente en fonction de T et w

Cette approche présente deux avantages majeurs, tout d'abord elle permet de prendre en compte l'influence de la température et de la teneur en eau sur la perméabilité apparente, ensuite, elle permet de différencier les essences à travers la chaleur de sorption, tout en se limitant à l'identification de trois paramètres : δ_o , A_{ad} , et A_{de} .

4. Conclusion

Une différenciation du comportement hydrique des feuillus et des résineux est proposée. Cela permet de proposer de nouveaux abaques d'équilibre hygroscopique pour chaque essence souhaitée. La dernière inconnue reste le champ hydrique initial dans tout le volume. Enfin, l'application au suivi des structures en ambiances variables est rendue possible par la prise en compte de l'effet de la température sur la perméabilité apparente.

5. Bibliographie

- [MER 09]S. Merakeb, F. Dubois, et C. Petit, « Modeling of the sorption hysteresis for wood », *Wood Sci. Technol.*, vol. 43, n° 7-8, p. 575-589, nov. 2009.
- [RAW 96]S. P. S. Rawat, « Enthalpy-entropy compensation during sorption of water in wood », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 60, p. 787-790, 1996.
- [DEN 80]R. W. Dent, « A sorption theory for gas mixtures », *Polym. Eng. Sci.*, vol. 20, n° 4, p. 286-289, mars 1980.
- [STA 64]A. J. Stamm, *Wood and cellulose science*. Ronald Press Co., 1964.
- [MER 06]S. Merakeb, « Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois », 2006.
- [RIJ 94]J. F. Rijdsdijk, *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994.
- [SKA 88]C. Skaar, *Wood water relations*. 1988.
- [TOU 15]A. Touil, J. Litaïem, et F. Zagrouba, « Isothermes de sorption et propriétés thermodynamique de l'*Allium sativum* », *J. Tunis. Chem. Soc.*, vol. 17, p. 105-114, 2015.
- [MED 16]D. Medjelekh *et al.*, « Characterization of the coupled hygrothermal behavior of unfired clay masonries: Numerical and experimental aspects », *Build. Environ.*, vol. 110, p. 89-103, déc. 2016.
- [GER 11]J. Gérard *et al.*, « Tropix ». CIRAD, 2011.
- [PER 01]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, n° 8, p. 1629-1643, août 2001.
- [STA 59]A. J. Stamm, « Bound water diffusion into wood in the fiber direction », *For. Prod. J.*, vol. 9(1), p. 27-32, 1959.
- [KUL 15]K. Kulasinski, « Physical and mechanical aspects of moisture adsorption in wood biopolymers investigated with atomistic simulations », ETH Zurich, 2015.
- [CHO 63]E. T. Choong, « Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range », 1963.
- [NEL 86]R. M. Nelson, « Diffusion of bound water in wood-part 3-A model for nonisothermal diffusion », *Wood Sci. Technol.*, vol. 20, n° 4, p. 309-328, 1986.