

COMPORTEMENT THERMO-HYGRO-MECANIQUE, RELATIONS STRUCTURE / PROPRIETES ET DIVERSITE DES BOIS

F. Dubois, Université de Limoges, Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons. Téléphone : 05 55 93 45 26, Télécopie : 05 55 93 45 01, Adresse électronique : frederic.dubois@unilim.fr

Mots clés : Viscoélasticité, Mécanosorption, Transfert de Masse, Effet d'échelle

1. INTRODUCTION

La conception et la maintenance des structures en bois massif ou lamellé-collé doivent considérer la problématique du comportement et des pathologies couplées aux variations climatiques en phase chantier et en service. Si aujourd'hui, la maîtrise et la réglementation du séchage des bois permettent d'avoir, en usine, des bois secs avec un taux d'humidité compris entre 12% et 20%, le couplage, entre propriétés mécaniques et variations climatiques, induit des effets différés se traduisant par une amplification des déformées due à une augmentation globale du taux d'humidité en extérieure ou l'apparition de fentes et fissures lorsque les conditions climatiques se traduisent par un séchage globale de la structure (bâtiments surchauffés, expositions pleins sud en été, etc.). Bien que la réglementation européenne (Eurocode 5) introduit ces notions d'effets différés, elle ne permet pas d'anticiper suffisamment les pathologies liées aux variations climatiques.

A l'échelle matériau, le couplage thermo-hygro-mécanique se traduit par un comportement mécanosorptif alliant la dépendance des propriétés mécaniques (viscoélasticité) à l'humidité, les effets de retrait-gonflement ainsi que l'orthotropie cylindrique caractérisant le matériau bois.

A l'échelle d'éléments de structure, cette mécanosorption est couplée au processus de transfert de chaleur et de masse se traduisant par un déphasage et un amortissement (inertie hydrique) des variations climatiques. Les effets mécanosorptifs sont alors hétérogènes dans les sections transversales rendant ainsi plus complexe l'anticipation du comportement à long terme des structures en bois.

2. COMPORTEMENT MECANO-SORPTIF

2.1 Protocole expérimental à l'échelle matériau en traction

A l'échelle du matériau, le comportement mécanosorptif caractérise sa réponse mécanique à une sollicitation mécanique couplée à des variations d'humidité interne. Ce comportement se traduit par un effet mémoire et un blocage des déformations (Gril, 1988), (Dubois *et al.*, 2012) (Colmars *et al.*, 2013). A cette échelle, l'essai le plus représentatif est présenté Figure 1 (Pittet, 1996), (Dubois *et al.*, 2005). Les échantillons testés ont des dimensions permettant de négliger les effets de diffusion dans l'épaisseur. Le dispositif expérimental est composé d'une micro presse électromécanique mettant en traction l'échantillon dans un caisson climatique régulé en température dans lequel des airs sec et saturé sont mélangés afin d'obtenir des variations hydriques rapides. La déformation axiale de l'échantillon est capturée par un extensomètre pincé sur sa section droite.

Le chargement mécanique, synchronisé à l'histoire hydrique, est présenté en Figure 2. Le protocole expérimental vise à séparer les différents processus mis en exergue; à savoir, le retrait-gonflement caractérisant le domaine hygroscopique du bois et le comportement viscoélastique mécanosorptif.

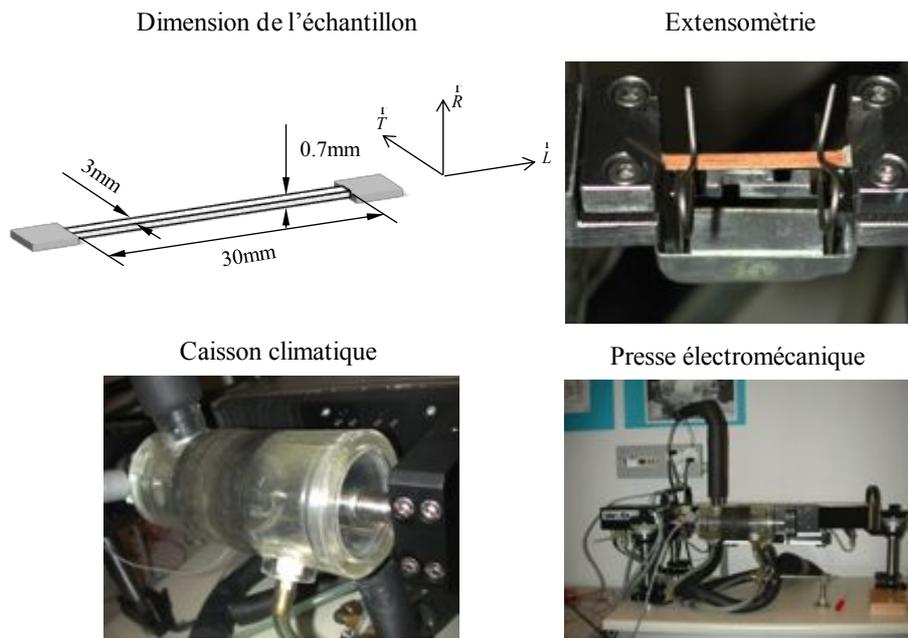


Figure 1 : Essai mécanosorptif

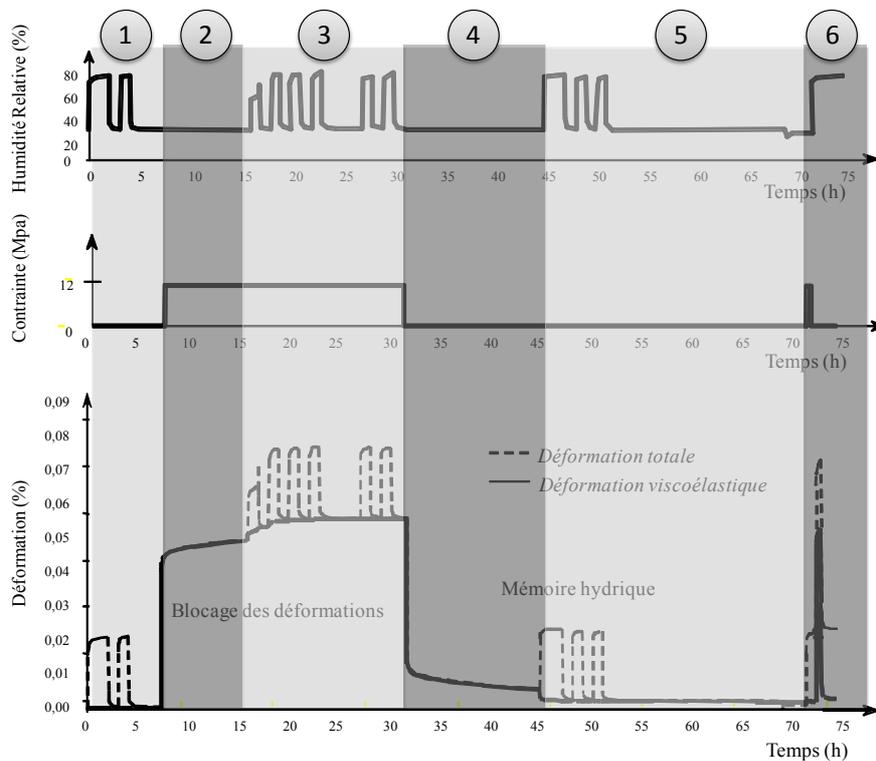


Figure 2 : Chargement mécanique et hydrique

Comme indiquées en Figure 2, la réponse mécanique en déformation permet d'identifier 6 phases caractéristiques :

1. Une première phase représente le retrait gonflement libre en l'absence de contraintes mécaniques.
2. La première phase de fluage se fait sous humidité 'sèche' constante.
3. La mécanosorption s'illustre, dans un premier temps, par une accélération et une augmentation de la déformation lors des phases d'humidification contrairement aux phases de séchage qui induisent un blocage des déformations caractérisant l'effet hygro-verrou mis en avant par Gril (1988).

4. Cette phase de recouvrance, sous basse humidité, se traduit par une déformation résiduelle à long terme, résultat des effets hygro-verrous ultérieurs.
5. La recouvrance s'accroît durant les phases d'humidification mettant en avant une mémoire hydrique.
6. Enfin, une fois l'ensemble de la recouvrance opérée, un second chargement mécanique traduit le retour originel de l'échantillon prouvant que le comportement, sous sollicitations peu sévères, peut être considéré comme linéaire.

2.2 Protocole expérimental à l'échelle d'éléments fléchis

Dans le domaine du Génie Civil Bois, les couplages thermo-hygro-mécaniques concernent principalement des éléments porteurs horizontaux pour lesquels le critère de flèche est souvent dimensionnant. Des essais de fluage en chambre climatique, sur des poutres de petites dimensions (diminution des effets de diffusion), sont proposés. La Figure 3 présente le principe du montage pour lequel la mesure des flèches supérieure et inférieure permet d'isoler les effets de retrait gonflement de la section transversale, et ce, à mi-portée.

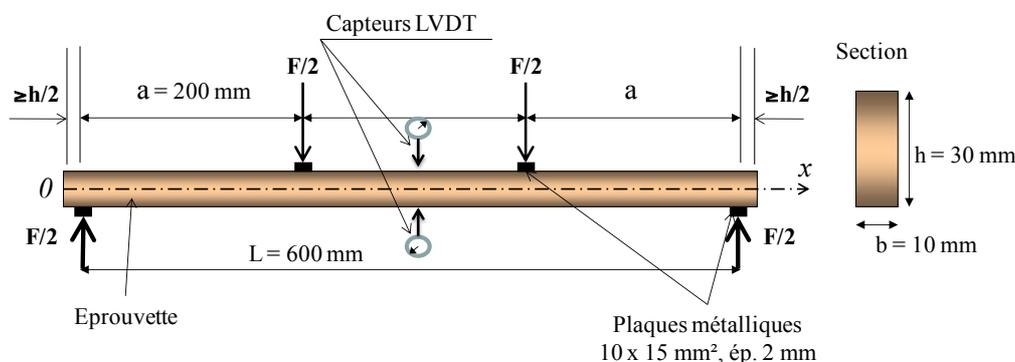


Figure 3 : Essais de flexion 4 points

Huit montages sont placés dans une chambre climatique d'un volume de 20m³ régulée en température et humidité. Un sécheur chimique permet des rampes de séchage rapides afin de déclencher l'effet verrou mis en évidence précédemment. Deux échantillons sont placés à part, sans chargement mécanique, afin d'isoler les effets de retrait gonflement et de mesurer, par pesée, l'évolution de l'humidité interne moyenne. Plusieurs essences sont testées comme le Douglas, l'Épicéa, le Hêtre mais également des essences tropicales comme l'Ozigo et le Moabi. Pour l'ensemble des essences, les observations expérimentales sont les suivantes, Figure 4 :

1. Les effets de retrait gonflement sont évalués par différence des flèches mesurées en fibre inférieure et supérieure.
2. Une première phase de fluage à humidité 'sèche' se caractérise par une évolution identique des déflexions.
3. Sous chargement mécanique, le processus d'humidification induit un accroissement de la flèche inférieure pour laquelle le gonflement a peu d'effet. Par contre, la flèche supérieure de fluage est compensée par le gonflement qui est du même ordre de grandeur.
4. La phase de séchage permet, une nouvelle fois, d'observer l'effet verrou sur la face inférieure. Concernant la fibre supérieure, seul le retrait hydrique est observé.
5. Lors du déchargement à l'état sec, nous observons une phase de recouvrance présentant une flèche résiduelle importante. L'évolution est identique pour les fibres inférieure et supérieure.
6. Contrairement à l'expérience en traction, la dernière phase d'humidification ne permet pas de recouvrir totalement la flèche. Seule le gonflement de la fibre supérieure est observé.

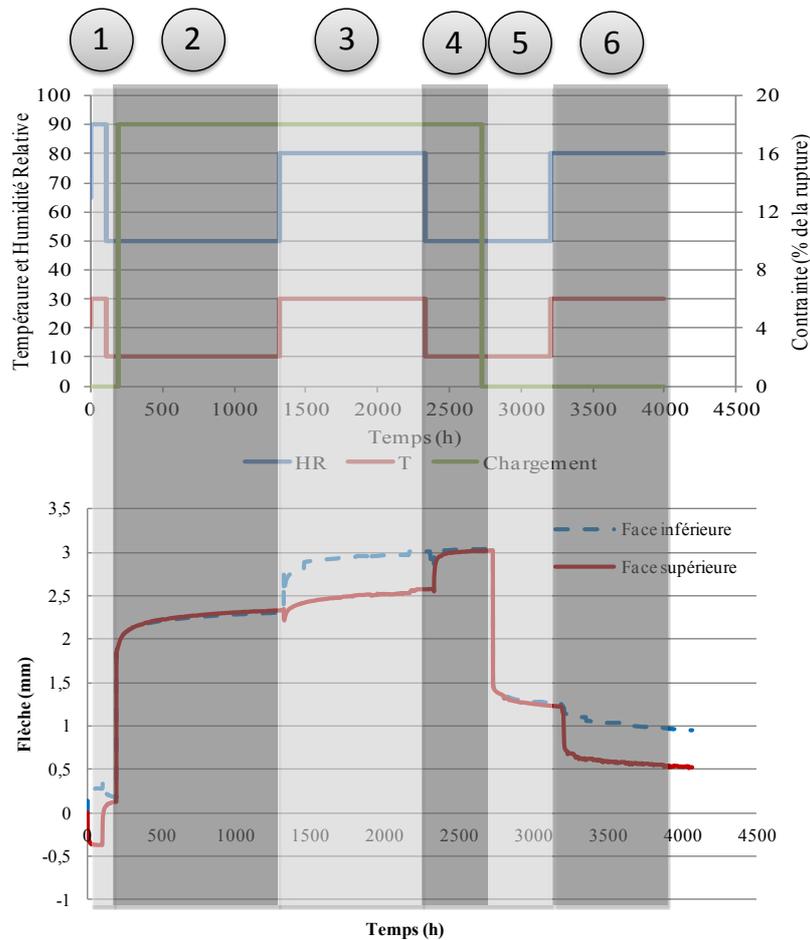


Figure 4 : Essais de flexion en enceinte climatique

2.3 Echelle d'éléments structuraux

A l'échelle d'éléments de structure, le comportement différé mécanosorptif n'est plus piloté directement par l'ambiance mais par les gradients hydriques qu'elle engendre dans la section transversale. Dans ces conditions, il est proposé, dans cette partie, un essai thermo-hygro-mécanique sur des structures réelles en ambiances réelles. Pour amplifier les effets, il a été choisi deux essences tropicales (Ozigo et Moabi) placées dans un climat tropical à Franceville (Gabon) en intérieur climatisé, en extérieur abrité et exposées aux intempéries, Figure 5. D'une portée entre appuis de 3m, la section transversale est de 80x180mm².



Figure 5 : Essais de flexion en climat tropical

Afin d'exprimer les effets différés, l'Eurocode 5 introduit un coefficient majorateur k_{def} tel que :

$$k_{def} = \frac{u(t)}{u_{inst}} - 1 \quad (1)$$

Où $u(t)$ et u_{inst} désignent respectivement la flèche à mi-portée en fonction du temps et la flèche instantanée mesurée lors de la mise en charge.

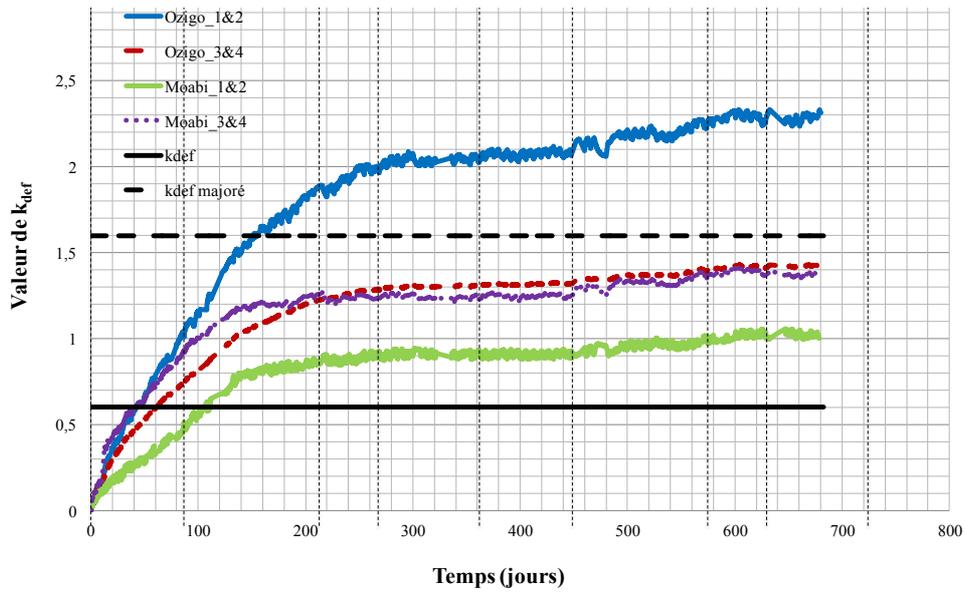


Figure 6 : k_{def} en ambiance intérieure climatisée

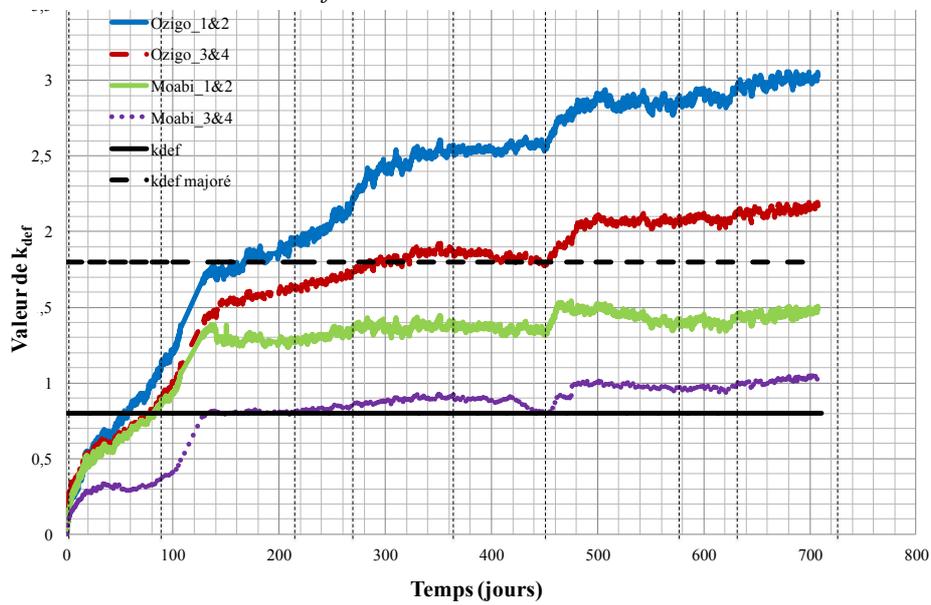


Figure 7 : k_{def} en ambiance extérieure sous abrit

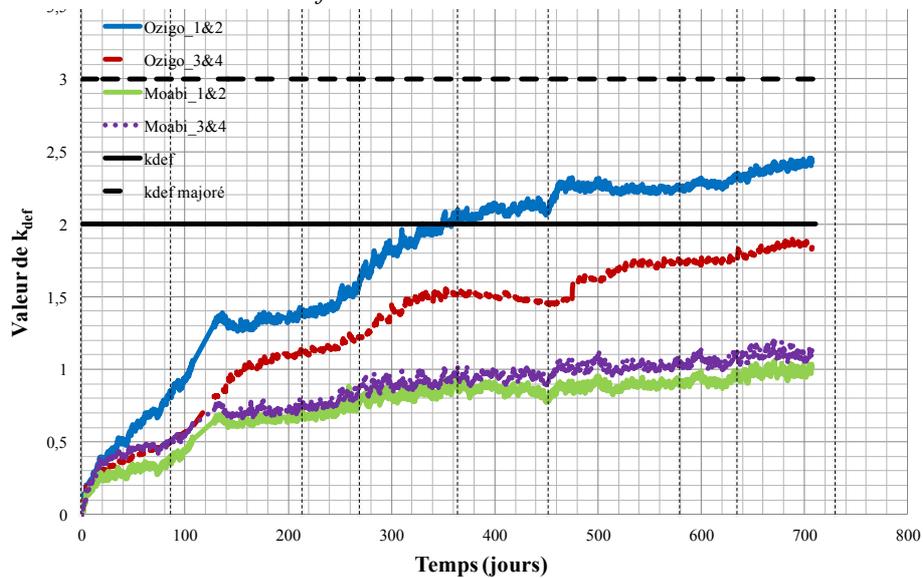


Figure 8 : k_{def} en ambiance extérieure sous intempéries

Pour les trois conditions climatiques, les évolutions de k_{def} sont présentées en Figures 6, 7 et 8. Ces graphiques sont complétés par les valeurs proposées par l'Eurocode 5 (valeur de base et valeur majorée). Nous observons que l'évolution des flèches montre une accumulation qui est due, d'une part, à l'équilibre hydrique qui se fait jour après jour en fonction de l'inertie hydrique de la section et, d'autre part, aux processus hygro-verrous qui semblent non réversibles comme il l'a été observé lors des essais de flexion précédents. Enfin, les valeurs seuil de k_{def} mériteraient d'être adaptées à l'essence et au climat.

2.4 Modèle hygro-verrou

Le modèle hygro-verrou repose sur les approches de Gril (1988) et Husson et al. (2010) généralisées à un comportement viscoélastique par Dubois *et al.* (2012). La forme uniaxiale du modèle est traduit par la loi de comportement suivante :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t, \tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + \int_0^t \alpha \cdot \frac{\partial w}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (2)$$

α représente le coefficient de retrait-gonflement. $J(t, \tau)$ désigne une pseudo fonction de fluage introduisant le couplage thermo-hygro-mécanique. En accord avec une décomposition en série de Prony, elle prend la forme suivante :

$$J(t, \tau) = C_o^{\max}(\tau, t) + \sum_{i=1}^N \int_{\tau}^t \frac{1}{\eta^i(\vartheta)} \cdot \exp\left[-\int_{\tau}^{\vartheta} \frac{d\alpha}{C_i^{\max}(\alpha, t) \eta^i(\alpha)}\right] \cdot d\vartheta \quad (3)$$

$C_i^{\max}(\tau, t)$ désigne une complaisance maximale atteinte entre les instants τ et t . Cette notion permet d'introduire l'effet verrou lors des phases de séchage. La double intégrale, présente dans l'expression (3), permet de modéliser l'histoire hydrique lors des phases de recouvrance ainsi que l'hygro activation. Ce modèle a fait l'objet d'une discrétisation incrémentale en vue d'une implémentation dans un code aux éléments finis sous sa forme tridimensionnelle et orthotrope.

3. EFFETS D'ECHELLE

Dans ce travail, nous considérons que les effets d'échelle sont principalement dus au processus de diffusion se traduisant, dans le cas d'une configuration de flexion, par un gradient hydrique évolutif couplé à un gradient de contrainte pouvant également être évolutif lorsque l'inertie de flexion varie au grès du retrait gonflement transversal.

3.1 Transfert de masse

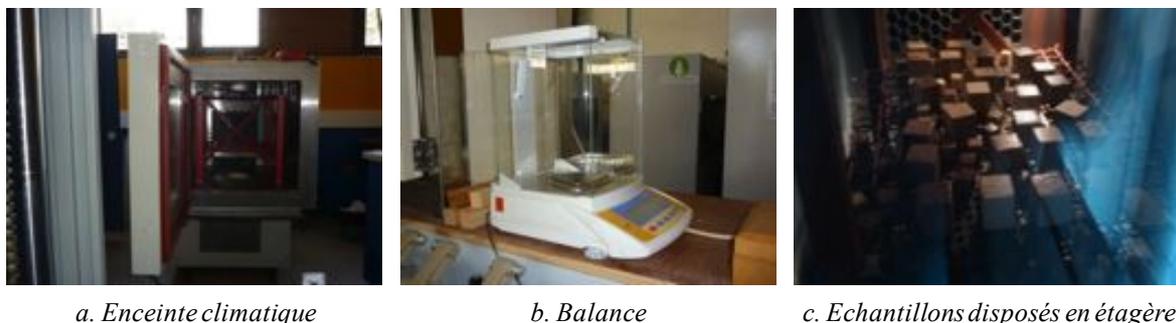
Le transfert de masse étudie le processus de diffusion hydrique. Généralement piloté par des lois dérivées de Fick, le processus est caractérisé par une forte orthotropie et une forte non linéarité. Une des principales difficultés provient du changement de phase entre la vapeur d'eau dans l'air et l'eau liée dans le bois via, d'une part, les isothermes de sorption et, d'autre part, les effets convectifs dus au mouvement d'air. Ainsi, le processus de transfert de masse peut se résumer comme suit (Perre *et al.*, 1990), (Lasserre, 2000) :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \overset{\Gamma}{\nabla} \cdot \underline{\underline{D}}_w(w) \overset{\Gamma}{\nabla} w \quad (4)$$

Où $\underline{\underline{D}}_w$ désigne le tenseur de diffusion orthotrope dépendant du taux d'humidité w . Dans le repère principal d'orthotropie $(\overset{\Gamma}{L}, \overset{\Gamma}{R}, \overset{\Gamma}{T})$, ce tenseur est diagonal avec, comme valeurs principales :

$$D_w^\alpha = D_o^\alpha \cdot \exp(k^\alpha \cdot w), \quad \alpha \in (L, R, T) \quad (5)$$

D_o^α représente le coefficient de diffusion anhydre dans la direction α tandis que k^α représente la non linéarité exponentielle du processus de diffusion. La caractérisation du tenseur de diffusion repose principalement sur des optimisations numériques du modèle via des essais d'adsorption et de désorption en enceinte climatique et par pesées, Figure 9, et ce, jusqu'à atteindre un équilibre hydrique.



a. Enceinte climatique

b. Balance

c. Echantillons disposés en étagère

Figure 9 : Mesure de l'humidité moyenne en phase d'adsorption et de désorption

Plusieurs géométries permettent d'étudier les effets d'échelles ainsi que le rôle des échanges convectifs. L'orthotropie de la diffusion nécessite également d'étudier différents sens de diffusion.

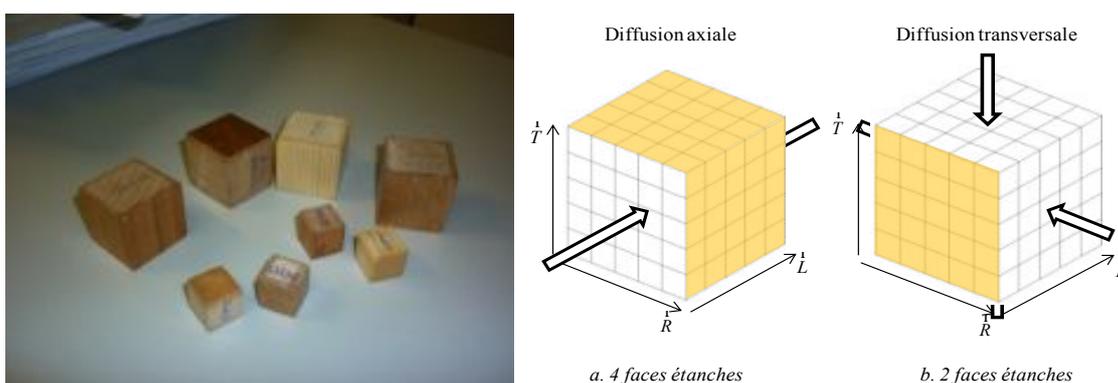


Figure 10 : Effets d'échelle et sens de diffusion

Pour différentes essences, tempérées et tropicales, quelques données de diffusion sont représentées en Table 1, (Manfoumbi, 2012).

Table 1 : Propriétés de diffusion

Essences	$D_o^L (m^2 s^{-1})$	k^L	$D_o^R (m^2 s^{-1})$	k^R	$D_o^T (m^2 s^{-1})$	k^T
Epicéa	$1.04 \cdot 10^{-9}$	0	$2.47 \cdot 10^{-10}$	$2.49 \cdot 10^{-1}$	$1.24 \cdot 10^{-10}$	$2.49 \cdot 10^{-1}$
Hêtre	$5.24 \cdot 10^{-10}$	0	$1.79 \cdot 10^{-10}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$8.96 \cdot 10^{-11}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$
Moabi	$4.50 \cdot 10^{-10}$	0	$7.20 \cdot 10^{-11}$	4.80	$3.60 \cdot 10^{-11}$	4.80
Ozigo	$5.34 \cdot 10^{-10}$	0	$7.70 \cdot 10^{-11}$	3.11	$3.85 \cdot 10^{-11}$	3.12

3.2 Isothermes de sorption

Les échanges convectifs en surface sont pilotés par un coefficient d'échange surfacique S et par une correspondance entre l'humidité relative de l'air environnant et l'eau liée à la surface du matériau.

Le bilan de masse en surface permet d'écrire :

$$\nabla \cdot \underline{\underline{D}}_w(w) \nabla w = S \cdot (w_{eq} - w) \quad (6)$$

w_{eq} représente l'humidité dans le bois en équilibre instantané avec l'ambiance climatique. Elle se détermine par des essais de sorption et de désorption sur des échantillons de petite taille. Comme présentés en Figure 11, de minces échantillons (2mm d'épaisseur) sont placés dans des cloches sous vide saturées par des sels permettant de régler l'air pour différents paliers d'humidité relative contrôlés à l'aide d'un hygromètre.



Figure 11 : Protocole expérimental

Le changement de phase vapeur/eau liée nécessite une approche thermodynamique afin de modéliser ces isothermes de sorption. Merakeb et al. (2009) a proposé un modèle qui permet de relier l'humidité relative et la température de l'air au taux d'humidité. Pour une température constante, le modèle se traduit de la façon suivante :

$$\ln\left(\frac{w}{w_s}\right) = \varphi_{\beta} \cdot \ln(HR) \cdot \exp(a_{\beta} \cdot HR) \quad (7)$$

w_s représente le taux d'humidité maximal atteint à l'équilibre avec une humidité relative HR de l'air saturée (100%). φ_{β} et a_{β} représentent les paramètres de l'isotherme différenciés selon une cinétique d'adsorption ($\beta = a$) et de désorption ($\beta = d$). Une méthode d'optimisation de Newton Raphson permet de quantifier ces paramètres selon les essences, Figure 12 et Table 2.

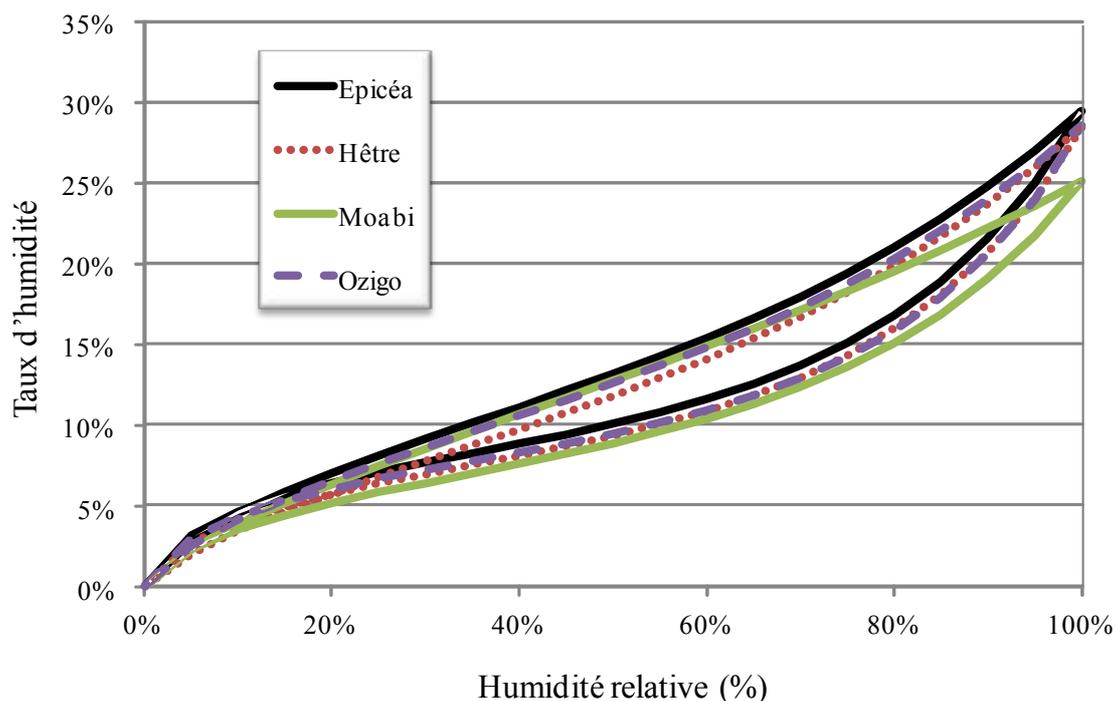


Figure 12 : Isothermes de sorption à 20°C

Table 2 : Paramètres d'isothermes de sorption à 20°C

Essences	w_s	φ_a	φ_d	a_a	a_d
Epicéa	29%	0.68	0.74	1.63	0.90
Hêtre	29%	0.73	0.85	1.59	0.82
Moabi	25%	0.74	0.78	1.41	0.46
Ozigo	29%	0.69	0.77	1.67	0.85

4. APPLICATION

Plusieurs applications de couplage thermo-hygro-mécanique ont été proposées dans la littérature. Outre, la problématique des concentrations de contrainte lors des phases de séchage du bois vert (Moutou Pitti et al., 2013), nous présentons dans ce travail l'étude des risques de fissuration d'éléments de structure soumis à des séchages excessifs, soit dans des ambiances asséchées (chauffage infra-rouge dans des halles sportives ou commerciales), soit en extérieur avec des cycles séchage/humidification. Dans ce dernier cas, considérons une poutre en Douglas lamellé-collé à double décroissance de 36m de portée encollée en atelier dans des configurations strictes d'humidité (taux d'humidité de 11%) et placée ensuite en extérieur (phase chantier). D'une épaisseur de 22cm, la géométrie est précisée en Figure 13, et ce, sous la forme d'un maillage par éléments finis réalisé sous le code de calcul Castem.

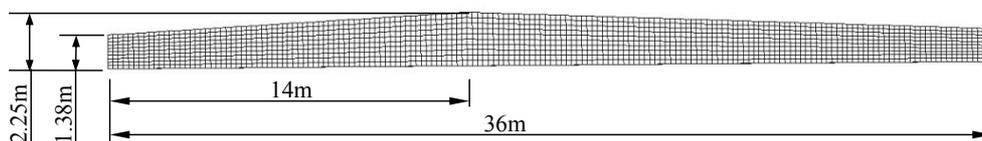


Figure 13 : Poutre lamellé collé, dimensions et maillage éléments finis

L'exposition climatique en période estivale génère une variation journalière du taux d'humidité en surface entre 7% et 12%. Dans ces conditions, plusieurs journées types sont simulées afin de reproduire l'évolution du taux d'humidité dans la section. Pour des raisons de symétries mécanique et hydrique, seule la moitié de la section est modélisée. A partir d'un calcul tridimensionnel, la Figure 14 présente l'évolution type de l'humidité dans la section transversale la plus grande (faitage).

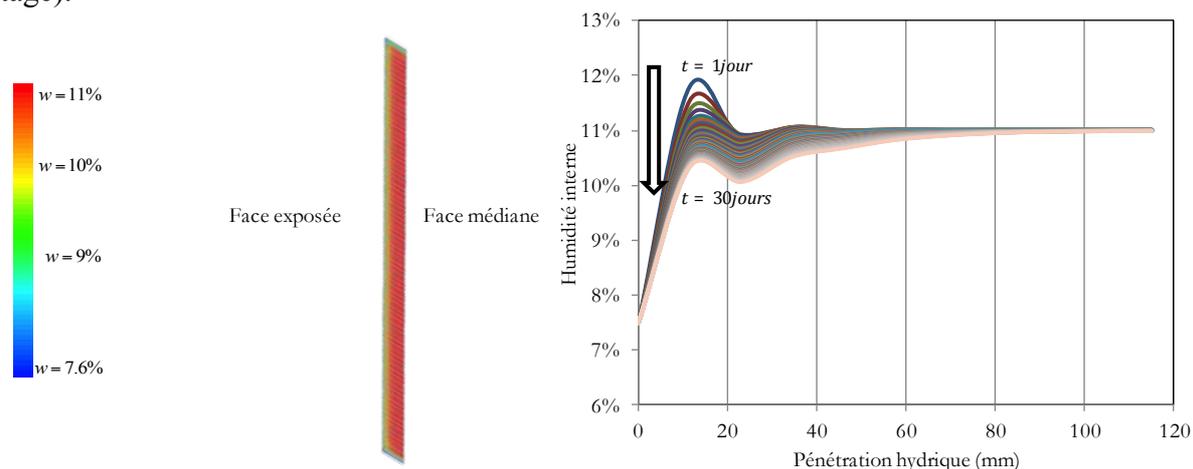


Figure 14 : Profil hydrique

Le profil hydrique montre que, durant 30 jours de climat sévère, seule une largeur périphérique de 40mm et affectée par les variations climatiques. Cependant, le gradient périphérique peut générer des risques de fissuration. Si nous prenons comme critère une valeur limite en contrainte transversale de traction, nous observons les points suivants, Figure 15:

- La face exposée à l'environnement climatique est le siège d'une fissuration transversale (contrainte supérieure à 10MPa).

- Des effets de relaxation combinés à l’inertie hydrique et à la mécano-sorption mettent en évidence une diminution des pics de contrainte.
- Enfin, la concentration des contraintes de traction est limitée à une périphérie inférieure à 1cm. Au-delà, il est montré une contrainte de compression qui signe un arrêt de fissuration.

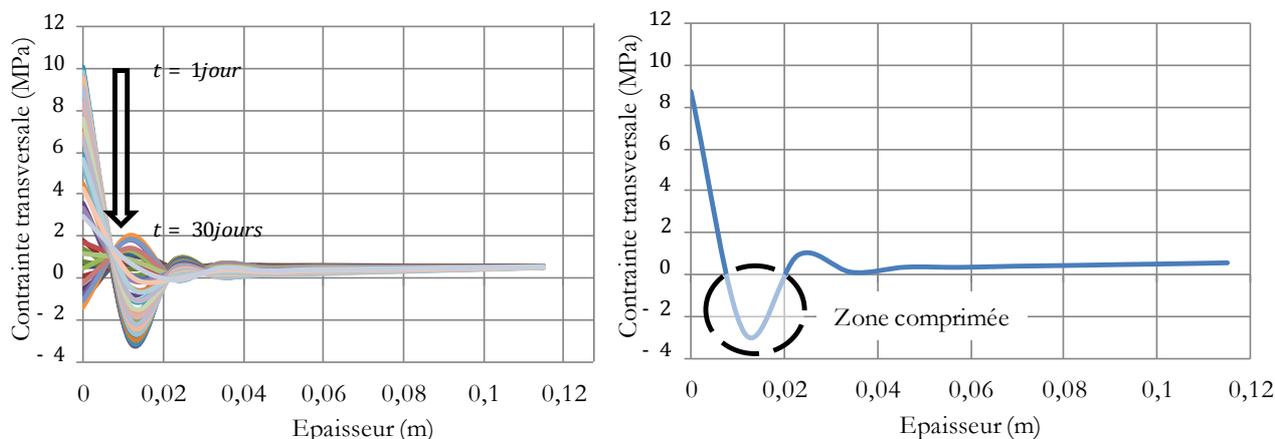


Figure 15 : Contraintes transversales et risques de fissuration

5. CONCLUSION

Les couplages thermo-hygro-mécaniques dans les structures bois doivent être étudiés dès la phase de conception des ouvrages. Aujourd’hui, les ingénieurs sont dépourvus de ce type d’outils et ne trouvent pas de solutions dans les règlements de construction. Ainsi, le développement d’ouvrages ‘hors normes’ (comme les bâtiments industriels ou recevant du public ainsi que les ouvrages d’art) nécessite de développer, d’une part, un partenariat entre concepteurs et experts dans le couplage et, d’autre part, des outils de diagnostic ou de monitoring afin de valider et contrôler les hypothèses de calcul tout au long de la vie des ouvrages.

REFERENCES

- Colmars J. , Dubois F., Gril J., “One–dimensional discrete formulation of Hygrolock model for wood hygromechanics”, *Mechanics of Time Dependent Materials*, in press, (2013).
- Dubois, F., Randriambololona, H., Petit, C., “Creep in wood under variable conditions : Numerical modelling and experimental validation”, *Mechanics of Time Dependent Materials*, **9**, (2005), pp. 173-202.
- Dubois F., Husson J. M., Sauvat N., Manfoumbi N., “Modeling of the viscoelastic, mechano-sorptive behavior in wood”, *Mechanics of Time Dependent Materials*, **16**, 4, (2012), pp. 439-460.
- Gril, J., “Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure”, *Phd thesis, Ecole Polytechnique, University of Paris VI* (1988).
- Husson J.M., Dubois F., Sauvat N., “Elastic response in wood under moisture content variations: analytic development”, *Mechanics of Time Dependent Materials*, **14**, 2, (2010), pp. 203-217.
- Lasserre B., “Modélisation thermo-hygro-mécanique du comportement différé de poutres de structure en bois”, *PhD thesis, University of Bordeaux 1*, (2000).
- Manfoumbi Boussougou, “Contribution à l’adaptation de l’Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement”, *PhD thesis, University of Limoges*, (2012).
- Merakeb S., Dubois F., Petit C., “Modeling of the sorption hysteresis for wood”, *Wood Science and Technology*, **43**, 7-8, (2009), pp. 575-589.
- Moutou Pitti R., Dubois F., Sauvat N., Fournely E., “Strain analysis in dried green wood: Experimentation and modeling approaches”, *Engineering Fracture Mechanics*, **105**, (2013), pp. 182-199.
- Perre P., Degiovanni A., “Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotrope : séchage du bois à basse et haute température”, *International Journal of Heat and Mass Transfers*, **33**, 11, (1990), pp.2463–2478.
- Pittet, V., 1996, “Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargement de longue durée”, *Phd thesis, Federal Polytechnic School of Lausanne*, (1996).