

ForestValue

hardwood_joint

WP1 – Tâche 1.3

**Étude des transferts hygrothermiques
dans une paroi multicouche à connexion
rainurée**

Annabelle HOSPITAL

2022



Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus dans le secteur européen du bâtiment en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif des études mécaniques et thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente une partie de la participation française à ce projet et concerne l'étude hygrothermique des assemblages rainurés.

Sommaire

1	Introduction	5
2	Modélisation des transferts de chaleur et humidité	11
2.1	Transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux.....	11
2.2	Modèle mathématique.....	19
2.3	Validation et ajustement du modèle en 1D.....	23
3	Étude expérimentale hygrothermique d’assemblages rainurés	31
3.1	Descriptif du dispositif expérimental.....	31
3.2	Étude de l’incertitude de la mesure des capteurs de déplacement	34
3.3	Résultats expérimentaux	39
4	Simulations hygrothermiques des modules expérimentaux.....	49
4.1	Modélisation mécanique : hygro-expansion	49
4.2	Paramètres matériaux du modèle thermo-hydrigue.....	54
4.3	Modélisation hygrothermique	58
5	Application du modèle thermo-hydrigue à l’échelle d’une paroi multicouche à connexion rainurée.....	65
5.1	Conditions limites et données matériaux.....	65
5.2	Présentation des résultats.....	68
6	Conclusion	73
7	Bibliographie	75

1 Introduction

L'objet de ce travail est l'étude hygrothermique d'une paroi de bâtiment en matériaux biosourcés dont le système constructif repose sur l'assemblage de planches de bois feuillus par préparation spécifique des surfaces de contact et vissage (assemblage développé au LERMAB).

La paroi étudiée est un panneau structural constitué d'un empilage de plis croisés à 90° (voir Figure 1-1). Chaque pli est composé de lames de bois aboutées et rainurées dans la direction longitudinale sur une face. Parallèles entre elles et espacées régulièrement, les lames sont disposées verticalement (montants) puis horizontalement (traverses) un pli sur deux. L'espace libre entre les lames de bois est occupé par des bandes d'isolant.

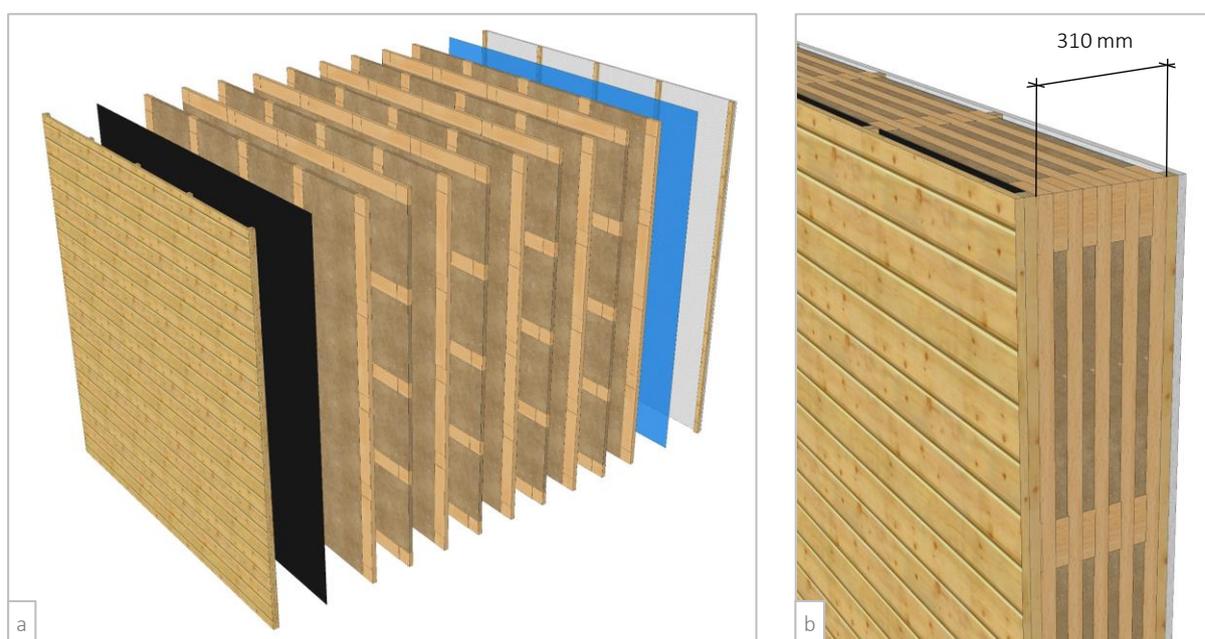


Figure 1-1 Exemple de composition d'un mur utilisant l'assemblage rainuré : a) de gauche à droite : parement extérieur, pare-pluie, 9 plis croisés, pare-vapeur et parement intérieur, b) largeur total des 9 plis croisés.

Au niveau des intersections, les lames sont rainurées dans la direction transversale (voir Figure 1-2) et vissées pour maintenir le contact bois sur bois, cet assemblage est appelé assemblage rainuré. L'assemblage rainuré est présenté ici pour la réalisation d'une paroi de bâtiment, mais il peut se décliner sur le même principe pour d'autres éléments de construction (poutre treillis par exemple, les rainures pouvant être réalisées avec un angle par rapport à la direction longitudinale).

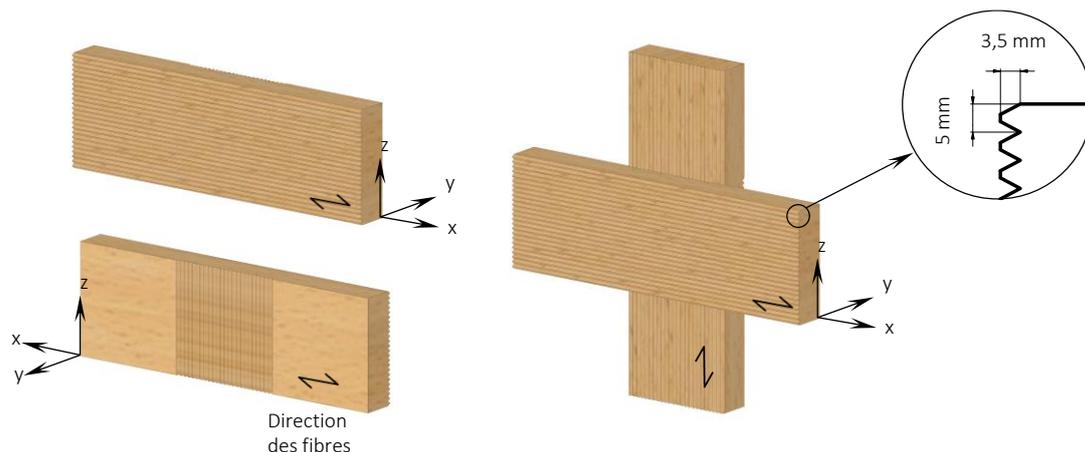


Figure 1-2 Schéma explicatif du fonctionnement de l'assemblage rainuré

Ce type de mur est adaptable et paramétrable selon les besoins, le nombre de plis croisés peut varier, ainsi que le type de matériaux utilisés (bois de hêtre ou de chêne, isolant en fibre de bois ou minérale, etc.). De même, différents types de parements intérieurs et extérieurs sont possibles.

Une étude sur la faisabilité d'un ouvrage en hêtre des Vosges par planches croisées striées vissées a été réalisée par le LERMAB entre 2014 et 2015. L'assemblage utilisé était basé sur le même principe que l'assemblage présenté par la Figure 1-2. Les deux faces des planches étaient rainurées dans la direction longitudinale, les rainures réalisées dans la direction transversale formaient des « pyramides » appelées picots (voir Figure 1-4), l'assemblage est donc appelé assemblage picot.

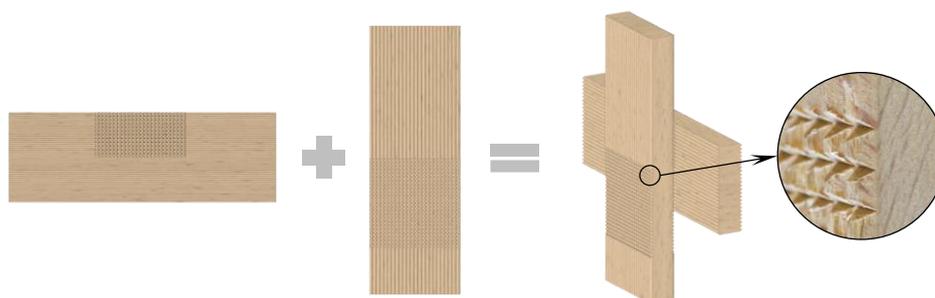


Figure 1-3 Schéma explicatif du fonctionnement de l'assemblage picot

Dans le cadre de l'étude avec l'assemblage picot des essais mécaniques ont été réalisés pour déterminer la résistance et le comportement des assemblages soumis à une sollicitation de moment pur. Lors de ces essais, 28 assemblages ont été stockés dans une salle climatisée où la teneur en eau d'équilibre du bois était égale à 12 %, et 2 assemblages ont été stockés dans un environnement où la teneur en eau d'équilibre du bois a atteint près de 8 %. La Figure 1-4 présente les courbes d'essais d'assemblages picot soumis à une sollicitation de moment pur. Les courbes rouges représentent les deux assemblages dont la teneur en eau du bois était à près de 8 %. La moyenne du moment à rupture pour un plan de cisaillement de l'assemblage, M_{ass} [kN/m], est donnée pour les deux teneurs en eau, ainsi que la raideur rotationnelle K_{ass} [kN m/rad].

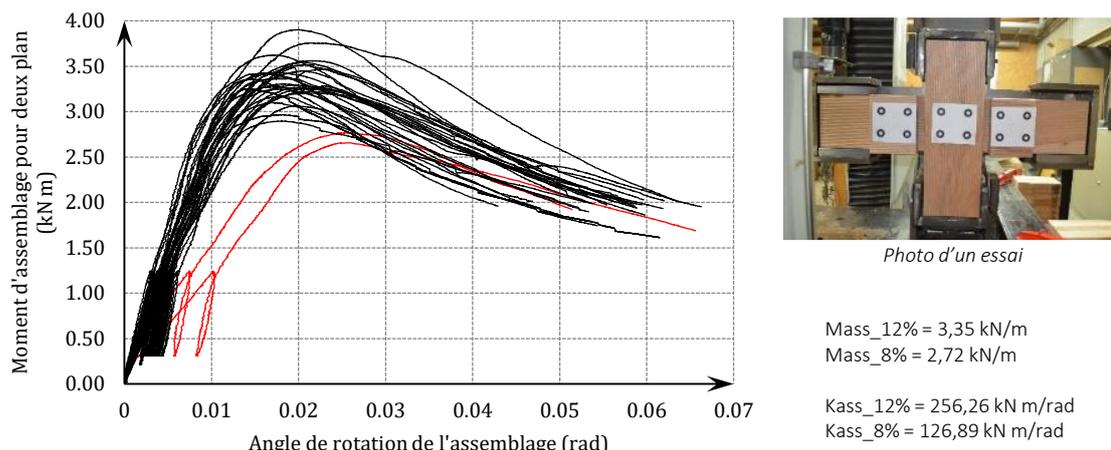


Figure 1-4 Résultats des essais mécaniques pour déterminer la résistance de l'assemblage picot

Ces essais donnent une indication sur l'impact de la variation de la teneur en eau dans le bois (ici une diminution) sur la résistance de l'assemblage picot. La résistance est plus faible pour les deux essais avec un bois à une teneur en eau d'environ 8 %, cela peut être expliqué par le jeu créé entre les deux planches, cet espace résultant du retrait du bois.

Suite à ces essais, un assemblage picot a été soumis à un environnement à humidité relative élevée. Après la stabilisation de la teneur en eau du bois, l'assemblage a été dévissé et il a été observé un « matage » du bois dû au gonflement de ce dernier. Le retrait n'est donc pas le seul phénomène qui peut diminuer la résistance de l'assemblage, un jeu peut aussi résulter du gonflement de bois, en effet, le matage du bois après gonflement ne lui permet pas de retrouver sa dimension initiale.

La résistance et la rigidité de l'assemblage rainuré et picot dépendent du contact bois sur bois, or le caractère hygroscopique du matériau bois entraîne des variations dimensionnelles qui peuvent résulter en un jeu dans l'assemblage. La paroi étant soumise à des variations de température et d'humidité au sein du bâtiment, les propriétés mécaniques de l'assemblage rainuré peuvent être dégradées. Il est donc fondamental de quantifier les deux phénomènes liés que sont les transferts de chaleur et d'humidité ayant lieu dans les assemblages des parois en fonction du temps afin d'appréhender correctement leur comportement.

La simulation des transferts thermiques et hydriques de ce type de paroi est complexe. En effet, les couches qui composent le mur ne sont pas uniformes. Ainsi, selon la partie du mur étudiée sa composition est différente. Quatre zones sont identifiées (voir Figure 1-5) :

- la zone bois-bois est uniquement composée de couches de bois, elle correspond au croisement des planches ;
- la zone bois-isolant est composée de bois et d'isolant, la première couche étant en bois ;
- la zone isolant-bois est aussi composée de bois et d'isolant, mais sa première couche correspond à un panneau d'isolant ;
- la zone isolant-isolant est composée seulement d'isolant.

Une étude en une dimension ne peut pas prendre en compte l'interaction entre les différentes zones, du fait de la géométrie de l'assemblage rainuré, il est donc nécessaire de réaliser l'étude en trois dimensions.

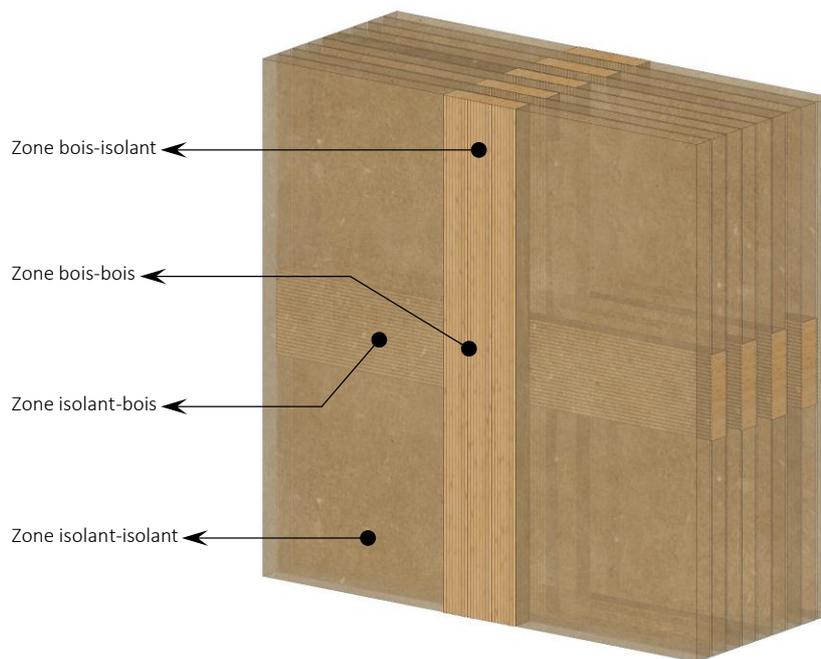


Figure 1-5 Représentation de l'assemblage rainuré utilisé dans un mur, identification des quatre zones le composant

L'étude sur la faisabilité d'un ouvrage en hêtre des Vosges par planches croisées striées vissées réalisée par le LERMAB entre 2014 et 2015 qui a été évoquée précédemment a aussi permis d'étudier le comportement thermo-hydrrique d'une paroi. Cette étude a permis de confronter la résistance thermique d'un mur calculée à partir des résistances thermiques de chaque zone (un calcul en 1D) avec les résultats d'essais en double enceinte climatique d'une paroi soumise à différentes conditions de température et d'humidité. Les valeurs des résistances thermiques étaient concordantes, néanmoins, les essais n'ont pas permis de caractériser les transferts hydriques pour toutes les zones du mur. En effet, seule la température et l'humidité d'une zone bois-isolant ont été mesurées, or, c'est au niveau de l'assemblage (zone bois-bois) que la quantification des transferts hydriques doit être faite. Le contact bois sur bois doit être caractérisé car c'est de lui dont dépend la raideur et la résistance de l'assemblage.

De nombreux outils de simulations numériques des transferts de chaleur et d'humidité ont déjà été développés [1], mais les degrés de développement et de simplification des modèles sont bloqués dans les codes de ces outils. Or, la paroi qui doit être étudiée est caractérisée par un assemblage ayant une configuration particulière ne pouvant être prise en compte par ces outils de simulations existants. L'objectif de ce travail est donc de proposer un modèle simple mais suffisamment complet et flexible pour décrire les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans cette paroi.

Cette étude est un cas particulier, le modèle développé peut s'appliquer pour tout élément de construction de plusieurs couches dans la limite des hypothèses émises dans la partie 2.1. Dans cette même partie, les différents mécanismes de transferts et de stockage de chaleur ainsi que d'humidité qui interviennent dans une paroi sont. Pour le transfert de chaleur, les transports par conduction thermique et par flux d'enthalpie à travers la diffusion de vapeur avec changements de phase sont pris en compte. Pour le transfert d'humidité, le transport par diffusion de vapeur d'eau est pris en compte ainsi que le transfert d'eau par capillarité. Les transferts de chaleur et d'humidité entre la paroi et son environnement sont aussi décrits.

La partie 2.2 présente le modèle mathématique, il est basé sur les travaux de Kunzel [2]. Les potentiels moteurs des transferts de chaleur et d'humidité choisis sont respectivement la température et l'humidité relative. Ce modèle est implémenté dans le code de calcul aux éléments finis Cast3M qui est développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

La partie 2.3 présente la validation du modèle développé. Une première validation est effectuée en respectant les directives de la norme EN 15026 [3]. Par la suite, les résultats de simulations numériques obtenues avec le modèle sont comparés avec les résultats de différents modèles existants, comme celui implémenté dans le logiciel commercial

WUFI®. Cette partie présente aussi plusieurs paramètres qui peuvent être ajustés pour optimiser le temps de calcul des simulations.

La partie 3 propose un protocole expérimental afin de mesurer les variations dimensionnelles de l'assemblage étudié. Le dispositif expérimental est décrit et l'incertitude de l'instrumentation des modules expérimentaux est discutée. La grandeur mesurée est le retrait ou le gonflement sur la hauteur des planches de bois de l'assemblage à l'aide de capteurs de déplacement. Les résultats pour les différents essais réalisés sont présentés dans cette partie.

Les résultats expérimentaux sont confrontés aux résultats obtenus avec le modèle développé dans la partie 4. Afin de les comparer, un modèle d'hygro-expansion a été développé afin de calculer les déformations des planches à partir de leurs champs de teneur en eau. Le modèle thermo-hydrique développé dans la partie 2 est adapté afin de modéliser au mieux les résultats des essais.

Enfin, une étude thermo-hydrique à l'échelle d'une paroi est proposée dans la partie 5 afin d'étudier l'influence de la variation de la teneur en eau dans la paroi sur sa résistance et sa raideur.

2 Modélisation des transferts de chaleur et humidité

2.1 Transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux

Les matériaux biosourcés utilisés dans cette étude sont le bois de feuillus et les panneaux d'isolant en fibres de bois. Ces matériaux étant tous à base de bois, cette section présente les transferts de chaleur et d'humidité ayant lieu dans ce type de matériau. Préalablement, les notions relatives à l'air humide et celles liées au stockage de l'humidité dans le bois sont définies, ainsi que les hypothèses d'étude qui seront donc les limites du modèle numérique proposé. Les références concernant les différents principes physiques présentés sont omises lorsque la théorie est généralement connue et acceptée.

2.1.1 Définitions relatives à l'air humide

L'air humide est composé d'air sec et de vapeur d'eau. La pression partielle de vapeur d'eau, p_v [Pa], correspond à la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule tout le volume du mélange de gaz que constitue l'air humide. Sa valeur maximale correspond à $p_{v,sat}$ qui est la pression de vapeur saturante exprimée en [Pa], au-delà de cette valeur il y a condensation. La pression de vapeur saturante peut être exprimée en fonction de la température, T [°C], par les formules empiriques suivante [4] :

$$p_{v,sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot T}{237,3 + T}\right) \text{ pour } T \geq 0 \text{ °C}$$
$$p_{v,sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot T}{265,5 + T}\right) \text{ pour } T < 0 \text{ °C}$$
(2-1)

L'humidité relative caractérise le degré d'humidité d'une ambiance : il s'agit du rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et sa valeur à saturation pour la même température. L'humidité relative, notée HR ou ϕ , peut aussi s'exprimer en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau et de la pression de vapeur saturante :

$$HR = \phi = \frac{p_v}{p_{v,sat}}$$
(2-2)

2.1.2 Stockage de l'humidité dans le bois

La quantité d'eau contenue dans le bois peut être définie de différentes façons, dont :

- La teneur en eau massique, u [kg/kg, %], qui est le rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse de bois à l'état anhydre :

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$
(2-3)

avec

- m_h la masse humide du matériau [kg] ;
 m_s la masse du matériau anhydre [kg], pour une pièce de bois sciée, elle est déterminée par la méthode de dessiccation, l'échantillon de bois est séché en étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de sa masse [5].

- La teneur en eau en masse par volume, w [kg/m³] :

$$w = \rho_s \cdot u \quad (2-4)$$

avec

- ρ_s la masse volumique du matériau anhydre [kg/m³].

- La teneur en eau volumique ψ [m³/m³, vol%], qui est le rapport du volume d'eau sur le volume apparent du matériau sec, elle peut être exprimée à partir de la teneur en eau massique :

$$\psi = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot u \quad (2-5)$$

avec

- ρ_w la masse volumique de l'eau [kg/m³].

L'eau dans un bois vert est retenue de trois façons :

- l'eau de constitution qui est intégrée à la composition chimique du bois (elle est l'eau restante à l'état anhydre et ne peut être évacuée qu'avec un traitement thermique) ;
- l'eau liée qui est contenue dans les parois cellulaires ;
- l'eau libre qui se trouve dans les cavités cellulaires.

Lorsqu'un bois vert est exposé à des conditions atmosphériques, c'est tout d'abord l'eau libre qui s'évapore et une nouvelle phase apparaît dans les cavités cellulaires, la vapeur d'eau. La teneur en eau au moment où toute l'eau libre aura disparue correspond au point de saturation des fibres (PSF), à partir de ce moment débute l'évaporation de l'eau liée. Le domaine hygroscopique du bois correspond à la plage de teneur en eau inférieure au PSF, il est caractérisé par un équilibre thermodynamique entre la vapeur d'eau contenue dans les cavités cellulaires et l'eau liée présente sur les parois cellulaires.

Le bois est donc un matériau hygroscopique, il a la capacité de stocker et de libérer l'humidité de l'air ambiant. Un matériau hygroscopique placé dans un environnement à humidité relative et température fixes tend vers une teneur en eau d'équilibre. Pour une température donnée, la courbe donnant l'évolution de la teneur en eau du bois en fonction de l'humidité relative de l'air, lorsque celle-ci croît, est appelée isotherme de sorption (voir Figure 2-1). Cette courbe traduit le phénomène d'adsorption physique de la vapeur d'eau, le phénomène inverse est appelé désorption (perte d'eau). L'impact de la température sur la courbe de sorption (d'adsorption ou de désorption) est généralement négligé dans la physique du bâtiment. Le fait que la désorption donne une valeur d'humidité dans le bois plus grande que l'adsorption est appelé phénomène d'hystérésis. Les relations entre la teneur en eau, l'humidité relative et la température peuvent aussi être données par des tableaux, graphiques, diagrammes ou équations.

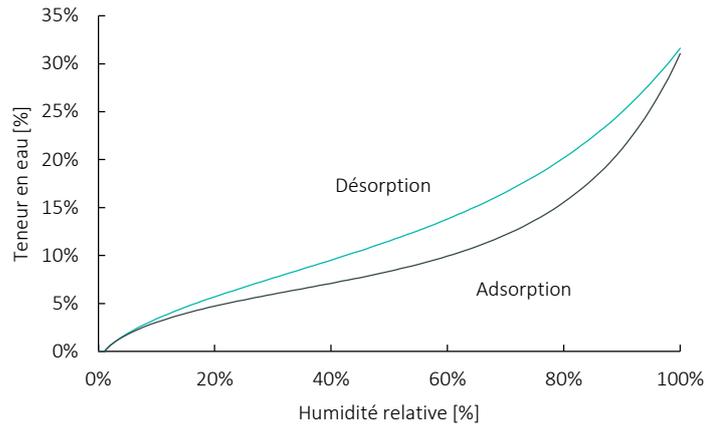


Figure 2-1 Isothermes de sorption à 20°C pour le bois de hêtre, données issues de [6]

La perte ou le gain d'eau dans le bois provoque des phénomènes de retrait (désorption) et de gonflement (adsorption). Le bois étant un matériau anisotrope, les déformations dues au retrait ou au gonflement du bois sont différentes selon les trois directions principales du bois. Les déformations tangentielles sont environ deux fois plus élevées que les déformations radiales, et les déformations longitudinales sont très faibles. Le retrait total et le gonflement total peuvent être calculés à l'aide des formules suivantes :

$$R_i = \frac{l_{i,sat} - l_{i,s}}{l_{i,sat}} \cdot 100 \quad (2-6)$$

$$G_i = \frac{l_{i,sat} - l_{i,s}}{l_{i,s}} \cdot 100$$

avec

- R_i le retrait dans la direction i (tangentielle, radial ou longitudinal) [%] ;
- G_i le gonflement dans la direction i [%] ;
- $l_{i,sat}$ la dimension dans la direction i à l'état saturée [mm] ;
- $l_{i,s}$ la dimension dans la direction i à l'état anhydre [mm].

Dans le domaine hygroscopique, les variations dimensionnelles sont considérées comme proportionnelles aux variations en teneur en eau. Les coefficients de retrait, r_i [%], et de gonflement, g_i [%], sont définis comme la pente de la droite représentant la déformation en fonction de l'humidité du bois :

$$r_i = \frac{l_{i,sat} - l_{i,s}}{l_{i,sat} \cdot u_{PFS}} \cdot 100 \quad (2-7)$$

$$g_i = \frac{l_{i,sat} - l_{i,s}}{l_{i,s} \cdot u_{PFS}} \cdot 100$$

avec

- u_{PFS} l'humidité au point de saturation des fibres [%].

L'hypothèse de linéarité permet aussi de calculer la dimension finale due au retrait ou au gonflement pour une teneur en eau du bois donnée :

$$l_{i,w} = l_{i,sat} (1 - r_i (u_{PFS} - u)) \quad (2-8)$$

$$l_{i,w} = l_{i,s} (g_i (u_{PFS} - u) + 1)$$

2.1.3 Hypothèses d'étude

Pour le modèle 1D et 2D, une paroi verticale séparant deux ambiances, intérieure et extérieure, avec lesquelles elle échange de l'énergie et de la vapeur d'eau est considérée. Le transfert d'air au sein de la paroi n'est pas pris en compte. La paroi est considérée comme un milieu continu et les contacts entre deux matériaux sont supposés n'opposer aucune résistance aux transferts d'énergie et d'humidité.

Dans le cadre de cette étude, les matériaux qui composent la paroi sont considérés comme homogènes, indéformables et inerte chimiquement. La distribution de la température et de la teneur en eau initiales sont considérées uniformes dans les matériaux. Une hypothèse forte est que l'équilibre thermodynamique local est atteint pour chaque phase, dans le cas du bois cette hypothèse est valide mais dans le cas de matériau très diffusifs à la vapeur d'eau et fortement hygroscopique, comme de l'isolant en fibre de bois, l'équilibre local n'est pas atteint. Ce phénomène peut induire d'importantes erreurs en régime transitoire, notamment pour les matériaux de faible épaisseur (en dessous de 24 mm selon les travaux de [7]), une formulation a été proposé par [8] afin de prendre en compte le phénomène de non-équilibre local.

Des hypothèses supplémentaires sont à prendre en compte :

- la vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait ;
- la pression totale est supposée constante et égale à la pression atmosphérique ;
- les effets de la gravité sont négligés ;
- le transfert de chaleur dans le matériau par rayonnement est négligé ;
- absence de gel (température en dessous de zéro considérée comme égale à zéro).

2.1.4 Mécanismes de transfert de l'humidité

Il existe différents mécanismes de transfert d'humidité dans un matériau poreux selon les forces motrices qui les gouvernent. Ces mécanismes ont été listés de différentes manières dans de nombreuses publications, le Tableau 2-1 résume ces différents mécanismes selon Künzle [2].

Tableau 2-1 Mécanismes de transport de l'humidité dans les milieux poreux d'après [2]

Phases transportées	Mécanismes	Forces motrices
Vapeur d'eau	Diffusion de vapeur	Pression de vapeur
	Thermodiffusion	Température
	Diffusion de Knudsen ou effusion	Pression de vapeur
	Advection	Pression totale
Eau liquide	Migration capillaire	Pression de succion
	Migration d'eau liée	Teneur en eau
	Flux gravitationnel	Gravité
	Flux hydraulique	Différence de pression totale
	Electrokinésie	Champ électrique
	Osmose	Concentration en ions

Seul le mécanisme de diffusion vapeur est pris en compte pour le transfert de vapeur d'eau, il correspond à la diffusion moléculaire libre : le transport des molécules d'eau est déterminé par leurs collisions entre elles.

La thermodiffusion correspond à la vapeur d'eau transportée par diffusion due à un gradient de température, ceci modifie l'humidité relative de l'air localement et entraîne une redistribution de l'humidité. Ce mécanisme est rarement pris

en compte pour les matériaux de construction, une étude datant de 2011 a confirmé son existence et mis en évidence sa part négligeable vis-à-vis de l'apport de la diffusion de vapeur [9].

L'effusion ou diffusion de Knudsen décrit le transport des molécules d'eau déterminé par les collisions avec les parois des pores. Ayant une approche macroscopique ce mécanisme est pris en compte dans le facteur de résistance intervenant dans la densité de flux diffusif.

L'advection correspond au transfert de vapeur d'eau transportée par l'air circulant à travers les pores du matériau (phénomènes de convection interne), ce mécanisme n'est pas pris en compte car le transfert d'air est considéré comme nul au sein de la paroi.

Le transfert d'eau liquide par capillarité étant majoritaire les mécanismes de flux gravitationnel, de flux hydraulique, d'électrokinésie et d'osmose ne sont pas considérés ici.

Transfert de vapeur d'eau par diffusion

Le transfert de vapeur d'eau dans un volume d'air libre et immobile se produit par diffusion due à un gradient de concentration en vapeur d'eau de l'air (de la région la plus concentrée vers la région la moins concentrée). La densité de flux diffusif, $\varphi_{w,v}$ [kg/(m² s)], peut-être décrite par la loi de Fick en faisant intervenir un coefficient de diffusion et la teneur (ou concentration) en vapeur d'eau de l'air. Néanmoins, en utilisant la loi des gaz parfait et en négligeant le transport dû au gradient de température, la densité de flux diffusif peut être exprimée en fonction de la pression de vapeur d'eau pour des raisons pratiques :

$$\varphi_{w,v} = -\delta_a \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2-9)$$

avec

δ_a la perméabilité de l'air à la vapeur [kg/(m s Pa)], 2×10^{-10} kg/(m s Pa).

La perméabilité de l'air à la vapeur dépend de la température et de la pression de l'air, elle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [2] :

$$\delta_a = 2 \cdot 10^{-7} \frac{(T + 273.15)^{0.81}}{P_a} \quad (2-10)$$

avec

T la température ambiante [°C] ;

P_a la pression de l'air ambiant [Pa], 101,325 Pa.

Pour un matériau poreux, la vapeur d'eau peut également migrer par diffusion sous l'effet d'un gradient de pression partielle de vapeur en introduisant un facteur de résistance à la diffusion noté μ [-] :

$$\varphi_{w,v} = -\frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} = -\delta_p \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2-11)$$

avec

δ_p la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau [kg/(m·s·Pa)].

La perméabilité à la vapeur d'eau du matériau désigne le taux de vapeur pouvant traverser une épaisseur de 1 m de matériau pour une différence de pression de vapeur de 1 Pa de part et d'autre en 1 s. Ce paramètre est caractérisé par la méthode normalisée dite « méthode de la coupelle » par la norme ISO 12572 [10] (sous conditions isotherme). La perméabilité dépend de la teneur en eau du matériau ainsi que de sa température (rarement pris en compte pour cette dernière).

Une grandeur souvent rencontrée pour caractériser un matériau est l'épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente pour la diffusion de vapeur S_d [m]. Cette valeur inclut l'épaisseur e [m] du matériau et correspond à l'épaisseur d'une couche d'air qui aurait la même résistance à la vapeur que le matériau :

$$S_d = \mu \cdot e \quad (2-12)$$

Transport d'eau liquide

Dans le bois, l'eau liquide peut être présente sous deux formes, l'eau libre et l'eau liée. L'eau liée présente dans le matériau est mise en mouvement par un gradient de teneur en eau. Ce transport est pris en compte dans la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau décrivant le transport de vapeur, la différenciation du transport de l'eau liée et de celui de la vapeur d'eau étant difficile expérimentalement (voir méthode gravimétrique ISO 12572 [10]).

Le transfert d'eau liquide par capillarité est gouverné par la différence de pression de l'eau dans les pores du matériau. La densité de flux d'eau liquide, $\varphi_{w,l}$ [kg/(m² s)], peut-être décrite en fonction de la pression de succion capillaire, p_{succ} [Pa], selon la loi de Darcy :

$$\varphi_{w,l} = -K_l \cdot \frac{\partial p_{succ}}{\partial x} \quad (2-13)$$

avec

K_l le coefficient de diffusion en phase liquide [kg/(m s Pa)] (appelé aussi perméabilité liquide ou conductivité liquide).

Il est aussi possible d'exprimer le flux d'eau liquide en choisissant la teneur en eau comme potentiel moteur :

$$\varphi_{w,l} = -\rho_s \cdot D_w \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = -D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2-14)$$

avec

D_w le coefficient de transport capillaire (ou diffusivité hydrique) [m²/s].

Le code de calcul développé utilise comme potentiel moteur l'humidité relative, d'après [2] il est possible d'exprimer la densité de flux de l'eau liquide en utilisant ce potentiel moteur :

$$\varphi_{w,l} = -D_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2-15)$$

avec

D_ϕ le coefficient de conduction liquide [kg/(m s)].

Ces trois coefficients peuvent être reliés ainsi :

$$D_\phi = D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial \phi} = K_l \cdot \frac{\partial p_{succ}}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial \phi} \quad (2-16)$$

2.1.5 Transfert de chaleur

Transfert par conduction

Dans un milieu poreux le mode de transfert de chaleur principal est la conduction (le rayonnement et la convection/advection sont négligés). La conduction est un phénomène similaire à la diffusion, c'est un mode de transfert de l'énergie

d'agitation moléculaire par échange à l'occasion des collisions entre molécules. Le gradient de température est le moteur de la conduction thermique. La loi de Fourier exprime la densité de flux d'énergie conductif $\varphi_{T,cd}$ [W/m²] :

$$\varphi_{T,cd} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-17)$$

avec

λ la conductivité thermique du matériau [W/(m K)].

La conductivité est différente selon les phases présentes dans un matériau poreux, elle est donc fortement dépendante de l'humidité dans le cas d'un matériau poreux hygroscopique. La conductivité est aussi dépendante de la température (ceci est négligé dans le domaine de température usuel des matériaux de construction).

La résistance thermique de conduction, R_{th} [m² K/W], est aussi utilisée pour caractériser le transfert thermique d'un matériau, elle définit l'aptitude à la couche de matériau à s'opposer au passage de la chaleur :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (2-18)$$

avec

e l'épaisseur du matériau [W/(m K)]

Couplage entre le transfert d'humidité et le transfert de chaleur

Dans un matériau poreux, le transport d'humidité va induire un flux de chaleur latent et sensible dû à un phénomène de changement d'état, la densité de flux induit, $\varphi_{T,w}$ [W/m²], s'exprime ainsi :

$$\varphi_{T,w} = H_w \cdot \varphi_{w,v} \quad (2-19)$$

avec

H_w l'enthalpie spécifique de la phase vapeur [J/kg], 2 500 J/kg.

Selon [2] la densité de flux de chaleur latente peut être négligée en dessous de 50 % d'humidité relative.

2.1.6 Transferts surfaciques

Transferts de chaleur

Dans le cas de transferts thermiques, des échanges convectifs et radiatifs (rayonnements grandes longueurs d'ondes) ont lieu entre la surface d'une paroi et le milieu ambiant. Dans le domaine de la physique du bâtiment, ces échanges surfaciques sont pris en compte de façon simplifiée par l'intermédiaire de la loi de Newton qui permet d'exprimer la densité de flux thermique surfacique, $\varphi_{c,t}$ [W/m²] :

$$\varphi_{c,t} = h_t \cdot (T_a - T_{surf}) \quad (2-20)$$

avec

h_t le coefficient d'échanges surfaciques thermique [W/(m² K)] ;

T_a la température de l'air ambiant [K] ;

T_{surf} la température de la surface du matériau [K].

L'inverse du coefficient d'échanges surfaciques thermique correspond à la résistance surfacique. Dans le cas de l'étude d'une paroi séparant deux ambiances intérieure et extérieure, la résistance surfacique est notée R_{si} pour l'intérieur et

R_{se} pour l'extérieure. Des valeurs des résistances surfaciques thermique sont données dans la norme ISO 13788 [4] pour l'étude d'éléments de construction ainsi que dans la norme ISO 6946 [11].

Transferts de vapeur d'eau

Le transfert de vapeur d'eau entre la surface d'un élément de construction et le milieu ambiant peut-être décrit de la même manière que le transfert de chaleur :

$$\varphi_{c,v} = h_v \cdot (p_{v,a} - p_{v,s}) \quad (2-21)$$

avec

$\varphi_{c,v}$	la densité de flux hydrique surfacique [kg/(m ² ·s)]
h_v	le coefficient d'échanges surfaciques hydrique [kg/(m ² ·s·Pa), s/m]
$p_{v,a}$	la pression partielle de vapeur de l'air ambiant [Pa]
$p_{v,s}$	la pression partielle vapeur de la surface du matériau [Pa]

La norme ISO 13788 néglige la résistance surfacique à la vapeur d'eau mais le coefficient d'échanges surfaciques hydrique peut être exprimé selon le coefficient d'échanges surfaciques thermiques selon [2] :

$$h_v = 7 \cdot 10^{-9} h_t \quad (2-22)$$

Il est possible d'exprimer la densité de flux hydrique surfacique en fonction de l'humidité relative, la pression de vapeur pouvant s'exprimer en fonction de l'humidité relative et de la pression de vapeur saturante selon l'expression (2-2), ainsi :

$$\varphi_{c,v} = h_v \cdot (\phi_a \cdot p_{vs,a} - \phi_s \cdot p_{vs,s}) \quad (2-23)$$

avec

ϕ_a	l'humidité relative de l'air ambiant [%] ;
ϕ_s	l'humidité relative de la surface du matériau [%] ;
$p_{vs,a}$	la pression de vapeur saturante de l'air ambiant [Pa] ;
$p_{vs,s}$	la pression de vapeur saturante de la surface du matériau [Pa].

Cette densité de flux peut être exprimée avec une différence d'humidité relative, à cette fin un coefficient d'échange surfacique équivalent, $h_{v,eq}$, est défini comme suit :

$$h_{v,eq} = h_v \cdot p_{vs,s} \quad (2-24)$$

De plus, une humidité relative équivalente est aussi définie ainsi :

$$HR_{eq} = HR_a \cdot \frac{p_{vs,a}}{p_{vs,s}} \quad (2-25)$$

La densité de flux hydrique surfacique peut donc s'exprimer selon :

$$\varphi_{c,v} = h_{v,eq} \cdot (HR_{eq} - HR_s) \quad (2-26)$$

2.2 Modèle mathématique

La partie précédente a permis de rappeler les mécanismes de transferts d'humidité et de chaleur ayant lieu dans les enveloppes de bâtiments. La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité est donc basée sur une approche phénoménologique permettant de traiter les problèmes physiques à l'échelle macroscopique. Dans cette démarche, les bilans d'énergie et de masse sont exprimés à l'aide de moteurs de transferts mesurables (température et humidité relative) et de coefficients liés aux propriétés des matériaux évalués expérimentalement.

2.2.1 Couplage des transferts de chaleur et d'humidité

Bilan d'énergie

L'équation de conservation de la chaleur est basée sur la conservation de l'enthalpie du système :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial \varphi_{T,cond}}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_{T,w}}{\partial x} \quad (2-27)$$

avec

H l'enthalpie totale [J/m³].

L'enthalpie totale est la somme de l'enthalpie du matériau sec, de l'enthalpie de l'eau contenue dans le matériau sous forme vapeur et de l'enthalpie de l'eau contenue dans le matériau sous forme liquide. Étant donné la faible valeur de la masse volumique de la vapeur, son enthalpie est négligeable devant les autres termes. L'enthalpie totale peut s'écrire :

$$H = (\rho_s \cdot C_{p,0} + w \cdot C_{p,w}) \cdot T \quad (2-28)$$

avec

$C_{p,0}$ la capacité thermique du matériau anhydre [J/kg K] ;

$C_{p,w}$ la capacité thermique à pression constant de l'eau [J/(kg K)]; 4 185 J/(kg K).

Ainsi l'équation bilan d'énergie s'écrit :

$$\rho_s \cdot C_p^* \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_w \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \cdot \frac{\partial (\phi \cdot p_{vsat})}{\partial x} \right) \quad (2-29)$$

Dans l'espace à trois dimensions :

$$\rho_s \cdot C_p^* \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + Q_T \quad (2-30)$$

Avec

Q_T le terme source thermique [W/m³], caractérise les phénomènes de changement de phase (liquide/vapeur) et les processus de sorption (prise d'humidité) au sein du matériau (voir équation (2-19)).

$$Q_T = H_w \cdot \nabla(\delta_p \cdot \nabla(\phi \cdot p_{vsat})) \quad (2-31)$$

C_p^* la capacité thermique massique équivalente [J/(kg K)].

$$C_p^* = C_{p,0} + \frac{W \cdot C_{p,w}}{\rho_s} \quad (2-32)$$

Bilan massique

Le flux d'humidité est la somme des flux de vapeur et d'eau liquide :

$$\varphi_w = \varphi_{w,v} + \varphi_{w,l} \quad (2-33)$$

avec

$\varphi_{w,v}$ la densité de flux de vapeur [kg/(m² s)] ;

$\varphi_{w,l}$ la densité de flux d'eau liquide [kg/(m² s)].

L'équation de la conservation de la masse d'eau peut donc s'écrire ainsi :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial \varphi_{w,v}}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_{w,l}}{\partial x} \quad (2-34)$$

Soit, en utilisant les équations (2-4), (2-11) et (2-15) :

$$\rho_s \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s \cdot D_w \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2-35)$$

En introduisant le terme de capacité hydrique, ξ_ϕ [kg/m³], il est possible d'exprimer l'équation bilan massique avec l'humidité relative comme potentiel moteur :

$$\rho_s \cdot \xi_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \cdot \frac{\partial (\phi \cdot p_{v,sat})}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s \cdot D_w \cdot \xi_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (2-36)$$

Dans l'espace à trois dimensions :

$$\rho_s \xi_\phi \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\delta_p^* p_{v,sat} \nabla \phi \right) + Q_w \quad (2-37)$$

avec

Q_w le terme source hydrique [kg/(m³ s)]

$$Q_w = \nabla \cdot \left(\delta_p \cdot \phi \cdot \nabla (p_{v,sat}) \right) \quad (2-38)$$

δ_p^* la perméabilité apparente [kg/(m s Pa)]

$$\delta_p^* = \delta_p + \xi_\phi \frac{\rho_s D_w}{\rho_{v,sat}} \quad (2-39)$$

2.2.2 Modélisation par éléments finis

La résolution du modèle développé a été effectuée via le logiciel de calcul aux éléments finis Cast3M. La Figure 2-2 présente le logigramme du modèle thermo hydrique, la logique est de résoudre successivement l'équation thermique puis l'équation hydrique à l'aide de l'algorithme Theta-méthode utilisé dans Cast3M pour la résolution de problèmes de thermique transitoire.

La première étape est la définition des données d'entrée :

- La géométrie (1D, 2D ou 3D) du composant de construction et le maillage de chaque élément. Pour les besoins de résolution hydrique le maillage doit être suffisamment fins aux zones de contacts (contact en l'air et la paroi, et contact entre les matériaux) ;
- Les caractéristiques du matériau. Elles peuvent être constantes ou dépendre de la température, de l'humidité relative ou de la teneur en eau ;
- La température initiale et l'humidité relative initiale des matériaux. Le champ de température est initialisé avec des valeurs constantes de températures pour chaque matériau, mais il est aussi possible de l'initialiser avec un profil de température déterminé via un calcul précédent ou par mesure. Il en est de même pour l'initialisation du champ d'humidité, qui peut aussi être déterminé via le champ de teneur en eau et les isothermes de sorption ;
- Les conditions aux limites, cela inclus la température et l'humidité relative de l'air de chaque côté de la paroi (extérieur à gauche et intérieur à droite par convention). Ces données peuvent être constantes ou dépendantes du temps, dans ce cas, elles peuvent provenir de fichiers météo, de simulations de courbes sinusoïdales ou de mesures directes. Les coefficients des transferts surfaciques thermique et hydrique sont aussi nécessaires, ils permettent le couplage entre les données climatiques précédentes et les conditions aux surfaces de la paroi.

La deuxième étape permet de définir l'intervalle de temps et la période pendant laquelle le calcul doit être effectué.

Une première boucle sur le temps est implémentée, elle permet de mettre à jour les conditions aux limites. Une deuxième boucle incluse dans la première permet de calculer les champs de température et d'humidité relative des matériaux. Un minimum de deux itérations de cette boucle sont effectuées. Lors de la première itération les propriétés des matériaux aux conditions initiales sont calculées ainsi que la pression de vapeur saturante, ensuite l'équation thermique est résolue. Le champ de température résultant est utilisé pour actualiser les propriétés des matériaux et la pression de vapeur saturante, puis l'équation hydrique est résolue. Les mêmes calculs sont effectués pour la deuxième itération. S'il y a convergence entre les champs de température et d'humidité relative des deux itérations le calcul passe au pas de temps suivant, sinon, une itération supplémentaire est nécessaire. Le test de convergence est basé sur la différence entre les champs de température et d'humidité relative de deux itérations successives (0,01 °C pour la température et 0.1 % pour l'humidité relative)

Le code de calcul implémenté est basé sur une procédure existante utilisée par Cast3M pour la résolution de problèmes thermique transitoire. L'équation thermique est de la forme :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + Q \quad (2-40)$$

avec

- ρ la masse volumique du matériau ;
- C la capacité thermique du matériau ;
- T la température ;
- λ la conductivité thermique ;
- Q le terme source thermique.

Ainsi, le Tableau 2-2 présente l'analogie entre l'équation thermique utilisée par Cast3M et les équations bilan de transfert de chaleur et d'humidité, (2-30) et (2-37).

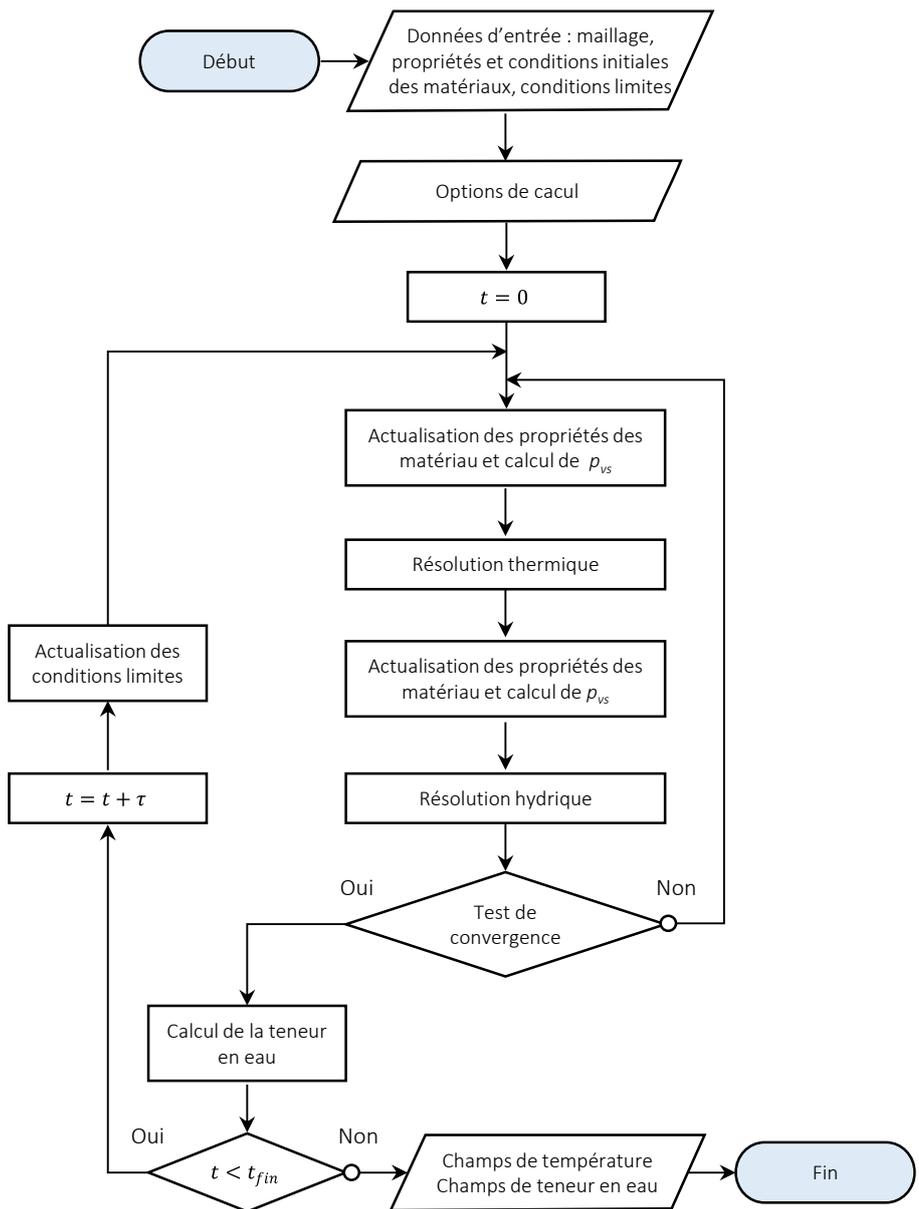


Figure 2-2 Logigramme du modèle thermo-hydraulique

Tableau 2-2 Correspondance entre les coefficients des équations thermique et hydrique avec ceux de Cast3M

Équation thermique de Cast3M	Équation bilan de transfert de chaleur	Équation bilan de transfert d'humidité
T	T	ϕ
ρ	ρ_s	ρ_s
C	c_p^*	ξ_ϕ
λ	λ	$\delta_p^* p_{v, sat}$
Q	Q_T	Q_w

2.3 Validation et ajustement du modèle en 1D

L'objectif de cette partie est de valider le code de calcul développé avec Cast3M. Il a tout d'abord été validé en configuration 1D à l'aide de la norme EN 15026 [3], elle « définit l'application pratique des logiciels de simulation hygrothermique utilisés pour prévoir le transfert de chaleur et d'humidité transitoire unidimensionnel dans les composants multicouches d'enveloppes du bâtiment soumis des deux côtés à des conditions climatiques fluctuantes ». Par la suite des simulations pour différents cas ont été comparés avec le logiciel de calcul WUFI. Enfin, l'application du modèle en 2D et 3D demandant un temps de calcul conséquent, plusieurs optimisations des paramètres du modèle sont discutées à la fin de cette partie.

2.3.1 Validation selon la norme EN 15026

Présentation de l'exemple de référence

La norme propose l'étude des transferts de chaleur et d'humidité dans le cas d'un mur semi-infini constitué d'une seule couche de matériau homogène. Initialement, le mur est à une température de 20 °C et une humidité relative de 50 %. Les conditions climatiques extérieures sont ensuite modifiées et sont égales à une température de 30 °C et à une humidité relative de 95 %. La répartition de la température et celle de l'humidité doivent être calculées après 7, 30 et 365 jours.

La masse volumique du matériau et sa capacité thermique sont respectivement : $\rho_s = 2280 \text{ kg/m}^3$ et $c_p = 800 \text{ J/(kg K)}$.

La pression de succion capillaire en fonction de la teneur en eau est définie par :

$$p_{succ} = 0,125 \cdot 10^8 \left(\left(\frac{146}{w} \right)^{1/0,375} - 1 \right)^{0,625}$$

Avec la teneur en eau exprimée en fonction de l'humidité relative :

$$w = \frac{146}{\left(1 + \left(-8 \cdot 10^{-8} \cdot R_{H_2O} T \rho_w \ln(\phi) \right)^{1,6} \right)^{0,375}}$$

Avec

R_{H_2O} la constante de gaz de la vapeur d'eau [J/(kg K)], soit 462 J/(kg K) qui est le résultat du rapport entre la constante des gaz parfaits $R = 8,3147 \text{ J/(mol K)}$ et la masse molaire de l'eau $M_w = 0,018 \text{ kg/mol}$;

T la température de référence [K], 293,15 K ;

ρ_w la masse volumique de l'eau liquide [kg/m³], 1 000 kg/m³.

La conductivité thermique et le coefficient de perméabilité sont donnés en fonction de la teneur en eau :

$$\lambda = 1,5 + \frac{15,8}{1000} w \text{ et } \delta_p = \frac{26,1 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot R_{H_2O} T} \frac{1 - w/146}{0,503 \left(1 - w/146 \right)^2 + 0,497}$$

Le coefficient de diffusion en phase liquide dépend de la teneur en eau selon :

$$K = \exp \left(-39,2619 + 0,0704 \cdot (w - 73) - 1,7420 \cdot 10^{-4} \cdot (w - 73)^2 - 2,7953 \cdot 10^{-6} \cdot (w - 73)^3 - 1,1566 \cdot 10^{-7} \cdot (w - 73)^4 + 2,5969 \cdot 10^{-9} \cdot (w - 73)^5 \right)$$

Paramètres de la simulation et résultats

Les caractéristiques du matériau sont celles présentées ci-dessus. L'épaisseur du mur est de 20 m afin de représenter le domaine semi-infini de l'exemple test de la norme. Du côté extérieur, le mur est soumis à une température de 30 °C et

une humidité relative de 95 %. Du côté intérieur, les conditions environnementales sont égales aux conditions initiales du matériau, soit une température de 20 °C et une humidité relative de 50 %.

Le maillage utilisé est un maillage non régulier, il est plus resserré au niveau du côté extérieur (40 nœuds sur les 25 premiers centimètres pour un total de 99 nœuds). Le pas de temps est fixé à une heure, la température et la teneur en eau sont calculées sur 365 jours. La Figure 2-3 et la Figure 2-4 présentent les résultats de la simulation (traits pleins) et les limites de validité données par la norme (différents marqueurs).

Les résultats sont concordants et permettent de valider le comportement du code de calcul développé dans le cas simplifié de transfert de chaleur et d'humidité en régime transitoire unidimensionnel.

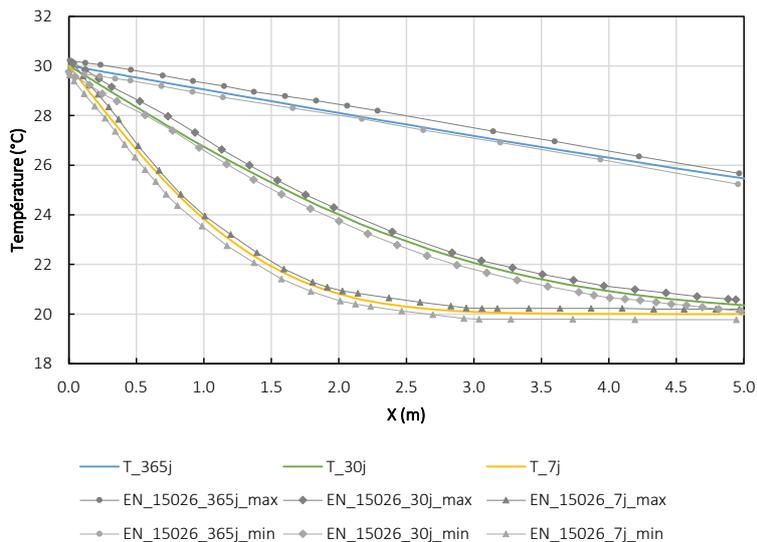


Figure 2-3 Profils de température sur les 5 premiers mètres à 7, 30 et 365 jours

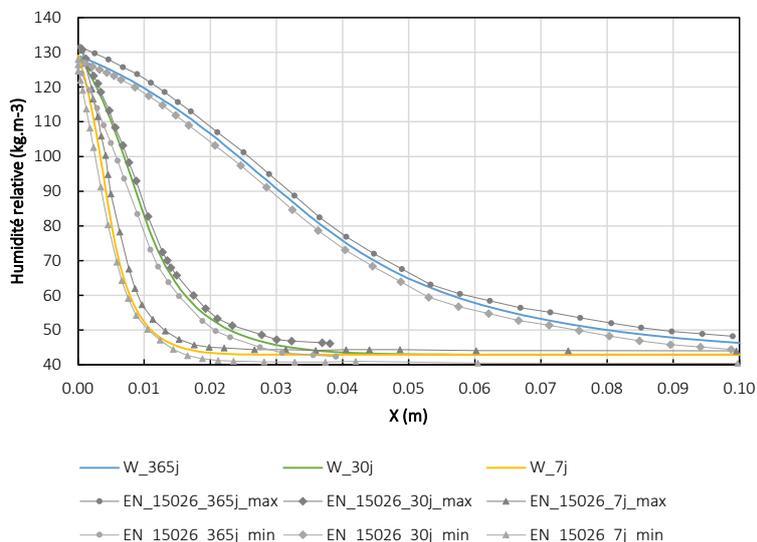


Figure 2-4 Profils de teneur en eau sur les 10 premiers centimètres à 7, 30 et 365 jours

2.3.2 Comparaison entre le modèle et les simulations WUFI

WUFI® est un logiciel développé dans le cadre de la thèse de Künzle [2] et est validé par le Fraunhofer Institut Bauphysik de Holzkirchen en Allemagne. Il permet de calculer le transfert de chaleur et d'humidité simultanément dans des com-

posants de construction de plusieurs couches unidimensionnelles soumis à un régime climatique dynamique. La température et l'humidité relative sont choisis comme potentiels moteurs. Le code développé pour cette étude est basé sur le même modèle que celui utilisé par WUFI, la comparaison de résultats de simulations avec les deux codes de calcul permet de valider le bon fonctionnement du code de calcul développé dans le cas de parois multicouches composées de matériaux hygroscopiques.

Présentation des données d'entrées

Les simulations proposées sont effectuées sur deux matériaux dont les caractéristiques sont disponibles dans le logiciel WUFI : bois dur et panneau d'isolant en fibre de bois (WLG 040). Pour chaque matériau, WUFI donne les caractéristiques suivantes : la masse volumique, la porosité, la capacité thermique, la conductivité thermique à l'état sec et le facteur de résistance à la diffusion à l'état sec. Selon le matériau sélectionné d'autres caractéristiques sont disponibles : l'isotherme de sorption, le coefficient de transport liquide de succion en fonction de la teneur en eau, le coefficient de transport liquide de redistribution en fonction de la teneur en eau, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur en fonction de l'humidité relative et la conductivité thermique en fonction de l'humidité et/ou de la température.

WUFI considère deux coefficients de transfert liquide, ils correspondent tous deux au coefficient de transport capillaire mais leur utilisation dépend des conditions limites. Le coefficient de transfert liquide pour succion, D_{ws} , décrit l'absorption capillaire de l'eau lorsque la surface imprégnée est complètement imbibée. Le coefficient de transfert liquide pour succion, D_{ww} , décrit la répartition de l'eau absorbée lorsqu'à la fin de l'imprégnation aucune eau nouvelle ne pénètre plus et que l'eau présente commence à se répartir.

Les simulations numériques ne prennent pas en compte la pluie et le rayonnement, les valeurs des coefficients surfaciques utilisés sont données dans le Tableau 2-3 ci-dessous.

Tableau 2-3 Coefficients surfaciques thermiques et hydriques

	Extérieur	Intérieur
h_t [W/(m ² K)]	17	8
h_v [s/m]	75×10^{-9}	25×10^{-9}

Le maillage des profils de la paroi a été automatisé, il est possible de créer une ou plusieurs couches ayant la même épaisseur. Une partie du maillage est présentée par la Figure 2-5, les éléments choisis sont des éléments quadratiques à 8 nœuds (élément Q8). Pour le cas présenté la couche a une épaisseur, l_1 , égale à 0,0335 m et une densité, d_1 , de 0,01 m. Comme dit précédemment le maillage doit être suffisamment étroit pour la résolution hydrique proches des zones de contact. Ainsi un paramètre a été défini, l_d , il correspond à la longueur où le maillage est plus fin. Sur cette distance la densité de maillage est variable, elle varie de $d_3 = 0,0001$ m à $d_2 = 0,001$ m. Ainsi, il y a 27 nœuds le long de l_d et 57 le long de l_1 .

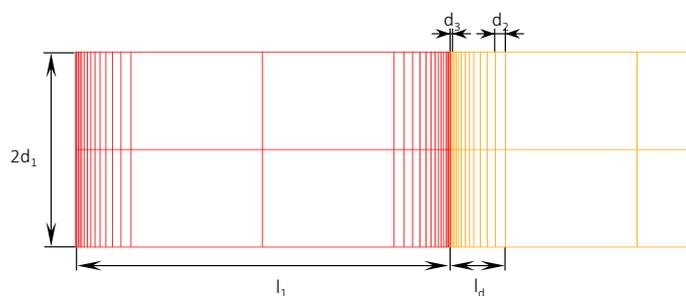


Figure 2-5 Paramètres du maillage

Paroi à 9 couches sous conditions climatiques constantes

Une paroi composée de 9 couches de matériaux de même épaisseur est étudiée en 1D. Les simulations sont calculées pour une zone bois-isolant, c’est à dire une alternance bois isolant (voir Figure 1-5). Les conditions initiales pour les matériaux sont une température de 20 °C et une humidité relative de 60 %. Au début du calcul, les conditions aux limites du côté extérieur sont modifiées, la température de l’air ambiant passe de 20 °C à 10 °C et l’humidité relative passe de 60 % à 80 %. La distribution de la température et la teneur en eau dans la paroi sont calculées après 1 jour, 7 jours et 30 jours. Le pas de temps est défini à 1 heure.

Les Figure 2-6 et Figure 2-7 présentent les résultats de la simulation Cast3M (traits pleins) et de la simulation avec le logiciel WUFI (traits pleins avec marqueurs), les deux simulations sont concordantes.

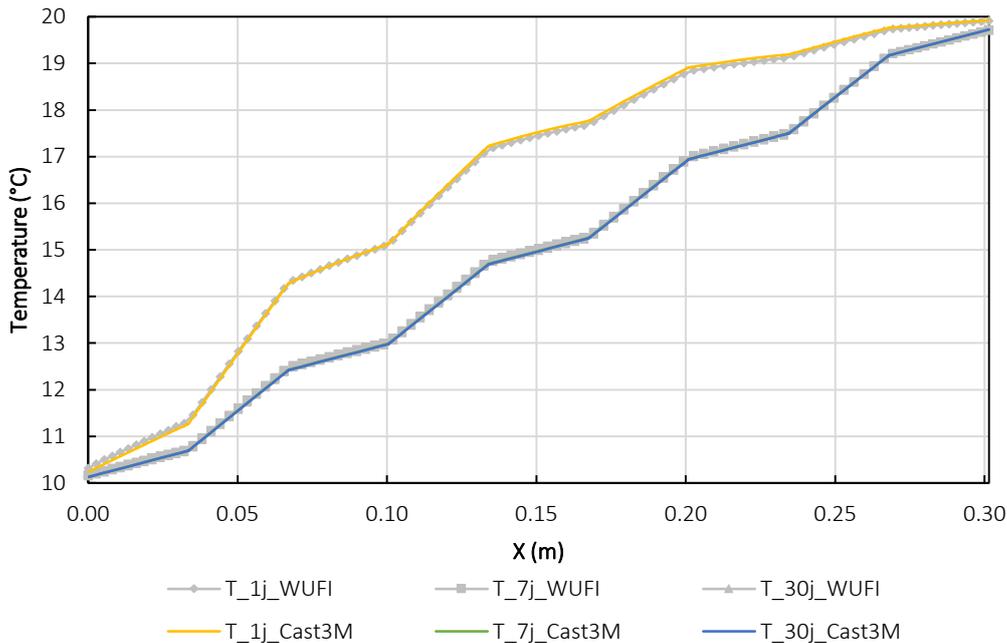


Figure 2-6 Profils de température après 1 jour, 7 jours et 30 jours

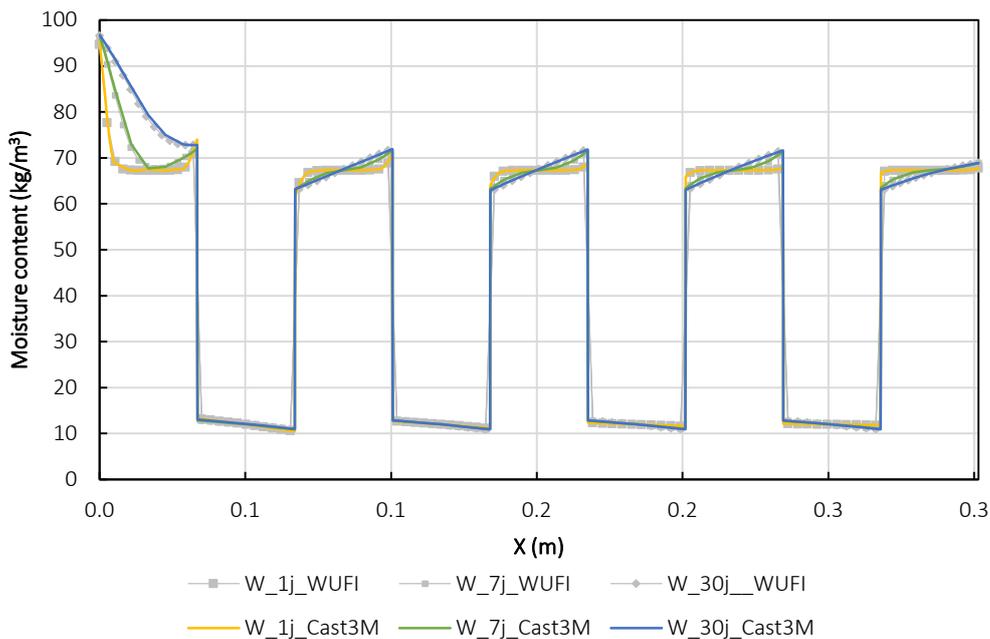


Figure 2-7 Profils de teneur en eau après 1 jour, 7 jours et 30 jours

Paroi à 9 couches sous conditions climatiques variables

Afin de modéliser les transferts de température et d'humidité dans un mur rainuré à 9 plis sous conditions climatiques variables, il est nécessaire de lisser les données. En effet, la résolution hydrique ne peut être effectuée avec des variations d'humidité relative de l'air trop grandes entre deux pas de calcul.

Données climatiques

Il est possible de lisser les données climatiques en réalisant une moyenne mobile sur les données, mais il est aussi possible de le faire en décomposant les courbes de température et d'humidité en plusieurs courbes sinusoïdales correspondantes à différentes fréquences : mois, semaines, jour. Dans les deux cas, seules les données climatiques extérieures sont nécessaires. En effet, le climat intérieur peut être calculé en appliquant l'annexe C de la norme EN 15026 [3]. La température et l'humidité relative à l'intérieur des bâtiments chauffés (logements et bureaux) peuvent être déterminées à partir des graphiques de la moyenne journalière des températures de l'air extérieur, Figure 2-8. Deux niveaux d'humidité relative de l'air intérieur sont proposés en fonction du taux d'occupation supposée du bâtiment :

- a – taux d'occupation normal ;
- b – fort taux d'occupation.

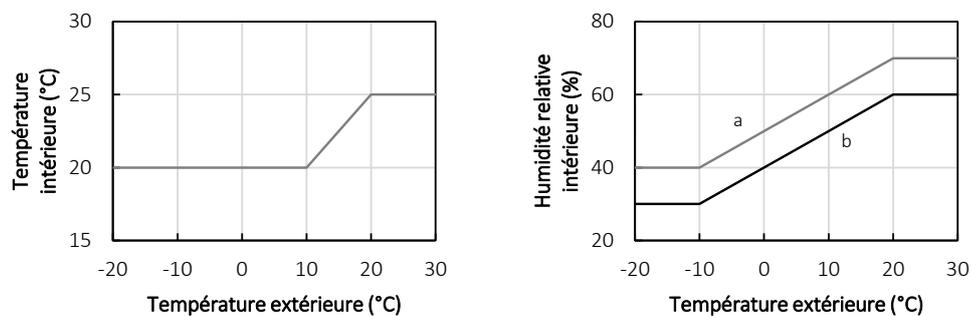


Figure 2-8 Température et humidité relative moyenne journalière de l'air intérieur dans les logements et bureaux chauffés en fonction de la température moyenne journalière de l'air extérieur.

Courbes sinusoïdales

Le logiciel WUFI permet d'appliquer des conditions variables sous forme de courbes sinusoïdales, ainsi, un mur à 9 plis est étudié en 1D sous température et humidité relative variable. Les simulations sont calculées pour une zone bois-isolant comme précédemment, néanmoins l'épaisseur des plis est prise à 35 mm. Les conditions initiales pour les matériaux sont une température de 20 °C et une humidité relative de 60 %. Les conditions environnementales prennent la forme de courbes sinusoïdales qui peuvent être exprimées comme l'équation (2-41) dans le cas de la température, ces courbes représentent les variations de température ou d'humidité relative pour une période de un an. Le Tableau 2-4 donne les valeurs utilisées pour les simulations. La distribution de la température, de l'humidité relative et de la teneur en eau dans la paroi sont calculées après 1 jour, 7 jours, 30 jours et 365 jours. Le pas de temps est défini à 1 heure.

$$T_e = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (t - t_{\max})\right) + D \quad (2-41)$$

avec

- T_e la température extérieure [°C] ;
- A l'amplitude [°C] ;
- t le temps [jours] ;
- t_{\max} le jour où la température est à son maximum ;
- D la température moyenne annuelle [°C].

Tableau 2-4 Paramètres des courbes sinusoïdales pour les températures et humidités relatives extérieures et intérieures

	Température extérieure	Température intérieure	Humidité relative extérieure	Humidité relative intérieure
Amplitude	9 °C	1 °C	8 %	10 %
Valeur moyenne	9 °C	21 °C	80 %	50 %
Jour valeur maximale	15 juillet	3 juillet	15 décembre	16 Août

La distribution en teneur en eau dans les matériaux est présentée sur la Figure 2-7, à l’image des simulations précédentes, les résultats obtenus avec le modèle implémenté sous Cast3M et ceux de WUFI concordent.

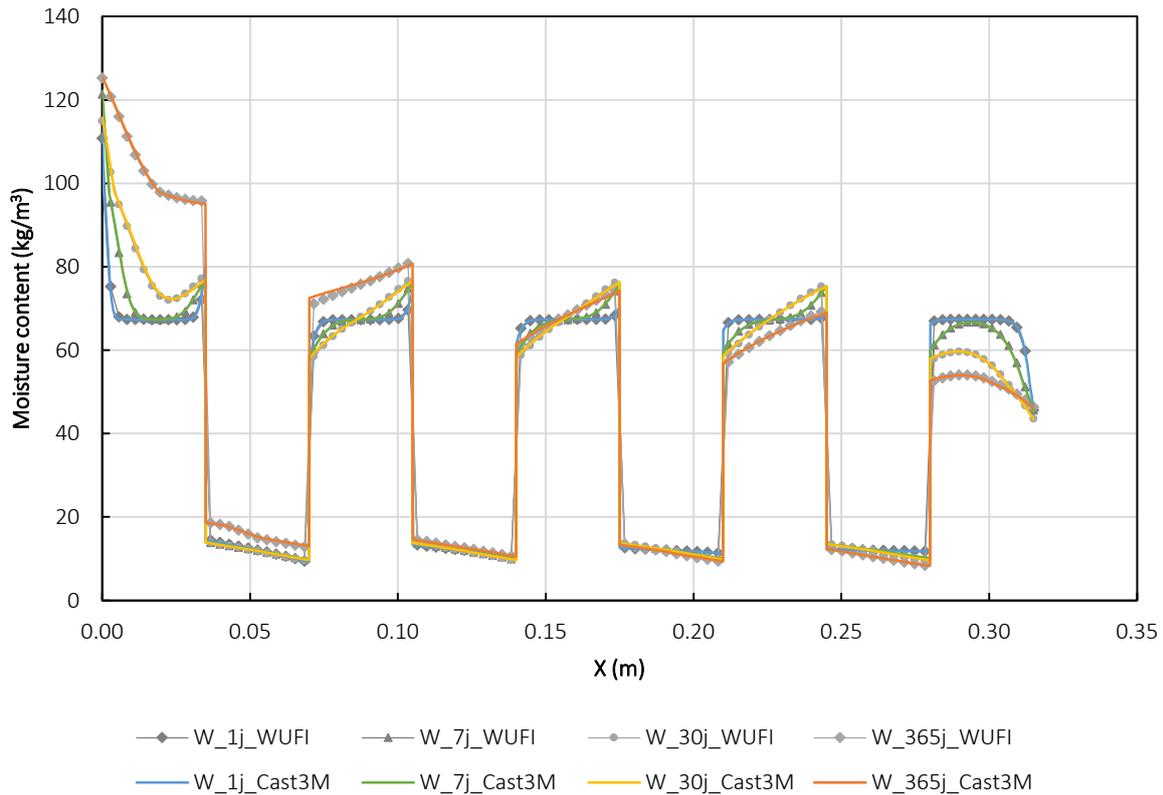


Figure 2-9 Profils de teneur en eau des matériaux après 1 jour, 7 jours, 30 jours et 365 jours

Des différences sont présentes au niveau des zones de contact entre matériaux ou aux extrémités de la paroi. Ces différences sont dues au maillage qui est plus fin dans les simulations de Cast3M que dans les simulations réalisées avec le logiciel WUFI. Le maillage de l’assemblage étudié est développé dans la section suivante.

2.3.3 Ajustements du modèle Cast3M

Optimisation du maillage

Simplification

L'objet à mailler pour cette étude est un assemblage rainuré à 9 plis. Comme expliqué à l'aide de la Figure 1-5 visible à la page 8 quatre zones différentes ont été définies dans l'assemblage. La Figure 2-10 représente les détails des différentes zones, elle met en évidence les dimensions des zones de contact entre les plis. Pour la zone bois-isolant, qui est constituée d'une alternance de planches de bois et de panneaux d'isolant, les deux matériaux sont séparés par une lame d'air de 0,7 mm d'épaisseur. Il est à noter que cette affirmation n'est vraie que pour le dessin réalisé sous CAO, dans la réalité le panneau d'isolant ne se tiendra pas à une distance constante de la planche de bois. Néanmoins, il est nécessaire de faire cette hypothèse pour effectuer des calculs afin de proposer une simplification des zones de contact.

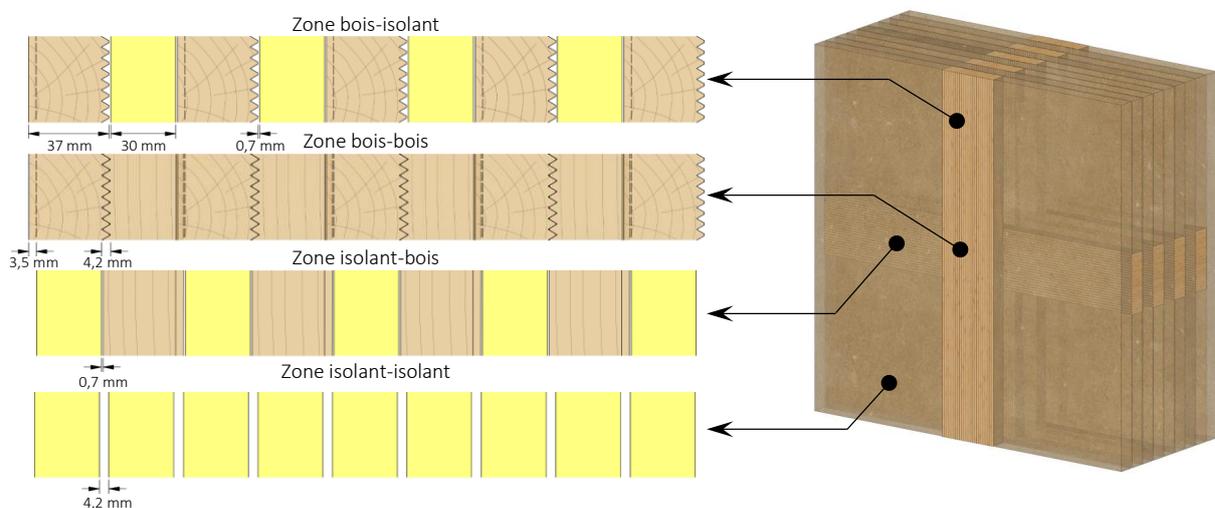


Figure 2-10 Détails des différentes zones de l'assemblage

Des simulations à l'aide du logiciel de calcul WUFI sont réalisées pour déterminer s'il est pertinent de simplifier les zones de contact des plis. Pour chacune des quatre zones de l'assemblage deux géométries sont proposées, une géométrie « exacte » représentant le plus fidèlement possible la zone, et une géométrie simplifiée. Pour la première géométrie il a été nécessaire d'introduire des lames d'air de différentes épaisseurs. La géométrie simplifiée définit une épaisseur de plis identiques pour les deux matériaux, soit 35 mm, et un contact continu entre les matériaux (absence de lames d'air).

Deux cas sont étudiés, la température et l'humidité relative initiales des matériaux au début des calculs sont identiques dans les deux cas, elles sont respectivement de 20 °C et de 60 % d'humidité relative. Ce sont les conditions environnementales qui diffèrent. Pour le premier cas, les conditions du côté gauche sont de 10 °C et de 80 % d'humidité relative, et du côté droit de 20 °C et de 50 % d'humidité relative. Pour le second cas, les conditions extérieure et intérieure sont variables dans le temps.

Pour chaque zone les deux cas ont été étudiés sur une année. Les différences de teneur en eau au cours du temps ne sont pas significatives pour toutes les simulations, en effet elle ne dépasse pas les 0,25 % de teneur en eau. La teneur en eau déterminée grâce à la norme EN 13183-1 [5] est exprimée à 0,1 % mais lors de l'utilisation de SHT 75 ayant une précision en température à $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ et en humidité relative à $\pm 1,8\%$, la précision de mesure de la teneur en eau est de l'ordre de 0,3 %. La géométrie simplifiée est donc appropriée dans le cas de cette étude qui a comme objectif la compréhension de la distribution de l'humidité dans l'assemblage rainuré.

Taille du maillage

La modélisation du comportement hydrique demande l'utilisation d'un maillage suffisamment fin aux extrémités des matériaux. Une étude de sensibilité a permis de déterminer qu'une densité de 2 mm au minimum est nécessaire pour la résolution hydrique, le maillage défini avec cette densité est noté M1. Néanmoins, un maillage plus fin est aussi proposé afin de mailler plus finement les rainures, ce maillage est noté M2. Pour les deux maillages, une densité fine est appliquée sur les 20^{er} mm du matériau puis une densité plus élevée de 5 mm est appliquée. La Figure 2-11 présente les différents maillages pour un matériau ayant une hauteur de 20 mm et une largeur de 100 mm, le nombre d'éléments est de 320 dans le cas de M1 et de 1674 pour M2.



Figure 2-11 Exemple de maillages implémentés dans le modèle Cast3M

Optimisation du pas de temps

Les simulations de transferts d'humidité et de température dans les parois utilisent généralement un pas de temps d'une heure afin de garder un temps de calcul raisonnable et un résultat suffisamment précis. En effet, plus le pas de temps est court plus la simulation est fidèle et le temps de calcul est élevé, à l'inverse, plus le pas de temps est long plus la simulation perd en précision mais le temps de calcul diminue.

L'optimisation du pas de temps dépend des données d'entrée pour les conditions limites utilisées. Tout d'abord ces données peuvent imposer un pas de temps, néanmoins, s'il est trop long pour la simulation il y a possibilité d'interpoler les données. Dans le cas où un pas de temps plus grand est souhaitable il est possible de moyenniser les données (moyenne mobile). Ainsi, avec des données déjà moyennées il est possible d'utiliser un pas de temps plus grand que celui choisi habituellement d'une heure.

Le pas de temps influence grandement la durée du calcul et il est dépendant des données d'entrées. Pour chaque type de simulation il est donc indispensable d'étudier son influence sur les résultats de simulations en 1D avant d'utiliser une résolution en 2D ou 3D.

3 Étude expérimentale hygrothermique d'assemblages rainurés

L'objectif du travail présenté dans cette partie est d'obtenir des données fiables pour la validation du modèle numérique développé et présenté précédemment. De plus, la réalisation de ces essais permet d'avoir une approche réaliste du comportement réel d'un assemblage rainuré constituant une paroi lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques connues.

3.1 Descriptif du dispositif expérimental

Afin d'étudier expérimentalement l'influence des transferts de chaleur et d'humidité dans les parois utilisant des assemblages rainurés, des modules expérimentaux ont été fabriqués et instrumentés. Le principe de ces essais hygrothermiques est de placer un module expérimental, dont la teneur en eau initiale des matériaux le constituant est connue, dans un environnement permettant à ces matériaux de tendre vers une teneur en eau d'équilibre différente (augmentation ou diminution).

L'étude du comportement hydrique d'un élément de construction est majoritairement réalisée à l'aide de capteurs permettant de mesurer la teneur en eau des matériaux. Il a été envisagé dans un premier temps de mesurer la teneur en eau du bois en utilisant une technique de mesure électrique. Cette technique consiste à mesurer la résistivité du matériau à l'aide de sondes placées dans le matériau et d'un mégohmmètre. Les tests effectués au laboratoire n'ont pas permis de valider cette méthode de mesure, en effet, la précision obtenue n'était pas suffisante dans la plage de teneur en eau du bois étudiée (entre 6 % et 18 %). Une autre voie a donc été envisagée dans le cas de cette étude dont la finalité est de caractériser les variations dimensionnelles ayant lieu dans un assemblage rainuré. Ainsi, la mesure directe de ces variations permet d'obtenir des données exploitables immédiatement et c'est donc l'utilisation de capteurs de déplacement qui a été retenue (ce type de capteurs ont déjà été utilisés pour l'étude du comportement du matériau bois lors du séchage [12]).

3.1.1 Présentation des modules étudiés

L'étude expérimental des transferts thermiques et hydriques à l'échelle d'une paroi ne pouvant être réalisée, il a été décidé d'étudier ces transferts à l'échelle d'un assemblage constituant la paroi. Ainsi, des éléments représentant une partie de la paroi ont été réalisés, cette partie est mise en évidence par un contour bleu sur la Figure 3-1. Un élément contient un assemblage rainuré en son centre. La hauteur et la largeur de l'élément étudié mesurent 720 mm, étant représentatif d'un mur de 9 plis son épaisseur théorique est de 310 mm (épaisseur total pour la zone bois-bois). Néanmoins, pour des raisons pratiques dues à l'usinage des panneaux d'isolant, la hauteur et la largeur de l'élément sont réduites à 714 mm, la précision obtenue lors de l'usinage des modules et de leur montage est de 1 mm pour la hauteur et la largeur de l'assemblage.

L'élément est constitué de planches en bois et de panneaux d'isolant en fibres de bois (voir partie droite de la Figure 3-1). Les planches ont une hauteur de 120 mm avec une épaisseur de 37 mm et une longueur de 714 mm. Les rainures sont identiques à celles présentées dans la Figure 1-2 page 6. Les panneaux d'isolant en fibre de bois proviennent de la société Soprema, se sont des panneaux PAVATHERM® ayant une épaisseur de 30 mm, le panneau avant découpe mesurant 1100 x 600 mm. Les côtés de l'élément sont rendus étanche à l'humidité grâce à une bâche, de plus l'extrémité des planches est obstruée avec un scotch en aluminium, empêchant ainsi la diffusion longitudinale à partir des extrémités

des planches. L'étanchéité à l'air est réalisée grâce à un pare-pluie posé sur les deux faces de l'élément. Le pare-pluie provient de la société pro climat sous la référence écran SOLITEX FRONTA WA ($S_d = 0,05$ m). L'étanchéité entre le pare-pluie et la bâche est assurée par un ruban aérotape. Des panneaux en LVL de sapin enveloppent l'élément sur les côtés pour le bon maintien des films plastiques, des tasseaux sont ajoutés afin de finaliser cette enveloppe. L'ensemble est appelé par la suite module, un module en cours de montage puis terminé et instrumenté est présenté sur la Figure 3-2.

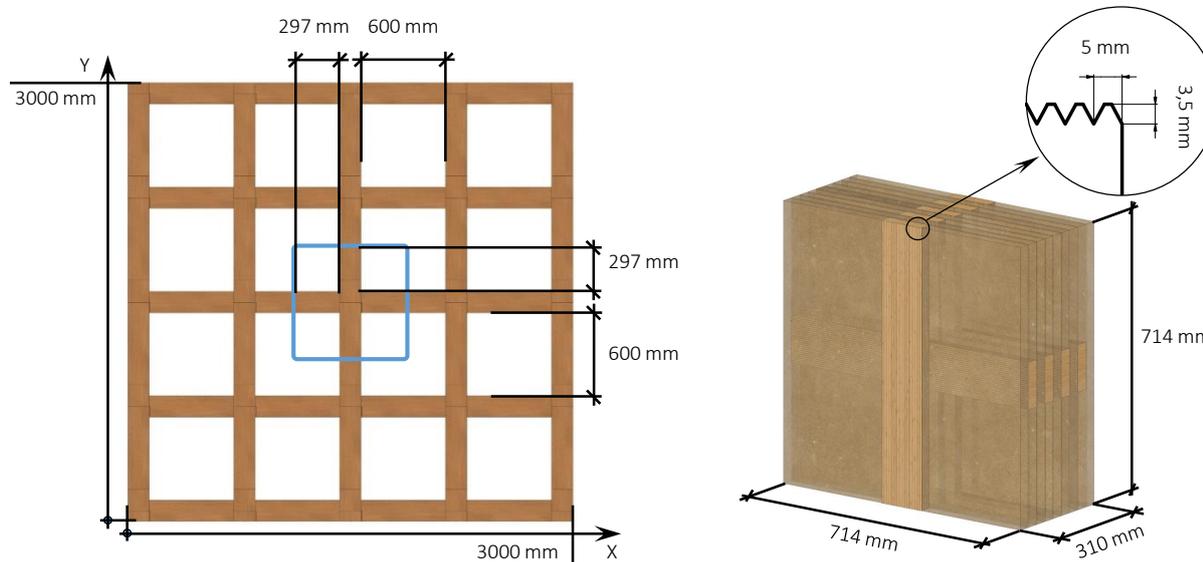


Figure 3-1 Dimensions d'un mur rainuré (à gauche) et de l'élément étudié (à droite)

La teneur en eau initiale des matériaux de l'élément étudié est caractérisée avant le montage du module, elle est notée W_0 . Ce dernier est ensuite placé dans un environnement dont la température et l'humidité relative sont connues. La teneur en eau d'équilibre du matériau bois dans cet environnement, notée W_{ext} , est différente de W_0 , des transferts d'humidité ont donc lieu au sein des matériaux pour permettre à la teneur en eau du bois de tendre vers W_{ext} . La teneur en eau finale des matériaux, notée W_f , est caractérisée à la fin des essais.

Trois modules ont été réalisés, l'isolant est le même pour tous, mais les planches utilisées sont d'un matériau différent ou d'une teneur en eau différente :

- Module A : les planches sont en bois de hêtre et ont été placées en enceinte climatique jusqu'à l'équilibre de leur teneur en eau, les réglages étaient de 20 °C et 85 % d'humidité relative, la teneur en eau initiale des planches était en moyenne égale à 17,0 % ;
- Module B : les planches sont en bois de hêtre et ont été stockées en intérieur, leur teneur en eau initiale étant en moyenne de 8,9 % ;
- Module C : les planches sont en LVL de hêtre avec 15 % de plis croisés (produit BauBuche Q de la société Pollmeir), leur teneur en eau initiale était en moyenne de 6,3 % ;

Afin d'étudier le phénomène de retrait le module A est placé, dans un premier temps, dans une salle climatique régulée à 20 °C et 65 % d'humidité relative, puis dans un second temps, dans un environnement sec et chauffé. Les modules A et C sont placés dans un environnement humide en intérieur (sous-sol) afin d'étudier l'effet du gonflement sur l'assemblage.

L'épaisseur au niveau de la zone bois-bois de l'assemblage dépend de la précision de l'usinage des rainures et du maintien des planches par vissage. Pour les modules en hêtre cette épaisseur était de 312 mm à la fin du montage des assemblages, pour le module en LVL elle était de 319 mm (les rainures étant réduites de 0,8 mm pour des raisons d'usinages).

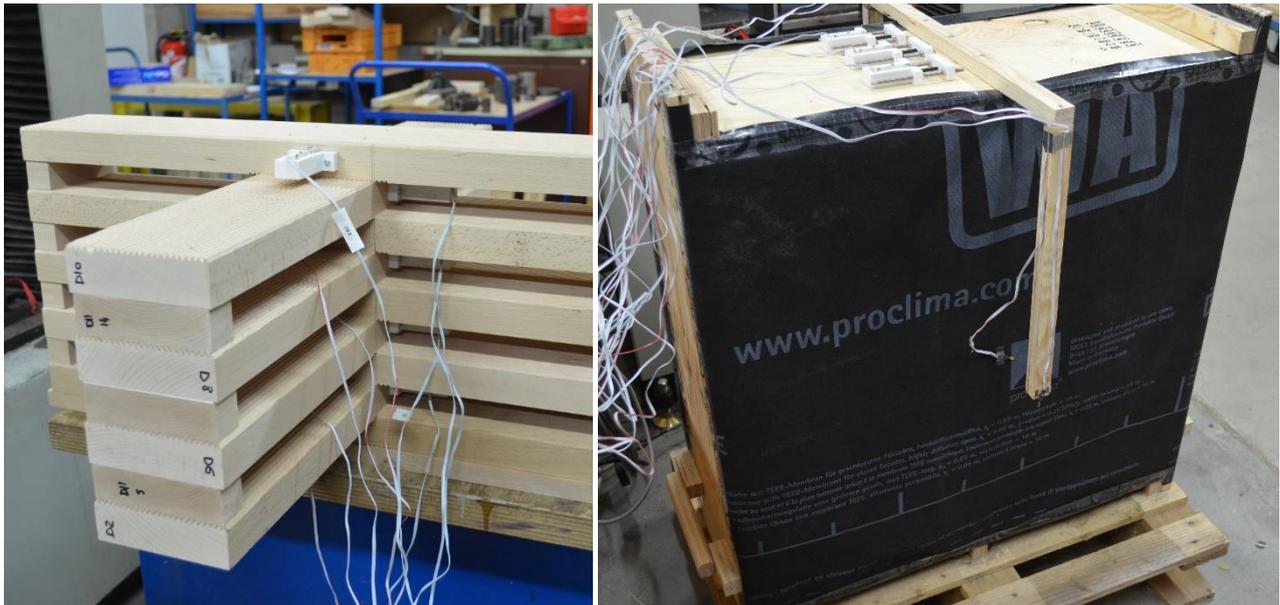


Figure 3-2 Photos du module A en cours de montage (gauche) et terminé (droite)

3.1.2 Instrumentation des caissons

Afin de suivre le comportement thermique et hydrique des assemblages, la température et l'humidité de la surface des caissons et de l'air ambiant sont mesurées lors des essais à l'aide de capteurs capacitifs SHT 75 Sensirion. Ces capteurs ont une précision de mesure de $\pm 1,8\%$ d'humidité relative et de $\pm 0,3\text{ °C}$ à 25 °C pour la température (voir Figure 3-3). Chaque caisson est équipé de quatre capteurs SHT75 : un sur chaque face, où ils sont placés en son centre, et un à 10 cm de chaque face, alignés sur le précédent.

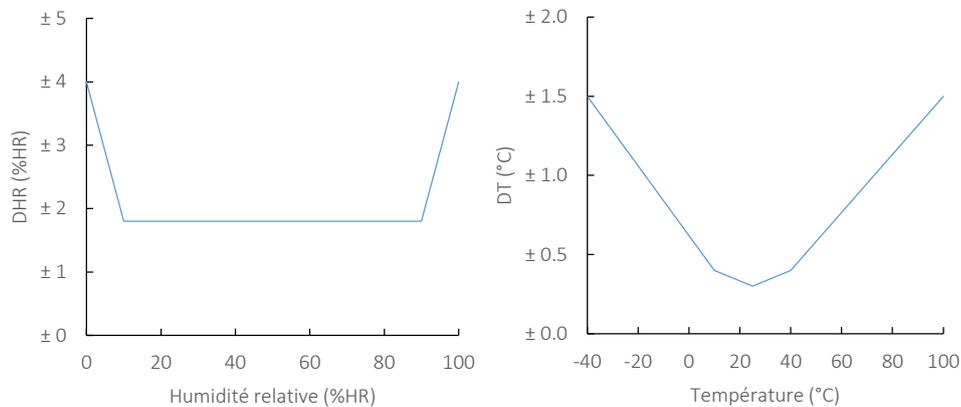


Figure 3-3 Précisions en humidité relative et en température des capteurs SHT75

Les variations dimensionnelles sont mesurées à l'aide de capteurs de déplacement BEI Sensors 9615R5.1KL2.0, le sigle LMP est utilisé pour désigner ces capteurs dans la suite du document, il provient de leur dénomination en anglais « Linear Motion Position ». La Figure 3-4 présente le système de mesure des variations dimensionnelles : un perçage traversant de 6 mm de diamètre est réalisé au centre de l'épaisseur de la planche, une bride en plastique vissée à la planche permet de maintenir le capteur de déplacement, au contact de la tige du capteur se trouve une tige filetée maintenue par une plaque en plastique est vissée de l'autre côté de la planche. Ainsi, lors du gonflement ou du retrait du bois sur la hauteur de la planche la tige du capteur s'allongera ou se rétractera. Les capteurs sont placés au centre de la longueur des planches, ainsi ils se trouvent au centre de l'assemblage. Chaque planche de l'assemblage est instrumentée avec un capteur, il y a donc 9 capteurs de déplacement dans l'assemblage.

Trois capteurs de déplacement supplémentaires sont utilisés à l'extérieur du caisson, ils sont appelés capteurs de suivi. Ces capteurs sont maintenus dans un support de capteur de déplacement en plastique, ils permettent de mesurer la déviation des capteurs en fonction du temps ainsi que de vérifier leur étalonnage plusieurs fois sur la durée des essais si nécessaire. Les brides, plaques et supports de capteurs sont en polyester PET, ces éléments ont été usinés avec une fraiseuse CNC (Charly4U). Les tiges filetées et les boulons utilisés dans le système de mesure sont en acier inoxydable.

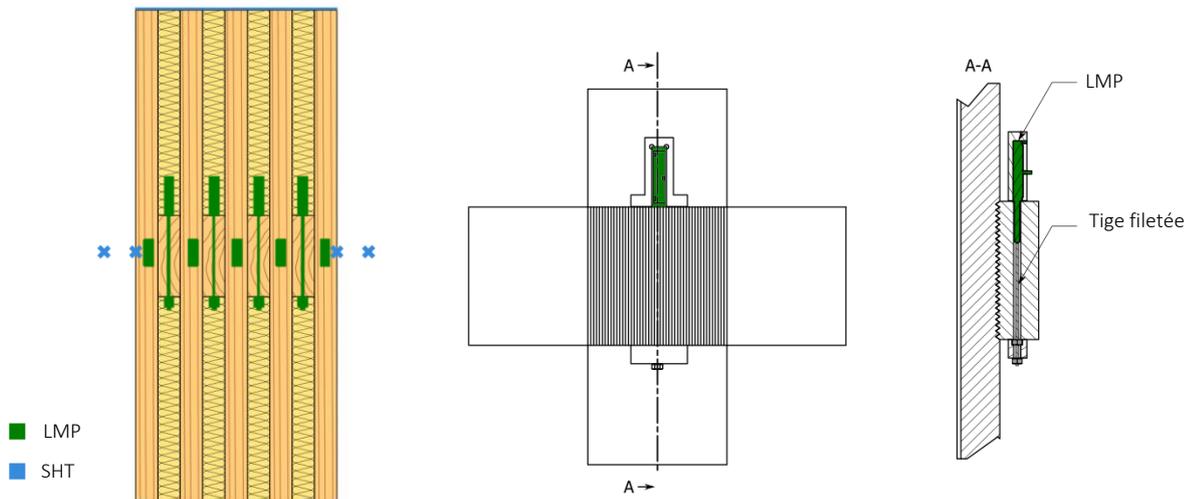


Figure 3-4 Placement des capteurs et détails du système de mesure des déplacements pour une planche

Dans un premier temps les 12 capteurs de déplacement ainsi que les 4 capteurs SHT75 étaient contrôlés par une carte Arduino. Ce système avait été choisi pour permettre une grande liberté quant au lieu de mise en place des modules. En effet, cette solution ne nécessitait pas d'ordinateur, il suffisait d'avoir une prise électrique pour alimenter la carte Arduino en courant. Les données étaient enregistrées sur une carte SD et elles pouvaient être récupérées à des temps définis lors des essais. Néanmoins, des essais réalisés avant la mise place des modules expérimentaux ont montré que ce système d'acquisition ne permet pas d'obtenir une précision suffisante. Ces essais ainsi que leurs résultats sont présentés dans la section suivante.

Le système retenu pour l'instrumentation des modules est l'utilisation de la carte Arduino pour les capteurs SHT75 et l'utilisation d'un appareil d'acquisition National Instrument (NI) 9201 ou 9205 avec un alimentation électrique externe (ALE2902M) pour plus de stabilité. L'appareil d'acquisition des données NI pour les capteurs de déplacement ainsi que la carte Arduino sont reliés à un ordinateur pour l'enregistrements des données.

Les capteurs de déplacement sont des capteurs potentiométriques linéaires, le système d'acquisition récupère la tension des capteurs qui varie en fonction de la position de la tige. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage des capteurs pour convertir la tension [V] en déplacement [mm]. La procédure d'étalonnage des capteurs est décrite dans la section suivante. Les données de l'étalonnage et des acquisitions sont ensuite traitées à l'aide du logiciel Matlab.

3.2 Étude de l'incertitude de la mesure des capteurs de déplacement

3.2.1 Étalonnage des capteurs

L'étalonnage des capteurs, avec le système d'acquisition composé seulement de la carte Arduino, a été réalisé à température ambiante avec un jeu de cales Mitutoyo (grade 22). Pour les mesures de déplacement la course de la tige du capteur a été choisie entre 10 mm et 20 mm. L'étalonnage a donc été effectué sur cette plage de mesure et tous les 1 mm, plusieurs mesures ont été effectuées pour chaque pas. Lors de cet étalonnage plusieurs sources d'incertitudes ont été identifiées : le jeu latéral de la tige du capteur, la répétabilité de la mesure et l'erreur de linéarité du capteur. L'incertitude d'étalonnage trouvée était de 0,03 mm ($k = 2$). L'étalonnage réalisé avec les systèmes d'acquisition des modules (carte Arduino et appareil NI reliés à un ordinateur) donne la même valeur pour l'incertitude d'étalonnage.

3.2.2 Essais pour caractériser le système de mesure de déplacement

Description du dispositif expérimental

Afin d'identifier d'éventuelles sources d'incertitudes supplémentaires et de mettre à l'épreuve le système d'acquisition (carte Arduino seule), des essais ont été réalisés durant 45 jours. Des éprouvettes en hêtre ont été instrumentées avec des capteurs de déplacement, deux types d'éprouvettes ont été utilisées : des éprouvettes ayant une teneur en eau initiale moyenne de 9,3 % et des éprouvettes ayant une teneur en eau initiale moyenne de 12,9 %. Les premières ont été placées dans une enceinte climatique régulée à 20 °C et 85 % d'humidité relative et les autres ont été placées au-dessus de cette même enceinte climatique, les essais ayant été réalisés en été les conditions environnementales ont été en moyenne de 25,06 °C et 45,0 % d'humidité relative.

Le système de fixation des capteurs sur les éprouvettes était le même que celui utilisé pour les essais avec les modules (voir Figure 3-5), de même les éprouvettes de bois avaient une hauteur et une épaisseur proches de celles des planches utilisées pour les modules, soit une hauteur de 120 mm et une épaisseur de 30 mm. Pour des raisons pratiques de manipulation et de stockage des éprouvettes, leur largeur était d'environ 120 mm.



Figure 3-5 Photo d'un capteur de « suivi » dans un support (a) et photo du système de mesure des déplacements sur une éprouvette (b)

Les éprouvettes provenaient de différentes planches de hêtre. Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées avant la mise en place des capteurs à l'aide d'un pied à coulisse numérique (précision 0,04 mm), de même leurs masses ont été prises à l'aide d'une balance (précision de 0,1 g).

Six éprouvettes ayant une teneur en eau faible ont été placées dans une enceinte climatique régulée à 20 °C et 85 % d'humidité relative. Quatre éprouvettes étaient équipées de capteur de déplacement, elles sont numérotées de A1 à A4, les deux autres servant de témoin, elles sont numérotées A5 et A6. De même, six éprouvettes ayant une teneur en eau élevée ont été placées au-dessus de l'enceinte climatique avec quatre éprouvettes instrumentées (numérotée de B1 à B4) et deux éprouvettes témoins (numérotée de B5 et B6). De plus, pour chaque ambiance deux capteurs dans des supports à capteur ont été placés pour mesurer la déviation de la mesure au cours du temps.

La plage de mesure du capteur a été choisi entre 10 mm et 20 mm, les capteurs lors de leur mise en place ont donc été positionnés à une distance de 15 mm pour les deux configurations.

Les essais ont duré près de 45 jours, la masse des éprouvettes témoin a été prise plusieurs fois durant ce laps de temps afin de suivre l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes. À la fin, la masse et les dimensions des éprouvettes ont été mesurées et leur humidité finale a été calculée selon la norme EN 13183-1 [5].

Résultats

Éprouvettes à l'extérieur de l'enceinte climatique

La Figure 3-6 présente les données climatiques enregistrées à l'extérieur de l'enceinte climatique, à proximité des éprouvettes de hêtre. Pour les deux grandeurs mesurées les courbes représentent la moyenne des mesures de deux capteurs SHT 75. La Figure 3-7 présente les courbes de déplacement des tiges des capteurs LMP5 à LPM8, les données sont moyennées sur une heure. Les éprouvettes étaient à une teneur en eau moyenne de 12,9 % au début des essais, elles ont été placées dans un environnement avec une température moyenne de 25,06 °C et une humidité relative moyenne de 45,5 %. La valeur mesurée représente le retrait du bois sur la hauteur de l'éprouvette, soit $121,33 \pm 0,14$ mm pour les quatre éprouvettes de hêtre placées à l'extérieur de l'enceinte climatique et équipées de capteur LMP, le retrait a augmenté durant les essais, la teneur en eau des éprouvettes a donc diminué.

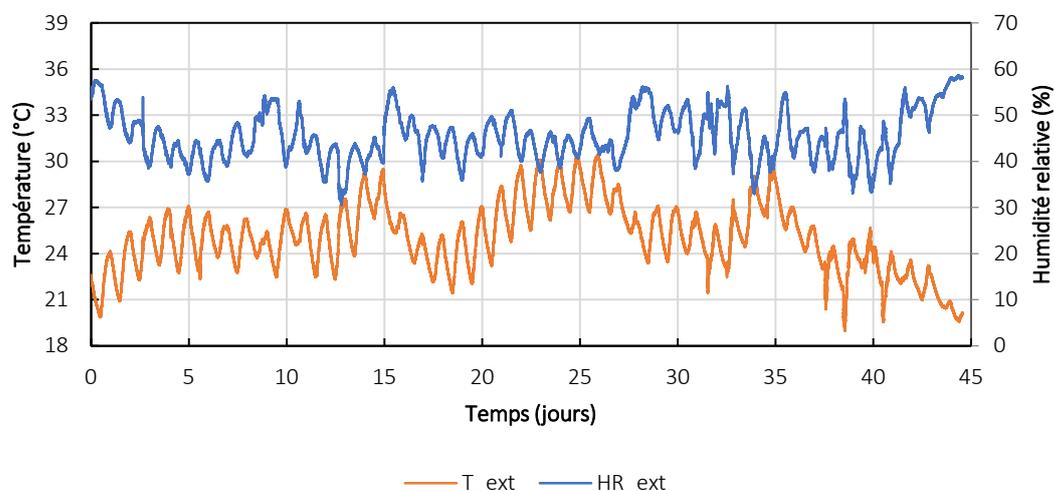


Figure 3-6 Conditions environnementales pour les éprouvettes de hêtre à 12,9 % de teneur en eau initiale

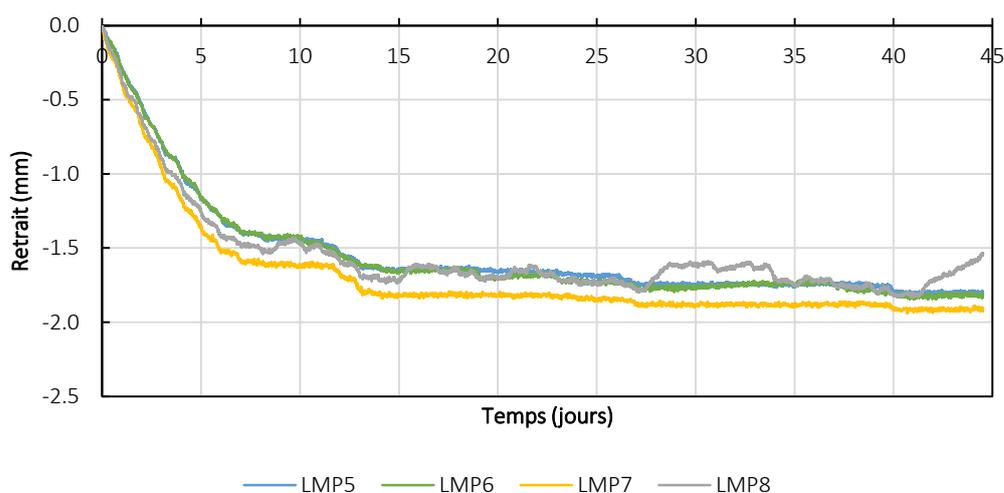


Figure 3-7 Déplacement mesuré pour les éprouvettes de hêtre à 12,9 % de teneur en eau initiale : B1 (LMP5), B2 (LMP6), B3 (LMP7) et B4 (LMP8)

Éprouvettes à l'intérieur de l'enceinte climatique

Des éprouvettes de hêtre à une teneur en eau initiale de 9,3 % ont été placées dans une étuve réglée à 20 °C et 85 % d'humidité relative, la Figure 3-8 présente les mesures moyennées de deux capteurs SHT 75 placés dans l'enceinte. Suite à de fortes chaleurs l'enceinte climatique n'a pas pu réguler, elle s'est arrêtée à partir du 24^e jour d'essais et n'a pu être remise en état de marche qu'à partir du 31^e jour. Ceci explique l'absence de régulation visible sur la Figure 3-8 entre le 24^e et le 31^e jour. Une autre anomalie est visible autour du 41^e jour, elle est due à une coupure de courant. Les baisses ponctuelles d'humidité relative ou les augmentations ponctuelles de température correspondent à l'ouverture de la porte de l'enceinte climatique.

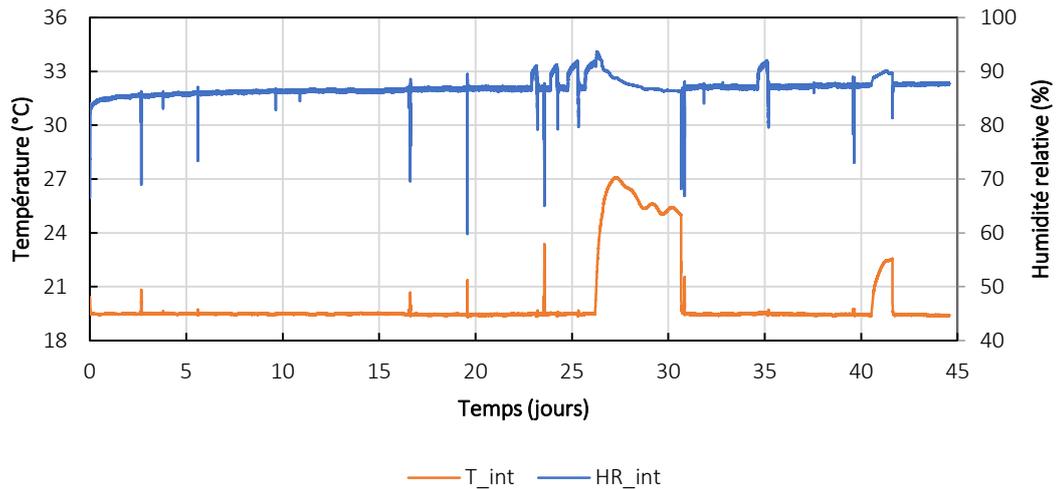


Figure 3-8 Température et humidité relative à l'intérieur de l'enceinte climatique

La Figure 3-7 présente les courbes de déplacement des tiges des capteurs LMP1 à LMP4, les données sont moyennées sur une heure. Les éprouvettes étaient à une teneur en eau moyenne de 9,3 % au début des essais, elles ont été placées dans un environnement avec une température moyenne de 20 °C et une humidité relative moyenne de 80 %. La valeur mesurée représente le gonflement du bois sur la hauteur de l'éprouvette, soit $120,76 \pm 0,13$ mm pour les quatre éprouvettes de hêtre placées à l'intérieur de l'enceinte climatique et équipées de capteur LMP, le gonflement a augmenté durant les essais, la teneur en eau des éprouvettes a donc augmenté.

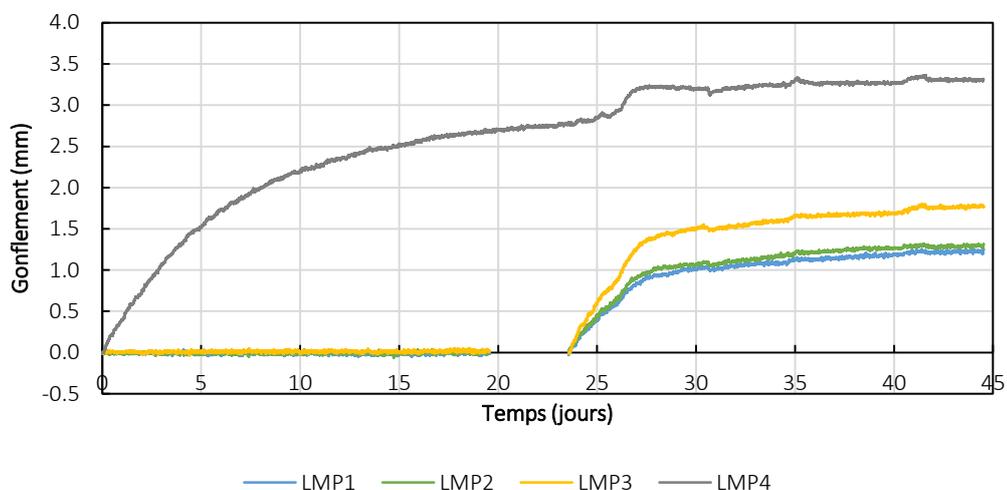


Figure 3-9 Déplacement mesuré pour les éprouvettes de hêtre à 9,3 % de teneur en eau initiale : A1 (LMP1), A2 (LMP2), A3 (LMP3) et A4 (LMP4)

Un problème est survenu lors des essais comme le montre la Figure 3-9, en effet, les capteurs LMP1, LMP2 et LMP3 n'ont pas enregistré de déplacement durant les 20^e jours. Les capteurs ont été démontés des éprouvettes, les tiges étaient bloquées contre la paroi du trou de perçage. Afin de remédier à ce problème les perçages ont été agrandi avec un foret de 7 mm de diamètre (le perçage initial était de 6 mm), puis les éprouvettes ont été placées à l'extérieur de l'enceinte pour que leur teneur en eau moyenne diminue. Lorsque la teneur en eau des éprouvettes fut d'environ 10,5 % les capteurs ont été fixés sur les éprouvettes et ces éprouvettes ont été remises en place dans l'enceinte climatique.

Incertitude de mesure

La Figure 3-10 présente les mesures des quatre capteurs de suivi, pour plus de lisibilité les mesures, dont le pas d'acquisition est d'une minute, sont moyennées sur 24 h. Ces mesures montrent une déviation maximum sur 45 jours d'essais de 0,3 %, soit 5×10^{-4} mm ($k = 2$). Les variations des déplacements mesurées peuvent s'expliquer par l'influence de l'environnement sur les matériaux constituant le support des capteurs de suivi, l'influence du rayonnement électromagnétique (les fils ne sont pas isolés) et l'influence de l'alimentation électrique. Ces variations sont inférieures à l'incertitude de l'étalonnage (soit 0,3 mm), néanmoins, pour les essais avec les modules expérimentaux le signal de l'alimentation sera enregistré pour pouvoir quantifier son influence sur les enregistrements des capteurs LMP.

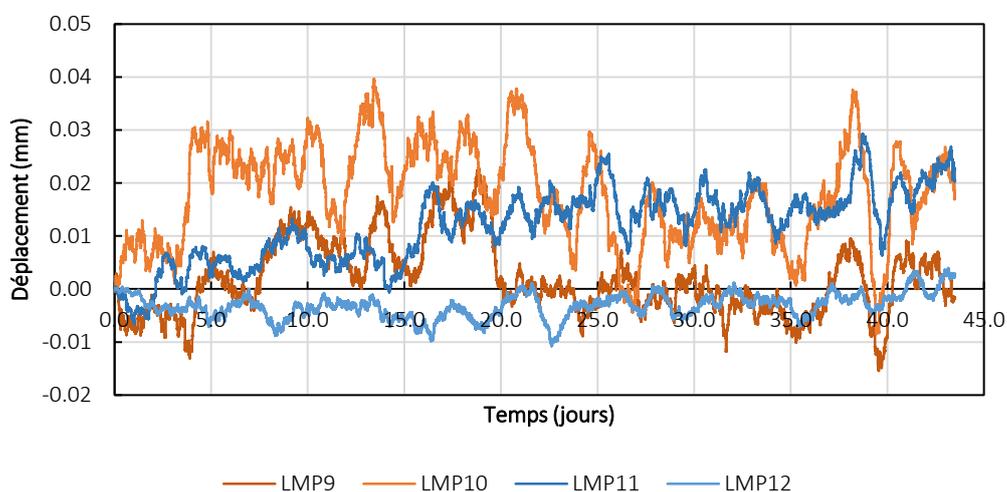


Figure 3-10 Déplacement mesuré par les capteurs LMP9 et LMP10 placés à l'intérieur de l'enceinte climatique, et par les capteurs LMP11 et LMP12 placés au-dessus de l'enceinte climatique.

Le déplacement mesuré présenté Figure 3-10 est moyenné sur 24 h mais les données sont enregistrées toutes les minutes. Pour les 48 h l'écart type des mesures enregistrées est égal à 0,03 mm, à la fin des essais et sur 48 h l'écart type est de 0,1 mm. Ainsi, il y aurait un problème de stabilité électrique qui pourrait devenir plus important avec des essais durant plus de 45 jours. Afin de confirmer cette hypothèse un test a été effectué avec un système d'acquisition différent comprenant une source électrique stabilisée (voir description du système d'acquisition dans la section 3.1.2). Le test n'a pas pu être effectué sur une grande période de temps, néanmoins, il a montré que l'écart-type des mesures sur 7 jours est inférieur à 0,01 mm.

Conclusion

Ces essais avaient pour objectif de tester le système d'acquisition et d'identifier des sources d'incertitudes quant à la mesure des déplacements. Les résultats des mesures ne sont pas exploitables pour tester le modèle en 1D ou 2D car le transfert de vapeur longitudinal n'a pas été empêché. Le problème à modéliser est donc un problème 3D, et ce type de modélisation demandant un temps de calcul trop long, elle n'a donc pas été réalisée.

Ces essais n'ont pas permis de valider le système d'acquisition utilisant seulement une carte Arduino, l'incertitude de mesure étant trop grande. Ainsi c'est le système d'acquisition décrit dans la section 3.1.2 qui est choisi pour les essais avec les modules expérimentaux pour plus de fiabilité dans le temps.

Suite à ces essais, la méthode de mise en place du capteur sur l'éprouvette a été modifiée pour permettre un meilleur centrage de la tige et donc empêcher tout blocage. De même, le perçage des éprouvettes sur les 120 mm de hauteur avait été réalisés avec une perceuse à colonne. La déviation pouvait être importante, un nombre important d'éprouvettes avait été percées et seulement les « meilleurs », c'est-à-dire celles avec le moins de déviation possible, avait été sélectionnées. Le nombre de planches disponibles pour assembler les modules étant limité, l'utilisation d'une nouvelle méthode pour percer les planches a été élaborée. Elle consiste à utiliser la machine d'essais utilisée dans la tâche 4.4 du Work Package 4 du projet Hardwood_joint en utilisant un montage permettant de percer le plus droit possible. Le perçage s'effectue en quatre temps :

- Perçage de l'éprouvette avec une mèche courte de 6 mm de diamètre sur 59 mm avec la machine d'essai ;
- Perçage de l'éprouvette avec une mèche longue de 6 mm de diamètre sur 96 mm avec la machine d'essai (course maximale de la machine d'essai) ;
- Perçage débouchant de l'éprouvette avec une mèche longue de 6 mm de diamètre à l'aide d'une perceuse portative (24 mm restant) ;
- Perçage à 7 mm sur 50 mm avec la machine d'essai du côté de fixation du capteur.

La déviation des perçages est plus faible que lors des perçages à la perceuse à colonne, elle est au maximum de 0,6 mm.

3.3 Résultats expérimentaux

Les essais ont été mis en place durant le mois de décembre 2020 et ils ont été arrêtés en janvier 2022. Pour le module A, l'essai aura duré 391 jours et pour les modules B et C, les essais auront duré 418 jours.

3.3.1 Acquisition et suivi des mesures

Pour les modules B et C le système d'acquisition permet d'enregistrer une mesure toutes les 72 ou 73 s. La valeur enregistrée est la moyenne de 30 mesures pour ne pas créer des fichiers d'enregistrement trop volumineux. Pour le module A le système d'acquisition permet d'enregistrer toutes les 73 ou 74 s, la valeur enregistrée est la moyenne de 60 mesures (le système d'acquisition est plus rapide car le nombre de capteurs est plus faible).

Durant la durée des essais, les données enregistrées sur les ordinateurs ont été récupérées à intervalle régulier afin de vérifier au bon déroulement des essais. Néanmoins, des pertes de données ont eu lieu et seront précisées dans les sections suivantes. L'étalonnage des capteurs placés à l'extérieur des modules a été effectué plusieurs fois durant les essais et n'a pas révélé de déviation de l'étalonnage au cours du temps. De même les mesures des capteurs situés à l'extérieur des modules n'ont pas montré de déviation dans le temps supérieur à 0,01 mm.

3.3.2 Mesures pour le module A

Température et humidité relative

Le module a été monté dans une salle régulée en température et humidité, soit 20°C et 60 % respectivement. Le module est resté dans cette salle 49 jours puis il a été déplacé dans une salle ventilée et chauffée. La Figure 3-11 présente les mesures de température et d'humidité relative des capteurs SHT, deux capteurs sont placés à 10 cm de la surface du module (notés A1 et A2 avec en indice le nom du module) et deux autres capteurs sont placés contre le pare-pluie (notés S1 et S2).

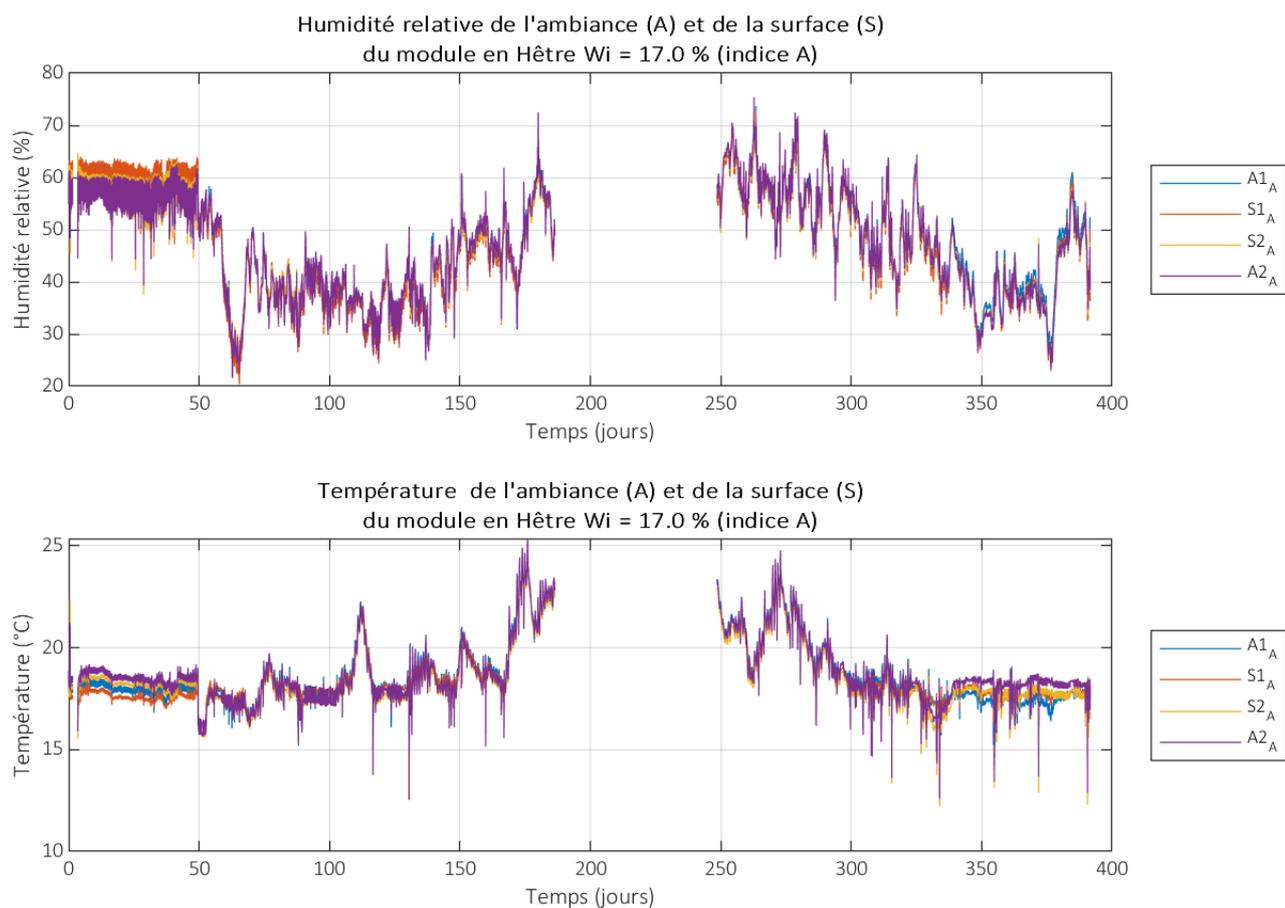


Figure 3-11 Conditions environnementales mesurées pour le module A (395 jours)

Une coupure d'électricité a eu lieu durant près de 3 jours au début de l'essai les données perdues sur cet intervalle de temps ne sont pas dommageables pour la suite de l'étude. Au contraire, durant l'été 2021 l'ordinateur du module a cessé d'enregistrer, entraînant une perte importante de données entre le 15/06/2021 et le 16/08/2021 (voir Figure 3-11). En effet, ni les déplacements ni les températures et l'humidité relative de l'air n'ont été enregistrés. Néanmoins, les données environnementales peuvent être extrapolées à partir des données météorologiques mesurées sur le toit du bâtiment. Cette extrapolation est possible car il n'y avait pas de chauffage durant cette période, et en comparant les données mesurées quelques jours avant et après la coupure avec les données météorologiques, il est possible d'effectuer la transformation observée (une différence linéaire de température et d'humidité relative) pour la plage de données manquantes.

La Figure 3-12 présente les mesures d'humidité relative et de températures complétées par les données météorologiques modifiées. Ainsi une première période est visible sur les 49 premiers jours de l'essai, elle correspond au temps passé du module dans la salle régulée. Pour cette première période la température moyenne été de 17,8 °C. La deuxième période, entre 49 et 130 jours, correspond au temps passé dans la salle chauffée et ventilée, le chauffage était régulé 18 °C. Durant cette période, la température était quasi constante, sa valeur moyenne étant de 18,2 °C, certains pics sont visibles est correspondent à des journées dont la température dépassait 18°C. La troisième période correspond au temps de l'essai sans chauffage, cette période s'étant du 130^{ème} jour au 339^{ème} jour, ainsi la température à fluctuée entre 18°C et 26°C. Enfin durant la dernière période, entre 339 et 391 jours, le chauffage c'est activé et la température moyenne était de 17,7 °C.

L'humidité relative était constante durant la première période, sa moyenne était de 59,2%. Nous pouvons observer une baisse de l'humidité relative lors de la deuxième période ainsi que lors de la quatrième période, la moyenne pour ces deux périodes étant relativement de 36,3 % et 39,7 %. Comme pour la température, l'humidité relative a fluctué durant la troisième période, allant de 30 % à 70 %.

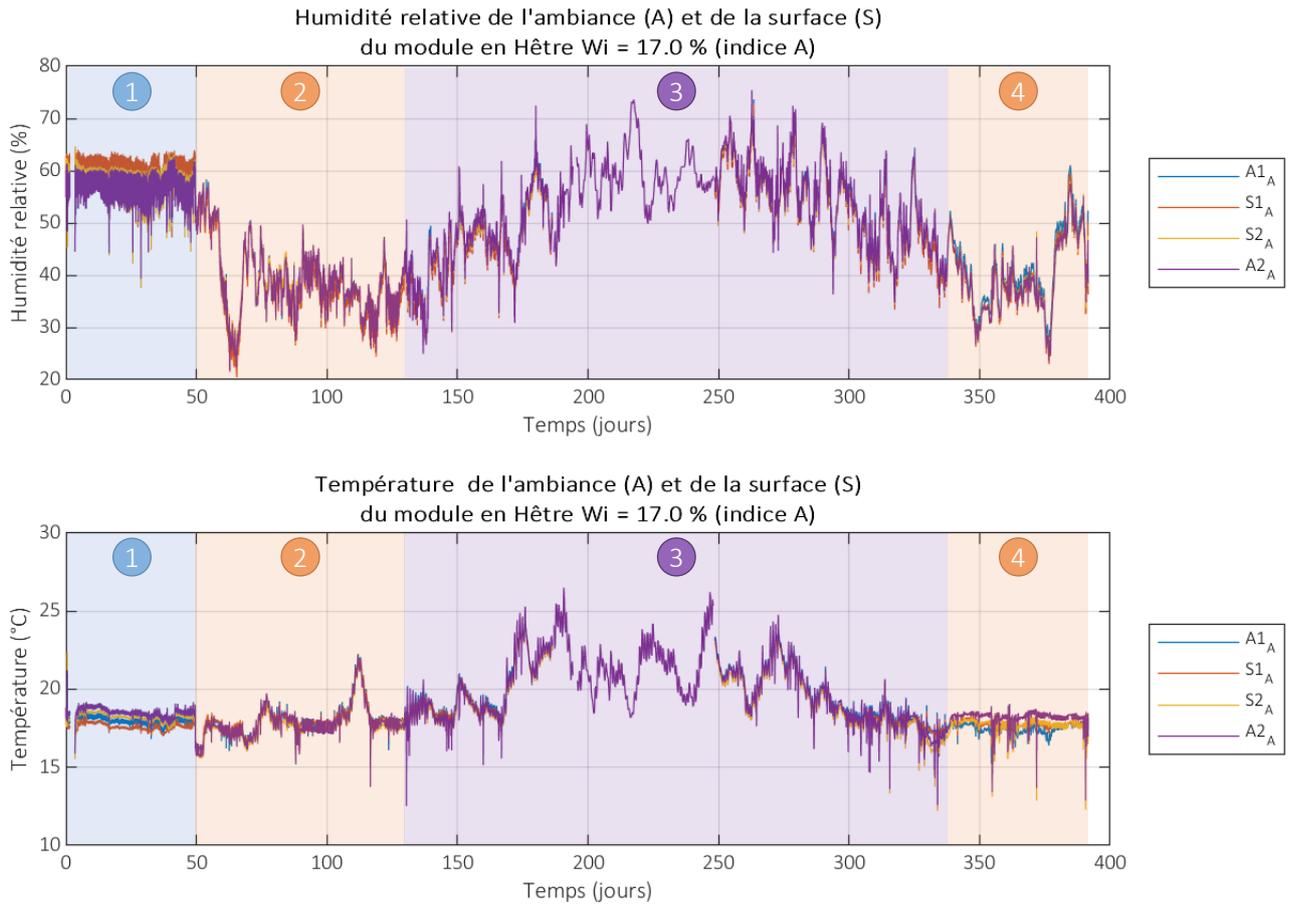


Figure 3-12 Conditions environnementales mesurées pour le module A (395 jours) avec ajout de données complémentaires

Retrait et gonflement

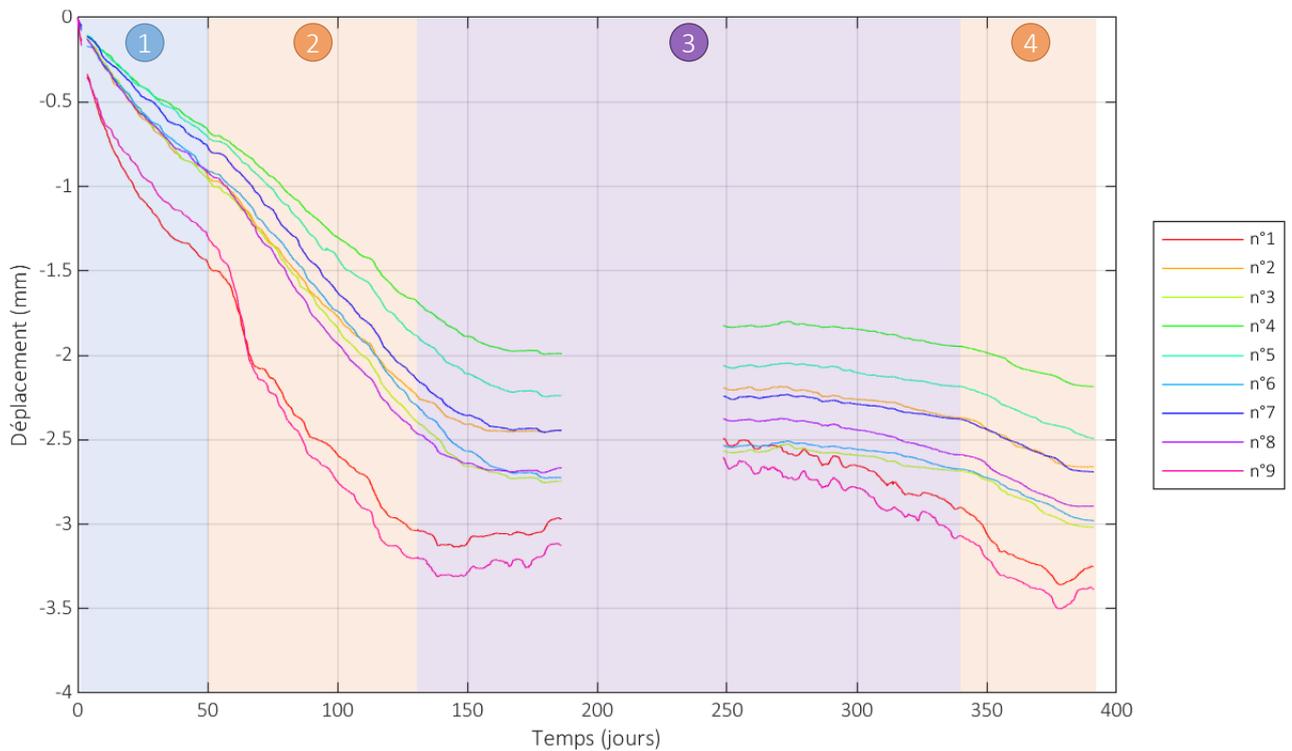


Figure 3-13 Déplacements mesurés pour le module A (395 jours)

Les déplacements mesurés par les capteurs LMP sont présentés par la Figure 3-13, l'ordre des capteurs LMP correspond à l'ordre des planches, ainsi les LMP n°1 et n°9 sont les capteurs des planches contre le pare-pluie. Ces deux capteurs sont ceux qui répondent le plus vite aux transferts de température et d'humidité dans l'assemblage.

Les déplacements de la Figure 3-13 sont négatifs car la teneur en eau du bois était élevée, 17,0 %, ils correspondent donc à une perte de teneur en eau qui entraîne un retrait du bois. Le passage entre la première et la deuxième période, soit d'un environnement humide à un environnement plus sec, est marqué par une déformation plus rapide. En effet, cela est visible particulièrement pour les capteurs n°1 et n°9, la pente lors du début de la deuxième période est plus élevée que celle lors de la première période. Nous pouvons observer que lors de la troisième période les déplacements ont diminué, témoignant d'un gonflement du bois, soit une reprise d'humidité. Cela s'explique par l'augmentation de l'humidité relative sur cette période, et lorsque cette dernière a diminué il y a de nouveau un retrait du bois, soit une perte en teneur en eau. Les dernières mesures de l'essai dans la quatrième période montrent un faible gonflement pour les capteurs n°1 et n°9, cela est dû à l'augmentation de l'humidité relative de l'environnement.

Les échanges de température et de masse sont symétriques dans l'assemblage, la différence visible entre les capteurs n°1 et n°9, ou n°2 et n°8 proviennent de l'anisotropie du bois, le retrait ou gonflement n'étant pas le même dans la direction tangentielle et radiale (voir section 4.1 page 49). En effet, les planches de hêtre utilisées ne proviennent pas de la même planche et les cernes ne sont pas identiques. Ceci explique aussi pourquoi ce n'est pas la planche située au centre de l'assemblage avec le capteur n°5 qui présente le moins de déformation.

Après l'arrêt de l'essai, des mesures à l'aide d'un pied à coulisse numérique (précision 0,04 mm) ont été effectuées afin de confronter ces mesures avec celles des capteurs de déplacement (voir Figure 3-14). L'incertitude de mesure avec le pied à coulisse est plus grande que celle tracer sur le graphique, en effet, les planches de bois étaient déformées par les variations de teneur en eau et la mesure avec le pied à coulisse au centre de la planche était délicate à effectuer. Cela est très visible pour les planches en contact avec le pare-pluie où l'écart entre la mesure au pied à coulisse et la mesure des capteurs de déplacement est le plus grand. Néanmoins, au vu de la similitude entre les mesures, l'écart moyen entre les deux séries de mesures étant de 0,10 mm, il est possible de conclure que les mesures des capteurs de déplacements durant les essais sont correctes. La perte de données n'a donc pas eu d'influence sur les mesures des capteurs de déplacements.

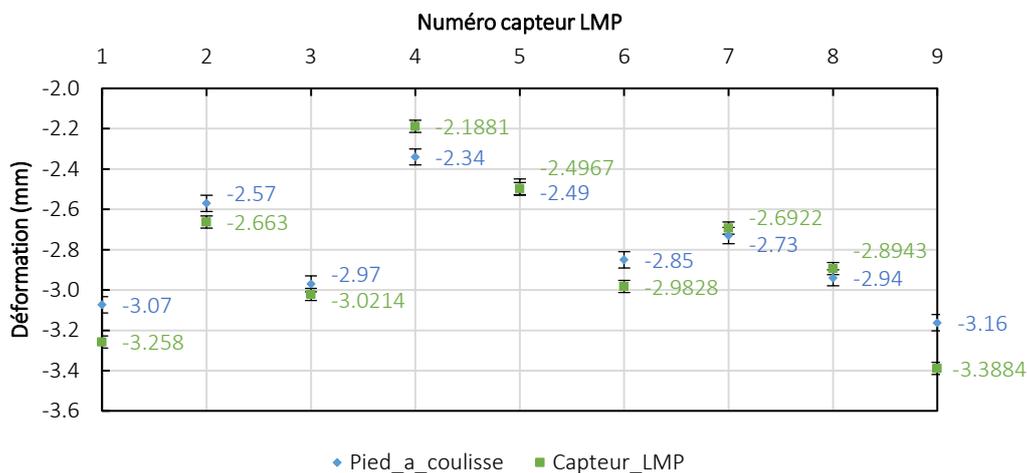


Figure 3-14 Mesures des déformations à la fin de l'essai du module A : mesure avec un pied à coulisse numérique (marqueurs et légendes bleu) et mesure avec les capteurs de déplacements (marqueurs et légendes verts)

Teneur en eau initiale et finale

Le Tableau 3-1 présente les teneurs en eau initiales et finales de chaque planche constituant l'assemblage du module A. La teneur en eau initiale a été caractérisée lors de l'usinage des planches en appliquant la norme NF-EN 13183-1 [5] (méthode par dessiccation) sur les chutes de bois, les planches étant à l'équilibre la teneur en eau était homogène dans l'ensemble de la planche. La teneur finale est caractérisée sur une éprouvette de 20 mm de large incluant le perçage de

la planche, sa hauteur est la hauteur de la planche (environ 120 mm) et son épaisseur est l'épaisseur de la planche (environ 37 mm). Ainsi, la teneur finale caractérisée correspond à la teneur en eau du volume de la planche dont les déformations ont été mesurées par le capteur de déplacement. La valeur moyenne de la teneur en eau est de 10,1 % avec un écart-type de 0,2 %. Nous pouvons observer qu'il existe de faibles écarts entre les teneurs en eau finales des planches.

Tableau 3-1 Teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module A

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_o (%)	17,2	17,0	17,4	16,6	17,1	16,9	16,9	17,2	17,0
W_f (%)	9,8	10,1	10,0	10,2	10,4	10,2	10,4	10,1	9,9

3.3.3 Mesures pour les modules B et C

Température et humidité relative

La Figure 3-15 présente les mesures de température et d'humidité relative pour les modules B et C, comme pour le module A des capteurs SHT sont placés à 10 cm du module (notés A1 et A2) et d'autres sont placés sur le pare-pluie (notés S1 et S2). Pour la modélisation les températures en-dessous de zéro seront prises comme étant égales à zéro (une hypothèse du modèle étant l'absence d'eau gelée).

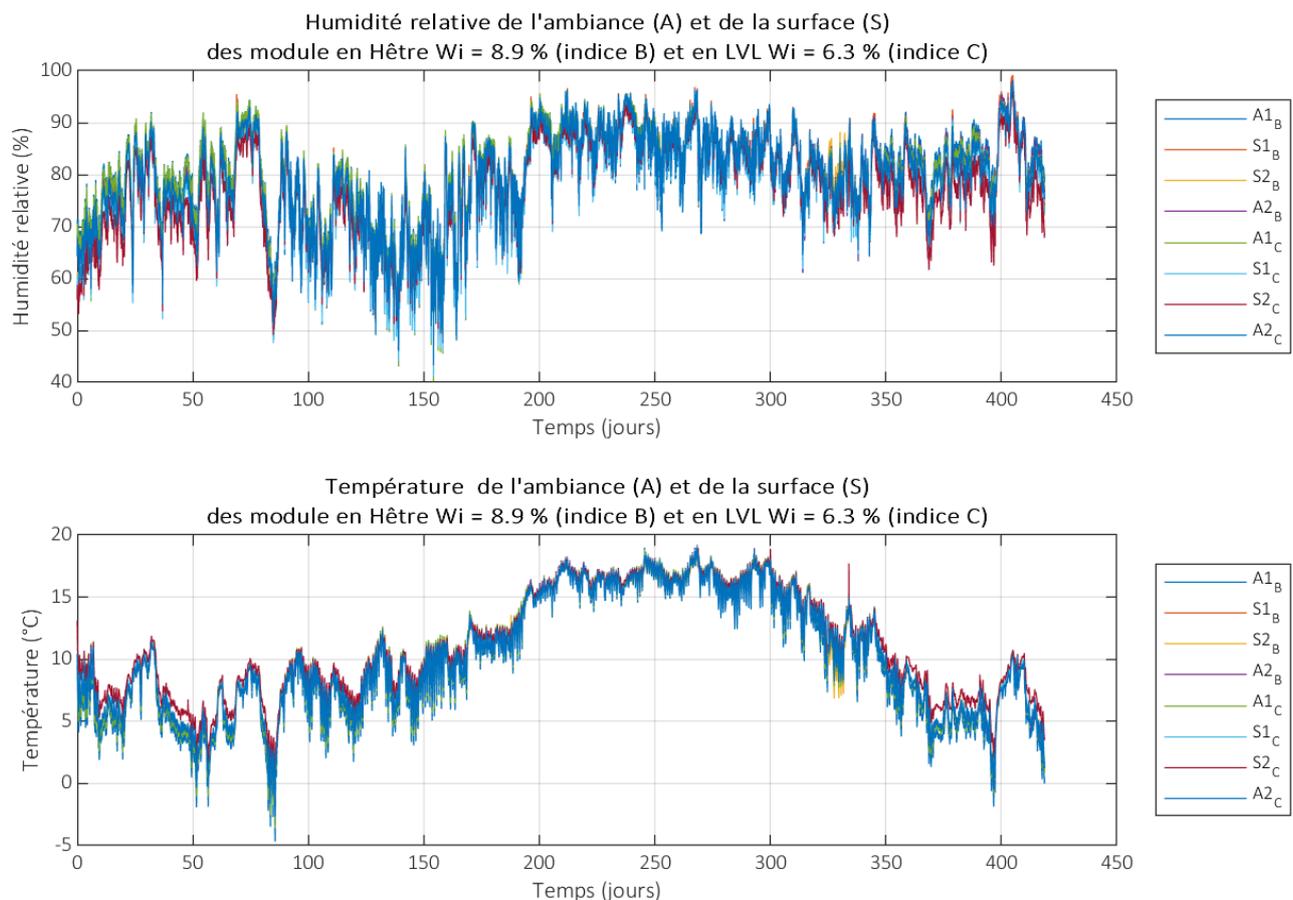


Figure 3-15 Conditions environnementales mesurées pour les modules B et C (418 jours)

Les modules étaient placés au sous-sol d'un bâtiment, la température et l'humidité de l'air étaient donc grandement dépendants des conditions météorologiques.

Retrait et gonflement

Les déplacements mesurés pour les modules B et C sont présentés par la Figure 3-16 et la Figure 3-17 respectivement. Pour le module B les capteurs LMP n°1 et n°9 correspondent aux capteurs fixés sur les planches contre le pare-pluie, de même dans le cas des capteurs LMP n°1 et n°9 pour le module C.

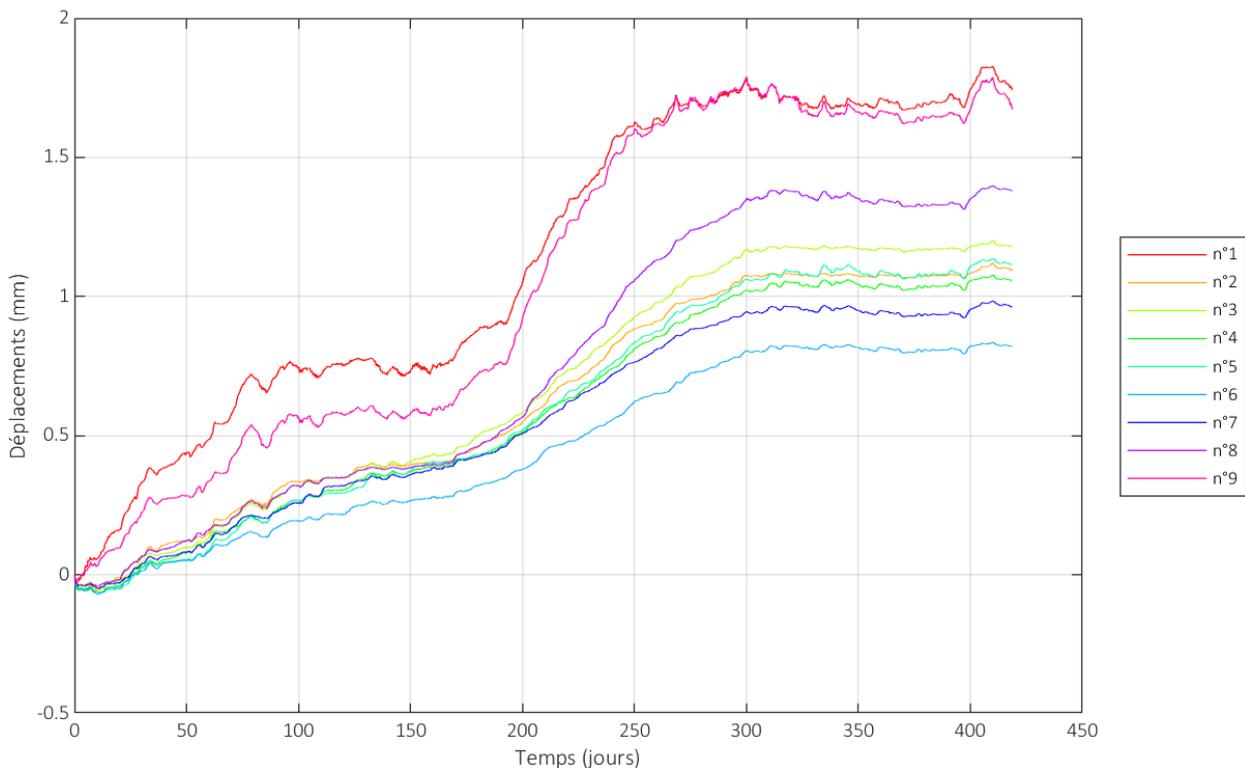


Figure 3-16 Déplacements mesurés pour le module B (418 jours)

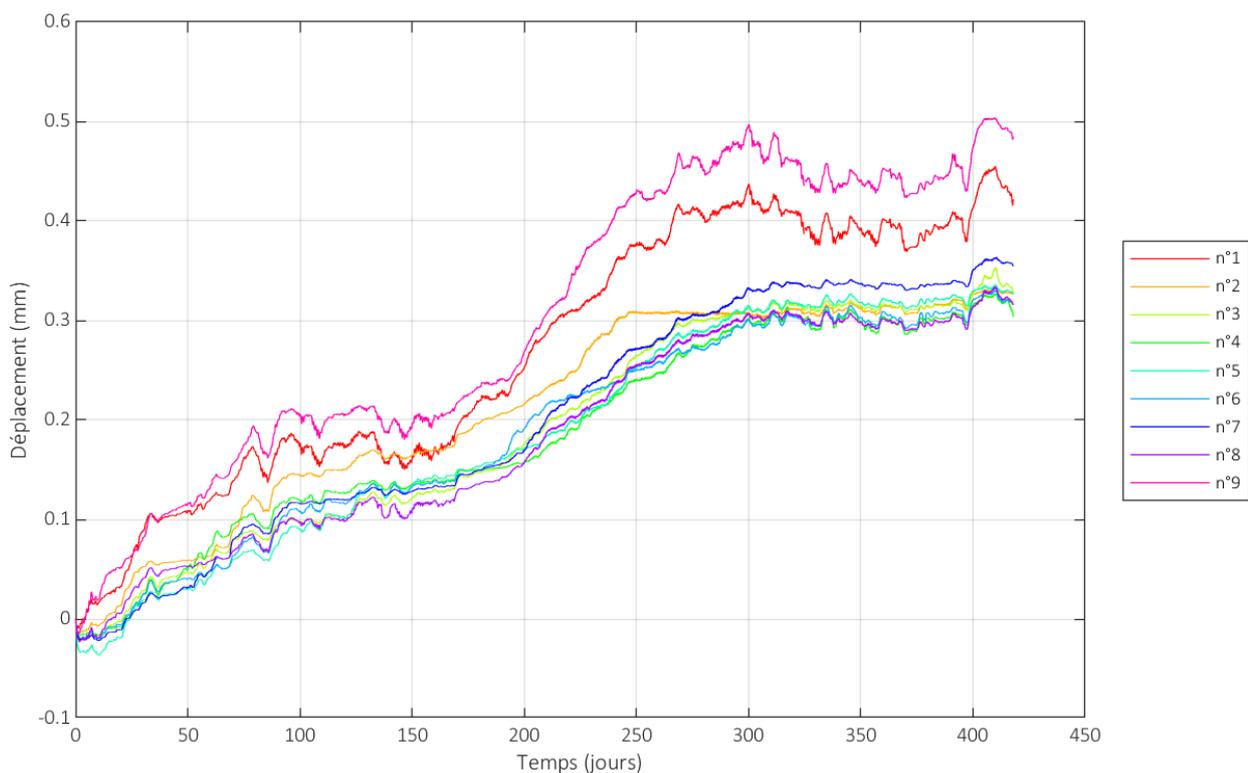


Figure 3-17 Déplacements mesurés pour le module C (418 jours)

Pour le module C, le capteur de déplacement situé sur la planche n°2 n'a plus enregistré de déplacement à partir du 245^{ème} jour jusqu'au 301^{ème} jour (voir courbe orange sur la Figure 3-17). La tige du capteur c'est semblablement bloqué ou un autre disfonctionnement du capteur a eu lieu, dans tous les cas les données du capteur n°2 ne seront pas prises en compte à partir du 245^{ème} jour.

Les capteurs des planches contre le pare-pluie, n°1 et n°9, sont, comme dans le cas du module A les capteurs qui enregistrent le plus de déformations, elles sont ici positives et correspondent au gonflement du bois. Pour les deux modules nous pouvons observer l'augmentation des déformations dues au gonflement du bois durant toute la durée des essais. En effet, les planches de bois avaient une teneur en eau initiale faible, 8,9 % pour le module B et 6,3 % pour le module C, et l'humidité relative de l'air était élevée, entre 70 % et 86 %, la teneur en eau du bois a donc augmenté.

Cependant, nous pouvons observer au début des essais des déplacements négatifs. La Figure 3-18 présente les déplacements mesurés pour les modules B et C les 35 premiers jours et permet de mieux observer ces déplacements. Ces variations dimensionnelles sont certainement dues au changement de température, en effet, les modules ont été assemblés dans un environnement dont la température était proche de 20 °C, or la température de la cave était de 6,7 °C les 30 premiers jours des essais. D'après la littérature, les variations dimensionnelles d'origine thermique sont très faibles par rapport à celles générées par un gradient hydrique et, par conséquent, elles sont dans la plupart des cas négligées [13]. Dans le cas du module B la déformation maximale observée est de - 0,070 mm et pour le module C elle est de - 0,036 mm. Le modèle mécanique d'hygro-expansion ne prend pas en compte ces variations et les données seront donc modifiées afin que ce retrait n'apparaisse pas lors de la comparaison avec les résultats des simulations numériques.

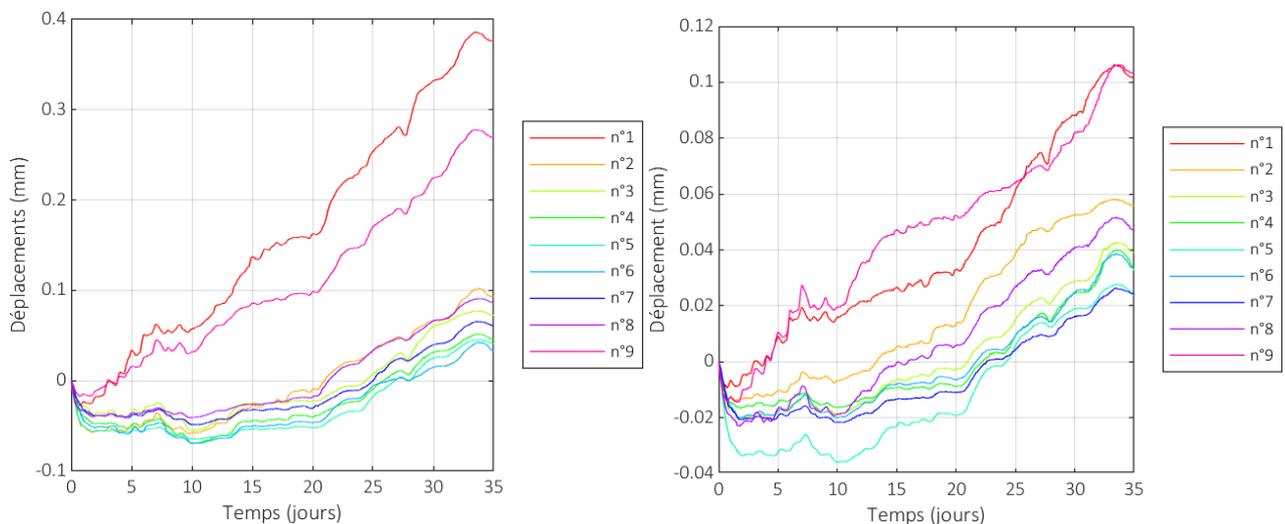


Figure 3-18 Déplacements mesurés pour le module B (figure droite) et le module C (figure gauche) les 35 premiers jours

Après l'arrêt de l'essai, des mesures à l'aide d'un pied à coulisse numérique (précision 0,04 mm) ont été effectuées afin de confronter ces mesures avec celles des capteurs de déplacement. Ces mesures n'ont été possibles que pour les planches n°1 et n°9 pour les deux modules. En effet, il n'a pas été possible d'enlever les vis des assemblages et la méthode d'usinage des assemblages afin de réaliser des éprouvettes pour obtenir la teneur en eau finale des planches n'a pas permis de faire les mesures sur toute la hauteur de la planche. Les données mesurées sont présentées dans le Tableau 3-2 ainsi que les données de capteurs LMP.

La déformation des planches de hêtre était importante et non uniforme sur la largeur des planches, la mesure au pied à coulisse est donc légèrement faussée mais nous pouvons conclure que les mesures des capteurs LMP sont correctes la différence entre les deux types de mesures étant en moyenne de 0,06 mm. Les planches issues du panneau de LVL de hêtre à plis croisés ne présentaient pas de grandes déformations à la fin de l'essai, les mesures effectuées avec le pied à coulisse sont donc plus précises et sont concordantes avec celles enregistrées par les capteurs LMP.

Tableau 3-2 Mesures des déformation en millimètres des planches n°1 et n°9 pour les modules B et C

Type de mesure	Module B		Module C	
	LMP	Pied à coulisse	LMP	Pied à coulisse
Planche n°1	1,7420	1,65	0,4123	0,4771
Planche n°9	1,6725	1,71	0,42	0,45

Teneur en eau initiale et finale – Module B

Le Tableau 3-3 présente les teneurs en eau initiales et finales de chaque planche constituant l'assemblage du module B. La teneur en eau initiale a été caractérisée lors de l'usinage des planches en appliquant la norme NF-EN 13183-1 [5] (méthode par dessiccation) sur les chutes de bois. La teneur finale est caractérisée sur une éprouvette de 20 mm de large incluant le perçage de la planche, sa hauteur est la hauteur de la planche (environ 120 mm) et son épaisseur est l'épaisseur de la planche (environ 37 mm). Ainsi, la teneur finale caractérisée correspond à la teneur en eau du volume de la planche dont les déformations ont été mesurées par le capteur LMP.

Tableau 3-3 Teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module B

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_0 (%)	8,5	8,5	9,6	9,3	9,4	9,5	9,3	8,2	7,9
W_f (%)	13,8	13,3	14,7	14,4	14,1	14,4	14,7	13,6	13,8

La valeur moyenne de la teneur en eau finale pour le module B est de 14,1 % avec un écart type de 0,5 %. Ainsi, les teneurs en eau finales de chaque planche sont semblables, mais nous pouvons observer que les teneurs en eau finales des planches n°1, n°2, n°8 et n°9 sont légèrement plus faible avec une moyenne de 13,6 % contre 14,5 % pour les planches numérotées entre 3 et 7. La différence est donc de 1,1 %, cette différence peut s'expliquer par la baisse d'humidité relative observée les derniers jours de l'essai (voir Figure 3-15). Néanmoins, il faut aussi tenir compte de la teneur en eau initiale des planches où la même différence est observable : 8,3 % de teneur en eau initiale pour les planches n°1n n°2, n°8 et n°9 contre 9,4 % pour les autres planches, soit une différence de 1,1 %).

Teneur en eau initiale et finale – Module C

Le Tableau 3-4 présentent les teneurs en eau initiales et finales de chaque planche constituant l'assemblage du module C qui ont été obtenues avec la méthode décrite pour le module B.

Tableau 3-4 Teneurs en eau initiales et finales des planches de LVL de hêtre du module C

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_0 (%)	6,4	6,4	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,4	6,4
W_f (%)	12,1	11,4	10,8	10,4	10,7	10,8	10,8	11,0	12,6

La valeur moyenne de la teneur en eau finale est de 11,2 % avec un écart type de 0,7 % pour le module C. Nous pouvons observer que la teneur en eau finale décroît entre l'extérieur du module et le centre du module. Ici les teneurs en eau initiales étaient très semblables car les planches de LVL de hêtre provenaient du même panneau, néanmoins la distribution des teneurs en eau finales n'est pas symétrique, une différence de 0,5 % est observée pour les planches n°1 et n°9, et une différence de 0,4 % entre les planches n°2 et n°8. Une explication possible serait l'influence du positionnement des modules B et C sur les coefficient d'échange surfaciques thermique et hydrique. En effet, les deux modules étaient côte à côte lors des essais. L'espace entre les deux modules était de 30 cm et bien que les températures et humidité relatives pour chaque surface sont semblables, il est possible que la vitesse de l'air ne soit pas le même.

Les planches du modules C sont issues d'un panneau de LVL de hêtre à plis croisé. Le calcul du retrait et du gonflement ne dépend donc pas de l'orientation des cernes comme pour le module A et le module B. Nous pouvons donc calculer le gonflement théorique à partir des teneur en eau initiales et finales des planches selon l'équation à l'aide des coefficients de retrait donnés par le fabricant [14] en % pour 1 % de modification de la teneur en eau :

- 0,01 %/% dans le sens du fil du placage de surface ;
- 0,03 %/% perpendiculaire au sens du fil du placage de surface ;
- 0,45 %/% dans le sens de l'épaisseur du panneau.

Ces coefficients de retrait sont notés α_i , ils sont exprimés en % pour 1 % de modification de la teneur en eau car ils prennent en compte la teneur en eau à saturation du matériau. Ainsi, pour calculer la déformation du matériau l'équation (2-8) doit être modifiée ainsi :

$$d_{i,wf} = l_{i,w0} \cdot \alpha_i (W_f - W_0) \quad (3-1)$$

avec

- $d_{i,wf}$ la déformation dans la direction i (tangentielle, radial ou longitudinal) [mm] ;
- $l_{i,sat}$ la dimension initiale dans la direction i [mm] ;
- α_i le retrait dans la direction i [%/%] ;
- W_f la teneur en eau finale [%] ;
- W_0 la teneur en eau initiale [%].

Pour le calcul de la déformation sur la hauteur des planche le coefficient de retrait utilisé est le coefficient perpendiculaire au sens du fil du placage de surface. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 3-5 ainsi que les mesures des capteurs LMP correspondantes. Les déformations calculées sont inférieures d'environ 0,17 mm par rapport aux mesures des capteurs LMP. L'explication la plus probable provient du fait que le perçage a été effectué au milieu de l'épaisseur de la planche, ainsi, les capteurs LMP ont mesuré le déplacement de plis dans la même direction, les capteurs étaient positionnés entre les deux plis croisés du LVL de hêtre (voir Figure 3-19). Le coefficient de retrait donné par le fabricant est global, or les capteurs LMP ont mesuré une déformation locale pour des plis dans la même direction. Le coefficient de retrait est certainement plus grand à cet endroit, et si sa valeur est multipliée par deux, les valeurs obtenues sont égales à celles mesurées par les capteurs LMP.

Tableau 3-5 Déformations mesurées par les capteurs LMP et calculée pour le module C

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mesure LMP	0,4062	0,3582	0,3296	0,3042	0,3247	0,3317	0,3312	0,3325	0,4421
Calcul pour $\alpha_i = 0,03$ %/%	0,4123	0,3267	0,3287	0,3035	0,3277	0,3158	0,3547	0,3140	0,4771
Calcul pour $\alpha_i = 0,06$ %/%	0,4123	0,3267	0,3287	0,3035	0,3277	0,3158	0,3547	0,3140	0,4771

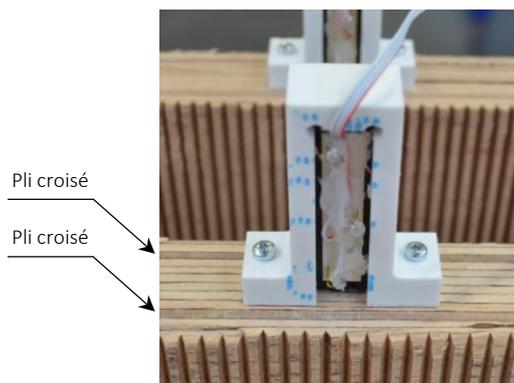


Figure 3-19 Position d'un capteur de déplacement (LMP) fixé sur une planche de LVL de hêtre à plis croisés

3.3.4 Conclusions sur les essais

Dans le cas du module A, soit avec un bois de hêtre avec une teneur en eau initiale moyenne de 17,0 % placé dans un environnement permettant à la teneur en eau des matériaux de diminuer, des déplacements négatifs, soit un retrait des planches sur leur hauteur ont bien été observés. De même, pour le module B, soit avec un bois de hêtre avec une teneur en eau initiale à 8,6 % placé dans un environnement humide, des déplacements positifs, soit du gonflement des planches sur leur hauteur ont été observés. La mesure des déplacements montre donc que des transferts hydriques ont eu lieu lors des essais et ces données sont utilisées pour développer le modèle thermo-hydrique et le valider. Ainsi, le modèle sera valide dans le cas de l'adsorption en utilisant les données du module B et dans le cas de la désorption en utilisant les données du module A.

Dans le cas du troisième module, soit le module C avec des planches en LVL de hêtre, les déplacements sont bien plus faibles, soit 3,6 fois plus faibles que pour le bois de hêtre du module B soumis aux mêmes conditions environnementales. Cela s'explique par une stabilité dimensionnelle plus grande du LVL par rapport au bois de hêtre, mais aussi un coefficient de diffusion plus faible. Comme montré dans la section précédente, il a été nécessaire de modifier le coefficient de retrait afin d'obtenir des déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales concordantes avec celles mesurées par les capteurs LMP. Il serait donc nécessaire de prendre en compte les différents plis constituant le matériau pour modéliser sa déformation lors de la prise de teneur en eau. Or, le LVL est un matériau nouveau et son comportement hygrothermique a été très peu étudié. Nous manquons donc de données pour pouvoir modéliser ce matériau, notamment à propos du comportement de la colle présente entre les plis. Ces données ne seront donc pas utilisées pour développer le modèle thermo-hydrique.

4 Simulations hygrothermiques des modules expérimentaux

4.1 Modélisation mécanique : hygro-expansion

L'objectif des essais présentés précédemment est de suivre la variation dimensionnelle de plusieurs assemblages rainurés soumis à différentes conditions environnementales et de comparer les valeurs mesurées avec des valeurs de simulations numériques. Le modèle thermo-hydrigue développé pour cette étude permet d'obtenir les champs de teneur en eau dans les matériaux de l'assemblage. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle d'hygro-expansion permettant de calculer les déformations des planches selon leurs variations en teneur en eau afin de confronter les résultats des essais et ceux du modèle thermo-hydrigue. Ainsi un modèle mécanique est développé à l'aide du code de calcul Cast3M.

Le modèle d'hygro-expansion est un modèle mécanique élastique orthotrope. Pour ce modèle, il existe deux options afin de définir le repère orthotrope du matériau. Il est possible de définir la première direction d'orthotropie en donnant les coordonnées correspondantes en utilisant l'option 'DIRECTION'. Une autre option, 'RADIAL', permet de définir un repère orthotrope radial, pour cela il est nécessaire de donner les coordonnées de la moelle de l'arbre. C'est cette dernière option qui est choisie dans la suite pour cette étude afin d'utiliser un modèle orthotrope radial avec position de moelle. Les coordonnées du centre de l'arbre sont définies à partir de photos de la section des planches prises avant les essais. Les deux extrémités de toutes les planches de hêtres ont été photographiées, ainsi deux couples de coordonnées sont déterminées pour chaque planche. Les coordonnées utilisées pour le modèle sont la moyenne des deux couples de coordonnées.

Afin de déterminer les déformations des planches sur la hauteur une analogie est faite entre la dilatation thermique et la dilatation hydrique. Ainsi, les coefficients de dilatation thermique du modèle mécanique élastique orthotrope, dit modèle d'hygro-expansion, sont remplacés par les coefficients de retrait. De même, les champs de températures sont remplacés par les champs de teneur en eau. En effet, en utilisant les coefficients de retrait et de gonflement il est possible de déterminer les variations dimensionnelles des planches au niveau des assemblages. Du bois de hêtre (*Fagus Sylvatica*) est utilisé pour la confection des modules A et B, les coefficients de retrait, r_i (où i désigne la direction considérée, tangentielle, radiale ou longitudinale), sont donnés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 Coefficients de retrait du hêtre (*Fagus Sylvatica*)

Source	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Coefficient de retrait tangential r_t [%]	Coefficient de retrait radial r_r [%]	Coefficient de retrait longitudinal r_l [%]
[19] ¹	680 anhydre	≈11,8	≈5,8	0,3
[20]	710 à 12 %	11,6	5,7	-

Les valeurs des propriétés mécaniques nécessaires au modèle d'hygro-expansion sont celles utilisées pour la modélisation des essais de cisaillement des assemblages rainurés. Les coefficients de poisson sont pris comme étant nuls, les valeurs pour les modules d'élasticité longitudinale et les modules de cisaillement sont données dans le rapport du projet `hardwood_joint WP4-T4.2-RT-2022`.

¹ Initialement dans les travaux de Wagenführ R. 1996 – Holzatlas. Fachbuchverlag Leipzig.

Le modèle d’hygro-expansion a été développé en parallèle du modèle thermo-hydrrique. Néanmoins, une première approximation des déformations finales est présentée dans cette section afin de déterminer si le modèle d’hygro-expansion doit prendre en compte la géométrie de l’assemblage ainsi que les liaisons entre les éléments bois. Ainsi, pour cette première approximation, le retrait et le gonflement ont été calculé à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches constituant les modules. Pour ces calculs, la teneur en eau de chaque planche est considérée comme uniforme sur la section de la planche, cela est vrai dans le cas de la teneur en eau initiale car les bois étaient à l’équilibre mais c’est inexact dans le cas de la teneur en eau finale. Les calculs suivants ne servent donc pas à optimiser le modèle thermo-hydrrique mais à choisir le type de modélisation mécanique nécessaire afin de valider le modèle thermo-hydrrique.

4.1.1 Modèle d’hygro-expansion avec éléments libres

La première approche est de modéliser les sections de planches élément par élément. Ainsi le modèle d’hygro-expansion consiste à calculer la déformation d’un élément 2D qui représente la section d’une planche, sa hauteur est de 120 mm et sa largeur est de 35 mm. Le modèle est appelé par la suite modèle d’hydro-expansion avec éléments libres, abrégé HExp_EL.

Module A : assemblage rainuré en hêtre avec perte de teneur en eau

Les résultats des simulations pour le module A sont donnés dans le Tableau 4-2, les valeurs mesurées par les capteurs de déplacements lors de l’essai sont aussi données dans ce tableau. Les valeurs sont proches pour les planches n°2 à n°8, la différence étant de l’ordre de 0,05 mm, mais dans le cas des planches 1 et 9 la différence entre les mesures et le résultat des simulations est d’environ 0,39 mm. L’écart n’est donc observé que pour les deux planches situées sur les côtés de l’assemblage rainuré.

Tableau 4-2 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module A avec le modèle HExp_EL et déformations mesurées par les capteurs de déplacement (capteurs LMP).

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle HExp_EL (mm)	-2,89	-2,71	-3,08	-2,25	-2,49	-2,89	-2,71	-2,84	-2,98
Capteurs LMP (mm)	-3,26	-2,66	-3,02	-2,19	-2,50	-2,98	-2,69	-2,89	-3,39
Différence	-11,35 %	1,88 %	1,99 %	2,74 %	-0,40 %	-3,02 %	0,74 %	-1,73 %	-12,09 %

Les coefficients de retrait ont été modifié afin de connaître leur influence sur les résultats, soit $\pm 0,3\%$ pour les coefficients de retrait tangentiel et radial. Dans le cas des planches n°1 et 9 la modification du coefficient de retrait tangentiel fait varier les déformations de $\pm 0,06$ mm, dans le cas du coefficient de retrait radial les déformations varient de $\pm 0,02$ mm. La variabilité des propriétés du bois ne permet donc pas d’expliquer l’écart entre les mesures des capteurs de déplacements et les valeurs des simulations numériques. Cet écart peut provenir du fait que les calculs sont effectués à partir de champs de teneurs en eau uniformes, ce qui n’est pas le cas en réalité.

L’influence de la position de la moelle de l’arbre a aussi été étudiée. Seuls les résultats pour le module A sont présentés car dans le cas du module B les écarts entre les différentes simulations sont minimes (en dessous de 0,03 mm). Dans le cas du module A, la Figure 4-1 donne les valeurs mesurées par les capteurs de déplacements lors de l’essai, ainsi que les valeurs déterminées avec le modèle d’hydro-expansion avec le couple de coordonnées obtenu par la moyenne du couple de coordonnées d’une face de la planche et du couple de l’autre face. Sur la figure les barres d’écart-type représentent les valeurs obtenues en utilisant les couples de coordonnées de chaque face. Ainsi, il est possible de conclure que la position de la moelle de l’arbre à un impact plus ou moins important selon l’orientation des cernes de la planche, néanmoins les résultats obtenus avec le modèle d’hygro-expansion avec éléments libres sont satisfaisants et la valeur des coordonnées de la position de la moelle sont conservés.

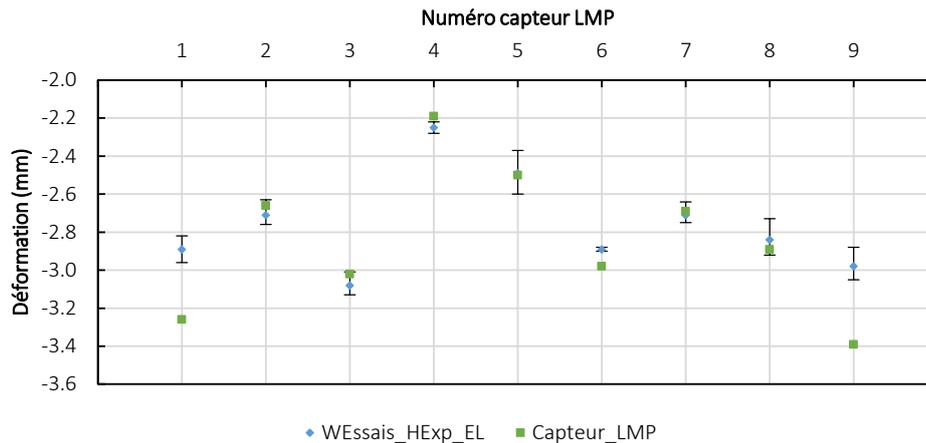


Figure 4-1 Déformations du module A : données mesurées par les capteurs de déplacement (capteur_LMP) et valeurs obtenues à partir des valeurs des teneurs en eau initiales et finales des planche avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments libres (WEssais_HExp_EL).

Module B : assemblage rainuré en hêtre avec gain de teneur en eau

Le Tableau 4-3 donne les valeurs des déformations obtenues avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments libres pour le module B ainsi que les mesures des capteurs de déplacement à la fin de l'essai. L'écart entre les valeurs est importante, elle est en moyenne de 0,77 mm, avec un maximum de 1,08 mm pour la planche numéro 4. Le modèle d'hygro-expansion utilisé n'est donc pas suffisant, le gonflement mesuré est plus faible que le gonflement obtenu avec le modèle.

Tableau 4-3 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module B

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle HExp_EL (mm)	2,28	1,88	2,18	2,14	1,81	1,68	1,69	2,16	2,08
Capteurs LMP (mm)	1,74	1,09	1,18	1,06	1,11	0,82	0,96	1,38	1,67
Différence	31,03 %	72,48 %	84,75 %	101,89 %	63,06 %	104,88 %	76,04 %	56,52 %	24,55 %

Pour conclure sur le modèle d'hygro-expansion avec éléments libres, ce modèle semble satisfaisant dans le cas du retrait du bois (avec une nuance pour les planches placées sur les côtés de l'assemblage) mais il est insuffisant dans le cas du gonflement du bois. Ainsi, un modèle plus complet prenant en compte les contraintes de l'assemblage est à développer.

4.1.2 Modèle d'hygro-expansion avec éléments joints

Le comportement des assemblages rainurés lors d'essais de cisaillement a été modélisé lors de la tâche 4.2 du projet `hardwood_joint`. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du code de calcul Cast3M en introduisant des éléments finis de type joint entre les lames de bois. Cette étude a permis de déterminer les raideurs d'interface de surface cisailée selon le type de rainures, longitudinales ou transversales, et le type d'essence, chêne, hêtre ou bouleau (voir rapport WP4-T4.2-RT-2022). Un nouveau modèle d'hygro-expansion a donc été développé avec des éléments de type joint dont les propriétés mécaniques ont été déterminées lors de l'étude évoquée précédemment, ce modèle est appelé modèle d'hygro-expansion avec élément joints, abrégé dans la suite du document HExp_JT.

Les planches de bois sont croisées perpendiculairement dans l'assemblage rainuré réalisé pour les essais. Il est donc nécessaire de calculer les déformations des sections des planches en deux temps comme le montre la Figure 4-2. Tout d'abord les calculs d'hygro-expansion sont réalisés sur un maillage, appelé maillage 1, où la section transversale des planches impaires est maillée et la section dans le sens du fil du bois des planches paires est maillée. Le maillage 2 correspond au complémentaire du premier maillage. Il est nécessaire de décomposer ainsi le calcul car les coefficients

de retrait dépendent de la direction du bois, ainsi les éléments bois orientés longitudinalement vont limiter les déformations des autres éléments bois grâce à la liaison par les éléments de type joint entre les éléments. Les maillages constitués d'éléments de type joint sont représentés par des droites noires sur la figure ci-dessous.

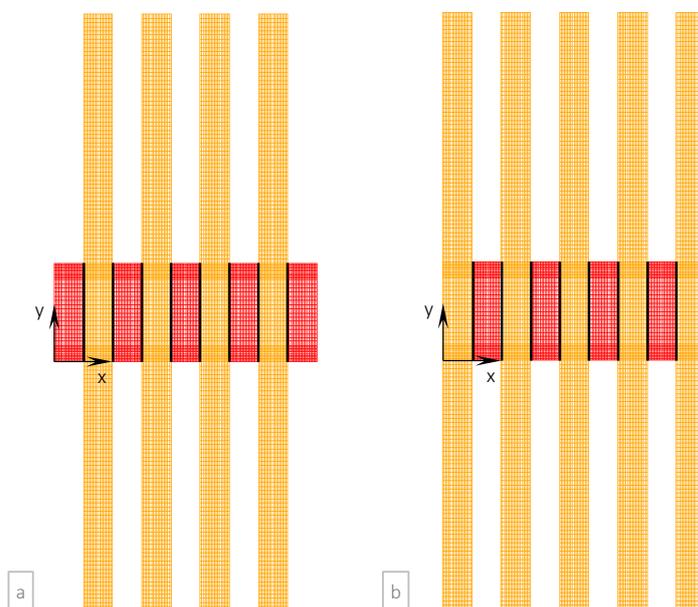


Figure 4-2 Maillages du modèle d'hygro-expansion avec éléments joints : (a) maillage 1, (b) maillage 2

Module A : assemblage rainuré en hêtre avec perte de teneur en eau

Le Tableau 4-4 donne les valeurs des déformations obtenues avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments joints pour le module A ainsi que les mesures des capteurs de déplacement à la fin de l'essai. Les valeurs avec le nouveau modèle d'hygro-expansion sont plus faibles que les valeurs obtenues avec le modèle d'hygro-expansion précédent. Néanmoins, la valeur de la raideur de cisaillement utilisée a été caractérisée pour des assemblages rainurés assemblés et testés avec une teneur en eau d'environ 12 %.

Une campagne d'essais de cisaillement d'assemblages rainurés avec variation de teneur en eau a été effectuée lors de la tâche 3.4 du projet hardwood_joint afin de prendre en compte l'influence de la prise ou de la perte de teneur en eau au cours du temps sur les propriétés mécaniques de l'assemblages. Il est donc possible de calculer une nouvelle raideur permettant de prendre en compte la perte de teneur en eau à partir de ces essais. Ainsi, la raideur de cisaillement, notée *KS*, est prise égale à $4,47 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ pour les essais sans variations de teneur en eau (essais à 12 %) et $2,00 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ avec une variation de teneur en eau de -6,90 %. Les calculs pour la deuxième valeur de la raideur de cisaillement sont donnés dans le Tableau 4-4 à la ligne appelée « Modèle HExp_JT (mm) avec *KS* modifiée selon ΔW ». Les valeurs obtenues se rapprochent de celles mesurées par les capteurs LMP mais sont plus faibles que celles obtenues avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments libres.

Tableau 4-4 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module A avec le modèle HExp_JT et déformations mesurées par les capteurs de déplacement (capteurs LMP).

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capteurs LMP (mm)	-3,26	-2,66	-3,02	-2,19	-2,50	-2,98	-2,69	-2,89	-3,39
Modèle HExp_JT (mm)	-2,62	-2,21	-2,49	-1,83	-2,04	-2,35	-2,19	-2,30	-2,71
Différence avec LMP	-19,59 %	-16,83 %	-17,47 %	-16,23 %	-18,56 %	-21,06 %	-18,66 %	-20,36 %	-20,20 %
Modèle HExp_JT (mm) avec <i>KS</i> modifiée selon ΔW	-2,73	-2,43	-2,75	-2,02	-2,24	-2,59	-2,41	-2,53	-2,82
Différence avec LMP	-16,11 %	-8,48 %	-9,06 %	-7,84 %	-10,25 %	-13,09 %	-10,26 %	-12,33 %	-16,91 %

Il est possible d'expliquer cette différence par la création d'un jeu entre les planches de bois. Ce jeu n'est pas pris en compte dans le modèle d'hygro-expansion avec éléments joints. Afin de pouvoir calculer les déformations en fonction du temps, il est nécessaire de prendre en compte l'influence du jeu. Ainsi, la raideur de cisaillement des éléments de type joint a été modifiée jusqu'à ce que les valeurs obtenues avec le modèle d'hygro-expansion soient semblables à celles mesurées par les capteurs. La raideur a été multipliée par 0,1 et les valeurs de déformations obtenues sont données dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module A avec le modèle HExp_JT dont la raideur de cisaillement est ajustée.

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capteurs LMP (mm)	-3,26	-2,66	-3,02	-2,19	-2,50	-2,98	-2,69	-2,89	-3,39
Modèle HExp_JT (mm) avec KS ajustée	-2,87	-2,68	-3,03	-2,22	-2,47	-2,85	-2,66	-2,79	-2,95
Différence avec LMP	-12,05 %	0,83 %	0,26 %	1,51 %	-1,02 %	-4,25 %	-0,99 %	-3,39 %	-13,06 %

Les déformations estimées avec le modèle des planches situées contre le pare-pluie sont plus faibles que celles mesurées par les capteurs de déplacement. Comme précédemment cet écart provient peut-être du fait que les calculs de déformation sont effectués à partir de champs en teneur en eau uniforme.

Module B : assemblage rainuré en hêtre avec gain de teneur en eau

Le Tableau 4-6 donne les valeurs des déformations obtenues avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments joints pour le module B ainsi que les mesures des capteurs de déplacement à la fin de l'essai. Comme avec le module précédent, un calcul est effectué avec la raideur de cisaillement des essais réalisés à 12 % en teneur en eau, puis avec cette résistance modifiée selon la teneur en eau, soit $6,42 \times 10^9 \text{ N/m}^3$. Les valeurs avec le modèle d'hygro-expansion avec éléments joints dont la raideur de cisaillement dépend de ΔW sont plus proches des valeurs des capteurs LMP que celles obtenues avec le modèle d'hygro-expansion précédent. Néanmoins, l'écart est encore important, en moyenne de 0,20 mm contre 0,77 mm avec le modèle précédent.

Tableau 4-6 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module B avec le modèle HExp_JT et déformations mesurées par les capteurs de déplacement (capteurs LMP).

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capteurs LMP (mm)	1,74	1,09	1,18	1,06	1,11	0,82	0,96	1,38	1,67
Modèle HExp_JT (mm)	1,87	1,33	1,59	1,58	1,31	1,23	1,23	1,59	1,72
Différence avec LMP	7,35 %	21,99 %	34,43 %	49,45 %	18,33 %	50,10 %	27,72 %	15,17 %	2,70 %
Modèle HExp_JT (mm) avec KS modifiée selon ΔW	1,83	1,26	1,50	1,50	1,24	1,16	1,16	1,50	1,68
Différence avec LMP	5,01 %	15,37 %	26,96 %	41,08 %	11,82 %	41,71 %	20,59 %	8,88 %	0,42 %

La raideur de cisaillement a été calculée à partir d'une relation linéaire obtenue après l'analyse d'essais de cisaillement avec variations de teneur en eau. Or, le gain de teneur en eau des assemblages rainurés était en moyenne de 2,0 % et il est en moyenne de 5,2 % pour les planches du module B. La valeur est peut-être sous-estimée, et d'autres phénomènes ont peut-être lieu comme la compression du bois qui limiterait la déformation de la planche. Ainsi, il est donc proposé d'ajuster la valeur de KS en la multipliant par 3, la valeur est finalement de $1,93 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ dans le cas du module B. Les valeurs de déformations obtenues avec le modèle sont données dans le Tableau 4-7.

Tableau 4-7 Déformations calculées à partir des teneurs en eau initiales et finales des planches de hêtre du module B avec le modèle HExp_JT dont la raideur de cisaillement est ajustée.

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capteurs LMP (mm)	1,74	1,09	1,18	1,06	1,11	0,82	0,96	1,38	1,67
Modèle HExp_JT (mm) avec KS ajustée	1,71	1,04	1,23	1,23	1,02	0,96	0,95	1,24	1,57
Différence avec LMP	-1,68 %	-4,41 %	4,48 %	15,92 %	-7,67 %	16,58 %	-0,75 %	-9,86 %	-6,07 %

Le modèle d'hygro-expansion avec éléments joint semble donc suffisant pour modéliser le retrait et le gonflement des assemblages rainurés des modules d'essai. Néanmoins, ce modèle nécessitera certainement d'autres ajustements, en effet, les champs de teneurs en eau du modèle thermo-hydrique ne seront pas des champs uniformes et les variations de teneur en eau ne sont pas linéaires dans le temps.

4.2 Paramètres matériaux du modèle thermo-hydrique

Seul les propriétés physiques du bois de hêtre définies dans le modèle sont données dans la suite de cette section. Les propriétés de l'isolant en fibre de bois et du pare-pluie sont données dans la section 5.1.2 page 66.

Dans ses travaux de thèse Varnier [6] a développé un modèle thermo-hydrique d'une poutre en hêtre soumise à des conditions climatiques. Les propriétés du bois de hêtre déterminées par expérimentation dans ces travaux ont été reprises pour cette étude.

4.2.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique du bois dépend de la densité du bois, de la direction considérée (radiale, tangentielle ou longitudinale) ainsi que de la teneur en eau du bois [15]. Sonderegger [16] a réalisé des essais pour déterminer la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du bois de hêtre ainsi qu'en fonction de la direction considérée. Il a été choisi de considérer le bois comme un matériau isotrope transverse pour ce modèle. Ainsi, la loi pour la conductivité thermique dans la direction transversale est prise comme étant la moyenne des lois dans les directions radiale et transversale. À partir des données de Sonderegger [16] pour une température égale à 20 °C on obtient la relation suivante :

$$\lambda = 0,214 \cdot u + 0,106 \quad (4-1)$$

avec

λ la conductivité thermique du matériau [W/(m K)] ;
 u La teneur en eau massique, u [kg/kg, %].

L'influence de la température étant faible par rapport à l'influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique [16] elle n'est pas prise en compte.

4.2.2 Équilibre hygroscopique du hêtre

Il existe de nombreux modèles permettant de déterminer l'équilibre hygroscopique du matériau en bois en fonction de l'humidité relative de l'air. Le modèle retenu a été proposé par Merakeb [17], basé sur l'équilibre thermodynamique de l'équilibre des différentes phases de l'eau, il permet de décrire les phénomènes d'adsorption et de désorption. Merakeb propose une équation reliant la teneur en eau u et l'humidité relative ϕ :

$$u = u_s \cdot \exp(\varphi_{a/d} \cdot \ln(\phi) \exp(\alpha_{a/d} \cdot \phi)) \quad (4-2)$$

avec

- u_s la teneur en eau de saturation à 100 % d'humidité relative [kg/kg, %] ;
 $\varphi_{a/d}$ un paramètre thermodynamique différent selon le cycle de sorption [-] ;
 $\alpha_{a/d}$ une constante de calage différente selon le cycle de sorption [-].

La teneur en eau à saturation à 100 % d'humidité relative est calculée selon l'équation suivante :

$$u_s = \left(u_s^0 + \frac{C_{p,0}}{C_e} \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_e}{L} \cdot T \right) - \frac{C_{anh}}{C_e} \quad (4-3)$$

avec

- u_s^0 la teneur en eau à saturation à 0 °C [kg/kg, %] ;
 $C_{p,0}$ la capacité thermique massique du matériau anhydre [J/(kg K)] ;
 C_e la capacité thermique massique de l'eau [J/(kg K)] ;
 L la chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg] ;
 T la température [°C].

Les courbes d'adsorption et de désorption obtenues avec l'équation (4-2) et les valeurs des paramètres donnés dans le Tableau 4-8 sont nommées courbes enveloppe, elles sont représentées en trait épais sur la Figure 4-3. Ces courbes représentent les équilibres hygroscopiques obtenus pour des variations monotones de 0 à 100 % ou de 100 à 0 % d'humidité relative pour l'adsorption et la désorption respectivement.

Or, l'histoire hydrique des matériaux poreux ne suivent pas strictement ces deux courbes, cette histoire est la suite de variations de teneur eau et se situe donc entre les deux courbes enveloppe. Des modèles ont été développés pour prendre en compte l'équilibre hygroscopiques initial du matériau ainsi que les variations d'humidité relatives de son environnement. Ainsi, grâce à des isothermes dites partielles, il est possible de prédire l'évolution de la teneur en eau d'un matériau à partir d'un point quelconque à l'intérieur du cycle.

Tableau 4-8 Valeurs des paramètres des équations(4-2), (4-4), (4-5) pour les bois de feuillus d'après [17] et [6]

φ_a	φ_d	α_a	α_d	A	D	B
0,849	0,852	1,647	1,088	0,40	0,06	1,50

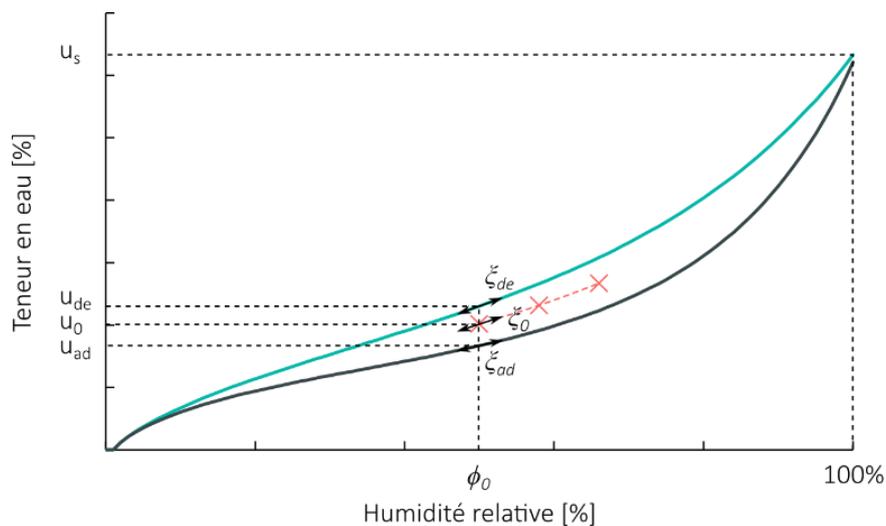


Figure 4-3 Isothermes enveloppes (température à 20 °C) pour le hêtre et construction d'une isotherme partielle

La Figure 4-3 représente la construction d'une courbe isotherme partielle d'après les travaux de Pedersen [18] : le point initial est défini par son humidité relative, notée ϕ_0 , et sa teneur en eau, notée u_0 . Un coefficient directeur local de l'isotherme partielle, noté ξ_0 , est calculé au moyen d'une interpolation entre les capacités hydriques des courbes isothermes enveloppe pour l'humidité relative ϕ_0 . Ce coefficient est aussi appelé capacité hydrique, son expression dépend du sens de l'évolution de l'humidité relative, lors de l'adsorption il est noté ξ_{ad} et lors de la désorption ξ_{de} , les deux capacités s'expriment selon les équations suivantes :

$$\xi_{0,de} = \left(\frac{(u_0 - u_{ad})^B \cdot \xi_{de} + D \cdot (u_{de} - u_0)^B \cdot \xi_{de}}{(u_{de} - u_{ad})^B} \right) \quad (4-4)$$

$$\xi_{0,ad} = \left(\frac{A \cdot (u_0 - u_{ad})^B \cdot \xi_{de} + (u_{de} - u_0)^B \cdot \xi_{ad}}{(u_{de} - u_{ad})^B} \right) \quad (4-5)$$

avec

- $\xi_{0,de}$ la capacité hydrique au point de teneur en eau u_0 , cas pour la désorption [-] ;
- $\xi_{0,ad}$ la capacité hydrique au point de teneur en eau u_0 , cas pour l'adsorption [-] ;
- ξ_{de} la capacité hydrique de la courbe enveloppe de désorption [-] ;
- ξ_{ad} la capacité hydrique de la courbe enveloppe d'adsorption [-] ;
- u_0 la teneur en eau initiale [kg/kg, %] ;
- u_{ad} la teneur en eau pour une humidité relative ϕ_0 sur la courbe enveloppe d'adsorption [kg/kg, %] ;
- u_{de} la teneur en eau pour une humidité relative ϕ_0 sur la courbe enveloppe de désorption [kg/kg, %] ;
- A, D, B des constantes définies à partir de données expérimentales [-].

L'équation suivante permet de calculer au temps i la teneur en eau du matériau, notée u_i , selon sa teneur en eau et son humidité relative précédente, notées respectivement u_{i-1} et ϕ_{i-1} , ainsi que l'humidité relative au temps i , notée ϕ_i :

$$u_i = \xi_i \cdot (\phi_i - \phi_{i-1}) + u_{i-1} \quad (4-6)$$

La teneur en eau initiale de chaque planche et des panneaux d'isolant en fibres de bois ont été déterminés avant le montage des modules. La teneur en eau de ces matériaux était à l'équilibre, en effet ils ont été stockés durant une longue période dans un environnement stable donc la température et l'humidité sont connues. Ces deux dernières grandeurs sont nécessaires pour initier le calcul.

4.2.3 Perméabilité

La perméabilité est prise comme dépendante de la teneur en eau du matériau et de sa température. Les équations nécessaires à son calcul sont données ci-dessous ainsi que les valeurs des différents coefficients (voir Tableau 4-9), pour plus de détails voir [6].

$$\delta^* = \delta_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot M_{ve} \cdot T}\right) \quad (4-7)$$

avec

- δ^* la perméabilité apparente [kg/(s m Pa)] ;
- δ_0 un paramètre de calcul homogène à une perméabilité [kg/(s m Pa)] ;
- E_a l'énergie d'activation [J/kg] ;

- R la constante des gaz parfait soit 8,314 J/(mol K) ;
 M_{ve} la masse molaire de la vapeur d'eau soit 0,018015 kg/mol ;
 T la température [K].

$$E_a = H_s - (C_{ve} \cdot T) \quad (4-8)$$

avec

- H_s la chaleur de sorption [J/kg] ;
 C_{ve} la capacité thermique massique vapeur d'eau soit 2010 J/(kg K) ;
 T la température [K].

$$H_s = L + \Delta H_s \quad (4-9)$$

avec

- ΔH_s Différence d'enthalpie de vaporisation de l'eau liée et de l'eau libre [J/kg] ;
 L la chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg], qui dépend de la température (exprimée en °C) selon l'équation $L = 2501 - 2,4456 \cdot T$;

$$\Delta H_s = A_{ad/de} \cdot \ln\left(\frac{u}{u_s}\right) \quad (4-10)$$

avec

- $A_{ad/de}$ des paramètre de calcul de ΔH_s en adsorption et désorption [J/kg] ;
 u la teneur en eau [kg/kg, %] ;
 u_s la teneur en eau de saturation à 100 % d'humidité relative [kg/kg, %].

Tableau 4-9 Coefficients pour le calcul de la perméabilité

	δ_0	A_{ad}	A_{de}
Direction longitudinale	$35,28 \times 10^{-4}$	1,70	1,89
Direction radiale	$31,64 \times 10^{-5}$	2,17	2,43

4.2.4 Masse volumique

La masse volumique utilisée par le modèle est la masse volumique anhydre : ρ_s [kg/m³]. Elle est définie comme étant la masse d'1 m³ de matériau anhydre. La masse anhydre du matériau est obtenue expérimentalement par la méthode de dessiccation, un échantillon est séché en étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de sa masse [5].

Dans le modèle numérique, une valeur moyenne est donnée pour les panneaux d'isolation en fibre de bois. Dans le cas des planches en hêtre ou en LVL de hêtre, la masse volumique de chaque planche a été caractérisée. Néanmoins, des simulations ont été réalisées avec une valeur moyenne pour l'ensemble de planche d'un module et elles ont été comparées avec des simulations où la masse volumique anhydre est propre à chaque planche. La différence entre les résultats était quasi nulle, il est donc possible de simplifier le code de calcul en utilisant une moyenne pour l'ensemble des planches. Les valeurs utilisées pour les différentes simulations sont données dans le Tableau 4-10.

Tableau 4-10 Masses volumiques anhydres du matériau bois

	Module A (hêtre)	Module B (hêtre)	Module C (LVL de hêtre)
ρ_s [kg/m ³]	627,3	615,8	727,9
Coefficient de variation	2,3 %	5,9 %	1,3 %

*Valeur de la masse volumique moyenne donnée par le fabricant : 800 kg/m³, soit une masse volumique anhydre de 714 kg/m³ avec une teneur en eau de 12 %

4.3 Modélisation hygrothermique

Les simulations présentées dans la suite de cette section ont un pas de temps de 1 h, les conditions environnementales sont les températures et les humidités relatives mesurées lors des essais par les capteurs SHT placés à 10 cm des modules. Ces données environnementales sont moyennées sur 24 h. Toutes les modélisations de cette section prennent en compte le pare-pluie pour chaque face des modules, son épaisseur est de 0,45 mm et son maillage est composé de deux éléments sur son épaisseur. Les maillages des éléments représentant les plis de la paroi ont une épaisseur de 35 mm et leur maillage est le maillage M1 de la Figure 2-11 page 30. En effet, des calculs ont été effectués avec la maillage M2 de la même figure et leurs résultats sont égaux à ceux effectués avec la maillage M1.

4.3.1 Modélisation hygrothermique 1D

Les simulations suivantes sont des simulations 1D qui correspondent à une zone bois-bois. Les figures suivantes, Figure 4-4 et Figure 4-5, présentent les données mesurées par les capteurs LMP pour les différents modules, ainsi que les résultats des simulations numériques. La comparaison entre les mesures et les simulations montrent que la modélisation 1D n'est pas suffisante pour modéliser les variations dimensionnelles ayant lieu dans les assemblages. En effet, les déformations issues des simulations numériques sont beaucoup plus faibles que celles mesurées par les capteurs. De même, la différence entre les teneurs en eau finales issue du modèle thermo hydrique 1D et celles déterminées expérimentalement est élevée, voir Tableau 4-11 et Tableau 4-12. Pour les deux modules, cette différence est plus grande pour les planches situées à l'intérieur de l'assemblage rainuré, du numéro 2 au numéro 8. Ainsi, des simulations incluant l'effet 3D sont nécessaires pour prendre en compte les transferts hydriques latéraux. Permettant d'apporter une source d'humidité supplémentaire.

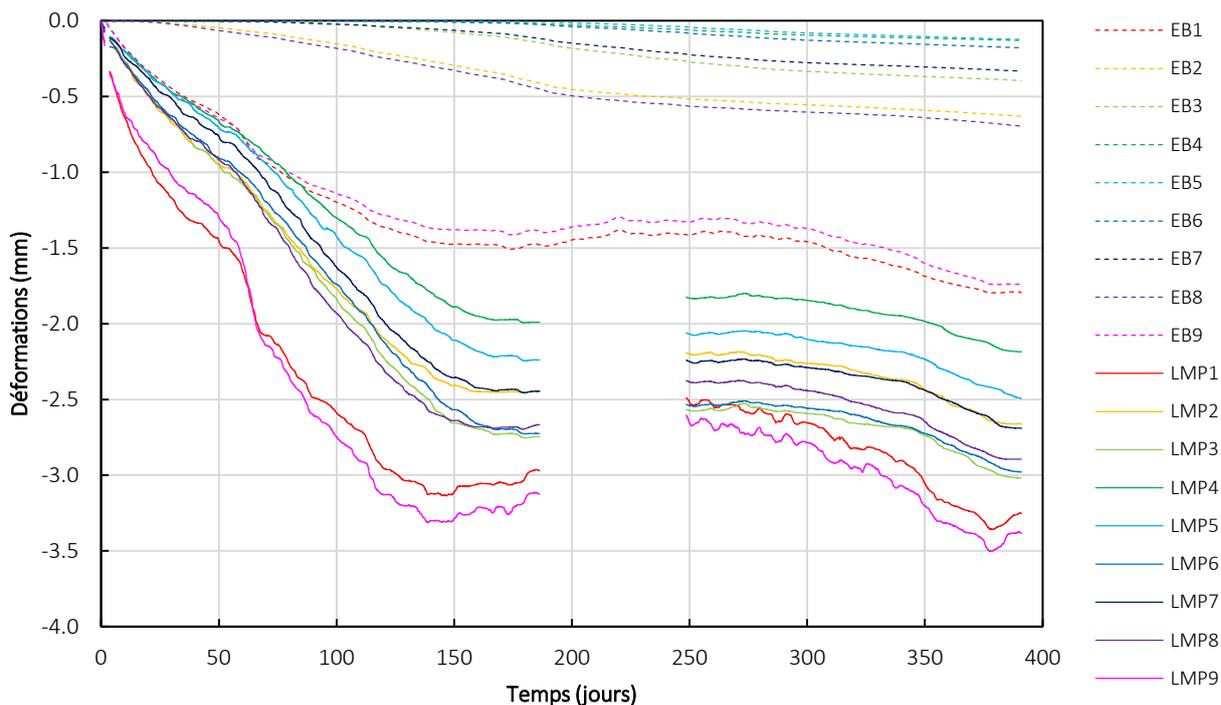


Figure 4-4 Retrait (mm) des planches pour le module A en fonction du temps (jours). Mesures avec les capteurs de déplacement courbes LMP1 à LMP9 et valeurs des simulations numériques avec le modèle 1D courbes EB1 à EB9 (EB pour élément bois).

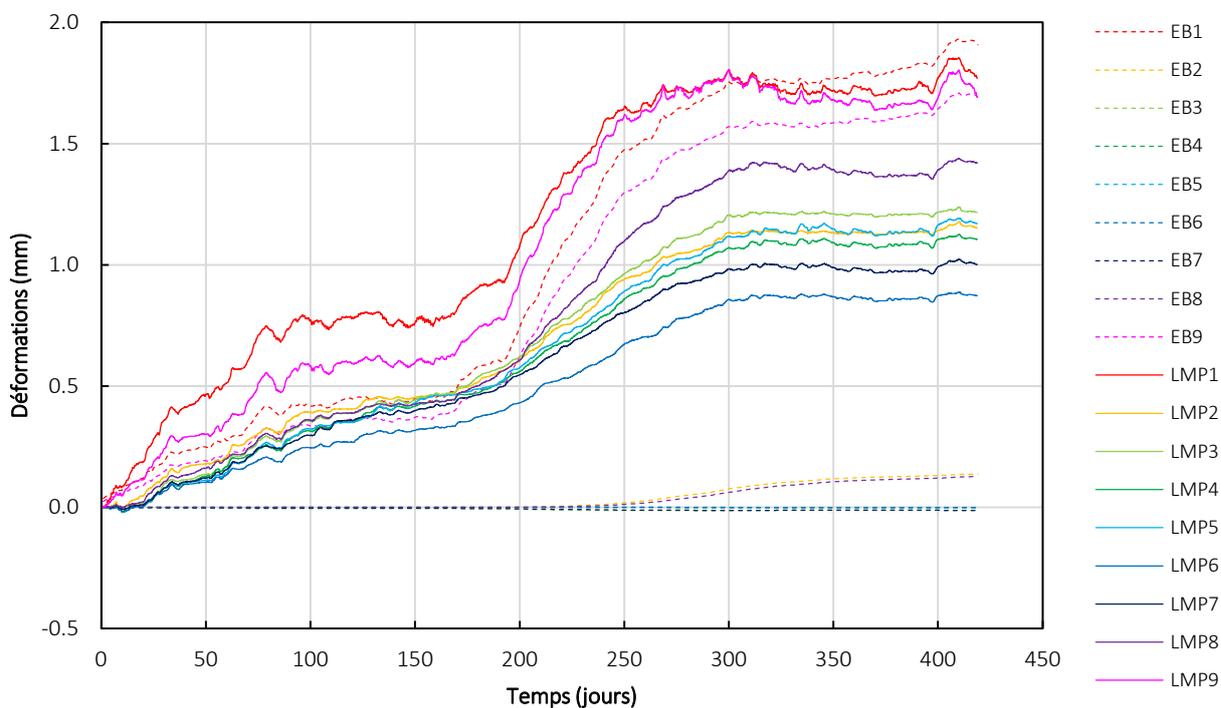


Figure 4-5 Gonflement (mm) des planches pour le module B en fonction du temps (jours). Mesures avec les capteurs de déplacement courbes LMP1 à LMP9 et valeurs des simulations numériques avec le modèle 1D courbes EB1 à EB9.

Tableau 4-11 Teneurs en eau finales des planches de hêtre du module A : données expérimentales et valeurs obtenues avec le modèle 1D

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_f expérimental (%)	9,8	10,1	10,0	10,2	10,4	10,2	10,4	10,1	9,9
W_f modèle 1D (%)	12,7	15,3	16,4	16,2	16,7	16,5	16,1	15,4	12,6
Différence	2,9	5,2	6,4	6,0	6,3	6,3	5,8	5,3	2,7

Tableau 4-12 Teneurs en eau finales des planches de hêtre du module B : données expérimentales et valeurs obtenues avec le modèle 1D

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_f expérimental (%)	13,8	13,3	14,7	14,4	14,1	14,4	14,7	13,6	13,8
W_f modèle 1D (%)	13,5	9,1	9,6	9,3	9,4	9,5	9,3	8,8	13,4
Différence	-0,3	-4,2	-5,1	-5,1	-4,7	-4,9	-5,4	-4,8	-0,4

4.3.2 Modélisation hygrothermique 2.5D

La géométrie de l'assemblage rainuré est complexe à prendre en compte pour des calculs de transferts hydriques et thermiques. En effet, comme l'a montré la section 2.3.3 page 29, nous pouvons distinguer 4 zones au sein de l'assemblage rainurés. Les propriétés de diffusion thermiques et hydriques des différentes couches composant les zones ne sont pas les mêmes : uniquement du bois, uniquement de l'isolant, une alternance d'isolant et bois. Ainsi, le flux d'humidité n'est pas le même pour chaque zone de l'assemblage.

Comme l'a montré la section précédente, la modélisation 1D de la zone bois-bois n'est pas suffisante car la teneur en eau des planches situées à l'intérieur de l'assemblage n'augmente ou ne diminue pas suffisamment. Afin d'apporter des transferts d'humidité supplémentaires à ces planches un modèle thermo-hydrique couplant des simulations 1D et 2D a été développé.

La Figure 4-6 présente le logigramme du modèle thermo hydrique 2.5D, la logique est d'utiliser le modèle thermo hydrique pour deux types de simulations. Tout d'abord des simulations 1D de la zone isolant-isolant sont réalisées afin d'obtenir les profils de température et d'humidité relative de cette zone. Les éléments d'isolant ont une largeur de 35 mm.

Ensuite, des simulations 2D de la zone bois-bois sont effectuées avec comme conditions limites supplémentaires les profils de température et d'humidité relative obtenues précédemment. Le maillage 2D de la zone bois-bois est constitué de 9 éléments bois de 35 m de large et de 120 mm de haut. Les sources de chaleur de d'humidité supplémentaires sont appliquées sur les droites supérieures et inférieures des éléments bois. L'ajout de ces conditions limites apporte une source supplémentaire d'humidité mais elle reste insuffisante. Ainsi, un paramètre noté $d_{2.5D}$ est définie afin de créer une source d'humidité entre les éléments bois. Ce paramètre correspond à une longueur entre les éléments bois où les sources évoquées précédemment sont appliquées. Ce paramètre doit donc être ajuster afin d'obtenir un comportement hydrique de l'assemblage rainuré modélisé semblable à celui des différents essais.

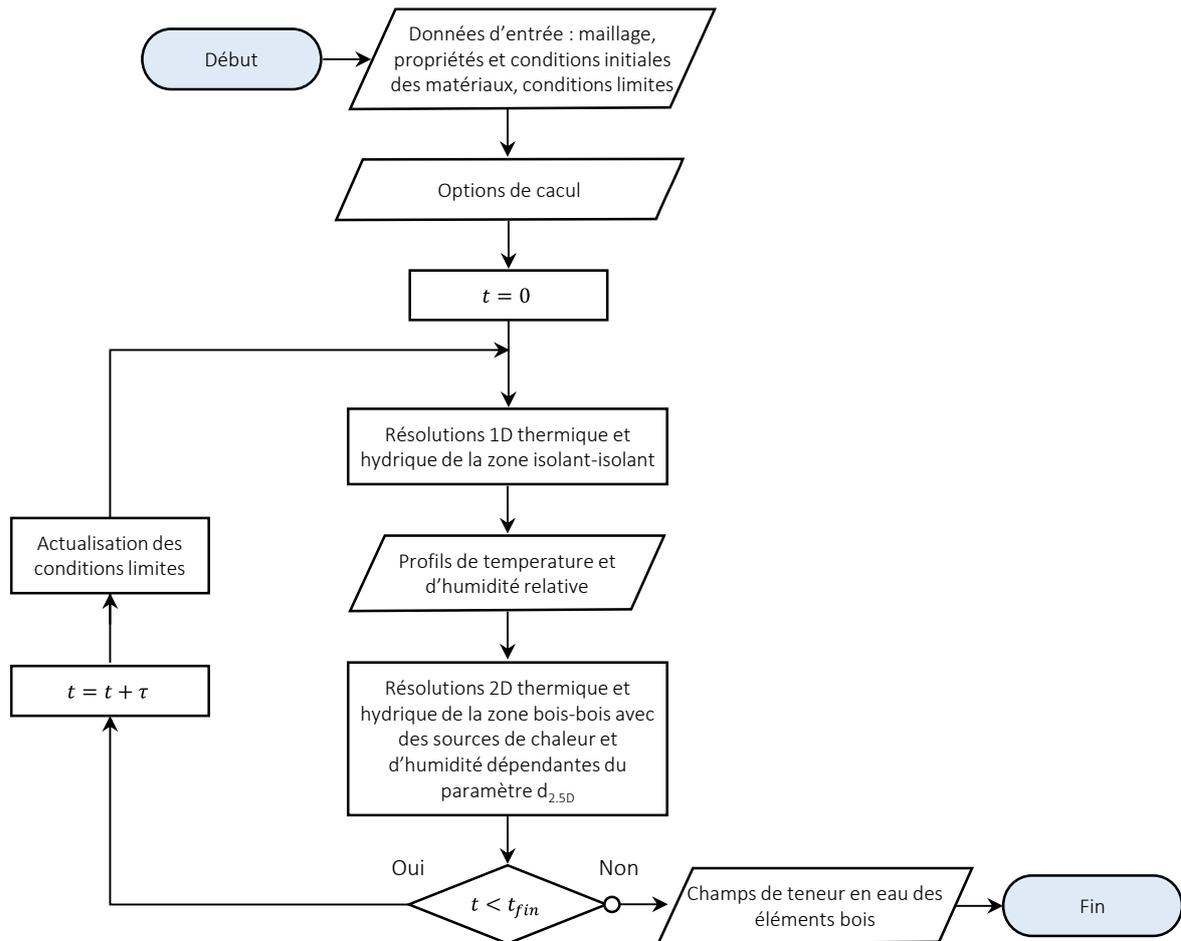


Figure 4-6 Logigramme du modèle thermo-hydrrique 2.5D

Module A : assemblage rainuré en hêtre avec perte de teneur en eau

Le Tableau 4-13 donnent les valeurs des teneurs en eau finales du module A déterminées expérimentalement et celles issues du modèle thermo hydrique 2.5D. Les données concordent en ajustant le paramètre $d_{2.5D}$ qui est pris égale à 35 mm.

Tableau 4-13 Teneurs en eau finales des planches de hêtre du module A : données expérimentales et valeurs obtenues avec le modèle 2.5D

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_f expérimental (%)	9,8	10,1	10,0	10,2	10,4	10,2	10,4	10,1	9,9
W_f modèle 2.5D (%)	9,7	10,2	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,1	9,6
Différence	-0,1	0,1	0,3	0,1	-0,1	0,1	-0,2	0,0	-0,3

La Figure 4-7 présente les données mesurées par les capteurs LMP pour le module A, ainsi que les résultats des simulations numériques avec les modèle thermo-hydrrique 2.5D. La raideur KS du joint entre les éléments bois est variable selon la différence de teneur en eau au moment du calcul et de la teneur en eau initiale. Les données expérimentales et simulées sont proches, l'allure des courbes est similaire pour chaque élément bois mais des différences sont visibles. Ainsi, les déformations pour les deux élément bois extérieurs (soit n°1 at n°9) sont surestimées par le modèle. Une explication possible est que le coefficient $d_{2.5D}$ est le même entre tous les éléments bois, or la teneur en eau diminue plus rapidement pour les éléments bois n°1 et n°9 et un jeu peut apparaître entre les éléments modifiant ainsi les propriétés de diffusion entre les éléments bois. Cette différence entres les déformations peut aussi provenir de modèle d'hygro-

expansion, la valeur de la raideur du joint ayant été ajustée. Néanmoins, étant donné que le modèle surestime légèrement les déformations ne pas corriger cet écart n’impact pas négativement les résultats présentés à la fin de cette étude.

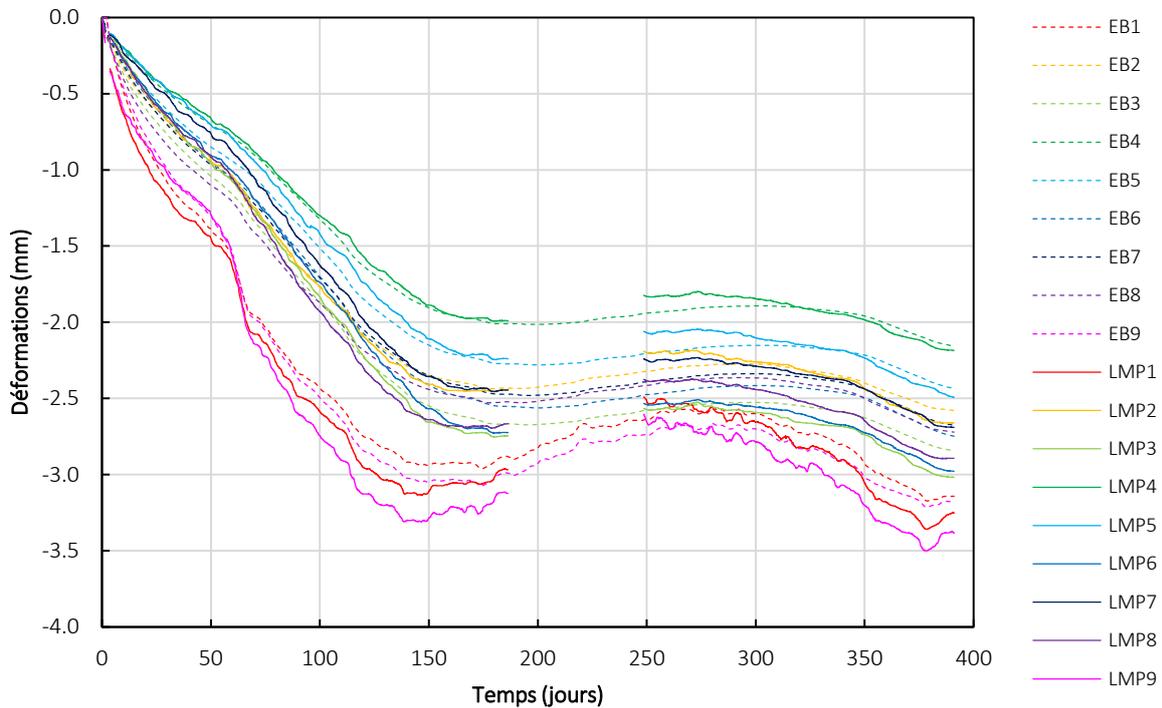


Figure 4-7 Retrait (mm) des planches pour le module A en fonction du temps (jours). Mesures avec les capteurs de déplacement courbes LMP1 à LMP9 et valeurs des simulations numériques avec le modèle 2.5D courbes EB1 à EB9 (traits pointillés).

Module B : assemblage rainuré en hêtre avec gain de teneur en eau

Le Tableau 4-14 donnent les valeurs des teneurs en eau finales du module B déterminées expérimentalement et celles issues du modèle thermo hydrique 2.5D. Le paramètre $d_{2.5D}$ qui est pris égale à 30 mm. Les données concordent pour les planches intérieures, de la planche n°3 à la planche n°7, la teneur en eau pour les autres planches est surestimée. Plusieurs phénomènes peuvent être la cause de cet écart.

Tableau 4-14 Teneurs en eau finales des planches de hêtre du module B : données expérimentales et valeurs obtenues avec le modèle 2.5D

Numéro de la planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W_f expérimental (%)	13,8	13,3	14,7	14,4	14,1	14,4	14,7	13,6	13,8
W_f modèle 2.5D (%)	16,3	14,7	14,8	14,5	14,6	14,6	14,6	14,5	16,1
Différence	2,5	1,4	0,1	0,1	0,5	0,2	-0,1	0,9	2,3

Les propriétés de diffusion dépendent de la température et de la teneur en eau du matériau mais il est possible que les contraintes de compression de l’assemblage influencent aussi cette propriété. La Figure 4-8 présente les données mesurées par les capteurs LMP pour le module B ainsi que les résultats des simulations numériques avec le modèle thermo hydrique 2.5D. Cette figure montre que l’écart entre les données expérimentales et simulées numériquement apparaît après 170 jours pour les planches n°1 et n°9, et après 200 jours pour les autres planches. Ces périodes correspondent à une prise en teneur en eau des planches comme le montre la Figure 4-9, les contraintes de compression sont donc plus élevées dans l’assemblage à partir de ces périodes qu’à l’état initiale. Néanmoins, il est difficile de prendre en compte ce phénomène dans le modèle de diffusion. De plus, il n’est pas possible d’écarter une dérive du modèle de diffusion. Des essais supplémentaires seraient nécessaires afin d’obtenir des résultats plus précis.

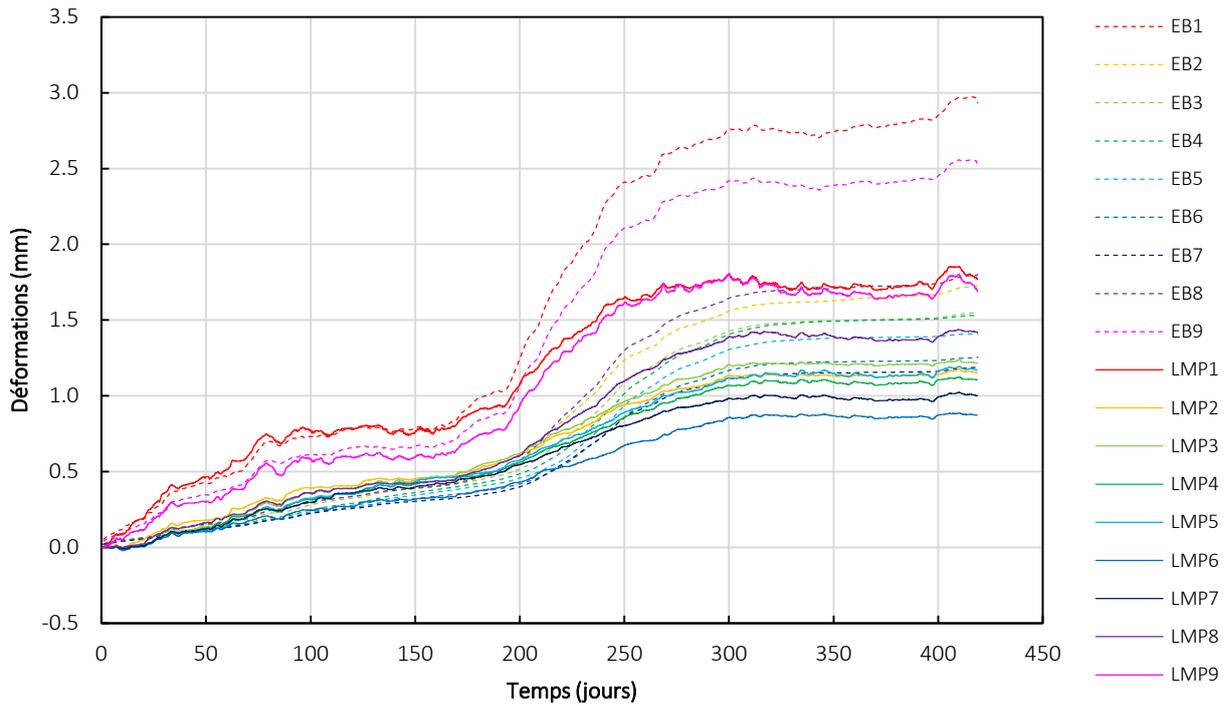


Figure 4-8 Gonflement (mm) des planches pour le module B en fonction du temps (jours). Mesures avec les capteurs de déplacement courbes LMP1 à LMP9 et valeurs des simulations numériques avec le modèle 2.5D courbes EB1 à EB9 (traits pointillés).

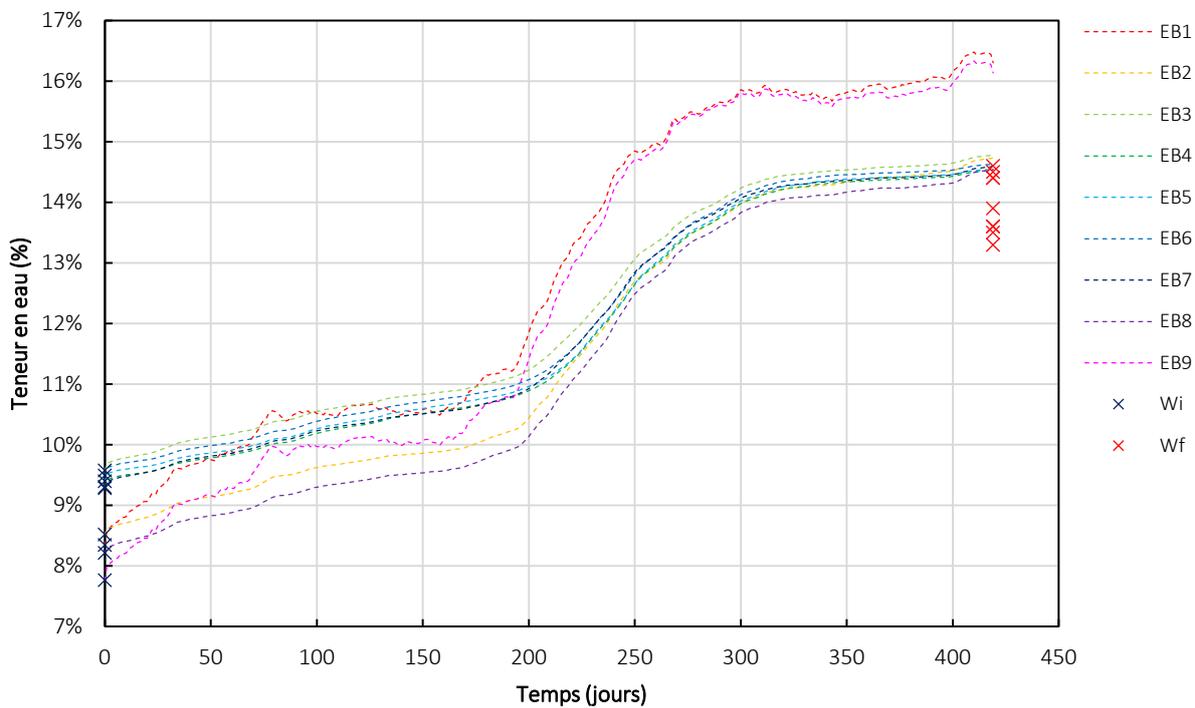


Figure 4-9 Teneur en eau (%) des planches pour le module B en fonction du temps (jours). Les mesures expérimentales au début (Wi) et à la fin (Wf) de l'essai sont représentés par des croix bleues et rouges respectivement. Les valeurs des simulations numériques avec le modèle 2.5D sont représentées par les courbes EB1 à EB9 (traits pointillés).

Conclusion

Le paramètre $d_{2,5D}$ permet de prendre en compte le rôle de l'isolant pour la diffusion du flux d'humidité. Ce module est différent pour le module A et le module B. Une explication possible est que cette différence provient de la déformation de l'assemblage. En effet, dans le cas du module A le processus impliqué est la désorption du bois et il a donc été observé un retrait du bois. Dans ce cas, un jeu s'est créé entre les lames et modifie donc la diffusion entre les éléments bois. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle thermo-hydrique. D'un autre côté, dans le cas du module B, le processus impliqué est l'adsorption et il a donc été observé un gonflement du bois. Dans ce cas, et comme cela a été expliqué précédemment, la compression locale du bois peut modifier la diffusion de l'humidité au sein du matériau. Ce phénomène non plus n'est pas pris en compte dans le modèle thermo-hydrique. Ainsi dans les deux cas c'est le paramètre $d_{2,5D}$ qui permet de prendre en compte ces différents processus, ce qui explique une différence de valeur selon le processus étudié.

Le modèle thermo-hydrique développé semble satisfaisant et peut être utilisé pour la suite de cette étude. La teneur en eau des planches extérieures sont surestimées mais cela place les résultats du côté de la sécurité. Ce modèle ainsi que les essais effectués ont permis une meilleure compréhension du comportement mécanique de l'assemblage lors de la variation de la teneur en eau des planches. Néanmoins, afin d'obtenir un modèle thermo-hydrique plus précis, des essais supplémentaires sont nécessaires. En effet, le fait d'avoir mesuré les déformations des planches au lieu de la teneur en eau du matériau ne permet pas d'ajuster précisément le modèle thermo-hydrique car il a fallu aussi ajuster le modèle d'hygro-expansion.

Afin d'ajuster précisément le modèle thermo-hydrique et le modèle d'hygro-expansion après la fin de cette étude, des essais sur des assemblages de trois éléments pourraient être réalisés dans une enceinte climatique. Le même système d'acquisition pourrait être utilisé, ainsi les déformations pourraient être mesurés durant les essais. Le principe de ces essais serait d'augmenter ou de baisser l'humidité relative de l'enceinte climatique par palier. Le changement de palier ne serait effectué que lorsque la masse des éprouvettes serait stable, la teneur en eau serait donc à l'équilibre.

5 Application du modèle thermo-hydrrique à l'échelle d'une paroi multicouche à connexion rainurée

5.1 Conditions limites et données matériaux

5.1.1 Composition de la paroi et modélisation

La paroi étudiée a été présentée succinctement lors de l'introduction et est présentée en détails sur la Figure 5-1. L'élément central du mur est composé de 9 plis de lames croisées et rainurées de 37 mm d'épaisseur en hêtre, les espaces libres sont remplis par des panneaux d'isolant en fibre de bois de 30 mm d'épaisseur. Le côté extérieur du mur est composé d'un bardage en bois et d'une lame d'air ventilée. Le côté intérieur de mur est composé d'un vide technique (lame d'air non ventilée) et d'une plaque de plâtre. Une pare-pluie et un pare-vapeur sont aussi ajoutés comme indiqué sur le schéma b de la Figure 5-1.

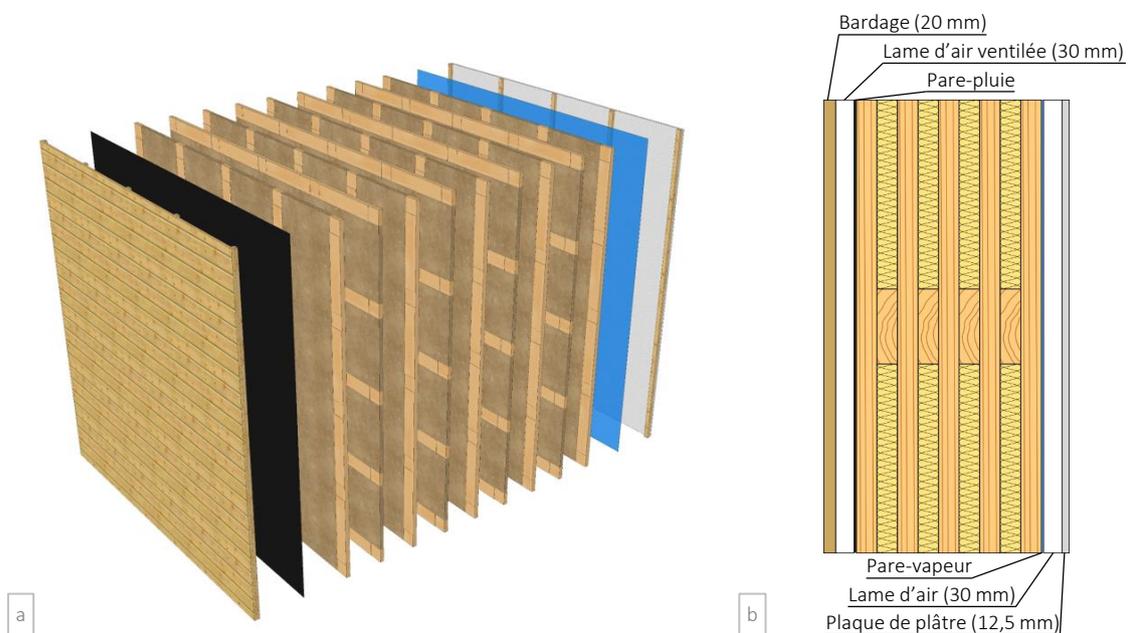


Figure 5-1 Composition du mur étudié utilisant l'assemblage rainuré :a) vue des différentes couches constituant le mur, b) Représentation schématique d'un assemblage au sein de ce mur à 9 plis.

Pour la modélisation le bardage et la lame d'air ne sont pas pris en compte, en effet on considère que la lame d'air est suffisamment ventilée pour que la température et l'humidité relative de la lame d'air soient égales à celles de l'extérieur. La pluie n'est donc pas prise en compte. De même, Le rayonnement solaire n'est pas pris en compte, ainsi que la réflexion du sol pour se placer dans un cas de figure le plus défavorable possible.

La modélisation n'est pas réalisée pour une paroi avec plusieurs assemblages à 9 plis mais pour une partie de la paroi qui comprend un assemblage avec 9 plis de lames croisées. Pour rappel, les transferts d'air sont négligés.

5.1.2 Propriétés matériaux

Les lames sont en bois de hêtre, leurs propriétés sont décrites dans la section 4.2 page 54. Les propriétés du pare-pluie sont données par le fabricant et celles des autres matériaux proviennent de la base de donnée du logiciel WUFI®.

Isolant en fibre de bois

L'isolant en fibre de bois choisit est le « Panneau d'isolation en fibre de bois (WLG 040) », sa masse volumique est de 155 kg/m³, sa chaleur spécifique est de 1 400 J/kg K et son coefficient de résistance à la diffusion de vapeur est égale à 3. La conductivité thermique du panneau d'isolation en fibre de bois dépend de la teneur en eau, voir graphique a de la Figure 5-2. Le graphique b de la Figure 5-2 donne l'isotherme de sorption du panneau d'isolation en fibre de bois.

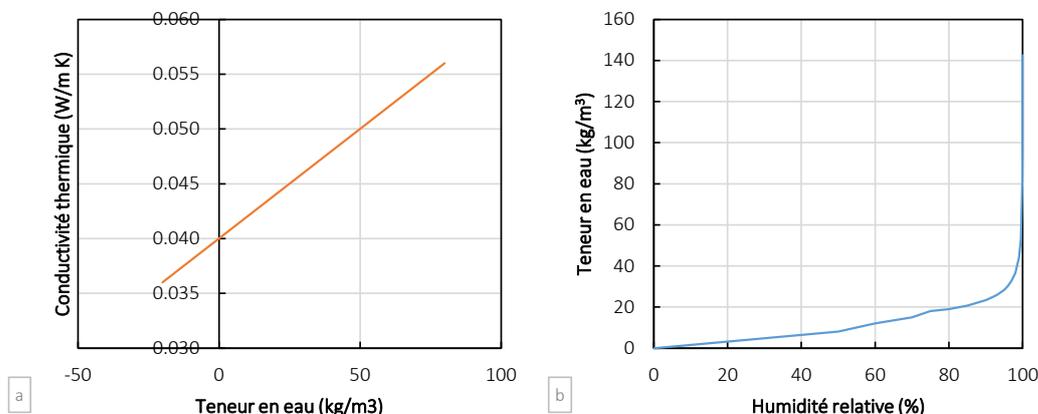


Figure 5-2 Conductivité thermique et isotherme de sorption de l'isolant en fibre de bois

Plaque de plâtre

La masse volumique de la plaque de plâtre choisit est de 850 kg/m³, sa chaleur spécifique est de 850 J/kgK et son coefficient de résistance à la diffusion de vapeur est égale à 8,3. La conductivité thermique de la plaque de plâtre dépend de la teneur en eau, voir graphique a de la Figure 5-3. Le graphique b de la Figure 5-3 donne l'isotherme de sorption de la plaque.

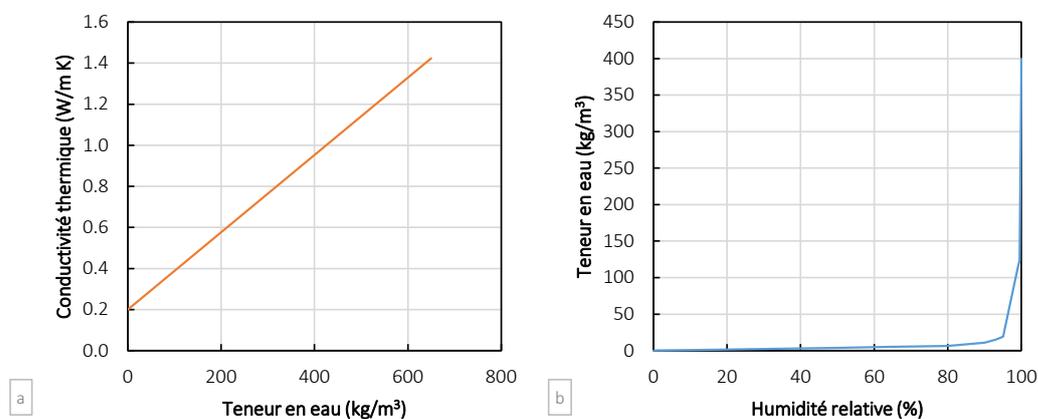


Figure 5-3 Conductivité thermique et isotherme de sorption de la plaque de plâtre

Lame d'air non ventilée

Les propriétés de la lame d'air ventilée sont données dans le Tableau 5-1. La relation entre l'humidité relative, ϕ (%), et la teneur eau de la lame d'air, W (kg/m^3), est la suivante :

$$W = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \phi \quad (5-1)$$

Tableau 5-1 Propriétés physiques de la lame d'air non ventilée de 30 mm d'épaisseur

	Unité	Valeur
Masse volumique	Kg/m^3	1,3
Chaleur spécifique	$\text{J}/\text{kg K}$	1 000
Coefficient de résistance diffusion vapeur μ	-	0,46
Conductivité thermique	$\text{W}/\text{m K}$	0,18

Pare pluie

Les propriétés du pare pluie « Écran SOLITEX FRONTA WA » de la société pro clima sont données dans le Tableau 5-2. Le pare-pluie est le même que celui utilisé pour les essais présentés précédemment (voir section 3.1.1 page 31).

Tableau 5-2 Propriétés physiques du pare-pluie selon la documentation du fabricant

	Unité	Valeur
Grammage	g/m^2	100
Épaisseur	mm	0,45
Coefficient de résistance diffusion vapeur μ	-	110
Valeur S_d	m	0,05
Conductivité thermique	$\text{W}/(\text{m K})$	2,3

Pare vapeur

Le pare-vapeur a un S_d de 20 m, ses propriétés sont données dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 Propriétés physiques du pare-vapeur selon la documentation du fabricant

	Unité	Valeur
Masse volumique	kg/m^3	130
Épaisseur	mm	1
Coefficient de résistance diffusion vapeur μ	-	20 000
Valeur S_d	m	20
Conductivité thermique	$\text{W}/(\text{m K})$	2,3

5.1.3 Ambiances extérieures et intérieures

L'étude du mur a été réalisée avec un climat extérieur correspondant au climat de la ville de Nancy (climat de plaine froid et humide), les données proviennent de la base de donnée du logiciel WUFI®. La température est modifiée, en effet le modèle ne prend pas en compte le gel de l'eau, ainsi les températures négatives sont remplacées par une température égale à 0°C. Le climat intérieur est déterminé à partir du climat extérieur selon la norme EN 15026 [3] (annexe C). La température et l'humidité relative à l'intérieur des bâtiments chauffés (logements et bureau) peuvent être déterminées à partir des graphiques de la moyenne journalière des températures de l'air extérieur. La Figure 5-4 et la Figure 5-5 présentent respectivement la température et l'humidité des ambiances extérieures et intérieures.

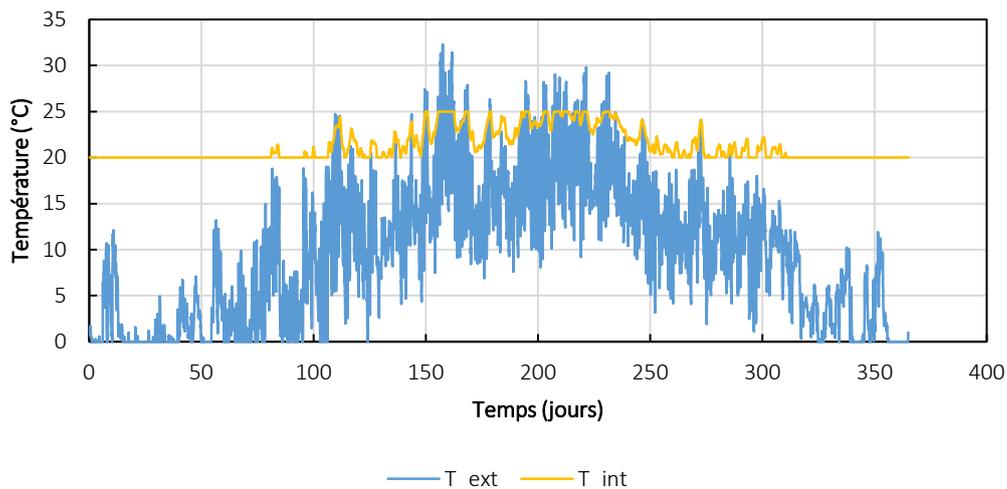


Figure 5-4 Températures extérieur et intérieur pour 1 an (début au 1^{er} janvier)

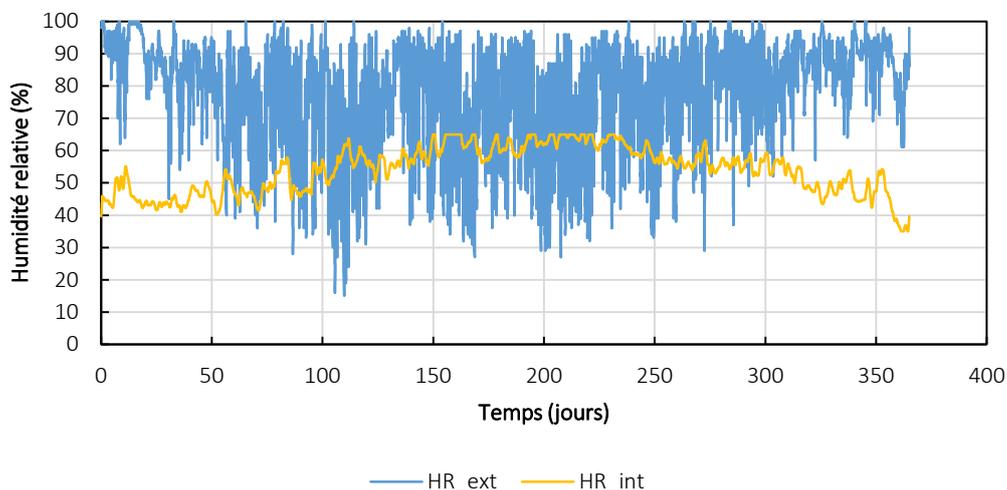


Figure 5-5 Humidités relatives intérieur et extérieur pour 1 an (début au 1^{er} janvier)

5.2 Présentation des résultats

Plusieurs simulations numériques ont été effectuées avec une teneur en eau initiale des éléments bois égale à 8 %, 10 %, 12 % ou 16 %. L'humidité relative est calculée à partir de la courbe de désorption du hêtre à 20°C. L'humidité relative des autres matériaux est prise à 50 % et la teneur en eau est calculée selon la courbe de sorption de chaque matériau, la température initiale étant de 20°C pour tous les matériaux. Le pas de temps de calcul est de 24 heures et le temps de calcul est de 10 ans pour les simulations avec une teneur en eau initiale des éléments bois de 10 % et de 12 %, et de 5

ans pour 8 % et 16 %. Le paramètre $d_{2,5D}$ est pris égale à 35 mm pour toutes les simulations, la pris de teneur en eau sera surestimée mais pour les calculs de la raideur et de la résistance du mur le phénomène de désorption est celui qui influence le plus les résultats.

5.2.1 Teneur en eau du bois en fonction du temps

La teneur en eau donnée dans cette section correspond à la teneur en eau de l'assemblage de deux éléments bois. Cette teneur en eau est calculée à partir des champs 2D de teneur en eau. Par exemple, pour le premier assemblage, noté avec l'indice Ass1, sa teneur en eau correspond à la teneur en eau de l'élément bois numéro 1 sur 5 mm et à celle de l'élément bois numéro 2 sur 5 mm au niveau de l'interface de l'assemblage. Ainsi, les figures ci-dessous donnent la teneur en eau moyenne pour les 8 assemblages du mur au niveau de leur interface, de leur connexion.

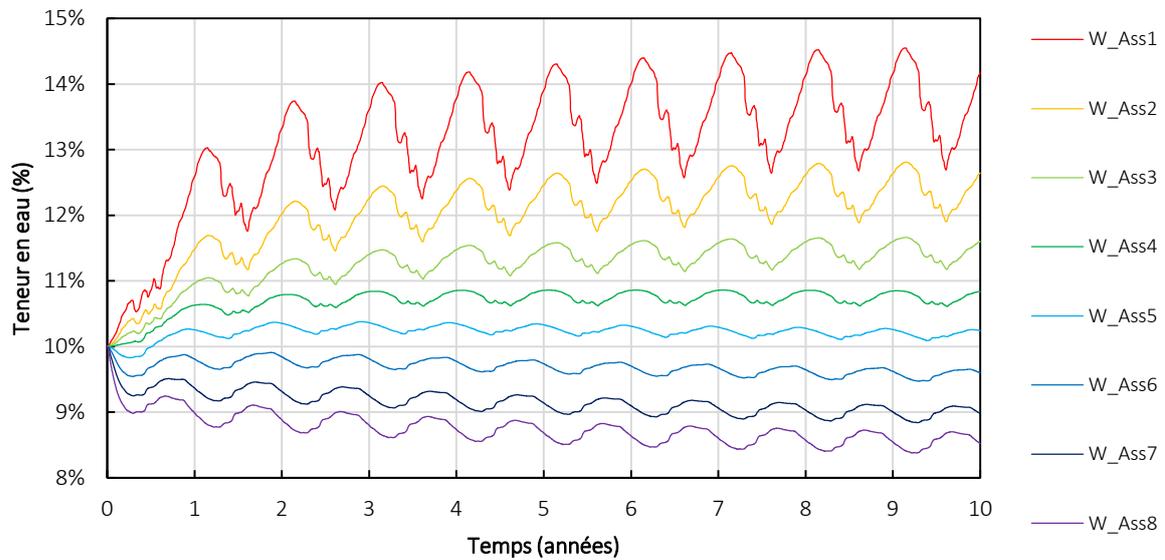


Figure 5-6 Teneur en eau en fonction du temps des interfaces des assemblages du mur avec une teneur eau en initiale du bois de 10 %

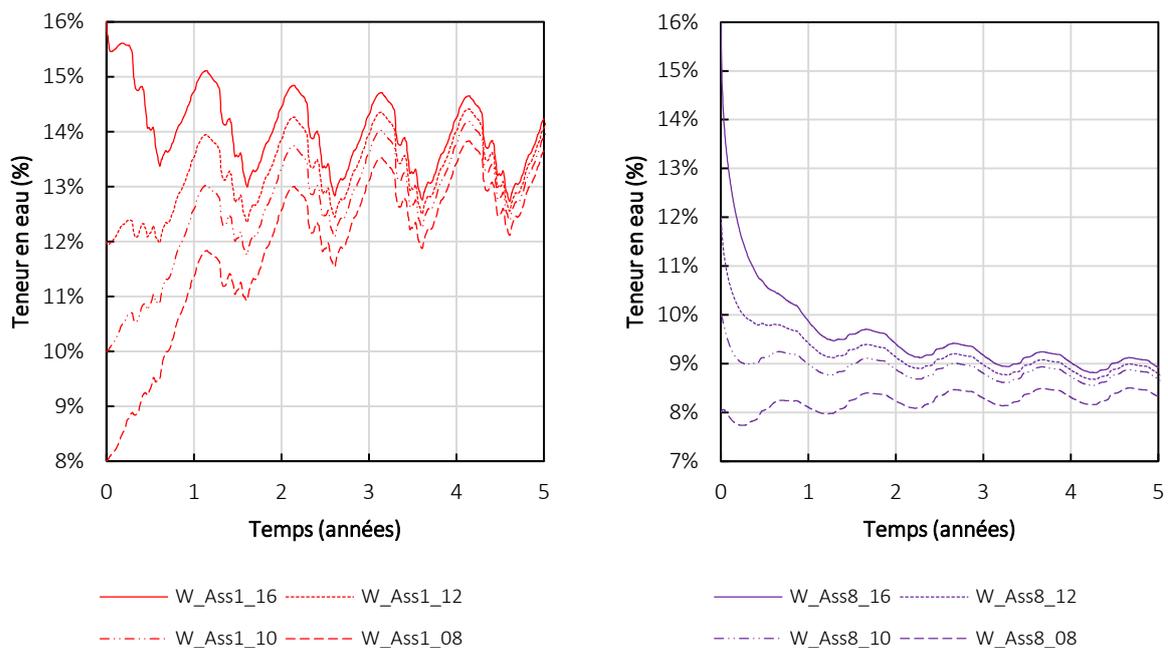


Figure 5-7 Teneur en eau en fonction du temps des interfaces des assemblages du mur pour les assemblages n°1 (gauche) et n°8 (droite)

La Figure 5-6 donne la teneur en eau des assemblages sur une durée de 10 ans, la teneur en eau initiale étant de 10 % pour le matériau bois. Nous pouvons observer l'influence des variations d'humidité relative et de température extérieures et intérieures par la présence de cycles d'adsorption et de désorption qui se répètent, ces cycles atteignent une teneur en eau d'équilibre après quelques années. La Figure 5-7 donne la teneur en eau pour les assemblages n°1 t n°8, soit l'assemblage le plus proche de l'extérieur et l'assemblage le plus proche de l'intérieur respectivement. La teneur en eau est donnée pour les différents teneurs en eau initiales des éléments bois, nous pouvons observer que cette teneur en eau tend vers la même teneur en eau d'équilibre.

5.2.2 Comportement mécanique des assemblages

Il est nécessaire ici de rappeler que des campagnes expérimentales ont eu lieu lors du projet `hardwood_joint` afin de caractériser le comportement mécanique de l'assemblage rainuré pour trois essences : le hêtre, le chêne et le bouleau. Des essais de cisaillement ont été réalisés avec différentes configurations d'assemblages afin d'étudier le cisaillement longitudinal et le cisaillement transversale de l'assemblage. Certains de ces essais ont été effectués avec des éléments bois dont la teneur en eau était de d'environ 12 %, et d'autres essais ont été effectués avec des variations de teneur en eau. Pour ces derniers, la teneur en eau lors de l'assemblage était différente de la teneur en eau lors de l'essai, plus faible ou plus élevée. À partir de l'ensemble de ces essais des lois ont été définies afin de calculer la raideur et la résistance des assemblages en fonction de la variation de la teneur en eau. Les lois obtenues, ainsi que la méthode de calcul de la capacité résistante et de la raideur pour un assemblage (constitué de deux éléments bois) sont disponibles dans le rapport `hardwood_joint WP3-T3.4-RT_Assemblages-2022`.

Les essais de cisaillement avec un gain de teneur en eau, c'est-à-dire une teneur en eau initiale des lames lors de l'assemblage plus faible que la teneur en eau finale des lames lors de l'essai, n'ont pas permis d'établir une loi de comportement pour la capacité résistante et la raideur de l'assemblage lorsque la teneur en eau du bois augmente. En effet, les gains d'humidité pour les essais de cisaillement pour le hêtre sont de l'ordre de 2,5 % et les résultats de ces essais sont semblables à ceux effectués à 12 %. Ainsi, dans la suite de cette partie la capacité résistante et la raideur de l'assemblage ne sera pas affectée par la prise de teneur en eau de l'assemblage vis-à-vis de sa teneur en eau initiale.

5.2.3 Raideur du mur en fonction du temps

La paroi étudiée est constituée de 9 plis de lames croisées, le calcul de la raideur doit donc prendre en compte la raideur de 8 assemblages, assemblages constitués de deux éléments bois croisés perpendiculairement. Ainsi, la raideur totale de l'assemblage à 9 plis est la somme des raideurs des 8 assemblages avec deux éléments bois, la raideur totale est notée K et est exprimée en kN/mm.

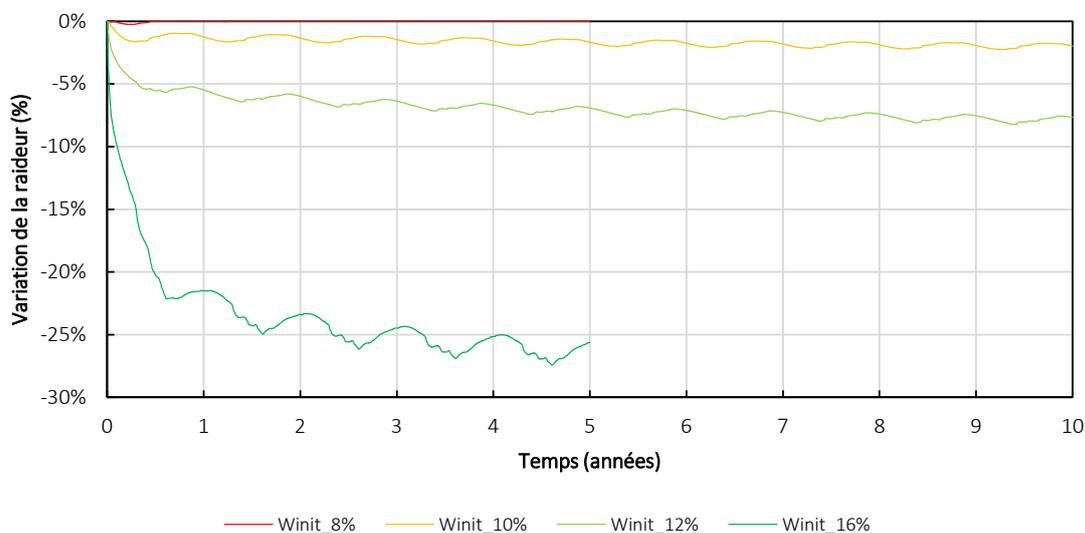


Figure 5-8 Variation de la raideur de l'assemblage en fonction du temps pour des teneurs en eau initiales des éléments bois différentes

À partir de la différence entre la teneur en eau initiale et la teneur en eau en fonction du temps et en utilisant les règles de calculs évoquées dans la section précédente il est possible de calculer la raideur de chaque assemblage puis la raideur totale de l'assemblage en fonction du temps. Ainsi, la Figure 5-8 présente la variation de la raideur de l'assemblage en fonction du temps. Comme expliqué dans la section précédente, l'influence de la prise d'humidité n'est pas prise en compte dans le calcul de la raideur, la raideur ne peut donc que diminuer. Ainsi pour la simulation numérique avec une teneur en eau initiale de 8 % la raideur varie très peu, au contraire, pour une teneur en eau initiale de 16 % la raideur diminue très vite lors de la première année puis se stabilise entre -25 % et -27 %.

La comparaison entre les simulations numériques permet de conclure que la teneur en eau initiale a une grande influence sur la raideur du mur en fonction du temps. L'observation de la figure amène à conclure qu'une teneur en eau initiale de 8 % des éléments bois est souhaitable afin d'avoir une raideur constante dans le temps de service du bâtiment. Néanmoins, pour ce calcul la compression irréversible du bois qui peut se produire lors d'une augmentation très élevée de la teneur en eau du bois n'est pas prise en compte. Cette plastification sous contrainte pourrait produire un jeu dans l'assemblage lors de la diminution de la teneur en eau du bois.

La Figure 5-9 donne la variation de la teneur en eau des interfaces des assemblages pour une teneur en eau initiale des éléments bois de 8 %. Nous pouvons observer que la teneur en eau des éléments augmente pour toutes les interfaces d'assemblages, cette augmentation étant très élevée pour les interfaces étant le plus proche de l'extérieur. Dans ce cas il semble nécessaire de prendre en compte la compression irréversible du bois, car lors de la diminution de la teneur en eau pour les interfaces d'assemblages ayant atteint ce seuil un jeu pourrait se créer et ainsi diminuer la raideur de l'assemblage.

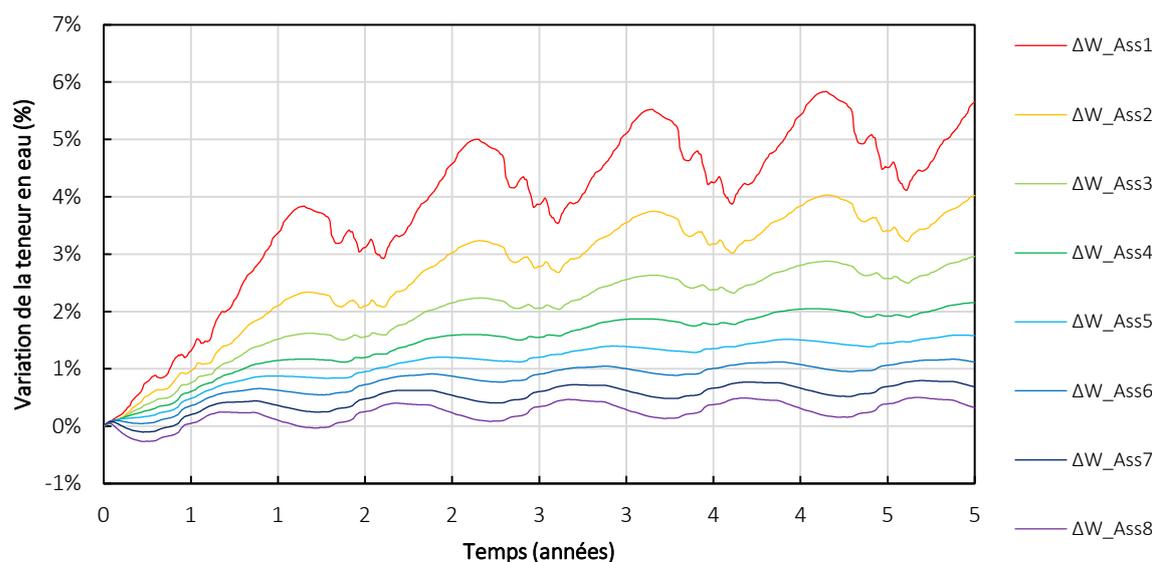


Figure 5-9 Variation de la raideur de l'assemblage en fonction du temps pour des teneurs en eau initiales des éléments bois différentes

Cependant, le jeu entre les lames de bois n'a pas été pris en compte lors de la diminution de la teneur en eau du bois pour le calcul de la raideur de l'assemblage dans cette section. En effet, les essais de cisaillement avec diminution de la teneur en eau des assemblages pour le hêtre avec des éléments bois croisés perpendiculairement n'ont pas montré une augmentation significative du jeu entre les rainures. À l'opposé, les essais avec des éléments bois assemblés avec des rainures transversales (soit perpendiculaires au sens du fil) ont montré une augmentation significative du jeu entre les rainures. Ainsi, pour un élément constructif avec des lames assemblées avec des rainures transversales il faudrait prendre en compte le jeu car cela signifierait que tous les assemblages ne sont pas sollicités.

5.2.4 Capacité résistante du mur en fonction du temps

La paroi étudiée est constituée de 9 plis de lames croisées, le calcul de la résistance doit donc prendre en compte la résistance de 8 assemblages, assemblages constitués de deux éléments bois croisés perpendiculairement. Pour un déplacement noté u_i [mm], la capacité résistante d'un assemblage de deux éléments bois, notée $F_{\max,i}$ [kN], s'exprime comme le produit de sa raideur, notée K_i [kN/mm], et du déplacement u_i :

$$F_{\max,i} = K_i \cdot u_i \quad (5-2)$$

Ainsi, la première étape du calcul consiste à calculer le déplacement de chaque assemblage à partir de la raideur calculée précédemment et de sa résistance calculée selon les règles de calculs évoquées précédemment. Ensuite, il est possible de calculer la capacité résistante de l'assemblage à 9 plis, elle dépend de l'assemblage dont la capacité est la plus élevée donc dont le déplacement est le plus faible, ainsi :

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^8 K_i \times \min(u_i) \quad (5-3)$$

avec

- F_{\max} la capacité résistante de l'assemblage à 9 plis [kN] ;
- K_i la raideur de l'assemblage à deux éléments numéro i [kN/mm] ;
- u_i le déplacement de l'assemblage numéro i [mm].

La Figure 5-10 donne les variations de la résistance de l'assemblage complet en fonction du temps pour des simulations numériques ayant une teneur en eau initiale des éléments bois différentes. Nous pouvons remarquer que comme pour la raideur, la résistance pour une teneur en eau initiale de 8 % est quasi constante dans le temps. L'explication est la même que précédemment, le calcul ne prend pas en compte l'influence de l'augmentation de la teneur en eau. Les variations de résistance pour une teneur en eau initiale de 10 % sont le même que pour la raideur, cela est vrai aussi dans le cas d'une teneur en eau initiale de 12 %. Pour une teneur en eau initiale de 16 %, la variation de résistance est moins importante que dans le cas de la raideur.

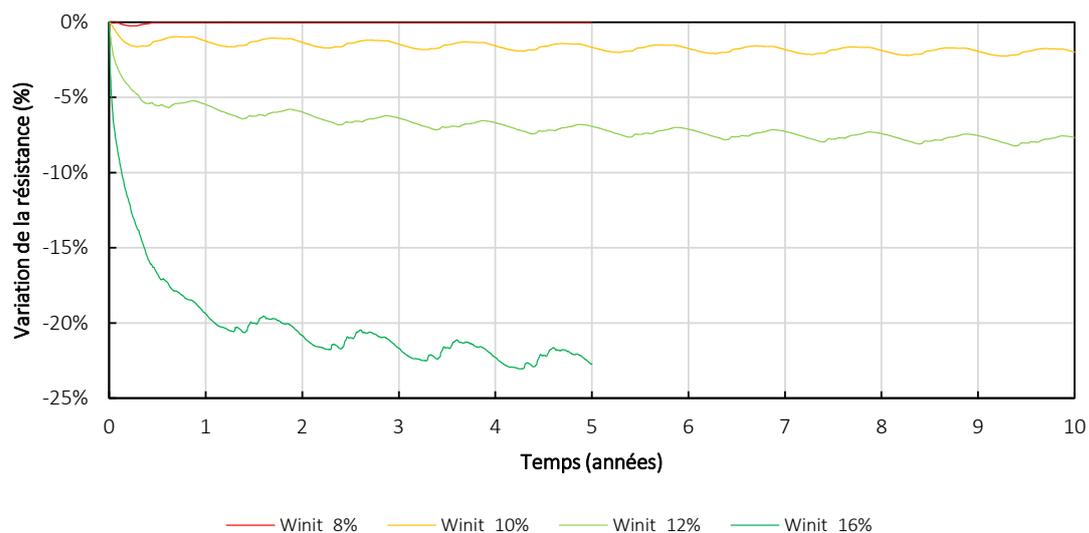


Figure 5-10 Variation de la résistance de l'assemblage en fonction du temps pour des teneurs en eau initiales des éléments bois différentes

Les estimations de la variation de la raideur et de celle de la résistance permettent de mettre en évidence l'importance de la teneur en eau initiale des éléments bois. Ainsi, dans cette configuration de mur, il est préférable d'avoir une teneur en eau initiale des éléments bois entre 10 % et 12 % avec un temps entre l'usinage et le montage de l'assemblage très court.

6 Conclusion

Une étude bibliographique sur les transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux tel que le bois a permis de formuler un modèle numérique afin de modéliser ces transferts dans un assemblage rainuré. Les potentiels moteurs des transferts de chaleur et d'humidité choisis dans ce modèle sont respectivement la température et l'humidité relative. Ce modèle a été implémenté dans le code de calcul aux éléments finis Cast3M. Plusieurs validations du modèle ont été réalisées, une avec la norme EN 15026 et d'autres avec le logiciel commercial WUFI. Le modèle 1D validé, le développement du modèle 2D a été effectué.

Néanmoins, des études supplémentaires ont été nécessaires afin d'optimiser le modèle. En effet, le temps de calcul des transferts d'humidité et de température d'un assemblage rainuré en 2D étant trop long, une étude de sensibilité sur le maillage et sur les données environnementales d'entrée a été réalisée pour réduire ce temps de calcul. Ainsi, le maillage optimal est défini et la simplification des données d'entrées dépendra des simulations à effectuer. Cependant, le temps de calcul reste trop conséquent, une nouvelle approche pour la résolution du problème 3D a été développée sur la base des modèles 1D et 2D couplés.

Une fois le modèle 1D validé, le développement d'un modèle prenant en compte la géométrie complexe de l'assemblage rainuré a été effectué. En parallèle et afin de valider ce modèle, une étude expérimentale a été mise en œuvre. La grandeur physique mesurée pour ces essais n'était pas la teneur en eau du matériau mais directement la variation dimensionnelle des bois composant l'assemblage. Le système d'acquisition avec des capteurs de déplacement étant pour la première fois utilisé pour le suivi du retrait ou du gonflement des planches d'un assemblage rainuré, des essais préliminaires ont été réalisés. Ainsi, avant la mise en place des modules expérimentaux, des essais ont été réalisés pour tester le système d'acquisition et déterminer sa précision de mesure.

Les données des essais ont permis de mettre en évidence la nécessité de développer un modèle thermo-hydrique 3D. Néanmoins, il n'a pas été possible de modéliser en 3D les transferts de température et d'humidité car les temps de calculs apparaissent extrêmement longs malgré les optimisations réalisées sur le code de calcul. Ainsi, un modèle 2.5D a été développé pour simuler de manière réaliste les essais, ce modèle thermo-hydrique couple des simulations 1D et 2D.

Afin de comparer les données d'essais et les simulations numériques obtenues avec le modèle thermo-hydrique 2.5D, il a été nécessaire d'utiliser un modèle d'hygro-expansion. Ce dernier a permis de calculer à partir de la teneur en eau les déformations du bois ayant lieu au sein de l'assemblage rainuré lors des essais. Ainsi, il a été possible à partir des données d'essais d'ajuster le modèle thermo-hydrique 2.5D pour le processus d'adsorption et de désorption du bois constituant l'assemblage rainuré.

Le modèle 2.5D a été ensuite utilisé pour l'étude du comportement mécanique d'un mur réalisé avec des assemblages rainurés. Des simulations numériques ont permis d'estimer la variation de la teneur en eau aux différentes interfaces des assemblages en fonction du temps. Ensuite, les règles de calculs établies à la suite des essais de cisaillement de la tâche 3.4 du Work Package 3 ont permis d'estimer à terme la variation de rigidité des assemblages dans le temps. Il a été ainsi montré que la teneur en eau initiale des planches de bois utilisées est un paramètre important à prendre en compte.

Le modèle développé permet donc d'estimer le comportement en fonction du temps d'un mur réalisé avec des assemblages rainurés. Des améliorations sont cependant nécessaires pour estimer au mieux ces variations. Tout d'abord le modèle hygro-thermique a été ajusté à partir d'essais unitaire soit en absorption soit en désorption. Pour avoir des valeurs plus représentatives de la réalité il faudrait des données d'essais supplémentaires afin d'ajuster au mieux le modèle. Ainsi, des essais avec des paliers de prise de teneur eau seraient nécessaires mais aussi des essais avec des variations de teneur en eau cyclique. De même, des essais de cisaillement avec des variations de teneur en eau cyclique seraient à envisager afin de comprendre au mieux le comportement mécanique de l'assemblage rainuré avec de telles

conditions, et ainsi comprendre si la compression irréversible du bois influence la raideur et la résistance du bois lors d'une forte augmentation de la teneur en eau des éléments bois.

Pour conclure, la simplification du problème tridimensionnel qui a permis le développement du modèle thermo-hydrique 2.5D pourrait être extrapolée à la modélisation d'autres types d'assemblages car l'étude du retrait gonflement et sa prévision reste un problème majeur pour le dimensionnement fiable des assemblages quel que soit la nature du bois utilisé.

7 Bibliographie

- [1] J.M.P.Q. Delgado, N.M.M. Ramos, E. Barreira, V.P. de Freitas, A critical review of hygrothermal models used in porous building materials, *Journal of Porous Media*. 13 (2010) 221–234.
- [2] H.M. Künzeli, Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters, Doctoral Thesis, IRB Verlag, 1995.
- [3] AFNOR, NF EN 15026 - Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, 2008.
- [4] AFNOR, NF EN ISO 13788 - Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse - Méthodes de calcul, 2013.
- [5] AFNOR, NF EN 13183-1 - Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation, 2002.
- [6] M. Varnier, Comportement thermo-hygro-mécanique différencié des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie, Université de Limoges, 2019.
- [7] R. Rémond, G. Almeida, Mass diffusivity of low-density fibreboard determined under steady- and unsteady-state conditions: Evidence of dual-scale mechanisms in the diffusion, *Wood Material Science & Engineering*. 6 (2011) 23–33. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.515035>.
- [8] A. Challansonnex, Transferts couplés chaleur/masse dans les matériaux de construction biosourcés: investigation expérimentale et théorique du non-équilibre local, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2019.
- [9] H. Janssen, Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction?, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54 (2011) 1548–1562.
- [10] AFNOR, NF EN ISO 12572 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle, 2016.
- [11] AFNOR, NF EN ISO 6946 - Composants et parois de bâtiments - Résistance thermique et coefficient de transmission thermique - Méthodes de calcul, 2017.
- [12] C. Lazarescu, S. Avramidis, Drying Related Strain Development in Restrained Wood, *Drying Technology*. 26 (2008) 544–551. <https://doi.org/10.1080/07373930801944697>.
- [13] R.J. Ross, *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*, 2010.
- [14] H.J. Blaß, J. Streib, *BauBuche Lamibois hêtre Guide Technique de conception et de dimensionnement à l'Eurocode 5 3ème édition*, (n.d.) 78.
- [15] F.F.P. Kollmann, W.A. Côté, *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*, 1968. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9> (accessed October 16, 2019).
- [16] W.U. Sonderegger, Experimental and theoretical investigations on the heat and water transport in wood and wood-based materials, ETH Zurich, 2011. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-006532317>.
- [17] S. Merakeb, Modélisation des structures en bois en environnement variable, Thèse de doctorat, Limoges, 2006. <http://www.theses.fr/2006LIMO0031> (accessed November 8, 2018).
- [18] C. Rode Pedersen, Combined heat and moisture transfer in building constructions, 1990. <http://orbit.dtu.dk/files/5297902/CarstenRode.pdf> (accessed November 9, 2018).
- [19] P. Perré, *Fundamentals of wood drying*, A.R.BO.LOR., Nancy, 2007.
- [20] CIRAD, Fiche Hêtre, (2012). <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperrees/HETRE.pdf> (accessed September 20, 2018).