

## Migration d'humidité en régime non isotherme dans le bois massif : mesures par imagerie X et simulations numériques

Benoît Martin<sup>\*1,2</sup>, Julien Colin<sup>2,3</sup>, Pin Lu<sup>2</sup>, Joel Casalinho<sup>3</sup>, Anis Bouali<sup>1</sup>, Patrick Perré<sup>2,3</sup> et Romain Rémond<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LERMaB, ENSTIB, Université de Lorraine  
Épinal, France

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, SFR Concordet FR CNRS 3417

Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, France

<sup>3</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux

Gif-sur-Yvette, France

\*b.martin@univ-lorraine.fr

---

*RESUME.* Ce travail s'intéresse à la migration d'humidité dans le bois massif en régime non isotherme. L'imagerie X 2D a été utilisée dans un premier travail pour suivre l'évolution du champ de teneur en eau dans le bois lorsqu'il est soumis à un gradient de température constant. Les résultats ont été analysés à l'aide d'un modèle numérique simulant les transferts couplés masse-chaueur. Le gradient de concentration de vapeur doit être utilisé comme force motrice pour la diffusion mais une différence de cinétique subsiste en régime transitoire. Pour répondre aux questions qui demeurent, un nouveau dispositif d'imagerie à rayons X 3D est présenté. Sa conception permet de suivre le champ de la teneur en eau dans un échantillon de bois soumis à des conditions non isothermes variables, plus proches des conditions d'usages des matériaux de construction.

*MOTS-CLEFS.* Transferts couplés ; non isotherme ; épicéa ; tomographie ; modélisations

---

*ABSTRACT.* This work focuses on moisture migration in solid wood in non-isothermal conditions. 2D X-ray imaging was used to follow moisture content evolution in wood subjected to a constant temperature gradient. The results were analysed using a numerical model simulating coupled mass-heat transfer. The vapour pressure gradient have to be used as the driving force for diffusion but discrepancies remain in the transient phase. To answer the remaining questions, a new 3D X-ray imaging setup is presented. Its design makes it possible to follow moisture content field in a wood sample subjected to variable non-isothermal conditions, closer to the conditions of use of building materials.

*KEYWORDS.* Coupled transfer, non isothermal, spruce, tomography, modelling

---

## 1 INTRODUCTION

La performance énergétique des bâtiments neufs et du bâti existant après rénovation thermique est une des réponses face aux enjeux environnementaux du 21<sup>ème</sup> siècle (Rogelj et al., 2018; ADEME, 2018). Pour garantir la pérennité de ces ouvrages ainsi qu’une qualité d’air intérieur saine, il est nécessaire d’assurer un bon comportement hygrothermique des parois extérieures (Nielsen et al., 2004; Johansson et al., 2013; Tietze et al., 2017). Leurs compositions intègrent de plus en plus de matériaux biosourcés, tel que le bois massif. Ces échanges hydriques peuvent avoir un impact non négligeable sur les déperditions thermiques globales et doivent, en conséquence, être intégrés dans les modèles numériques (Duforestel, 2014; Moon et al., 2014; Perré et al., 2019). Cependant, des études ont montré que des écarts demeurent entre mesures expérimentales et simulations hygrothermiques (Woloszyn et al., 2014; McClung et al., 2014). Différentes explications ont été évoquées dans la littérature, par exemple les modalités de caractérisation des propriétés hydriques des matériaux. Elle est généralement effectuée en conditions isothermes, sans étudier l’effet de la température (mesure de la perméabilité à la vapeur, courbe d’humidité d’équilibre, etc.) qui se trouve donc relativement éloignée des conditions d’usages des matériaux. Les parois extérieures étant soumises à des conditions climatiques variables, les transferts couplés de chaleur et de masse ont principalement lieu en régime transitoire. En outre, les spécificités des matériaux hygroscopiques soumis à des conditions dynamiques donnent lieu à une hystérésis de sorption causée par le ré-agencement moléculaire (Skaar, 1988; Wadsö, 1994; Chen et al., 2018) et une opposition des forces motrices de diffusion d’humidité. Les gradients de teneur en eau et de pression de vapeur (fonction de la température) peuvent se retrouver opposés ou additionnés suivant les conditions aux interfaces et au sein du matériau (cycles jour/nuit, inter-saison, etc).

Pour mieux comprendre la dynamique des transferts au sein de ces parois, il est nécessaire de descendre à l’échelle matériau. Ce travail s’intéresse à la migration d’humidité dans le bois massif en régime non isotherme. Pour ce faire, l’imagerie à rayons X est utilisée afin de ne pas perturber les forces motrices mises en jeu. Dans une première partie, les résultats expérimentaux 2D obtenus par Bouali et al. sont analysés avec l’aide du modèle numérique TransPore (Perré and Turner, 1999; Bouali et al., 2012). Dans une seconde partie, un nouveau dispositif expérimental d’imagerie X 3D est présenté pour répondre aux interrogations soulevées lors de la précédente étude. Enfin, une analyse critique des résultats obtenus est effectuée suivie d’une présentation des résultats simulés avec les nouvelles conditions limites envisagées.

## 2 DONNÉES ISSUES DE BOUALI ET AL., 2012

### 2.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

#### 2.1.1 PROTOCOLE D’ACQUISITION EXPÉRIMENTAL

Les travaux de Bouali et al. sur la diffusion d’humidité dans le bois massif en régime non isotherme ont été réalisés à l’aide de l’imagerie à rayons X 2D (Fig. 1). Un échantillon d’alisier (*Sorbus torminalis*), préalablement à l’équilibre hygroscopique, avait été placé entre deux plaques de laiton au sein desquelles circulait un fluide caloporteur assurant une différence de température. Le coté froid de la plaque avait été maintenue à 15°C et le coté chaud à 35°C pendant une durée de 528 heures. L’échantillon avait été recouvert d’une feuille d’aluminium collée avec de la résine époxy sur toutes ses faces pour éviter les transferts massiques et ainsi garantir une teneur en eau moyenne constante.

#### 2.1.2 MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle de calcul TransPore simulant les transferts couplés de chaleur et de masse dans le milieu poreux avait été utilisé lors de ces travaux. Ce dernier fait intervenir trois variables

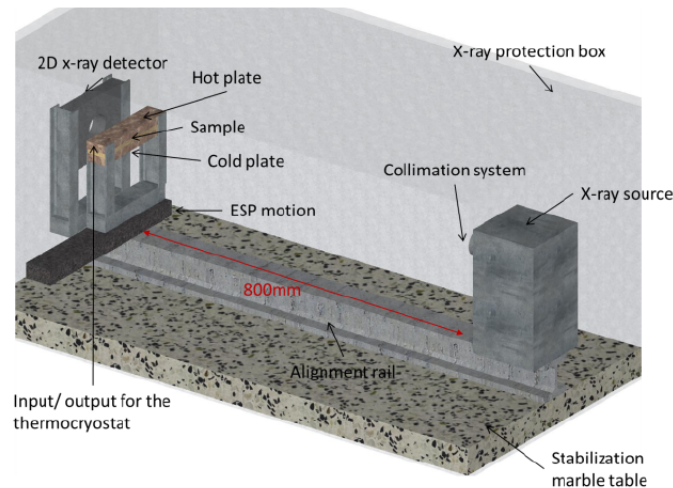


FIGURE 1. Banc d'essai à rayons X 2D constitué d'une plaque chaude et froide maintenant un gradient de température constant dans un échantillon en bois massif

indépendantes : la teneur en eau, la pression interne de la phase gazeuse et la température. Le jeu d'équations implicites est résolu numériquement par la méthode de prise moyennes volumiques utilisant le principe du volume élémentaire représentatif (VER) (Perré and Turner, 1999; Perré et al., 2007). La version 2D du code avait été utilisée pour confronter les données expérimentales et celles simulées.

## 2.2 CHOIX DE LA FORCE MOTRICE DE LA DIFFUSION

Dans ce travail, différentes formulations proposées dans la littérature ont été implémentées dans le code numérique TransPore afin de comparer les résultats prédits avec les résultats expérimentaux de Bouali et al. (2012). La communauté scientifique en charge de la thermique du bâtiment utilise principalement la pression de vapeur d'eau comme terme moteur de la diffusion d'humidité. La première simulation (cas A) utilise donc cette force motrice avec un facteur de résistance à la diffusion ( $\mu$ ) constant égale à 50. La seconde simulation (cas A\*) intègre l'hygro-activation de la diffusion en adoptant la fonction  $\mu(HR)$  proposée par Rode and Clorius (2004) pour l'épicéa (*Picea abies*). Cette expression a été utilisée par défaut en raison du manque de données disponibles pour l'alisier. Enfin, la dernière simulation (Cas B) utilise l'expression proposée par Siau et Avramidis (1993) qui modélise le flux diffusif en régime non isotherme avec deux termes moteurs, le gradient de température et le gradient d'eau liée.

La figure 2 présente le profil d'humidité suivant la hauteur de l'échantillon en direction radiale après 528 heures. Le gradient de teneur en eau mesuré s'est développé dans le sens opposé au gradient de température imposé. La variation d'humidité par rapport à la variation de température reste plus ou moins constante au voisinage de la plaque chaude et évolue exponentiellement au voisinage de la plaque froide. Cette tendance est correctement reproduite par le modèle avec les configurations A et A\* qui utilisent le gradient de concentration de vapeur comme terme moteur de la diffusion contrairement à la formulation de (Siau and Avramidis, 1993). La prise en compte de l'hygro-activation de la diffusion (Cas A\*) accentue légèrement le gradient d'humidité finale en réduisant la résistance au transfert interne dans la zone la plus humide (près de la plaque froide). La bonne concordance expérience/simulation est confirmée lorsque l'on compare la dynamique d'évolution du champ d'humidité dans l'échantillon sur l'ensemble de l'essai (Fig. 3).

Cependant, suite à ces travaux, des interrogations subsistent sur la redistribution de l'humidité lorsque le gradient de température change de direction (dynamique). Lors de la phase

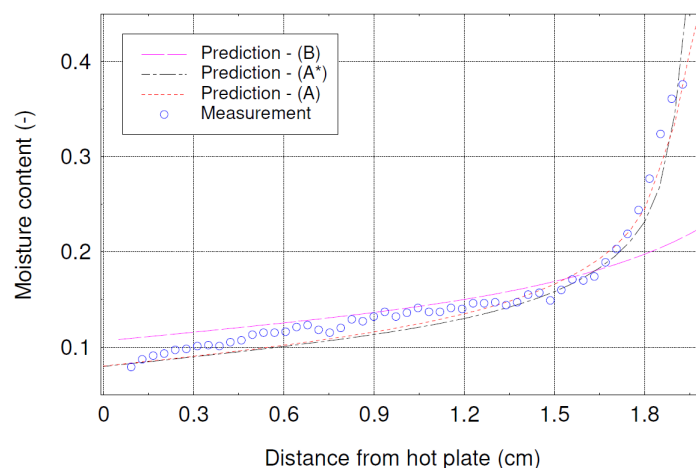


FIGURE 2. Comparaison des profils expérimentaux et simulés de teneur en eau

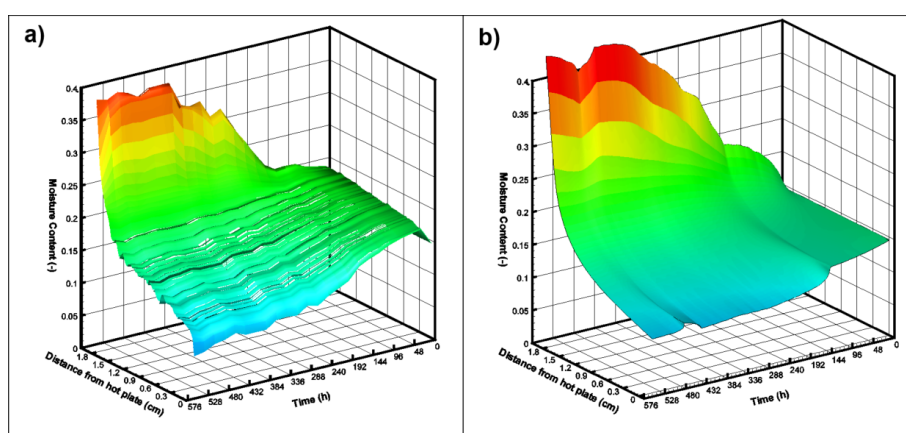


FIGURE 3. Évolution temporelle du profil d'humidité mesuré (a) et simulé (cas A) suivant la hauteur de l'échantillon (b)

transitoire, des écarts subsistent entre les valeurs prédites par le modèle et celles observées expérimentalement. Par ailleurs, les teneurs en eau mesurées du côté froid de l'échantillon en fin d'essai se trouvaient proche du point de saturation des fibres indiquant une possible formation d'eau libre (liquide) qui demande à être explorée (Fig. 3 b). Enfin, l'essence étudiée (alisier terminal) avait été choisie pour son homogénéité anatomique mais elle n'est pas représentative des essences couramment utilisées dans le domaine de la construction. En conséquence, un nouveau dispositif expérimental a été imaginé pour apporter des éléments de réponse.

### 3 NOUVEAU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL D'IMAGERIE À RAYONS X 3D

#### 3.1 DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF ADAPTÉ À L'IMAGERIE 3D

La tomographie à rayons X (ou imagerie 3D) requiert l'acquisition d'un grand nombre de projections 2D (radios) à différents angles de vues suivant une rotation complète de la zone étudiée. La reconstitution du volume numérique s'effectue ensuite par rétro-projection des radios (Grangeat Pierre, 2002). Le dispositif expérimental a donc été conçu pour permettre la rotation de l'échantillon pendant l'acquisition tout en maintenant une différence de température sur ses faces opposées avec des modules Peltier. Dans ce travail, l'essence d'épicéa a été choisie car elle est couramment utilisée pour les ouvrages en bois (Ramage et al., 2017). L'échantillon cylindrique (diam 20 mm x 20 mm de hauteur) a été débité suivant la direction radiale puis conditionné

dans une enceinte climatique jusqu'à l'équilibre hygroscopique. Le maintien d'une teneur en eau moyenne dans l'échantillon pendant toute la durée de l'essai est assuré par une gaine thermo-rétractable avec adhésif imperméable aux transferts de masse (Fig. 4).

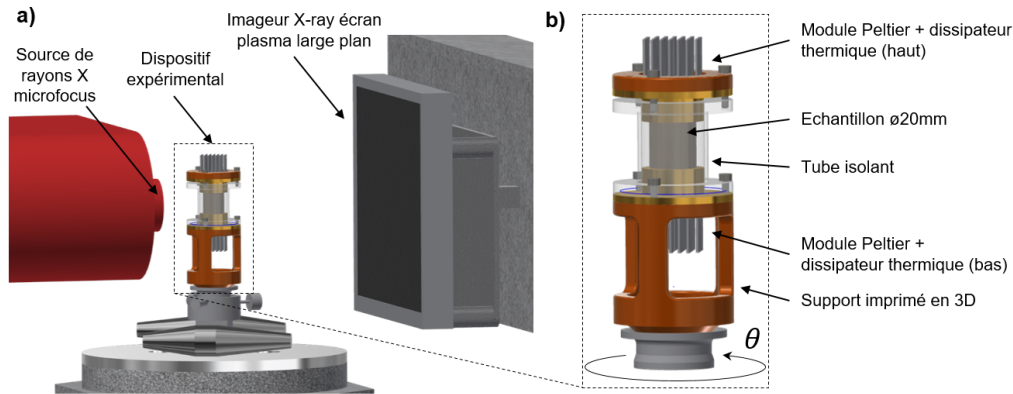


FIGURE 4. a) Vue schématique du dispositif et b) zoom du support échantillon

## 3.2 UTILISATION DU MODÈLE POUR GUIDER LA CONCEPTION

### 3.2.1 EFFET DE BORDS ET CONDITIONS LIMITES

Les effets de bord en périphérie de l'échantillon sont liés aux échanges thermiques externes. Ils induisent une différence de température entre la surface périphérique et le cœur de l'échantillon entraînant un flux d'humidité perpendiculairement à son axe principal et a pour conséquence une perturbation de l'intensité du gradient de température initialement imposée. L'impact de ces transferts thermiques est représenté sur la figure 5 avec les résultats des simulations suivant trois configurations :

- cas i :  $h_c = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- cas ii :  $h_c = 1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- cas iii :  $h_c = 12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Dans le cas théorique i, ne considérant aucun échange thermique en périphérie, le profil de teneur en eau se trouve parfaitement homogène suivant le rayon de l'échantillon. Lorsque le coefficient d'échange externe est de l'ordre de  $12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , un profil de teneur en eau suivant le rayon de l'échantillon se forme (Fig.5 cas iii). En conséquence, cet effet doit être contrôlé pour maîtriser les conditions limites. Pour y répondre, l'échantillon est positionné à l'intérieur d'un tube présentant une conductivité thermique modérée, dont la géométrie permet de limiter l'épaisseur de la couche d'air autour de l'échantillon afin de réduire les échanges thermiques par convection (cas ii).

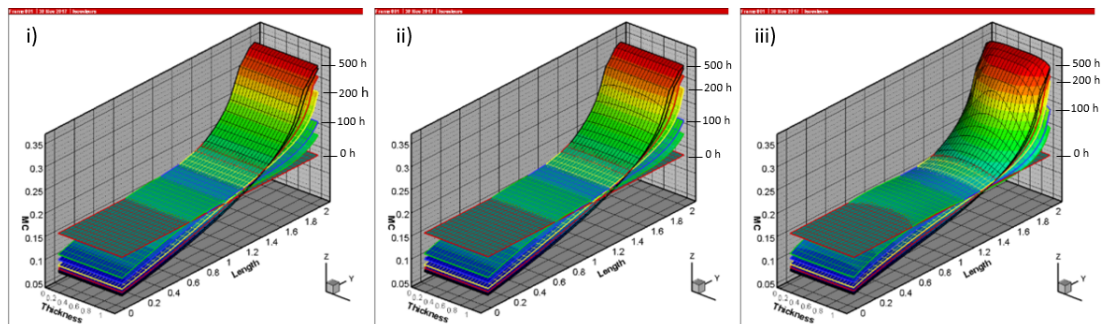


FIGURE 5. Évolution de la distribution du champ de teneur en eau aux temps  $t_0 \text{ h}$  ;  $t_{50} \text{ h}$  ;  $t_{100} \text{ h}$  ;  $t_{200} \text{ h}$  ;  $t_{300} \text{ h}$  ;  $t_{400} \text{ h}$  et  $t_{500} \text{ h}$  pour les cas i, ii et iii

### 3.2.2 CONDITIONS LIMITES DYNAMIQUES

La séquence des sollicitations thermiques appliquées de part et d'autre de l'échantillon est représentée sur la figure 6. Elle se décompose en trois phases. En premier lieu, un régime non isotherme constant avec une différence de température de 20 °C est généré pour reproduire une configuration d'hiver de manière simplifiée (phase 1). Ensuite, un retour en condition isotherme est adopté pour faire appel au gradient de teneur en eau comme force motrice (phase 2). Enfin, une oscillation de la température sur l'une des extrémités de l'échantillon autour de la température moyenne (maintenue sur l'autre extrémité) est réalisée afin d'approcher le comportement dynamique observé en inter-saison ou en été.

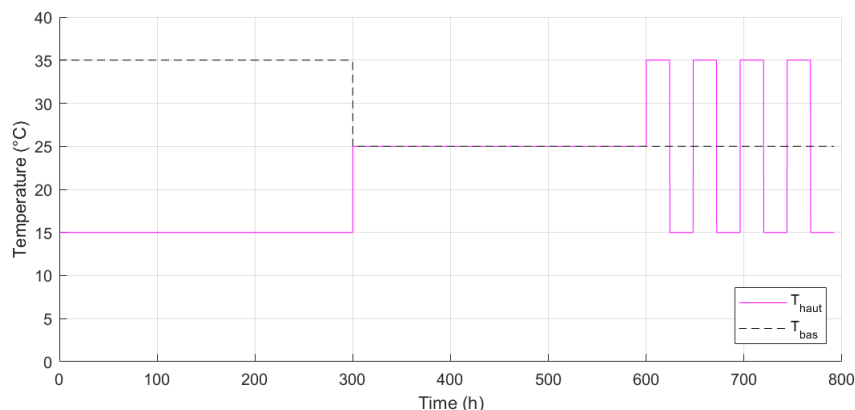


FIGURE 6. Consignes des températures appliquées sur les faces opposées de l'échantillon

La figure 7 représente l'évolution prédite par le modèle, dans sa version actuelle, de la distribution de la teneur en eau suivant la hauteur de l'échantillon soumis à des conditions limites dynamiques et avec un coefficient d'échange externe fixé à  $1 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$  (cas ii). Dans cette configuration, les transferts massiques en périphérie sont considérés nuls. Sur les figures 5 et 7, le côté chaud de l'échantillon est placé à l'abscisse zéro de l'échantillon et le côté froid à 20 mm. Lors de la phase 1, la migration de l'humidité s'effectue du côté chaud vers le côté froid de part le gradient de pression de vapeur. Lors du retour à l'isotherme (phase 2) d'une durée identique à la phase précédente, une re-distribution de l'humidité a lieu mais sans parvenir à revenir à l'état initial. Enfin, l'effet dynamique approché par l'alternance du gradient de température devrait, d'après le modèle, nous permettre d'obtenir des variations cycliques importantes aux faces opposées de l'échantillon.

## 4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, la migration de l'humidité dans le bois massif en condition non isotherme a été étudiée avec le code de calcul TransPore. Les données expérimentales obtenues par imagerie à rayons X 2D lors des travaux de Bouali et al. ont confirmé l'utilisation du gradient de pression de vapeur comme terme moteur pour la diffusion. L'ajout de l'hygro-activation de la diffusion à la formulation n'a pas influencé de manière significative la prédiction du modèle dans le cas d'un gradient de température constant. Pour étudier la dynamique, plus représentative des conditions d'usages des matériaux de construction, un nouveau dispositif expérimental d'imagerie X 3D a été présenté. Un soin particulier a été apportée à la maîtrise des conditions limites en vue être en mesure d'estimer la contribution des forces motrices de diffusion (gradients de pression de vapeur et de teneur en eau) sur la migration d'humidité. Les données expérimentales, prochainement obtenues, feront l'objet d'une analyse avec le modèle numérique avec la possibilité d'identification de paramètres suivant une méthode inverse.

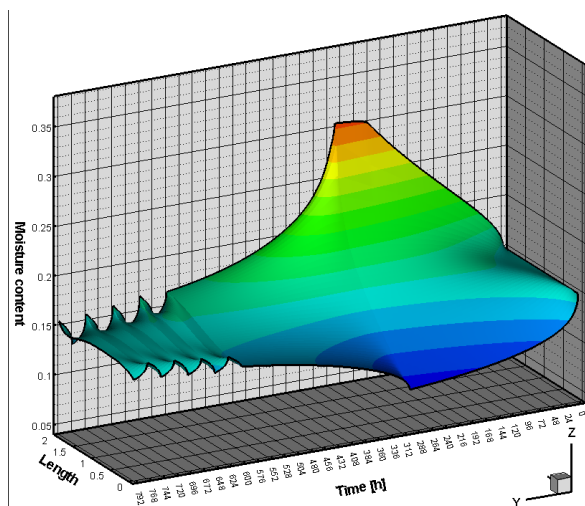


FIGURE 7. Évolution du champ de teneur en eau simulée selon les trois phases de sollicitations thermiques

## 5 REMERCIEMENTS

L'Ademe est partenaire du projet et co-finance une bourse de thèse dans le cadre de la thématique « villes et territoires durables », contribution au développement de bâtiments performants intégrant des matériaux biosourcés.

Cette étude a été réalisée au Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), soutenu par la Région Grand Est, le Département de la Marne, le Grand Reims et de l'Union Européenne. Les auteurs tiennent à remercier le Département de la Marne pour son soutien financier.

Pour une durée de trois ans (du 01/05/2016 au 31/10/2019), le projet 3D-BioMat est hébergé par le Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB 51110 Pomacle, France). D'un budget total de 965 000 euros, 3D Bio-Mat est cofinancé par le Grand Reims à hauteur de 31 % et par l'Union européenne à hauteur de 48,7 % (soit 50 % des dépenses éligibles). L'Europe s'engage en Champagne-Ardenne avec le Fonds Européen de développement régional).

## RÉFÉRENCES

- ADEME, . (2018). Climat, Air et Energie - Chiffres clés - éditions 2018. Technical report.
- Bouali, A., Rémond, R., Almeida, G., and Perré, P. (2012). Thermo-diffusion in wood : X-ray MC profiles analysed using a 2-D computational model. event-place : Xiamen, China.
- Chen, M., Coasne, B., Guyer, R., Derome, D., and Carmeliet, J. (2018). Role of hydrogen bonding in hysteresis observed in sorption-induced swelling of soft nanoporous polymers. *Nature Communications*, 9(1) :3507.
- Duforestel, T. (2014). Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Mémoire HDR.
- Grangeat Pierre (2002). *La tomographie : fondements mathématiques, imagerie microscopique et imagerie industrielle*. Traitement du signal et de l'image. Lavoisier Hermès Science publ.
- Johansson, P., Bok, G., and Ekstrand-Tobin, A. (2013). The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions. *Building and Environment*, 65 :178–184.

- McClung, R., Ge, H., Straube, J., and Wang, J. (2014). Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture : field measurements and simulations. *Building and Environment*, 71 :95–110.
- Moon, H. J., Ryu, S. H., and Kim, J. T. (2014). The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings. *Energy and Buildings*, 75 :439–446.
- Nielsen, K., Holm, G., Uttrup, L., and Nielsen, P. (2004). Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(4) :325–336.
- Perré, P., Challansonnex, A., and Colin, J. (2019). On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133 :968–975.
- Perré, P., Remond, R., and Turner, I. W. (2007). Comprehensive Drying Models based on Volume Averaging : Background, Application and Perspective. *Drying Technology*, 1.
- Perré, P. and Turner, I. W. (1999). A 3-D version of TransPore : a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(24) :4501–4521.
- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., and Scherman, O. (2017). The wood from the trees : The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 :333–359.
- Rode, C. and Clorius, C. O. (2004). Modeling of Moisture Transport in Wood with Hysteresis and Temperature-Dependent Sorption Characteristics. page 15.
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kobayashi, S., Krieglner, E., Mundaca, L., Séférian, R., Vilariño, M. V., Calvin, K., Emmerling, J., Fuss, S., Gillett, N., He, C., Hertwich, E., Höglund-Isaksson, L., Huppmann, D., Luderer, G., McCollum, D. L., Meinshausen, M., Millar, R., Popp, A., Purohit, P., Riahi, K., Ribes, A., Saunders, H., Schädel, C., Smith, P., Trutnevyte, E., Xiu, Y., Zhou, W., Zickfeld, K., Flato, G., Fuglestvedt, J., Mrabet, R., and Schaeffer, R. (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5 degree in the Context of Sustainable Development. page 82.
- Siau, J. and Avramidis, S. (1993). Application of a thermodynamic model to experiments on nonisothermal diffusion of moisture in wood. *Wood Science and Technology*, 27(2).
- Skaar, C. (1988). *Wood-Water Relations*. Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Tietze, A., Ott, S., Boulet, S., Gradeci, K., Labonnote, N., Grynning, S., Noreen, J., and Anna, P. (2017). Tall Timber Facades - Identification of Cross-effective and Resilient Envelopes for Wood Constructions (TallFacades). Technical report.
- Wadsö, L. (1994). Describing non-Fickian water-vapour sorption in wood. *Journal of Materials Science*, 29(9) :2367–2372.
- Woloszyn, M., Virgone, J., Trabelsi, A., Slimani, Z., Mougél, E., Reymond, R., Rafidiarison, H., Perré, P., Pierre, F., Belarbi, R., Issaadi, N., Abahri, K., Bejat, T., Piot, A., Wurtz, E., Duforestel, T., Daâge, M. C., Perrin, B., Coutand, M., Vololonirina, O., Pompéo, C., Jomaa, W., Lauffer, J.-S., Thiriet, P., Diss, R., Rémond, N., and Legrand, O. (2014). Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT. page 9.



(Siau and Avramidis, 1993) (Rode and Clorius, 2004)