



**HAL**  
open science

# Dynamique des transferts d'humidité au sein de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) : mesures par imagerie X et simulations numériques

Benoît Martin

► **To cite this version:**

Benoît Martin. Dynamique des transferts d'humidité au sein de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) : mesures par imagerie X et simulations numériques. Matériaux. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0044 . tel-03780542

**HAL Id: tel-03780542**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03780542v1>**

Submitted on 19 Sep 2022

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

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



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# THÈSE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : SPÉCIALITÉ SCIENCES DU BOIS ET DES FIBRES

---

## Dynamique des transferts d'humidité au sein de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) : mesures par imagerie X et simulations numériques

---

Présentée et soutenue publiquement le 22 mars 2022 par

Benoît MARTIN

### Membres du jury :

Jean Michel Leban	Directeur de recherche, INRAE Nancy	Président
Monika Woloszyn	Professeure, Polytech Annecy Chambéry (LOCIE)	Rapporteur
Rachid Bennacer	Professeur, ENS Paris Saclay (LMT)	Rapporteur
Samira Kherrouf	Docteure, Ingénieur ADEME	Examinatrice
Romain Rémond	Maître de conférences HDR, Université de Lorraine (LERMAB)	Directeur de thèse
Julien Colin	Maître de conférences, CentraleSupélec (LGPM)	Co-Encadrant
Patrick Perré	Professeur, CentraleSupélec (LGPM)	Invité



## Avant-propos et remerciements

C'est avec une réelle passion et curiosité pour le matériau bois que j'ai voulu me lancer dans un projet doctoral à la suite de mes études d'ingénieurs. Ayant exercé dans plusieurs entreprises, mon parcours professionnel dans le secteur de la construction bois a fait ressortir le besoin d'une meilleure connaissance des spécificités du bois en vue d'utiliser l'essence naturellement adaptée à l'application envisagée. C'est dans cette optique que j'ai souhaité étudier les transferts d'humidité au sein du bois massif à travers ce projet doctoral. Après ces quatre années de thèse, fortement perturbées par une crise sanitaire internationale, ce manuscrit est le fruit d'une expérience humaine et collective où, à travers ces quelques lignes, je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui y ont contribué sans pour autant être en mesure d'être exhaustif.

Je tiens tout d'abord à dédier mes premiers remerciements à mon directeur de thèse Romain Rémond pour m'avoir donné la possibilité d'assouvir ma curiosité à travers ce sujet de thèse intégrant à la fois une partie expérimentale et une autre numérique. La pédagogie avec laquelle il transmet ses connaissances est un plaisir pour tout étudiant souhaitant en savoir plus sur les mécanismes de transfert quelque peu complexe dans le bois massif. Merci pour ton investissement et implication depuis les premiers jours malgré un emploi du temps bien rempli.

Il me revient ensuite tout naturellement à remercier Julien Colin, co-encadrant, pour son accompagnement quotidien. Je n'ai pas les mots pour exprimer le rôle prépondérant qu'il a eu durant ces quatre années. Ses qualités humaines et sociables couplés à ses compétences scientifiques sont pour moi un exemple d'encadrement.

Une autre personne que je souhaite remercier est Patrick Perré, directeur de la chaire de biotechnologie de CentraleSupélec, pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire et me mettre à disposition les moyens nécessaires pour le bon déroulement des travaux expérimentaux. Sa manière d'aborder la science avec plaisir et passion sont communicatives. Merci pour cette remarquable pédagogie dans le partage des connaissances de la science du bois.

Cette thèse a aussi été l'occasion de travailler en équipe autour de la conception de dispositifs expérimentaux. À ce titre, je tiens à remercier Joel Casalinho, Mahamadou Mounkaila et Sébastien Gauthier notamment pour leur investissement dans l'élaboration des dispositifs originaux imaginés. Ce travail a fait l'objet de nombreux prototypages où la Fabrique de CentraleSupélec a joué un rôle essentiel. J'ai une pensée particulière à Frédéric Lesage et Hanane Meliani que je remercie pour leur disponibilité et conseils pour l'impression des pièces en 3D et pour la conception des cartes PCB.

Ces dispositifs ont été conçus pour fonctionner au sein d'un tomographe aux rayons X où, avec Pin Lu, nous avons passé un temps certain pour trouver les solutions aux problèmes auxquels nous avons été confrontés. Un grand merci pour ta patience et au partage de tes connaissances qui ont permis d'exploiter le tomographe en dehors de son utilisation normale.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du jury de thèse pour le temps consacré à la lecture de ce manuscrit. Merci à Monika Woloszyn et Rachid Bennacer, d'avoir accepté d'en être rapporteur. Je remercie également Jean Michel Leban en qualité de président de jury et Samira Kherrouf pour leurs intérêts portés à cette thèse et leurs implications pour l'examen de mes travaux de recherche.

Enfin, je remercie mes proches pour leur soutien et avec qui j'ai eu le plaisir de leur faire découvrir le monde de la recherche ainsi que quelques secrets des propriétés remarquables du bois.







# Tables des matières

Avant-propos et remerciements.....	3
Liste des symboles.....	15
Préambule.....	19
Introduction générale.....	23
<b>1 Revue de littérature.....</b>	<b>27</b>
1.1 Le secteur de la construction bois, ses enjeux et ses freins.....	29
1.1.1 Les essences bois utilisées en construction.....	29
1.1.2 Les parts de marché bois et ses perspectives.....	29
1.1.3 Intérêt du matériau bois pour la construction.....	31
1.1.4 Les freins et préoccupations pour son utilisation.....	31
1.2 Le matériau bois et ses spécificités.....	34
1.2.1 La structure macroscopique du bois.....	34
1.2.2 La morphologie anatomique des résineux.....	35
1.2.3 Les constituants chimiques des résineux.....	38
1.2.4 L'eau dans le bois.....	40
1.2.5 Techniques de détermination de la teneur en eau.....	43
1.3 Les transferts d'humidité et de chaleur au sein du bois massif.....	44
1.3.1 Transferts thermiques dans le bois.....	45
1.3.2 Transferts massiques dans le bois.....	45
1.3.3 Détermination des propriétés de transferts massique du bois massif.....	49
1.3.4 Exemples de confrontations entre simulations numériques et mesures expérimentales.....	54
1.4 Conclusion.....	58
<b>2 Étude de la cinétique de migration d'humidité par imagerie X.....</b>	<b>61</b>
2.1 Introduction.....	63
2.2 Matériels et méthodes.....	63
2.2.1 Préparation des échantillons.....	63
2.2.2 Imagerie par rayons X.....	64
2.3 Résultats et discussion.....	73



2.3.1 Teneur en eau locale à saturation complète versus masse volumique anhydre	73
2.3.2 Direction longitudinale.....	73
2.3.3 Direction radiale.....	77
2.4 Conclusion.....	82
Annexe A : Choix du produit d'étanchéité adapté à l'imagerie X et au bois	83
<b>3 Investigation des voies de passage de l'eau libre au sein de la structure interne du bois par micro tomographie X.....</b>	<b>87</b>
3.1 Introduction.....	89
3.2 Matériels et méthodes.....	89
3.2.1 Préparation de l'échantillon.....	89
3.2.2 Tomographie par rayons X.....	90
3.3 Résultats et discussion.....	93
3.4 Conclusion.....	101
Annexe B : Visualisation de la présence d'eau libre dans les lumens du bois final.....	102
<b>4 Étude des transferts d'humidité au sein d'un échantillon soumis à des sollicitations thermiques dynamiques.....</b>	<b>105</b>
4.1 Introduction.....	107
4.2 Matériels et méthodes.....	108
4.2.1 Préparation de l'échantillon.....	108
4.2.2 Définition des conditions limites.....	109
4.2.3 Description du dispositif expérimental.....	109
4.2.4 Acquisition des projections et reconstruction tomographique.....	112
4.2.5 Détermination de la teneur en eau.....	114
4.3 Résultats et discussion.....	118
4.3.1 Tendances générales.....	118
4.3.2 Phase 1 : Conditions non-isothermes.....	119
4.3.3 Phase 2 : Conditions isothermes.....	122
4.3.4 Phase 3 : Conditions dynamiques.....	123
4.3.5 Évaluation du champ de teneur en eau suivant le rayon de l'échantillon...	124
4.4 Conclusion.....	126
Annexe C : Étude de l'atténuation aux rayons-X de la matière composant différents tubes.....	128



Annexe D : Étude numérique des effets de bord.....	129
Annexe E : Complément sur le dispositif expérimental.....	130
E.1 Principe général.....	130
E.2 Schémas du circuit électrique.....	131
Annexe F : Reconstruction tomographique et artéfacts de reconstruction numérique.....	133
<b>5 Simulations numériques.....</b>	<b>135</b>
5.1 Introduction.....	137
5.2 Matériels et méthodes.....	138
5.2.1 Modèles numériques.....	138
5.2.2 Configurations étudiées.....	142
5.3 Résultats et discussion.....	144
5.3.1 Reprise d'humidité dans le cas de l'imbibition suivant la direction longitudinale.....	144
5.3.2 Cinétique d'évolution temporelle d'humidité d'un échantillon exposé à des solllicitations thermiques dynamiques.....	147
5.4 Conclusion.....	151
Annexe G : Détermination du coefficient d'absorption selon une méthode inspirée de la norme EN ISO 15148.....	154
Annexe H : Données d'entrée et de sortie de la configuration n°5 – WUFI pro .....	156
H.1 Disposition des volumes de contrôle.....	156
H.2 Propriétés de l'épicéa.....	157
H.3 Conditions limites.....	158
H.4 Résultats globaux.....	159
Annexe I : Données d'entrée et de sortie de la configuration II – WUFI pro .....	160
I.1 Disposition des volumes de contrôle.....	160
I.2 Propriétés de la couche de revêtement imperméable.....	161
I. 3 Propriétés de l'épicéa.....	162
I.4 Conditions limites.....	163
I.5 Résultats globaux.....	164
Annexe J : Données d'entrée et de sortie de la configuration IV – WUFI pro .....	166
J.1 Disposition des volumes de contrôle.....	166
J 2 Propriétés du revêtement imperméable.....	167



J 3 Propriétés de l'épicéa.....	168
J.4 Conditions limites.....	169
J.5 Résultats globaux.....	170
<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>173</b>
<b>Index des figures.....</b>	<b>177</b>
<b>Index des tableaux.....</b>	<b>183</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>185</b>





# Liste des symboles

## Lettres grecques

- $\alpha$  facteur de pondération
- $\Delta$  différence
- $\eta$  viscosité dynamique
- $\delta$  diffusion
- $\epsilon$  retrait ou gonflement
- $\theta$  angle de contact
- $\lambda$  conductivité thermique
- $\mu$  coefficient d'atténuation ou facteur de résistance à la diffusion
- $\sigma$  tension superficielle
- $\rho$  masse volumique

## Lettres latines

- A coefficient d'absorption
- C composition chimique
- CLT Cross Laminated Timber
- c concentration
- D coefficient de diffusion
- d épaisseur
- E énergie
- EMC Teneur en eau d'équilibre
- g accélération de pesanteur
- H hauteur
- h coefficient de transfert
- I intensité
- J flux massique
- K perméabilité ou température
- k perméabilité intrinsèque
- kr perméabilité relative
- L longueur ou longitudinal
- M masse molaire
- m masse
- P pression

## Liste des symboles

---

Q	débit volumique
R	constante des gaz parfaits ou radial
r	rayon
S	section ou surface ou saturation
T	température ou transmittance ou tangentiel
t	temps
u	vecteur vitesse
V	volume
X	teneur en eau
x	distance

### **Indice ou exposant**

B	champ de noir
BI	bois initial
BT	bois de transition
BF	bois final
b	eau liée
c	capillaire
eq	équivalent
h	humide
g	gaz
l	liquide
psf	point de saturation des fibres
sat	saturation complète
v	vapeur ou volumique
ws	migration liquide
0	anhydre ou initial ou faisceau incident





# Préambule

Ce manuscrit est rédigé sous forme de publications scientifiques. Lors de cette thèse, un article a été publié (chapitre 2) et un second en cours de révision (chapitre 3). La traduction complète de ces chapitres a été menée avec une réorganisation structurelle afin d'obtenir un manuscrit de thèse cohérent et éviter la redondance entre les chapitres. Les références des publications sont décrites ci-dessous :

- **Monitoring imbibition dynamics at tissue level in Norway spruce using X-ray imaging**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Casalinho, J., Perré, P. & Rémond, R. (2021)  
*Holzforschung*
- **3D investigation of liquid pathways in internal structure of Norway spruce during imbibition**  
Martin, B., Colin, J., Perré, P., Casalinho, J., Mounkaila, M., Lu, P., & Rémond, R.  
*Soumis dans la revue Holzforschung le 6 aout 2021*

Lors de ces travaux de thèse, de nombreuses communications ont pu être effectuées lors de conférences nationales et internationales :

- **Étude de la migration d'humidité en conditions non-isothermes dans le bois massif par tomographie à rayons X**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Casalinho, J., Perré, P. & Rémond, R.  
10<sup>ème</sup> journées du GDR 3544 « Sciences du bois », Novembre 2021, Montpellier, France
- **Migration d'humidité en régime non-isotherme dans le bois massif : mesures par imagerie X et simulation numérique**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Casalinho, J., Bouali, A., Perré, P. & Rémond, R.  
International Building Performance Simulation Association (IBPSA), Juillet 2021, Reims, France
- **Water migration in wood during imbibition assessed by X-ray imaging**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Casalinho, J., Perré, P. & Rémond, R.  
Nordic Symposium n Building Physics (NSB), September 2020, Tallin, France
- **Transfert d'humidité en régime non-isotherme dans le CLT : mesures par tomographie X 3D et modélisation numérique**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Casalinho, J., Mougel, E., Bouali, A., Perré, P. & Rémond, R.  
8<sup>ème</sup> journées du GDR 3544 « Sciences du bois », Novembre 2019, Épinal, France

- **Dynamique des transferts d'humidité au sein du bois lamellé collé croisé (CLT) : mesure par tomographie X**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Perré, P. & Rémond, R.  
Les Journées Jeunes Chercheurs Transfrontalières, Avril 2019, Reims, France
- **Measuring moisture content distribution in wood during imbibition by micro-tomography**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Casalinho, J., Perré, P. & Rémond, R.  
Physics of drying conference, Novembre 2018, Marne la-Vallée, France
- **Dynamique des transferts d'humidité au sein du bois lamellé croisé (CLT) : mesures par tomographie X et modélisation numérique**  
Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Mougel, É., Perré, P. & Rémond, R.  
Journée scientifique Matériaux de Construction Biosourcés, Mars 2018, Marne-la-Vallée, France







# Introduction générale

L'utilisation du bois massif dans le domaine de la construction couvre de nombreux enjeux à la fois économiques et environnementaux notamment. La prise en compte de l'impact environnemental des bâtiments est renforcée avec l'intégration de l'empreinte carbone des projets de construction. Ce critère favorise l'emploi des matériaux biosourcés tel que le bois. D'un point de vue économique, la structuration de la filière couplée à la maîtrise des techniques de construction récente amène à une augmentation de l'utilisation du bois massif dans le secteur des ouvrages de grande envergure. Ces projets impliquent un allongement de la durée de montage sur site. Lors de cette phase, les éléments constructifs en bois massif sont exposés aux conditions environnementales extérieures. Lors de reprise d'humidité suite à des intempéries, le temps de séchage – nécessaire avant la mise en place des couches et revêtements extérieurs et intérieurs – est une problématique récurrente pouvant engendrer des surcoûts économiques, soit avec l'allongement de la phase de montage afin d'attendre le séchage des éléments, soit avec un risque de dégradation de l'ouvrage. Par ailleurs, la performance thermique des constructions doit répondre à la nouvelle réglementation environnementale (RE 2020) préconisant des consommations énergétiques inférieures à des seuils réglementaires suivant la typologie de l'ouvrage. Les professionnels du secteur de la construction s'appuient sur des outils numériques pour estimer les consommations énergétiques et valider les complexes de paroi multicouches suivant des conditions dynamiques par le biais de base de données météorologiques. Pourtant de nombreuses études ont montré des écarts entre les mesures expérimentales et les simulations notamment pour les matériaux hygroscopiques où le couplage chaleur-masse est non négligeable.

C'est dans ce contexte que ces travaux de thèse s'inscrivent afin de mieux comprendre la dynamique des transferts d'humidité dans le bois massif, dans l'optique de garantir des habitats durables et sains. Pour y parvenir, ce projet de thèse a été réalisé dans le cadre d'un partenariat liant le Laboratoire d'Études et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMaB) de l'université de Lorraine et de Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (LGPM, Chaire de Biotechnologie) de CentraleSupélec. L'approche repose sur l'utilisation de l'imagerie par rayons X pour suivre l'évolution du champ de teneur en eau à l'échelle du matériau. Cette méthode – non destructive et non invasive – à l'avantage de ne pas perturber localement le milieu étudié par l'insertion de capteurs. Ce travail de thèse a donc nécessité le développement de plusieurs dispositifs expérimentaux originaux accompagnés de protocoles d'analyse d'images pour évaluer la teneur en eau au cours du temps. Les données ainsi obtenues ont ensuite fait

l'objet d'une confrontation avec des simulations issues de modèles numériques en vue d'étudier le caractère prédictif de ces derniers.

Le manuscrit se compose de cinq chapitres avec en premier lieu une revue bibliographique présentée dans le chapitre 1 reprecisant le contexte de l'étude. Les notions principales concernant les spécificités du bois ainsi que les propriétés de transferts y sont détaillées.

Le second chapitre est dédié à l'étude de la cinétique de migration d'humidité dans le cas de l'imbibition. Ce travail – utilisant l'imagerie par rayons X 2D – présente une méthode rigoureuse du traitement du signal permettant d'obtenir l'évolution du champ de teneur en eau au sein d'un échantillon discrétisé en régions d'intérêts. Cette méthode a permis de discerner les cinétiques d'absorption d'humidité dans le bois initial et le bois final.

Le troisième chapitre apporte une analyse complémentaire de la migration capillaire avec la visualisation directe des voies de passages de l'eau libre dans le milieu poreux d'un échantillon d'épicéa suivant la direction longitudinale.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la redistribution de l'humidité dans un échantillon d'épicéa soumis à une séquence de sollicitations thermiques mimant des scénarios rencontrés sur les parois extérieures d'un bâtiment. Ce travail est à l'origine d'un dispositif remarquable qui a nécessité d'importants développements expérimentaux. Les résultats préliminaires présentés sont issus d'un protocole de calibration permettant d'obtenir une corrélation du niveau de gris à une teneur en eau au sein de l'échantillon discrétisé en régions d'intérêts tridimensionnelles.

Le cinquième chapitre est dédié à la confrontation des résultats expérimentaux quantitatifs issus des chapitres 2 et 4 avec des résultats numériques en vue de tester les capacités prédictives des modèles de simulation. Certaines propriétés des modèles ont été modifiées pour voir leurs impacts sur les simulations. Des limites aux approches macroscopiques et des pistes d'amélioration sont présentées.

Enfin, ce manuscrit se finalise par une conclusion regroupant les principaux résultats et les perspectives de ce travail





# Chapitre 1

---

Revue de littérature



## 1.1 Le secteur de la construction bois, ses enjeux et ses freins

### 1.1.1 Les essences bois utilisées en construction

En France métropolitaine, la couverture forestière représente environ 30 % de la surface terrestre. La diversité des essences d'arbres présente dans ces forêts est relativement importante avec un total de 138 essences réparties sur tout le territoire de manière non homogène (ONF, 2018). Le volume total de bois sur pied actuel est estimé à 2.8 milliards de mètre cube. Chaque année, la croissance des arbres produit l'équivalent de 88 millions de mètre cube de bois et l'exploitation forestière en extrait environ 42 millions (Hervé, 2016). Ce volume récolté se décompose en trois grandes catégories de valorisation avec 21 % du volume destiné au bois énergie, 28 % à l'industrie et 51 % au bois d'œuvre. Sur cette dernière catégorie, le bois de feuillus représente 28 % et 72 % de résineux (FCBA, 2018). La proportion de résineux récolté est supérieure aux feuillus en raison de son utilisation pour la construction bois notamment, secteur très dynamique actuellement. De nos jours, les essences de pin, sapin, épicéa et douglas sont couramment utilisées pour les ouvrages bois allant de la maison individuelle aux immeubles de grande hauteur (Figure 1.1).



Figure 1.1- Exemple de typologie de construction bois utilisant principalement des essences résineuses a) Fuste ou bois empilé (magazine Marie Claire Maison), b) Ossature bois (Batimat) et c) Panneaux en bois lamellé-croisé collé (CLT : cross laminated timber) (Lignatec SAS)

### 1.1.2 Les parts de marché bois et ses perspectives

Le secteur de la construction bois (comprenant également les structures mixtes bois/béton ou bois/métal) en France métropolitaine représente 6,3 % du marché du logement (individuel et collectif confondus) et 16,3 % des bâtiments non résidentiels en 2018. Ces parts de marché sont relativement peu importantes mais connaissent une dynamique de progression forte ces dernières années. Entre 2016 et 2018, les segments de la construction bois ont connu une progression plus importante que l'ensemble du marché (COFIBAB and France Bois Forêt, 2019). À titre d'exemple, le secteur de la construction bois a connu une hausse de l'ordre de 20 % sur cette période alors que le marché global, tous systèmes constructifs confondus, a

enregistré une augmentation du nombre de mise en chantier de 11 %. Par ailleurs, la filière estime que le secteur de la construction bois pourrait représenter environ 30 % des parts de marchés à l'horizon 2030 (CFB BOIS/CNI et *al.*, 2021). Enfin, une étude prospective de l'évolution de la consommation de bois aux horizons 2020, 2035 et, à titre indicatif, en 2050 a été réalisée par le bureau d'informations et de prévisions économiques (BIPE) et l'institut technologique forêt cellulose bois-construction ameublement (FCBA) sur la base de plusieurs scénarios intégrant la *Stratégie Nationale Bas-Carbone*. Les estimations indiquent des écarts importants suivant les scénarios envisagés avec une augmentation allant de 8 % (tendanciel) et 230 % Objectif Neutralité Carbone (ONC)) à l'horizon 2035 (Figure 1.2).

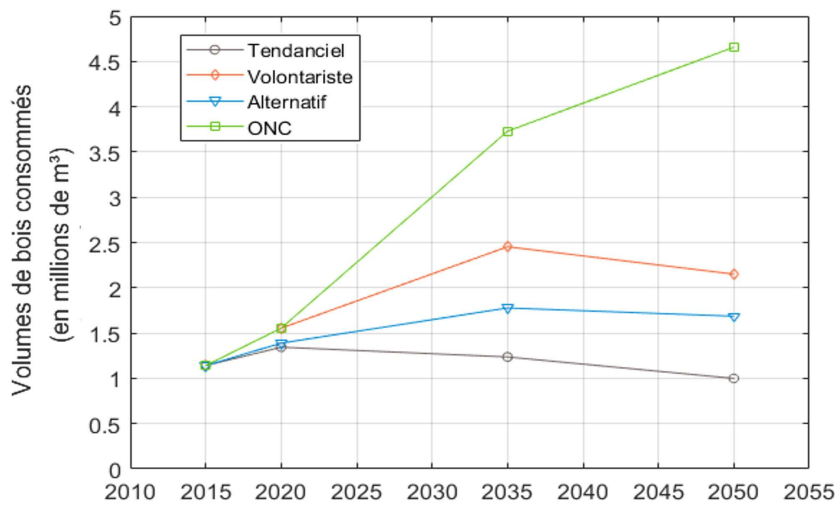


Figure 1.2- Estimation des volumes consommés de bois dédiés aux systèmes constructifs et charpentes (BIPE and FCBA, 2019). Les scénarios envisagés s'appuient sur une évolution des parts de marché stable (tendanciel - moyenne 2010-2015), forte sous contrainte (Alternatif - potentiel raisonnable), forte (volontariste - potentiel maximal) et très forte (ONC - normes et optimiste)

Les verrous réglementaires et technologiques sont aujourd'hui levés offrant la possibilité d'utiliser ce matériau pour des ouvrages de grande hauteur. De nos jours, de plus en plus d'immeubles en bois sont édifiés suivant un système constructif mixte poteaux-poutres en bois lamellé collé combiné à des panneaux en bois lamellé-croisé-collé (CLT : *cross laminated timber*) (Karacabeyli et *al.*, 2013; Ramage et *al.*, 2017). Cette technologie est maintenant maîtrisée par de plus en plus d'entreprises amenant une augmentation des moyens de production pour répondre à la demande (Brandner et *al.*, 2016; Muszynski et *al.*, 2020). La filière bois se structure et investie dans les moyens de production lui permettant de diminuer les coûts pour être compétitif vis-à-vis des autres systèmes constructifs.

D'après les nations unies, la population mondiale va croître de 40 % en l'espace de 30 ans, soit l'équivalent de 3 milliards de personnes supplémentaires à l'horizon 2050. Les prédictions indiquent une tendance à l'urbanisation de la population passant de 55 % en 2018 à 75 % en 2050 (United Nations et *al.*, 2019). En France, de nouveaux logements vont devoir être construits pour accueillir l'équivalent du nombre d'habitants de l'Île-de-France, soit environ 10



millions de personnes supplémentaires lors de ces 30 prochaines années. Ainsi, les ouvrages de grande hauteur vont être plébiscités pour densifier les villes en réponse aux prédictions démographiques de la population humaine et au besoin de limiter l'artificialisation des sols. La surélévation des structures existantes peut également répondre en partie à ce besoin grâce à la légèreté des ossatures bois.

### 1.1.3 Intérêt du matériau bois pour la construction

Le secteur résidentiel/tertiaire est un poste d'émission de gaz à effet de serre important en France. Il représente environ 22 % des émissions de CO<sub>2</sub> en considérant celles liées à la consommation d'énergie des bâtiments pour l'année 2017. Cependant, l'énergie grise des matériaux employés n'avait pas été prise en compte dans ce calcul. Les enjeux environnementaux imposent une diminution de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment. Ces enjeux ont fait l'objet de l'établissement d'une nouvelle réglementation environnementale (RE 2020) qui est entrée en vigueur à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2022. Elle intègre trois objectifs majeurs dont celui de diminuer l'impact carbone de la construction des bâtiments (Ministère de la Transition Ecologique, 2020). Les matériaux biosourcés, tels que le bois, sont donc des candidats de choix pour répondre au mieux à ce critère. En effet, le processus de transformation allant de l'arbre à la planche génère environ 60 % de moins de gaz à effet de serre comparé à d'autres matériaux de construction, tels que l'acier, la brique ou le béton armé (Buchanan and Levine, 1999; Pajchrowski et al., 2014). L'atout majeur de son utilisation en construction est qu'il fait office de puits de carbone (stockage de carbone) durant la vie de l'ouvrage avec l'équivalent d'une tonne de CO<sub>2</sub> stocké pour un mètre cube de bois. Un autre intérêt à l'utilisation des matériaux biosourcés est leur capacité à réguler l'humidité relative de l'air intérieur de manière passive et ainsi participer au confort des occupants. La capacité de régulation hydrique est donnée sous le terme de *moisture buffering value (MBV)* (Rode et al., 2006). Plus sa valeur est élevée, plus le matériau est en mesure de jouer le rôle de régulateur de l'ambiance intérieure. Les matériaux sont d'autant plus performants qu'ils peuvent stocker de l'humidité et ainsi limiter les pertes d'énergies liées aux transferts de vapeur (Duforestel, 2015; Kreiger and Srubar, 2019).

### 1.1.4 Les freins et préoccupations pour son utilisation

#### 1.1.4.1 La disponibilité de la ressource

Pour faire face à la demande croissante en bois et à la pression exercée sur la ressource, une gestion des forêts responsable avec un maintien de la biodiversité est primordiale afin de lui conférer un caractère plus résilient face au changement climatique (Hurlbert et al., 2019). En effet, les forêts françaises font aujourd'hui face à une pénurie de pluviométrie accompagnées d'une augmentation des températures favorisant le risque incendie ainsi que la prolifération

d'insectes xylophages tel que le scolyte s'attaquant principalement à l'épicéa ou la chenille processionnaire au Pin sylvestre. Le prélèvement de bois d'œuvre pour la construction doit donc être en adéquation avec la production biologique de bois. Pour limiter l'impact d'un ouvrage bois sur la ressource forestière, la notion de durée de vie du bâtiment doit être pris en compte. La longévité d'une construction a également l'intérêt de stocker le carbone sur un temps plus long. Or, comme il est évoqué dans des parties suivantes, cette longévité peut se retrouver réduite dès lors que la teneur en eau est importante sur des temps longs et répétés au sein des parois.

#### 1.1.4.2 Les agents biologiques

En tant que matériau biosourcé et biodégradable, le bois entre naturellement dans le cycle du carbone. Le bois mort est décomposé et transformé en humus par les champignons lignivores (pourriture blanche, brune, etc.) ainsi que par les larves ou insectes xylophages et/ou bactéries dans une moindre mesure (Kollmann and Côté, 1968; Schmidt, 2006). En milieu naturel, de l'évolution perpétuelle des plantes en réponse à leur environnement résulte une très grande diversité d'essences d'arbres. C'est pourquoi certaines essences ont des propriétés différentes et sont dites plus ou moins durable (au sens de leur longévité) suivant un classement établi d'après la norme EN 350 (NF EN 350, 2016).

La principale limitation de la durabilité des ouvrages bois est leur sensibilité face aux agents biologiques (Agence Qualité Environnement, 2019), qui est intrinsèquement liée à l'humidité. Il est possible de ressortir trois configurations pouvant amener à un risque de développement de champignon lignivore engendrant une dégradation des propriétés mécaniques des éléments bois.

La première peut avoir lieu lors de la phase de construction où les éléments structurels peuvent être soumis à des intempéries (Olsson, 2020). Dans ce cas, des variations importantes de teneur en eau peuvent se produire, ce qui nécessite alors un temps de séchage avant d'appliquer les revêtements intérieurs et/ou extérieurs intégrant l'isolation. Pour y remédier, différents moyens peuvent être mis en œuvre comme, par exemple, la mise en place d'une toiture provisoire offrant une protection intégrale (Figure 1.3).



Figure 1.3- Moyens mis en œuvre face aux intempéries lors de la phase de construction a) aucunes (Olsson, 2020), b) avec polyane recouvrant toutes les faces des panneaux (Liisma et al., 2019) et c) protection intégrale avec une structure provisoire (Gasparri et al., 2015)

La seconde peut se manifester une fois le bâtiment achevé lorsque des infiltrations d'eau depuis les façades extérieures surviennent engendrant un apport local d'humidité (Figure 1.4a) (Tietze et *al.*, 2017). Pour limiter ce risque de désordre avec le développement de moisissures (Figure 1.4b), une conception architecturale favorisant l'écoulement de l'eau sur les façades extérieures accompagnées d'une mise en œuvre soignée sont nécessaires. Par ailleurs, les fuites d'appareils ou du réseau d'eau peuvent également engendrer un risque d'apport d'humidité en condition d'utilisation.

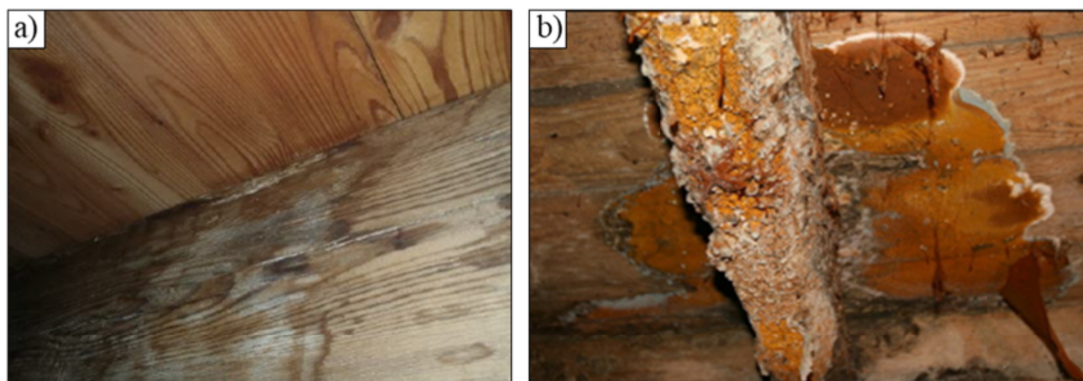


Figure 1.4- a) Présence d'infiltration d'eau (Tietze et *al.*, 2017), b) Développement de moisissures suite à infiltration d'eau (crédit photo SEMHV - <http://www.merule-expert.com/>)

Enfin, la troisième configuration impliquant une possibilité de développement de champignon est lorsque les transferts de l'humidité – au sein des parois multicouches – générée en usage normal du bâtiment n'ont pas été intégrés lors de la phase de conception ou lorsque l'agencement des couches a été mise en œuvre de manière incorrecte (Guide Rage, 2012). En conséquence, la disposition des matériaux composant la paroi peuvent faire office de barrière à la diffusion de vapeur pouvant engendrer une humidité relative élevée ( $HR > 80 \%$ ) ou une condensation de vapeur d'eau au niveau d'un point froid, appelé point de rosé. Ceci offre alors des conditions favorables au développement de moisissures (Johansson et *al.*, 2013).

Pour répondre à ces risques, les essences – dites non durables – tel que le sapin ou l'épicéa – utilisé massivement en construction – font l'objet en France de traitements chimiques préventifs. Cependant, ces essences sont peu imprégnables rendant cette solution peu efficace. D'autre part, les produits de préservation sont lessivables à l'eau diminuant ainsi la concentration des produits de préservations ne pouvant plus assurer un caractère antifongique suffisant. Enfin, le recyclage de ces matériaux traités chimiquement et pouvant intégrer des métaux lourds est limité à la valorisation énergétique dans des incinérateurs spécifiques à cause des fumées toxiques générées (Assemblée des Chambres Françaises de Commerce et d'Industrie, 2011).

Une autre alternative consiste à prévenir ces risques en adoptant une stratégie sécuritaire vis-à-vis des transferts d'humidités. Le bois peut connaître des variations de teneur en eau sans dommage dès lors que les conditions de développement de croissance d'agents biologiques ne

sont pas réunies (Johansson et *al.*, 2013; Viitanen, 1994). Dans ce but, la maîtrise de l'hygrométrie des pièces de bois doit être intégrée dès la phase de conception et contrôlée de la phase de chantier jusqu'au parfait achèvement des travaux. Pour étudier les transferts hygrothermiques dans le bois massif, il est nécessaire de descendre à l'échelle matériau afin de mieux comprendre les interactions ayant lieu entre l'eau et le bois suivant différentes sollicitations hydriques ou thermiques. C'est pourquoi, ce travail de thèse se concentre sur les transferts d'humidité au sein de l'épicéa qui est actuellement l'une des essences de résineux majoritairement utilisées dans le secteur de la construction. La meilleure compréhension des mécanismes de transfert dans le bois massif est également une donnée importante pour d'autres secteurs industriels tels que le séchage où le l'imprégnation de produit de préservation.

## 1.2 Le matériau bois et ses spécificités

### 1.2.1 La structure macroscopique du bois

Le bois, ou xylème secondaire, est formé par addition périphérique de couches cellulaires coaxiales. Ce tissu végétal résulte tout d'abord de divisions cellulaires du côté interne d'un méristème annulaire, appelé cambium et correspondant à des cellules mères localisées sous l'écorce, puis de la différenciation des cellules filles (Figure 1.6b). La genèse de bois est donc responsable de la croissance en diamètre de l'arbre (Parham and Gray, 1984).

Le bois est donc un matériau anisotrope et plus précisément orthotrope cylindrique grâce à ses plans de symétrie. Ses propriétés se définissent selon trois directions orthogonales (Figure 1.5), à savoir :

- Longitudinale (suivant l'axe du tronc),
- Radiale (du centre, la moelle, à la périphérie, l'écorce),
- Tangentielle (tangent au tronc).

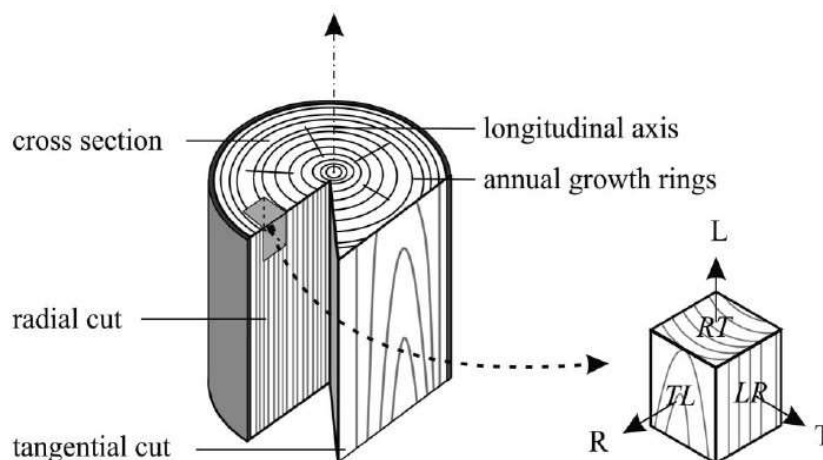


Figure 1.5- Schéma représentant les directions orthogonales du bois et les plans de référence associés (Franke and Quenneville, 2011)

Dans la direction radiale, plusieurs zones sont distinctes allant de la moelle (centre) à l'écorce (Figure 1.6). Le xylème secondaire (ou bois) se compose de l'aubier, situé en périphérie (bois récemment formé), et du duramen (bois plus ancien). Lors de la duramenisation, les cellules subissent une ultime transformation physique et chimique, pouvant conférer au bois une durabilité naturelle vis-à-vis des agents biologiques (NF EN 350, 2016). L'aubier est la seule des deux zones où circule la sève brute allant des racines jusqu'aux feuilles. En outre, dans cette partie du bois et lors de la vie de l'arbre, des cellules peuvent être encore vivantes, correspondant au parenchyme. Dans le duramen, qui peut être différencié (colorée) ou non selon les essences (Trouy, 2015), toutes les cellules sont mortes.

Dans les régions tempérées, la croissance des arbres s'effectue du printemps jusqu'à la fin de l'été créant ainsi un nouveau cerne chaque année. Au sein de chaque cerne, une zone claire précède une zone foncée comme illustré sur la Figure 1.6a. Cette différence de couleur traduit une hétérogénéité du bois liée au cycle de croissance de l'arbre suivant les saisons. Pour comprendre l'origine de cette variation de couleur, il est nécessaire de descendre à une échelle inférieure (microscopique) afin d'accéder à la structure anatomique du bois.

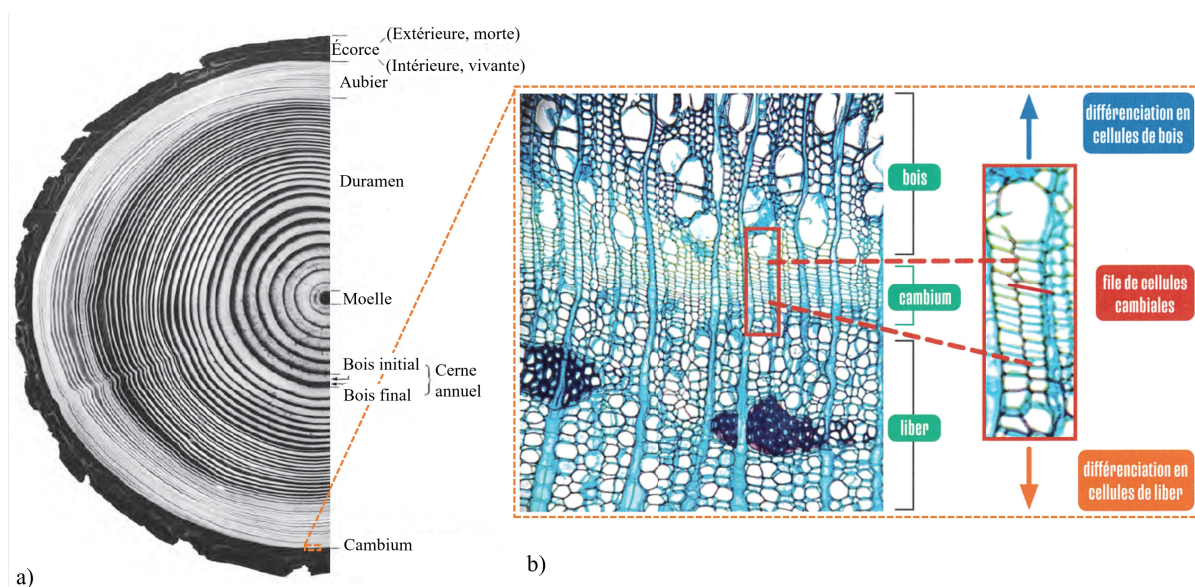


Figure 1.6- a) Section transversale d'une grume d'une essence résineuse (douglas) (Grosser, 1977), b) Coupe transversale colorée de peuplier au niveau du méristème (cambium) où se divise les cellules formant le bois du côté interne et l'écorce (le liber) du côté externe (Lenne, 2021)

## 1.2.2 La morphologie anatomique des résineux

La structure anatomique des essences résineuses est représentée schématiquement sur la Figure 1.7. Elle se compose de cellules de trachéides orientées suivant la direction longitudinale, de rayons ligneux distribués suivant la direction radiale et chez certaines essences de canaux résinifères. Les cellules de trachéides ont deux principales fonctions : la conduction longitudinale de la sève brute dans l'aubier (en périphérie du tronc) et un rôle de soutien mécanique sur l'ensemble de la section. Les rayons ligneux peuvent être de deux types. Ils sont

nommés hétérocellulaires lorsqu'ils sont composés de cellules de parenchyme et de trachéides radiales et homocellulaires lorsque seul des cellules de parenchyme sont présentes. Ces derniers ont un rôle de stockage de réserves et de conduction de la sève suivant la largeur du tronc. Chez certaines essences comme chez l'épicéa, des canaux résinifères sont présents au sein de rayons ligneux ou suivant la direction longitudinale. Leur fonction principale est le stockage de composés complexes formant une résine gluante générée par les cellules sécrétrices disposées autour du canal résinifère. En cas de « blessure » (ex : branche cassée, attaques d'insectes, etc.), la résine contenue dans les canaux résinifères s'écoule pour colmater la brèche et agir comme un pansement avec ses composés antiseptiques et toxiques.

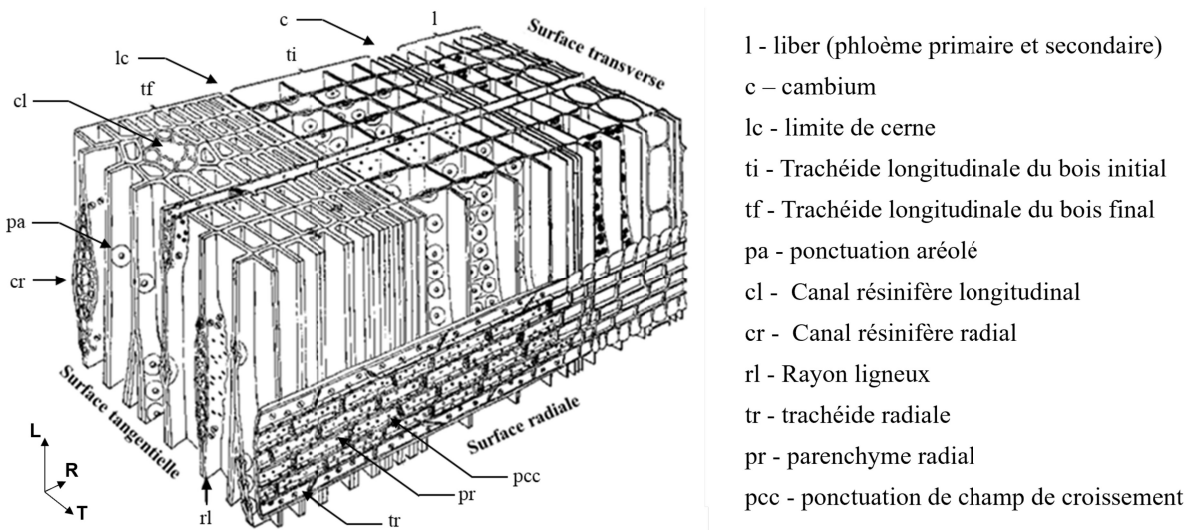


Figure 1.7- Vue schématique de la structure anatomique d'une essence résineuse (mélèze), extrait de (Grosser, 1977) initialement issue de Mägdefrau, 1951

La croissance des arbres en région tempérée évolue en fonction des saisons impactant les dimensions des trachéides. Les trachéides situées dans le bois initial (aussi appelé bois de printemps) ont une épaisseur de paroi plus faible avec une taille de lumen (vide cellulaire) plus importante pour maximiser le flux de sève comparé au bois final (ou bois d'été) ayant une paroi épaisse et un lumen réduit. Dans la section du tronc et des branches, l'arrêt de la croissance de l'automne jusqu'au printemps prochain est marqué par une limite de cerne. Ces variations de dimensions induisent une densité hétérogène au sein du cerne expliquant la différence de couleur visible sur la Figure 1.6a entre le bois initial (clair) et le bois final (foncé). Avec leur longueur allant de moins de 1 mm jusqu'à 5 mm pour une moyenne de 3 mm environ, les trachéides composent environ 93 % du volume de bois (Wilson and White, 1986). Les rayons ligneux, eux, représentent approximativement 6 % et 1 % pour les canaux résinifères (Panshin and De Zeeuw, 1980).

Afin d'assurer une continuité du flux de sève brute, l'ensemble des cellules sont connectées les unes aux autres par de petits orifices appelés ponctuations assurant ainsi la migration du fluide des racines jusqu'aux feuilles via l'évapotranspiration (Dixon, 1914; Lenne, 2021). Les

ponctuations ont des caractéristiques différentes en fonction de leur localisation et des cellules qu'elles connectent. Au sein des essences résineuses, il est possible de distinguer trois types de ponctuations (Figure 1.8). Elles peuvent être :

- aréolées (entre trachéides),
- semi-aréolées (entre trachéides et cellules de parenchyme),
- simples (entre cellules de parenchyme).

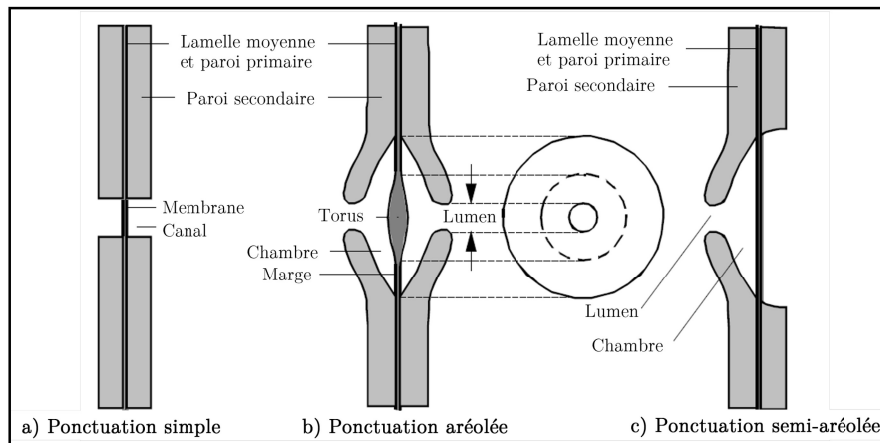


Figure 1.8- Représentation schématique des trois types de ponctuation présent dans les résineux (illustration de (Perré, 2007b) initialement issue de (Grosser, 1977)

Elles se composent toutes d'une membrane issue de la paroi primaire et d'une cavité localisée sur la paroi secondaire. Les ponctuations simples (Figure 1.8a) sont de forme circulaire et situées entre deux cellules de parenchyme. La cavité correspond à une absence de paroi secondaire et le passage des fluides s'effectue à travers de petits canaux appelés plasmodesmes. Les ponctuations aréolées (Figure 1.8b et Figure 1.9), localisées entre deux trachéides, se composent d'une membrane mobile partiellement hydrolysé (marge) assurant le passage du fluide et en son centre du torus, imperméable aux transferts massiques (Kollmann and Côté, 1968). Ces ponctuations aréolées ont la particularité d'être ouvertes ou fermées au passage de la sève : la ponctuation est alors dite aspirée lorsque le torus se trouve appliquée contre la paroi secondaire de par les pressions capillaires lorsque du gaz (bulle d'air) est présent sur l'une de ses faces (Siau, 1984). Ce phénomène peut apparaître lorsque l'arbre est vivant en réponse au risque d'embolie estivale ou hivernale. Le séchage du bois vert conduit également à l'aspiration des ponctuations aréolées suite au départ de l'eau au sein des lumens. Dans ce cas, les ponctuations localisées dans le bois de printemps se retrouvent presque toutes avec le torus plaqué contre la paroi secondaire (Figure 1.9b) et restent dans cette position par des liaisons de Van der Valls. Dans le bois d'été, les ponctuations sont moins assujetties à l'aspiration du fait qu'elles aient une dimension plus réduite que dans le bois de printemps (Liese and Bauch, 1967; Siau, 1984).

La communication entre les rayons ligneux et les trachéides (Figure 1.8c) est opérée par des ponctuations de champ de croisement semi-aréolés (simple du côté de la cellule de parenchyme

et aréolée du côté de la trachéide). Elles peuvent avoir différentes caractéristiques en fonction des essences avec un passage des fluides qui peut être plus ou moins complexe (Figure 1.10). Chez l'épicéa, elles sont de type picéoïde. De plus amples informations concernant la structure du bois sont disponibles dans de nombreux ouvrages dédiés (Kollmann and Côté, 1968; Siau, 1984; Trouy, 2015).

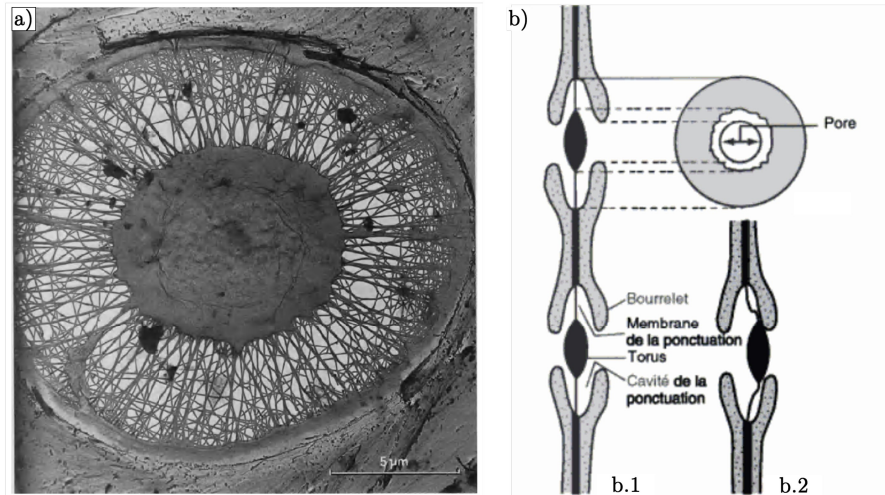


Figure 1.9- Vue de face effectuée au microscope électronique à balayage d'une ponctuation aréolée non aspirée (Siau, 1984), b) Représentation schématique en position ouverte et fermée d'une ponctuation aréolée (Hopkins, 2003)

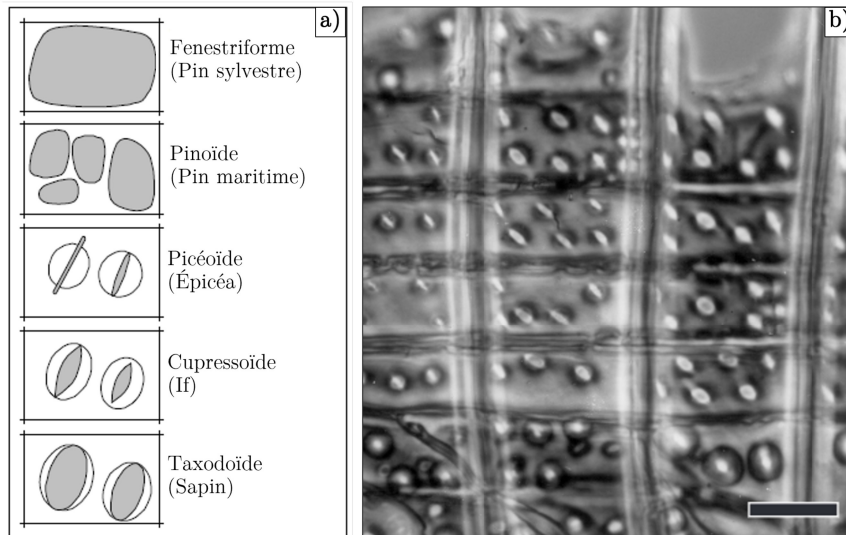


Figure 1.10- Représentation schématique des types de ponctuation semi-aréolées visibles chez les résineux (Perré, 2007b), b) visualisation de ponctuations semi-aréolées de type picéoïde d'épicéa ; échelle 20μm (Richter et al., 2004)

### 1.2.3 Les constituants chimiques des résineux

Les parois cellulaires se composent de trois principales macromolécules, avec la cellulose, l'hémicellulose et les lignines. L'agencement de ces constituants forme la matière lignocellulosique. Un quatrième type de constituants, nommé extractibles, est également



présent au sein des rayons ligneux et/ou des canaux résinifères. Le Tableau 1.1 indique les proportions moyennes de chacun des constituants pour les essences résineuses.

Tableau 1.1- Proportions massiques moyennes des constituants des essences résineuses (Dumon and Gélus, 1982)

Constituant	Proportion massique (%)
Cellulose	42 <sup>±2</sup>
Hémicellulose	27 <sup>±2</sup>
Lignines	28 <sup>±3</sup>
Extractible	3 <sup>±2</sup>

L'agencement de ces constituants au sein des parois est complexe mais peut être représentée de manière schématique et simplifiée tel qu'illustré en Figure 1.11 d'après les travaux d'Heger (2004). Au sein de ces chaînes de polymères, les constituants du bois sont liés entre eux par des liaisons covalentes (fortes) et des ponts hydrogène (faibles). Les lignines sont des molécules aromatiques se situant au sein de la matrice amorphe. Elles peuvent être assimilées à la « colle du bois » et ont pour rôle d'imperméabiliser la paroi cellulaire. La cellulose est un homopolymère linéaire de glucose avec la particularité de se présenter sous forme cristalline (structure régulière et ordonnée) et paracristalline (structure irrégulière et moins ordonnée). Enfin, les hémicelluloses sont des hétéropolymères (composé de plusieurs monomères) avec des ramifications de différents sucres.

Cette organisation de la paroi confère des propriétés hydrophiles à la paroi lignocellulosique au niveau des zones paracristallines de la cellulose, de l'hémicellulose à travers les groupements OH libres présents en grand nombre et les lignines mais en plus faible proportion. La structure pariétale n'est pas abordée dans ce manuscrit mais le lecteur peut se référer à de nombreux ouvrages décrivant en détails la composition chimique des composants du bois (Pettersen, 1984) et leur organisation (Kollmann and Côté, 1968; Panshin and De Zeeuw, 1980).

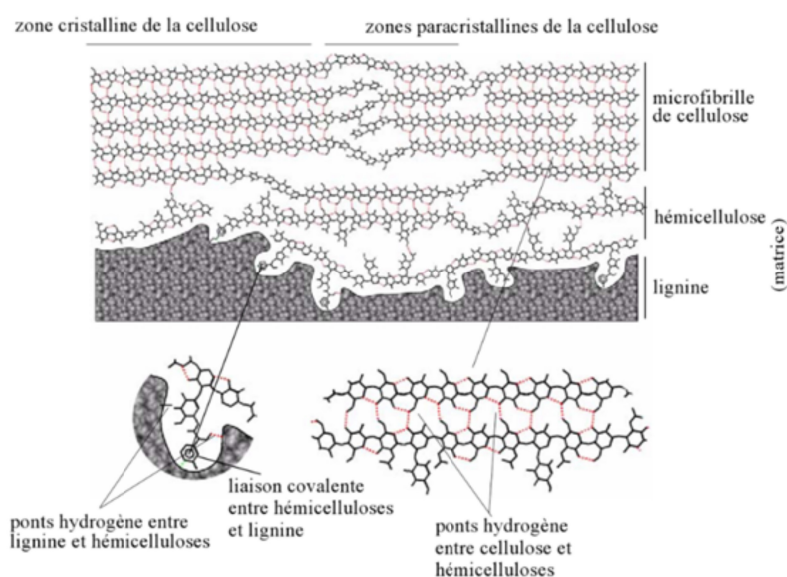


Figure 1.11- Représentation schématique de l'organisation des chaînes de polymère d'une paroi cellulaire à l'état anhydre (Navi and Morlier, 2005)

## 1.2.4 L'eau dans le bois

### 1.2.4.1 Les états de l'eau présents dans le bois

De par la composition chimique et la structure anatomique du bois, l'eau peut être présente sous les trois formes suivantes :

- liée à la paroi lignocellulosique par des liaisons hydrogènes,
- vapeur dans les vides cellulaires (lumens),
- liquide (également appelée eau libre) au sein des vides cellulaires.

L'eau liée correspond aux molécules d'eau localisées sur les sites hydroxyles disponibles au sein de la cellulose paracristalline (ou amorphe) et l'hémicellulose principalement. Elles sont liées aux chaînes de polymères à travers des liaisons hydrogène ou forces de Van der Waals comme illustré schématiquement sur la Figure 1.12. Plusieurs couches peuvent se former écartant ainsi les chaînes de polymères s'accompagnant au niveau macroscopique de variations dimensionnelles (retrait/gonflement) du matériau. Ces variations dimensionnelles sont fonctions des directions de croissance de l'arbre et de l'orientation de l'angle des micro-fibrilles (Peck, 1957). Dans le cas de l'épicéa, le retrait volumique dans le domaine hygroscopique (entre le point de saturation des fibres et l'état anhydre) est d'environ 13 % (FNB, 2018) avec des disparités suivant les directions de référence étant de 8,7 % suivant la direction tangentielle, 3,9 % dans la direction radiale et 0,2 % dans la direction longitudinale (Perré, 2007a).

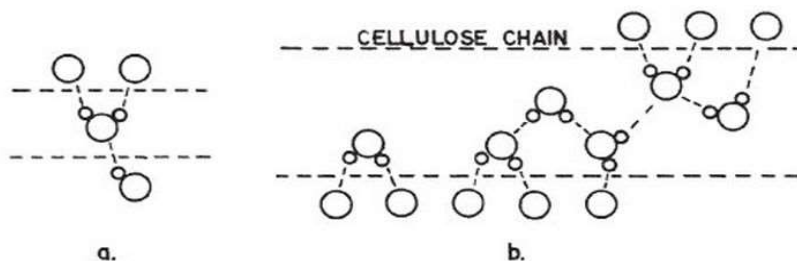


Figure 1.12- Représentation schématique de molécules d'eau liées sur des chaînes de cellulose suivant les sites hydroxyles primaires (a) et secondaires (b) (Skaar, 1988)

Lorsque la paroi est saturée en eau liée, cela signifie que le point de saturation des fibres (PSF) est atteint. Pour l'ensemble des essences, le PSF se situe à environ 30 % de teneur en eau pour une température de 20 °C (Siau, 1984). Au-dessus de cette valeur, de l'eau libre peut être présente mais n'engendra pas de changement dimensionnel. Cette eau est également appelée eau capillaire, car elle est soumise aux forces capillaires au sein des lumens des cellules (chapitre 1.3.2.2).

Dans le domaine de la construction, la mesure de la teneur en eau moyenne  $X$  d'une pièce de bois s'effectue sur base sèche (équation 1.1). C'est-à-dire, par rapport à son état anhydre obtenu après passage dans une étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de sa masse.

$$X = \frac{m_h - m_0}{m_0} \quad (1.1)$$

La plage de variation de teneur en eau – généralement exprimée en pourcentage – s'étend de 0 % (état anhydre) à environ 400 % pour l'épicéa (saturation intégrale, fonction de la porosité du bois). Chacun des états de l'eau confère au bois une teneur en eau moyenne suivant des proportions variables. Par exemple la vapeur d'eau contenue dans les lumens est négligeable au regard de l'eau liée et libre (capillaire).

#### 1.2.4.2 Teneur en eau d'équilibre

La teneur en eau d'une pièce de bois varie en fonction des conditions atmosphériques pour tendre vers un équilibre hygrothermique avec l'air humide. Cette caractéristique confère au bois un caractère hygroscopique où la teneur en eau d'équilibre (EMC) est fonction de nombreux paramètres.

##### Effet de l'humidité relative sur l'EMC

La caractérisation de l'EMC s'effectue selon la NF ISO 12571 (2013). Le principe consiste à maintenir une température constante et à mesurer la masse stabilisée d'un échantillon exposé à plusieurs paliers d'humidité relative. Les résultats sont présentés sous forme graphique à travers la courbe d'isotherme de sorption. L'allure de la courbe d'isotherme, telle que représentée en Figure 1.13, est similaire pour toutes les essences. Elle résulte des composantes de l'eau liée et libre qui vont se manifester de manière prépondérante sur certaines plages d'humidité relative (HR) avec :

- 1 Pour des HR inférieures à 25 %, la liaison de molécules d'eau sur les sites hydroxyles libres des chaînes de polymère (monocouche),
- 2 Pour les HR intermédiaire, la juxtaposition de plusieurs couches d'eau liée (multicouche) entre les chaînes de polymère Figure 1.12b),
- 3 Pour les HR supérieures à 80 %, l'eau capillaire (condensation capillaire) dans les plus petits pores.

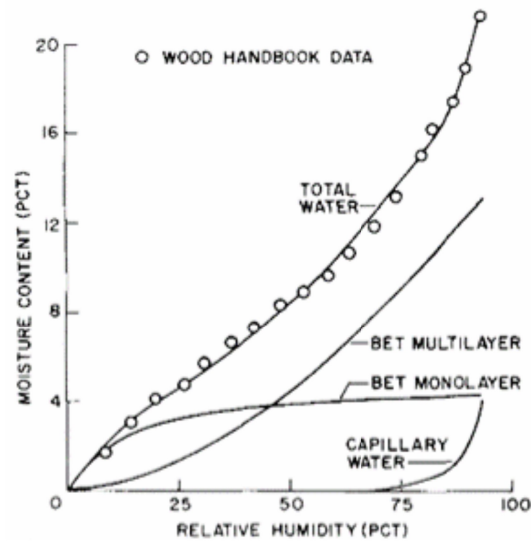


Figure 1.13- Isotherme de sorption type du bois (Simpson, 1980)

Le paramètre prédominant affectant l'EMC est l'humidité relative.

### Effet de la température sur l'EMC

Une température plus élevée induit une EMC plus faible, comme illustré sur la Figure 1.14. Ce phénomène s'explique par une énergie cinétique des molécules d'eau plus élevée rendant moins probable la liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les sites hydroxyles des chaînes de polymères (Navi and Morlier, 2005). Ce caractère est plus marqué pour les plages d'humidité relative situées entre 40 et 80 %.

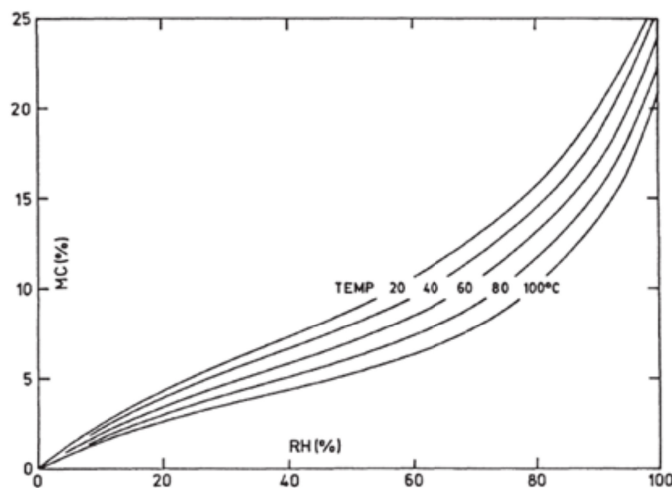


Figure 1.14- Isotherme de sorption de l'épicéa pour différentes températures extrait de Skaar (1988) avec les données issues de Stamm (1964)

### Effet de l'histoire sur l'EMC

L'effet de l'histoire du matériau s'exprime lors de cycles d'adsorption-désorption qui induisent une boucle d'hystérèse avec un retour à un équilibre hygroscopique différent de celui de départ (Shi and Avramidis, 2017). Pour une température et une humidité relative données, la teneur en eau mesurée en phase de désorption est supérieure à la teneur en eau mesurée en

phase d'adsorption. Ce phénomène est appelé hystérésis de sorption (Figure 1.15). Il est fonction d'un grand nombre de paramètres dont notamment les contraintes mécaniques, l'énergie d'activation des liaisons, la température. Il est plus fortement marqué pour la plage d'humidité relative située entre 40 et 80 % d'humidité relative et son effet s'estompe pour les températures élevées (Almeida et *al.*, 2018; Chen et *al.*, 2018; Skaar, 1988).

De nombreux travaux se sont intéressés à l'hystérésis de sorption avec l'établissement de plusieurs modèles physiques ou empiriques pouvant relier la teneur en eau à l'humidité relative et l'histoire de ses variations (Skaar, 1988).

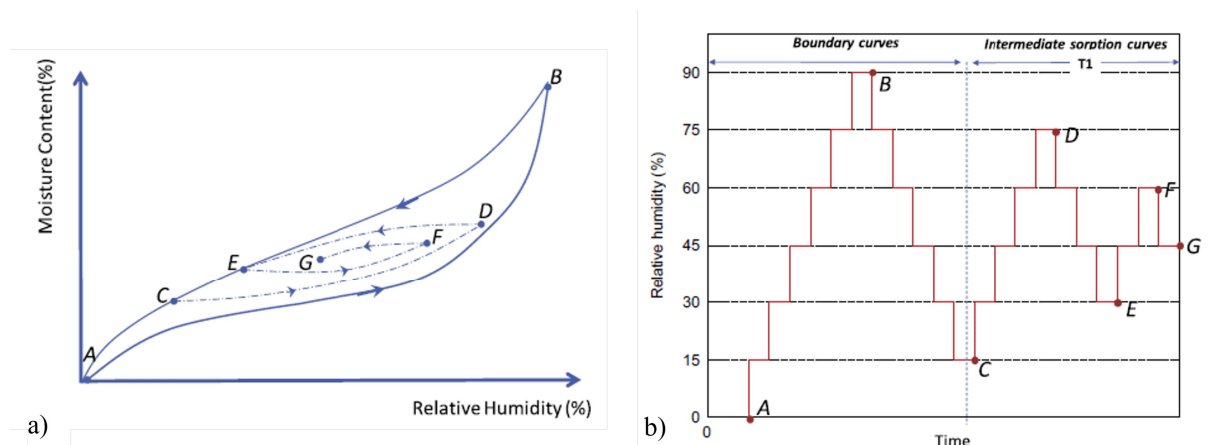


Figure 1.15- Évolution schématique de l'hystérésis de sorption (a) après plusieurs cycles d'adsorption et désorption décrit en (b) (Rémond et *al.*, 2018)

### Autres paramètres influençant l'EMC

Les autres paramètres influençant l'EMC sont les contraintes mécaniques (Hill et *al.*, 2012; Skaar, 1988), la teneur en extractibles (Vahtikari et *al.*, 2017) et l'essence de bois (Keylwerth, 1969). Cette dernière est due aux variations de concentration des composants du bois (cellulose et son taux de cristallinité, hémicellulose, lignines et extractibles) offrant un nombre plus ou moins important de groupements OH disponibles pour l'adsorption de l'eau (Pettersen, 1984).

### 1.2.5 Techniques de détermination de la teneur en eau

Une large gamme de techniques est disponible pour déterminer la teneur en eau dans un échantillon de bois. La plus répandue est la méthode gravimétrique décrite par la norme NF EN 13183-1 (2002). L'inconvénient principal de cette méthode est qu'elle est destructive. Par ailleurs, la valeur obtenue est une moyenne de la teneur en eau de l'éprouvette ce qui est une limitation lorsque la distribution spatiale d'humidité est nécessaire. Pour y accéder, l'éprouvette peut être découpée en tranche successive puis, chaque tranche est pesée pour déterminer la teneur en eau de cette dernière après un passage à l'étuve. Cependant, cette méthode est fastidieuse et ne permet pas une précision fine de la distribution de la teneur en eau.

Une autre méthode normée consiste à utiliser la résistivité électrique entre deux broches métalliques insérées dans une pièce de bois (NF EN 13183-2, 2002). Cette méthode est

pertinente pour les mesures *in situ* dans les structures en bois situées entre 6-8 et 25-30 % (Tiitta et *al.*, 1999) mais est imprécise au-delà. Les écarts entre la teneur en eau moyenne mesurée suivant la méthode gravimétrique (référence) et résistivité électrique peuvent atteindre 1 % et 6 % pour des teneurs en eau moyenne proche de 8 % et 22 % respectivement. Par ailleurs une vigilance particulière du positionnement des capteurs par rapport à l'orientation des fibres du bois doit être effectuée pour avoir une mesure fiable (NF EN 13183-2, 2002; Tiitta and Olkkonen, 2002).

En laboratoire, la distribution de la teneur en eau peut être évaluée à l'aide de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Il s'agit d'une technique non invasive et non destructive basée sur le temps de relaxation de l'hydrogène protium ( $^1\text{H}$ ) après avoir été exposé à un champ magnétique (Hameury and Sterley, 2006; Passarini et *al.*, 2015). À partir des gradients de champ magnétique, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet d'accéder à une distribution spatiale de l'eau (Zhou et *al.*, 2018). Le principal avantage de la RMN est l'accès à l'état de l'eau (liée ou libre) déterminé en fonction du temps de relaxation (Almeida et *al.*, 2007; Gezici-Koç et *al.*, 2017). Néanmoins, la structure anatomique reste inaccessible à l'observation, car les noyaux de spin nucléaire du carbone-12 et l'oxygène-16 – présents dans la paroi lignocellulosique – sont nuls et ne peuvent donc pas émettre de signaux RMN (Houts et *al.*, 2004). Une autre technologie, basée sur l'atténuation des rayonnements ionisants (rayons X ou neutrons), peut être utilisée pour visualiser la migration de l'eau dans un bois. De nombreux travaux ont montré le grand potentiel de ces techniques dans l'observation de l'absorption d'eau dans différents matériaux (Baettig, 2005; Desmarais et *al.*, 2016; Roels et *al.*, 2004; Sandberg and Salin, 2012) ou pour étudier les cinétiques de séchage d'une pièce de bois (Baettig, 2005; Remond, 2004). Ces techniques ont pour principal avantage d'accéder à l'évolution de la teneur en eau locale sans perturber le milieu étudié par l'insertion de capteurs. Cependant, l'évaluation quantitative, locale et précise de la teneur en eau au cours du temps reste le principal défi avec ces techniques.

### 1.3 Les transferts d'humidité et de chaleur au sein du bois massif

Le matériau bois comme décrit précédemment est un matériau poreux faiblement connecté et présentant une forte tortuosité. La matrice solide se compose de constituants partiellement hydrophiles qui induisent une complexité des transferts avec les changements état de l'eau générant un couplage des transferts chaleur-masse. D'autre part, la structure anatomique amène à une anisotropie des transferts suivant les directions de croissance du bois.

Dans cette partie, une description succincte des modes de transfert de chaleur et d'humidité est abordée et illustrée avec des exemples de résultats issus de modèles numériques et de données expérimentales.

### 1.3.1 Transferts thermiques dans le bois

Au sein d'un matériau solide, lorsqu'il n'y a pas de transfert de matière, le transfert thermique a lieu par conduction dès qu'il y a une différence de température entre deux points. La loi de Fourier exprime la densité de flux de chaleur  $\vec{J}_c$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) comme étant proportionnelle au gradient de température. La constante de proportionnalité nommée conductivité thermique  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) est alors fonction de la nature du matériau.

$$\vec{J}_c = -\lambda \vec{grad}(T) \quad (1.2)$$

La conductivité thermique d'un matériau de construction est caractérisée suivant la norme NF EN 12664 (2001) en régime permanent. Dans le cas du bois, elle est fonction de la direction orthogonale (L, R ou T), de la température et de la teneur en eau (Maclean, 1941; Suleiman et al., 1999). Outre son effet sur la conductivité, la présence d'eau a un impact sur le bilan de chaleur, à travers les enthalpies de changement d'état et les transferts enthalpiques associés aux transferts massiques. C'est pourquoi, il est nécessaire de s'intéresser aux transferts d'humidités de chaque phase de l'eau (liée, vapeur et libre) suivant leur force motrice associée.

### 1.3.2 Transferts massiques dans le bois

Les transferts massiques au sein du bois peuvent s'opérer à travers plusieurs voies de passage suivant l'état hydrique du matériau comme illustré schématiquement sur la Figure 1.16. À travers le milieu poreux, le transfert d'humidité peut s'effectuer dans les cavités (vapeur d'eau et eau libre) et dans la paroi lignocellulosique (eau liée).

#### 1.3.2.1 Diffusion de l'eau liée et de la vapeur d'eau

Le transfert d'humidité par diffusion est généré dès lors qu'un gradient de concentration est présent. Par analogie avec la loi de Fourier, le flux diffusif – exprimé à travers la loi de Fick – est proportionnel au gradient de concentration. Dans le cas monodimensionnel la densité de flux diffusif est exprimée suivant l'équation (1.3) :

$$\vec{J}_m = -D \vec{grad}(c) = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1.3)$$

avec  $J_m$  la densité de flux de matière ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ),  $D$  le coefficient de diffusion intrinsèque au matériau ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ), et  $c$  la concentration massique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

La force motrice est fonction de la phase considérée. À l'échelle locale, il convient de différencier la diffusion d'eau liée au sein de la paroi cellulaire et de vapeur dans les cavités, ayant chacune leur propre force motrice.

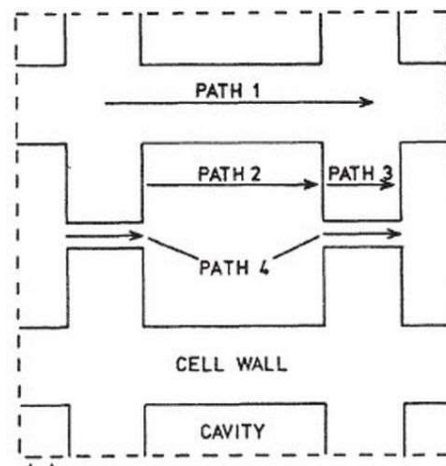


Figure 1.16- Schématisation des transferts d'humidité en transverse suivant différentes voies de passage possible (Skaar, 1988)

Le cheminement peut être continu sous forme d'eau liée à travers les parois ou de vapeur à travers les lumens. Le cheminement peut également être discontinu avec des changements d'état : l'eau traverse parois et lumens successifs respectivement à l'état vapeur et liée. Ces changements d'état sont endothermiques (eau liée → vapeur) ou exothermiques (vapeur → eau liée) et vont localement agir sur le champ température. De même, les états de l'eau libre et liée présentent des niveaux d'énergie différents. Cette différence d'enthalpie est appelée chaleur différentielle de sorption  $h_b$ . Sa valeur décroît avec la teneur en eau jusqu'à être égale à zéro au PSF (Figure 1.17).

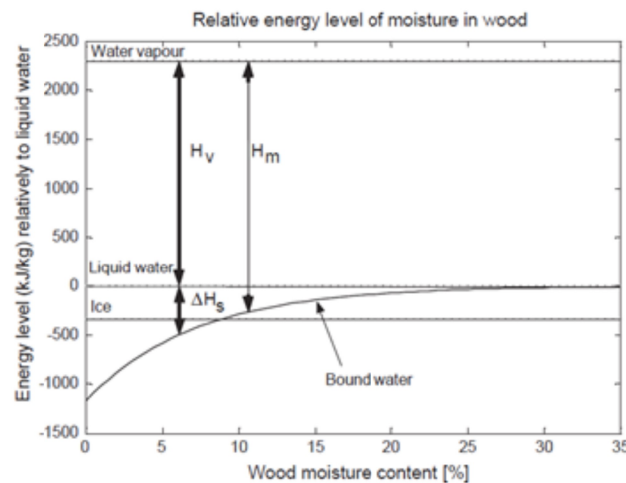


Figure 1.17- Enthalpie de l'eau liée par rapport à l'eau libre dans le bois (Hameury, 2005)

À l'échelle macroscopique, les contributions de la diffusion de vapeur et de l'eau liée sur le flux massique sont délicates à déterminer. La proportion du flux de matière de chacun des états de l'eau varie en fonction de nombreux paramètres tels que l'essence, la densité, la direction, la température et la teneur en eau du bois. Par conséquent, une seule force motrice est généralement choisie à l'échelle macroscopique et un coefficient de diffusion apparent est utilisé. Ce dernier doit être défini suivant les directions d'anisotropie du bois (L, R et T).



En dessous du point de saturation des fibres, seule la présence de vapeur eau au sein des lumens et l'eau liée dans la paroi cellulaire sont considérées. Elles ont chacune leur propre force motrice avec :

Pour la vapeur d'eau, le gradient de pression partielle de vapeur d'eau :

$$J_v = \frac{M_v}{RT} \frac{D_v}{\mu} \frac{\partial P_v}{\partial x} \quad (1.4)$$

avec  $M_v$  la masse molaire de vapeur (0,018 kg.mol<sup>-1</sup>),  $R$  la constante des gaz parfait (8,314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>),  $T$  la température (K),  $D_v$  la diffusion de vapeur dans l'air (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>),  $\mu$  le facteur de résistance à la diffusion du matériau et  $P_v$  la pression de vapeur (Pa).

Pour l'eau liée, le gradient de teneur en eau :

$$J_b = -\rho_s D_b \frac{\partial X}{\partial x} \quad (1.5)$$

avec  $\rho_s$  la masse volumique de la matrice solide (kg.m<sup>-3</sup>),  $D_b$  la diffusion d'eau liée (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) et  $X$  la teneur en eau (sur base sèche).

Ces deux dernières équations correspondent à un gradient monodimensionnel, selon  $x$  .

### 1.3.2.2 Migration liquide

Sous l'effet d'un gradient de pression, la migration d'eau liquide dans le bois massif a lieu dans la porosité connectée. Au sein d'une trachéide pouvant être assimilée à un tube capillaire, le flux liquide théorique est proportionnel à la puissance 4 du rayon du conduit d'après la loi de Poiseuille. En d'autres termes, sous l'effet d'un même gradient de pression, le débit de liquide traversant une trachéide ayant un rayon de 20  $\mu\text{m}$  équivaut à un total de 16 trachéides avec un diamètre de 10  $\mu\text{m}$  ou 256 avec un rayon de 5  $\mu\text{m}$  (Tyree Melvin T and Zimmermann, 2002). Cependant cette approche simplifiée ne tient pas compte de la connectivité partielle entre les trachéides – d'une longueur moyenne de 3 mm – fonction des punctuations aréolées aspirées ou non d'après leur localisation dans le bois initial ou le bois final. Pour tenir compte de la complexité du milieu poreux, la migration d'une seule phase est décrite suivant la loi de Darcy faisant intervenir le concept de perméabilité intrinsèque  $k$  (m<sup>2</sup>) caractérisant la capacité d'un fluide à s'écouler au sein du milieu poreux lorsqu'il est soumis à un gradient de pression. La perméabilité dépend à la fois des caractéristiques du fluide (de la viscosité notamment) et de la géométrie du milieu poreux traversé.

$$k = \frac{Q \cdot L \cdot \eta}{S \cdot \Delta P} \quad (1.6)$$

avec  $Q$  le débit volumique en régime permanent (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>),  $L$  la longueur (m),  $\eta$  la viscosité du fluide (Pa.s),  $\Delta P$  la différence de pression aux extrémités de l'échantillon (Pa).

**Pression capillaire**

Dans le cas de la mise en contact d'un liquide à la surface d'un matériau poreux initialement non saturé avec ce liquide, la coexistence de trois phases a lieu : solide, gazeuse et liquide. À l'interface liquide/gaz, la tension superficielle  $\sigma$  (N.m<sup>-1</sup>) exprime la dissymétrie des forces de cohésion des molécules d'eau. Elle est fonction de la température, des fluides en présence et de leur pureté. Dans le cas de l'eau en contact avec l'air, la valeur de la tension superficielle évolue linéairement en fonction de la température entre 0 °C et 100 °C suivant l'expression suivante :

$$\sigma = (76,06 - 0,1676 \cdot T) \cdot 10^{-3} \tag{1.7}$$

avec  $T$  la température (°C)

À l'interface de ces trois phases, un angle de contact  $\theta$  est visible à l'équilibre mécanique qui dépend de la mouillabilité du solide par le liquide. Lorsque cet angle de contact est inférieur à 90°, le solide est dit mouillant et non mouillant dès lors que l'angle est supérieur. Une illustration est donnée sur la Figure 1.18 suivant les deux cas de figures au sein d'un tube.

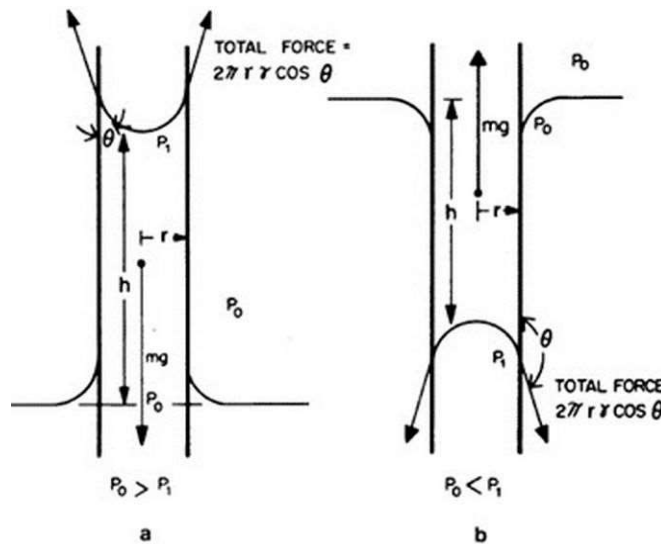


Figure 1.18- Représentation schématique de l'effet de l'angle de contact à l'interface liquide gaz avec a) un liquide mouillant et b) non mouillant (Siau, 1984)

Ces propriétés (tension superficielle et angle de contact) ont une influence sur la forme de l'interface liquide/gaz. Cette forme tend à minimiser l'énergie de surface. Il en résulte une différence de pression de part et d'autre de l'interface.

Un équilibre s'établit entre les phases au sein du tube vertical suivant la loi de Laplace (1.8).

$$P_g - P_l = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \theta \tag{1.8}$$

où la pression de gaz est une combinaison de la pression de vapeur et de l'air sec en considérant l'air comme un gaz parfait :

$$P_g = P_v + P_a \tag{1.9}$$

De l'équation (1.8), il est possible de déduire que la pression capillaire est inversement proportionnelle au rayon du tube (Tableau 1.2). La hauteur de montée au sein du tube vertical est donnée par la loi de Jurin suivant la relation suivante :

$$\Delta H = \frac{2\sigma \cos\theta}{r \rho_l g} \quad (1.10)$$

avec  $\Delta H$  la hauteur d'eau (m),  $\rho_l$  la masse volumique de l'eau ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $\theta$  égale à  $0^\circ$  et  $g$  l'accélération de pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ ).

Tableau 1.2- Relation entre rayon du capillaire et la différence de pression avec son équivalent en hauteur d'eau (Perré and Badel, 2006)

Rayon du capillaire		$\Delta P$ (équivalent en hauteur de colonne d'eau)	
1	mm	0,146 kPa	(14,9 mm)
100	$\mu\text{m}$	1,46 kPa	(0,149 m)
10	$\mu\text{m}$	14,6 kPa	(1,49 m)
1	$\mu\text{m}$	146 kPa	(14,9 m)
0,1	$\mu\text{m}$	1,46 MPa	(149 m)
0,01	$\mu\text{m}$	14,6 MPa	(1,49 km)

Au sein de l'épicéa, le rayon équivalent des lumens des trachéides varie entre le bois initial et le bois final de 2 à 20  $\mu\text{m}$  en moyenne avec des lumens pouvant être inférieur à 2  $\mu\text{m}$  de diamètre au niveau des dernières rangées de trachéides dans le bois final (Perré, 1993). De cette distribution, résulte des pressions capillaires différentes lors de l'imbibition.

### 1.3.3 Détermination des propriétés de transferts massique du bois massif

#### 1.3.3.1 Détermination du coefficient de diffusion massique

La caractérisation du coefficient de diffusion de vapeur d'eau est effectuée en régime permanent et en condition isotherme suivant la méthode de la coupelle (NF EN ISO 12572, 2016). Le principe consiste à établir de part et d'autre des faces d'un échantillon une pression partielle de vapeur différente afin d'imposer un flux de vapeur à travers l'échantillon. Pour ce faire, l'échantillon est positionné au-dessus d'une coupelle contenant soit une solution saline donnant une humidité relative connue, soit un dessiccant.

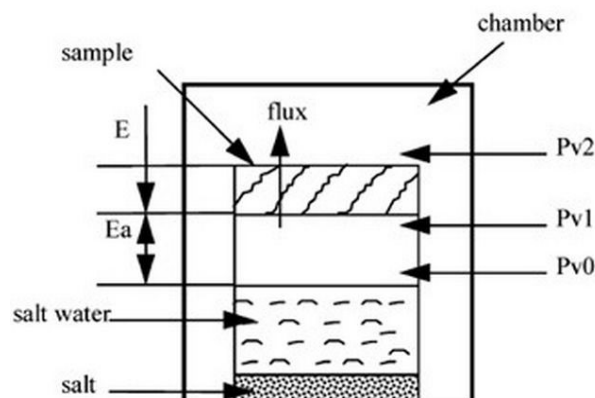


Figure 1.19- Représentation schématique du montage de la méthode de la coupelle (Zohoun et al., 2003)

Il a été montré que cette méthode peut conduire à des erreurs de mesure si la lame d'air intérieure est négligée (Zohoun et *al.*, 2003) ou lorsque le flux advectif n'est pas considéré (Duforestel, 2015). Par ailleurs, le système d'étanchéité peut être imparfait (Zelinka et *al.*, 2016) et conduire à des flux périphériques 2D (Claesson et *al.*, 1994). Enfin, dans le cas de la mesure du coefficient de diffusion en condition sèche (dry cup), le maintien d'une humidité relative constante proche de zéro est délicate et le choix du dessiccant peut avoir un impact important (Colinart et *al.*, 2020). Dès lors, les conditions limites deviennent incorrectes.

La valeur du coefficient de diffusion peut également être déterminée en régime transitoire par méthode inverse lors d'un essai de sorption en condition isotherme. Pour ce faire, l'échantillon est soumis à un changement soudain d'humidité relative afin de suivre la dynamique du système lorsque l'échantillon tend vers le nouvel équilibre. Le temps caractéristique est alors fonction du coefficient de diffusion du matériau. La méthode la plus usuelle consiste à suivre l'évolution de la masse consécutivement à ce changement de condition limite (Agoua et *al.*, 2001). Une amélioration de cette méthode a été développée par Perré et *al.* (2015) en suivant l'humidité relative en face arrière suite changement d'humidité relative. Dans ce cas, seule une face de l'échantillon est exposée à un palier d'humidité relative et son évolution en face arrière est mesurée par un capteur (Figure 1.20). Dans cette configuration, l'étanchéité périphérique est assurée avec une membrane en caoutchouc qui a montré son efficacité et simplicité d'utilisation (Perré, 1987; Zohoun, 1998). Suivant cette méthode, l'humidité relative finale mesurée en face arrière est connue ce qui permet de réduire la durée de l'essai.

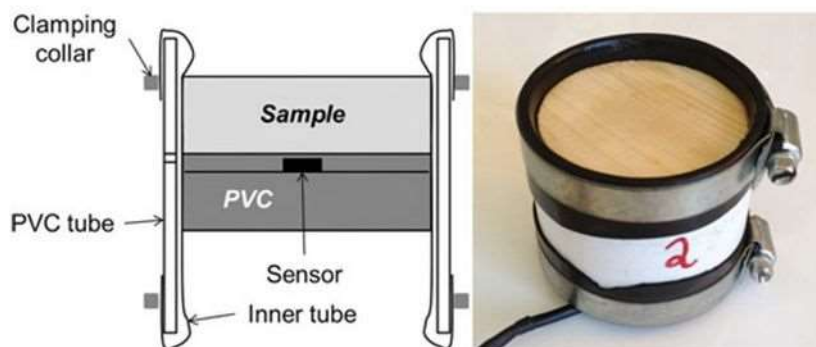


Figure 1.20- Principe de montage expérimental avec l'utilisation d'une membrane caoutchouc pour l'étanchéité périphérique (Zohoun, 1998) pour la détermination du coefficient de diffusion à la vapeur en face arrière (Perré et *al.*, 2015)

La mesure du coefficient de diffusion en régime transitoire peut permettre de mettre en évidence le caractère double-échelle de la diffusion de certain matériau tel que les panneaux de fibres basse densité (Challansonnex et *al.*, 2019). En ce qui concerne le bois massif, les coefficients de diffusion obtenus selon les directions transverses du bois (R et T), en régime permanent (Agoua et *al.*, 2001; Tarmian et *al.*, 2012) et transitoire (Challansonnex et *al.*, 2018; Perré et *al.*, 2015) sont similaires. Ceci tend à confirmer l'absence de cet effet double échelle de la diffusion en direction transverse. Ce comportement peut s'expliquer par une forte tortuosité

et une faible perméabilité impliquant une résistance de la diffusion principalement localisée au niveau des parois cellulaires (Siau, 1984).

D'autres méthodes ont été développées permettant de suivre le profil de teneur en eau pouvant ensuite être utilisé pour déterminer le coefficient de diffusion par méthode inverse. Pel et *al.* (1996) ont notamment utilisés la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour déterminer le coefficient de diffusion de différents matériaux de construction.

### 1.3.3.2 Détermination de la perméabilité

Dans une pièce de bois vert non saturée intégralement, deux phases fluides coexistent (gaz et liquide). Les modifications possibles de la connectivité entre les trachéides avec l'aspiration des punctuations aréolées conduisent à définir pour le bois une perméabilité intrinsèque  $k$  ( $m^2$ ) pour chaque phase considérée et une perméabilité relative  $kr$  variant entre 0 et 1 en fonction du taux d'humidité.

Pour la phase gazeuse :

$$u_g = \frac{k_g kr_g}{\eta_g} \vec{\text{grad}} (P_g) \quad (1.11)$$

Pour la phase liquide :

$$u_l = \frac{k_l kr_l}{\eta_l} \vec{\text{grad}} (P_l) \quad (1.12)$$

avec la pression liquide  $P_l$  reliée à la pression gazeuse par l'intermédiaire de la pression capillaire :

$$P_l = P_g - P_c \quad (1.13)$$

Dans le cas de la perméabilité gazeuse, l'échantillon étudié est préalablement séché (pour éliminer toute phase liquide) puis soumis à une différence de pression engendrant un flux d'air devant être quantifié pour déterminer une perméabilité en régime permanent. Le principe général est présenté en Figure 1.21 avec l'utilisation d'une membrane caoutchouc pour l'étanchéité périphérique de l'échantillon.

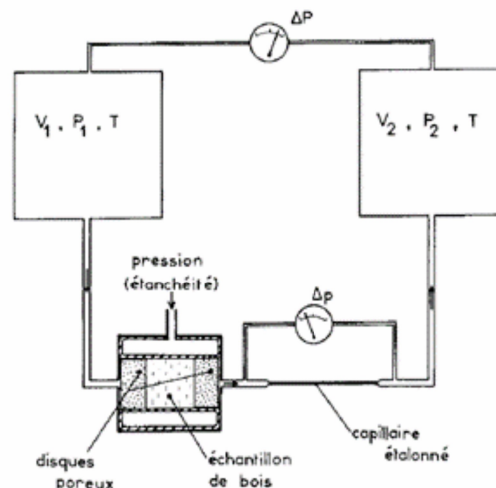


Figure 1.21- Représentation schématique d'un dispositif de mesure de la perméabilité à l'air (Perré, 1987)

La mesure de la perméabilité à l'air varie d'un échantillon à l'autre suivant la variation naturelle et locale du bois en fonction des conditions de croissance de l'arbre. Des tendances peuvent cependant être données avec une perméabilité gazeuse longitudinale de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  et de  $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  dans le plan transverse (Comstock and Côté, 1968; Perré, 1987). Il s'agit d'ordre de grandeur avec des variations parfois supérieures à un facteur 100 autour de ces valeurs selon les essences. Il est à noter également que le soin apporté à la préparation de l'échantillon et de l'état de surface sont des paramètres pouvant impacter la mesure de la perméabilité (Choong et *al.*, 1975). L'utilisation d'un microtome pour rafraîchir la surface est une solution pour limiter l'obstruction des lumens par détachement de la paroi cellulaire ou de poussières.

Concernant la phase liquide, les spécificités de la structure anatomique du bois, les interactions entre les molécules d'eau avec la paroi cellulaire et la présence d'air dans les pores rendent plus complexe la détermination de la perméabilité liquide. En effet, la saturation complète des pièces de bois étant difficile à obtenir, un écoulement biphasique a lieu. Les travaux de Tesoro et *al.* (1972) ont montré que la perméabilité longitudinale d'un échantillon initialement saturée en eau diminuait drastiquement dès lors que la saturation diminuait légèrement. Ces résultats ont été obtenus avec un dispositif expérimental reprenant le même principe que présenté en Figure 1.21 mais en intégrant deux arrivées (air saturée en vapeur d'eau et liquide). L'écoulement de la phase liquide est donc impacté par la phase gazeuse ce qui rend complexe la détermination de la perméabilité relative  $kr$  fonction de la concentration de chacune des phases dans le milieu poreux et pondérant ainsi la perméabilité intrinsèque du milieu (Tesoro et *al.*, 1974).

### 1.3.3.3 Détermination de l'absorption d'eau dans le cas de l'imbibition

Au niveau normatif, la norme NF EN ISO 15148 (2003) permet de caractériser l'absorption d'eau  $A_w$  par un matériau préalablement à l'équilibre hygroscopique. Le principe consiste à mettre une face de l'échantillon en contact avec de l'eau et de mesurer la reprise de masse au cours du temps afin d'obtenir le coefficient d'absorption d'eau  $A_w$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ) en régime permanent. Cette méthode a pour avantage de mettre en évidence les différences d'absorption suivant les directions principales du bois (L, R et T). Cependant l'information est globale et ne donne pas accès à la distribution locale de teneur en eau au sein de l'échantillon au cours du temps. Pour étudier la migration de l'eau au sein du bois, la radiographie aux rayons X est une possibilité tel qu'illustré sur la Figure 1.22 montrant une hétérogénéité de la migration liquide suivant les directions orthogonales (L, R et T). Lors de cette expérience, la face inférieure des échantillons d'épicéa (initialement sec à l'air) a été mise en contact avec de l'eau liquide. L'acquisition des radiographies au cours des 60 premières minutes d'imbibition révèle une migration de l'eau plus rapide dans le bois final que dans le bois initial (Zillig, 2009; Derome et *al.*, 2005; Sedighi-Gilani et *al.*, 2012). Cette différence de migration – visible à travers la

présence d'eau dessinant la structure intra-cerne du bois (en gris clair, le bois humide et en noir, le bois sec) – peut être expliquée par une pression capillaire plus élevée dans le bois final que dans le bois initial. De plus, une perméabilité plus faible dans le bois initial dû au séchage avec l'aspiration des ponctuations aréolées peut conduire à une migration capillaire plus complexe.

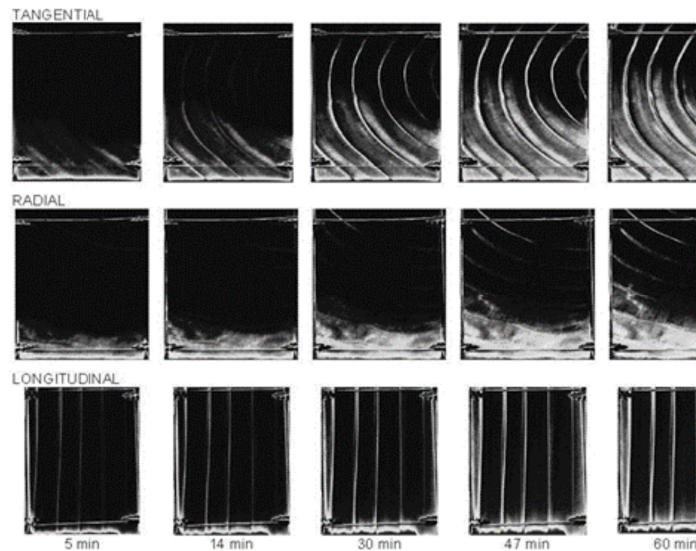


Figure 1.22- Imageries 2D par rayons X de l'évolution de la migration d'humidité suivant les trois directions (L, R et T) de l'épicéa pendant l'imbibition (Derome et al., 2005)

Afin de visualiser les voies de passage de l'eau dans le bois, d'autres techniques ont été utilisées avec par exemple de l'eau colorée (Ghazil, 2010; Petty and Preston, 1970) ou l'imagerie à résonance magnétique (Almeida et al., 2008). Les résultats ont mis en évidence que seule une partie des cellules étaient conductrices comme illustrée sur la Figure 1.23.

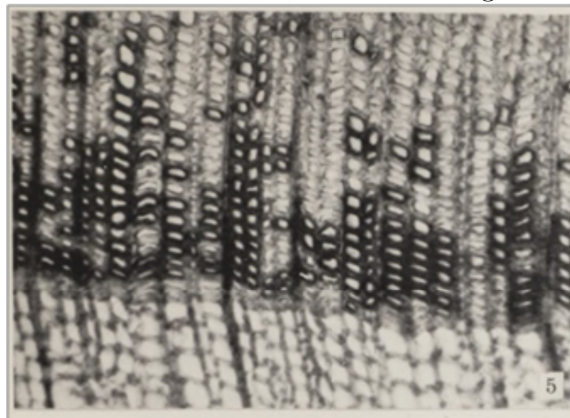


Figure 1.23- Cellules conductrices du bois final devenues foncées avec utilisation d'eau colorée dans l'épicéa (Petty and Preston, 1970)

Une teneur en eau initiale proche du PSF lors d'expériences d'imbibition avec plusieurs essences résineuses (Épicéa, Pin et Douglas) conduit à une cinétique de reprise d'humidité plus rapide qu'avec des échantillons avec une teneur en eau initiale inférieure à 5 % d'après les résultats de Sedighi-Gilani et al. (2012). Une explication avancée est le possible ralentissement de la migration capillaire en lien avec un angle de contact plus important du fait de la paroi

lingocellulosique non saturée en eau liée. Ainsi la norme NF EN ISO 15148 (2003) impose un conditionnement préalable des éprouvettes dans une ambiance où l'humidité relative se situe entre 40 et 60 % jusqu'à la stabilisation de la masse des éprouvettes.

Enfin, il convient également de renseigner la localisation de l'échantillon au sein d'une grume, car les propriétés diffèrent entre la moelle, le duramen et l'aubier. En effet, une migration capillaire plus rapide est généralement observé dans l'aubier comparé au duramen (Sedighi-Gilani et *al.*, 2014; Sandberg and Salin, 2012). Cette différence s'explique par une perméabilité réduite dans le duramen suite aux modifications chimiques et physiques lors de la duraménisation.

### 1.3.4 Exemples de confrontations entre simulations numériques et mesures expérimentales

#### 1.3.4.1 Choix de la force motrice de diffusion en conditions non-isothermes

Les méthodes non destructives et non invasives de détermination du champ de teneur en eau donnent la possibilité d'étudier les forces motrices mises en jeu par les modèles simulant les transferts couplés chaleur-masse dans les milieux poreux et de tester leur capacité prédictive.

Dans le domaine de la construction, les matériaux composant les parois sont généralement soumis à des variations de températures de part et d'autre de la paroi impliquant des conditions non isothermes en conditions d'usages. Le gradient de température impacte les transferts d'humidité (thermo diffusion) ce qui peut expliquer les écarts entre simulations et mesures expérimentales si ce mécanisme n'est pas ou mal considéré par la modélisation. Janssen (2011) a réalisé une synthèse critique de plusieurs travaux traitant de la question de l'effet du gradient de température sur la diffusion (effet Soret). Il conclut que ce dernier effet a un impact négligeable sur la diffusion lorsque la force motrice utilisée est le gradient de pression de vapeur et que cette force motrice peut donc être utilisée seule.

Une étude expérimentale utilisant l'imagerie aux rayons X 2D a confirmé cette analyse (Bouali et *al.*, 2012). Le principe consistait à imposer une différence de température de 20 °C aux faces opposées d'un échantillon d'alisier (essence feuillus) et de suivre l'évolution du profil de teneur en eau au cours du temps. L'échantillon bois était initialement à l'équilibre hygroscopique ( $X = 15\%$ ) et recouvert de l'ensemble de ses faces par un matériau imperméable pour maintenir une teneur en eau moyenne constante. Les résultats expérimentaux ont montré une diffusion d'humidité allant du côté chaud vers le côté froid (Figure 1.24). Ces derniers ont été comparés avec les résultats d'un modèle numérique, où deux forces motrices de transfert d'humidité ont été testées (pression partielle de vapeur et teneur en eau + gradient de température). Cette confrontation confirme la bonne reproduction du profil de teneur en eau avec l'utilisation du gradient de pression partielle de vapeur seul comparé à



l'utilisation du gradient de teneur en eau liée et du gradient de température selon l'expression proposée par Avramidis et Siau, (1987).

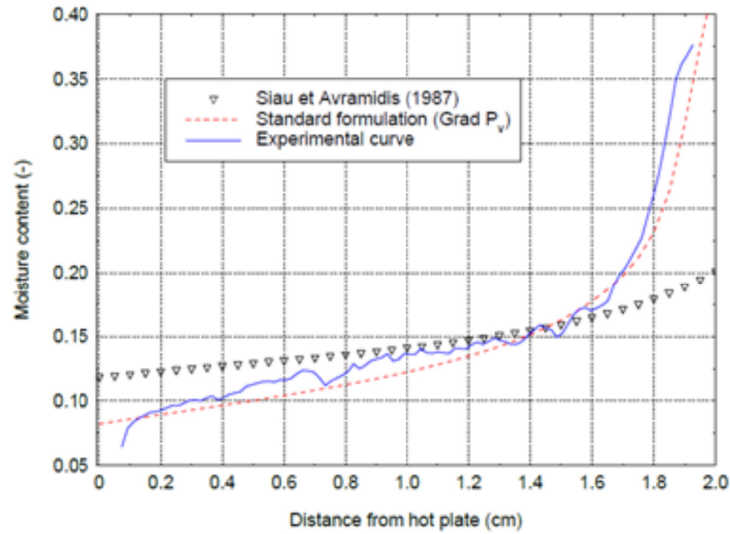


Figure 1.24- Résultats expérimentaux et simulés de teneur en eau en conditions non-isothermes (Bouali et al., 2012)

Cependant des questions demeurent puisque ces résultats ont été effectués en conditions non-isothermes constantes, ce qui reste éloigné des conditions réelles rencontrées dans les bâtiments. En effet, les parois sont exposées aux conditions climatiques extérieures (cycles jour/nuit, inter-saison, etc.) et d'usages de pièces à l'intérieur (cuisine, salle de bain, chambre, etc.) induisant des variations de température permanent. Pour se rapprocher de ces conditions réelles tout en maîtrisant les conditions limites, l'utilisation d'un système de double enceintes est pertinent. Le principe consiste à placer une paroi à l'échelle 1/1 entre deux enceintes climatiques permettant de reproduire des conditions hygrothermiques dynamiques différentes de part et d'autre de la paroi. La Figure 1.25 représente les résultats expérimentaux et simulés d'une paroi multicouche composée de l'intérieur vers l'extérieur de :

- épicea,
- panneau de fibre bois haute densité,
- enduit extérieur.

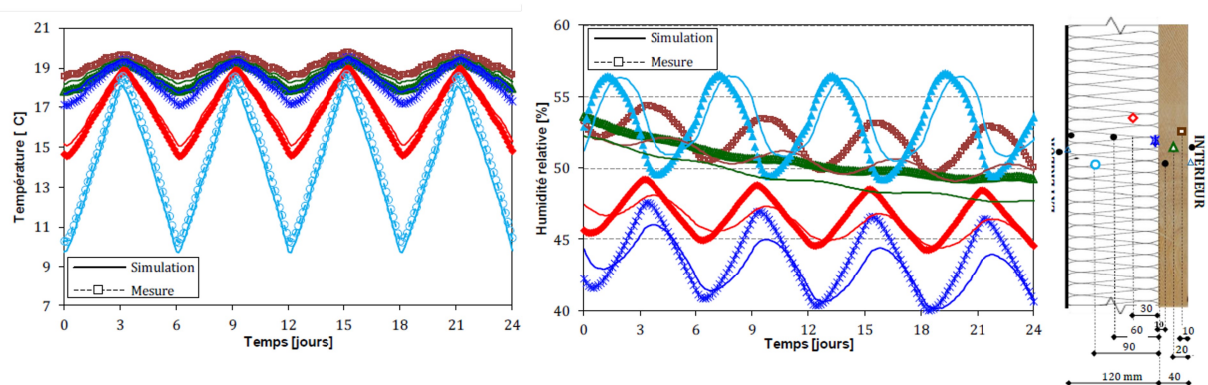


Figure 1.25- Évolution de la température et de l'humidité relative d'une paroi exposée à des conditions cycliques contrôlées à l'aide d'une double enceinte climatique et simulation numérique (Rafidiarison, 2012)

Les résultats indiquent des écarts entre les valeurs expérimentales et simulées. En ce qui concerne les valeurs au sein du bois massif (courbes verte et marron), ces écarts apparaissent faibles pour la température mais importante pour l'humidité relative. La dynamique des variations d'humidité relative n'est pas correctement reproduite avec une amplitude atténuée des données issues de la simulation et un déphasage entre les valeurs expérimentales et simulées. D'une manière générale, des écarts plus marqués sont observés pour les matériaux hygroscopiques où le couplage des transferts de chaleur et de masse n'est pas correctement reproduit en condition dynamique (Busser et *al.*, 2019).

Une des explications possible est que ces conditions dynamiques amènent à des situations où les gradients de teneur en eau et de pression partielle de vapeur peuvent se retrouver opposés ou additionnés suivant les conditions aux interfaces et du profil de teneur en eau au sein du matériau. Par ailleurs, les cycles d'adsorption et de désorption induisent des hystérésis de retour à l'équilibre hygroscopique qui, en outre, dépendent de la température ce qui ajoute une complexité supplémentaire. Ce paramètre est d'ailleurs généralement négligé dans les modèles simulant les transferts couplés de chaleur-masse dans les milieux poreux dans le domaine de la construction.

Enfin, d'après les résultats visibles sur la Figure 1.24, une teneur en eau du côté de la plaque froide est proche, voire supérieure au point de saturation des fibres signifiant la présence possible d'eau libre. Il en résulte alors une apparition puis une migration capillaire au sein du milieu poreux, qu'il convient d'étudier.

#### 1.3.4.2 Transferts d'humidité au-dessus du PSF

Peu de travaux sont disponibles dans la littérature traitant de la migration capillaire intégrant à la fois des mesures expérimentales et simulées dans des configurations relatives à la construction. En ce qui concerne le bois massif, une récente étude a exploré la reprise d'humidité et le drainage au sein de panneaux contrecollés CLT (Kordziel et *al.*, 2020). Ces panneaux sont couramment utilisés de nos jours pour la réalisation d'ouvrage en bois de grande hauteur. Dans cette étude, la mise en contact de l'échantillon avec l'eau a été opérée suivant deux configurations :

- a) la face inférieure du panneau contrecollé est mise en contact avec de l'eau suivant la norme NF ISO 12571 (2013) puis, l'eau du réservoir est retirée pour engendrer une phase de séchage à l'air libre (Figure 1.26a),
- b) la face supérieure du panneau contrecollé est mise en contact avec de l'eau, puis l'eau est retirée et la face supérieur est recouverte d'un film imperméable pour mimer une exposition d'un panneau contrecollé en condition réelle après une averse durant de la phase de construction (Figure 1.26b).

Le principe expérimental est présenté en Figure 1.26 avec la position des capteurs de résistivité électrique utilisé pour la mesure de la teneur en eau dans l'épaisseur du panneau CLT. Les données expérimentales ont été ensuite comparées avec le logiciel commercial WUFI pro – développé par l'IBP Fraunhofer – qui est l'un des outils utilisés par les bureaux d'études permettant de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux.

Dans cette étude, le modèle a été initialement calibré avec les données expérimentales pour déterminer le coefficient de transport d'eau liquide  $D_{ws}$  ( $m^2.s^{-1}$ ). Les résultats mettent en lumière des écarts importants de teneur en eau entre les valeurs expérimentales et simulées à la fois lors de la phase d'absorption et de séchage suivant les deux configurations même si les tendances sont reproduites par le modèle. Une des explications possibles tient dans le choix d'utiliser des électrodes pour mesurer le profil de teneur en eau dans l'épaisseur du panneau. Les valeurs maximales mesurées – proches de 30 % après 30 jours de contact avec l'eau – semblent faibles comparées à d'autres études (Johansson and Kifetew, 2010; Sandberg and Salin, 2012). La mesure de la résistivité électrique est imprécise pour les valeurs de teneur en eau au-delà du point de saturation des fibres (chapitre 1.2.5). En conséquence, la calibration du modèle peut donc en être affectée et expliquer les écarts entre simulations et données expérimentales pour les points situés à 6 et 25 mm de la surface de contact.

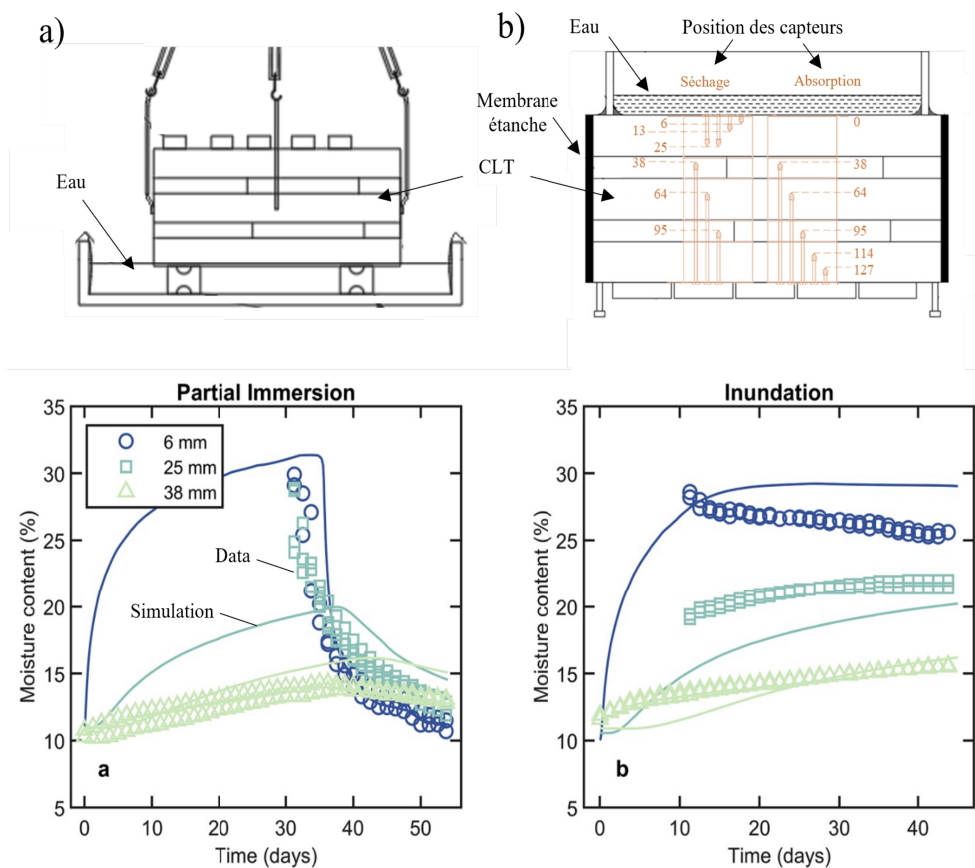


Figure 1.26- Confrontation entre des données expérimentales et simulées avec le logiciel WUFI pro lors de phase d'adsorption et de séchage (Kordziel et al., 2020)

## 1.4 Conclusion

Ce chapitre fait un bref état des lieux du secteur de la construction bois en France et met en évidence les enjeux environnementaux comme une opportunité pour un développement fort du secteur de la construction bois. Cependant cette ressource renouvelable n'est pas illimitée et doit s'accompagner d'une gestion durable des forêts. L'évolution des systèmes constructifs, notamment des ouvrages de grande hauteur, impliquent une conception s'inscrivant sur le long terme. La durée de vie des ouvrages participe au stockage du carbone et diminue également la pression sur la ressource. Pour assurer la performance et la pérennité de ces ouvrages, une meilleure compréhension et intégration des transferts d'humidité au sein des enveloppes sont nécessaires. Ce travail de conception doit, en outre, intégrer les exigences réglementaires en matière de consommation d'énergie ce qui implique l'utilisation d'outils numériques pour choisir les matériaux composant les parois et estimer l'ambiance intérieur des logements ainsi que la consommation énergétique suivant des conditions dynamiques.

Les outils numériques nécessitent des améliorations en vue d'affiner leur capacité prédictive pour les matériaux hygroscopiques. Les transferts d'humidité au sein du bois massif impliquent les différents états de l'eau (liée, vapeur et liquide) ayant chacun leur propre force motrice et sont fortement couplés entre eux. Par ailleurs, dans des conditions dynamiques d'exposition, les spécificités du bois massif induisent des hystérésis de retour à l'équilibre de teneur en eau qui doivent être intégrés dans les modèles. Enfin, la structure orthotrope du bois massif induit une complexité des transferts s'opérant dans les trois directions avec des ordres de grandeur différents allant d'un facteur 100 à 1000 et avec des hétérogénéités des propriétés de transferts au sein des cernes.

En vue de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu au sein du bois massif, le recours à des données expérimentales fiables issues de dispositifs ne perturbant pas les forces motrices est nécessaire. L'imagerie par rayons X a montré son potentiel pour décrire de manière qualitative la migration d'humidité dans le bois et d'autres matériaux de construction. Toutefois, la quantification locale de la teneur en eau au sein du matériau étudié reste complexe.

Ce travail de thèse s'appuie sur cette technologie pour analyser l'évolution du champ de teneur en eau au sein de l'épicéa de manière qualitative et quantitative pour ensuite confronter les résultats expérimentaux avec des simulations numériques.





# Chapitre 2

---

Étude de la cinétique de migration d'humidité  
par imagerie X





## 2.1 Introduction

Comme il a été évoqué lors du chapitre précédent, le besoin de données expérimentales fiables est indispensable pour une meilleure compréhension et description de la migration d'humidité au sein du bois massif. De nombreuses méthodes sont disponibles comme celle décrite dans la norme NF EN ISO 15148 (2003). Cette dernière est basée sur la mesure de l'évolution de la masse d'un échantillon en contact avec de l'eau. Cette méthode a pour avantage de pouvoir comparer les matériaux de construction entre eux mais donne accès à une information globale sans accès à la redistribution de la teneur en eau au sein de l'échantillon. Pour accéder à une information plus riche, d'autres méthodes sont disponibles tels que la RMN, IRM et l'imagerie par rayons X ou neutron. Le principal avantage de ces méthodes est le suivi sans contact de la reprise d'humidité d'un échantillon et donc sans perturbation des forces motrices mise en jeu. Cependant, pour l'ensemble de ces méthodes, la complexité réside dans la calibration du dispositif en vue de traduire la variation d'intensité du signal en teneur en eau du matériau étudié.

Ce chapitre présente un travail expérimental et une analyse numérique des données donnant accès à la dynamique d'imbibition à l'aide de l'imagerie 2D par rayons X. Le protocole de traitement des images obtenues – permettant de discriminer la matière lignocellulosique et l'eau – est décrit en détail. Ce dernier prend en compte l'hétérogénéité spatiale du faisceau X et la variation d'intensité de la chaîne d'acquisition source-imageur dans le temps. Ce travail de traitement des images couplé à la haute résolution de l'imageur a donné accès aux cinétiques de reprise d'humidité dans le bois initial et le bois final au sein d'échantillons d'épicéa suivant deux directions (longitudinale et radiale).

## 2.2 Matériels et méthodes

### 2.2.1 Préparation des échantillons

Les échantillons d'épicéa commun (*Picea abies*) proviennent d'un tronc d'arbre récolté dans la région d'Auvergne en France. Les échantillons ont été extraits dans une planche située à la base de la grume où la moelle (premiers cernes) et le liber (phloème) étaient visibles. Au total, 73 cernes annuels ont été comptés, avec une épaisseur moyenne de  $2,7^{\pm 0,7}$  mm.

Le débit a fait l'objet d'un travail minutieux pour établir la position précise des échantillons au sein de la planche avec la numérotation des cernes allant de la moelle vers l'écorce. La géométrie parallélépipédique rectangulaire des échantillons a été obtenue avec une machine de découpe de précision (SECOTOM 50, Struers) afin que les faces des échantillons coïncident avec les plans de références comme indiqué dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1- Dimensions des échantillons et position suivant la direction radiale

Référence	Dimensions (mm)			Numéro de cerne (à partir de la moelle)
	Longueur (*)	Largeur (*)	Épaisseur (**)	
Échantillon A	30,80 (L)	8,70 (R)	3,07 (T)	42-46
Échantillon B	29,91 (R)	8,90 (T)	2,09 (L)	38-52

\* Direction d'imbibition : longitudinale (L), radiale (R)

\*\* Direction perpendiculaire à la direction d'imbibition : longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)

La longueur et largeur de l'échantillon ont été définies en accord avec les caractéristiques de l'imageur du tomographe et du rayon de courbure des cernes afin d'étudier l'imbibition d'eau dans le bois initial et le bois final des échantillons via l'imagerie 2D par rayons X.

Le protocole de préparation des échantillons a été établie suivant plusieurs étapes. La première étape a consisté à appliquer une couche régulière d'un revêtement imperméable (Rubson, Liquid rubber plus) sur les surfaces parallèles à la direction d'absorption d'eau, afin d'imposer un flux d'humidité unidirectionnel pendant l'imbibition. Ces surfaces avaient été préalablement poncées avec du papier de verre P360 pour parfaire l'accroche. Un total de deux couches a été appliquée pour assurer la continuité du revêtement. Une fois le revêtement sec, la longueur finale de l'échantillon a été découpée à l'aide d'un microtome (Thermo Scientific, Sliding Microtome HM 450) pour garantir un état de surface sans particules pouvant obstruer les lumens au niveau de la section en contact avec l'eau (Comstock and Côté, 1968). Enfin, l'échantillon était conditionné dans une enceinte climatique (Memmert HPP110eco) réglée à 25 °C et 50 % d'humidité relative jusqu'à stabilisation de sa masse. Au cours de la préparation de l'échantillon s'étalant sur plusieurs jours, un échantillon jumeau a été utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale (au début du test d'imbibition) d'après la méthode gravimétrique.

## 2.2.2 Imagerie par rayons X

### 2.2.2.1 Description du dispositif expérimental

La réalisation des essais d'imbibition a nécessité le développement d'un dispositif expérimental sur mesure afin d'être installé dans le nanotomographe (RX Solutions, EasyTom XL Ultra 150-160) du laboratoire. La stabilisation du niveau d'eau en contact avec le bas de l'échantillon a fait l'objet d'une attention particulière en utilisant un système de boucle fermée composé de deux réservoirs, d'une pompe à eau et d'un trop-plein (Figure 2.1-Détail A). Le principe de fonctionnement a consisté à alimenter le réservoir supérieur en eau distillée stocké dans le réservoir inférieur une fois la pompe allumée. Le trop plein – assurant le niveau d'eau constant – du réservoir supérieur déversait ensuite l'eau dans le réservoir inférieur. Le système fonctionnait ainsi en boucle fermée. L'alimentation de la pompe – contrôlée depuis l'extérieur du tomographe – permettait de démarrer ou d'arrêter l'imbibition au moment désiré. L'échantillon était suspendu au-dessus du réservoir via une pièce en aluminium munie d'un ressort latéral. La géométrie du support permettait de ne pas perturber les échanges massiques

sur les faces opposées de l'échantillon sans avoir d'éléments pouvant le masquer vis-à-vis des rayons X. L'échantillon était soigneusement positionné sur son support à l'aide d'une petite pièce réalisée par impression 3D. L'ensemble était fixé sur un axe de translation linéaire Newport (modèle M-UMR5.5) pour ajuster le bas de l'échantillon avec le niveau d'eau du réservoir. Durant les expériences, les conditions environnementales (température et humidité relative) étaient mesurées à l'aide d'une sonde SHT85 (Sensirion AG).

En imagerie X, une acquisition d'une série d'images en vue de réaliser ultérieurement une reconstruction 3D nécessite plusieurs dizaines de minutes, ce qui est incompatible avec l'étude des phénomènes de courtes durées. Or, la reprise d'humidité est rapide aux premiers instants après la mise en contact de l'échantillon avec l'eau. C'est pourquoi, le protocole d'acquisition a été basé sur des images 2D (ou radiographie) permettant d'acquérir une image toutes les 10 secondes. Les images obtenues durant les essais ont été réalisées en utilisant la source de rayons X micro-foyer scellée (20  $\mu\text{m}$  de taille de foyer dans les conditions de fonctionnement choisies) en combinaison avec une camera CCD (taille de pixel de 9  $\mu\text{m}$ ). Ce choix a été le fruit d'essais préliminaires offrant le meilleur compromis entre le temps d'acquisition et la résolution spatiale. En effet, en imagerie 2D, la résolution spatiale est fonction des distances entre l'objet observé, la source de rayons X et l'imageur. De plus, l'épaisseur de l'objet observé a un impact sur la netteté des contours à cause de l'angle d'incidence du faisceau conique de rayons X. Cet aspect est important, car il conditionne la possibilité de distinguer clairement les cernes annuels du bois. Ainsi, pour minimiser l'impact de l'angle du faisceau incident, la distance source/imageur a été maximisée (environ 1 m) et l'échantillon était positionné au plus près de la caméra CCD (Figure 2.1). Cette configuration d'acquisition a permis d'observer distinctement les lumens remplis d'eau pendant l'imbibition pour l'essai en direction radiale (la direction longitudinale de l'échantillon étant alors dans la même direction des rayons X). Enfin, pour répéter les mêmes séquences d'acquisition d'images à des intervalles de temps définis, l'ensemble des paramètres d'acquisition étaient enregistrées dans le logiciel contrôlant le tomographe.

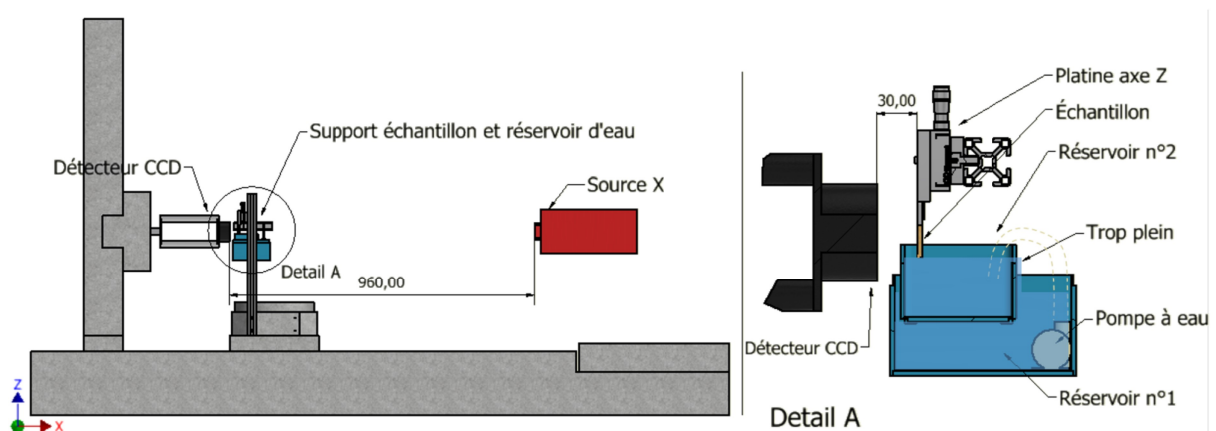


Figure 2.1- Représentation schématique du dispositif expérimental d'imagerie 2D par rayons X positionné au sein du tomographe

### 2.2.2.2 Acquisition des images

Les paramètres de la source de rayons X et de la caméra CCD ont été définis pour répondre aux spécificités du matériau bois et de la vitesse d'absorption de l'eau, rapide aux premiers instants de l'imbibition. Ils ont été choisis de manière à avoir le meilleur compromis entre durée d'acquisition et clarté des images tels que :

- une tension de la source de rayons X paramétrée à 90 kV et une intensité définie à 200  $\mu\text{A}$  avec une taille de spot d'émission de 20  $\mu\text{m}$ ,
- une caméra CCD configurée en 16 bits avec un binning de  $2 \times 2$  pour obtenir  $1344 \times 2016$  pixels,  $18 \times 18 \mu\text{m}^2$  chacun ( $24.2 \times 36.3 \text{ mm}^2$ ),
- un temps d'exposition fixé à 10 secondes par image.

Les expériences ont duré quatre jours et le suivi d'imbibition a été effectué avec plusieurs séries d'acquisitions d'images de six heures opérées à des intervalles de temps proche au début de l'expérience puis plus éloignées.

### 2.2.2.3 Traitement des images

L'étape de traitement des images doit être rigoureuse pour obtenir une teneur en eau précise au sein de l'échantillon d'après la méthode utilisant le champ de transmission des rayons X (Perré and Thiercelin, 2004). Le traitement d'images se décompose en trois étapes avec : la réduction du bruit, la correction spatiale de l'hétérogénéité du faisceau de rayons X et la correction temporelle des variations source/imageur.

Le bruit dû aux particules cosmiques et au détecteur ont été atténués par l'application d'un filtre médian sur dix images successives  $I$  pour chaque pixel  $(i, j)$ . Ensuite, le flux incident de rayons X n'était pas uniforme sur la surface de l'échantillon, car le faisceau de rayons X était divergent avec une intensité de rayonnement dépendant de l'angle d'incidence. Ainsi, une correction spatiale a été appliquée en introduisant le terme de transmittance  $T(t)$  selon l'équation 2.1 :

$$T(t, i, j) = \frac{I(t, i, j) - I_B(t_0, i, j)}{I_0(t_0, i, j) - I_B(t_0, i, j)} \quad (2.1)$$

avec  $I_0(t_0)$  l'image de référence sans échantillon prise dans les mêmes conditions de fonctionnement et  $I_B(t_0)$  l'image de champ de noir correspondant au niveau de gris des pixels de la caméra CCD enregistrée sans émission de rayons X.

Enfin, la variation temporelle de la chaîne d'acquisition source/imageur a été corrigée en utilisant une partie de l'image  $T(t)$  (sans objet) – la région d'intérêt  $ROI_{correct}$ , visible sur la

Figure 2.2 – et en comparant sa valeur de transmittance moyenne  $\langle T(t) \rangle [ROI_{correct}]$  à celle de la même partie de l'image  $T(t_0)$  selon la formule suivante :

$$T_{correct}(t, i, j) = T(t, i, j) \cdot \frac{\langle T(t_0) \rangle [ROI_{correct}]}{\langle T(t) \rangle [ROI_{correct}]} \quad (2.2)$$

Un exemple de ce traitement d'image est illustré sur la Figure 2.2 avec la distribution des niveaux de gris de l'image avant (Figure 2.2a) et après application des corrections (Figure 2.2b). Pour que l'image traitée puisse être comparée à l'image d'origine, elle a été convertie en 16 bits. Sur cette image, le pic situé à proximité de la valeur du niveau de gris (égale à 2000) est dû au porte échantillon en aluminium ayant une forte atténuation aux rayons X. Le pic dont les valeurs de niveau de gris sont comprises entre 8000 et 9000 correspond au faisceau incident de rayons X. La distribution des valeurs de niveau de gris de l'échantillon d'épicéa avec une teneur en eau équilibrée à 9,87 % est constituée d'un pic correspondant au bois initial (environ 7000), suivi d'un épaulement correspondant au bois final (gris plus foncé que le bois initial en raison d'une densité et donc d'une atténuation aux rayons X plus élevées).

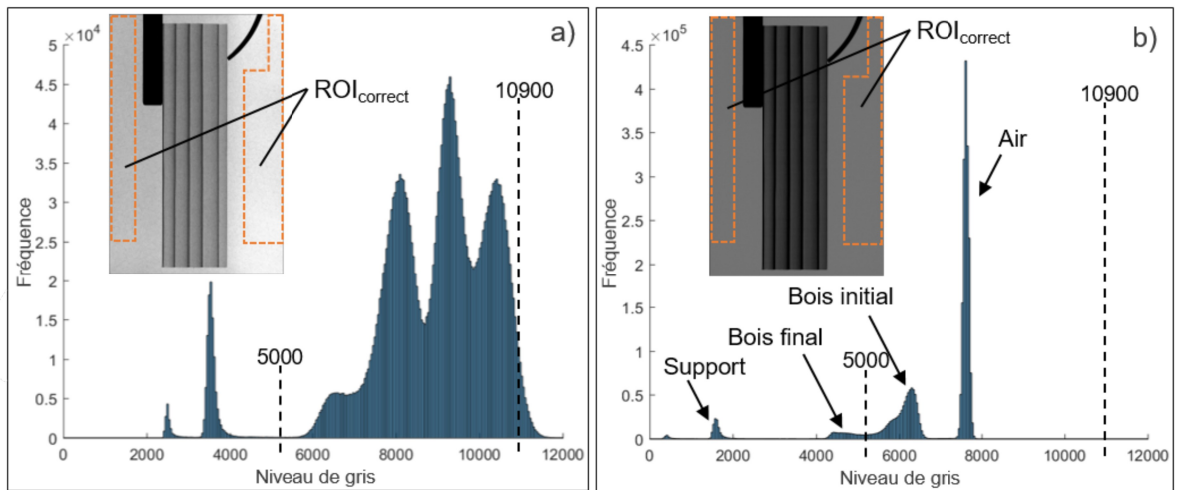


Figure 2.2- Distribution du niveau de gris avant (a) et après (b) le traitement de l'image. Les lignes pointillées verticales représentent la limite de la luminosité et du contraste de l'image incorporée

#### 2.2.2.4 Détermination de la teneur en eau

##### Transmittance des rayons X en fonction de la teneur en eau

La mesure de la teneur en eau dans le bois et d'autres matériaux poreux et/ou hygroscopique à l'aide de l'imagerie par rayons X repose sur la transmission des rayons X (Cullity, 1956; Guinier, 1964). La loi de Beer-Lambert décrit l'intensité du faisceau transmis  $I$  lorsqu'un faisceau monochromatique d'énergie  $E$  traverse un matériau de composition chimique  $C$ , de densité  $\rho$  et d'épaisseur suivant la direction du faisceau de rayons X  $d$  :

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp(-\mu(E, C) \cdot \rho \cdot d) \quad (2.3)$$

avec  $I_0$ , l'intensité du faisceau incident et  $\mu$  le coefficient d'atténuation massique.

Dans le cas d'un matériau humide, les masses volumiques respectives du matériau lignocellulosique et de l'eau peuvent être considérées comme un matériau constitué de deux constituants. La loi de Beer-Lambert peut alors s'écrire comme suit pour calculer la transmittance d'un matériau vis-à-vis d'un faisceau de rayons X monochromatique :

$$T(E) = \frac{I(E)}{I_0(E)} = \exp(-(\mu_0(E) \cdot \rho_0 + \mu_l(E) \cdot \rho_l) \cdot d) \quad (2.4)$$

avec  $T$ , la transmittance,  $\mu_0$  le coefficient d'atténuation massique du bois anhydre ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\mu_l$  le coefficient d'atténuation massique de l'eau ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\rho_0$  la masse volumique du bois anhydre en ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), et  $\rho_l$  la masse volumique de l'eau en ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

À partir de l'équation (2.4) une masse volumique équivalente peut être obtenue à partir d'une moyenne pondérée des masses volumiques du bois sec et de l'eau. Pour un faisceau monochromatique, le logarithme de la transmittance dépend donc linéairement de cette densité équivalente. Cependant, dans le cas d'un faisceau de rayons X polychromatique, l'équation (2.4) doit être intégrée sur l'ensemble du spectre énergétique. Comme l'atténuation dépend de l'énergie, le spectre change le long de son parcours (durcissement du faisceau). Dans ce cas, la relation additive simple entre le logarithme de la transmittance, la masse volumique du bois et la masse volumique de l'eau n'est plus valable. Une étape de calibration est alors nécessaire pour obtenir la fonction de transmittance et les facteurs de pondération spécifiques à l'acquisition de la chaîne de rayons X dans les conditions d'exploitations. Cette étape peut être réalisée en utilisant un détecteur spectrométrique (Perré and Thiercelin, 2004). Cependant, dans le cas de l'imageur CCD utilisé dans cette étude, la distribution spectrale du faisceau polychromatique de rayons X ainsi que le comportement polychromatique du détecteur étaient inconnus. Seules les valeurs intégrales ( $I$  et  $I_0$ ) mesurées par la caméra CCD sur chaque pixel des images de projection étaient accessibles. C'est pourquoi, une relation non linéaire, issue de Bouali et al. (2012), a été utilisée pour relier la transmittance  $T$  à la densité de surface équivalente  $\rho_{eq}^*$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) selon l'équation (2.5) :

$$\ln(T) = L_0 \cdot \rho_{eq}^* + L_1 \cdot (1 - \exp(-\frac{\rho_{eq}^*}{\lambda})) \quad (2.5)$$

où  $L_0$  défini la pente initiale de la courbe (atténuation avant tout durcissement du faisceau), et  $L_1$  et  $\lambda$  sont les coefficients liés au durcissement progressif de l'effet énergétique polychrome.

Ainsi,  $L_1$  est la pente obtenue pour la plus haute énergie contenue et détectée dans le faisceau polychromatique. Tous ces coefficients sont spécifiques à la chaîne d'acquisition source/détecteur dans les conditions de fonctionnement.

Dans cette expression, la masse surfacique équivalente  $\rho_{eq}^*$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) intègre, dans la même expression, les deux phases du matériau humide (bois et eau) ainsi que le revêtement imperméable appliqué périphérie :

$$\rho_{eq}^* = \frac{\rho_0^* \cdot (X + \alpha) + \rho_{sealant\ apparent}^*}{\epsilon} \quad (2.6)$$

avec  $X$  la teneur en eau (-),  $\alpha$  le facteur de pondération de l'atténuation du bois sec par rapport à l'atténuation de l'eau (-),  $\rho_{sealant\ apparent}^*$  la densité superficielle apparente du revêtement imperméable ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), et  $\epsilon$  le gonflement surfacique (-).

La masse surfacique  $\rho^*$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) est exprimée comme suit :

$$\rho^* = \rho \cdot d \quad (2.7)$$

avec  $\rho$  la masse volumique ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et  $d$  l'épaisseur de l'échantillon traversé par le faisceau de rayons X (m).

Enfin, la prise en compte du gonflement du bois suite à la reprise d'humidité est nécessaire, car ce dernier réduit la masse surfacique de la matière lignocellulosique. Les variations dimensionnelles dues au gonflement surfacique  $\epsilon$  ont été déterminé en calculant l'évolution de la surface de chaque région d'intérêt  $S_{ROI_n}$  par rapport à l'état initial d'après l'équation (2.8). Les détails des positions des ROI dans les deux directions d'imbibition sont indiqués sur la Figure 2.4.

$$\epsilon = \frac{S_{ROI_n}(t)}{S_{ROI_n}(t_0)} \quad (2.8)$$

Le rapport d'atténuation entre le matériau lignocellulosique et l'eau ( $\alpha$ ) peut être considéré comme constant au-delà de 80 keV selon la base de données XCOM du National Institute of Standard and Technology (NIST) (Seltzer, 1987), malgré le durcissement du faisceau de rayons X polychromatiques (Pease et *al.*, 2012).

Les valeurs des paramètres  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $\lambda$  et  $\alpha$  ont ainsi été identifiées lors de l'étape de calibration en utilisant des échantillons parallélépipédiques d'Alisier terminal (*Sorbus torminalis*) de différentes épaisseurs (de 0,86 à 8,89 mm) sans revêtement. Cette essence a été choisie en raison de sa structure anatomique homogène qui assure une masse volumique régulière au sein du cerne annuel. Cette caractéristique a permis de considérer une masse surfacique similaire pour l'ensemble des échantillons. Une série d'images a été réalisée pour chaque épaisseur suivant deux états distincts : sec à l'air (MC  $\simeq$  8 %, base sèche) et entièrement saturé en eau (MC  $\simeq$  125 %, base sèche). La teneur en eau de référence a été déterminée par la méthode gravimétrique en pesant chaque échantillon d'alisier avant et après chaque acquisition. Les valeurs des coefficients  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $\lambda$  et  $\alpha$  ont ensuite été identifiées simultanément avec le solveur non linéaire GRG (Excel), en minimisant l'écart entre les données numériques et expérimentales (méthode des moindres carrés). Les résultats sont présentés sur la Figure 2.3 avec les valeurs correspondantes des coefficients dans le Tableau 2.2.

*Tableau 2.2- Valeurs des coefficients  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $\alpha$  et  $\lambda$*

$L_0$	$L_1$	$\lambda$	$\alpha$
-0,04713	-0,65	2,54	0,71229

Contrairement aux autres paramètres du modèle ( $L_0$ ,  $L_1$  et  $\lambda$ ),  $\alpha$  dépend de l'essence. Après calibration, sa valeur peut être ajustée d'une espèce à l'autre à l'aide d'une seule mesure de rayons X à une teneur en eau connue.

Avec le protocole de préparation de l'échantillon, une dernière étape de calibration était nécessaire pour identifier la distribution spatiale de  $\rho_0^*$  et  $\rho_{sealant\ apparent}^*$  de l'équation (2.6). Pour ce faire, l'acquisition des images selon le protocole détaillé en 2.2.2.2 et 2.2.2.4 a été réalisée avant et après application du revêtement sur l'échantillon (respectivement  $T_{\text{sans revêtement}}$  et  $T_{\text{avec revêtement}}$ ) avec une teneur en eau de l'échantillon soigneusement maintenue constante entre et pendant ces deux acquisitions.

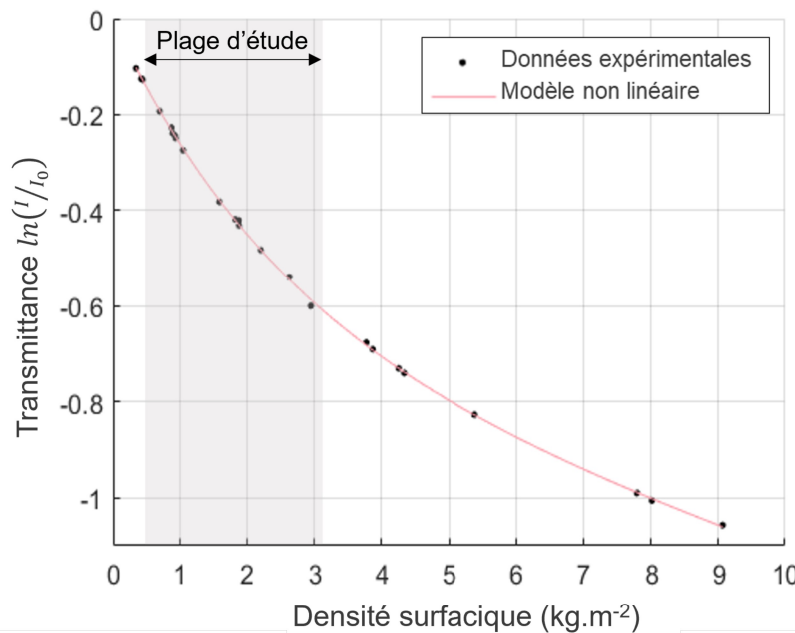


Figure 2.3- Données expérimentales d'échantillons d'alisier (*Sorbus terminal*) de différentes épaisseurs et teneurs en eau avec la courbe d'ajustement non linéaire (2.5). La plage des masses surfaciques utilisées lors des expériences d'imbibition est représentée en gris

### Discretisation spatiale

L'évolution de la distribution de l'humidité dans l'échantillon a été évaluée à partir de régions d'intérêt (*region of interest*, ROI) en utilisant un script MATLAB développé à cet effet. La hauteur de l'échantillon a été divisée en 59 ROI adjacentes de 0,52 mm de hauteur (Figure 2.4a) pour l'expérience d'imbibition dans la direction longitudinale. En direction radiale, la hauteur de l'échantillon a été discrétisée selon les cernes annuels. Pour chaque ROI, la correction temporelle est réalisée en considérant la transmittance de la région située dans l'air à la même hauteur ( $ROI_{correct}$  issue de 2.2). Cette précaution a été adoptée pour compenser une absorption des rayons X légèrement non uniforme selon la hauteur de l'image de transmittance due à un gradient de concentration de vapeur d'eau lié à l'évaporation à la surface du réservoir.

Afin de mettre en évidence le contraste de densité et son effet sur la cinétique d'imbibition, des ROIs ont été définies dans le bois initial et le bois final. Pour ce faire, il a fallu, dans un



premier temps, déterminer la position des limites de cerne à partir du changement de pente local du niveau de gris dû à la variation de densité. Dans un second temps, chaque cerne a été divisé en trois sous régions avec 45 % de sa largeur allouée au bois initial et 45 % au bois de transition (BT, entre le bois initial et final) et 10 % au bois final (Figure 2.4). Ces proportions ont été considérées constantes pendant l'imbibition.

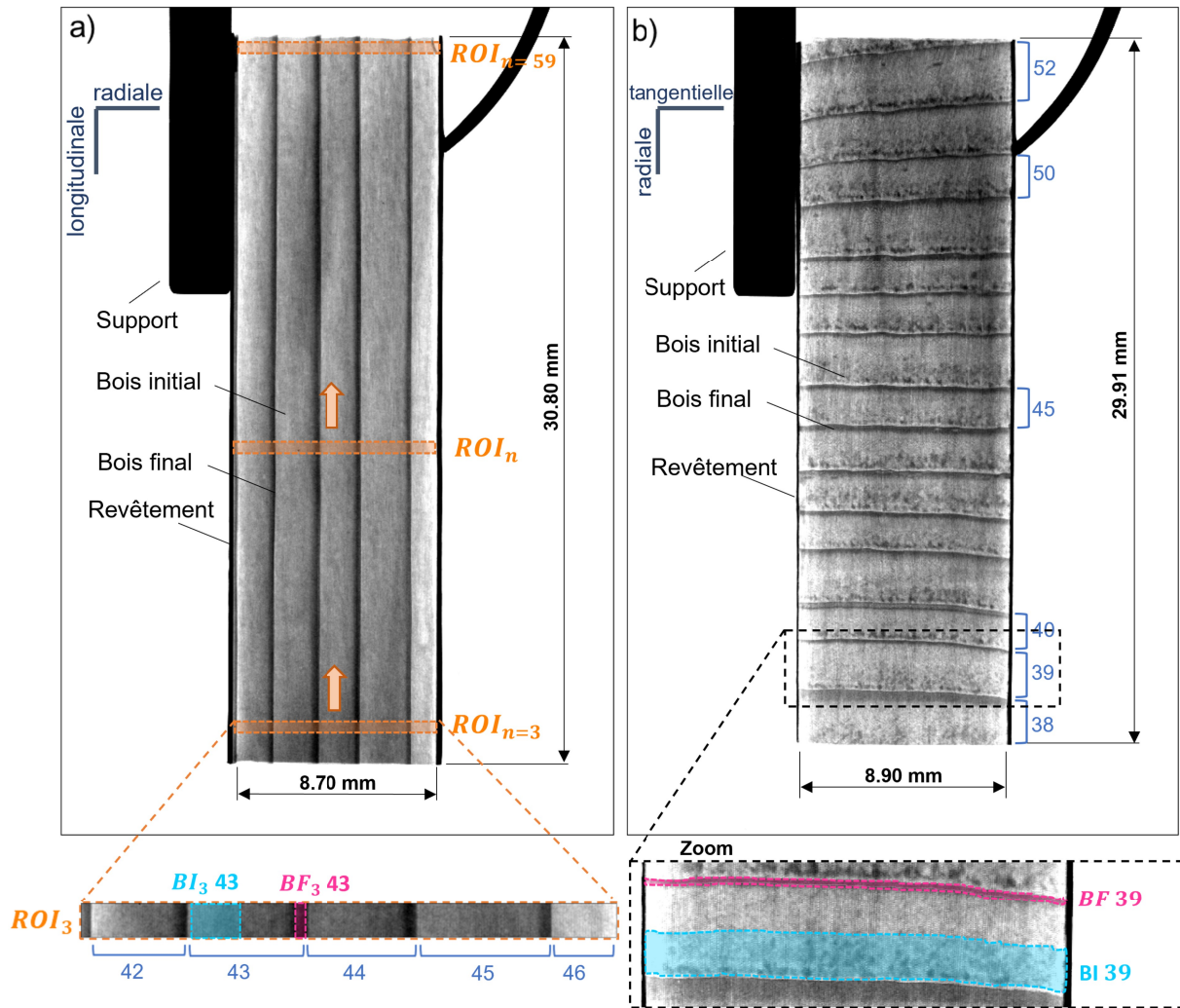


Figure 2.4- Principe des régions d'intérêt (ROI) sélectionnées pour l'expérience d'imbibition dans les directions longitudinale (a) et radiale (b)

Les modifications dimensionnelles des ROIs dues au gonflement affectent la densité de surface et doivent être prises en compte pour calculer les variations de teneur en eau (équations 2.6 et 2.8). Dans la direction longitudinale, les images n'ont pas de marqueurs anatomiques pour suivre une éventuelle variation. Heureusement, l'hygro-expansion du bois est négligeable dans cette direction (Perré, 2007a; Skaar, 1988). Dans les directions radiale et tangentielle, les bords de l'échantillon et les limites de cerne étaient automatiquement détectées à partir du changement de pente local du niveau de gris.

### Teneur en eau théorique à saturation complète

Les variations absolues de teneur en eau au sein du cerne annuel doivent être analysées avec précaution. En effet, en raison de leur masse volumique spécifique, le bois initial et le bois final ont des capacités de stockage d'eau différentes. Ainsi, le calcul du taux de saturation – comme le rapport de teneur en eau sur la teneur en eau théorique à saturation complète – est pertinent pour mettre en évidence l'hétérogénéité substantielle de la cinétique d'imbibition entre le bois initial et final.

La teneur en eau théorique à saturation complète  $X_{sat}$  est atteinte lorsque les parois cellulaires et les lumens sont saturés d'eau. Elle a été estimée selon l'équation (2.9) (Perré and Turner, 2001b) en supposant que (i) la porosité de l'échantillon était entièrement saturée de liquide, et (ii) que le volume des pores était constant indépendamment de la teneur en eau (Mariaux, 1989).

$$X_{sat} = \frac{(\rho_0 \cdot X_{psf} + (1 - \frac{\rho_0}{\rho_s}) \cdot \rho_l)}{\rho_0} \quad (2.9)$$

avec  $\rho_l$  la masse volumique de l'eau liquide à 20 °C (1000 kg.m<sup>-3</sup>) et  $\rho_s$  la masse volumique de la paroi cellulaire (1530 kg/m<sup>3</sup>) (Siau, 1984).

Ce calcul est applicable à l'échantillon entier ou pour chaque ROI. Dans ce dernier cas, la masse volumique anhydre locale doit être connue pour estimer la teneur en eau théorique à saturation complète selon l'équation (2.9). Pour obtenir cette valeur, la masse surfacique  $\rho_{eq}^*$ , de la ROI considéré, a été identifiée à partir de la relation non linéaire (2.5). Pour ce calcul, il a été supposé (i) que la composition de la paroi cellulaire était la même dans le bois initial et le bois final, et (ii) que les contributions des matières extractibles et de la résine à l'atténuation des rayons X étaient uniformes. Enfin le passage d'une masse volumique anhydre locale  $\rho_0$  (kg.m<sup>-3</sup>) en une masse volumique anhydre surfacique  $\rho_0^*$  (kg.m<sup>-2</sup>) a été obtenue en divisant la densité volumique par l'épaisseur de l'échantillon traversé par le faisceau de rayons X. Cette épaisseur a dû être corrigée afin de tenir compte du gonflement entre l'état anhydre et initial durant l'acquisition avec l'introduction de  $d_{correct}$  selon l'équation :

$$d_{correct} = d \cdot \frac{1}{1 + \frac{R}{1-R} \cdot \frac{X}{X_{psf}}} \quad (2.10)$$

avec  $d$  l'épaisseur initiale de l'échantillon,  $R$  le retrait total selon le sens du bois de l'épaisseur (Perré et Huber, 2007) et  $X_{psf}$  le point de saturation des fibres. Les valeurs de  $d$  et  $R$  ont été considérés constantes quelle que soit la location de la ROI et  $X_{psf}$  de l'épicéa fixé à 29 % (Siau, 1984).

## 2.3 Résultats et discussion

### 2.3.1 Teneur en eau locale à saturation complète versus masse volumique anhydre

La masse volumique anhydre et la teneur en eau théorique à saturation complète sont visibles sur la Figure 2.5 suivant la largeur de la région d'intérêt n° 3 (ROI #3) de l'échantillon utilisé pour l'expérience d'imbibition longitudinale. La masse volumique anhydre moyenne déterminée sur l'ensemble de la région d'intérêt est de  $412 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Au sein des cernes, la variation de la masse volumique anhydre mesurée varie de  $250\text{-}280 \text{ kg}/\text{m}^3$  dans le bois initial à  $850\text{-}1100 \text{ kg}/\text{m}^3$  dans le bois final selon les cernes (Figure 2.5 - courbe orange). Ces résultats mettent en évidence l'hétérogénéité de la structure anatomique du bois d'épicéa (résineux), avec des parois cellulaires plus fines et des lumens plus grands dans le bois initial que dans le bois final (Butterfield and Meylan, 1980). Les valeurs ainsi obtenues sont en concordance avec les résultats d'autres études utilisant la méthode de la micro-densitométrie ou des mesures optiques (Decoux et *al.*, 2004). De cette variation de masse volumique, il en résulte une saturation en eau  $X_{sat}$  minimale dans le bois final (50-70 %) et maximale dans le bois initial (330-380 %).

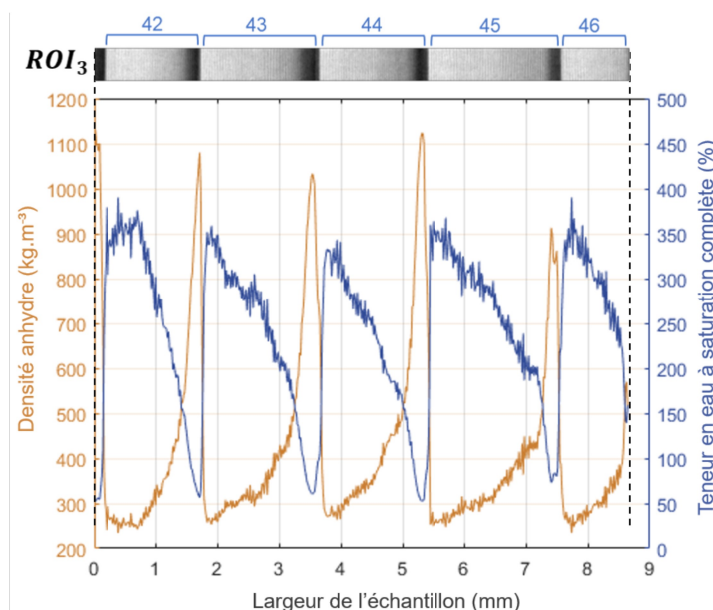


Figure 2.5- Distribution de la densité anhydre locale et de la teneur en eau locale à saturation complète le long de la largeur de l'échantillon pour la ROI #3

### 2.3.2 Direction longitudinale

#### 2.3.2.1 Tendances générales

La figure Figure 2.6 présente les tendances obtenues à partir des images pour les temps sélectionnés. L'absorption d'eau est visible via une variation du niveau de gris au sein de l'échantillon dès la première acquisition, soit après 50 secondes de contact avec l'eau. Ceci

indique un processus d'absorption d'eau rapide aux premiers instants (Figure 2.6a). Après 96 heures d'imbibition continue, la migration de l'humidité a atteint environ la moitié de la hauteur de l'échantillon (Figure 2.6a-d). L'évolution du front d'imbibition durant le test montre une migration non homogène inter et intra-cernes (Figure 2.6a-d). Les résultats mettent en évidence une absorption d'eau moins importante dans le cerne situé sur le côté droit (#46) que dans celui situé à côté. En effet, la variation du niveau de gris est moins prononcée ce qui signifie une teneur en eau plus faible. D'après cette observation, aucun transfert d'humidité significatif n'a semblé avoir eu lieu dans la direction radiale à travers la limite de cerne #45-46. Ces résultats montrant une absorption d'eau hétérogène dans l'espace et le temps au sein et entre les cernes confirment les observations de travaux antérieurs (Derome et *al.*, 2005; Desmarais et *al.*, 2016; Sandberg and Salin, 2012).

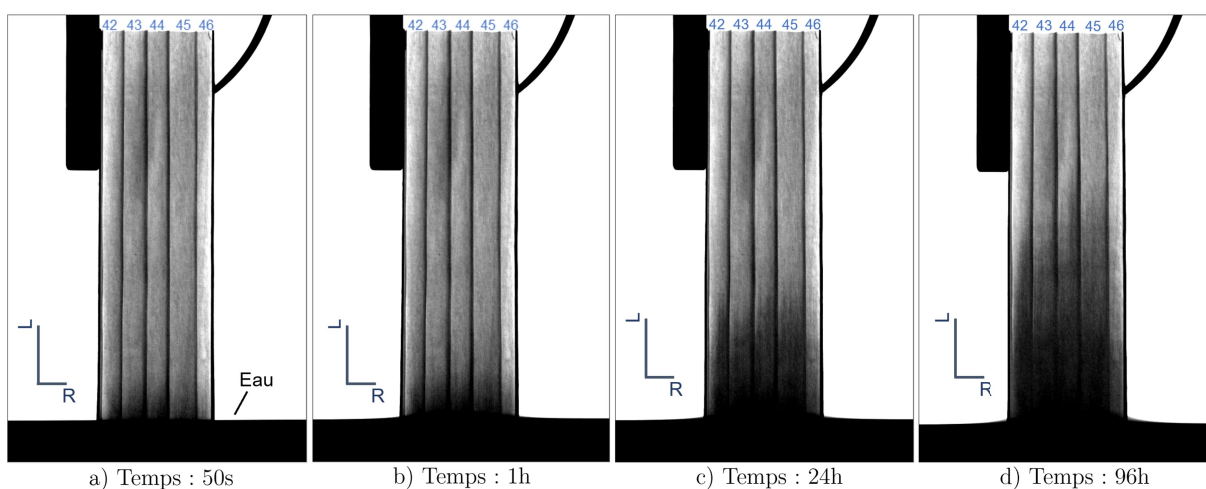


Figure 2.6- Absorption d'eau dans l'épicéa suivant la direction longitudinale à différents instants

### 2.3.2.2 Analyse quantitative

Pour compléter cette première analyse, la détermination de la teneur en eau selon la hauteur de l'échantillon a été effectuée en analysant chaque région d'intérêt (ROI). Lors de l'expérience d'imbibition, l'extrémité basse de l'échantillon n'était pas accessible à cause du contact avec l'eau. Pour cette raison, la détermination de la teneur en eau des ROI a débuté à partir de la ROI n°3, c'est-à-dire à une distance de 1,31 mm de l'extrémité de l'échantillon. La teneur en eau moyenne de l'échantillon a donc été estimée en faisant l'hypothèse que les ROIs #1 et #2 avaient la même teneur en eau que la ROI #3. L'évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon et des neuf ROIs sélectionnées sont représentées en fonction de la racine carrée du temps sur la Figure 2.7. Ces ROIs ont été choisies pour mettre en évidence la cinétique de l'absorption d'humidité à la fois à des intervalles de temps courts (proche de la surface de contact) et à des intervalles de temps longs (sur toute la hauteur de l'échantillon).

L'absorption d'humidité des ROIs situées à proximité de la surface de contact s'est effectuée suivant trois phases et de manière non linéaire. Une absorption rapide d'humidité est observée aux premiers instants (2 min 56 s) au niveau des ROIs proches de la zone de contact (jusqu'à

la ROI #5). La longueur concernée par cette augmentation rapide est d'environ 2 mm et peut s'expliquer par une invasion des lumens des trachéides directement en contact avec l'eau. Cependant, cette augmentation rapide de teneur en eau est restée éloignée de la saturation complète signifiant que seule une fraction des trachéides a été affectée. La seconde phase, qui implique les connexions entre les trachéides (via les ponctuations aréolées) et la diffusion de l'eau liée au sein des parois cellulaires, était beaucoup plus lente. L'augmentation de la teneur en eau calculée – en fonction de la racine carrée du temps – est restée constante jusqu'à ce qu'elle atteigne la dernière phase, où presque tous les lumens ont été remplis.

L'allure générale des courbes d'absorption d'humidité des ROI situées au-dessus d'une longueur de trachéide (ROI #10 à #29) décrit un comportement semblable mais avec un décalage dans le temps d'autant plus prononcé que la position de la ROI est éloignée de la surface de contact. Pour ces ROIs, l'évolution de la teneur en eau est caractérisée par une augmentation initiale lente et progressive, puis rapide lorsque le front d'imbibition atteint la zone considérée. À la fin de l'expérimentation, la distribution de la teneur en eau mesurée sur la hauteur de l'échantillon présente une forte hétérogénéité. Aucun changement significatif de la teneur en eau n'a été observé en haut de l'échantillon (ROI #58), alors qu'elle est passée de 10,1 % à d'environ 210 % (ROI #3) suivant une allure semblant tendre vers une valeur asymptotique. En conséquence, la teneur en eau moyenne de l'échantillon a augmenté rapidement aux premiers instants et a continué à croître, suivant une pente linéaire, jusqu'à la fin de l'essai en raison de la progression continue du front d'imbibition sur la hauteur de l'échantillon. La teneur en eau moyenne mesurée via l'imagerie par rayons X est très proche des valeurs obtenues par la méthode gravimétrique, avec 89,1 et 92,1 %, respectivement. Ces valeurs sont cohérentes compte tenu des précisions respectives des deux méthodes.

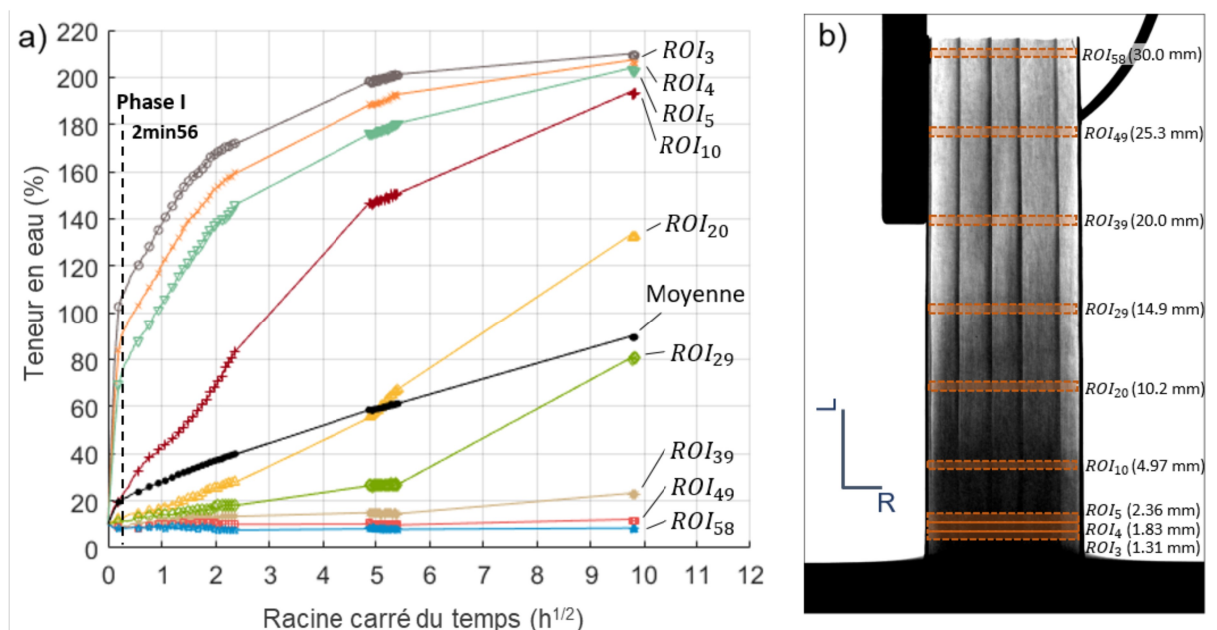


Figure 2.7- a) Cinétique de la teneur en eau pour les régions d'intérêts sélectionnées dans la direction longitudinale ; b) emplacement des régions d'intérêts dans l'échantillon

Les cinétiques d'absorption d'humidité dans le bois initial (BI) et le bois final (BF) sont visibles sur la Figure 2.8 pour les ROI #3 et #20, respectivement situées à 1,31 et 10,18 mm de la surface de contact. Ces deux emplacements ont été choisis pour illustrer les cinétiques d'absorption proches de la surface de contact (#3) et au-dessus de plusieurs trachéides successives (#20). Étant donné la forte hétérogénéité de la cinétique d'absorption entre le bois initial et le bois final, les résultats pour les ROIs sont présentés en teneur en eau (Figure 2.8a.1-ROI #3 et Figure 2.8a.2-ROI #20) et en saturation (Figure 2.8b.1-ROI #3 et Figure 2.8b.2-ROI #20). Au sein de la ROI #3, la cinétique d'absorption d'humidité se compose principalement de trois phases pour le bois initial et deux phases pour le bois final. La première phase (jusqu'à 2 min 56 s) est caractérisée par une augmentation rapide de la teneur en eau dans le bois initial et le bois final, confirmant une invasion directe des trachéides en contact avec l'eau. À la fin de cette phase, la vitesse d'absorption diminue fortement dans le bois final. En comparaison, la vitesse d'absorption de l'humidité dans le bois initial a également diminué mais dans une moindre mesure. La troisième phase dans le bois initial est caractérisée par un ralentissement de la cinétique d'absorption de l'humidité à mesure que la teneur en eau s'approche de la saturation complète.

Les résultats obtenus pour la ROI #20 – située à 10,18 mm de la surface de contact (Figure 2.8b.2) – confirment une augmentation significative de la teneur en eau dans le bois final avant le bois initial, comme rapporté qualitativement par l'imagerie par neutron par Desmarais et *al.* (2016). Après deux heures d'imbibition, un changement significatif de la teneur en eau est visible dans le bois final de trois cernes, alors qu'elle commence après vingt-quatre heures dans le bois initial. Pour expliquer ces différences, il est important de garder à l'esprit que la masse volumique moyenne des ROI situées dans le bois final est environ trois fois plus importante que celles du bois initial, soit  $970 \text{ kg.m}^{-3}$  contre  $283 \text{ kg.m}^{-3}$ . Cette variation de masse volumique au sein des cernes est due à la paroi cellulaire plus épaisse et à la taille plus petite des lumens dans le bois final que dans le bois initial (Kollmann and Côté, 1968). Cette structure anatomique induit un grand nombre de ponctuations aspirées dans le bois initial par rapport au bois final (Siau, 1984). En effet, la taille des ponctuations aréolées dans le bois final est plus petite que dans le bois initial ce qui conduit à une membrane plus rigide. Pour cette raison, elles sont moins susceptibles d'être aspirées lors du séchage de la planche initialement à l'état vert. Par conséquent, la migration de l'eau libre est facilitée dans le bois final, comme rapporté par Almeida et *al.* (2008) avec l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Dans le bois initial, la plupart des ponctuations sont aspirées entraînant une migration plus complexe de l'eau libre dans le réseau poreux. Aux premiers instants, seule une partie des trachéides directement en contact avec l'eau sont impliquées dans la migration de l'eau libre. Ensuite, l'eau migre d'une cellule à l'autre, expliquant la deuxième phase d'absorption de l'humidité. La diminution soudaine de la vitesse de migration dans le bois final de la ROI #3 à environ 65 % du taux de saturation, suivie d'une légère augmentation, peut s'expliquer par le fait que l'eau

libre ne représente qu'environ 50 % de la teneur en eau à saturation complète, alors qu'elle est de 90 % pour le bois initial. En effet, dans le bois final, la première phase d'absorption d'humidité peut s'expliquer par une invasion de l'eau libre dans presque tous les lumens des trachéides. Ensuite, l'augmentation lente et résiduelle de la teneur en eau jusqu'à la fin de l'expérience peut s'expliquer par la migration de l'eau dans les trachéides moins connectées ou dans les cellules des rayons ligneux. Ces résultats mettent en évidence la complexité de la migration de l'humidité dans le réseau poreux partiellement connecté, entraînant une hétérogénéité de la migration de l'eau dans l'espace et le temps.

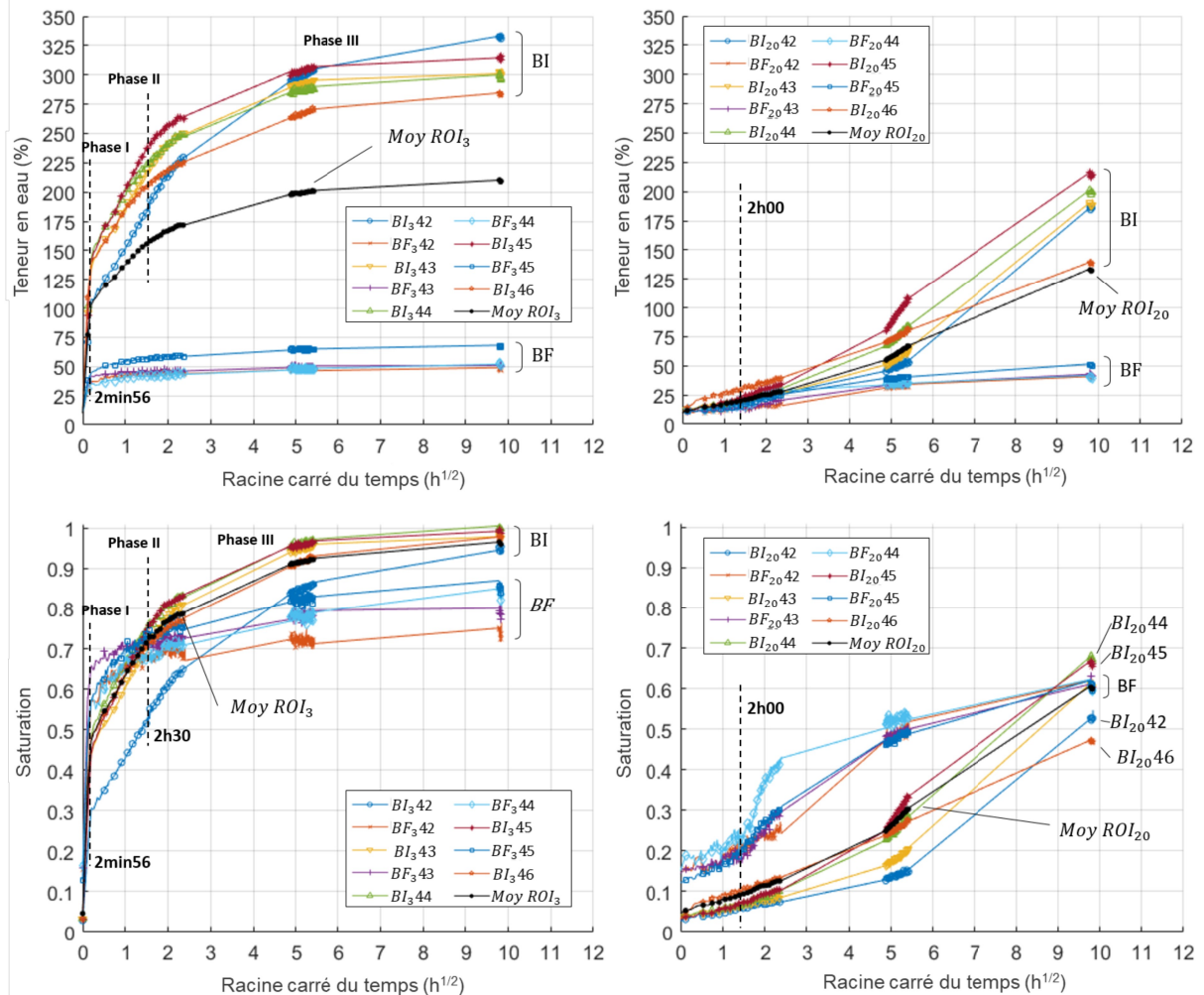


Figure 2.8- Cinétique d'absorption de l'humidité dans le bois initial (BI) et le bois final (BF) en teneur en eau (a) et saturation (b) pour les ROI #3 (1) et #20 (2), respectivement situées à 1,31 mm et 10,18 mm de la surface de contact

### 2.3.3 Direction radiale

#### 2.3.3.1 Tendances générales

Lors du test d'imbibition dans la direction radiale, la face de l'échantillon en contact avec l'eau était située dans le bois initial du cerne #38. Sur la Figure 2.9a, les images présentent l'évolution qualitative de l'absorption d'humidité au cours du temps. Le gonflement de

l'échantillon en direction tangentielle est clairement visible après 50 secondes de contact avec l'eau. Ensuite, le gonflement s'est légèrement prolongé jusqu'au bois final du même cerne. Cependant, aucun gonflement n'est observé au-dessus de la première limite cerne jusqu'à la fin de l'imbibition. L'absence de variations dimensionnelles signifie que l'eau liée ne s'est pas diffusée plus loin dans l'échantillon. Le bois final situé dans ce premier cerne semble faire office de barrière à la migration d'humidité, comme cela a été suggéré par Meder et *al.* (2003), même si cela n'a pas été observé par Sedighi-Gilani et *al.* (2012). Afin d'étudier si ce phénomène est dû à une caractéristique distincte du cerne #38, une deuxième expérience, avec le même échantillon et à la même teneur en eau initiale, a été réalisée après avoir raccourci l'échantillon pour supprimer le cerne #38. Dans ce cas, la face en contact avec l'eau était située désormais dans le bois initial du cerne #39 (Figure 2.9b). Les images montrent une absorption rapide d'humidité aux premiers instants avec un gonflement visible au-delà du premier cerne. Ensuite, l'absorption d'eau et du gonflement sont visibles dans le bois final des cerne #39 à #41 indiquant que l'eau a pu traverser la limite de cerne et migrer dans plusieurs cerne successifs.

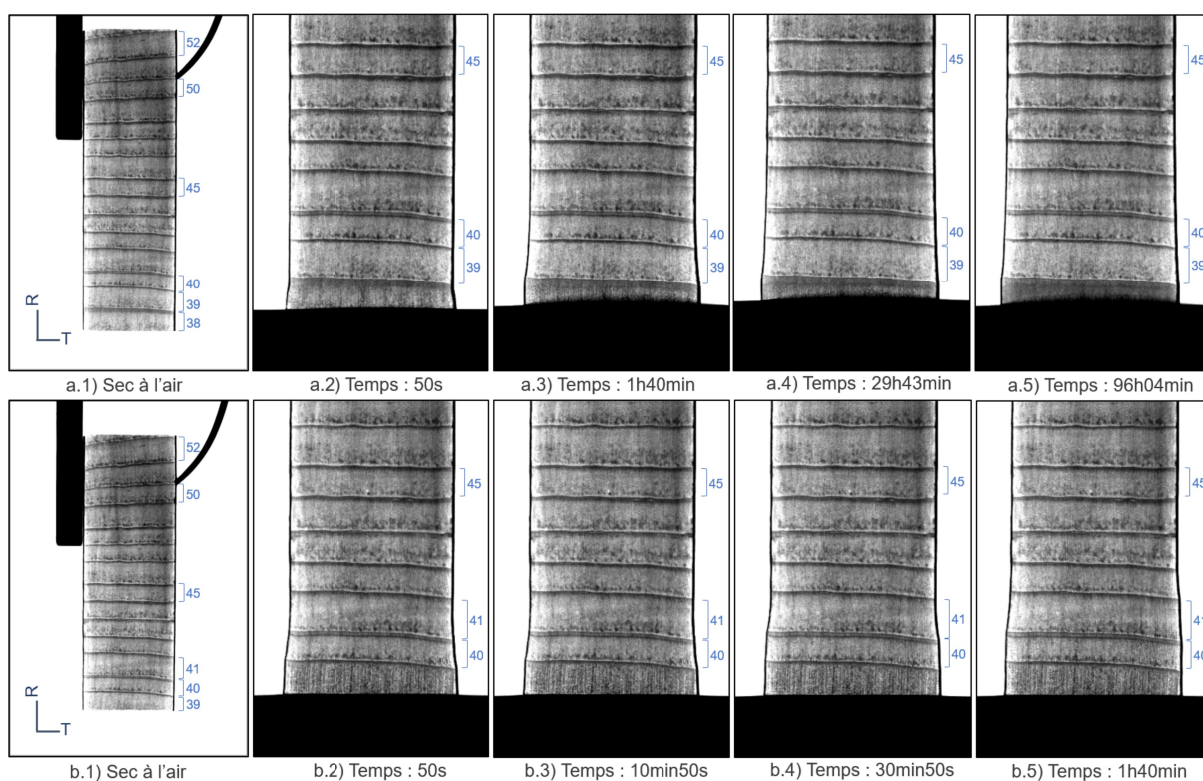


Figure 2.9- Absorption d'eau dans l'épicéa le long de la direction radiale à différents instants a) pour le premier test (avec le cerne n° 38) et b) pour le second test (après avoir retiré le cerne n° 38)

Pour expliquer ces différences de comportement, des agrandissements du bas de l'échantillon avant et après chaque expérience sont visibles sur la Figure 2.10. L'épaisseur relativement élevée du bois final du cerne 38 – inhabituelle pour du bois d'épicéa normal – suggère la présence de bois de compression (Figure 2.10a.1). À la fin de la première expérience d'imbibition, une ligne horizontale est visible dans la zone transitoire entre le bois initial et le



bois final du cerne 38 (Figure 2.10a.2). La migration de l'eau semble s'être stoppée à ce niveau, indiquant une discontinuité dans la porosité connectée. Lors de la seconde expérience – sans bois de compression apparent – l'eau est visible au sein des lumens des trachéides de plusieurs cerne annuels (taches sombres). Sur l'image de la Figure 2.10b.2, les lumens des trachéides accolées sont remplies préférentiellement selon la direction verticale – c'est-à-dire suivant la direction radiale – avec une hétérogénéité spatiale des lumens remplis.

De ces résultats, il est possible de conclure que le bois de compression constitue une barrière aux transferts en direction radiale puisque dans le bois normal, l'eau a pu traverser la limite de cerne sur plusieurs cerne. L'eau s'infiltre tout d'abord dans les trachéides connectées, puis migre dans les cellules restantes, de proche en proche.

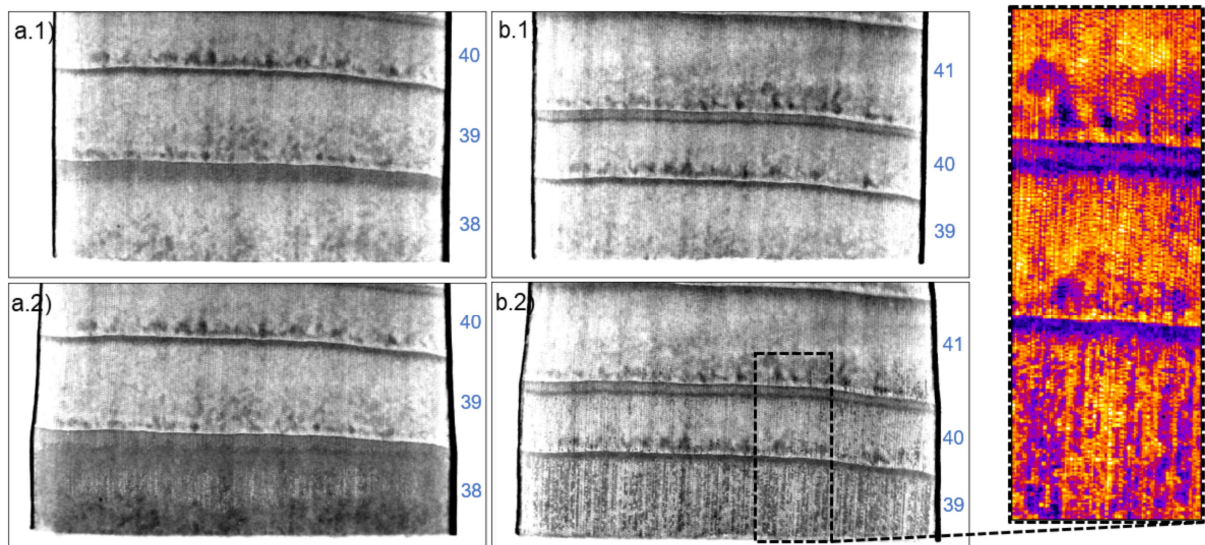


Figure 2.10- Zoom du bas de l'échantillon avant (indice 1) et à la fin (indice 2) de la première expérience d'imbibition (a) et (b) de la deuxième. Encadré en pointillé avec agrandissement à droite avec des fausses couleurs suivant le format "Feu" pour mettre en évidence les lumens remplis d'eau (taches bleues)

### 2.3.3.2 Analyse quantitative

La cinétique de la teneur en eau pour les ROIs sélectionnées est représentée sur la Figure 2.11 en fonction de la racine carrée du temps. Pour les deux expériences, une augmentation rapide de la teneur en eau est observée aux premiers instants près de la surface de contact et sous la première limite de cerne. Cependant, lors de la première expérience, aucune augmentation de teneur en eau significative n'est mesurée au sein du cerne situé juste au-dessus de la première limite de cerne (Figure 2.11-BI 39), alors que le taux de saturation en teneur en eau a atteint presque 40 % dans le cerne #40 lors de la seconde expérience. Au sein du cerne situé au-dessus (#41), une augmentation de la teneur en eau est observée dès trente minutes d'imbibition. Pour étudier ces différents comportements, le cerne en contact avec l'eau nécessite une approche plus détaillée pour les deux expériences. La zone la plus proche accessible aux rayons X (au-dessus de l'eau contenue dans le réservoir) est située dans le bois de transition BT

#38 dans la première expérience et BT #39 dans la seconde (Figure 2.11). Le taux de saturation des deux ROIs a atteint 55 % en moins de trois minutes. Cependant, dans le bois final, le taux de saturation est plus faible dans le cerne #38 que dans le cerne #39. Pour mettre en évidence le comportement particulier du cerne #38 lors de la première expérience, la région d'intérêt localisée dans le bois final (BF 38) a été divisée en deux parties égales suivant la direction radiale et nommées BF-1 38 et BF-2 38 (Figure 2.11a.2). Les deux ROIs montrent une différence de cinétique d'absorption d'humidité. Celle située en dessous (la plus proche de la surface de contact, c'est-à-dire BF-1 38) atteint un taux de saturation proche de 70 %, alors que la seconde (BF-2 38) reste proche de 40 %. Ces résultats confirment que la migration de l'humidité a cessé avant la première limite de cerne.

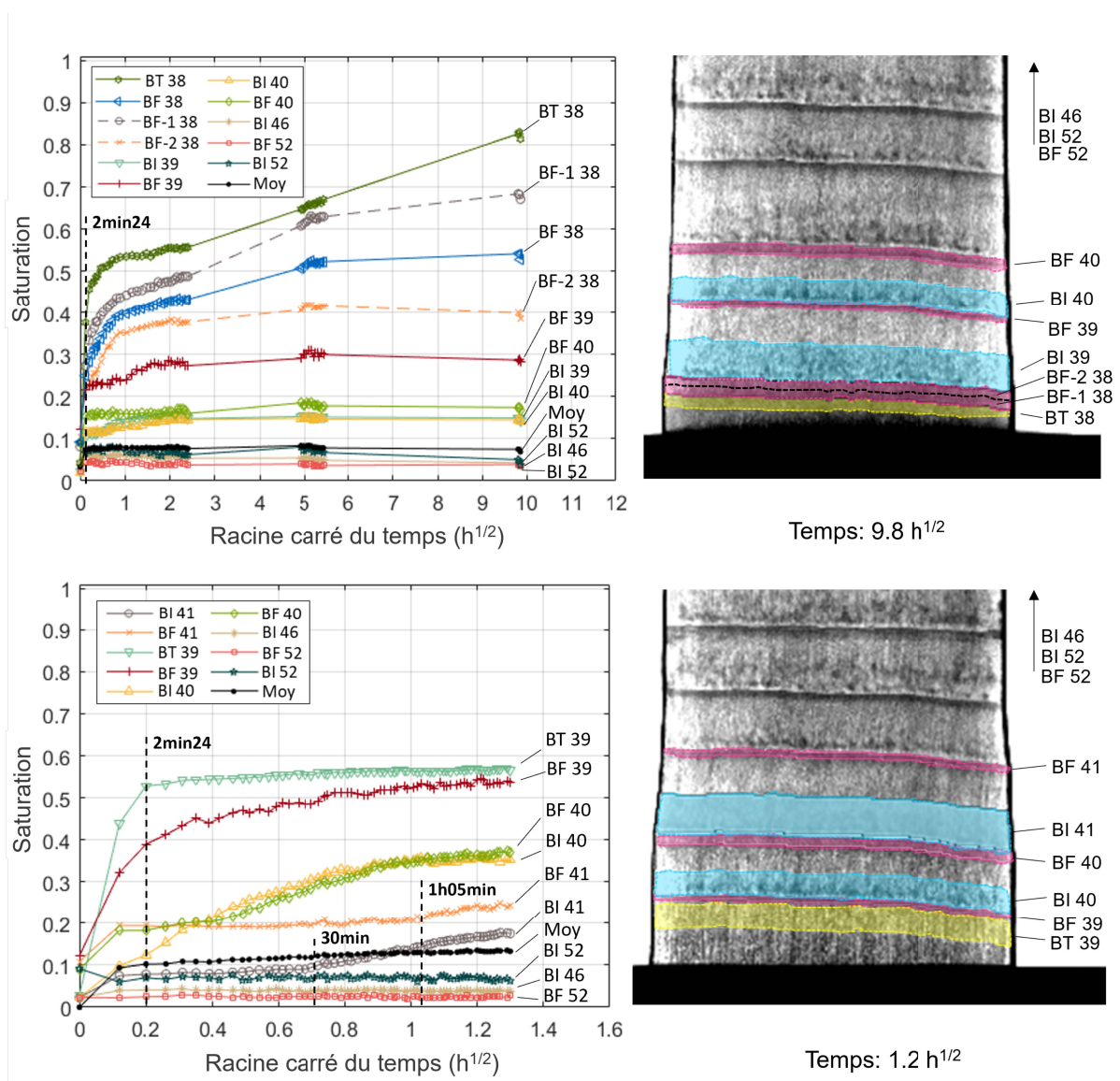


Figure 2.11- Evolution de la teneur en eau des ROI sélectionnées a) lors du premier essai (comprenant le cerne #38) et b) lors du second essai après avoir retiré le cerne #38

L'épaisseur relativement importante du bois final du cerne #38 suggère la présence de bois de compression comme énoncé auparavant. Pour approfondir et confirmer l'analyse effectuée à partir des résultats qualitatifs et quantitatifs, des images d'un échantillon jumeau (situé à proximité dans la direction longitudinale) ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage environnemental (*Environmental Scanning Electron Microscope* ESEM) avec le mode « Low Vac » (Figure 2.12). Chez les résineux, le bois de compression présente des cellules arrondies en raison de la valeur élevée de l'angle des microfibrilles avec des parois cellulaires plus épaisses qui forment des vides intercellulaires localisés à l'intersection de trois cellules, également appelé point triple (Butterfield and Meylan, 1980). Cependant, comme le bois de compression se forme en réaction aux contraintes environnementales, une réponse proportionnelle de l'arbre aux contraintes conduit à la formation de bois de compression avec des parois plus ou moins épaisses (Donaldson and Singh, 2013; Gardiner et al., 2014). Au sein du cerne d'intérêt, les parois cellulaires épaisses avec une forme partiellement circulaire ainsi que l'absence de ponctuations aréolées observées par rapport au bois initial sont les signes de la formation de bois de compression modérée (Warensjö, 2003). Ces caractéristiques particulières du bois de compression conduisent à une plus faible diffusion de l'eau liée comparativement au bois normal (Siau, 1984; Tarmian et al., 2012). Par ailleurs, le bois de compression est moins perméable en raison du nombre réduit de ponctuations ce qui ne permet pas à l'eau libre de migrer facilement d'une cellule à l'autre sous l'effet des forces capillaires (Mayr et al., 2006; Tarmian and Perré, 2009). Ces modifications chimiques et physiques expliquent pourquoi le bois de compression présente des propriétés différentes de celles du bois normal et fait office de barrière à la migration de l'humidité.

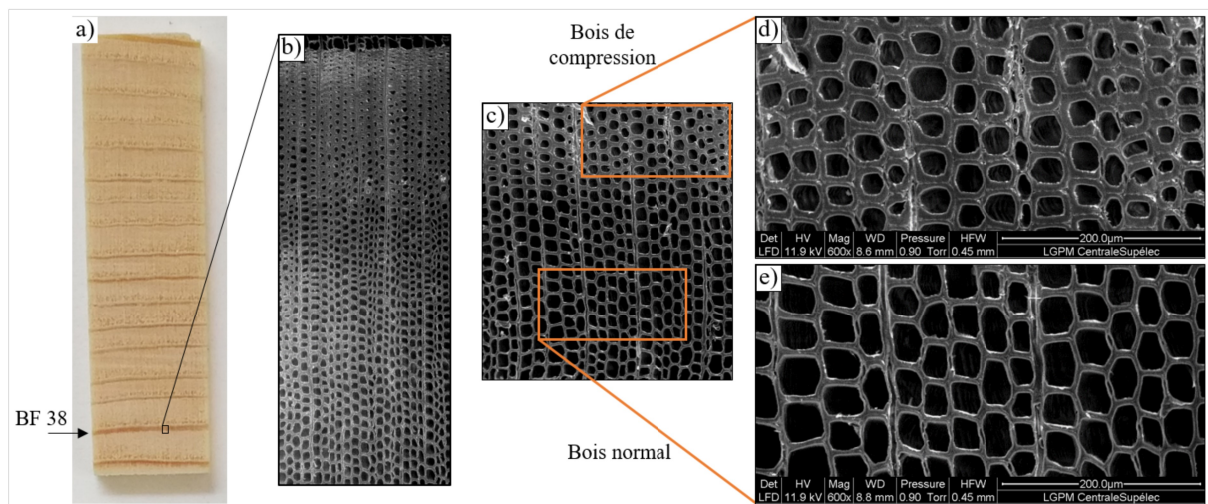


Figure 2.12- Images ESEM du cerne d'intérêt #38 de l'échantillon jumeau (photographie) utilisé pour l'expérience d'imbibition dans la direction radiale

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'imagerie 2D par rayons X a été utilisée comme technique non destructive pour étudier l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau dans l'épicéa lors d'expériences d'imbibition suivant les directions longitudinale et radiale. L'originalité de ce travail réside dans sa description et quantification de la cinétique d'absorption de l'humidité avec la mise en évidence des différences de propriétés de transfert entre le bois initial et le bois final. Les principaux résultats de ces expériences peuvent être résumés comme suit :

- Suivant la direction longitudinale :

- La migration de l'eau libre est plus rapide dans le bois final que dans le bois initial en raison de la présence de ponctuations aréolées non aspirées facilitant la migration du liquide,
- La migration de l'eau libre est plus complexe dans le bois initial, avec deux constantes de temps : la première avec la migration de l'eau dans une fraction de lumens connectés aux temps courts et la seconde – plus longue – pour atteindre progressivement la saturation complète par migration de cellules en cellules dans la direction radiale.

- Suivant la direction radiale :

- Le bois de compression fait office de barrière à la migration de l'humidité en raison de ses caractéristiques anatomiques spécifiques, avec un nombre limité de ponctuations dans les parois cellulaires et des quantités élevées de lignine,
- Dans le bois normal – comme pour la migration longitudinale – l'eau libre a pu migrer dans les quelques trachéides connectées avec des ponctuations non aspirées, expliquant les motifs ponctuels, suivis d'une lente propagation dans les régions voisines.

Les données expérimentales obtenues – issues de l'imagerie 2D par rayons X – peuvent être utiles pour améliorer la prédiction des modèles numériques simulant les transferts couplés de chaleur-masse dans le bois massif ou dans d'autres matériaux de construction. La pertinence de l'utilisation d'un modèle homogène ou hétérogène pourrait être étudiée avec la possibilité de déterminer la perméabilité relative liquide dans le bois final par méthode inverse. Ces analyses pourraient contribuer à la réduction de l'écart entre les mesures et les simulations des transferts dans le bâtiment et donc être utile pour améliorer leur performance et leur durabilité.

## Annexe A : Choix du produit d'étanchéité adapté à l'imagerie X et au bois

Des essais préliminaires sans application de produit d'étanchéité sur les faces périphériques ont été réalisés en utilisant l'imagerie par rayons X. Cependant, ces derniers n'ont pas été analysés en raison de la migration capillaire de l'eau à la surface de l'échantillon. Par conséquent, la teneur en eau et la vitesse de migration auraient été surestimées (De Meijer and Militz, 2001). Cet effet est visible sur la figure 5 de Desmarais et *al.* (2016), où des expériences d'imbibition dans la direction radiale du bois ont été réalisées. Lorsque les surfaces latérales ne sont pas recouvertes d'un revêtement imperméable et hydrophobe, l'eau remonte sur le plan longitudinal/tangentiel et pénètre dans le matériau via les lumens des trachéides reliées par des ponctuations ou atteint le sommet de l'échantillon. Ces phénomènes perturbent l'évaluation de la teneur en eau et les voies de pénétration de l'eau durant l'imbibition.

Dans cette étude, différents produits de revêtement ont été testés, parmi lesquels :

- résine époxy (Loctite EA3430) combinée à une feuille d'aluminium ; la résine époxy et la feuille aluminium présentent des fissures en raison du gonflement,
- peinture imperméable (AquaStop V33) ; peu hydrophobe et viscosité trop faible conduisant à la pénétration du produit dans les lumens des trachéides,
- spray bitumineux (SINTO) ; trop fragile,
- lasure bois (Mauler) ; pénètre dans les lumens des trachéides,
- sous-couche imperméable de carrelage (ParexLanko) : forte atténuation des rayons X entraînant une perte de détails. La présence de particules solides a rendu difficile une application homogène sur la surface du bois,
- revêtement liquide caoutchouc imperméable (Rubson, Liquid Rubber Plus) ; ne pénètre pas dans les lumens, facile à appliquer au pinceau, atténuation modérée aux rayons X, capable de suivre les variations dimensionnelles sans rupture, et imperméable.

Le vernis n'a pas été étudié en raison de sa non élasticité et de sa pénétration dans les lumens.

Par conséquent, le revêtement caoutchouc imperméable (Rubson) a apporté le meilleur compromis pour répondre aux spécificités du matériau bois et de l'imagerie par rayons X. La Figure 2.13 confirme la non pénétration du produit d'étanchéité dans le matériau et la continuité de la couche appliquée. Les coupes sélectionnées à partir d'une image tomographique 3D et réalisée à l'état sec (taille de voxel de 7  $\mu\text{m}$ ) ont mis en évidence l'irrégularité locale de la surface de l'échantillon. Les taches noires – principalement situées dans le bois initial – sont dues à des surépaisseurs locales du produit de revêtement comblant les irrégularités de l'échantillon.

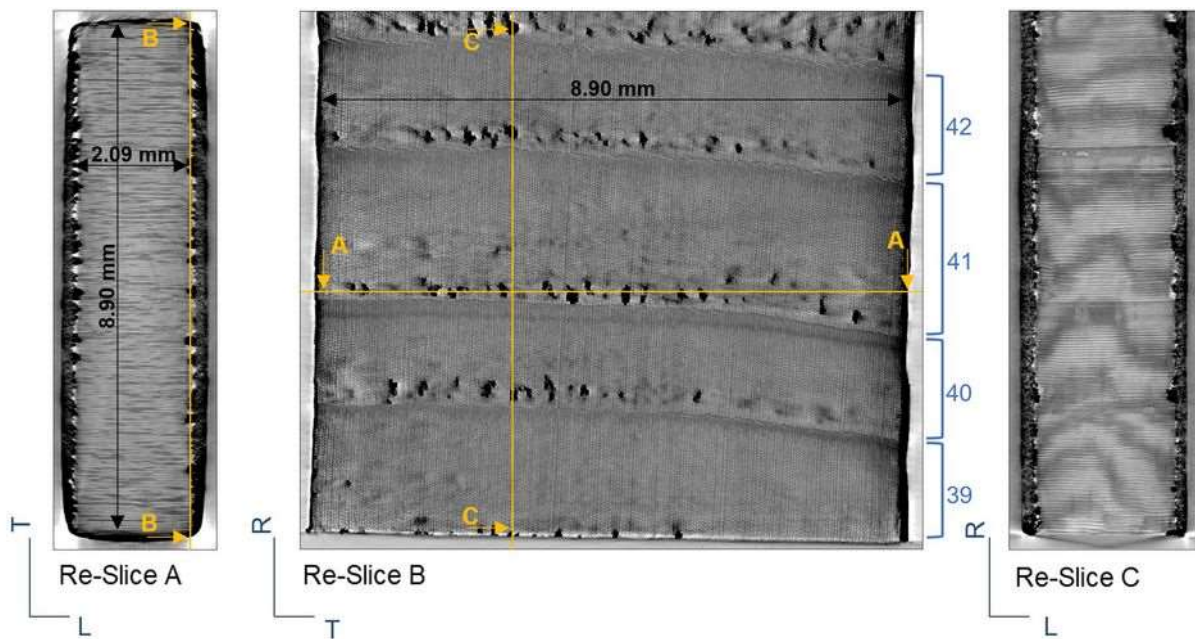


Figure 2.13- Coupes sélectionnées d'une image 3D obtenue par tomographie de l'échantillon B







# Chapitre 3

---

Investigation 3D des voies de passage de l'eau libre au sein de la structure interne de l'épicéa commun du bois par micro tomographie X



## 3.1 Introduction

L'étude à l'échelle macroscopique de la migration d'eau dans le bois d'épicéa lors de l'imbibition a permis de mettre en évidence des cinétiques de migration différentes entre le bois initial et le bois final dans la direction longitudinale durant l'imbibition. Au sein des cernes, la vitesse du front d'imbibition est plus importante dans le bois final comparé au bois initial. Une des pistes évoquées est la probabilité d'aspiration des ponctuations aréolées plus importante dans le bois initial comparé au bois final. Pour confirmer le rôle des ponctuations dans la migration liquide, la visualisation directe des voies de passage de l'eau libre au sein de la structure anatomique est nécessaire. Pour y accéder, la tomographie par rayons X a été utilisée, car cette technique permet une visualisation interne du matériau de manière non destructive.

Ce chapitre présente les solutions qui ont été imaginées pour suivre la migration de l'eau dans l'épicéa durant l'imbibition suivant la direction longitudinale avec la tomographie par rayons X. Le besoin de descendre à l'échelle microscopique a requis le développement d'un dispositif expérimental compatible avec les contraintes de la tomographie. Le défi ici était de maintenir le contact de la surface inférieure de l'échantillon avec l'eau pendant les acquisitions nécessitant une rotation complète et sans vibration de la région observée. L'analyse des images – issues des reconstructions 3D – obtenues au cours de l'imbibition a permis de décrire les voies de passages de l'eau dans le bois initial et le final d'un échantillon d'épicéa.

## 3.2 Matériels et méthodes

### 3.2.1 Préparation de l'échantillon

L'échantillon cylindrique d'épicéa (*Picea abies*) a été extrait dans la même planche que pour les échantillons utilisés lors des expériences d'imbibition 2D. Pour rappel, un total de 73 cernes annuel allant de la moelle au cambium a été compté. Un cylindre de 3 mm de diamètre et d'une longueur de 20 mm – dans la direction longitudinale – a été usiné à l'aide d'une machine CNC 5 axes (SCM morbidelli 100). L'échantillon était situé au niveau de la limite de cerne des cernes #50 (bois final) et #51 (bois initial). Ce dernier est donc localisé dans le bois mature et duramen (Donaldson and Singh, 2013; Longuetaud et al., 2006; Sandberg, 2009).

Après avoir été débité, l'échantillon a été stocké dans une enceinte climatique (Mermert HPP2200) avec une température fixée à 25 °C et une humidité relative à 50 %. Une fois la teneur en eau d'équilibre atteinte, la surface latérale a été enduite d'un produit d'étanchéité (AquaStop V33) pour limiter les transferts de masse en périphérie. Cette précaution permet d'étudier la migration de l'humidité en 1-D le long de l'axe principal de l'échantillon. Pour appliquer le revêtement de manière uniforme, un tour à bois miniature a spécifiquement été

conçu afin d'être adapté à la petite taille de l'échantillon cylindrique. La surface de l'échantillon a été poncée – avec un papier abrasif P320 – avant et après la première couche pour éliminer les fibres levées. Ensuite, une seconde couche a été appliquée pour parfaire le recouvrement. Enfin, la face en contact avec l'eau et la face opposée ont été rafraîchies à l'aide d'un microtome (Thermo Scientific Microm HM 450) pour obtenir la longueur finale. Une fois la préparation de l'échantillon finalisée, il a été stocké dans l'enceinte climatique jusqu'à stabilisation de sa masse.

## 3.2.2 Tomographie par rayons X

### 3.2.2.1 Description du dispositif expérimental

L'expérience d'imbibition a consisté à soumettre la surface inférieure de l'échantillon à un contact liquide. Le défi ici était de maintenir le contact avec l'eau pendant les scans nécessitant une rotation complète de l'échantillon sans vibration. Pour cela, un montage original a été conçu, comme visible sur la Figure 3.1. Le dispositif se compose d'un porte-échantillon situé au sommet d'un tube d'aluminium et d'un réservoir d'eau. L'ensemble est connecté avec un tube flexible (Figure 3.1a et Figure 3.1b). Le réservoir d'eau – imprimé en 3D – est divisé en deux compartiments afin de contrôler un niveau d'eau constant via un système de trop-plein. Le débit d'eau vers le trop plein est assuré par une pompe miniature situé dans un compartiment du réservoir.

Ce système d'alimentation en eau fonctionne comme un système de vase communicant où la hauteur du trop-plein d'eau dans le réservoir est la même qu'au sommet du tube d'aluminium. Avant le début de l'expérience, la hauteur du trop plein est ajusté à l'aide d'une platine verticale micrométrique (modèle Newport M-UMR5.25) pour que le niveau d'eau atteigne l'extrémité du tube en aluminium. Durant l'expérience d'imbibition, les conditions environnementales étaient contrôlées avec un capteur SHT85 (Sensirion AG avec une précision de  $\pm 1,5$  % RH et  $\pm 0,1$  °C) situé à proximité de l'échantillon (Figure 3.1a).

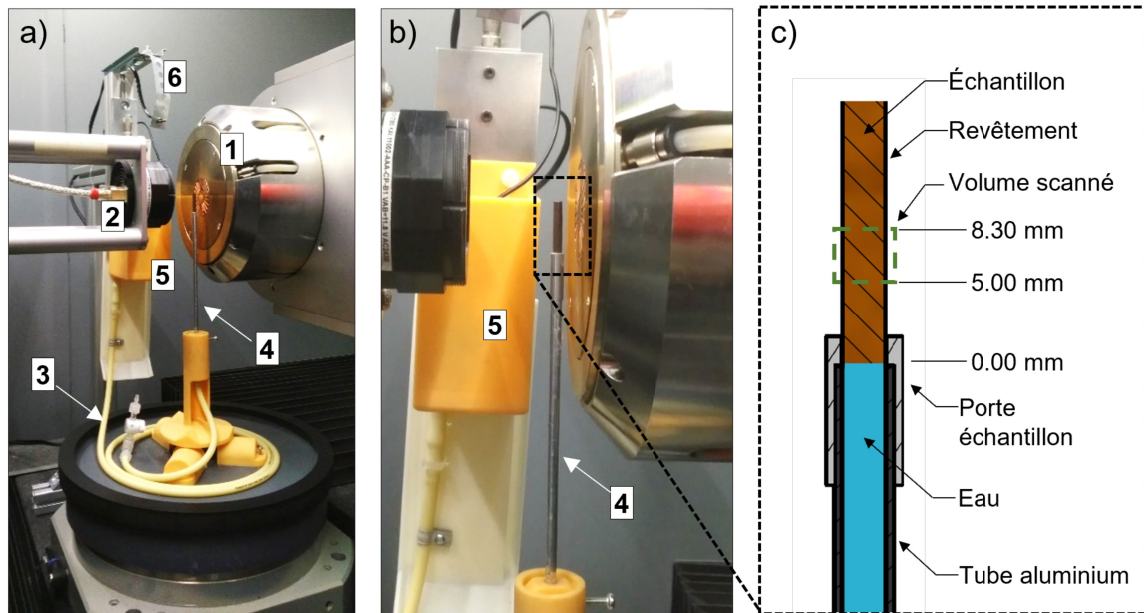


Figure 3.1- a) Vue d'ensemble du dispositif expérimental placé à proximité de la nano-source de rayons X (1), de l'imageur CCD (2), du tube flexible (3), du tube en aluminium (4), du réservoir d'eau distillée maintenu sur une platine micrométrique verticale (5) et du capteur de température et d'humidité relative (6) ; b) Zoom de l'emplacement de l'échantillon au sommet du tube en aluminium ; c) Schéma de l'échantillon avec la position du volume observé par rapport à l'extrémité basse de l'échantillon en contact avec l'eau (rectangle pointillé vert)

Les scans réalisés pendant l'imbibition ont été effectués à l'aide d'un nano-tomographe de dernière génération (RX Solution, EasyTom XL Ultra 150-160). La nano-source de rayons X – avec une tension fixée à 51 kV et un courant de 70  $\mu\text{A}$  – a été combinée à une caméra CCD 16 bits composée d'une matrice de  $4032 \times 2688$  avec une taille de pixel de 9  $\mu\text{m}$ . Un binning  $2 \times 2$  a été adopté sur l'imageur pour correspondre à la résolution du scintillateur. Le temps d'exposition était fixé à 0,6 seconde par image, sans moyenne d'image. Ces paramètres – associés au grossissement géométrique donné par les distances source-objet-imageur – ont permis d'obtenir une taille de voxel égale à 3  $\mu\text{m}$  avec une hauteur de scan de 3,3 mm pour un temps d'acquisition de 15 minutes. Le bas du volume scanné dans l'échantillon a été positionné à 5 mm de la surface de contact de l'eau (Figure 3.1c) pour s'assurer qu'au moins une extrémité de trachéide (et plus probablement deux) soit traversée par l'eau.

Avant le début de l'imbibition, l'état initial de l'échantillon – sec à l'air ( $X = 8\%$ , base sèche) – a été scanné. Ensuite, une précaution a été prise pour éviter la présence de bulles d'air piégées entre l'eau et le bas de l'échantillon pendant l'imbibition. Pour ce faire, l'échantillon positionné sur le porte échantillon a été retiré du tube d'aluminium avant d'allumer la pompe à eau. Ensuite, une fois l'eau arrivée en haut du tube d'aluminium, le porte échantillon était repositionné à la même position (Figure 3.1c), donnant dans le même temps le début de l'imbibition. L'absence de bulles d'air était vérifiée et validée par l'imagerie aux

rayons X. L'expérience a duré 24 heures au total. Plusieurs scans ont été réalisés pour suivre l'évolution de la migration de l'eau au sein de l'échantillon. Après chaque scan, le support échantillon était ramené manuellement à sa position angulaire initiale pour éviter l'enroulement du tube flexible. Il est à noter que pour obtenir une reconstruction 3D sans flou, le gonflement de l'échantillon doit rester négligeable pendant toute la durée d'un scan. Pour cette raison, la première acquisition a été effectuée une heure après le début de l'imbibition, soit une fois que le gonflement était finalisé sur l'ensemble du volume observé.

### 3.2.2.2 Traitement d'image

Les reconstructions 3D – à partir des projections 2D – ont été réalisées à l'aide du logiciel X-act (RX Solution) reposant sur le principe de la rétroprojection filtrée. Les étapes suivantes du traitement des images ont été réalisées avec le logiciel MATLAB. Dans un premier temps, les coupes transversales – empilées le long de l'axe z (Figure 3.2a) – ont été converties en images binaires en utilisant un seuillage local via la fonction *imbinarize* disponible sur MATLAB. Ensuite, les pixels isolés résiduels ont été supprimés dès lors qu'ils représentaient un groupement inférieur à 8 pixels accolés (Figure 3.2b). Les capacités d'atténuation des rayons X par l'eau et la matière lignocellulosique étaient trop proches pour différencier ces deux matières par seuillage (annexe B). Ainsi, les images binaires sont composées de pixels blancs (air) et de pixels noirs (parois cellulaires et/ou eau liquide) comme il est visible sur la Figure 3.2b. Une région d'intérêt (ROI) a été établie en excluant la périphérie de l'échantillon (en gris clair), endommagée lors de l'usinage (Figure 3.2c). Enfin, pour obtenir une visualisation des voies de passage de l'eau, les parois cellulaires ont été éliminées à l'aide d'une fonction d'érosion avec quatre itérations, suivie de l'élimination des groupes isolés de moins de 8 pixels. Ainsi, seuls les lumens des trachéides remplies d'eau restaient visibles (Figure 3.2d). Cette méthode a été choisie pour mettre en évidence l'eau dans les trachéides situées dans le bois initial. Dans le bois final, la taille du voxel – proche de la taille des pores – créait des régions continues sans possibilité de visualiser le passage de l'eau. Des groupements de pixels ne correspondant pas à de l'eau libre étaient également présents au niveau des canaux résinifères initialement remplis par des substances. Pour autant, cette méthode a permis d'obtenir une bonne vue d'ensemble de la distribution 3D de l'eau dans le réseau poreux pour une analyse qualitative.

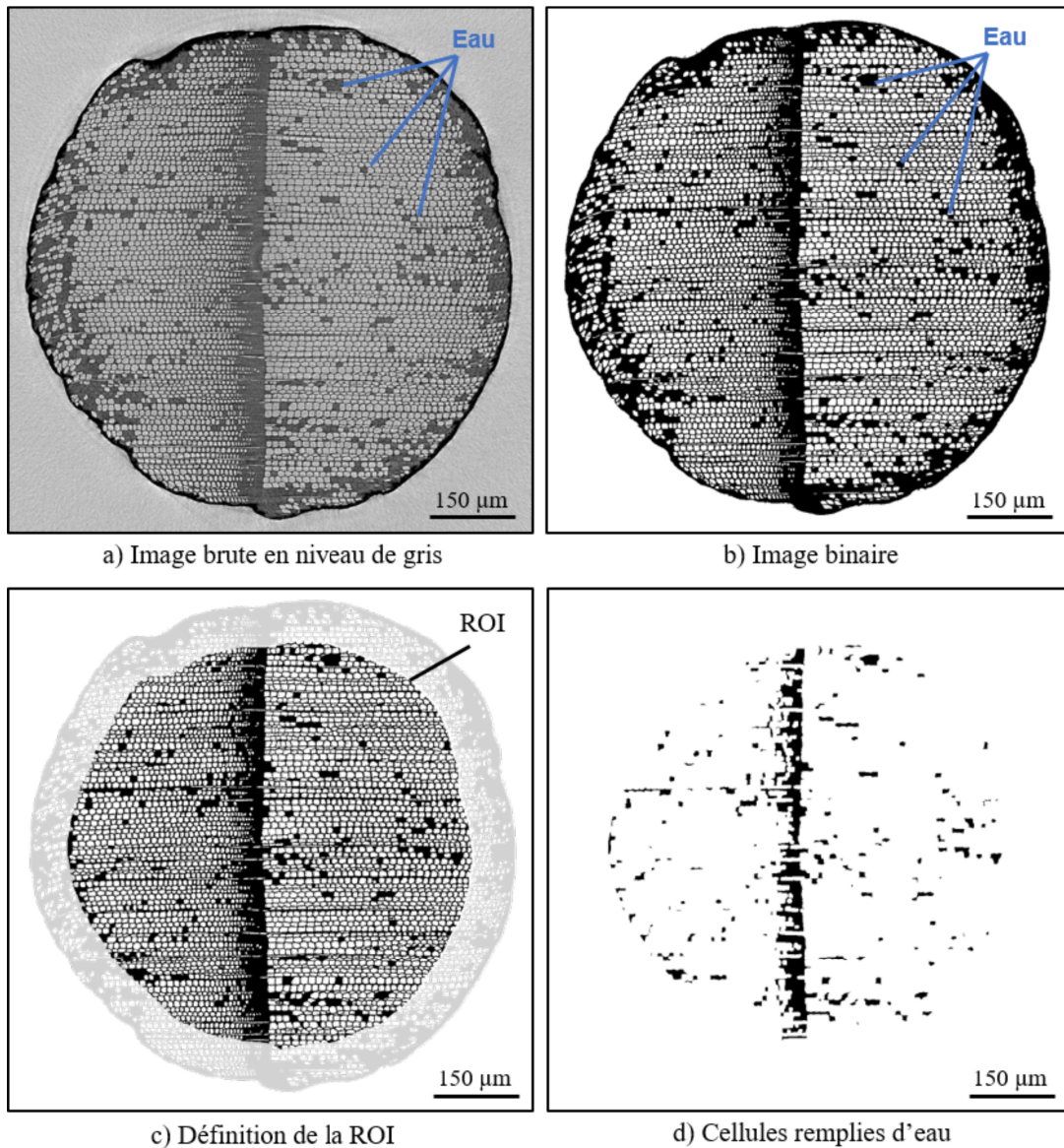


Figure 3.2- Coupe transversale de l'échantillon avec présence d'eau liquide à chaque étape du traitement d'image : a) image brute, b) après seuillage, c) avec la sélection de la région d'intérêt (ROI) et d) avec seul les lumens remplis d'eau dans la ROI

### 3.3 Résultats et discussion

La Figure 3.3 présente les coupes transversales de l'échantillon situées à 5 et 8,3 mm de la surface de contact à différents instants après traitement des images. L'eau a été mise en évidence en utilisant deux couleurs : la couleur orange correspond aux lumens nouvellement remplis d'eau (depuis l'acquisition précédente) et la couleur verte correspond aux lumens remplis d'eau en amont de l'acquisition précédente. Les résultats montrent un comportement contrasté de la migration d'eau entre le bois initial (BI) et le bois final (BF) pendant

l'imbibition. Après une heure d'imbibition, l'eau a progressé dans la plupart des trachéides situées dans le bois final jusqu'au sommet du volume scanné (à 8,3 mm de la surface de contact), alors que seules quelques trachéides isolées ont été remplies dans le bois initial. Lors la seconde acquisition – enregistrée deux heures plus tard – les nouvelles trachéides remplies d'eau (couleurs orange) étaient principalement situées à côté des précédentes. Après 19 et 24 heures d'imbibition, l'eau était présente dans des groupes de trachéides accolées, distribués de manière non uniforme. À la fin de l'expérience, des zones avec des cellules vides restaient présentes dans le bois initial sur les deux hauteurs des coupes (5 et 8,3 mm) mais ne semblaient pas être liées d'une coupe à l'autre.

La différence de migration de l'eau entre le bois initial et le bois final des essences résineuses a déjà été observée dans plusieurs études (Almeida *et al.*, 2008; Derome *et al.*, 2005; Desmarais *et al.*, 2016; Sandberg and Salin, 2012) et mesurée comme évoqué lors du chapitre précédent (Martin *et al.*, 2021), utilisant des méthodes non-destructives. La capacité de l'eau libre à migrer dans une pièce de bois est liée à sa perméabilité et donc notamment à sa porosité connectée. Chez les essences résineuses, la perméabilité à l'air est plus faible après le séchage en raison de l'aspiration des ponctuations aréolées (Comstock, 1969; Wilson and White, 1986). En raison de l'augmentation de l'épaisseur de la paroi cellulaire et de la diminution de la taille des ponctuations aréolées du bois initial au bois final, presque toutes les ponctuations peuvent être aspirées dans le bois initial et aucune dans le bois final (Bolton and Petty, 1978; Perré and Turner, 2001b). Les observations effectuées à partir de la Figure 3.3 confirment que les trachéides localisées dans le bois final restent conductrices malgré la petite taille des lumens, permettant ainsi à l'eau de migrer au sommet de l'échantillon en un temps relativement court. À l'inverse, le pourcentage élevé d'aspiration des ponctuations aréolées dans le bois initial réduit la connectivité entre les lumens des trachéides, conduisant à un nombre limité de chemin continu restant. Il en résulte une imbibition lente et incomplète dans cette partie du cerne. Le faible nombre de cellules utilisées comme voie de passage par l'eau libre a également été observé dans des travaux précédents utilisant de l'eau colorée (Petty and Preston, 1970; Ghazil, 2010). Cependant, contrairement à l'écoulement apparemment longitudinal dans le bois final, la distribution des cellules remplies entre les deux hauteurs (5 et 8,3 mm de la surface de contact) ne décrit aucune organisation longitudinale dans le bois initial. En raison de la très faible probabilité de connexion entre les trachéides dans le bois initial, les rares voies possibles pour remplir les trachéides voisines peuvent être soit transverses, soit longitudinales.



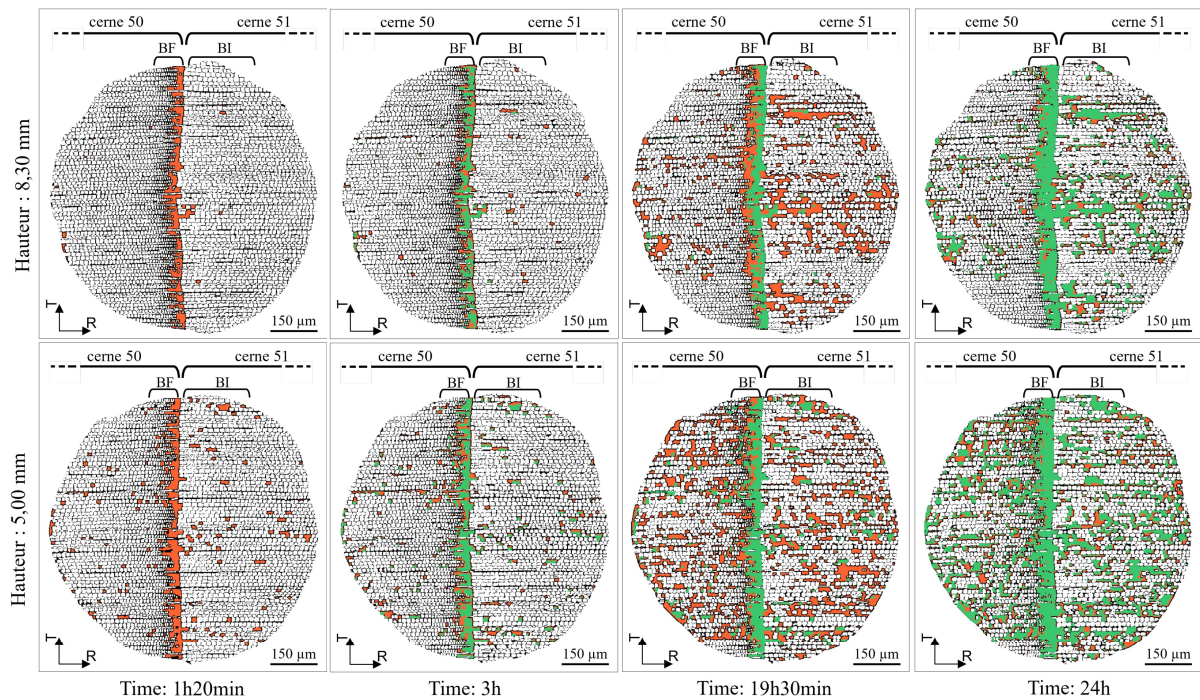


Figure 3.3- Coupes transversales situées à 5 mm (en bas du volume étudié) et 8,30 mm (en haut du volume étudié) de la surface de contact pendant l'imbibition. La couleur orange correspond aux lumens remplis depuis l'acquisition précédente et la couleur verte en amont des précédentes acquisitions

Pour accéder à la distribution de l'eau libre sur la hauteur du volume scanné, la surface totale des lumens a été estimée en additionnant le nombre de pixels blancs à l'intérieur de la ROI pour chaque coupe transversale (Figure 3.2c). Les courbes de la Figure 3.4 représentent la surface totale des lumens en fonction de la hauteur du volume scanné. Comme attendu, la surface des lumens a diminué au cours du temps et a augmenté suivant la hauteur (Figure 3.4). Ce qui est cependant intéressant, c'est l'allure non linéaire des courbes, notamment après 19 et 24 heures d'imbibition. Les variations locales ont augmenté avec le temps, mais leurs pics sont restés aux mêmes emplacements, reflétant le développement de groupement de cellules remplies. Ces résultats semblent être liés à la structure anatomique du bois qui n'est pas uniforme dans la direction longitudinale, avec la présence de rayons ligneux et de canaux résinifères.

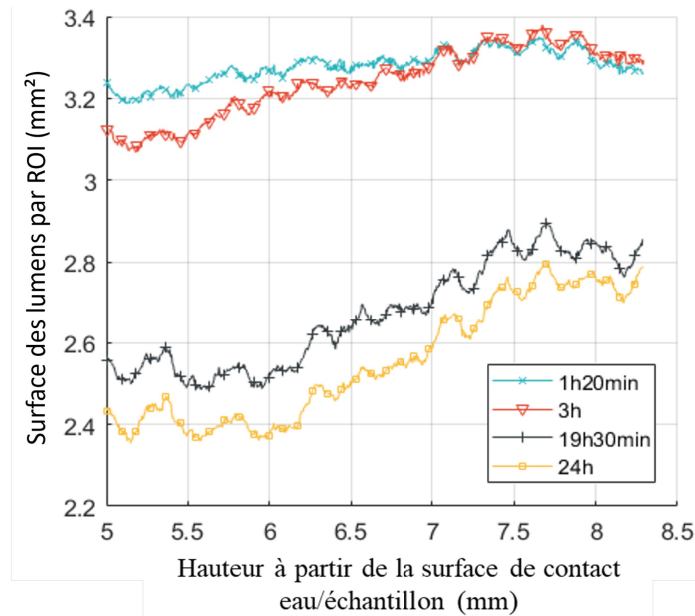


Figure 3.4- Surface totale des lumens localisée dans la ROI de chaque coupe transversale suivant la hauteur du volume scanné pendant l'imbibition

Afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble des mécanismes d'invasion, le volume scanné a été exploré par des vues 3D le long du plan longitudinal-tangentiel (L-T) en Figure 3.5a, et longitudinal-radial (L-R) en Figure 3.5b pour différents temps d'imbibition. Les parois cellulaires ont été retirées pour mettre en évidence la présence de l'eau (étape de traitement de l'image visible sur la Figure 3.2d). Ici encore, la couleur orange correspond aux lumens remplis depuis l'acquisition précédente et la couleur verte aux lumens remplis en amont des précédentes acquisitions.

Au sein du volume L-T – localisé dans le bois initial – la migration de l'eau libre s'est effectuée au sein de certaines trachéides en atteignant différentes hauteurs après une heure d'imbibition (Figure 3.5a.1). Après trois heures (Figure 3.5a.2), le passage de l'eau entre deux trachéides successives y est clairement visible (flèche bleue), ce qui signifie que l'eau a pu passer par des ponctuations aréolées non aspirées. Sur la même image, de nouvelles trachéides ont été remplies (couleur orange) à différentes hauteurs. Cependant, elles ne semblent pas être liées à celles précédemment remplies. Enfin, sur les images des deux scans effectués le jour suivant (après 19 et 24 heures d'imbibition), il est possible d'observer un grand nombre de trachéides remplies d'eau distribuées dans la direction longitudinale mais avec quelques grandes régions verticales restées vides (cercles noirs sur la Figure 3.5a.4). Par ailleurs, l'eau n'a pas rempli entièrement les lumens des trachéides, comme le révèlent les petits volumes orange isolés (Figure 3.5a.4). Ces derniers sont également visibles sur les vues 3D dans le plan L-R. (Figure 3.5b.4). Excepté cette similitude, une différence significative de la distribution de l'eau libre est clairement visible dans le plan L-R par rapport au plan L-T (Figure 3.5a.4 et Figure 3.5b.4).

Sur la Figure 3.5b.1, la représentation 3D met en évidence la différence de migration de l'eau entre le bois initial et le bois final. En effet, l'eau libre a atteint le sommet du volume scanné dans le bois final alors que seules quelques trachéides ont été envahies dans le bois initial. Dans le plan L-R, la présence d'eau dans les cellules est distribuée suivant des bandes horizontales (accolades sur la Figure 3.5b.3 et Figure 3.5b.4) avec des zones intermédiaires vides. Les lumens colorés semblent donc être remplis de manière discontinue suivant la direction longitudinale. Cette distribution non uniforme explique la présence de variations locales des courbes visible sur la Figure 3.4. La distribution spatiale de l'eau dans le plan L-R observée ici indique que les rayons ligneux (cellules de parenchyme, trachéides radiales et canaux résinifères dans les rayons ligneux plurisériés présent dans l'épicéa commun (Schoch et *al.*, 2004)) jouent un rôle dans la migration de l'eau libre.

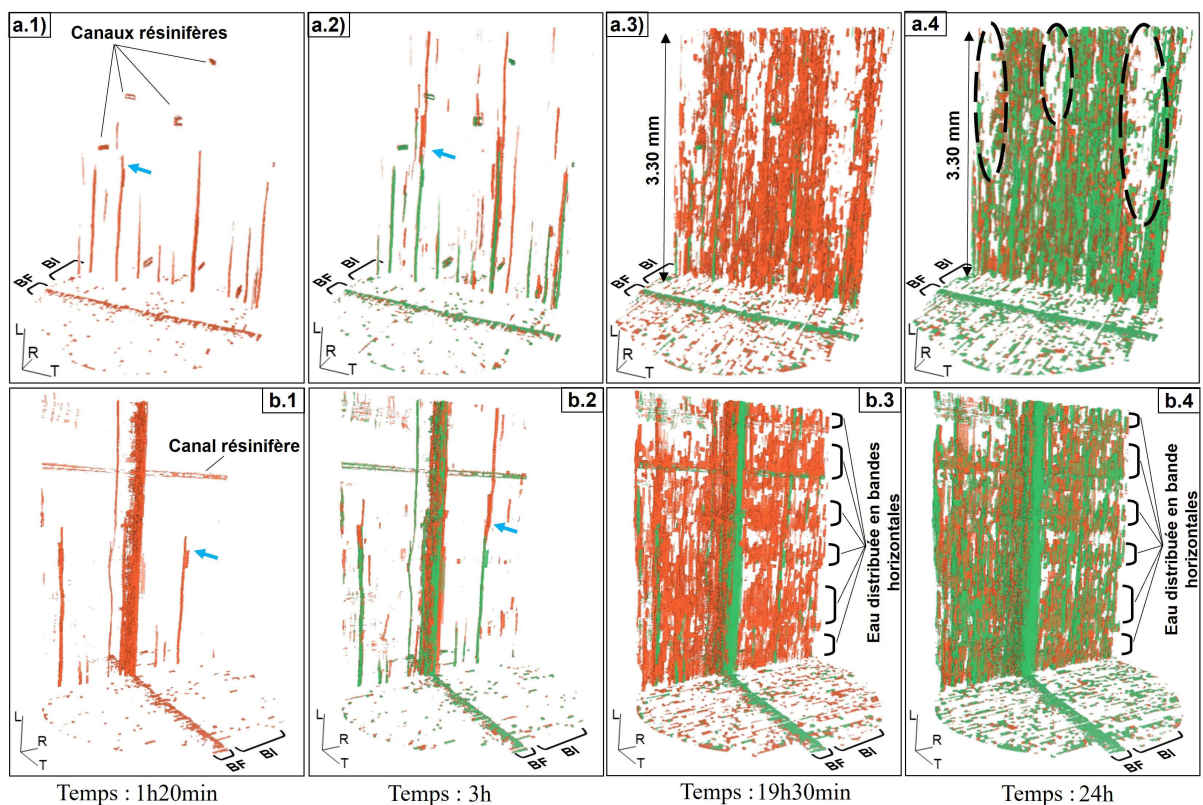


Figure 3.5- Vues 3D de la migration du liquide pour un volume sélectionné suivant le plan L-T (en haut) et L-R (en bas). Les flèches bleues indiquent la même trachéide remplie d'eau liquide. La couleur orange correspond aux lumens remplis d'eau aux acquisitions précédentes et la couleur verte aux lumens remplis en amont des précédentes acquisitions. Les cercles noirs pointillés indiquent les grandes régions verticales exemptes d'eau liquide

Pour mieux comprendre le rôle de chaque type de cellule dans la migration de l'eau, des coupes dans le plan L-T – issue des reconstructions tomographiques 3D – ont été représentées dans le bois final (Figure 3.6a) et le bois initial (Figure 3.6b). Seul un ajustement de la luminosité et du contraste a été effectué pour une meilleure observation. Comme attendu

d'après les précédents résultats commentés, presque toutes les trachéides ont été remplies dans le bois final après trois heures d'imbibition. Sur ces images, des cercles orange ont été ajoutés pour indiquer que certaines cellules de rayons ligneux ont été remplies d'eau pendant l'imbibition. Dans le bois initial, la propagation de l'eau libre dans les trachéides a été étudiée en détail à deux endroits (cercles jaunes Figure 3.6b.2). Une observation minutieuse permet de comprendre que l'eau remplissant les lumens des trachéides provient des rayons ligneux adjacents. Sur la Figure 3.6b.3, un grand nombre de trachéides ont été remplies à différentes hauteurs en lien avec la présence de cellules de rayons ligneux préalablement remplies d'eau. Par conséquent, des bulles d'air ont été piégées dans les trachéides, ajoutant une résistance à la migration du liquide en raison de la difficulté de l'air à s'échapper par les voies directes, partiellement remplies d'eau. Sur ces coupes L-T, il est possible d'observer que seule une partie des cellules des rayons ligneux participe à l'écoulement de l'eau. Sur ces images, un comptage manuel du nombre de cellules actives des rayons ligneux indique qu'environ 16 % et 26 % des cellules ont été remplies dans le bois initial et environ 20 % et 36 % dans bois final après trois heures et vingt-quatre heures respectivement. Le pourcentage plus élevé dans bois final s'explique par un nombre plus élevé de trachéides remplies dans cette partie du cerne. La non-imprégnation de certaines cellules des rayons ligneux a déjà été signalée lors de l'imprégnation de produit de conservation (Flynn, 1995). Sur les coupes tomographiques, la différenciation des cellules de parenchyme et de trachéides radiales présentes dans les rayons ligneux n'étaient pas accessibles à cause de la taille des pixels. Cependant, les trachéides radiales sont généralement positionnées aux extrémités hautes et basses des rayons ligneux unisériés de l'épicéa commun (Parham and Gray, 1984). Au cours de la vie de l'arbre, les cellules de parenchyme ont deux fonctions principales : la production et le stockage des nutriments. Au cours du processus de séchage, les substances élaborées (comme la résine) peuvent migrer et s'accumuler contre la membrane des ponctuations semi aréolées (entre les trachéides et les cellules de parenchyme) ou obstruer les ponctuations simples (entre cellules de parenchyme), ce qui réduit la perméabilité (McGinnes and Rosen, 1984; Nuopponen et *al.*, 2003). D'après la coupe L-T, il est possible de conclure que les cellules des rayons ligneux sont partiellement actives dans la migration de l'eau libre. L'absence de bulles d'air dans le bois final confirme la capacité de l'eau à migrer d'une trachéide à une autre.

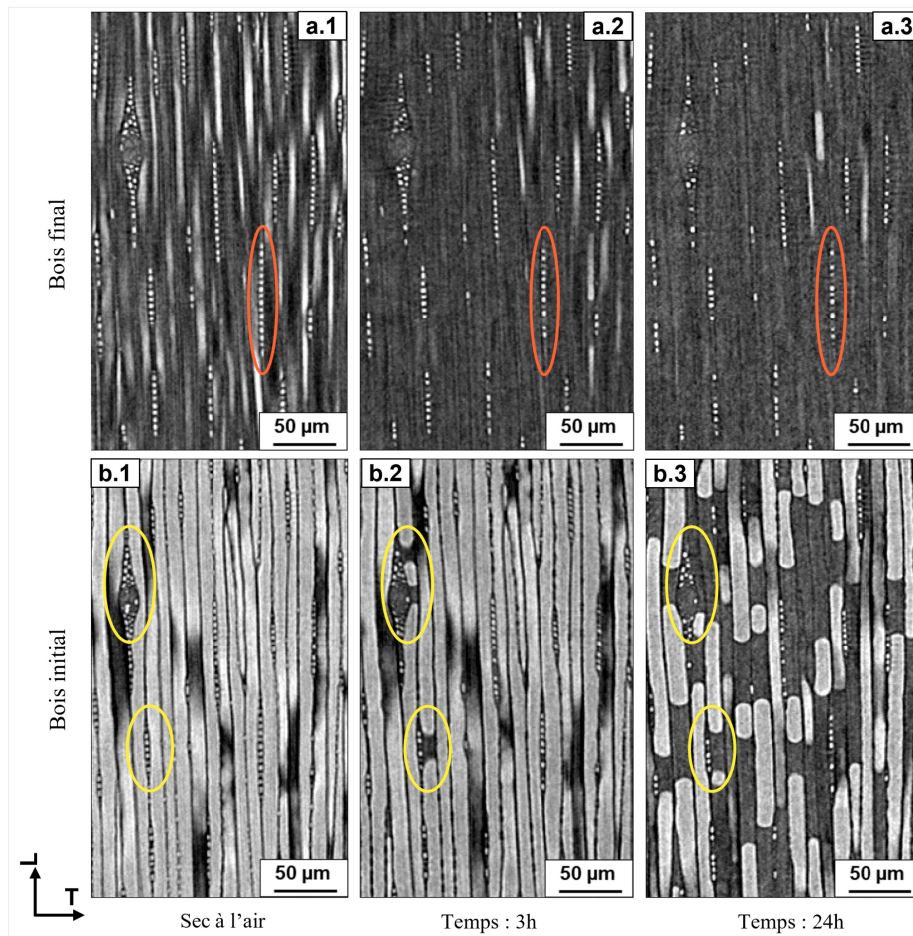


Figure 3.6- Coupes dans le plan L-T à différents instants lors de l'imbibition; a) dans le bois final, et b) dans le bois initial

Afin d'étudier la façon dont l'eau migre au sein des rayons ligneux, des coupes dans le plan L-R ont été représentées sur la Figure 3.7. Deux coupes ont été sélectionnées – espacées l'une de l'autre de 12 µm dans la direction tangentielle – pour visualiser l'invasion de l'eau dans une rangée de trachéides adjacente à des cellules de rayons ligneux (Figure 3.7a et Figure 3.7b espacées de 12 µm). Comme les rayons ligneux n'étaient pas parfaitement parallèles au plan de coupe, des étoiles vertes ont été ajoutées pour indiquer l'emplacement de plusieurs rayons ligneux horizontaux, commençant du côté gauche (Figure 3.7a.1) et se terminant du côté droit de la coupe (Figure 3.7b.1). Les zones indiquées par des rectangles verts en pointillés au sein de rayons ligneux montrent que de l'eau est apparue à l'intérieur de certaines cellules au cours de l'imbibition. Ces dernières sont marquées par des flèches vertes. Il est également possible d'observer des gouttelettes contre la paroi cellulaire de trachéides longitudinales situées à la même hauteur (rectangles orange en pointillés). À l'état sec à l'air, aucun volume d'eau n'a été observé à l'intérieur de ces trachéides (Figure 3.7a.1 et Figure 3.7b.1). Cette visualisation directe confirme que de l'eau libre est apparue dans ces régions précises (Figure 3.7a.3 et Figure 3.7b.3). Au sein des rayons ligneux les cellules remplies d'eau après trois heures d'imbibition

étaient également vides au stade sec (flèches vertes vides sur les Figure 3.7a.1 et Figure 3.7b.1). La même observation a pu être faite dans d'autres régions de la coupe où ces gouttelettes indiquent la première étape d'invasion d'eau dans les trachéides du bois initial. La capacité de migration de l'eau à travers les ponctuations de champs de croisement (reliant les rayons ligneux et les trachéides longitudinales) avait déjà été observée au microscope à la fin de processus d'imprégnation de produits de conservation (Tondi et *al.*, 2013; Wardrop and Davies, 1961). Les observations actuelles apportent une description de l'écoulement de l'eau au sein du bois initial dans la direction radiale qui semble être principalement dû aux rayons ligneux, remplissant ainsi les trachéides à différentes hauteurs. Ces voies de passage expliquent la présence d'eau dans des trachéides semblant isolées sur les vues 3D en Figure 3.5a.2 et Figure 3.5b.2 mais connecté via les rayons ligneux non visibles sur ces représentations. Les extrémités des trachéides peuvent également jouer un rôle comme le montre les rectangles violets mais de manière moins importante que les rayons ligneux. Des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer cette hypothèse avec, par exemple, une expérience d'imbibition en direction tangentielle.

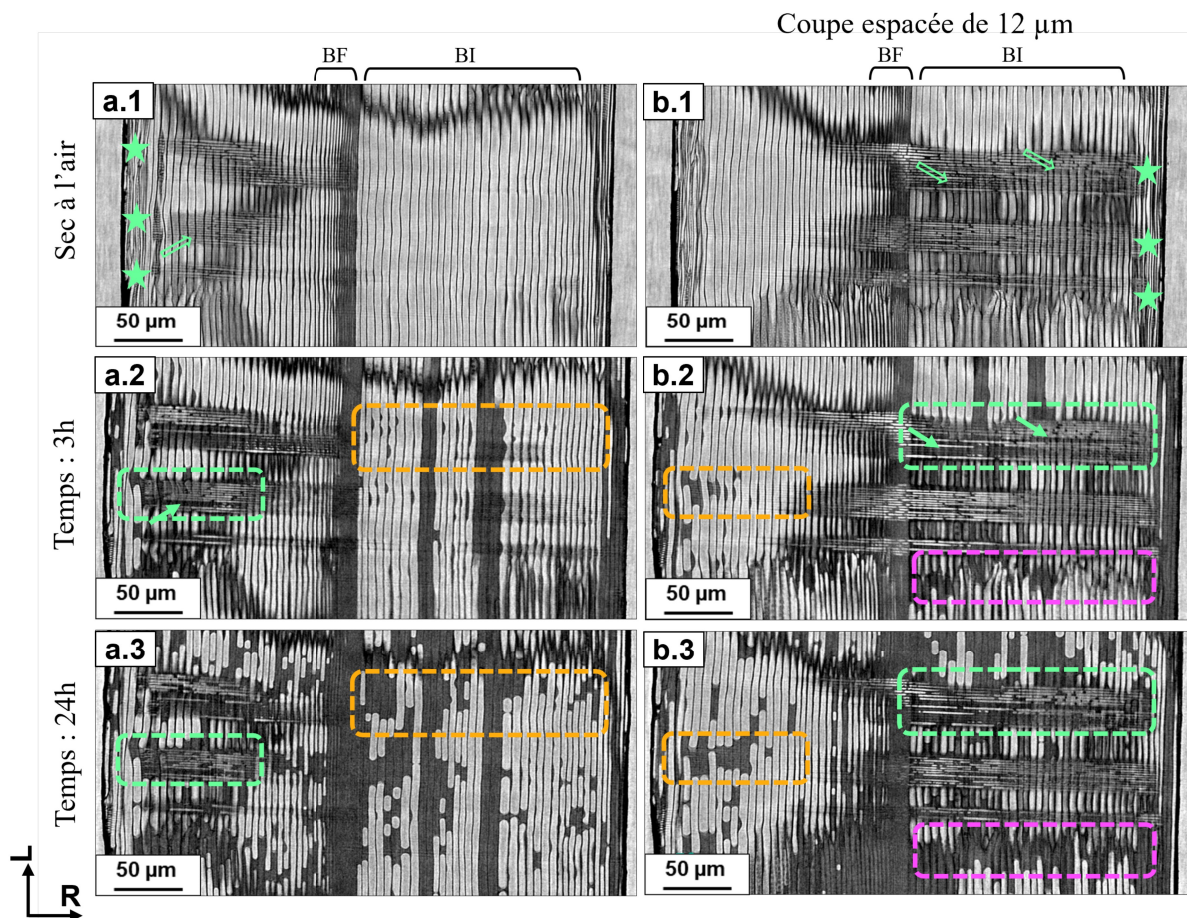


Figure 3.7- Coupes dans le plan L-R espacées de 12 µm. Les flèches vertes pleines indiquent la présence d'eau libre dans les cellules des rayons ligneux (les flèches vertes vides indiquent les mêmes cellules sans l'eau à l'état sec à l'air)

### 3.4 Conclusion

Un dispositif expérimental a été développé et installé dans un nano-tomographe pour visualiser les voies de passage de l'eau dans l'épicéa pendant l'imbibition en direction longitudinale. Les images tomographiques 3D montrent une distribution hétérogène de l'eau dans le bois, fortement liée à sa structure anatomique. D'après les observations, les voies de passage de l'eau libre dans la structure interne peuvent être décrites comme suit :

- Dans le bois initial, la migration directe de trachéides en trachéides est entravée par l'aspiration des ponctuations aréolées. Par conséquent, les cellules des rayons ligneux contribuent de manière significative à la migration de l'eau comme voie de passage intermédiaire reliant des groupes de trachéides. Il en résulte une invasion complexe de l'eau dans le bois initial, et une saturation incomplète des trachéides avec la présence de bulles d'air entre deux hauteurs de rayons ligneux,
- Dans le bois final, l'eau libre a migré de trachéides en trachéides restées connectées via les ponctuations aréolées non aspirées. En parallèle de cette migration longitudinale, l'eau pénètre dans les cellules des rayons ligneux et se propage dans la direction radiale. Cette redistribution est un mécanisme important, expliquant l'imbibition dans les trachéides localisées dans bois initial comme indiqué ci-dessus,
- Environ 30 % des cellules des rayons ligneux participent à l'écoulement de l'eau dans la direction radiale.

Pour compléter ces résultats, d'autres travaux pourraient explorer la migration de l'eau lors d'expériences d'imbibition réalisées dans la direction radiale ou tangentielle. Le dispositif expérimental présenté ici pourrait également être utilisé ou adapté afin d'étudier le comportement d'autres matériaux poreux.

## Annexe B : Visualisation de la présence d'eau libre dans les lumens du bois final

La Figure 3.8 représente des coupes transversales brutes et après segmentation situées à 5 mm de la surface de contact après la reconstruction tomographique 3D au stade initial (Figure 3.8a) et après 1h20min d'imbibition (Figure 3.8b). Le gonflement de l'échantillon est visible entre les coupes. La couleur gris foncé (ou noir après segmentation) correspond à la présence de matière ayant une densité élevée (bois ou eau) et la couleur gris clair aux vides (air). Sur les zooms, l'eau à l'intérieur des trachéides a un niveau de gris proche des parois cellulaires ne permettant pas de distinguer la forme des trachéides dans le bois final dès lors que plusieurs trachéides accolées sont remplies. Cependant, il apparaît clairement que les lumens sont bien remplis d'eau en comparant avec l'image segmentée à l'état initial (sec à l'air) et donc qu'il ne s'agit pas de bruit généré lors de la reconstruction tomographique.

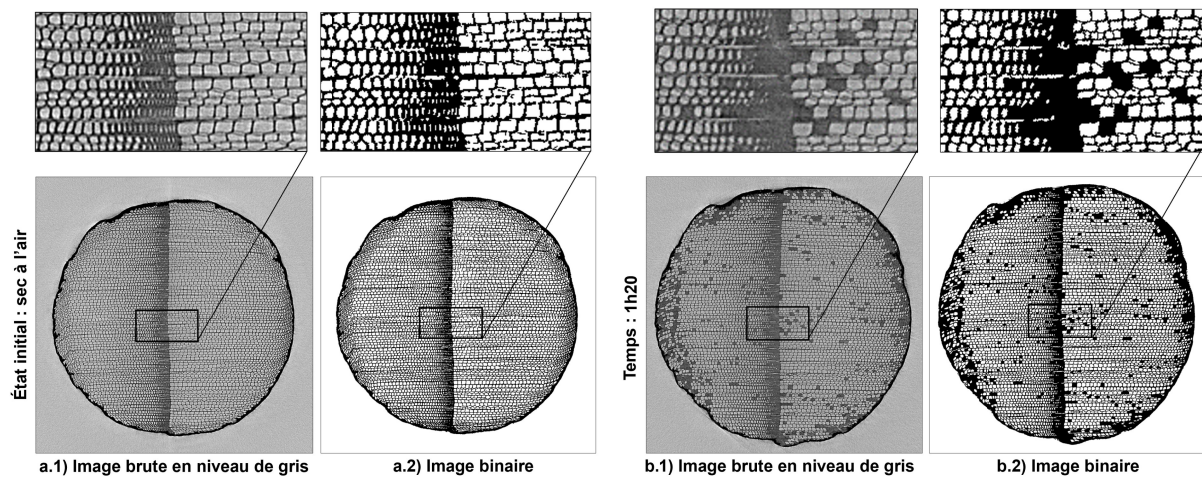


Figure 3.8- Coupes transversales brutes (indice n°1) et après segmentation (indice n°2) situées à 5 mm de la surface de contact à l'état initial sec à l'air (a) et après 1h20min d'imbibition (b)







# Chapitre 4

---

Étude expérimentale des transferts d'humidité  
au sein d'un échantillon soumis à des  
solicitations thermiques dynamiques



## 4.1 Introduction

Dans les chapitres 2 et 3, les travaux présentés s'intéressent à la migration capillaire au sein des vides cellulaires de l'épicéa, tel que cela peut se produire lors de la phase de construction d'un bâtiment ou en cas de mise en contact accidentelle du bois avec de l'eau (fuite). Ce chapitre est dédié à l'étude de la diffusion d'eau liée au sein d'un échantillon soumis à des sollicitations thermiques dynamiques en vue de se rapprocher des conditions réelles et usuelles rencontrées dans le bâtiment. En effet, une des fonctions principales des parois extérieures est de maintenir des conditions intérieures (température et d'humidité relative) confortables pour les occupants et donc de les isoler des conditions climatiques extérieures. Il en résulte des différences de températures entre le côté extérieur et intérieur de la paroi impliquant des transferts couplés thermiques et hydriques au sein des matériaux. Ces échanges participent à la régulation de l'humidité relative des pièces intérieures de manière passive et influent sur les performances énergétiques des bâtiments. Il convient alors d'étudier ces matériaux suivant des conditions non-isothermes avec des dispositifs expérimentaux adaptés.

Dans ce chapitre, la tomographie par rayons X a été utilisée pour suivre les cinétiques de migration d'humidité au sein d'un échantillon d'épicéa exposé à des températures différentes sur ses deux faces opposées. Pour ce faire, un dispositif expérimental original a été mis au point afin d'appliquer des températures variables suivant plusieurs phases de sollicitation tout en étant compatible avec les contraintes de la tomographie par rayons X. La conception du dispositif et l'établissement des conditions limites ont bénéficié des retours d'expériences issues des travaux menés par Bouali et *al.* (2012). Au total, trois phases de sollicitation thermique ont été définies. La première correspond à une phase en conditions non-isothermes (différence de température de 20 °C, condition rencontrée en période hivernal pour une paroi extérieure). La seconde est caractérisée par une phase de retour à des conditions aux limites isothermes sur les faces opposées de l'échantillon. Enfin, la dernière phase intègre des variations de température dynamiques afin de se rapprocher des conditions réelles rencontrées pour une paroi soumise au climat extérieur.

Les résultats de l'évolution des profils d'humidité ont été obtenus après une analyse rigoureuse des images tomographiques. Ainsi, le traitement des images est tout d'abord expliqué en détail. Ensuite, le protocole de calibration permettant d'obtenir une corrélation du niveau de gris à une teneur en eau est présenté. Ce qui amène, enfin, à une description de la discrétisation spatiale de l'échantillon en des régions d'intérêt pour obtenir les profils d'humidité. Cette méthode de traitement des données a permis l'estimation spatio-temporelle de la teneur en eau au cours des différentes phases de sollicitations.

## 4.2 Matériels et méthodes

### 4.2.1 Préparation de l'échantillon

L'échantillon cylindrique a été débité dans la même planche d'épicéa (*Picea abies*) que les échantillons utilisés lors des expériences d'imbibition (voir chapitre 2.2.1). L'usinage du cylindre d'un diamètre 20 mm et de longueur 35 mm – suivant la direction radiale – a été réalisé avec une machine CNC 5 axes (SCM morbidelli 100). L'échantillon est localisé au niveau des mêmes cernes annuels – cernes 37 à 51 – que l'échantillon utilisé lors de l'expérience d'imbibition 2D suivant la direction radiale (partie 2.2.1). L'échantillon se situe donc dans le duramen du bois parfait de l'arbre.

Dans le cadre de ces travaux, l'étude de la migration d'humidité au sein de l'échantillon soumis à des températures non uniformes et variables dans le temps nécessite de maintenir une teneur en eau moyenne constante. Pour ce faire, les surfaces de l'échantillon ont été recouvertes d'une double couches de revêtement imperméable (Rubson, Liquid Rubber Plus). L'application uniforme de ce revêtement sur la surface latérale a été facilitée par l'utilisation d'un tour à bois miniature spécifiquement conçu à cet effet. La rotation de l'échantillon lors de l'application et du séchage du revêtement a permis d'éviter un écoulement dû à la gravité qui aurait engendré une distribution non homogène du revêtement. Avant l'application des deux couches de revêtement, la surface latérale de l'échantillon a été poncée – avec un papier abrasif P320 – pour parfaire l'accroche mécanique et retirer les fibres levées. Ensuite, une gaine thermo-retractable en polyoléfine (RS Pro  $\varnothing$  24mm 3:1) souple a été ajoutée pour parfaire l'étanchéité en périphérie. Enfin, la mise à la longueur finale de l'échantillon a été effectuée avec une machine de découpe de précision (SECOTOM 50, Struers). Ces deux sections parallèles étant de nouveau sans revêtement, un multicouche a été appliqué comprenant une couche de revêtement Rubson, une feuille aluminium et de nouveau une couche de revêtement Rubson.

La teneur en eau moyenne de l'échantillon – avant application des revêtements imperméables – a été déterminée par double pesée d'un échantillon jumeau. Les deux échantillons ont été entreposés pendant une période de six mois dans la même enceinte climatique (Memmert HPP110eco) paramétrée à une température de 25 °C et une humidité relative de 87 % afin d'avoir une teneur en eau moyenne relativement élevée. À l'issue de cette phase de conditionnement, l'échantillon jumeau a été pesé, puis placé dans une étuve à 103 °C pour obtenir sa masse à l'état anhydre. La teneur en eau a été déterminée à 17.5 %. En parallèle, la mesure de la masse ainsi que les dimensions de l'échantillon ont permis de déterminer la masse volumique initiale.

## 4.2.2 Définition des conditions limites

La séquence des sollicitations thermiques appliquées de part et d'autre de l'échantillon est représentée sur la Figure 4.3. Elle se compose de trois phases avec :

- 1) une différence de température constante de 20 °C appliquée sur les faces opposées de l'échantillon, pour reproduire une configuration hivernale de manière simplifiée,
- 2) un retour à un équilibre thermique avec une température de 25 °C de part et d'autre de l'échantillon, pour rétablir une distribution homogène d'humidité,
- 3) des cycles de température de 15 et 35 °C ( $T_1$ ) sur une face et une température maintenue constante à 25 °C sur la seconde ( $T_2$ ), pour approcher le comportement dynamique observé en inter-saison ou en été (cycles jours-nuits).

Lors de cette séquence, différentes forces motrices pouvant contribuer à la diffusion d'humidité seront présentes au sein de l'échantillon (gradient de pression partielle de vapeur d'eau, gradient de teneur en eau et gradient thermique). Elles pourront se retrouver dans le même sens ou opposée au cours de l'essai impactant l'évolution du champ de teneur en eau.

## 4.2.3 Description du dispositif expérimental

La conception du dispositif expérimental a été élaborée pour être compatible avec la tomographie par rayons X et répondre aux besoins de l'expérience décrits ci-après :

### Les besoins :

- ◆ Application de températures différentes et modifiables sur les faces opposées d'un échantillon,
- ◆ Maintien des températures à la consigne, y compris lors des acquisitions tomographiques,
- ◆ Nécessité d'un dispositif de contrôle visuel des températures en temps réel,
- ◆ Enregistrement des températures au cours du temps,
- ◆ Limitation des transferts thermiques en périphérie de l'échantillon.

### Les contraintes :

- ◆ Dispositif manu-portable et facilité de mise en place dans le tomographe pour libérer l'appareil entre deux acquisitions,
- ◆ Seuls l'échantillon et son système de conditionnement doivent être présents dans le champ des rayons X pour éviter de perturber les acquisitions,
- ◆ Permettre la rotation sans vibrations tout en maintenant les températures de consigne lors des acquisitions,
- ◆ Conception compacte et adaptée à la taille de l'échantillon.

Pour répondre à ces critères, le dispositif se compose de deux systèmes de régulation de la température indépendants positionnés au-dessus et au-dessous de l'échantillon (Figure 4.1b). La liaison mécanique de ces deux éléments est assurée par un tube en polypropylène. Le choix de cette matière est le fruit de tests préliminaire où ce matériau offre une atténuation aux rayons X plus faible que le carbone et l'aluminium (annexe C) tout en présentant des propriétés mécaniques compatibles avec les contraintes du dispositif. L'échantillon est placé à l'intérieur du tube en polypropylène. Une fine lame d'air espaçant l'échantillon du tube participe à isolation thermique périphérique de l'échantillon. Ainsi, les effets de bord à la périphérie de l'échantillon, dus à un gradient thermique pouvant être présent suivant le rayon de l'échantillon, sont limités. Les échanges thermiques périphériques pouvant avoir un effet sur la diffusion d'humidité – effet du gradient thermique induit selon différentes configurations – a fait l'objet d'une analyse numérique. Cette étude complémentaire – visible en annexe C – souligne l'importance de limiter les transferts thermiques latéraux.

L'établissement des températures aux faces opposées de l'échantillon est effectuée par des modules Peltier. Le principe de fonctionnement repose sur l'effet Peltier où lorsqu'un courant électrique traverse un module composé de deux matériaux semi-conducteurs de natures différentes, une face du module libère de la chaleur et l'autre en absorbe. Le phénomène s'inverse lorsque le courant est inversé. Ce principe a pour double avantages la miniaturisation du dispositif expérimental et faciliter l'établissement de différentes températures. Cependant, cette miniaturisation ne permettait pas d'avoir une inertie suffisante pour maintenir, sans régulation, les températures de consignes lors d'une acquisition d'une durée de deux heures. En conséquence, une alimentation électrique continue du système de régulation de chaque module Peltier a été nécessaire. La mise sous tension a alors été assurée par des piles intégrées au montage le temps de l'acquisition tomographique en réponse à la double contrainte (i) d'éviter la présence de fils, qui n'auraient pas autorisé une rotation complète de l'échantillon sans vibration lors d'une acquisition, et (ii) de libérer le tomographe entre deux acquisitions durant les trois mois d'expérimentation.

Le maintien de la température de consigne était contrôlé par un micro processeur ArduinoNano installé sur le système de régulation. Fonctionnant en boucle fermée, l'algorithme de régulation définissait le sens du courant alimentant le module Peltier par l'intermédiaire de l'activation d'un module relais double après la lecture de la valeur d'un capteur de température PT 1000 (Figure 4.1c). Le contrôle direct du bon fonctionnement du système de régulation était assuré par un moniteur affichant les températures de consigne et mesurée à l'extrémité de l'échantillon. Une fois l'acquisition terminée dans le tomographe, le dispositif était placé dans une enceinte climatique ( $T = 25\text{ °C}$ ) et connecté à un ordinateur pour l'enregistrement des données. Une interface graphique développée en Visual Basic permettait de modifier la température de consigne manuellement et de changer le type d'alimentation ; soit sur pile lors



d'une acquisition tomographique, soit sur secteur dans l'enceinte climatique. Une description complémentaire du fonctionnement global et du circuit électrique avec la disposition des composants électroniques est visible en annexe D.

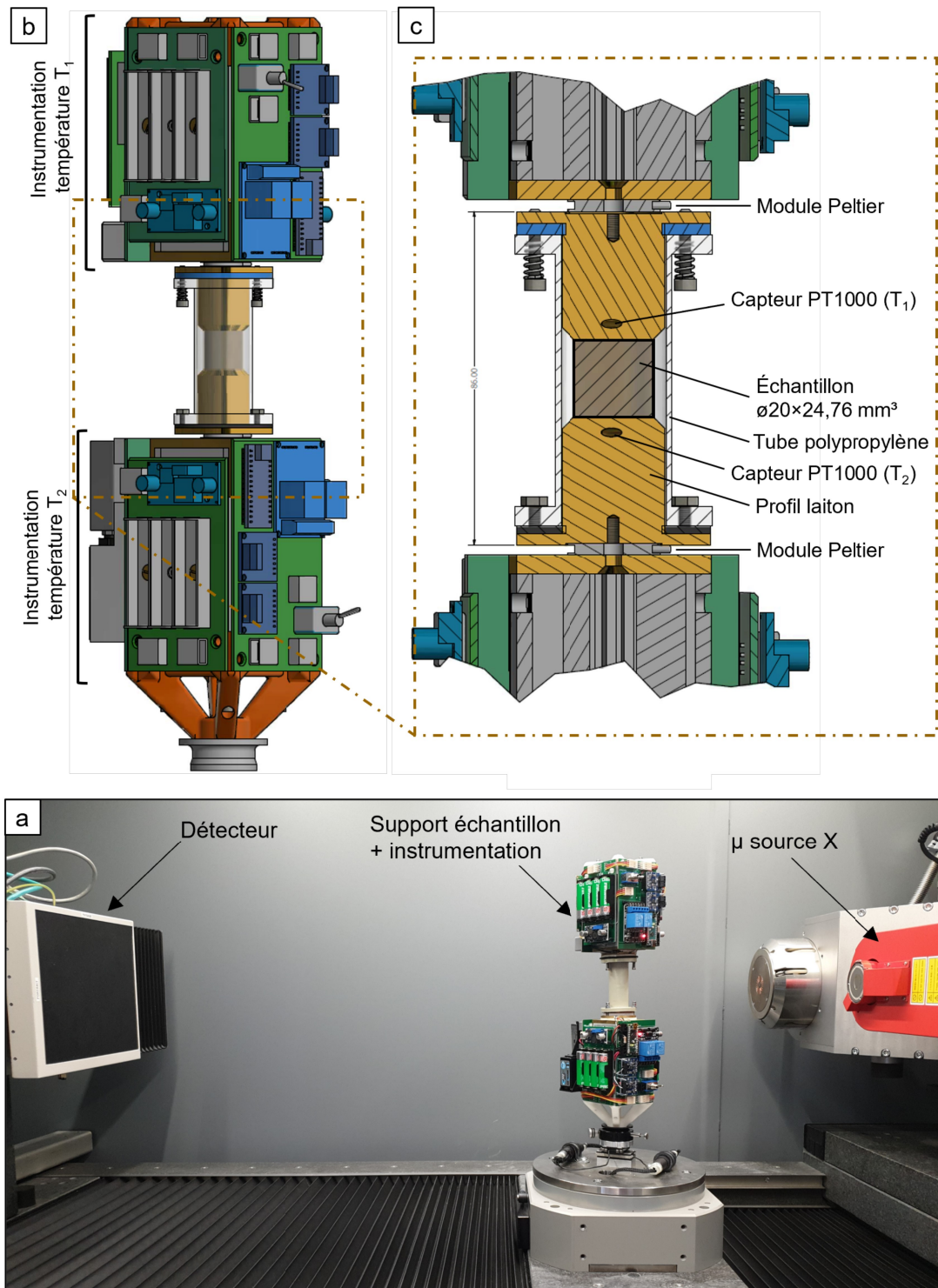


Figure 4.1- Photographie du dispositif positionné dans le tomographe aux rayons X, b) Schéma du support échantillon et de l'instrumentation, c) Vue en coupe et zoom sur l'échantillon

#### 4.2.4 Acquisition des projections et reconstruction tomographique

La tomographie s'effectue en deux étapes telles qu'illustrées sur la Figure 4.2. La première consiste à enregistrer un grand nombre de projections 2D de l'objet observé sous différents angles lors d'une rotation complète de l'échantillon ( $360^\circ$ ). La seconde étape consiste en la réalisation de la reconstruction tomographique – à partir des projections 2D – suivant la méthode de la rétroprojection filtrée basée sur le théorème de radon (1917). La valeur du niveau de gris des pixels obtenus, noté  $NDG$ , reflète la capacité du matériau à atténuer les rayons X. Il est fonction de la composition chimique du matériau et de sa masse volumique. Un  $NDG$  élevé indique donc un matériau avec un numéro atomique et/ou une masse volumique élevés. C'est pour cette raison que les vues 3D du volume reconstruit visible sur la Figure 4.2 semble être le négatif des projections lors de l'acquisition. De plus amples informations sont disponibles dans les ouvrages de Kak et Slaney (2001) et Grangeat (2002).

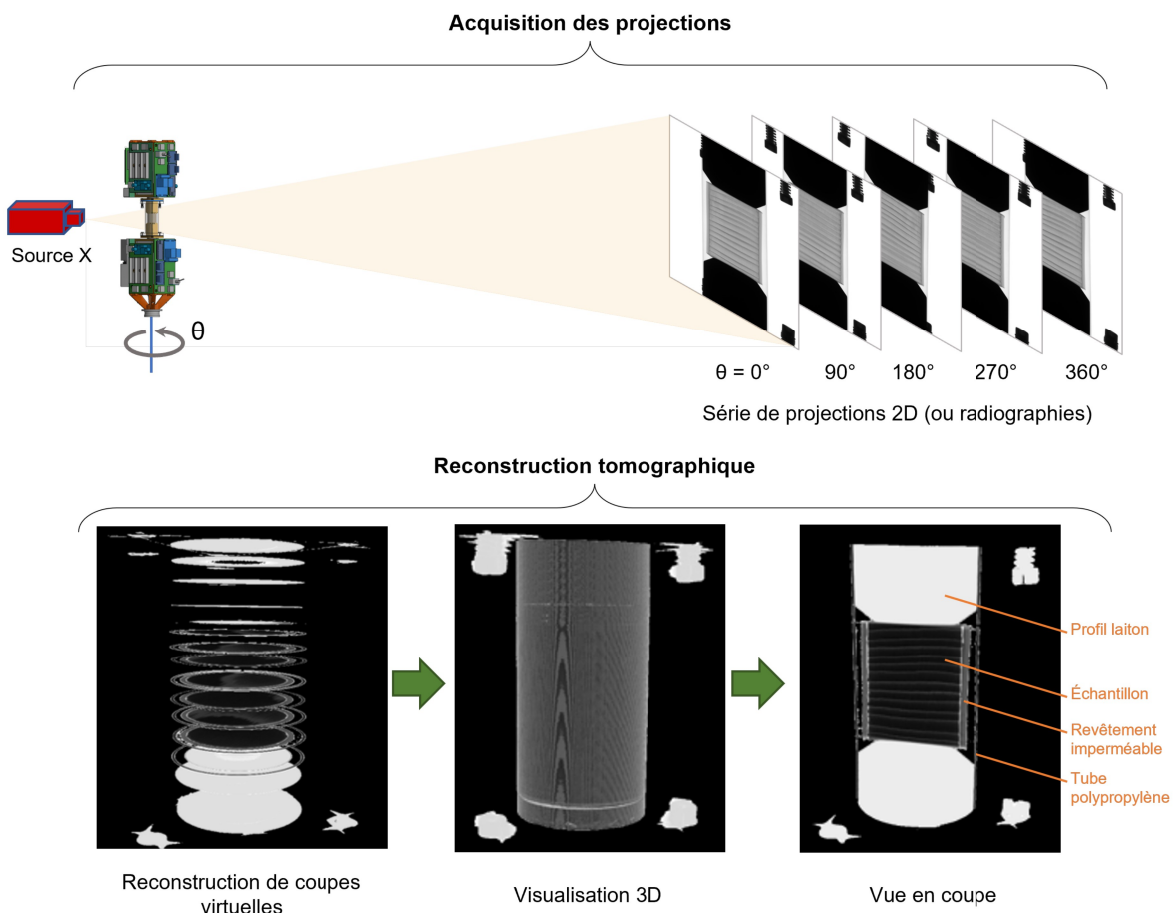


Figure 4.2- Représentation schématique des étapes d'une tomographie avec le support échantillon : a) Acquisition des projections et b) Reconstruction tomographique

L'acquisition des projections 2D a été réalisée avec un tomographe de dernière génération de la société RX Solutions (EasyTom XL Ultra 150-160) avec l'utilisation combinée d'une

micro-source de rayons X et d'un imageur plan large champ suivant la configuration décrite dans le tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1- Paramètres d'acquisition des projections

Générateur de rayons X micro foyer 150 kV	Imageur : capteur plan large champ
Tension : 100 kV	Matrice : 1920×1536 (pixel = 127 μm)
Intensité : 210 μA	Temps d'exposition : 0,5 s
Taille du spot d'émission : 20 μm	Nombre de projections moyennées : 3

Avec ces paramètres d'acquisition, la durée d'enregistrement des projections était d'une heure environ. Cependant, la durée totale d'une acquisition tomographique était de deux heures, car il était nécessaire d'effectuer auparavant une calibration de l'imageur pour tenir compte des valeurs par défaut des pixels de l'imageur et de la distribution hétérogène du faisceau de rayons X. Ces deux corrections étaient prises en compte avec l'acquisition d'une image de champ de noir (« Black field ») correspondant au niveau de gris des pixels de l'imageur enregistré sans émission de rayons X, et d'une image de référence – sans échantillon dans le champ des rayons X enregistrée avec les mêmes paramètres que ceux utilisés lors de l'acquisition des projections – pour obtenir la distribution du faisceau de rayons X sur l'imageur. Cette étape de calibration était précédée d'une étape nécessaire de stabilisation de la source X, dont la durée de 30 min, a été déterminée lors d'essais préliminaires.

Une fois l'acquisition des projections finalisée, la reconstruction tomographique était réalisée avec le logiciel X-Act fournit par le constructeur du tomographe. Le résultat obtenu est une série de coupes transversales générées perpendiculairement à l'axe z avec une taille de pixel de 40,017 μm. La visualisation 3D était enfin obtenue en compilant la pile d'images des sections transversales le long de l'axe z avec le logiciel *Fiji ImageJ* comme illustré sur la Figure 4.2.

La fréquence des acquisitions a été variable durant les trois mois de l'expérimentation avec deux acquisitions par jours lors des changements des conditions limites, puis une par jour en moyenne (Figure 4.3).

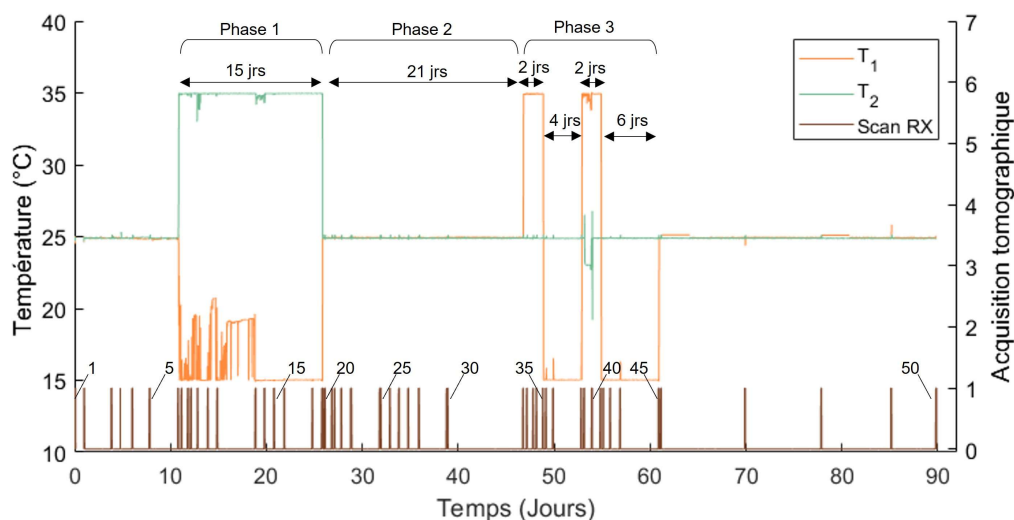


Figure 4.3- Températures appliquées sur les faces opposées de l'échantillon. La fréquence des acquisitions tomographiques est représentée en marron avec un total de 50 enregistrements

## 4.2.5 Détermination de la teneur en eau

### 4.2.5.1 Atténuation des rayons X en fonction de la teneur en eau

Pour le bois dont seule la masse volumique varie (et non la composition), Lindgren (1992) a montré que le niveau de gris de chaque pixel dépend de la masse volumique locale selon une relation linéaire :

$$\rho = A \cdot NDG + B \quad (4.1)$$

où A et B sont deux constantes.

Dans le cadre de ces travaux préliminaires, il a été émis comme hypothèse que les variations de masses volumiques apparentes de l'eau (changements de teneur en eau) et de la matière lignocellulosique (retraits/gonflements) ont, à valeur égale, le même effet sur le niveau de gris. De fait, une droite unique permet de relier la valeur de niveau de gris à la masse volumique du bois humide :

$$\frac{\rho_0(i, j, k, t)}{1 + \epsilon_v(X(i, j, k, t))} \cdot (1 + X(i, j, k, t)) = A \cdot NDG(i, j, k, t) + B \quad (4.2)$$

avec  $\rho_0$  la masse volumique anhydre du bois ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) et  $\epsilon_v$  le gonflement volumique par rapport à l'état anhydre. La position dans l'image étant donnée par les indices i, j, k (repère cartésien) :

$$\epsilon_v(X(i, j, k, t)) = \frac{R_v}{1 - R_v} \cdot \frac{X(i, j, k, t)}{X_{psf}} \quad (4.3)$$

avec  $R_v$  le retrait volumique total de l'épicéa égal à 0,13 (Perré et Huber, 2007) et  $X_{psf}$  le point de saturation des fibres égale à 0,29 (Siau, 1984).

L'application de cette fonction (4.2) pour l'étude de l'évolution temporelle du champ de teneur en eau a nécessité trois ajustements préalables comprenant deux corrections spatiales et une temporelle.

La première correction spatiale a pour objet de gommer un artefact de reconstruction lié à la conicité du faisceau X, lorsque les rayons X divergents traversent des zones de densités différentes. Cet effet est visible dans le volume d'air situé à l'extérieur du tube en polypropylène où des lignes horizontales sont présentes alors que le niveau de gris devrait être uniforme. Afin de remédier à cet artefact de reconstruction et en supposant que son impact est uniforme sur une section horizontale du volume reconstruit, il a été introduit le *NDG* réduit ( $NDG^*$ ) correspondant au ratio entre le *NDG* du point considéré dans le bois et le *NDG* moyen de l'air à la même hauteur k :

$$NDG^*(i, j, k, t) = \frac{NDG(i, j, k, t)}{\langle NDG_{air}(k, t) \rangle} \quad (4.4)$$

Par ailleurs, en discrétisant la section horizontale de l'échantillon à l'état initial en zones concentriques, il a été constaté que les valeurs de  $NDG$  n'étaient pas uniformes, et ce quelle que soit la hauteur considérée. Les valeurs de  $NDG$  étaient plus élevées au centre de l'échantillon qu'en périphérie traduisant un défaut de performance du filtre de reconstruction. C'est pourquoi, l'équation (4.2) a été adaptée en faisant varier  $B$  selon son éloignement par rapport à l'axe de l'échantillon (rayon  $r$  lui-même fonction des indices cartésiens  $i$  et  $j$ ) :

$$\frac{\rho_0(i, j, k)}{1 + \epsilon_v(X(i, j, k, t))} \cdot (1 + X(i, j, k, t)) = A \cdot NDG^*(i, j, k, t) + B(r(i, j)) \quad (4.5)$$

Enfin, la dernière correction devant être appliquée est pour tenir compte des variations temporelles de la chaîne d'acquisition d'une acquisition à une autre. Pour ce faire, un point fixe est nécessaire. Dans cette étude, l'échantillon étant recouvert sur l'ensemble de ses faces par un revêtement multicouche étanche, la teneur en eau moyenne de l'échantillon reste constante au cours de l'essai et égale à 17,5 %.

$$X_{correct}(i, j, k, t) = X(i, j, k, t) \cdot \frac{\langle X(t=0) \rangle}{\langle X(t) \rangle} \quad (4.6)$$

La teneur en eau moyenne est une moyenne des teneurs en eau locales pondérées par les masses anhydres locales :

$$\langle X(t) \rangle = \frac{\sum_{i,j,k} X(i, j, k, t) \cdot \frac{\rho_0(i, j, k)}{1 + \epsilon_v(X(i, j, k, t))} \cdot V_{voxel}}{\sum_{i,j,k} \frac{\rho_0(i, j, k)}{1 + \epsilon_v(X(i, j, k, t))} \cdot V_{voxel}} \quad (4.7)$$

#### 4.2.5.2 Discrétisation spatiale par régions d'intérêts

La distribution spatiale (radiale, inter-cerne et intra-cerne) de la teneur en eau a été étudiée en discrétisant l'échantillon en régions d'intérêts *ROI*. Pour ce faire, un script MATLAB a été développé pour détecter automatiquement le contour de l'échantillon suivant la variation du niveau de gris dû au revêtement Rubson. La section de l'échantillon a été divisée en quatre cylindres homothétiques nommés  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  et  $c_4$  (Figure 4.10a). Les cylindres des régions  $c_2$  à  $c_4$  sont creux. Pour chaque cylindre  $c$ , des ROI ont été définies suivant la hauteur : chaque cerne annuel a été divisé en trois selon la méthode décrite dans le chapitre 2.2.2.4. Pour rappel, 45 % de la hauteur du cerne a été allouée au bois initial *BI*, 45 % au bois de transition (*BT*, entre le bois initial et final) et 10 % au bois final *BF* (Figure 4.10b et Figure 4.10c). Ces proportions relatives ont été considérées constantes durant la durée de l'expérimentation. Il est à noter que le cerne 38 – situé à l'extrémité basse de l'échantillon – était incomplet et donc que sa

hauteur réelle était inaccessible. La détermination de la limite entre le bois de transition et le bois final de ce cerne a été définie suivant la variation du niveau de gris. Pour cette raison, la hauteur de la zone correspondant au bois final (# BF 38) a été figée sans tenir compte des variations dimensionnelles dans la direction radiale dues aux variations de teneur en eau liée. En ce qui concerne le cerne 51 situé à l'extrémité haute, la faible hauteur du cerne accessible n'a pas permis de distinguer la limite entre le bois initial et de transition. Il a donc été défini une seule ROI entre la limite de cerne et l'extrémité de l'échantillon.

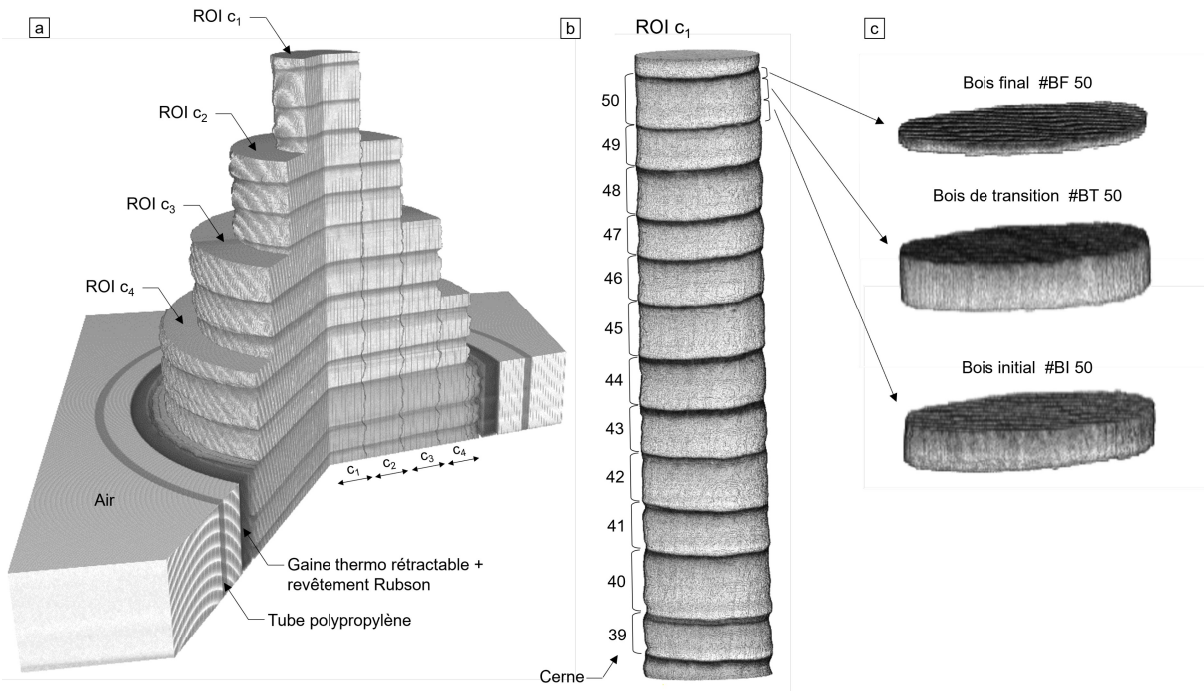


Figure 4.4- Représentation axonométrique partielle de l'échantillon avec les cylindres  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  et  $c_4$ , b) Zoom sur le cylindre central  $c_1$  et c) Exemple de la discrétisation du cerne #50 en trois régions d'intérêts avec BI 50, BT 50 et BF 50. Le niveau de gris a été inversé pour faciliter la visualisation. Ainsi, le niveau de gris foncé équivaut à la présence de matière plus dense qu'un niveau de gris clair

Cette discrétisation a permis de simplifier l'équation (4.5), en considérant des valeurs moyennes de  $\rho_0$ ,  $X$  et  $NDG$  au sein de chacune des ROIs et des valeurs moyennes de  $B$  pour chaque cylindre.

$$\frac{\rho_0(ROI)}{1+\epsilon_v(X(ROI,t))} \cdot (1+X(ROI,t)) = A \cdot NDG^*(ROI,t) + B(c) \quad (4.8)$$

#### 4.2.5.3 Calibration de la mesure de teneur en eau

La calibration du modèle, afin de déterminer les valeurs des constantes  $A$  et  $B$ , s'appuie sur l'application de l'équation (4.8) à l'état initial, lorsque la teneur en eau est uniforme dans l'ensemble de l'échantillon :

$$\frac{\rho_0(ROI)}{1+\epsilon_v(X(ROI,t=0))} \cdot (1+X(t=0)) = A \cdot NDG^*(ROI,t) + B(c) \quad (4.9)$$

Cette équation est applicable à chacune des ROIs. Dans ce modèle, les inconnues sont : une valeur de  $A$ , quatre valeurs de  $B$  correspondant à chaque cylindre et 39 valeurs de  $\rho_0$  correspondant à chaque ROI. Les valeurs de  $\rho_0$ ,  $A$  et  $B$  sont liés par une fonction linéaire. Ainsi, la résolution de ce système d'équations, seul, générerait une infinité de solutions, multiples les unes des autres. Afin d'identifier un unique ensemble de valeurs, il est nécessaire d'ajouter deux contraintes : (i) initialement (lorsque la teneur en eau est supposée uniforme au sein de l'échantillon), la moyenne des masses volumiques des ROIs pondérées par leurs volumes respectifs est égale à la masse volumique de l'échantillon (4.10) et (ii) les moyennes des masses volumiques anhydres des ROIs situées dans le bois initial pondérées par leurs volumes anhydres respectifs obtenues ici par imagerie 3D sont égales à celles obtenues en imagerie 2D (chapitre 2) (équation (4.11)).

$$\begin{aligned} \rho_{\text{échantillon}}(t=0) &= \frac{\sum_{ROI} \rho(ROI,t=0) \cdot V_{\text{voxel}} \cdot N_{\text{voxels}}(ROI,t=0)}{\sum_{ROI} V_{\text{voxel}} \cdot N_{\text{voxels}}(ROI,t=0)} \\ &= \frac{\frac{1+X(t=0)}{1+\epsilon_v(X(t=0))} \cdot \sum_{ROI} \rho_0(ROI) \cdot N_{\text{voxels}}(ROI,t=0)}{\sum_{ROI} N_{\text{voxels}}(ROI,t=0)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{ROI_{BI,2D}}^{39 \text{ à } 50} \rho_0(ROI_{BI,2D}) \cdot \frac{S_{\text{pixel}} \cdot N_{\text{pixels}}(ROI_{BI,2D}) \cdot e}{1+\epsilon_v(X_{2D}(t=0))}}{\sum_{ROI_{BI,2D}}^{39 \text{ à } 50} \frac{S_{\text{pixel}} \cdot N_{\text{pixels}}(ROI_{BI,2D}) \cdot e}{1+\epsilon_v(X_{2D}(t=0))}} \\ &= \frac{\sum_{ROI_{BI,3D}}^{39 \text{ à } 50} \rho_0(ROI_{BI,3D}) \cdot \frac{V_{\text{voxel}} \cdot N_{\text{voxels}}(ROI_{BI,3D},t=0)}{1+\epsilon_v(X_{3D}(t=0))}}{\sum_{ROI_{BI,3D}}^{39 \text{ à } 50} V_{\text{voxel}} \cdot N_{\text{voxels}} \frac{(ROI_{BI,3D},t=0)}{1+\epsilon_v(X_{3D}(t=0))}} \\ & \Rightarrow \frac{\sum_{ROI_{BI,2D}}^{39 \text{ à } 50} \rho_0(ROI_{BI,2D}) \cdot N_{\text{pixels}}(ROI_{BI,2D})}{\sum_{ROI_{BI,2D}}^{39 \text{ à } 50} N_{\text{pixels}}(ROI_{BI,2D})} \\ &= \frac{\sum_{ROI_{BI,3D}}^{39 \text{ à } 50} \rho_0(ROI_{BI,3D}) \cdot N_{\text{voxels}}(ROI_{BI,3D},t=0)}{\sum_{ROI_{BI,3D}}^{39 \text{ à } 50} N_{\text{voxels}}(ROI_{BI,3D},t=0)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

La résolution numérique des équations (4.9), (4.10) et (4.11) a permis d'identifier les valeurs des constantes du modèle (4.8) résumées dans le Tableau 4.2 et les masses volumiques anhydres représentées en fonction de la hauteur de l'échantillon sur la Figure 4.5.

Tableau 4.2- Valeurs des coefficients A et B

A	B			
	c1	c2	c3	c4
$4,6566 \cdot 10^4$	$4,6763 \cdot 10^{-4}$	$4,6770 \cdot 10^{-4}$	$4,6788 \cdot 10^{-4}$	$4,6844 \cdot 10^{-4}$

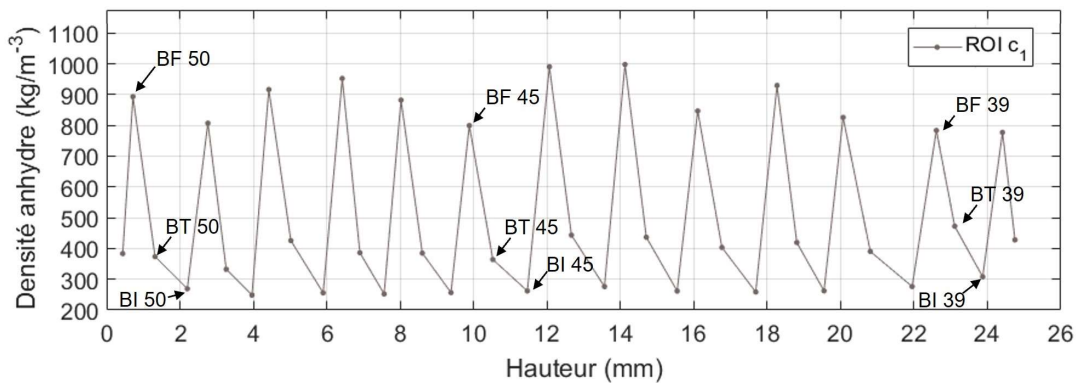


Figure 4.5- Distribution de la masse volumique du bois, par ROI, en fonction de la hauteur dans l'échantillon pour le cylindre central c1

## 4.3 Résultats et discussion

### 4.3.1 Tendances générales

La Figure 4.6 représente l'évolution de la teneur en eau du cylindre  $c_1$  situé au centre de l'échantillon au cours des trois mois d'expérimentation. L'analyse des résultats a été portée plus particulièrement sur ce cylindre central du fait de son isolation vis-à-vis des effets de bords comme cela a été observé en annexe D. L'établissement des conditions limites de températures aux bornes de l'échantillon sont ajoutés afin de localiser les trois phases de sollicitations thermiques. Suite à la première modification de températures sur les faces opposées de l'échantillon, une augmentation de la teneur en eau est visible du côté de la zone froide. Lors des premiers jours de cette première phase, la température mesurée a varié entre 15 et 20 °C, malgré une consigne maintenue à 20 °C, avec pour effet des variations de teneur en eau relativement importantes au plus près de la zone froide. Ensuite, une phase de retour à des conditions isotherme de part et d'autre de l'échantillon a été appliquée pendant une période de 15 jours. Au cours de cette phase, le profil de teneur en eau s'équilibre sur la hauteur de l'échantillon. Enfin, lors de dernière phase de sollicitations débutée à partir du 45<sup>ème</sup> jour, il est nettement visible une augmentation de la teneur en eau du côté de la zone froide, soit en haut ou en bas de l'échantillon en lien avec l'oscillation cyclique de la température.



Ces résultats indiquent un effet de la température sur le profil d'humidité suivant la hauteur de l'échantillon. Afin de mieux comprendre l'évolution des profils d'humidité, une analyse de l'évolution du champ de teneur en eau a été effectuée pour chaque phase de sollicitation thermique.

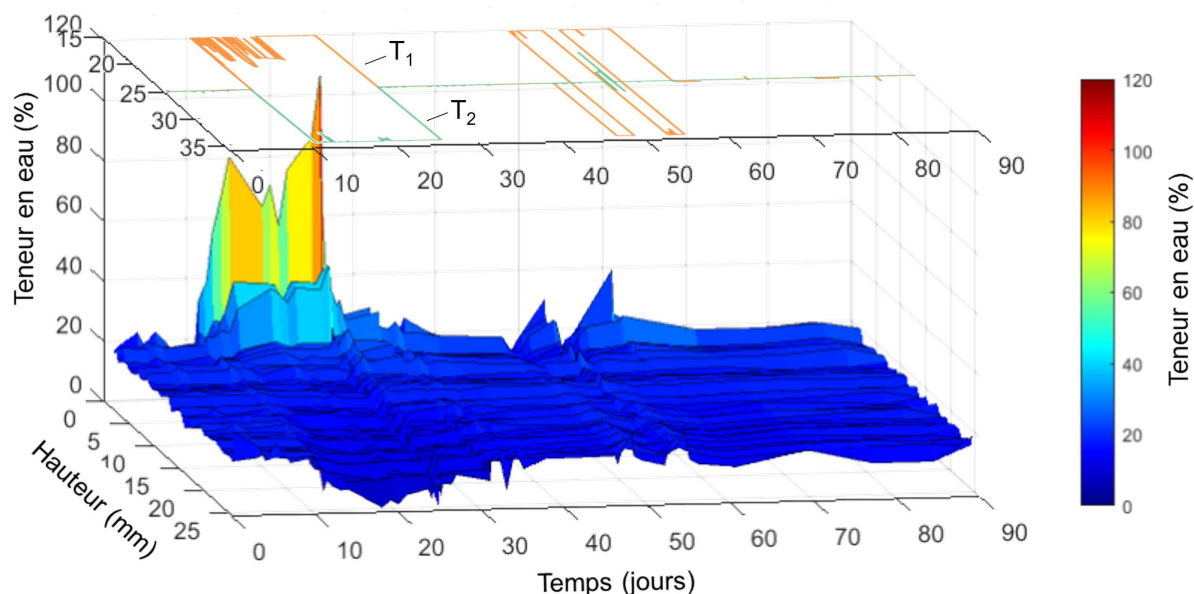


Figure 4.6- Evolution du champ de teneur en eau au cours des trois mois d'expérimentation au sein du cylindre central  $c_1$

### 4.3.2 Phase 1 : Conditions non-isothermes

La phase 1 correspond à l'application de conditions non-isothermes entre les deux faces opposées de l'échantillon avec un écart de température imposé de 20 °C. Initialement à une température de 25 °C, les faces hautes et basses sont respectivement soumises à des températures de 15 °C ( $T_1$ ) et 35 °C ( $T_2$ ). L'évolution temporelle de la teneur en eau le long de  $c_1$  – cylindre central de l'échantillon – est représentée sur la Figure 4.7. Il est également indiqué sur cette même figure le profil de densité anhydre des ROI (pour chaque cerne : bois final, bois de transition et bois initial). Les résultats indiquent une augmentation de la teneur en eau dans les ROI situées du côté de la surface froide ( $T_1 = 15$  °C). À l'inverse, l'humidité proche de la surface chaude ( $T_2 = 35$  °C) diminue. Suite aux changements des conditions limites, un gradient de température au sein de l'échantillon a été généré. Ce dernier induit lui-même un écart local entre l'humidité relative et l'activité de l'eau (également appelée humidité relative d'équilibre). Cet écart est localement et rapidement compensé par une modification de la pression partielle de vapeur (par adsorption ou désorption), ce qui conduit à un gradient de pression partielle de vapeur d'eau et donc à une diffusion d'humidité se propageant du côté

chaud vers le côté froid. En effet, l'échantillon étant recouvert sur l'ensemble de ses faces par un revêtement imperméable, la teneur en eau moyenne reste constante au cours du temps. Le changement des températures aux bornes de l'échantillon entraîne donc une redistribution d'humidité jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre thermodynamique soit atteint. Dans cette configuration, le gradient de pression partielle de vapeur d'eau et le gradient de teneur en eau sont opposés. Du côté de la plaque froide ( $T_1 = 15\text{ °C}$ ), il en résulte une accumulation d'humidité avec une augmentation de la teneur en  $X$  allant au-delà du point de saturation des fibres ( $X \approx 29\%$  b.s (Siau, 1984)). Seuls les premiers millimètres du côté de  $T_1$  présentent une évolution notable de teneur en eau avec une hétérogénéité forte au sein des cernes. Au sein des ROI #BI 51, #BT 50 et #BI 50, la teneur en eau au-dessus du PSF suggère la présence d'eau libre. Ces variations locales au-delà du PSF s'expliquent par une masse volumique variant d'un facteur 3 à 4 au sein des cernes entre le bois initial (BI) et le bois final (BF) de l'épicéa (Polge, 1966). Il en résulte une capacité de stockage d'eau capillaire plus importante dans le bois initial en raison d'une fraction de lumens plus importante que dans le bois final (Wilson and White, 1986; Butterfield and Meylan, 1980). Afin de visualiser plus en détail la distribution d'eau au sein des cellules, des coupes tomographiques suivant le plan radial-tangentiel (R-T) sont présentées sur la Figure 4.8a et suivant le plan radial-longitudinal (R-L) sur la Figure 4.8b.

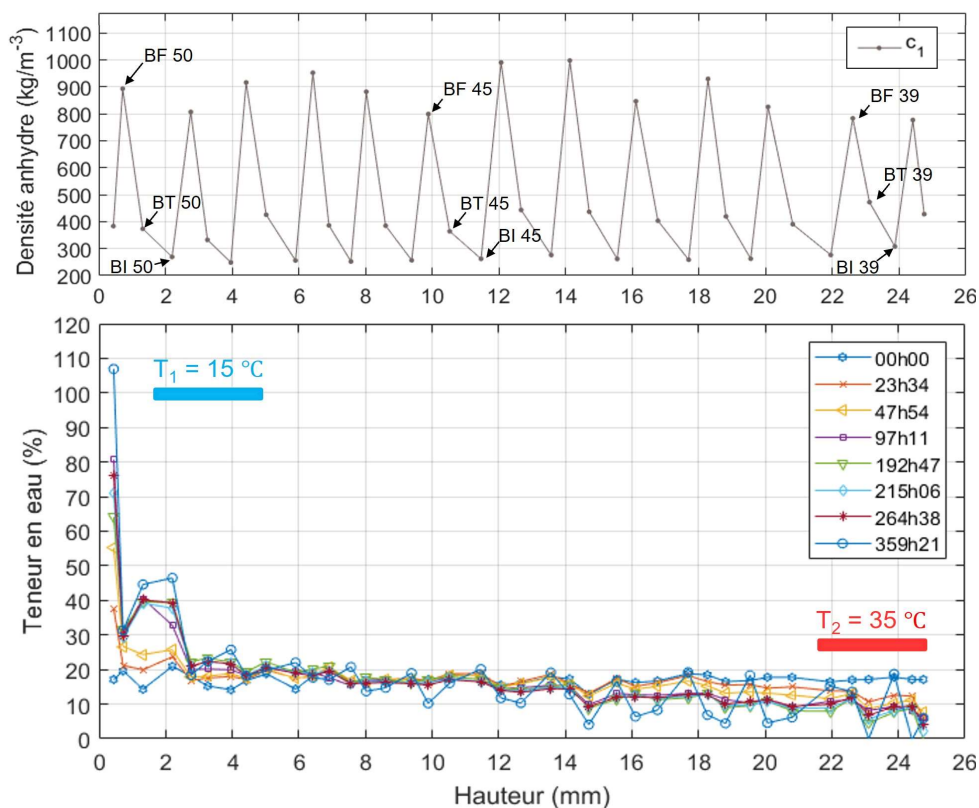


Figure 4.7- Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de  $c_1$  – cylindre central – selon la hauteur en conditions non-isothermes (phase 1) avec le profil de densité anhydre placé au-dessus

Les coupes tomographiques passent par l'axe de l'échantillon. Les valeurs de *NDG* ont été présentées en négatif pour en faciliter l'observation : en gris foncé, les zones présentent une densité de matière plus élevée (bois final) que celles en gris clair (bois initial). Deux lignes verticales en pointillées ont été ajoutées sur les côtés des coupes pour faciliter la visualisation des variations dimensionnelles de l'échantillon au cours du temps. Le diamètre de l'échantillon – suivant la direction tangentielle – augmente du côté de la plaque froide et diminue du côté de la plaque chaude. Ces variations dimensionnelles traduisent une variation de la quantité d'eau liée entre ces deux zones. Sur ces coupes, il est possible d'observer l'apparition de taches noires en haut de l'échantillon au cours de la phase 1 (Figure 4.8a.2-3 et Figure 4.8b.2-3). Ces taches noires sont dues à la présence d'eau libre au sein des pores de l'échantillon. Leur apparition – au cours de la phase 1 – est en accord avec la mesure de teneur en eau locale présentée sur la Figure 4.8. La localisation de l'eau libre est hétérogène au sein de l'échantillon et semble migrer suivant la direction radiale en formant des colonnes d'eau d'après les coupes R-T (Figure 4.8a). Cette observation est plus particulièrement marquée au niveau des canaux résinifères radiaux (Figure 4.8a3). En revanche, l'eau ne semble pas se propager de trachéides en trachéides comme observé sur les coupes en R-L (Figure 4.8b). D'après les coupes tomographiques en R-T et R-L, il semble que l'eau libre migre dans le sens opposé au gradient de pression partielle de vapeur d'eau avec la présence de trainées foncées verticales s'allongeant entre les acquisitions effectuées entre 97 heures et 360 heures après le début de la phase 1.

Au sein des essences résineuses, les canaux résinifères radiaux sont présents au sein de cellules de rayons ligneux multisériés. D'après les résultats issus du chapitre 3.3, ce sont les cellules bordant les canaux résinifères – cellules de parenchyme et/ou de trachéides radiales – qui sont utilisées comme voie de passage par l'eau libre et non les canaux résinifères eux-mêmes initialement remplie de substances métaboliques de l'arbre. Cette distribution de l'eau libre au sein de la structure anatomique de l'épicéa peut s'expliquer par l'aspiration dans le bois initial des ponctuations aréolées entre les trachéides longitudinales successives. Ces ponctuations – composées d'une membrane mobile partiellement hydrolysée avec en son centre le torus (zone dense imperméable) (Kollmann and Côté, 1968; Parham and Gray, 1984) – empêche le passage du fluide d'une trachéide à une autre lorsqu'elle est aspirée, c'est-à-dire, lorsque la membrane est plaquée contre la paroi secondaire de la cellule (Siau, 1984). La migration d'eau libre s'effectue alors préférentiellement à travers les cellules des rayons ligneux connectées aux trachéides longitudinales par des ponctuations de champs de croisements (semi-aérolées). Cette voie de passage utilisée par l'eau a pour effet un envahissement partiel des trachéides.

Ces valeurs de teneurs en eau supérieures au PSF confirment ce qui pouvait être suggéré – mais non accessible – lors des travaux menés par Bouali et *al.* (2012) qui ont utilisé

la radiographie aux rayons X pour suivre l'évolution du champ de teneur en eau d'un échantillon en conditions non-isothermes. Leurs résultats présentent une évolution du profil d'humidité similaire mais plus homogène expliqué par le choix de l'essence feuillue à pore diffus (Alisier Torminal) ayant une masse volumique homogène. À la fin de leur expérimentation, la teneur en eau mesurée avoisinait 40 % du côté de la plaque froide, soit au-dessus du PSF.

Dans cette présente étude, l'utilisation de la tomographie X a permis la visualisation directe d'eau libre au sein de la structure anatomique de l'épicéa confirmant ainsi les profils de teneur en eau visible sur la Figure 4.7.

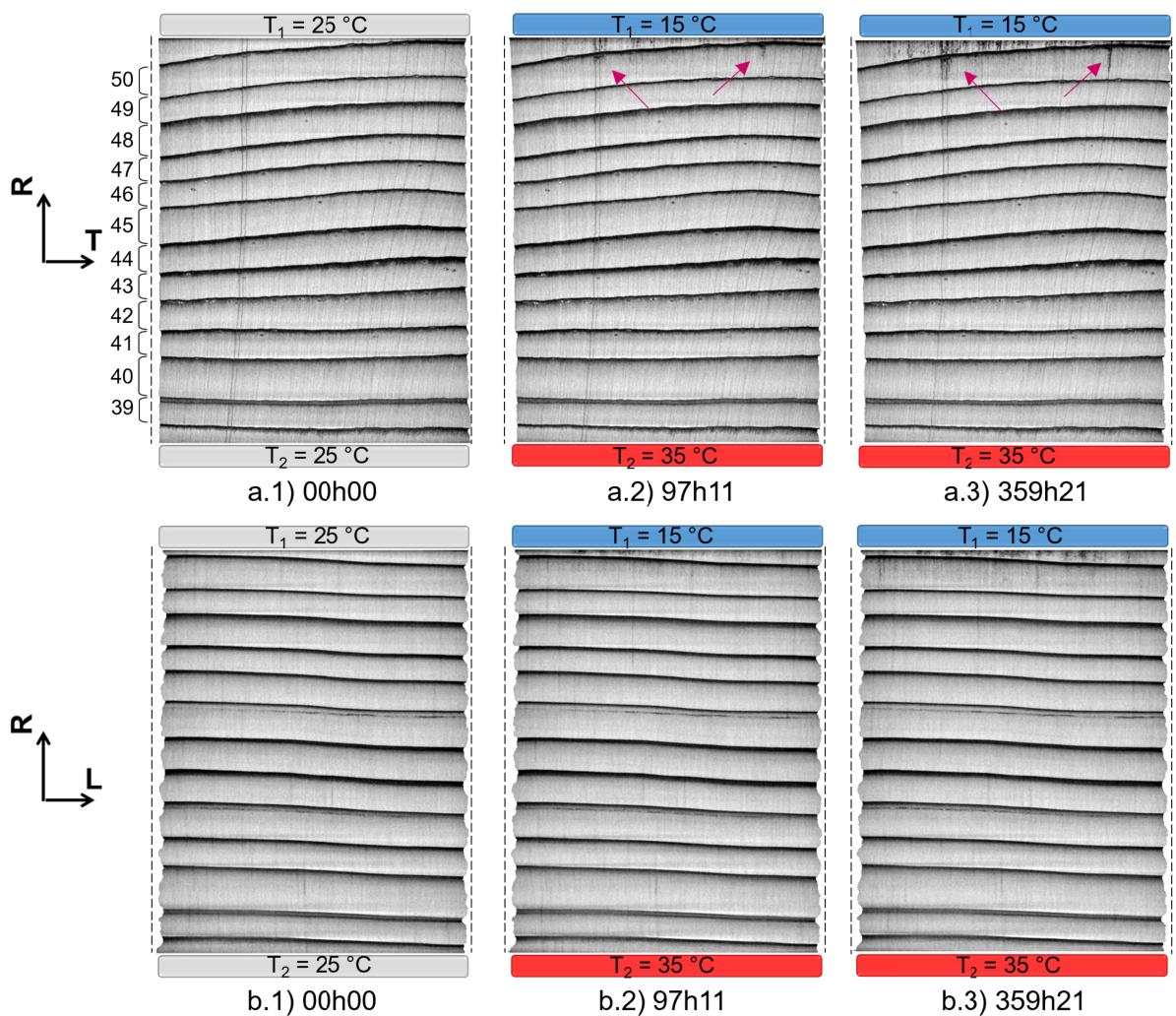


Figure 4.8- Coupes tomographiques passant par l'axe de l'échantillon lors de la phase 1 a) suivant le plan R-T et b) suivant le plan R-L. Le niveau de gris foncé équivaut à la présence de matière plus dense que le niveau de gris clair

### 4.3.3 Phase 2 : Conditions isothermes

La phase 2 s'effectue dans la continuité de la phase 1 avec un retour à des conditions isothermes imposées sur les phases opposées de l'échantillon. La Figure 4.9 représente

l'évolution de la teneur en eau locale de  $c_1$  situé au centre de l'échantillon. Au voisinage de  $T_1$  – plaque froide durant la phase 1 –, la teneur en eau diminue drastiquement dès le changement des conditions de température en passant de 109 % à la fin de la phase 1 à 30 % en moins de 24 heures dans le bois initial du cerne 51 (#BI 51). À l'inverse, du côté de  $T_2$  – la plaque chaude durant la phase 1 –, la teneur en eau augmente progressivement jusqu'à revenir à une valeur proche de la teneur en eau d'équilibre au début de l'expérience. Lors de cette phase 2, le profil de teneur en eau initialement hétérogène suite à la phase 1 redeviens plat après 146 heures (6 jours) en conditions isothermes.

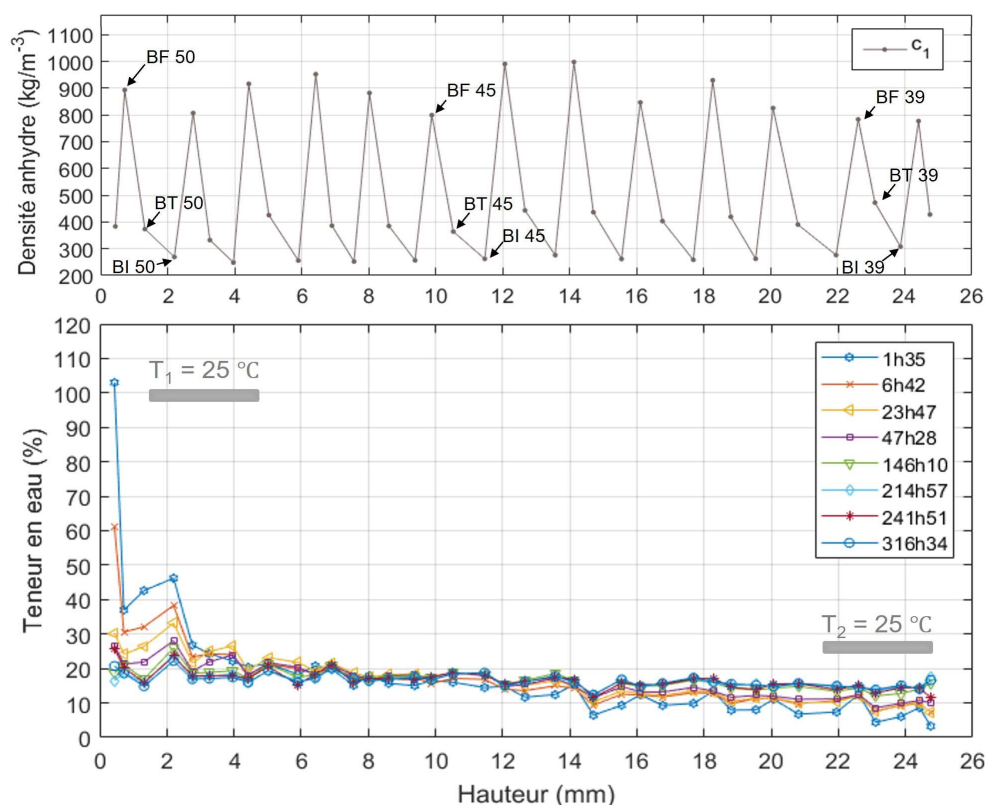


Figure 4.9- Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de la région d'intérêt  $c_1$  – cylindre central – selon la hauteur en conditions isothermes (phase 2) avec le profil de densité anhydre placé au-dessus

#### 4.3.4 Phase 3 : Conditions dynamiques

La phase 3 de sollicitations thermiques correspond à l'établissement de conditions dynamiques comprenant un total de deux cycles. Une face de l'échantillon est soumise à une température  $T_1$  15 °C puis de 35 °C tandis que la température  $T_2$  de l'autre face est maintenue à 25 °C. La Figure 4.10 présente l'évolution du profil d'humidité pour chacun des cycles de  $c_1$  situé au centre de l'échantillon. Malgré le bruit visible des valeurs de teneur en eau, inhérent à la méthode, les résultats indiquent que la teneur en eau varie après chaque changement de conditions sur les six premiers millimètres et de manière plus significative au voisinage de  $T_1$

que de  $T_2$ . La durée plus longue des demi-cycles 1,2 et 2,2 conduit à une accumulation plus importante d'humidité au voisinage de  $T_1$  (15 °C), avec des valeurs approchant, voir dépassant, le PSF. Au cours de l'essai, la variation de teneur en eau atteint au maximum 35 % au voisinage de  $T_1$ , (#BI 51) alors qu'elle ne dépasse pas 13 % du côté de  $T_2$ . Cette variation entre les demi-cycles diminue au fur et à mesure que la ROI est distante de l'extrémité de l'échantillon comme observé au milieu de l'échantillon où peu d'évolution est constaté. Un inversement des profils d'humidité a donc lieu dans l'échantillon avec la possibilité d'observer une augmentation de teneur en eau locale suite au changement de la température  $T_1$  de 15 à 35 °C notamment. Cette diffusion d'humidité est mise en évidence par l'ajout de flèches indiquant l'évolution de la teneur au voisinage de  $T_1$  pour le profil en vert foncé (début du cycle 2- Figure 4.10c) comparé au profil bleu clair (fin du cycle 1- Figure 4.10b) où la diminution d'humidité dans un cerne entraîne une augmentation dans le cerne voisin.

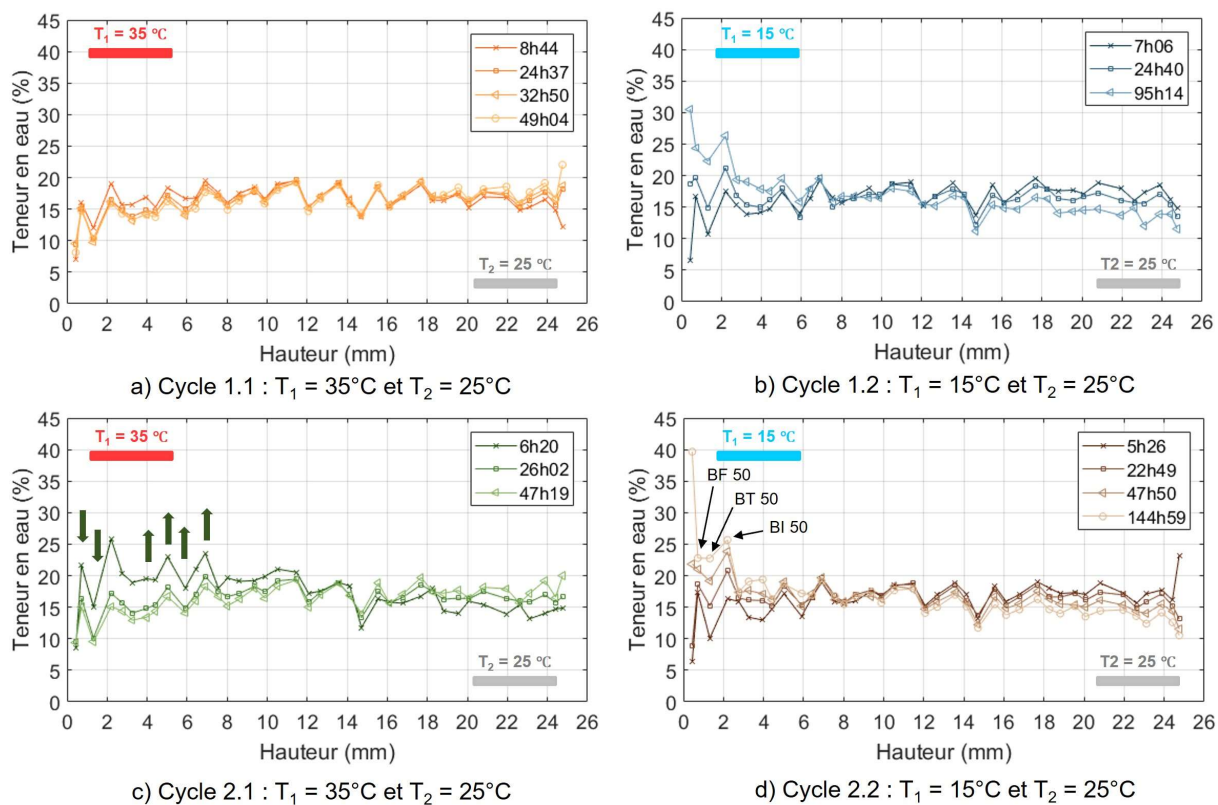


Figure 4.10- Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de la ROI c1 – cylindre central – selon la hauteur en conditions dynamiques (phase 3)

### 4.3.5 Évaluation du champ de teneur en eau suivant le rayon de l'échantillon

La Figure 4.11 présente le profil d'humidité suivant le rayon de l'échantillon lors de la phase 1 et 2 pour les régions situées dans les cernes 51 (#BI 51 - Figure 4.11a) et 50 (#BF 50 -

Figure 4.11b, #BT 50 - Figure 4.11c et #BI 50 - Figure 4.11d), soit au plus près de  $T_1$ . Pour chaque phase, trois profils d'humidité sont représentés correspondant à la première et dernière acquisition ainsi que celle effectuée 47 heures après le changement des températures. Les résultats indiquent que des gradients d'humidité sont présents suivant le rayon de l'échantillon. Ce dernier est particulièrement marqué dans le cerne 51 (Figure 4.11a) situées au plus près de  $T_1$  avec une différence de teneur en eau de 45 % entre le centre ( $c_1$ ) et la périphérie ( $c_4$ ). En revanche, les profils d'humidité localisés dans le bois final du cerne voisin (#BF 50) restent plats. À noter également que les profils d'humidité localisés dans le bois de transition (#BT 50) et bois initial (#BI 50) du cerne 50 semblent être inversés. Ces gradients d'humidité localisés suivant le rayon de l'échantillon peuvent s'expliquer par des déperditions thermiques latérales ayant pour effet une température au centre de l'échantillon ( $c_1$ ) respectant la valeur de consigne et une température en périphérie plus éloignée. Cette dernière pouvant approcher la température ambiante avec l'éloignement de l'extrémité de l'échantillon. Sur les coupes tomographiques, une migration de trachéides en trachéides suivant la direction longitudinale n'a pas pu être mise en évidence clairement mais, au contraire, plutôt dans la direction radiale. Cependant, la présence des profils d'humidité plats dans le bois final tend à penser qu'une migration capillaire transverse peut avoir lieu.

En analysant plus en détails les profils d'humidité. Il est possible d'observer qu'au cours de la phase 1, la teneur en eau augmente dans l'ensemble des ROI et diminuent lors de la phase 2 jusqu'à revenir à des valeurs proches de celles initiales. Seule une teneur en eau plus élevée est observée entre la fin de la phase 1 et le début de la phase 2 dans le bois final du cerne 50 (Figure 4.11b - #BF 50). Une hypothèse possible est le transfert d'humidité allant du cerne 51 vers le cerne 50 avec le changement de température de consigne.

Ces résultats confirment les observations effectuées précédemment dans ce chapitre et également dans le chapitre 3 avec une migration capillaire s'effectuant de trachéides en trachéides dans le bois final – via les ponctuations aréolées non aspirées – mais de manière bien plus complexe dans le bois initial à cause d'un grand nombre de ponctuations aréolées aspirées. En conséquence, une migration radiale à travers les rayons ligneux s'effectue de manière significative comme observée sur les Figure 4.8a et Figure 3.6. Il en résulte une redistribution latérale faible dans le bois initial pouvant expliquer la forme des profils d'humidité similaire dans le bois initial (Figure 4.11a et d) et plat dans le bois final (Figure 4.11b) lorsque la teneur en eau est supérieure au PSF.

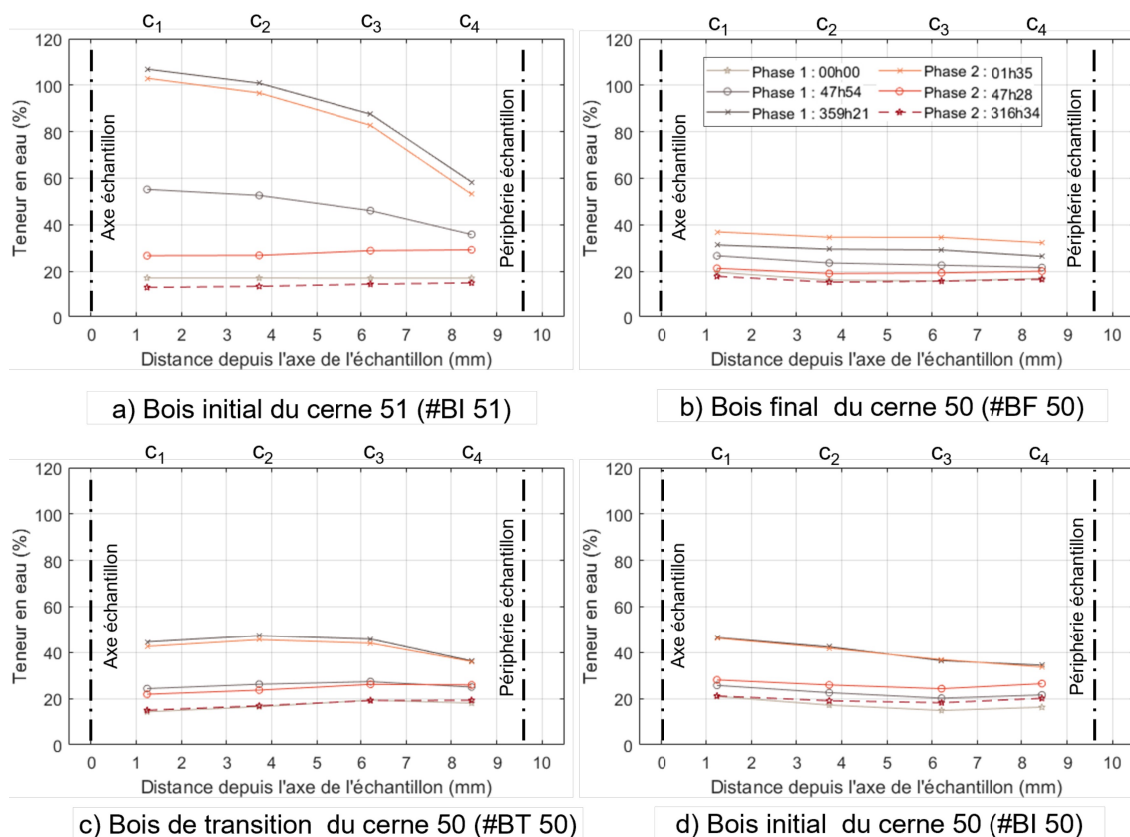


Figure 4.11- Évolution du profil d'humidité suivant le rayon de l'échantillon lors la phase 1 et 2 pour les zones : a) Bois initial du cerne 51 (#BI 51), b) Bois final du cerne 50 (#BI 50), c) Bois de transition du cerne 50 (#BI 50) et d) Bois initial du cerne 50 (#BI 50)

## 4.4 Conclusion

L'étude de la diffusion d'humidité au sein d'un échantillon d'épicéa exposé à des sollicitations thermiques variables a été conduite à partir d'images tomographiques par rayons X. Cette technique a demandé la conception d'un dispositif expérimental original pour répondre au besoin de l'établissement de condition limites précises et adapté aux contraintes de l'imagerie par rayons X. La conversion du niveau de gris des images tomographiques en teneur en eau de l'échantillon – discrétisé en régions d'intérêts – a donné accès à l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau suivant trois phases de sollicitation thermique. Les résultats obtenus au cours des trois mois d'expérimentations peuvent être résumés comme suit :

- En conditions non-isothermes, le suivi des profils d'humidité a montré une diffusion d'humidité allant du côté chaud vers le côté froid, à l'opposé du gradient de teneur en eau,



- Le champ de teneur en eau observée présente de fortes variations locales le long de l'échantillon dû au gradient de température lorsque le PSF est atteint. Ces variations sont liées à la masse volumique hétérogène de l'épicéa au sein des cernes,
- Les extrémités de l'échantillon aux voisinages des températures de consignes ont des amplitudes de variation de teneur en eau importantes et allant parfois au-delà du point de saturation des fibres,
- Les coupes tomographiques ont confirmé par visualisation directe d'apparition locale d'eau libre du côté froid de l'échantillon avec une migration liquide s'opérant suivant la direction radiale au sein des cellules des rayons ligneux et pouvant être opposé au gradient de température,
- Lors des cycles de températures, les profils d'humidité sont fonctions de la durée d'application du gradient de température et de l'histoire de ses variations,
- Les effets de bord en périphérie de l'échantillon ont pu être visualisés avec l'évolution du champ de teneur en eau suivant le rayon au cours du temps accessible par tomographie X 3D. Les transferts d'humidité au sein de l'échantillon sont fonctions des gradients de température issus de  $T_1$  et  $T_2$  mais aussi des échanges thermiques périphériques générant des flux en 3D. Le gradient de température entre les deux extrémités restant l'effet prédominant en raison de son amplitude.

Ces résultats expérimentaux vont être confrontés avec un modèle numérique simulant les transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux. La capacité prédictive y sera étudiée suivant plusieurs configurations en activant ou non certaines propriétés hygroscopiques pour évaluer l'impact de ces propriétés sur les transferts massiques.

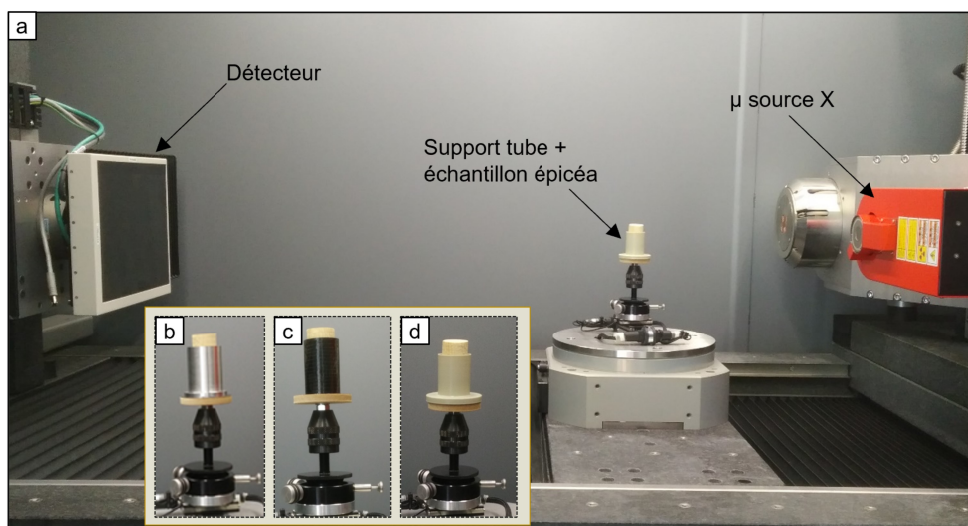
Au-delà de ce travail doctoral, les perspectives d'amélioration du protocole d'étude du champ de teneur en eau hors équilibre par tomographie 3D par rayons X pourront être étudiés. En effet, l'analyse de la distribution du *NDG* des images reconstruites dans le bois et dans l'air a mis en évidence la nécessité d'affiner les paramètres de reconstruction en vue de limiter les artefacts de reconstruction. Ce travail préliminaire n'a pas pu être investigué dans son intégralité lors de ce projet doctoral. À la suite de cette optimisation des paramètres de reconstruction, l'établissement d'un nouveau modèle mathématique permettant de lier la masse volumique au *NDG* pourra vraisemblablement être envisagé. En effet, pour ces travaux préliminaires, un modèle linéaire a été arbitrairement choisi reposant sur l'hypothèse d'un coefficient d'atténuation massique unique pour le bois et l'eau. Il est probable qu'une étude approfondie des coefficients d'atténuation massiques de l'eau et de la matière lignocellulosique mette en évidence une atténuation aux rayons X non linéaire.

## Annexe C : Étude de l'atténuation aux rayons-X de la matière composant différents tubes

La détermination du matériau le plus adapté pour le tube dans lequel l'échantillon est positionné a fait l'objet de tests préliminaires avec l'acquisition de radiographies suivant les mêmes conditions opératoires que lors des acquisitions tomographiques. L'étude a porté sur trois matières différentes avec un tube en aluminium, en carbone et en polypropylène. Les critères définis dans l'établissement du choix du matériau sont énumérés ci-dessous :

- Avoir une atténuation aux rayons X la plus faible possible,
- Usinage sur mesure aisée,
- Résistance mécanique suffisante pour lier les systèmes de régulations haut et bas.

La Figure 4.12 présente le dispositif adopté pour l'acquisition des images.



Un matériau avec une valeur de transmittance  $I/I_0$  la plus proche de 1 est recherché car cela signifie qu'il a une atténuation aux rayons X plus faible. Le polypropylène a donc été choisi pour sa faible atténuation aux rayons-X – valeur proche de 0,95 – et pour sa facilité d'usinage comparé aux valeurs de 0,91 et 0,75 pour le carbone et l'aluminium respectivement.

## Annexe D : Étude numérique des effets de bord

Les effets de bord en périphérie de l'échantillon sont liés aux échanges thermiques externes. Ils induisent une différence de température entre la surface périphérique et l'axe central de l'échantillon entraînant un flux d'humidité perpendiculairement à son axe principal. Ces conditions aux limites placent l'échantillon dans une configuration bidimensionnelle (2D) au niveau des transferts. Cela a pour conséquence une perturbation du gradient de température selon l'axe de l'échantillon induit par les températures contrôlées au niveau de ses faces opposées. L'impact de ces transferts thermiques est représenté sur la Figure 4.13 avec les résultats des simulations suivant trois configurations d'échange convectif sur les faces latérales où le coefficient de transfert massique a été modifié :

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

Dans le cas théorique i – sans échange convectif à la périphérie de l'échantillon – les transferts de chaleur par conduction entre les deux faces opposées de l'échantillon induisent un profil de teneur en eau parfaitement homogène suivant le rayon de l'échantillon (configuration monodimensionnelle (1D)). Lorsque le coefficient d'échange externe est de l'ordre de  $12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , un profil de teneur en eau suivant le rayon de l'échantillon se forme (configuration 2D - Figure 4.13 cas iii). En conséquence, cet effet doit être limité ou accessible pour maîtriser les conditions limites. Dans ce but, l'échantillon est positionné à l'intérieur d'un tube en polypropylène présentant une conductivité thermique modérée ( $0,22 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) et une densité homogène de  $910 \text{ kg.m}^{-3}$  (Datasheet tube polypropylène (PP)). Le tube a pour avantage d'isoler l'échantillon des échanges thermiques convectifs extérieur avec la présence d'une fine lame d'air autour de l'échantillon (cas ii).

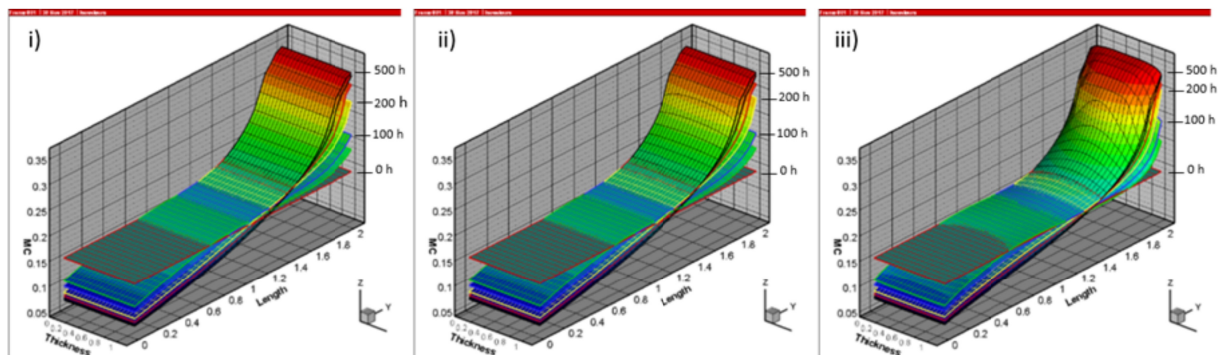


Figure 4.13- Évolution de la distribution du champ de teneur en eau aux temps  $t_{0h}$  ;  $t_{50h}$  ;  $t_{100h}$  ;  $t_{200h}$  ;  $t_{300h}$  ;  $t_{400h}$  et  $t_{500h}$  pour les cas i, ii et iii selon la hauteur du cylindre et le diamètre 20 mm

## Annexe E : Complément sur le dispositif expérimental

### E.1 Principe général

Le dispositif expérimental se présente avec deux systèmes de régulations indépendants positionnés en symétrie au-dessus et en dessous de l'échantillon afin d'établir et de maintenir des températures de surface sur les faces opposées de l'échantillon. L'emploi de module Peltier a l'avantage de pouvoir générer un flux de chaleur d'une face du module vers l'autre, l'une devenant froide et l'autre chaude. Ce flux de chaleur peut être inversé en changeant le sens du courant par lequel le module Peltier est alimenté. Ce type de composant est généralement couplé à un dissipateur de chaleur incorporant un ventilateur pour optimiser le rendement. En effet, il est nécessaire d'évacuer les calories du côté de la face chaude du module Peltier afin d'éviter que la face froide augmente en température à cause du transfert de chaleur par conduction à travers le module. Un bloc de laiton entre l'échantillon et chaque module Peltier permet d'assurer le contact thermique. Il permet également d'augmenter l'inertie thermique du système de régulation et ainsi de limiter les variations de température liées à la régulation. Le respect de la consigne est contrôlé par l'intermédiaire d'une sonde de température (PT1000) insérée dans le laiton au plus près de l'échantillon. Une carte ArduinoNano gère l'alimentation du module Peltier en fonction de l'écart entre la température de consigne et la température mesurée. Pour ce faire, un algorithme de régulation développé au sein du laboratoire contrôle un module relais alimentant le module Peltier soit dans un sens ou dans l'autre pour inverser le flux de chaleur généré. La carte ArduinoNano sert également d'interface et contrôle le maintien de la température de consigne.

Une interface graphique Visual Basic permet de définir la température de consigne souhaitée (lorsque le dispositif expérimental est connecté à un ordinateur) et d'enregistrer les données. Le programme Visual Basic fonctionne en tant que maître et la carte ArduinoNano en mode esclave.

La durée de l'expérimentation de plusieurs mois ne permettait pas de laisser le dispositif en place dans le tomographe au-delà des phases d'acquisition. Lors d'une acquisition par tomographie, il est alors nécessaire de déconnecter le dispositif de l'ordinateur et de l'installer dans le tomographe. Cette étape demande à changer le mode d'alimentation, c'est-à-dire de passer du mode d'alimentation via le secteur à un mode d'alimentation avec des accumulateurs (piles). Pour ce faire, un bouton switch permet de basculer d'un mode à l'autre. Lorsque l'alimentation est effectuée via les piles, l'enregistrement des données est interrompu. Un contrôle du bon fonctionnement du bloc d'instrumentation est cependant possible grâce aux moniteurs installés sur le dispositif donnant la température de consigne et celle mesurée par le capteur. Un second moniteur est présent affichant les valeurs de tension aux bornes des piles

pour en vérifier la charge. L'alimentation avec des piles lors de la réalisation d'un scan répond au besoin de manutention du dispositif et des contraintes liés à l'acquisition nécessitant une rotation complète de l'objet observé sans éléments venant s'incorporer dans le champ des rayons X ni vibrations. Pour ces raisons, l'ensemble des composants électroniques étaient intégrés au dispositif sur quatre cartes de circuit imprimé (PCB) positionnées autour de chaque face du dissipateur thermique, liées entre elles par des connecteurs de type JST.

## E.2 Schémas du circuit électrique

La conception du schéma électrique a nécessité l'utilisation de cartes PCB (*Printed Circuit Board*) dessinées sur mesure avec le logiciel *Altium v18* pour répondre à la fois aux contraintes dimensionnelles du dispositif mais aussi au besoin d'alimentation des composants à des voltages différents. Par ailleurs, la conception devait intégrer deux modes d'alimentation avec des piles lors de la réalisation d'une acquisition tomographique ou sur secteur. En effet, l'utilisation d'un module Peltier nécessite une alimentation continue pour maintenir la température de consigne demandée. En mode pile, le module Peltier est alimenté par un ensemble de trois piles de 1,2 V assemblé en parallèle. Cet ensemble est dupliqué pour alimenter en sens inverse le module en fonction du besoin avec l'activation ou non d'un double relais. Ce dernier fonctionne en 5 V ainsi que le ventilateur du dissipateur thermique et les moniteurs. Au total, deux capteurs PT1000 sont utilisés et positionnés de part et d'autre du module Peltier. Chaque capteur est couplé avec un amplificateur fonctionnant en 3,3 V pour être lu avec un ArduinoNano. Enfin, l'ArduinoNano était alimenté par deux piles 9 V assemblées en parallèle afin d'assurer une autonomie d'environ trois heures.

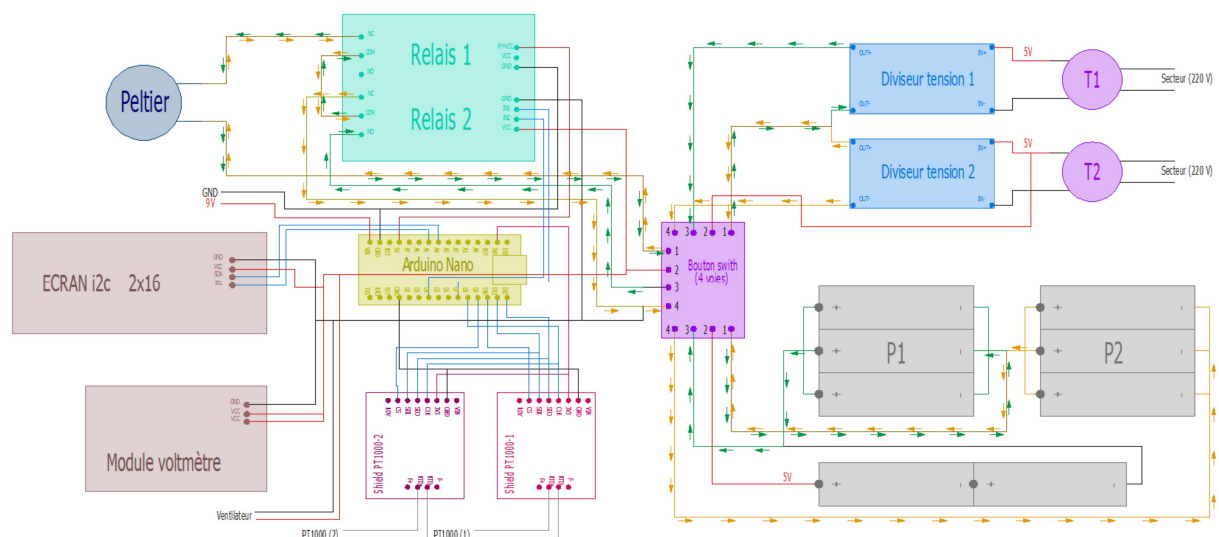


Figure 4.14- Schéma électrique du bloc instrumentation permettant la gestion de la température de consigne avec un module Peltier contrôlé avec un microprocesseur ArduinoNano. L'inversion du courant (flèches) dans le module Peltier est effectué par un relais double

# Étude des transferts d'humidité au sein d'un échantillon soumis à des sollicitations thermiques dynamiques

Un équilibre entre ergonomie et répartition des masses a mené à la conception tel qu'illustré sur la Figure 4.15a.

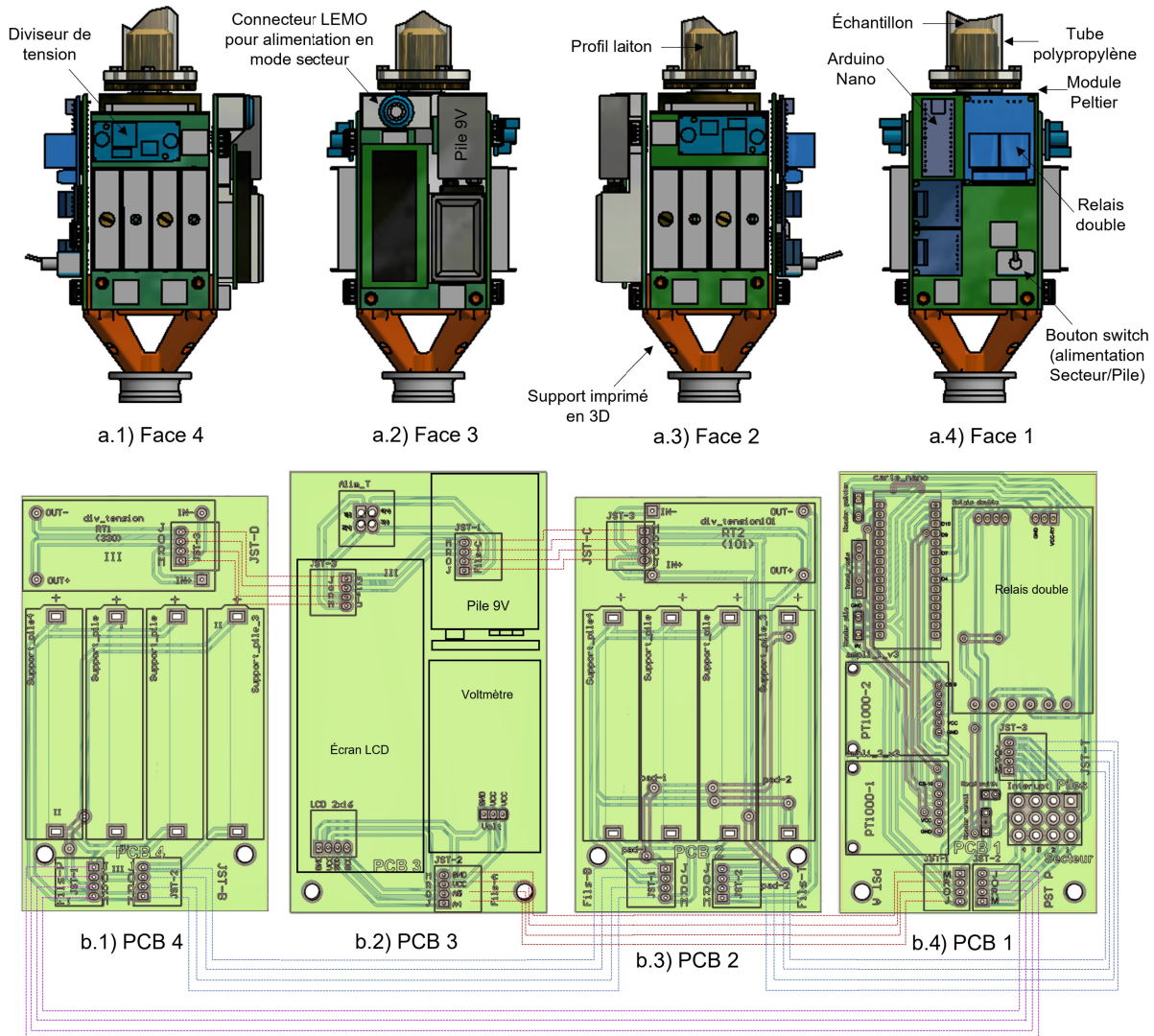


Figure 4.15- a) Représentation schématique des cartes PCB avec les composants électroniques sur chaque face du dissipateur thermique, b) Visualisation du circuit électrique sur les cartes PCB (recto-verso) avec l'emplacement des composants et raccord entre les cartes PCB

## Annexe F : Reconstruction tomographique et artéfacts de reconstruction numérique

La reconstruction tomographique – à partir des projections 2D – suivant la méthode de la rétroprojection filtrée est basée sur le théorème de radon (1917). Le principe général repose sur l'addition des valeurs de chaque pixel des projections dans un volume initialement vide et ceux tout au long du trajet, soit sur tout le diamètre. Chaque projection étant ajoutée pour chaque angle d'acquisition, les contours de l'objet scanné apparaissent au fur et à mesure de la reconstruction. Cependant, cette opération de retro projection simple donne une image floue. Afin de mettre en évidence les contours, un filtre est appliqué après une transformation de Fourier. Ce filtre accentue les hautes fréquences pour restaurer les contours. Enfin, une transformée de Fourier inverse permet d'obtenir une image reconstruite. Le bruit résultant de ce principe est alors fonction du filtre appliqué, de la nature du matériau scanné, du générateur aux rayons X émettant un faisceau polychromatique conique, de la capacité de conversion de l'imageur et de sa dynamique d'enregistrement. Les artéfacts de reconstruction sont visibles sur la Figure 1.19 avec notamment :

- des valeurs de NDG plus élevée en périphérie qu'au centre de l'échantillon,
- « Ombres » localisées dans le bois initial provenant du bois final du cerne adjacent (flèches rouges).

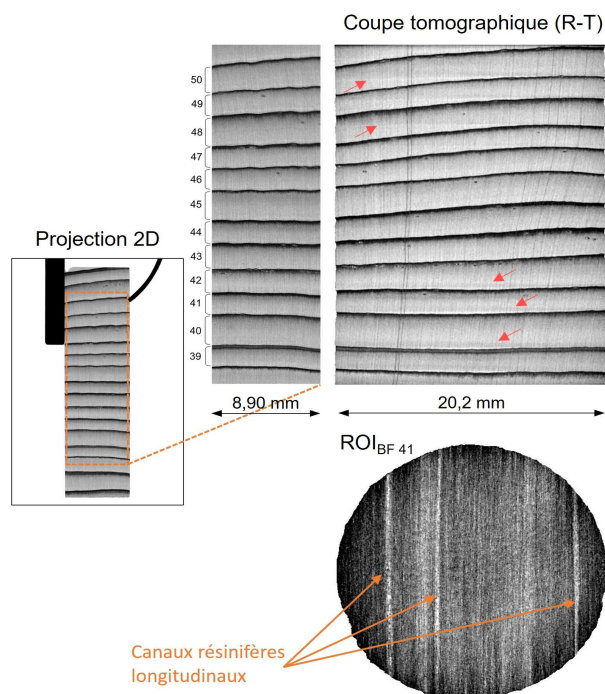


Figure 4.16- Visualisation des artéfacts de reconstruction tomographique et comparaison avec la projection effectuée dans le cadre des travaux d'imbibition du chapitre 2. Les valeurs de niveau de gris ont été inversées sur la coupe tomographique pour faciliter la visualisation. Les flèches rouges localisées sur la coupe tomographique indiquent la présence « d'ombres » provenant du bois final du cerne adjacent





# Chapitre 5

---

Simulations numériques



## 5.1 Introduction

L'utilisation des outils numériques s'est généralisée dans le domaine de la construction et devient indispensable pour concevoir de nouveaux ouvrages respectant les normes en vigueur dont les normes environnementales. En effet, le dépôt d'une demande de permis de construire pour un nouvel ouvrage demande une étude thermique avec une estimation de la consommation énergétique du bâtiment. Cette dernière doit être inférieure à  $75 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  pour les maisons individuelles et  $85 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  pour les locaux collectifs avec la RE 2020 (Ministère de la Transition Ecologique, 2020). Pour y répondre, une conception bioclimatique est à privilégier en lien avec une enveloppe extérieure intégrant une isolation performante pour limiter les déperditions thermiques. Ces isolants employés dans la construction sont également de plus en plus issus de matériaux biosourcés, car leur empreinte carbone est plus faible que d'autres matériaux isolants (Buchanan and Levine, 1999; Pajchrowski et *al.*, 2014). Le recours à des outils numériques est alors nécessaire pour prédire la consommation énergétique du bâtiment en lien avec les matériaux employés tout en assurant la compatibilité de ces derniers vis-à-vis des transferts d'humidité. En effet, leur agencement dans les parois multicouches doit être défini pour assurer un comportement hygrothermique n'engendrant pas d'accumulation d'humidité sur plusieurs années (Guide Rage, 2012). L'humidité au sein des parois est le facteur prépondérant d'émergence de désordres avec l'établissement de conditions favorables au développement de champignons lignivores et lignicoles (Viitanen, 1994; Johansson et *al.*, 2013). En conséquence, les performances thermiques des matériaux se retrouvent dégradées (tassement et conductivité thermique plus élevée (Dell'Isola et *al.*, 2012; Abdou and Budaiwi, 2013; Vololonirina et *al.*, 2014)), ainsi que les performances mécaniques de la structure porteuse à long terme. C'est pourquoi, le recours à des outils numériques d'aide à la conception est requis pour assurer un comportement hygrothermique des parois multicouches favorable aux transferts d'humidité. Cependant, la prédiction des modèles implémentés dans ces outils numériques souffrent encore de limitations notamment pour les matériaux hygroscopiques, pour lesquels les transferts couplés chaleur-masse doivent être considérés précisément (Busser et *al.*, 2019). Pour des raisons économiques, les logiciels mis à disposition des professionnels du bâtiment doivent répondre à un compromis entre capacité prédictive, temps de calcul et puissance CPU requise (devant généralement être compatible avec un ordinateur de bureau).

Afin de mieux comprendre les limites des outils numériques, les mesures expérimentales sont indispensables pour comparer les données issues des simulations à celles des expériences. La première étape est de descendre à l'échelle du matériau seul, afin de maîtriser de manière plus fine les conditions limites par rapport à une configuration multicouche comme c'est le cas dans les enveloppes des bâtiments. Dans ce chapitre, des confrontations entre les données expérimentales issues des chapitres 2 et 4 et simulées ont été menées suivant différentes

configurations. Deux modèles stimulant les transferts couplés chaleur-masse dans les milieux poreux ont été utilisés. Le premier est le logiciel WUFI pro utilisé par de nombreux bureaux d'études thermiques et le modèle TransPore utilisé dans des laboratoires de recherche.

## 5.2 Matériels et méthodes

### 5.2.1 Modèles numériques

Dans ces deux modèles, le milieu considéré est assimilé à un milieu continu fictif. Les équations bilans sont écrites pour chaque phase du milieu poreux au niveau microscopique puis elles sont moyennées et sommées sur un volume élémentaire représentatif (VER). La formulation adopte l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local. Cette approche permet de lier le milieu poreux multiphysique au milieu continu fictif. Cette approche continue ne permet naturellement pas d'appréhender les transferts au niveau local de la microstructure du bois mais à l'échelle macroscopique sur des temps d'observations éventuellement long. Les simulations numériques ont été effectuées en configuration 1D suivant la direction longitudinale d'après les expériences d'imbibition (chapitre 2) et la direction radiale d'après l'expérience de sollicitations thermiques (chapitre 4).

#### 5.2.1.1 Description du modèle TransPore

Le modèle TransPore – initialement développé pour le séchage du bois massif résineux (Perré, 1987; Perré and Degiovanni, 1990; Perré and Turner, 1999) – a été adapté pour des configurations liées à la thermique du bâtiment (Rémond and Perré, 2008; Rafidiarison, 2012). L'avantage de ce modèle « laboratoire » est de pouvoir tester différentes formulations et/ou d'activer certaines propriétés hygroscopiques du bois massif et de voir comment celles-ci impactent les résultats. Le jeu d'équation complet ne sera pas développé ici, le lecteur peut se reporter aux articles précédemment cités pour de plus amples informations. Seules les équations liées à la diffusion de vapeur d'eau et à la migration liquide sont rappelées ci-dessous en détaillant, le cas échéant, la formulation testée dans les configurations de ce chapitre.

##### Lois de transferts

La diffusion de vapeur  $J_v$  est décrite par la loi de Fick avec le gradient de fraction massique de vapeur comme force motrice. Cette force motrice peut s'exprimer à partir du gradient de pression partielle de vapeur d'eau, en condition isotherme via la loi des gaz parfait donnant l'expression (5.1) communément employée par la communauté de la thermique du bâtiment :

$$J_v = -\frac{\delta_v}{\mu} \frac{\partial P_v}{\partial x} \quad (5.1)$$

avec  $\delta_v$  le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ),  $\mu$  le facteur de résistance à la diffusion de vapeur du matériau et  $P_v$  la pression de vapeur (Pa).

La vitesse de la migration d'eau liquide dans le milieu poreux peut être décrite par la loi de Darcy faisant intervenir le terme de perméabilité  $K$ . La perméabilité caractérise la capacité d'un fluide à s'écouler au sein d'un milieu poreux lorsqu'il est soumis à un gradient de pression. Elle dépend à la fois des caractéristiques du fluide (de la viscosité notamment) et de la géométrie du milieu poreux traversé. Pour chaque phase fluide, une perméabilité intrinsèque  $k$  est définie, ne dépendant que de la géométrie du milieu poreux traversé (chapitre 1.3). En ce qui concerne la phase liquide, la pression liquide  $P_l$  est reliée à la pression gazeuse par l'intermédiaire de la pression capillaire  $P_c$ . Dans ce travail, la formulation de la pression capillaire a pu être étudiée suivant deux formulations distinctes issues de Spolek et Plumb (1981) et Perré and Turner, (2001b) d'après les équations 5.2 et 5.3 respectivement.

$$P_c = 0,124 \cdot 10^{-5} \cdot S_l^{-0,61} \quad (5.2)$$

avec  $S_l$  la saturation en eau libre (-)

$$P_c = \sigma(T) \cdot \left( \frac{3150}{S_l + 1 \cdot 10^{-4}} - \frac{1047 + 3,368 \cdot \rho_0}{1,02 - S_l} + 149,8 \cdot \rho_0 \cdot (1 - S_l) + 52350 \right. \\ \left. + 168,4 \cdot \rho_0 - \frac{3150}{1 \cdot 10^{-4}} \right) \quad (5.3)$$

avec  $\sigma$  la tension superficielle en  $\text{N.m}^{-1}$  d'après l'équation (1.7) et  $\rho_0$  la masse volumique anhydre en  $\text{kg.m}^{-3}$

Dans les deux cas, la pression capillaire est fonction de la saturation en eau libre. Cependant, la formulation (5.2) ne tient pas compte de la tension superficielle qui est fonction de la température. Pour intégrer cet effet, l'expression (1.7) a été ajoutée à la formulation pour les simulations. La formulation (5.3) a été développée dans le cas d'une configuration avec une masse volumique hétérogène pour intégrer l'effet des variations de masse volumique au sein des cernes annuels sur la pression capillaire. En effet, le bois initial (BI) formé au printemps a une masse volumique environ trois à quatre fois inférieure au bois final (BF) qui lui est formé à l'été. Les trachéides présentent dans le BF ont une taille de lumen inférieur à 3  $\mu\text{m}$  comparés à celles situées dans le BI avec un diamètre équivalent d'environ 20-30  $\mu\text{m}$ . En conséquence, la pression capillaire est plus importante dans les trachéides du BF tel que démontrée par la loi de Laplace.

Lorsque deux phases fluides coexistent dans un milieu poreux (gaz, liquide), la modélisation du flux massique doit séparer le flux de chaque phase en introduisant une pondération, appelée perméabilité relative, qui intervient dans la loi de Darcy généralisée. La perméabilité relative liquide doit prendre en compte la réduction du flux de liquide lorsque la teneur en humidité diminue (variation des chemins d'écoulement et de probabilité croissante de rupture de la continuité du liquide lorsque l'humidité diminue). Et réciproquement pour la perméabilité relative gazeuse. Pour les configurations testées avec le modèle TransPore, les valeurs de

perméabilités relatives liquide  $kr_L$  et gazeuse  $kr_G$  sont supposées ne dépendre que de la saturation en eau libre  $S_l$  d'après les équations suivantes (Perré, 1993) :

Direction longitudinale :

$$kr_G^L = 1 + (4S_l - 5) \cdot S_l^4 \text{ et } kr_L^L = S_l^8 \quad (5.4)$$

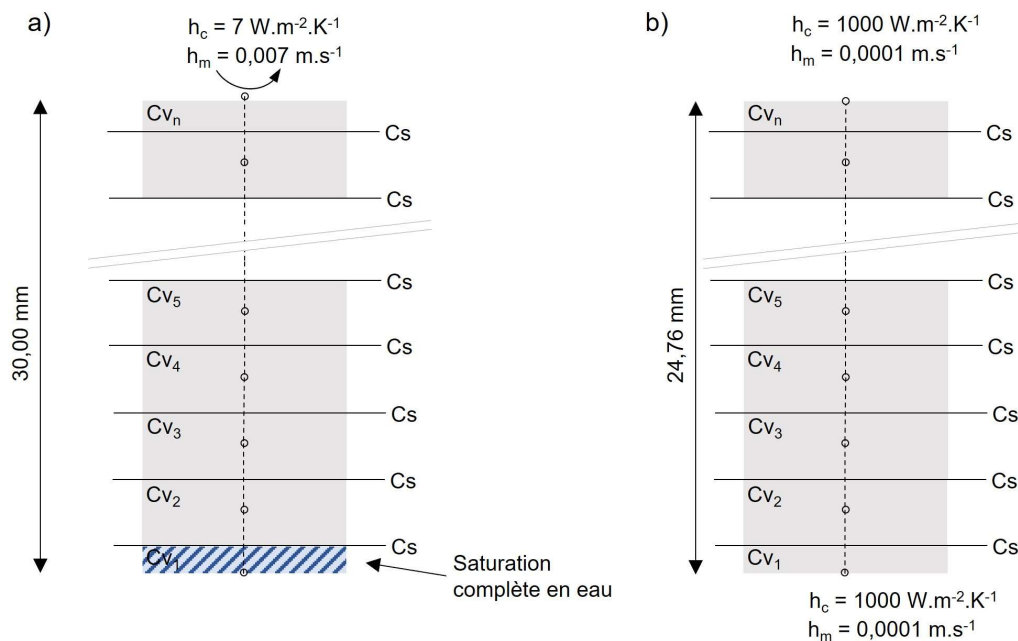
Direction transverse (radiale ou tangentielle) :

$$kr_G^T = 1 + (2S_l - 3) \cdot S_l^2 \text{ et } kr_L^T = S_l^3 \quad (5.5)$$

### Discrétisation et conditions limites

En supposant que les transferts s'effectuent uniquement suivant la direction étudiée lors des expérimentations, une version monodimensionnelle de TransPore a été utilisée. La longueur de l'échantillon a été discrétisée en volume de contrôle (Cv) avec Cs, les surfaces de contacts entre deux volumes. Au centre du CV se trouve le nœud. Au niveau des surfaces d'échange de l'échantillon, il s'agit d'un demi-volume de contrôle (1/2 CV), afin d'avoir le nœud à la surface de l'objet.

Dans le cas de l'imbibition, les configurations étudiées ont utilisé des conditions de Dirichlet pour le premier 1/2 CV saturé en eau (Figure 5.11a). À l'autre extrémité de l'échantillon, les conditions limites renseignées représentaient un milieu ambiant avec des échanges convectifs. Dans le cas de l'étude des transferts d'humidité d'un échantillon exposé à des sollicitations thermiques (chapitre 4), les conditions thermiques de Dirichlet ont été renseignées sur les faces opposées au niveau des systèmes de régulation Peltier en contact avec le laiton. Du point de vue massique, les flux sont considérés comme nuls au niveau de ces faces opposées (Figure 5.11b).



En ce qui concerne les températures renseignées dans les modèles :

- pour les simulations d'imbibition, des conditions isothermes ont été établies avec une température homogène renseignée à 21 °C.
- pour les essais en conditions non-isothermes, les températures appliquées aux extrémités de l'échantillon proviennent des valeurs mesurées lors de l'expérience présentée dans le chapitre 4 et visible sur la Figure 5.2. Pour rappel, la séquence de sollicitation thermique est composée de trois phases avec :
  - 1) une différence de température constante de 20 °C appliquée sur les faces opposées de l'échantillon pendant 15 jours,
  - 2) un retour à un équilibre thermique avec une température de 25 °C de part et d'autre de l'échantillon, durant 21 jours
  - 3) des cycles de température de 15 et 35 °C ( $T_1$ ) sur une face et maintenu constante à 25 °C sur la seconde ( $T_2$ ).

La première séquence (phase 1) correspond à une phase en condition non-isotherme avec une différence de température de 20 °C. Cette configuration a été adoptée pour représenter une période hivernale sur une paroi extérieure. La seconde séquence est caractérisée par une phase avec un retour à des conditions aux limites isothermes sur les faces opposées de l'échantillon. Enfin, la dernière phase intègre des variations de température dynamiques afin de se rapprocher des conditions réelles rencontrées pour une paroi soumise au climat extérieur lors de la saison printanière par exemple.

Lors de cette séquence, différentes forces motrices pour la diffusion d'humidité vont être présentes au sein de l'échantillon (gradient de pression partielle de vapeur d'eau, gradient thermique et gradient de teneur en eau). Elles pourront se retrouver, selon les phases, dans le même sens ou opposés.

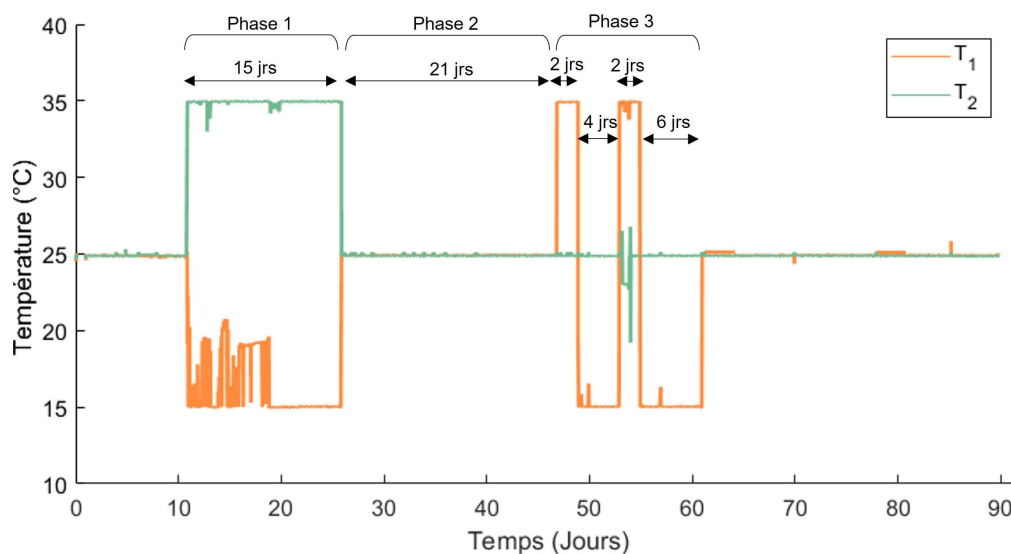


Figure 5.2- Températures imposées aux extrémités de l'échantillon issues de l'expérience présentée dans le chapitre 4

### 5.2.1.2 Description du modèle WUFI pro

Le modèle WUFI Pro v6.5 (*Wärme Und Feuchte Instationär*) est développé par l'institut Fraunhofer IBP (Institute for Building Physics) en Allemagne. Il a été spécifiquement développé pour simuler les transferts couplés de chaleur-masse en conditions dynamiques à travers une paroi multicouche selon une dimension (1-D) (Künzel, 1995). Les transferts d'humidités sont pris en compte suivant deux formulations distinctes pour la diffusion de vapeur d'eau et la migration liquide. Le gradient de pression partielle de vapeur d'eau est utilisée comme force motrice de diffusion d'humidité utilisant l'expression (5.1). Cette formulation intègre les propriétés du matériau avec le renseignement du facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$  comme donnée d'entrée. En ce qui concerne la migration liquide (équation 5.6), la formulation intègre un coefficient de transport liquide  $D_{ws}$  où le terme moteur est le gradient de teneur en eau  $X$ . Le coefficient de transport liquide est fonction de la teneur en eau suivant l'expression (5.7). Cette expression fait intervenir un coefficient d'absorption d'humidité  $A$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ) déterminé expérimentalement suivant la norme NF EN ISO 15148 (2003). La mesure du coefficient d'absorption a été effectuée selon les directions longitudinale et radiale tel que détaillé en annexe G.

$$J_m = D_{ws} \cdot \text{grad}(X) \quad (5.6)$$

$$D_{ws}(X) = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{X_l}\right)^2 \cdot 1000 \left(\left(\frac{X}{X_l}\right)^{-1}\right) \quad (5.7)$$

avec  $D_{ws}$  le coefficient de migration liquide ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) et  $X_l$  la saturation en eau libre.

#### Conditions aux limites

Dans le cas de l'imbibition, le CV en contact avec l'eau est supposé toujours saturé en eau libre. Cependant, le logiciel WUFI pro ne permet pas de maintenir une saturation complète permanente. Pour limiter la perte d'eau dans ce CV, la face en contact avec le milieu extérieur a été paramétrée en reprenant les conditions adoptées par Kordziel et *al.* (2020). L'humidité relative a donc été maintenue à 100 % tout en indiquant une période d'intempérie continue via l'établissant d'une pluviométrie de  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . À l'autre extrémité, une ambiance intérieure a été renseignée suivant les conditions moyenne de température ( $T=21 \text{ °C}$ ) et d'humidité relative ( $\text{HR}=52 \text{ %}$ ). L'ensemble des conditions limites est détaillé en annexes H, I et J.

### 5.2.2 Configurations étudiées

Les résultats des prédictions issus des configurations utilisées ont été confrontées avec les données expérimentales présentées dans les chapitres 2 (imbibition) et 4 (solicitations thermiques dynamiques). L'analyse numérique des résultats a été menée en deux temps. Dans un premier temps, les simulations ont été effectuées dans leur version standard avec des



données d'entrées issues soit de la littérature, soit mesurées sur les échantillons. Dans un second temps, des modifications sur les données d'entrées ont été apportées pour étudier l'impact de la perméabilité liquide, de la masse volumique hétérogène ou de l'hydro-activation de la diffusion de vapeur sur les prédictions des profils d'humidité. Ces variantes ont pour objet de faire ressortir les données d'entrées pertinentes permettant d'approcher les cinétiques d'humidité expérimentales.

**Configurations et propriétés utilisées pour les simulations d'imbibition :**

Dans le cas de l'imbibition, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau renseigné est identique pour l'ensemble des configurations. Sa valeur provient de Zohoun (1998) avec une valeur de 5 suivant la direction longitudinale. Les configurations 1 et 2a utilisent respectivement WUFI pro (Künzel, 1995) et TransPore (Perré and Turner, 1999) dans leur version standard où le matériau est considéré homogène. Pour WUFI pro, le coefficient d'absorption  $A$  (équation (5.7)) a été obtenue expérimentalement (Annexe G). Comme cela a été montré dans le chapitre 2, la variation de la masse volumique dans un accroissement annuel peut varier d'un facteur trois à quatre entre le BI et le BF. En raison de cette variation, presque toutes les propriétés de transfert vont varier (humidité à saturation intégrale, pression capillaire, coefficient de diffusion, perméabilité gazeuse et liquide, etc.). C'est pourquoi cette variation de masse volumique devrait être prise en compte. Ainsi, l'imbibition propre du BI (3a) et du BF (4a) a ensuite été étudiée avec le code TransPore en l'alimentant avec les propriétés spécifiques de chacune des zones. La pression capillaire et la perméabilité liquide ont été exprimées en fonction de la masse volumique d'après la formulation proposée par Perré and Turner (2001a). Pour les configurations 2 à 4 utilisant le modèle TransPore, une adaptation de la perméabilité liquide a été effectuée dans ce travail pour approcher le comportement moyen observé. Elle a été nommée avec un indice  $b$  en lien avec la configuration initiale référencée avec l'indice  $a$ .

*Tableau 5.1- Configurations utilisées dans le cas des simulations d'imbibition suivant la direction longitudinale*

N°	Modèle	$\rho_0$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\mu$	Pc (Pa)	$k_l^L$ (m <sup>2</sup> ) ou $D_{ws}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	$k_g^L$ (m <sup>2</sup> )
1	WUFI pro	415	5	-	Annexe H	-
2a	TransPore	415	5	(5.2)	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
2b	TransPore	415	5	(5.2)	$2,0 \cdot 10^{-17}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
3a	TransPore	300	5	(5.3)	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
3b	TransPore	300	5	(5.3)	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
4a	TransPore	900	5	(5.3)	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$
4b	TransPore	900	5	(5.3)	$3,0 \cdot 10^{-17}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$

**Configurations et propriétés utilisées dans le cas de transfert d'humidité suite à des sollicitations thermiques :**

De manière analogue à l'imbibition, les configurations I et II ont été effectuées avec le logiciel WUFI pro et le code TransPore dans leur version standard. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  dans la direction radiale est issue de Perré et *al.* (2015) avec une valeur de 70. Ensuite, l'hygro-activation de la diffusion a été ajoutée pour les configurations III et IV avec une expression de  $\mu$  en fonction de l'humidité relative d'après l'expression de Zhang et *al.* (2016). Enfin, la configuration V intègre la prise en compte du profil de masse volumique hétérogène afin d'étudier son influence sur les profils d'humidité. Les valeurs de perméabilité liquide et gazeuse sont issues de Perré and Turner (1999) pour les simulations effectuées avec le modèle TransPore. En ce qui concerne les simulations avec le modèle WUFI pro, le détail des données d'entrées est visible en annexe I).

*Tableau 5.2- Configurations utilisées dans le cas de sollicitations thermiques suivant la direction radiale*

N°	Modèle	$\rho_0$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\mu$	Pc (Pa)	$k_l^R$ (m <sup>2</sup> ) ou $D_{ws}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	$k_g^R$ (m <sup>2</sup> )
I	TransPore	415	70	(5.2)	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-16}$
II	WUFI pro	415	70	-	Annexe I	-
III	TransPore	415	$\mu(\text{RH})$	(5.2)	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-16}$
IV	WUFI pro	415	$\mu(\text{RH})$	-	Annexe J	-
V	TransPore	$\rho(z)$	$\mu(\text{RH})$	(5.2)	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-16}$

## 5.3 Résultats et discussion

### 5.3.1 Reprise d'humidité dans le cas de l'imbibition suivant la direction longitudinale

Les cinétiques de migration de l'humidité sont représentées suivant la racine carrée du temps pour mettre en évidence les phénomènes physiques de transfert massique aux temps courts et aux temps longs où respectivement la migration capillaire et la migration d'eau par diffusion (eau liée et vapeur d'eau) prédominent. La Figure 5.3 présente les résultats des configurations en teneur en eau (Figure 5.3a) et en saturation (Figure 5.3b).

La configuration 1 – utilisant le modèle WUFI pro – donne une cinétique de reprise d'humidité proche de celle mesurée expérimentalement excepté aux temps courts. En revanche, la configuration 2a – utilisant le modèle TransPore dans sa configuration standard – ne permet pas de reproduire la cinétique expérimentale d'imbibition. En effet, la migration capillaire prédite s'effectue de manière beaucoup trop intense avec une teneur en atteignant la saturation complète de l'échantillon en moins de 1 minutes. La valeur utilisée pour la perméabilité a été déterminée lors d'expériences effectuées en régime permanent (Siau, 1984; Perré and Karimi, 2002; Perré, 2007b) où la différence de pression était contrôlée et le flux

traversant l'échantillon était mesurée. Dans ce type d'expérience, une seule phase (liquide ou gazeuse) est présente dans le milieu poreux. Ces valeurs ont été utilisées avec succès dans des configurations de séchage où la migration liquide suit un chemin continu depuis le cœur du milieu étudié jusqu'à sa périphérie. Lors de l'imbibition, le flux liquide évoluant à travers le bois massif est fortement perturbé par les forces capillaires induites par les poches d'air emprisonnées dans le milieu poreux. Afin de reproduire l'évolution de l'humidité moyenne observée expérimentalement, il a été nécessaire de diminuer la perméabilité liquide d'un facteur  $10^5$  tel qu'illustré avec la configuration 2b. Cet ajustement de la perméabilité liquide avec le modèle TransPore a conduit à une prédiction proche de celle obtenue avec le modèle WUFI pro. Dans les deux cas, malgré une prédiction relativement proche des données mesurées, les modèles n'ont pas été en mesure de reproduire une cinétique de reprise d'humidité proche des valeurs expérimentales à la fois aux temps courts et aux temps longs mais pour des raisons différentes. En effet, avec le modèle WUFI pro, le coefficient de migration liquide (équation (5.7)) a été déterminé à partir de l'absorptivité  $A$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ) lors d'une expérience d'imbibition (Annexe G). Son potentiel prédictif pour la migration liquide reste toutefois limité puisque cette formulation ne peut pas prendre en compte l'effet de la pression de gaz sur la migration liquide. Cet effet peut être considéré négligeable pour cet essai à basse température et selon la direction longitudinale, très perméable au gaz mais ce n'est cependant pas toujours le cas (direction R ou T par exemple). Par ailleurs, lorsque l'humidité est exprimée sous forme de taux de saturation (Figure 5.5b), la courbe simulée avec le modèle WUFI pro approche 50 % à la fin de l'essai alors qu'il est de 40 % pour les valeurs obtenues par imagerie aux rayons X. Cette différence est liée aux données d'entrées dans le logiciel WUFI pro au niveau de la courbe « Moisture Storage Function » où il n'a pas été possible de renseigner une teneur en eau maximum théorique supérieure à 125 %. Selon l'expression (2.9), elle devrait être de 205 % pour un échantillon avec une masse volumique de  $415 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , valeur entrée dans le code TransPore. Du fait de cette limitation, l'étude de la capacité prédictive des cinétiques d'humidité dans le BI et BF a été effectuée seulement avec le modèle TransPore.

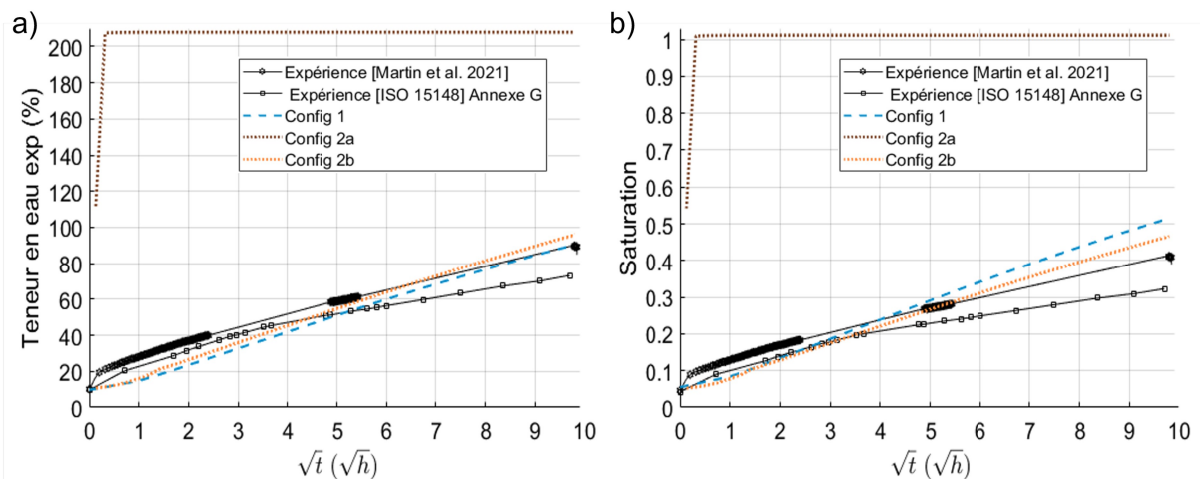


Figure 5.3- Cinétique de reprise d'humidité moyenne d'imbibition suivant la direction longitudinale exprimée en teneur en eau (a) et en saturation (b) avec les configurations détaillées dans le Tableau 5.1

La Figure 5.4 présente l'évolution de la saturation en eau en fonction de la racine carrée du temps pour les régions d'intérêts situées dans le BI (Figure 5.4a) et dans le BF (Figure 5.4b). Les prédictions obtenues avec les configurations 4a et 5a ont été effectuées avec une pression capillaire et des valeurs de perméabilité fonction de la masse volumique correspondant au BI et au BF. Comme pour la configuration avec une masse volumique moyenne (n°2a), les cinétiques d'imbibition prédites pour le BI et BF ont été trop rapides et il a de nouveau été nécessaire de réduire d'un facteur  $10^5$  la perméabilité liquide par rapport à la valeur initiale.

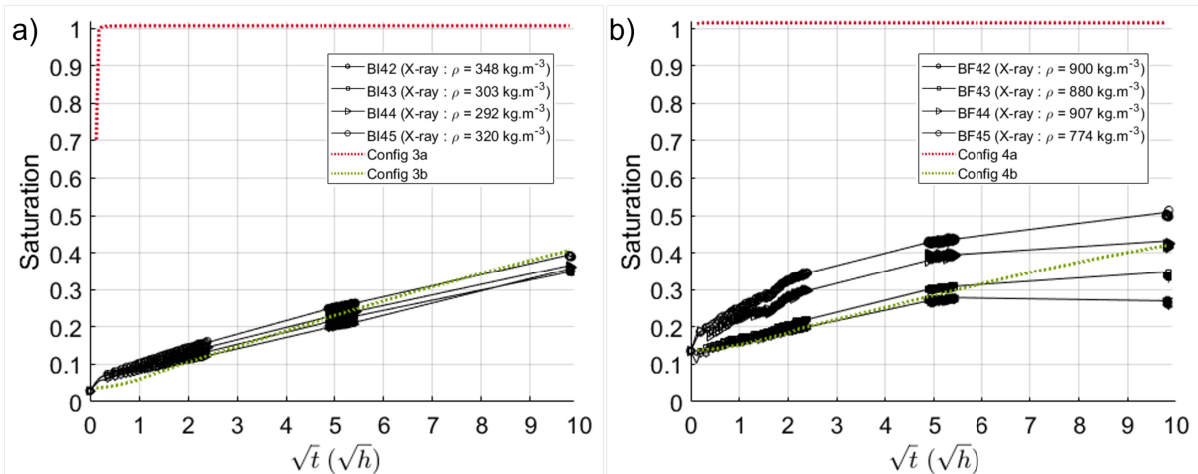


Figure 5.4- Cinétique de reprise d'humidité en imbibition suivant la direction longitudinale dans le bois initial (a) et le bois final (b). Le détail des configurations est visible dans le Tableau 5.1

Afin d'éclaircir sur les raisons pouvant expliquer les difficultés du modèle TransPore à prédire les cinétiques d'humidités, une comparaison entre les prédictions avec la configuration n°2b et les données expérimentales obtenues lors de l'expérience d'imbibition utilisant l'imagerie 2D aux rayons X a été effectuée. La Figure 5.5a présente l'évolution de la teneur en eau pour certaines régions d'intérêts (ROI) positionnées à différentes hauteurs dans l'échantillon tel qu'illustrée sur la Figure 5.5b. Les courbes en pointillées correspondent aux simulations pour les ROI de mêmes couleurs et celles continues les valeurs mesurées. Malgré une évolution de la teneur en eau moyenne simulée proche des valeurs expérimentales (courbes noires), des écarts importants sont présents pour les régions d'intérêts. En effet, au niveau de la ROI #4 située à 1,8 mm de la zone de contact (Figure 5.5a - courbe orange), le modèle n'est pas en mesure de capturer la reprise d'humidité aux premiers instants. La teneur en eau augmente lentement jusqu'au point de saturation des fibres puis passée ce point, une augmentation quasi instantanée a lieu jusqu'à saturation complète du CV. Cette cinétique est similaire pour les autres CV situés à des distances plus éloignées de la zone de contact avec un décalage dans le temps.

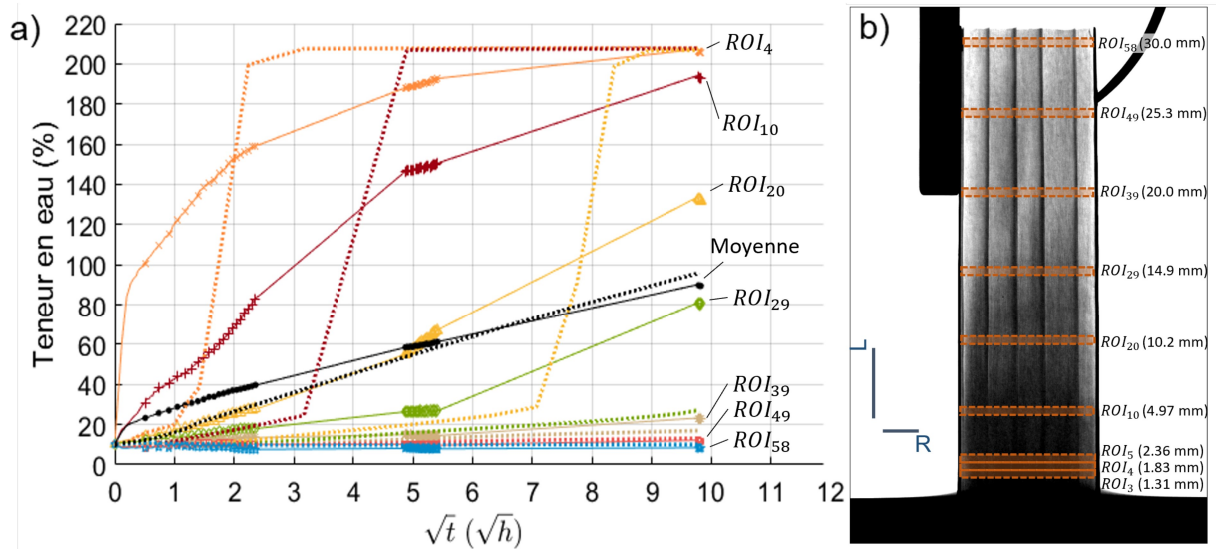


Figure 5.5- a) Évolution des cinétiques d'humidité simulées et expérimentales par ROI au cours de l'essai d'imbibition suivant la direction longitudinale, b) Position des ROI le long de la hauteur de l'échantillon

Ces résultats montrent les difficultés d'approcher la dynamique d'évolution du champ d'humidité dans le bois massif lors de l'imbibition par un modèle numérique utilisant une formulation macroscopique. La cinétique moyenne de l'imbibition peut être approchée par ce type de modèle numérique en réduisant fortement la perméabilité liquide et donc le flux d'eau liquide au sein du matériau. Cependant, la distribution réelle d'humidité ne peut pas être reproduite précisément.

Les simulations effectuées au sein du BI et BF indiquent que la prise en compte d'une masse volumique hétérogène n'est pas suffisante pour reproduire les cinétiques expérimentales. Comme cela a été présenté dans le chapitre 3, l'invasion capillaire de l'eau dans le bois suivant la direction longitudinale est complexe avec le rôle joué par les rayons ligneux dans la redistribution de l'humidité au cours de l'imbibition. Il en résulte une saturation incomplète des trachéides avec la présence de poches d'air. Ces éléments restent inaccessibles à la modélisation utilisée dans ce travail pour les modèles WUFI pro et TransPore en 1D.

### 5.3.2 Cinétique d'évolution temporelle d'humidité d'un échantillon exposé à des sollicitations thermiques dynamiques

#### 5.3.2.1 Conditions non-isothermes constante (phase 1)

##### 5.3.2.1.1 Simulations avec une masse volumique homogène

L'étude des transferts d'humidité a été effectuée au sein d'un échantillon recouvert sur l'ensemble de ses faces par un revêtement imperméable, en partant d'une température homogène de 25 °C et un profil d'humidité homogène (plat) de 17,5 %. Les conditions limites

ont ensuite été modifiées pour se placer dans des conditions non-isothermes avec l'application de températures différentes aux extrémités de l'échantillon. Cette différence de 20 °C a généré un gradient de température suivant la hauteur l'échantillon engendrant dans le même temps un gradient de pression partielle de vapeur d'eau. L'eau contenue dans l'échantillon ne pouvant s'évacuer, la diffusion d'humidité a conduit à une augmentation de la teneur en eau du côté de la zone froide et une diminution du côté de la zone chaude. Cette redistribution tend vers un nouvel équilibre thermodynamique.

Les simulations ont été effectuées avec les modèles TransPore (Figure 5.6a) et WUFI pro (Figure 5.6b) suivant les configurations I et II détaillées dans le Tableau 5.2. Les résultats des simulations sont comparés avec des données expérimentales issus du chapitre 4. Les deux modèles prédisent des cinétiques similaires avec une augmentation de la teneur en eau au voisinage de la plaque froide (15 °C) suivie d'une diminution linéaire de la teneur en eau jusqu'à l'autre extrémité avec une température de 35 °C. Cependant, la diffusion d'humidité simulée ne semble pas être assez intense pour redistribuer l'humidité au sein de l'échantillon comme cela a été observé expérimentalement. En effet, le facteur de résistance à la diffusion  $\mu$  de 70 – utilisé pour ces simulations – est trop élevé. Cela conduit à niveler l'écart d'humidité entre le côté chaud et le côté froid du matériau. En conséquence, l'humidité simulée du côté froid a atteint le point de saturation (PSF) à la fin de l'expérience. Négliger l'hydro-activation de la diffusion – dépendance de  $\mu$  avec l'humidité – semble donc être une simplification trop forte.

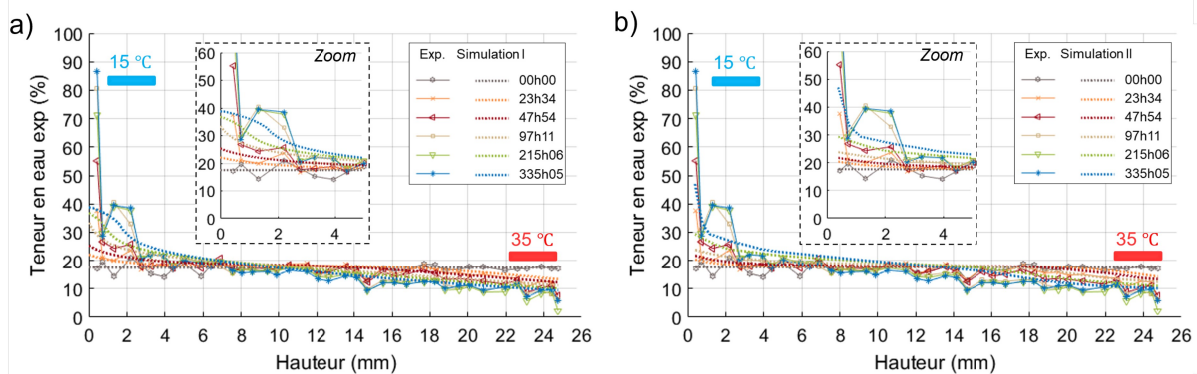


Figure 5.6- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore (a) et WUFI pro (b) suivant les configurations détaillées dans le Tableau 5.2

C'est pourquoi, de nouvelles simulations ont été effectuées en tenant compte de cet effet à l'aide de l'expression proposée par Zhang et al. (2016). La Figure 5.7 présente l'évolution des profils de teneur en eau ainsi obtenues. Les simulations ont été effectuées avec les paramètres détaillés dans le Tableau 5.2. Les résultats indiquent que la prise en compte de l'hydro-activation a pour effet une diffusion de vapeur d'eau plus intense au sein de l'échantillon amenant une teneur en eau plus élevée du côté de la plaque froide (T=15 °C). Cela est plus fortement visible avec le modèle WUFI pro qu'avec le modèle TransPore (Figure 5.7b). En

effet, la teneur en eau du premier CV a atteint une humidité de 90 % avec WUFI pro et 55 % avec le modèle TransPore (Figure 5.7a). Cet écart est dû à la différence de formulation entre les deux modèles au niveau de la migration liquide (force motrice et seuil différents d'apparition de la migration liquide). Une redistribution de l'humidité sur les volumes de contrôles adjacents semble être plus importante avec le modèle TransPore ce qui peut contribuer à limiter une humidité élevée sur les premiers CV. Néanmoins, les prédictions des deux modèles restent relativement éloignées des données expérimentales. Le renseignement d'une masse volumique moyenne semble être une approche trop éloignée de l'hétérogénéité réelle intra-cerne de l'épicéa. Son influence sur les profils d'humidité peut être explorée en vue d'améliorer la capacité prédictive du modèle.

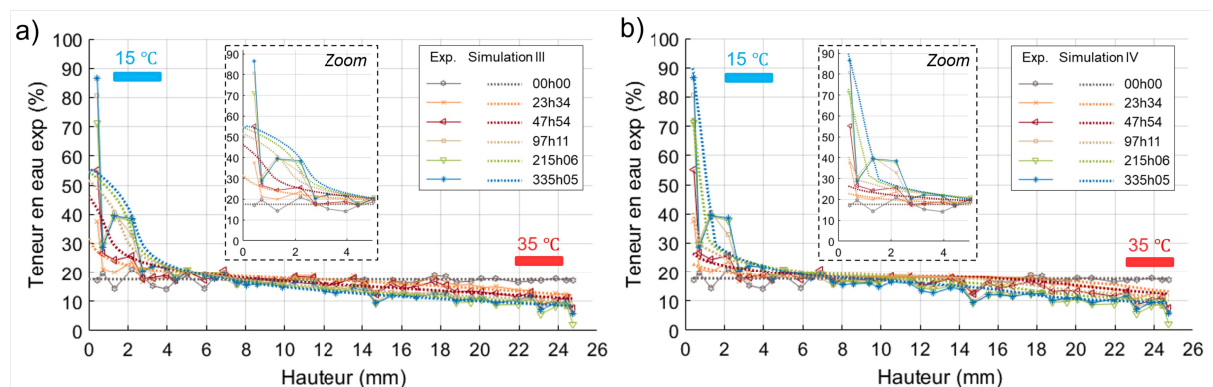


Figure 5.7- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore (a) et WUFI pro (b) suivant les configurations détaillées dans le Tableau 5.2

### 5.3.2.1.2 Simulations avec une masse volumique hétérogène

À chaque maille (CV), une masse volumique a été affectée à partir du profil issu des données expérimentales du chapitre 2. Cette variation de masse volumique entre les CV change la capacité de stockage d'humidité propre à chaque CV. Cet effet et l'hydro-activation de la diffusion d'humidité ont été pris en compte avec, les autres propriétés utilisées dans le modèle sont restées indépendantes de la masse volumique comme dans la version standard du modèle TransPore. WUFI pro n'a pas été modifié avec une densité hétérogène du fait de la limitation du nombre total de CV qu'il est possible de renseigner. Les résultats sont visibles sur la Figure 5.8 avec le profil de la masse volumique – renseignée dans le modèle – représenté au-dessus de la figure des profils d'humidité. Avec cette configuration V, les profils de teneur en eau simulés ont permis d'approcher ceux obtenus expérimentalement (Figure 5.8) par rapport à la configuration IV (Figure 5.7a). Pour améliorer la capacité prédictive du modèle, il serait intéressant d'implémenter dans TransPore 1D la formulation issue de Perré and Turner (2001b) qui intègre l'impact de la masse volumique sur les perméabilités gazeuse et liquide, le coefficient de diffusion de vapeur d'eau, la pression capillaire ou encore la conductivité thermique. Ainsi, les flux aux interfaces des CV seraient fonctions de la masse volumique. Ce travail numérique n'a pas été exploré dans le cadre de cette thèse afin de rester avec un modèle proche de ceux

utilisés par les professionnels du bâtiment. Cette configuration V donnant néanmoins une meilleure prédiction, elle a donc été utilisée dans le cas des conditions non-isothermes dynamiques. Ce dernier scénario a pour but de s'approcher des conditions réelles rencontrées dans les parois extérieures des ouvrages en bois massif.

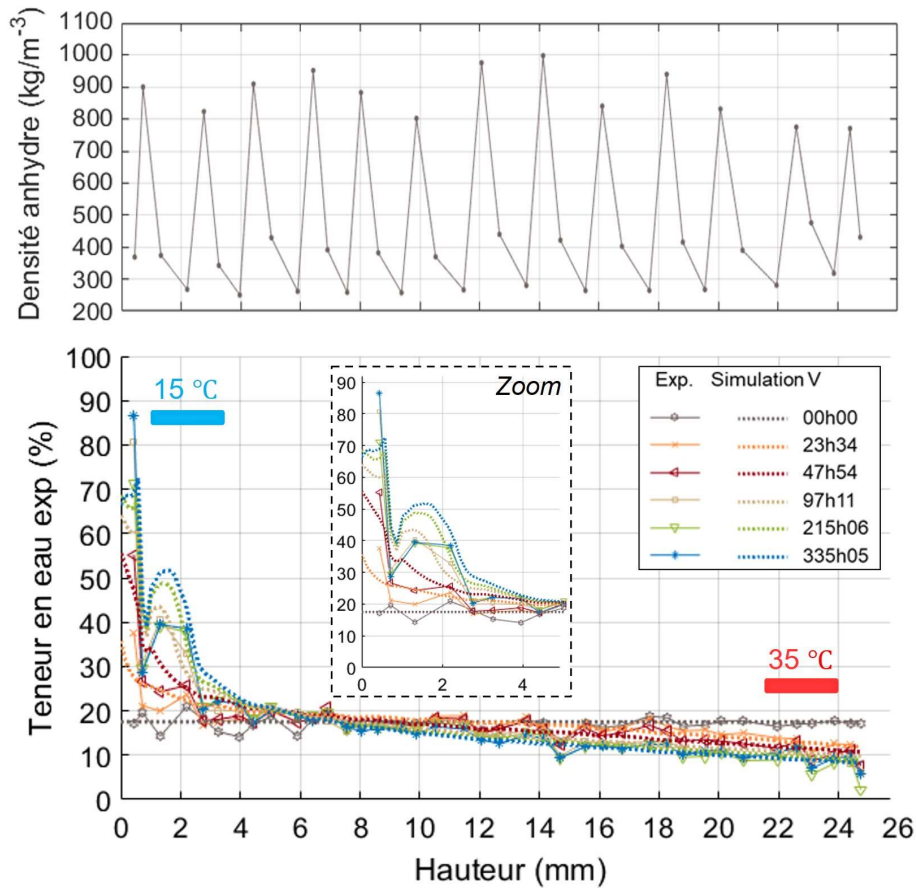


Figure 5.8- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore suivant la configuration V détaillée dans le Tableau 5.2

### 5.3.2.2 Conditions non-isothermes dynamique (phase 3)

L'analyse numérique des transferts d'humidité en conditions non-isothermes dynamiques au sein d'un échantillon d'épicéa a été réalisé à l'aide des mesures issues du chapitre 4 lors de la séquence de sollicitation n°3 (Figure 5.2). Les résultats de la simulation – effectuée avec la configuration V – sont visibles sur la Figure 5.9. Les tendances ont été correctement prédites avec le modèle où l'alternance des profils d'humidité a été reproduite en fonction des cycles. À noter que lors des demi-cycles 1.2 et 2.2, le modèle prédit des variations d'humidité réparties sur toute la hauteur de l'échantillon alors que les données expérimentales indiquent que seules les extrémités voient leur teneur en eau évoluer significativement. En conséquence, des teneurs en eau plus élevées ont été prédites à l'extrémité où la température est maintenue à 25 °C et inversement à l'autre extrémité de l'échantillon à 15 °C. Il est possible que les déperditions



thermiques latérales – mises en évidence dans le chapitre 4 – soient suffisantes pour induire une diffusion de vapeur d'eau latérale qui contribue à amplifier les variations d'humidité expérimentales au voisinage de  $T_2$  (alternance 15 et 35 °C) et minimiser du côté de  $T_1$  (25 °C constant). Ces effets de bords sont négligés par le modèle 1D, qui simule un transfert monodimensionnel d'humidité uniquement selon la hauteur de l'échantillon. Par ailleurs, le modèle utilise une fonction de sorption liant la teneur en eau à la pression partielle de vapeur ne tenant pas compte de l'hystérésis de sorption s'exprimant en conditions cycliques. Ces écarts entre les mesures et les simulations montrent les limites de la formulation en 1D utilisée dans ce travail.

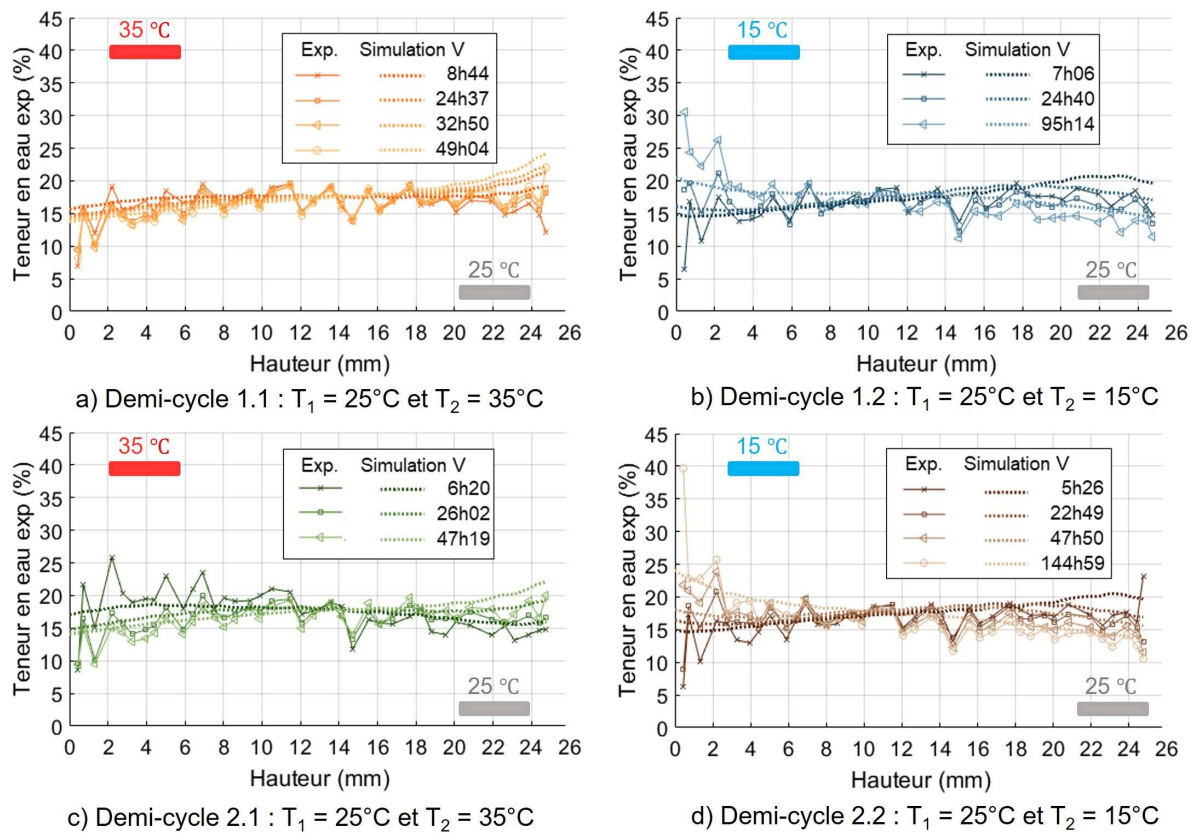


Figure 5.9- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore en condition dynamique avec la configuration V détaillée dans le Tableau 5.2

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, deux modèles simulant les transferts couplés chaleur-masse ont été utilisés et comparés aux données expérimentales issues des chapitres 2 et 4. La robustesse des modèles a donc été éprouvée dans deux configurations contrastées ; l'une avec une invasion capillaire d'eau dans le bois en condition isotherme, l'autre en suivant l'évolution du champ d'humidité

en conditions non-isothermes dynamiques. Les résultats des simulations 1D effectuées pour l'épicéa peuvent être résumés comme suit :

Dans le cas d'une mise en contact avec de l'eau liquide (imbibition) :

- Difficulté des modèles à reproduire des cinétiques de reprise d'humidité sur les temps courts et longs avec les valeurs de paramètres issues de la littérature,
- La diminution de la perméabilité liquide permet de reproduire les cinétiques d'imbibition moyenne mesurées. En revanche, l'évolution de la distribution de l'humidité dans l'échantillon n'est cependant pas correctement prédite.

Dans le cas de sollicitations thermique dynamiques :

- Prédiction des profils de teneur en eau améliorée avec l'utilisation d'un facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$  fonction de l'humidité relative,
- Une partie de la redistribution de l'eau liquide coté froid semble échapper au modèle WUFI pro, alors que TransPore arrive à le prédire,
- Sur les temps longs (plusieurs semaines), le renseignement d'une masse volumique hétérogène tenant compte des capacités de stockage différentielles entre le bois initial et le bois final a permis d'améliorer les prédictions,
- En conditions non-isothermes dynamique (inférieur à une semaine), la prédiction des profils de teneur en eau est proche des tendances mesurées. Cependant, la limite de la modélisation 1D a été mise en évidence par les effets de bords présent lors des expérimentations générant des transferts 2D. En outre, la prise en compte dans les modèles des effets de l'histoire des variations d'humidité et de la température sur l'humidité d'équilibre est nécessaire pour améliorer leurs prédictions.

Ces deux types d'essais sont très exigeants pour tester la robustesse d'un modèle de transferts couplés chaleur-masse. Dans les deux cas de figures étudiés, il a été possible d'approcher les cinétiques de transfert d'humidité moyennant une adaptation des données d'entrées des modèles. Le cheminement complexe de l'eau libre lors de ce type d'essai échappe à la modélisation macroscopique 1D et nécessiterait par exemple une modélisation discrète basée sur la morphologie réelle du milieu poreux comme cela a été réalisé par Frank et *al.* (2009). Cependant, dans le contexte de la construction, ce type de modèle n'est pas utilisé. La cinétique moyenne d'imbibition peut néanmoins être approchée par les modèles avec une formulation macroscopique sur des temps d'observation de la semaine, durée qui apparaît suffisante par exemple pour simuler l'humidification du bois liée à la stagnation d'eau de pluie en phase chantier. Ces mêmes modèles permettent de simuler les transferts (diffusion et redistribution eau libre) en conditions non-isothermes stationnaire, correspondant à une configuration hivernale au sein d'une paroi. Des écarts restent présents comme observés au niveau des champs d'humidité prédits/mesurés dans des conditions thermiques dynamiques,

caractéristiques de l'intersaison. Améliorer la capacité prédictive des modèles sur cette période est un enjeu important. L'implémentation dans les modèles d'une masse volumique hétérogène (TransPore) et de l'hydro-activation de la diffusion d'humidité (WUFI pro et TransPore) ont montrées qu'il était possible améliorer relativement facilement les prédictions. Pour aller plus loin, le développement de modèle 2D hétérogène intégrant les propriétés de transfert fonction de la masse volumique, de l'humidité et de la température nécessite des améliorations. Ils pourront intégrer les contributions futures de l'analyse de ces données expérimentales avec des modèles basés sur une formulation discrète des transferts comme évoqué précédemment.

## Annexe G : Détermination du coefficient d'absorption selon une méthode inspirée de la norme EN ISO 15148

La mesure du coefficient d'absorption d'eau a été effectuée en s'inspirant de la norme NF EN ISO 15148 (2003) suivant les directions longitudinale et radiale. La position et les dimensions des échantillons d'épicéa utilisés sont résumées dans le Tableau 5.3 :

Tableau 5.3- Dimensions des échantillons et position suivant la direction radiale

Référence	Dimensions (mm)			Numéro de cerne (à partir de la moelle)
	Longueur (*)	Largeur (*)	Épaisseur (**)	
Épicéa - L	30,37 (L)	30,14 (R)	20,38 (T)	24-31
Épicéa - R	29,90 (R)	29,93 (T)	20,22 (L)	43-55

\* Direction d'imbibition : longitudinale (L), radiale (R)

\*\* Direction perpendiculaire à la direction d'imbibition : longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)

Les surfaces parallèles à la direction d'absorption d'eau ont été recouvertes d'une double couche régulière d'un revêtement imperméable (Rubson, Liquid rubber plus), afin d'imposer un flux d'humidité unidirectionnel pendant l'imbibition. Ces surfaces avaient été préalablement poncées avec du papier de verre P360 pour parfaire l'accroche. Une fois le revêtement sec, la surface de contact de l'échantillon a été rafraîchie manuellement à l'aide d'une lame de microtome. La préparation de l'échantillon et le relevé des pesées étaient réalisées dans une pièce régulée en température. Pendant l'essai, les conditions enregistrées ont indiqué une température moyenne de  $23,5^{\pm 1,3}$  °C et une humidité relative moyenne de  $40^{\pm 4}$  %. L'immersion partielle des échantillons dans de l'eau distillée – environ 5 mm de profondeur – a été réalisée en insérant un fil en cuivre permettant suspendre l'échantillon en laissant libre la surface de contact (Figure 5.10).

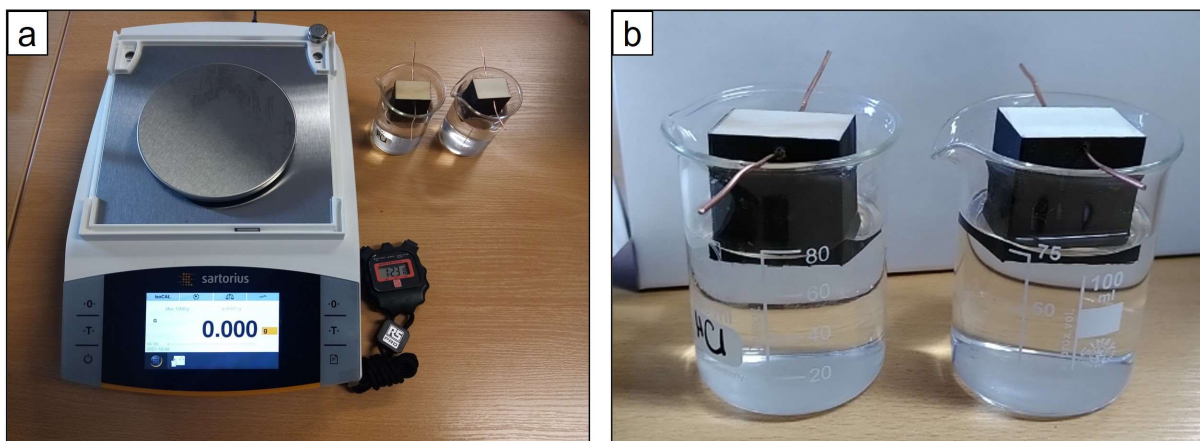


Figure 5.10- a) Équipement utilisé pour la mesure des pesées régulière et b) Principe de positionnement de mise en contact des échantillons avec de l'eau distillée

L'évolution de la reprise de masse (après avoir essuyé avec une éponge humidifiée la surface de contact) par unité de surface de chaque échantillon en fonction de la racine carrée du temps

est visible sur la Figure 5.11. Le coefficient d'absorption  $A$  d'humidité correspond à la pente de la droite déterminée en début d'essai. La différence des cinétiques d'humidité entre les directions longitudinale et radiale est bien visible comme attendue. Les valeurs d'absorption renseignées dans le modèle WUFI pro sont de  $0,0183 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$  pour la direction longitudinale et  $0,0044 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$  pour la direction radiale. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Zillig (2009) suivant la direction longitudinale et Kordziel (2018); Lepage (2012) suivant la direction radiale.

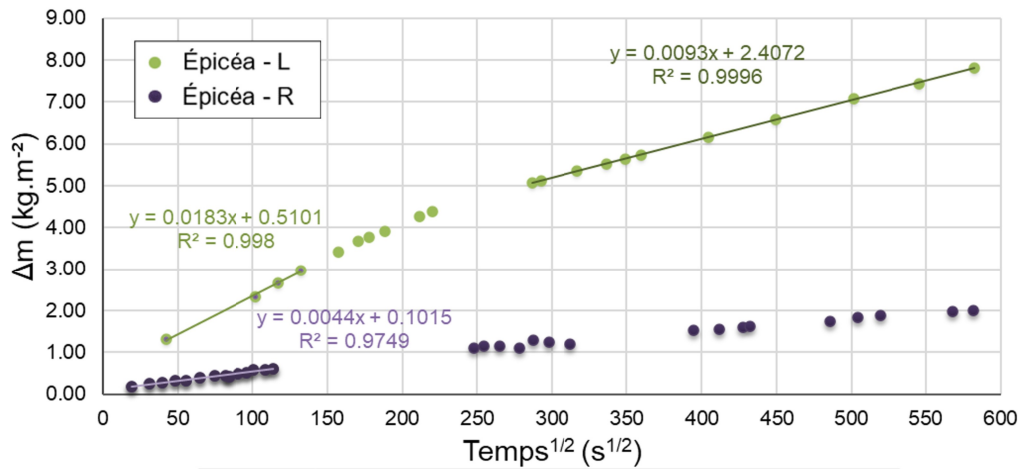
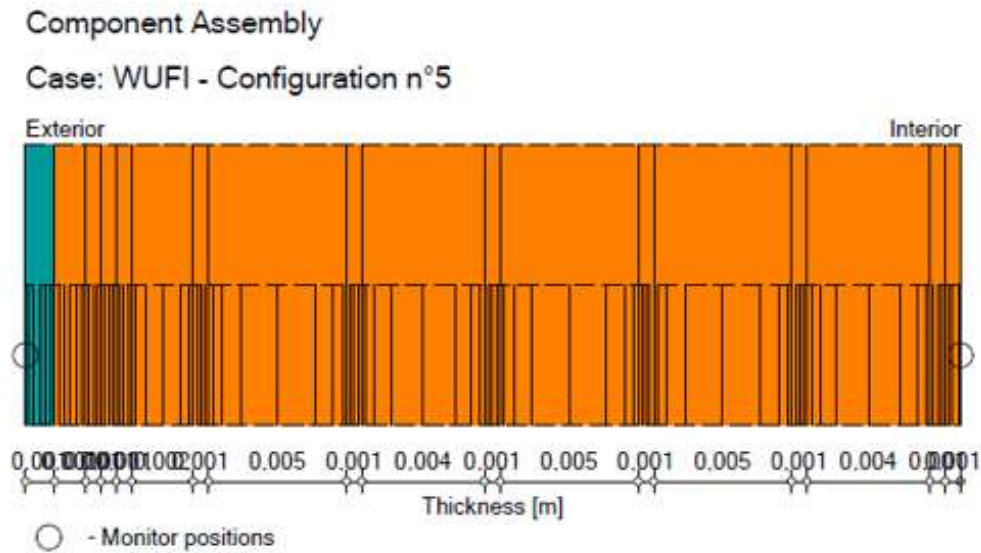




















Figure 5.11- Évolution de la reprise de masse fonction de la racine carrée du temps dans le cas de l'imbibition pour les échantillons d'épicéa suivant la direction longitudinale (L) et radiale(R)

## Annexe H : Données d'entrée et de sortie de la configuration n°5 – WUFI pro

### H.1 Disposition des volumes de contrôle



Materials:

	- *Spruce, longitudinal - full saturated	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.002 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.005 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.004 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.005 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.005 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.004 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m
	- *Spruce, longitudinal - 415kg/m3	0.001 m

Total Thickness: 0.032 m

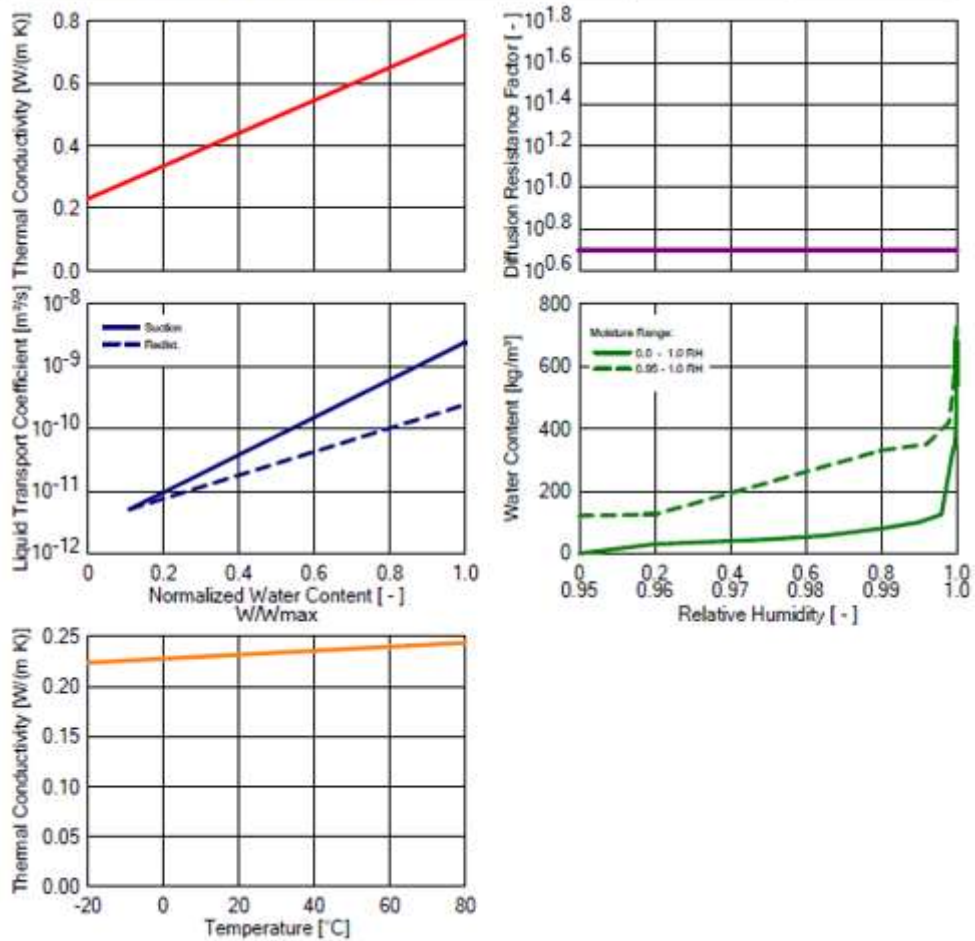
R-Value: 0.11 (m<sup>2</sup> K)/W

U-Value: 4.253 W/(m<sup>2</sup> K)

## H.2 Propriétés de l'épicéa

Material: \*Spruce, longitudinal - 415kg/m3

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m <sup>3</sup> ]	415
Porosity	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.73
Specific Heat Capacity, Dry	[J/(kg K)]	1400
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/(m K)]	0.23
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[ - ]	5
Reference Water Content	[kg/m <sup>3</sup> ]	80
Free Water Saturation	[kg/m <sup>3</sup> ]	728
Water Absorption Coefficient	[kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )]	0.0183
Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement	[%/M.-%]	1.3
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



### H.3 Conditions limites

#### Boundary Conditions

##### Exterior (Left Side)

Location: CDL\_face\_wet.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C  
 Orientation / Inclination: North / 0 °

##### Interior (Right Side)

Location: CDL\_face\_air\_IMB\_L.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C

#### Surface Transfer Coefficients

##### Exterior (Left Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance - includes long-wave radiation		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0 yes
sd-Value	No coating	[m]	----
Short-Wave Radiation Absorptivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Long-Wave Radiation Emissivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Adhering Fraction of Rain	Depending on inclination c	[ - ]	1.0
Explicit Radiation Balance			no

##### Interior (Right Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.125
sd-Value	No coating	[m]	----



## H.4 Résultats globaux

### Results from Last Calculation

#### Status of Calculation

Calculation: Time and Date	05/10/2021 10:22:20
Computing Time	0 min,1 sec.
Begin / End of calculation	01/01/2021 / 05/01/2021
No. of Convergence Failures	0

#### Check for numerical quality

Integral of fluxes, left side (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	10.72 0.35
Integral of fluxes, right side (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0.0 0.8
Balance 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	10.27
Balance 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	10.27

#### Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	1.96	12.23	1.96	12.23

#### Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

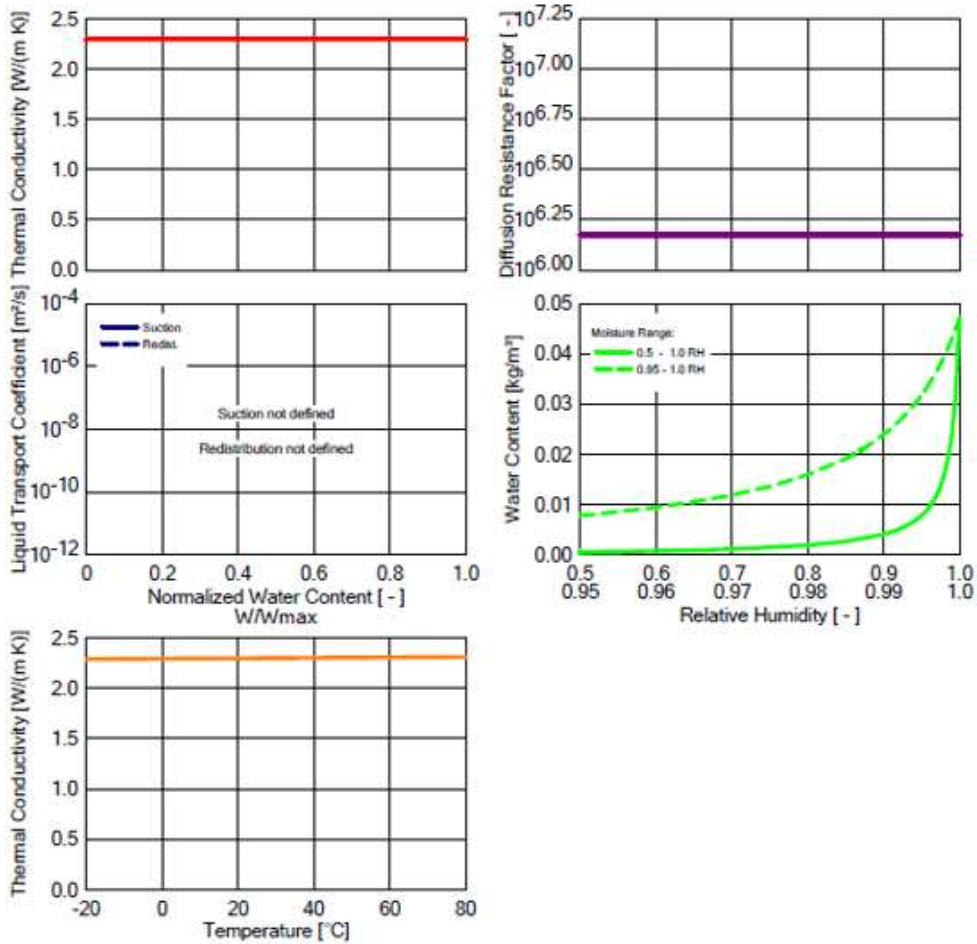
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
*Spruce, longitudinal - full saturated	728.00	724.98	687.77	728.00
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	718.32	40.00	718.32
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	712.82	40.00	712.82
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	708.97	40.00	708.97
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	704.98	40.00	704.98
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	694.23	40.00	694.23
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	682.48	40.00	682.48
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	653.16	40.00	653.16
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	616.01	40.00	616.01
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	561.93	40.00	561.93
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	479.64	40.00	479.64
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	246.79	40.00	246.79
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	97.04	40.00	97.04
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	79.15	40.00	79.15
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	64.41	40.00	64.41
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	54.93	40.00	54.93
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	48.23	40.00	48.23
*Spruce, longitudinal - 415kg/m3	40.00	46.81	40.00	46.81



## I.2 Propriétés de la couche de revêtement imperméable

Material: vapour barrier (sd=1500m)

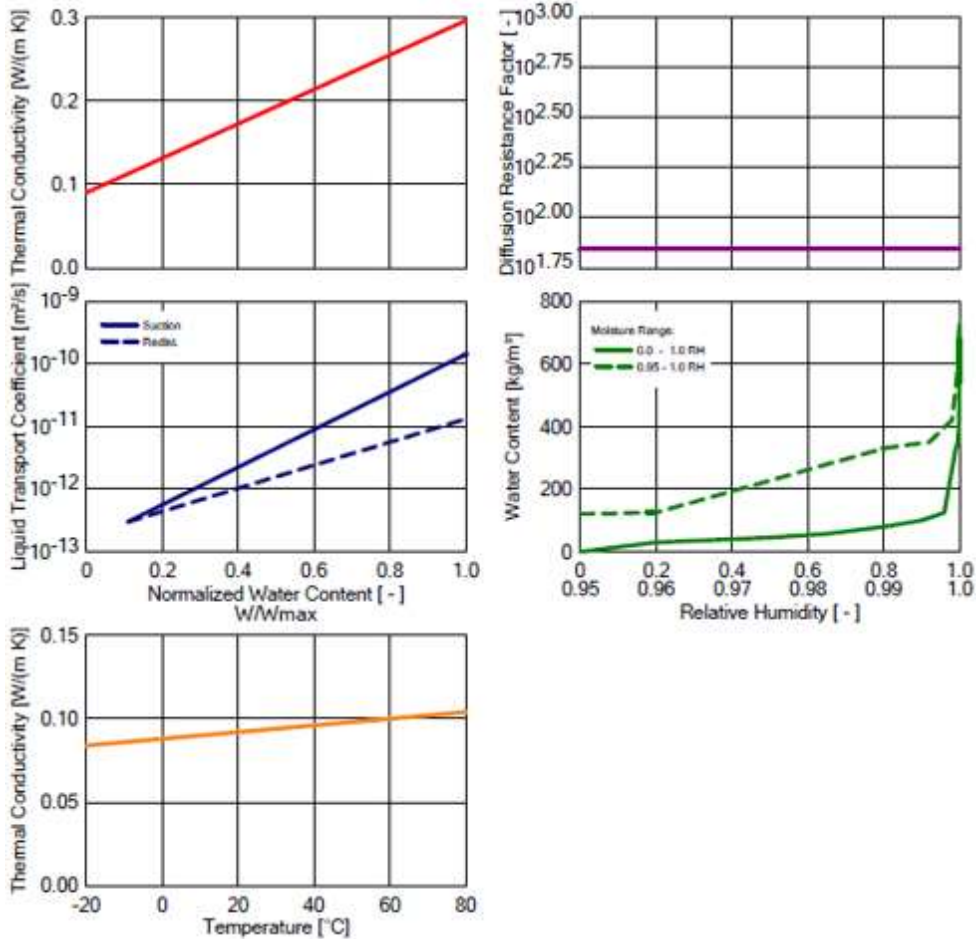
Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porosity	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Specific Heat Capacity, Dry	[J/(kg K)]	2300
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[ - ]	1500000
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



### I. 3 Propriétés de l'épicéa

Material: \*Spruce, radial - 415\_mu\_70

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m³]	415
Porosity	[m³/m³]	0.73
Specific Heat Capacity, Dry	[J/(kg K)]	1400
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/(m K)]	0.09
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	70
Reference Water Content	[kg/m³]	80
Free Water Saturation	[kg/m³]	728
Water Absorption Coefficient	[kg/(m² s <sup>0.5</sup> )]	0.0044
Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement	[%/M.-%]	1.3
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/(m K²)]	0.0002



## I.4 Conditions limites

### Boundary Conditions

#### Exterior (Left Side)

Location: CDL\_T2.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C  
 Orientation / Inclination: North / 90 °

#### Interior (Right Side)

Location: CDL\_T1.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C

### Surface Transfer Coefficients

#### Exterior (Left Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance - includes long-wave radiation		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0 yes
sd-Value	No coating	[m]	----
Short-Wave Radiation Absorptivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Long-Wave Radiation Emissivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Adhering Fraction of Rain		[ - ]	0
Explicit Radiation Balance			no

#### Interior (Right Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0
sd-Value	No coating	[m]	----

## I.5 Résultats globaux

### Results from Last Calculation

#### Status of Calculation

Calculation: Time and Date	05/10/2021 19:28:03
Computing Time	0 min, 10 sec.
Begin / End of calculation	01/01/2021 / 31/03/2021
No. of Convergence Failures	0

#### Check for numerical quality

Integral of fluxes, left side (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 -0,0
Integral of fluxes, right side (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 0,0
Balance 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,0
Balance 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,0

#### Water Content [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	1,81	1,81	1,81	1,81

#### Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
vapour barrier (sd=1500m)	0,00	0,00	0,00	0,00
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	66,62	195,13
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	67,52	137,84
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	68,36	122,09
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	69,14	118,52
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	69,83	115,07
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,67	70,48	111,69
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,66	71,35	106,71
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,64	72,31	100,52
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	73,61	73,06	96,95
*Spruce, radial - 415_mu_70 (Copy)	73,10	73,56	73,10	92,23
*Spruce, radial - 415_mu_70 (Copy)	73,10	73,42	73,10	83,26
*Spruce, radial - 415_mu_70 (Copy)	73,10	73,04	67,23	75,26
*Spruce, radial - 415_mu_70 (Copy)	73,10	72,66	53,84	73,80
*Spruce, radial - 415_mu_70 (Copy)	73,10	72,51	49,40	73,35
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,46	47,24	73,19
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,43	45,83	73,13
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,41	44,65	73,10
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	44,01	73,39
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	43,59	73,91
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	43,18	74,54
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	42,77	75,29

Water Content [kg/m³] (Continue)

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	42,37	76,19
*Spruce, radial - 415_mu_70	73,10	72,39	41,98	77,19
vapour barrier (sd=1500m)	0,00	0,00	0,00	0,00

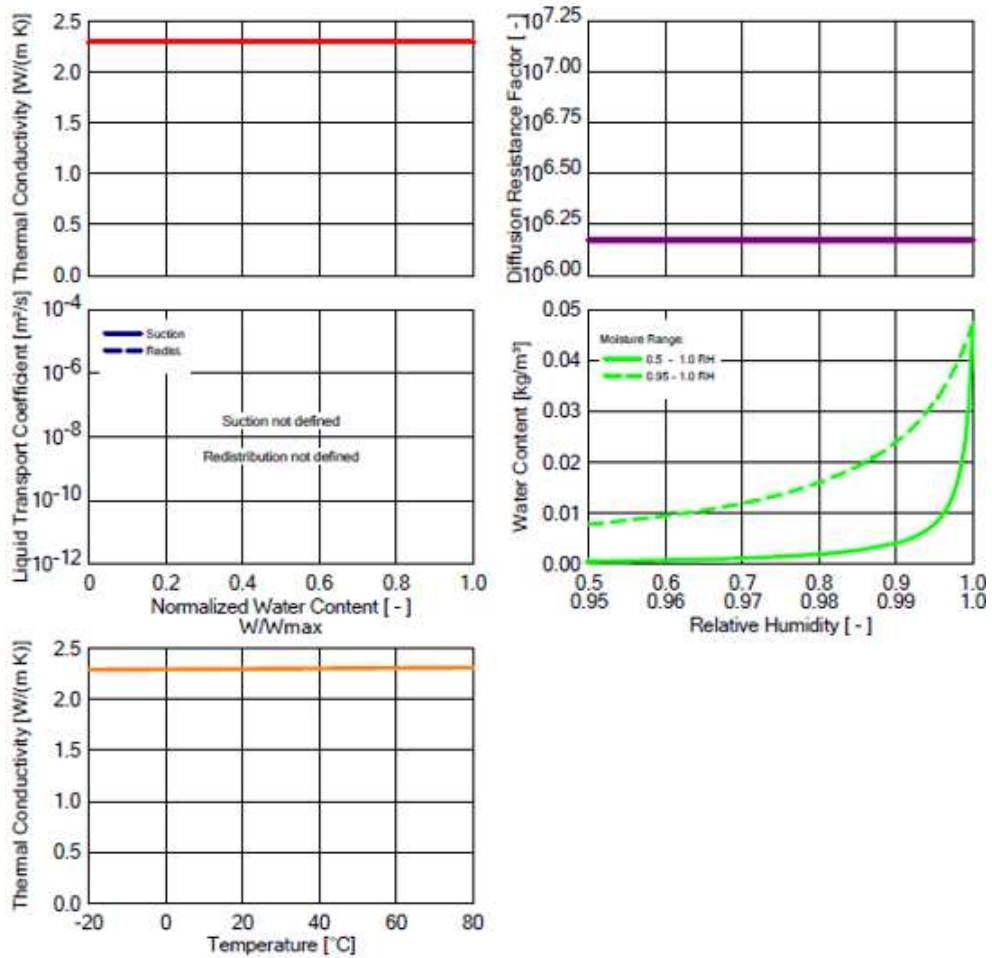




## J 2 Propriétés du revêtement imperméable

Material: vapour barrier (sd=1500m)

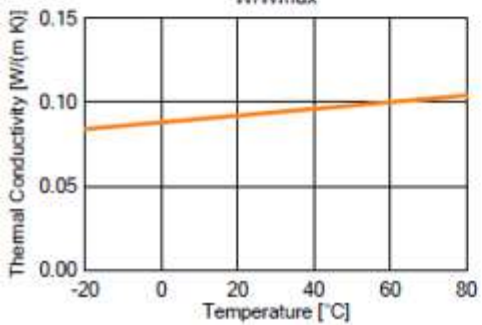
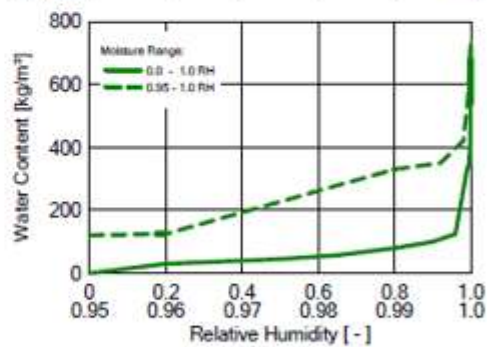
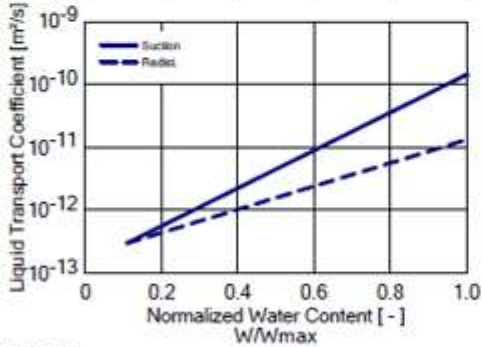
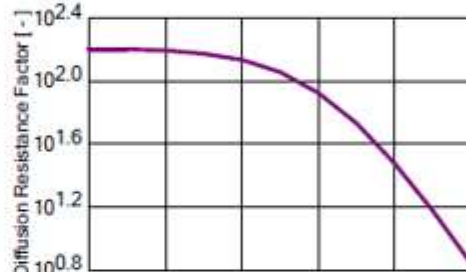
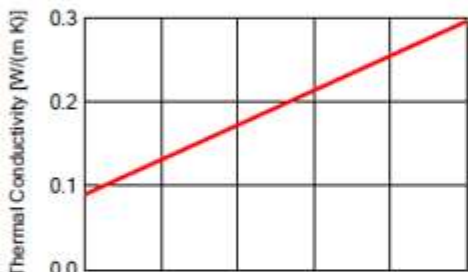
Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porosity	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Specific Heat Capacity, Dry	[J/(kg K)]	2300
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[ - ]	1500000
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



### J 3 Propriétés de l'épicéa

Material: \*Spruce, radial - 415\_mu(RH)

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m <sup>3</sup> ]	415
Porosity	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.73
Specific Heat Capacity, Dry	[J/(kg K)]	1400
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/(m K)]	0.09
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[ - ]	159
Reference Water Content	[kg/m <sup>3</sup> ]	80
Free Water Saturation	[kg/m <sup>3</sup> ]	728
Water Absorption Coefficient	[kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )]	0.0044
Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement	[%/M.-%]	1.3
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## J.4 Conditions limites

### Boundary Conditions

#### Exterior (Left Side)

Location: CDL\_T2.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C  
 Orientation / Inclination: North / 90 °

#### Interior (Right Side)

Location: CDL\_T1.wac  
 Temperature Shift: 0.0 °C

### Surface Transfer Coefficients

#### Exterior (Left Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance - includes long-wave radiation		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0 yes
sd-Value	No coating	[m]	----
Short-Wave Radiation Absorptivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Long-Wave Radiation Emissivity	No absorption/emission	[ - ]	----
Adhering Fraction of Rain		[ - ]	0
Explicit Radiation Balance			no

#### Interior (Right Side)

Name	Description	Unit	Value
Heat Resistance		[(m <sup>2</sup> K)/W]	0
sd-Value	No coating	[m]	----

## J.5 Résultats globaux

### Results from Last Calculation

#### Status of Calculation

Calculation: Time and Date	05/10/2021 19:51:53
Computing Time	1 min,24 sec.
Begin / End of calculation	01/01/2021 / 31/03/2021
No. of Convergence Failures	0

#### Check for numerical quality

Integral of fluxes, left side (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 -0,0
Integral of fluxes, right side (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 0,0
Balance 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,0
Balance 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,0

#### Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	1,58	1,58	1,58	1,58

#### Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
vapour barrier (sd=1500m)	0,00	0,00	0,00	0,01
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,92	58,14	373,00
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,92	59,11	290,41
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,93	60,04	197,43
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,93	60,93	132,79
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,94	61,78	121,45
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,94	62,58	118,05
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,95	63,71	113,21
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,96	65,09	107,06
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,97	66,33	101,11
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,98	67,97	95,71
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	72,99	69,17	91,65
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,02	59,07	78,17
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,06	47,61	77,52
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,08	43,90	79,40
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,09	42,80	80,50
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,09	42,17	81,38
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,10	41,34	82,84
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,11	40,72	84,20
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,11	40,32	85,28
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,12	39,92	86,53
*Spruce, radial - 415_mu(RH)	73,10	73,12	39,53	88,02

Water Content [kg/m³] (Continue)

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
*Spruce, radial - 415 _mu(RH)	73,10	73,13	39,14	89,60
*Spruce, radial - 415 _mu(RH)	73,10	73,13	38,76	91,26
vapour barrier (sd=1500m)	0,00	0,00	0,00	0,00



# Conclusions générales et perspectives

## Conclusions générales :

Ce travail de thèse s'est intéressé au suivi de la dynamique de migration d'humidité dans le bois massif afin de mieux appréhender les phénomènes mis en jeu, dans le but ultime d'améliorer la pérennité et la performance des ouvrages en bois grâce à des modèles numériques prédictifs. Le travail expérimental a été réalisé à l'échelle du matériau en développant des dispositifs originaux pour suivre la migration capillaire en imbibition et la diffusion d'humidité en conditions non-isothermes. L'exploitation des données expérimentales a ensuite fait l'objet d'une analyse numérique pour comprendre les écarts observés entre les mesures et les prédictions pour proposer des pistes d'améliorations des modèles.

Le premier travail expérimental a permis de suivre la reprise d'humidité lorsque le bois est en contact direct avec de l'eau liquide. Des mesures fiables des cinétiques de transfert d'humidité au sein de l'épicéa suivant les directions longitudinale et radiale ont été obtenues. Les résultats ont confirmé de manière quantitative les différences de propriété des transferts s'opérant suivant les directions principales du bois et au sein des cernes. L'invasion de l'eau dans le bois s'opère de trachéide en trachéide dans le bois final à travers les ponctuations aréolés ouverte au passage des fluides. En revanche, dans le bois initial, la migration de l'eau libre est plus complexe, avec deux constantes de temps : la première, aux temps courts, avec la migration de l'eau dans une fraction de lumens ouverts et la seconde – plus longue – avec un remplissage partiel et progressif de lumens d'autres cellules du bois initial, rarement de trachéides en trachéides et plus souvent par l'intermédiaire des rayons ligneux.

L'accès à la visualisation directe des lumens présenté dans le chapitre 3 confirme cette analyse avec une migration étagée s'opérant en premier lieu dans le bois final suivi d'une redistribution radiale dans le bois initial à travers les rayons ligneux. Cette description du chemin parcouru par l'eau s'explique par l'aspiration des ponctuations aréolés localisées dans le bois initial limitant la communication directe entre trachéides. Il en résulte une migration différentielle entre le bois final et initial engendrant la présence de poches d'air localisées dans les trachéides du bois initial entre deux hauteurs des cellules de rayons ligneux. L'analyse des images a montré que seule une partie des cellules des rayons ligneux participaient à l'écoulement de l'eau dans la direction radiale.

La confrontation des mesures avec les simulations issues des modèles WUFI pro et TransPore ont montré les limites de la formulation macroscopique des transferts couplés chaleur-masse dans les milieux poreux. Les données issues de la littérature n'ont pas permis de reproduire les

cinétiques d'imbibition moyenne mesurées à la fois sur le temps court (quelques heures) et longs (plusieurs jours). La masse volumique hétérogène du bois au sein des cernes induit des propriétés de transfert différentes entre le bois initial et final non accessibles à ce type de formulation.

La meilleure compréhension des transferts d'eau au sein de l'épicéa utilisé pour la construction a ensuite été enrichie par l'étude de la redistribution d'humidité sous l'effet de sollicitations thermiques. Il a été nécessaire de développer un dispositif très original pour à la fois contrôler la température appliquée de part et d'autre de l'échantillon et permettre la rotation de l'ensemble dans le nano tomographe. Ce dispositif a permis de reproduire des scénarios de température rencontré que l'on rencontre typiquement en hiver ou en intersaison et de regarder l'impact de celui-ci sur le champ d'humidité dans le matériau. Ces champs de teneur en eau ont été déterminés avec une méthode de corrélation du niveau de gris des images tomographiques – après reconstruction – à une teneur en eau. En configuration hivernale, les résultats expérimentaux ont montré une diffusion d'humidité du côté chaud vers le côté froid sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau. De l'eau libre apparaît du côté froid de l'échantillon qui ensuite se redistribue localement en migrant vers les zones plus sèches (coté chaud). Cette migration s'opère sous l'effet de la pression capillaire via les voies de passage présentant la plus faible résistance à l'écoulement : les rayons ligneux. La richesse des données expérimentales a également mis en évidence l'impact des effets de bord engendrant un autre gradient thermique suivant le rayon de l'échantillon. Ces observations ont été confirmées par la présence d'un gradient d'humidité dans la section de l'échantillon. La prise en compte de l'hydro-activation de la diffusion – en considérant le facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$  fonction de l'humidité relative – a permis d'améliorer la qualité des prédictions des modèles WUFI pro et TransPore. L'implémentation du profil de masse volumique réelle du matériau contribue également à améliorer les prédictions.

Cette thèse a permis de mieux comprendre les migrations d'humidité – capillaire et diffusive – au sein de l'épicéa en mettant en avant l'influence de la structure anatomique sur les voies de passage de l'eau. L'utilisation des modèles a mis en évidence les limites de la formulation macroscopique des transferts tout en proposant des pistes d'améliorations possibles des modèles actuels. Par ailleurs les données expérimentales riches issues des protocoles expérimentaux offrent des jeux de données disponibles pour des analyses complémentaires futures.

### Perspectives de ce travail :

Les perspectives de ce travail peuvent être découpées en deux axes de recherche distincts.

La première est orientée sur des campagnes d'expérimentations dédiées à l'invasion capillaire d'eau liquide, en s'intéressant à l'aspect cyclique de sollicitations hydriques lors de séquences d'imbibition/drainage avec le dispositif utilisant l'imagerie aux rayons X 2D. Le caractère



cyclique permettrait de s'approcher davantage des conditions réelles rencontrées lors de la phase de construction (intempérie, ensoleillement). En complément, les éléments constitutifs des bâtiments en bois pouvant être composés de pièces de bois massives assemblées par collage (ex. panneaux lamellés croisés CLT), il convient d'étudier l'impact du joint de colle sur les transferts de masse. Pour ce faire, des expériences d'imbibition et de diffusion d'humidité en conditions non-isothermes par tomographie par rayons X sur des échantillons bilame pourraient être envisagées. Il s'agit là de perspectives qui pourraient être réalisées à court terme avec les équipements existants et la méthodologie d'analyse des données de ce travail. Le second volet expérimental pourrait – projet à court et moyen terme – concerner l'étude des paramètres d'acquisition des projections 2D et de reconstruction tomographique en vue d'affiner le modèle de corrélation du niveau de gris à une teneur en eau à partir d'images 3D.

Le second axe d'investigation concerne l'amélioration des capacités prédictives des modèles. Comme il a été observé, l'utilisation d'un modèle macroscopique chaleur-masse en 2D – au lieu du 1D utilisé dans ce travail – permettrait d'intégrer d'une part les effets de bords observés dans certains résultats expérimentaux et d'autre part d'approcher la migration de l'eau libre s'effectuant dans la direction radiale via la contribution des rayons ligneux. Les jeux de données obtenus dans le cadre de cette thèse pourraient être analysés avec une modélisation discrète basée sur la morphologie réelle du milieu étudié. Ce travail à l'échelle microscopique pourrait bénéficier à la modélisation des transferts à l'échelle macroscopique en utilisant, par exemple, l'approche discrète pour prédire les propriétés macroscopiques équivalentes du bois massif à partir de sa morphologie réelle 3D.

Enfin, l'ensemble des dispositifs expérimentaux développés dans le cadre de cette thèse ont été dédiés à l'étude des transferts d'humidité dans l'épicéa. Il est à noter que ces dispositifs peuvent être utilisés pour d'autres essences bois et aussi pour un grand nombre de matériaux de construction où le besoin de caractérisation est considérable. À l'avenir, cette approche individualisée (matériau par matériau) pourrait être extrapolée à l'étude de la dynamique des transferts d'humidité dans des bicouches pour voir l'effet de la jonction de deux matériaux de morphologie différente, puis à des complexes multicouches comme pour les parois réelles. Cette dernière configuration nécessiterait l'utilisation de l'imagerie aux rayons X 2D avec le développement d'imageurs large plan avec une taille de pixel d'une dizaine de microns.



## Index des figures

- Figure 1.1- Exemple de typologie de construction bois utilisant principalement des essences résineuses a) Fuste ou bois empilé (magazine Marie Claire Maison), b) Ossature bois (Batimat) et c) Panneaux en bois lamellé-croisé collé (CLT : cross laminated timber) (Lignatec SAS).....29
- Figure 1.2- Estimation des volumes consommés de bois dédiés aux systèmes constructifs et charpentes (BIPE and FCBA, 2019). Les scénarios envisagés s'appuient sur une évolution des parts de marché stable (tendanciel - moyenne 2010-2015), forte sous contrainte (Alternatif - potentiel raisonnable), forte (volontariste - potentiel maximal) et très forte (ONC - normes et optimiste).....30
- Figure 1.3- Moyen mis en œuvre face aux intempéries lors de la phase de construction a) aucunes (Olsson, 2020), b) avec polyane recouvrant toutes les faces des panneaux (Liisma et al., 2019) et c) protection intégrale avec une structure provisoire (Gasparri et al., 2015).....32
- Figure 1.4- a) Présence d'infiltration d'eau (Tietze et al., 2017), b) Développement de moisissures suite à infiltration d'eau (crédit photo SEMHV - <http://www.merule-expert.com/>).....33
- Figure 1.5- Schéma représentant les directions orthogonales du bois et les plans de référence associés (Franke and Quenneville, 2011).....34
- Figure 1.6- a) Section transversale d'une grume d'une essence résineuse (douglas) (Grosser, 1977), b) Coupe transversale colorée de peuplier au niveau du méristème (cambium) où se divise les cellules formant le bois du côté interne et l'écorce (le liber) du côté externe (Lenne, 2021).....35
- Figure 1.7- Vue schématique de la structure anatomique d'une essence résineuse (mélèze), extrait de (Grosser, 1977) initialement issue de Mägdefrau, 1951.....36
- Figure 1.8- Représentation schématique des trois types de ponctuation présent dans les résineux ( illustration de (Perré, 2007b) initialement issue de (Grosser, 1977).....37
- Figure 1.9- Vue de face effectuée au microscope électronique à balayage d'une ponctuation aréolée non aspirée (Siau, 1984), b) Représentation schématique en position ouverte et fermée d'une ponctuation aréolée (Hopkins, 2003).....38
- Figure 1.10- Représentation schématique des types de ponctuation semi-aréolées visibles chez les résineux (Perré, 2007b), b) visualisation de ponctuations semi-aréolées de type picéoïde d'épicéa ; échelle 20µm (Richter et al., 2004).....38
- Figure 1.11- Représentation schématique de l'organisation des chaînes de polymère d'une paroi cellulaire à l'état anhydre (*Navi and Morlier, 2005*).....39

Figure 1.12- Représentation schématique de molécules d'eau liées sur des chaînes de cellulose suivant les sites hydroxyles primaires (a) et secondaires (b) (Skaar, 1988).....	40
Figure 1.13- Isotherme de sorption type du bois (Simpson, 1980).....	42
Figure 1.14- Isotherme de sorption de l'épicéa pour différentes températures extrait de Skaar (1988) avec les données issues de Stamm (1964).....	42
Figure 1.15- Évolution schématique de l'hystérésis de sorption (a) après plusieurs cycles d'adsorption et désorption décrit en (b) (Rémond et al., 2018).....	43
Figure 1.16- Schématisation des transferts d'humidité en transverse suivant différent voies de passage possible (Skaar, 1988).....	46
Figure 1.17- Enthalpie de l'eau liée par rapport à l'eau libre dans le bois (Hameury, 2005).....	46
Figure 1.18- Représentation schématique de l'effet de l'angle de contact à l'interface liquide gaz avec a) un liquide mouillant et b) non mouillant (Siau, 1984).....	48
Figure 1.19- Représentation schématique du montage de la méthode de la coupelle (Zohoun et al., 2003).....	49
Figure 1.20- Principe de montage expérimental avec l'utilisation d'une membrane caoutchouc pour l'étanchéité périphérique (Zohoun, 1998) pour la détermination du coefficient de diffusion à la vapeur en face arrière (Perré et al., 2015).....	50
Figure 1.21- Représentation schématique d'un dispositif de mesure de la perméabilité à l'air (Perré, 1987).....	51
Figure 1.22- Imageries 2D par rayons X de l'évolution de la migration d'humidité suivant les trois directions (L, R et T) de l'épicéa pendant l'imbibition (Derome et al., 2005) .....	53
Figure 1.23- Cellules conductrices du bois final devenues foncées avec utilisation d'eau colorée dans l'épicéa (Petty and Preston, 1970).....	53
Figure 1.24- Résultats expérimentaux et simulés de teneur en eau en conditions non-isothermes (Bouali et al., 2012).....	55
Figure 1.25- Évolution de la température et de l'humidité relative d'une paroi exposée à des conditions cycliques contrôlées à l'aide d'une double enceinte climatique et simulation numérique (Rafidiarison, 2012).....	55
Figure 1.26- Confrontation entre des données expérimentales et simulées avec le logiciel WUFI pro lors de phase d'adsorption et de séchage (Kordziel et al., 2020).....	57
Figure 2.1- Représentation schématique du dispositif expérimental d'imagerie 2D par rayons X positionné au sein du tomographe.....	65
Figure 2.2- Distribution du niveau de gris avant (a) et après (b) le traitement de l'image. Les lignes pointillées verticales représentent la limite de la luminosité et du contraste de l'image incorporée.....	67

- Figure 2.3- Données expérimentales d'échantillons d'alisier (*Sorbus terminal*) de différentes épaisseurs et teneurs en eau avec la courbe d'ajustement non linéaire (2.5). La plage des *masses surfaciques* utilisées lors des expériences d'imbibition est représentée en gris.....70
- Figure 2.4- Principe des régions d'intérêt (ROI) sélectionnées pour l'expérience d'imbibition dans les directions longitudinale (a) et radiale (b).....71
- Figure 2.5- Distribution de la densité anhydre locale et de la teneur en eau locale à saturation complète le long de la largeur de l'échantillon pour la ROI #3.....73
- Figure 2.6- Absorption d'eau dans l'épicéa suivant la direction longitudinale à différents instants.....74
- Figure 2.7- a) Cinétique de la teneur en eau pour les régions d'intérêts sélectionnées dans la direction longitudinale ; b) emplacement des régions d'intérêts dans l'échantillon.....75
- Figure 2.8- Cinétique d'absorption de l'humidité dans le bois initial (BI) et le bois final (BF) en teneur en eau (a) et saturation (b) pour les ROI #3 (1) et #20 (2), respectivement situées à 1,31 mm et 10,18 mm de la surface de contact.....77
- Figure 2.9- Absorption d'eau dans l'épicéa le long de la direction radiale à différents instants a) pour le premier test (*avec* le cerne n° 38) et b) *pour* le second test (après avoir retiré le cerne n° 38).....78
- Figure 2.10- Zoom du *bas* de l'échantillon avant (indice 1) et à la fin (indice 2) de la première expérience d'imbibition (a) et (b) de la deuxième. Encadré en pointillé avec *agrandissement* à droite avec *des fausses couleurs* suivant le format "Feu" pour mettre en évidence les lumens remplis d'eau (taches bleues).....79
- Figure 2.11- *Evolution* de la teneur en eau des ROI sélectionnées a) lors du premier essai (*comprenant* le cerne #38) et b) *lors du* second essai après avoir retiré le cerne #38.....80
- Figure 2.12- Images ESEM du cerne d'intérêt #38 de l'échantillon jumeau (photographie) utilisé pour l'expérience d'imbibition dans la direction radiale.....81
- Figure 2.13- Coupes sélectionnées d'une image 3D obtenue par tomographie de l'échantillon B .....84
- Figure 3.1- a) Vue d'ensemble du dispositif expérimental placé à proximité de la nano-source de rayons X (1), de l'imageur CCD (2), du tube flexible (3), du tube en aluminium (4), du réservoir d'eau distillée maintenu sur une platine micrométrique verticale (5) et du capteur de température et d'humidité relative (6) ; b) Zoom de l'emplacement de l'échantillon au sommet du tube en aluminium ; c) Schéma de l'échantillon avec la position du volume observé par rapport à l'extrémité basse de l'échantillon en contact avec l'eau (rectangle pointillé vert).....91
- Figure 3.2- Coupe transversale de l'échantillon avec présence d'eau liquide à chaque étape du traitement d'image : a) image brute, b) après seuillage, c) avec la sélection de la région d'intérêt (ROI) et d) avec seul les lumens remplis d'eau dans la ROI.....93

Figure 3.3-	Coupes transversales situées à 5 mm (en bas du volume étudié) et 8,30 mm (en haut du volume étudié) de la surface de contact pendant l'imbibition. La couleur orange correspond aux lumens remplis <i>depuis</i> l'acquisition <i>précédente</i> et la couleur verte <i>en amont des précédentes acquisitions</i> .....	95
Figure 3.4-	Surface totale des <i>lumens localisée dans la ROI de chaque coupe transversale suivant</i> la hauteur du volume scanné pendant l'imbibition.....	96
Figure 3.5-	Vues 3D de la migration du liquide pour un volume sélectionné <i>suivant le plan L-T</i> (en haut) et <i>L-R</i> (en bas). Les flèches bleues indiquent la même trachéide remplie d'eau liquide. La couleur orange correspond aux lumens remplis d'eau aux lumens remplis depuis l'acquisition précédente et la couleur verte aux lumens remplis en amont des précédentes acquisitions. Les cercles noirs pointillés indiquent les grandes régions verticales exemptes d'eau liquide.....	97
Figure 3.6-	Coupes dans le plan L-T à différents instants lors de l'imbibition; a) dans le bois final, et b) dans le bois initial.....	99
Figure 3.7-	Coupes dans le plan L-R espacées de 12 µm. Les flèches vertes <i>pleines</i> indiquent la présence d'eau libre dans les cellules des rayons <i>ligneux</i> (les flèches vertes vides indiquent les mêmes cellules sans l'eau à l'état sec à l'air).....	100
Figure 3.8-	Coupes transversales brutes (indice n°1) et après segmentation (indice n°2) situées à 5 mm de la surface <i>de contact à l'état initial</i> sec à l'air (a) et après 1h20min d'imbibition (b).....	102
Figure 4.1-	Photographie du dispositif positionné dans le tomographe aux rayons X, b) Schéma du support échantillon et de l'instrumentation, c) Vue en coupe et zoom sur l'échantillon.....	111
Figure 4.2-	Représentation schématique des étapes d'une tomographie avec le support échantillon : a) Acquisition des projections et b) Reconstruction tomographique .....	112
Figure 4.3-	Températures appliquées sur les faces opposées de l'échantillon. La fréquence des acquisitions tomographiques est représentée en marron avec un total de 50 <i>enregistrements</i> .....	113
Figure 4.4-	Représentation axonométrique partielle de l'échantillon avec les cylindres c1, c2, c3 et c4, b) Zoom sur le cylindre central c1 et c) Exemple de la discrétisation du cerne #50 en trois régions d'intérêts avec BI 50, BT 50 et BF 50. Le niveau de gris a été inversé pour faciliter la visualisation. Ainsi, le niveau de gris foncé équivaut à la présence de matière plus dense qu'un niveau de gris clair.....	116
Figure 4.5-	Distribution de la masse volumique du bois, par ROI, en fonction de la hauteur dans l'échantillon pour le cylindre central c1.....	118
Figure 4.6-	Evolution du champ de teneur en eau au cours des trois mois d'expérimentation au sein du cylindre central c1.....	120

Figure 4.7-	Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de $c_1$ – <i>cylindre central</i> – selon la hauteur en conditions non-isothermes (phase 1) avec le profil de densité anhydre placé au-dessus.....	121
Figure 4.8-	Coupes tomographiques passant par l'axe de l'échantillon lors de la phase 1 a) suivant le plan R-T et b) suivant le plan R-L. Le niveau de gris foncé équivaut à la présence de matière plus dense que le niveau de gris clair.....	123
Figure 4.9-	Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de la région d'intérêt $c_1$ – <i>cylindre central</i> – selon la hauteur en conditions isothermes (phase 2) avec le profil de densité anhydre placé au-dessus.....	124
Figure 4.10-	Évolution du profil de teneur en eau au cours du temps de la ROI $c_1$ – cylindre central – selon la hauteur en conditions dynamiques (phase 3).....	125
Figure 4.11-	Évolution du profil d'humidité suivant le rayon de l'échantillon lors la phase 1 et 2 pour les zones : a) Bois initial du cerne 51 (#BI 51), b) Bois final du cerne 50 (#BI 50), c) Bois de transition du cerne 50 (#BI 50) et d) Bois initial du cerne 50 (#BI 50).....	127
Figure 4.12-	a) Acquisition de projections suivant les mêmes conditions opératoires des acquisitions tomographiques, b) avec le tube en aluminium, c) le tube en carbone et d) le tube en polypropylène.....	129
Figure 4.13-	Évolution de la distribution du champ de teneur en eau aux temps $t_0$ h ; $t_{50}$ h ; $t_{100}$ h ; $t_{200}$ h ; $t_{300}$ h ; $t_{400}$ h et $t_{500}$ h pour les cas i, ii et iii selon la hauteur du cylindre et le diamètre 20 mm.....	130
Figure 4.14-	Schéma électrique du bloc instrumentation permettant la gestion de la température de consigne avec un module Peltier contrôlé avec un microprocesseur ArduinoNano. L'inversion du courant (flèches) dans le module Peltier est effectué par un relais double.....	132
Figure 4.15-	a) Représentation schématique des cartes PCB avec les composants électroniques sur chaque face du dissipateur thermique, b) Visualisation du circuit électriques sur les cartes PCB (recto-verso) avec l'emplacement des composants et raccord entre les cartes PCB.....	133
Figure 4.16-	Visualisation des artefacts de reconstruction tomographique et comparaison avec la projection effectuée dans le cadre des travaux d'imbibition du chapitre 2. Les valeurs de niveau de gris ont été inversées sur la coupe tomographique pour faciliter la visualisation. Les flèches rouges localisées sur la coupe tomographique indiquent la présence « d'ombres » provenant du bois final du cerne adjacent...	134
Figure 5.1-	Représentation schématique des conditions limites implémentées dans le code TransPore dans le cas de l'imbibition (a) et des sollicitations thermiques dynamiques (b).....	140
Figure 5.2-	Températures imposées aux extrémités de l'échantillon issues de l'expérience présentée dans le chapitre 4.....	141

Figure 5.3- Cinétique de reprise d'humidité moyenne d'imbibition suivant la direction longitudinale exprimée en teneur en eau (a) et en saturation (b) avec les configurations *détaillées* dans le Tableau 5.1.....145

Figure 5.4- Cinétique de reprise d'humidité en imbibition suivant la direction longitudinale dans le bois initial (a) et le bois final (b). Le détail des configurations est visible dans le Tableau 5.1.....146

Figure 5.5- a) Évolution des cinétiques d'humidité simulées et expérimentales par ROI au cours de l'essai d'imbibition suivant la direction longitudinale, b) Position des ROI le long de la hauteur de l'échantillon.....147

Figure 5.6- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore (a) et WUFI pro (b) suivant les configurations détaillées dans le Tableau 5.2.....148

Figure 5.7- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore (a) et WUFI pro (b) suivant les configurations détaillées dans le Tableau 5.2.....149

Figure 5.8- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore suivant la configuration V détaillée dans le Tableau 5.2.....150

Figure 5.9- Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle TransPore en condition dynamique avec la configuration V détaillée dans le Tableau 5.2.....151

Figure 5.10- a) Équipement utilisé pour la mesure des pesées régulière et b) Principe de *positionnement de mise en contact des échantillons avec de l'eau distillée*.....154

Figure 5.11- Évolution de la reprise de masse fonction de la racine carrée du temps dans le cas de l'imbibition pour les échantillons d'épicéa suivant la direction longitudinale (L) et radiale(R).....155



## Index des tableaux

Tableau 1.1- Proportions massiques moyennes des constituants des essences résineuses (Dumon and Gélus, 1982).....	39
Tableau 1.2- Relation entre rayon du capillaire et la différence de pression avec son équivalent en hauteur d'eau (Perré and Badel, 2006).....	49
Tableau 2.1- Dimensions des échantillons et position suivant la direction radiale.....	64
Tableau 2.2- Valeurs des coefficients $L0$ , $L1$ , $\alpha$ et $\lambda$ .....	69
Tableau 4.1- Paramètres d'acquisition des projections.....	113
Tableau 4.2- Valeurs des coefficients A et B.....	118
Tableau 5.1- Configurations utilisées dans le cas des simulations d'imbibition suivant la direction longitudinale.....	143
Tableau 5.2- Configurations utilisées dans le cas de sollicitations thermiques suivant la direction radiale.....	144
Tableau 5.3- Dimensions des échantillons et position suivant la direction radiale.....	154



---

# Bibliographie

- Abdou, A. and Budaiwi, I. (2013) The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*, 43 533–544.
- Agence Qualité Environnement (2019) *Fiches pathologie bâtiment: Les attaques des bois par les agents biologiques*.
- Agoua, E., Zohoun, S. and Perré, P. (2001) Utilisation d'une double enceinte pour déterminer le coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois en régime transitoire: recours à la simulation numérique pour valider la méthode d'identification: A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions: determination of the best fitting method by numerical simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(19) 3731–3744.
- Almeida, G., Gagné, S. and Hernández, R.E. (2007) A NMR study of water distribution in hardwoods at several equilibrium moisture contents. *Wood Science and Technology*, 41(4) 293–307.
- Almeida, G., Leclerc, S. and Perré, P. (2008) NMR imaging of fluid pathways during drainage of softwood in a pressure membrane chamber. *International Journal of Multiphase Flow*, 34(3) 312–321.
- Almeida, G., Rémond, R. and Perré, P. (2018) Hygroscopic behaviour of lignocellulosic materials: Dataset at oscillating relative humidity variations. *Journal of Building Engineering*, 19 320–333.
- Assemblée des Chambres Françaises de Commerce et d'Industrie (2011) *Classification des déchets - Code de l'environnement*.
- Avramidis, S. and Siau, J.F. (1987) An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood science and technology*, 21(3) 249–256.
- Baettig, R. (2005) *Using a poly-chromatic X-ray beam by moisture content and microfibril angle determination: theoretical and experimental approaches*. Thèse de doctorat thesis. Paris ENGREF: .
- BIPE and FCBA (2019) *Synthèse - Etude prospective: Evolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*.
- Bolton, A.J. and Petty, J.A. (1978) A model describing axial flow of liquids through conifer wood. *Wood Science and Technology*, 12(1) 37–48.

- Bouali, A., Rémond, R., Almeida, G. and Perré, P. (2012) *Thermo-diffusion in wood: X-ray MC profiles analysed using a 2-D computational model*. In: 2012 Xiamen: In Proceedings of the 18 th International Drying Symposium,.
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G. and Thiel, A. (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3) 331–351.
- Buchanan, A.H. and Levine, S.B. (1999) Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, 2(6) 424–437.
- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M. and Woloszyn, M. (2019) Comparison of model numerical predictions of heat and moisture transfer in porous media with experimental observations at material and wall scales: An analysis of recent trends. *Drying Technology*, 37(11) 1363–1395.
- Butterfield, B.G. and Meylan, B.A. (1980) *Three-dimensional structure of wood; an ultrastructural approach*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- CFB BOIS/CNI, FBF, FBIE and FIBOIS (2021) La filière bois présente son ‘Plan Ambition Bois-construction 2030’. UICB.
- Challansonnex, A., Casalinho, J. and Perré, P. (2019) Non-Fickian diffusion in biosourced materials: Experimental determination of the memory function using minute samples. *Construction and Building Materials*, 224 560–571.
- Challansonnex, A., Pierre, F., Casalinho, J., Lu, P. and Perré, P. (2018) Mass diffusivity determination of various building materials based on inverse analysis of relative humidity evolution at the back face of a sample. *Construction and Building Materials*, 193 539–546.
- Chen, M., Coasne, B., Guyer, R., Derome, D. and Carmeliet, J. (2018) Role of hydrogen bonding in hysteresis observed in sorption-induced swelling of soft nanoporous polymers. *Nature Communications*, 9(1) 3507.
- Choong, E.T., McMillin, C.W. and Tesoro, F.O. (1975) *Effect of Surface Preparation On Gas Permeability of Wood*. 4.
- Claesson, J., Hagentoft, C.-E. and Wadsö, L. (1994) Masked edge effects when measuring diffusion coefficients with the cup method. *Polymer Engineering and Science*, 34(10) 821–826.
- COFIBAB and France Bois Forêt (2019) *Conférence de presse - Enquête Nationale de la Construction Bois*.
- Colinart, T., Glouannec, P., Kurnitski, J. and Kalamees, T. (2020) On the importance of desiccant during the determination of water vapor permeability of permeable insulation material. In: *E3S Web of Conferences*. 2020 Tallinn: In Proceedings of the 12th Symposium of Building Physics, 14003.

- Comstock, G.L. (1969) Directional Permeability Of Softwoods. *Wood and Fiber Science*, 1(4) 283–289.
- Comstock, G.L. and Côté, W.A. (1968) Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. *Wood Science and Technology*, 2(4) 279–291.
- Cullity, B.D. (1956) *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing.
- De Meijer, M. and Militz, H. (2001) Moisture transport in coated wood. Part 2: Influence of coating type, film thickness, wood species, temperature and moisture gradient on kinetics of sorption and dimensional change. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58(6) 467–475.
- Decoux, V., Varcin, E. and Leban, J.-M. (2004) Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. *Annals of Forest Science*, 61(3) 251–262.
- Dell’Isola, M., d’Ambrosio Alfano, F.R., Giovinco, G. and Ianniello, E. (2012) Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content. *International Journal of Thermophysics*, 33(8–9) 1674–1685.
- Derome, D., Roels, S. and Carmeliet, J. (2005) *Qualitative work to study water movement in wood*. In: 2005 Reykjavik, Iceland: Proceedings of the 7th symposium on building physics in the Nordic countries, 173–180.
- Desmarais, G., Gilani, M.S., Vontobel, P., Carmeliet, J. and Derome, D. (2016) Transport of polar and nonpolar liquids in softwood imaged by neutron radiography. *Transp Porous Med*, 113(2) 383–404.
- Dixon, H.H. (1914) *Transpiration and the ascent of sap in plants*.
- Donaldson, L.A. and Singh, A.P. (2013) Formation and structure of compression wood. In: J. Fromm (ed.) *Cellular Aspects of Wood Formation*. Plant Cell Monographs. Berlin, Heidelberg: Springer, 225–256.
- Duforestel, T. (2015) *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique: recherches sur l’efficacité énergétique des bâtiments*. Mémoire HDR thesis. Université d’Artois.
- Dumon, R. and Gélus, M. (1982) *La valorisation chimique du bois*. Paris: Masson.
- FCBA (2018) *Memento*.
- Flynn, K.A. (1995) A review of the permeability, fluid flow, and anatomy of spruce (*Picea SPP.*). *Wood and Fiber Science*, 27(3) 278–284.
- FNB (2018) *Fiche comprendre: Le retrait du bois*.

- Frank, X., Almeida, G. and Perré, P. (2009) *Imbibition capillaire d'un échantillon de bois: reconstitution 3D de l'anatomie et simulation Lattice Boltzmann*. In: 2009 Marseille: Au 19ème Congrès Français de Mécanique., 7.
- Franke, B. and Quenneville, P. (2011) Numerical Modeling of the Failure Behavior of Dowel Connections in Wood. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(3) 186–195.
- Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P. and Gril, J. (2014) *The biology of reaction wood*. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gasparri, E., Lucchini, A., Mantegazza, G. and Mazzucchelli, E.S. (2015) Construction management for tall CLT buildings: From partial to total prefabrication of façade elements. *Wood Material Science & Engineering*, 10(3) 256–275.
- Gezici-Koç, Ö., Erich, S.J.F., Huinink, H.P., van der Ven, L.G.J. and Adan, O.C.G. (2017) Bound and free water distribution in wood during water uptake and drying as measured by 1D magnetic resonance imaging. *Cellulose*, 24(2) 535–553.
- Ghazil, S. (2010) *Étude de la migration des fluides dans le bois*. Thèse de doctorat thesis. Nancy: Université Henri Poincaré.
- Grangeat P (2002) *La tomographie: fondements mathématiques, imagerie microscopique et imagerie industrielle*. Traitement du signal et de l'image. Lavoisier Hermès Science publ.
- Grosser, D. (1977) *Die Hölzer Mitteleuropas: ein mikrographischer Lehratlas*. Berlin: Springer.
- Guide Rage (2012) Systèmes constructifs à ossature bois - Maitrise des performances thermiques. *Guide Rage - Recommandations professionnelles*, 148.
- Guinier, A. (1964) *Theory and technics for x-ray crystallography*. Paris: Dunod.
- Hameury, S. (2005) Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study. *Building and Environment*, 40(10) 1400–1412.
- Hameury, S. and Sterley, M. (2006) Magnetic resonance imaging of moisture distribution in *Pinus sylvestris* L. exposed to daily indoor relative humidity fluctuations. *Wood Material Science and Engineering*, 1(3–4) 116–126.
- Heger, F. (2004) *Etude du phénomène de l'élimination de la mémoire de forme du bois densifié par post-traitement thermo-hydro-mécanique*. These de doctorat thesis. EPFL.
- Hervé, J.-C. (2016) *National Forest Inventories: Assessment of Wood Availability and Use*. C. Vidal, I.A. Alberdi, L. Hernández Mateo, and J.J. Redmond (eds.). Cham: Springer International Publishing.
- Hill, C.A.S., Ramsay, J., Keating, B., Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M. and Constant, B. (2012) The water vapour sorption properties of thermally modified and densified wood. *Journal of Materials Science*, 47(7) 3191–3197.

- Hopkins, W.G. (2003) *Physiologie végétale*. Bruxelles: De Boeck.
- Houts, J.H. van, Wang, S., Shi, H., Pan, H. and Kabalka, G.W. (2004) Moisture movement and thickness swelling in oriented strandboard, part 1. Analysis using nuclear magnetic resonance microimaging. *Wood Science and Technology*, 38(8) 617–628.
- Hurlbert, M., Krishnaswamy, J., Davin, E., Johnson, F.X., Fernando, C., Morton, J., Viner, D., Bailis, R., Byers, E., Calvin, K., Diaz-Chavez, R., Evans, J., Fletcher, A., Ford, J., Manialawy, Y., McElwee, P., Quan, J., Renwick, A., Thiery, W., Warner, A., Rodrigues, R., Li, B.L.T. and Zikhali, T. (2019) *Risk management and decision-making in relation to sustainable development*. In: 128.
- Janssen, H. (2011) Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7–8) 1548–1562.
- Johansson, J. and Kifetew, G. (2010) CT-scanning and modelling of the capillary water uptake in aspen, oak and pine. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(1) 77–85.
- Johansson, P., Bok, G. and Ekstrand-Tobin, A. (2013) The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions. *Building and Environment*, 65 178–184.
- Kak, A.C. and Slaney, M. (2001) *Principles of computerized tomographic imaging*. Classics in applied mathematics 33. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Karacabeyli, E., Douglas, B., FPInnovations (Institute), and Binational Softwood Lumber Council (2013) *CLT handbook: cross-laminated timber*.
- Keylwerth, R. (1969) Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchtigkeits-Gleichgewicht. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 27(8) 285–290.
- Kollmann, F.F.P. and Côté, W.A. (1968) *Principles of wood science and technology: I solid wood*. Springer-Verlag. Vol. 1.
- Kordziel, S. (2018) *Study of moisture conditions in a multi-story mass timber building through the use of sensors and WUFI hygrothermal modeling*. Thesis. Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library.
- Kordziel, S., Glass, S.V., Boardman, C.R., Munson, R.A., Zelinka, S.L., Pei, S. and Tabares-Velasco, P.C. (2020) Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope. *Building and Environment*, 177 106866.
- Kreiger, B.K. and Srubar, W.V. (2019) Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods. *Energy and Buildings*, 202 109394.
- Künzel, H.M. (1995) *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag.
- Lenne, C. (2021) *Dans la peau d'un arbre. Secrets et Mystères des Géants qui vous entourent*. Belin.

- Lepage, R. (2012) *Moisture response of wall assemblies of cross-laminated timber construction in cold canadian climates*. Thesis thesis. University of Waterloo.
- Liese, W. and Bauch, J. (1967) On the closure of bordered pits in conifers. *Wood Science and Technology*, 1(1) 1–13.
- Liisma, E., Kuus, B.L., Kukk, V. and Kalamees, T. (2019) A Case Study on the Construction of a CLT Building Without a Preliminary Roof. *Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 25(2) 53–62.
- Lindgren, O. (1992) *Medical CT-Scanners for Non-Destructive Wood Density and Moisture Content Measurements*. 92.
- Longuetaud, F., Mothe, F., Leban, J.-M. and Mäkelä, A. (2006) Picea abies sapwood width: Variations within and between trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(1) 41–53.
- Maclean, J.D. (1941) Thermal conductivity of wood. *Heating, piping and air conditioning*. Madison, USA,.
- Mariaux, A. (1989) La section transversale de fibre observée avant et après séchage sur bois massif. *Bois et forêts des tropiques*, 221 65–76.
- Martin, B., Colin, J., Lu, P., Mounkaila, M., Casalinho, J., Perré, P. and Rémond, R. (2021) Monitoring imbibition dynamics at tissue level in Norway spruce using X-ray imaging. *Holzforschung*, Available from <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf-2020-0269/html> [accessed 1 August 2021].
- Mayr, S., Bardage, S. and Brandstrom, J. (2006) Hydraulic and anatomical properties of light bands in Norway spruce compression wood. *Tree Physiology*, 26(1) 17–23.
- McGinnes, E.A. and Rosen, H.N. (1984) Macroscopic and Microscopic Analyses of Color Changes of Wood Pressure Steam-Dried Above Atmospheric Pressure. *Wood and Fiber Science*, 16(1) 48–56.
- Meder, R., Codd, S.L., Franich, R.A., Callaghan, P.T. and Pope, J.M. (2003) Observation of anisotropic water movement in Pinus radiata D. Don sapwood above fiber saturation using magnetic resonance micro-imaging. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(4) 251–256.
- Ministère de la Transition Ecologique (2020) *RE 2020 Eco-construire pour le confort de tous*. Ministère de la transition écologique.
- Muszynski, L., Larasatie, P., Guerrero, J.E.M., Albee, R. and Hansen, E.N. (2020) *Global CLT industry in 2020: Growth beyond the Alpine Region*. 9.
- Navi, P. and Morlier, P. (2005) *Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures*. [Matériaux]. PPUR presses polytechniques. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.



- NF EN 350 (2016) *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois.*
- NF EN 12664 (2001) *Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique.*
- NF EN 13183-1 (2002) *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method.*
- NF EN 13183-2 (2002) *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 2: Estimation by electrical resistance method.*
- NF EN ISO 12572 (2016) *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle.*
- NF EN ISO 15148 (2003) *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion.*
- NF ISO 12571 (2013) *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique.*
- Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jämsä, S. and Viitaniemi, P. (2003) The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. *Wood Science and Technology*, 37(2) 109–115.
- Olsson, L. (2020) Moisture safety in CLT construction without weather protection – Case studies, literature review and interviews. In: *E3S Web of Conferences*. 2020 Tallinn: In Proceedings of the 12th Symposium of Building Physics, 10001.
- ONF (2018) *L'ONF* Available from <https://www.onf.fr/onf> [accessed 5 May 2021].
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A. and Strykowski, W. (2014) Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction and Building Materials*, 52 428–436.
- Panshin, A.J. and De Zeeuw, C. (1980) *Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada.*
- Parham, R.A. and Gray, R.L. (1984) Formation and Structure of Wood. In: R. Rowell (ed.) *The Chemistry of Solid Wood*. Advances in Chemistry. Washington, DC: American Chemical Society, 3–56.
- Passarini, L., Malveau, C. and Hernández, R.E. (2015) Distribution of the equilibrium moisture content in four hardwoods below fiber saturation point with magnetic resonance microimaging. *Wood Science and Technology*, 49(6) 1251–1268.

- Pease, B.J., Scheffler, G.A. and Janssen, H. (2012) Monitoring moisture movements in building materials using X-ray attenuation: Influence of beam-hardening of polychromatic X-ray photon beams. *Construction and Building Materials*, 36 419–429.
- Peck, E.C. (1957) How Wood Shrinks and Swells. *Forest Products Journal*, 7(7) 235–244.
- Pel, L., Brocken, H. and Kopinga, K. (1996) Determination of moisture diffusivity in porous media using moisture concentration profiles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(6) 1273–1280.
- Perré, P. (1993) Analyse d'images et modélisation mathématique: deux outils pour comprendre et mieux utiliser le matériau bois. *Revue Forestière Française*, 166.
- Perré, P. (2007a) Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples. *Holzforschung*, 61(4) 419–429.
- Perré, P. (2007b) *Fundamentals of wood drying*. Nancy: ARBOLOR.
- Perré, P. (1987) *Le séchage convectif de bois résineux: choix, validation et utilisation d'un modèle*. These de doctorat thesis. Paris.
- Perré, P. and Badel, É. (2006) De l'eau dans l'arbre à l'eau dans le matériau bois: une introduction. *Revue Forestière Française*, (4). Available from <http://hdl.handle.net/2042/6701> [accessed 8 March 2021].
- Perré, P. and Degiovanni, A. (1990) Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(11) 2463–2478.
- Perré, P. and Huber, H. (2007) Measurement of free shrinkage at the tissue level using an optical microscope with an immersion objective: results obtained for Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and spruce (*Picea abies*). *Annals of Forest Science*, 64(3) 255–265.
- Perré, P. and Karimi, A. (2002) Fluid migration in two species of beech (*Fagus silvatica* and *Fagus orientalis*): A percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 4 50–68.
- Perré, P., Pierre, F., Casalinho, J. and Ayouz, M. (2015) Determination of the Mass Diffusion Coefficient Based on the Relative Humidity Measured at the Back Face of the Sample During Unsteady Regimes. *Drying Technology*, 33(9) 1068–1075.
- Perré, P. and Thiercelin, F. (2004) Evidence of dual scale porous mechanisms during fluid migration in hardwood species: Part I Using the attenuation of a polychromatic x-ray beam to determine the evolution of moisture content during imbibition of beech. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 12 773–782.
- Perré, P. and Turner, I.W. (1999) A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(24) 4501–4521.

- Perré, P. and Turner, I.W. (2001a) Determination of the Material Property Variations Across the Growth Ring of Softwood for Use in a Heterogeneous Drying Model Part 1. Capillary Pressure, Tracheid Model and Absolute Permeability. *Holzforschung*, 55(3) 318–323.
- Perré, P. and Turner, I.W. (2001b) Determination of the Material Property Variations Across the Growth Ring of Softwood for Use in a Heterogeneous Drying Model. Part 2. Use of Homogenisation to Predict Bound Liquid Diffusivity and Thermal Conductivity. *Holzforschung*, 55(4) 417–425.
- Pettersen, R.C. (1984) The Chemical Composition of Wood. In: R. Rowell (ed.) *The Chemistry of Solid Wood*. Advances in Chemistry. Washington, DC: American Chemical Society, 57–126.
- Petty, J.A. and Preston, R.D. (1970) *Permeability and structure of the wood of Sitka spruce*. In: Biological Sciences. 1970 London: Proceedings of the Royal Society of London, 149–166.
- Polge, H. (1966) Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants: applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des Sciences Forestières*, 23(1) 1–206.
- Rafidiarison, H.M. (2012) *Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation. Applications aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat*. Université de Lorraine.
- Ramage, M.H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D.U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P.F. and Scherman, O. (2017) The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 333–359.
- Remond, R. (2004) *Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées*. Thèse de doctorat thesis. ENGREF (AgroParisTech).
- Rémond, R., Almeida, G. and Perré, P. (2018) The gripped-box model: A simple and robust formulation of sorption hysteresis for lignocellulosic materials. *Construction and Building Materials*, 170 716–724.
- Rémond, R. and Perré, P. (2008) *Modélisation du Comportement Thermique d'une Maison Bois à l'Aide de Micromodèles Chaleur-Masse Distribués*. 10.
- Richter, H.G., Grosser, D., Heinz, I. and Gasson, P.E. (2004) IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*, 25(1) 1–70.
- Rode, C., Peuhkuri, R., Lone, H., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Harderup, L.-E. and Arfvidsson, J. (2006) *Moisture Buffering of Building Materials*. Technical University of Denmark DTU.

- Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Ellis, A.T., Hall, C., Kumaran, K., Pel, L. and Plagge, R. (2004) A Comparison of Different Techniques to Quantify Moisture Content Profiles in Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27(4) 261–276.
- RS (2020) *Datasheet tube polypropylène (PP)*.
- Sandberg, K. (2009) *Norway spruce heartwood: properties related to outdoor use*. Thesis thesis. Luleå: Division of Wood Science and Technology, Luleå University of Technology, Skellefteå.
- Sandberg, K. and Salin, J.-G. (2012) Liquid water absorption in dried Norway spruce timber measured with CT scanning and viewed as a percolation process. *Wood Science and Technology*, 46(1–3) 207–219.
- Schmidt, O. (2006) *Wood and Tree Fungi*. Springer Berlin Heidelberg.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F., Kienast, F. and Schmatz, C. (2004) *Wood anatomy of central European Species*. Available from [www.woodanatomy.ch](http://www.woodanatomy.ch).
- Sedighi-Gilani, M., Griffa, M., Mannes, D., Lehmann, E., Carmeliet, J. and Derome, D. (2012) Visualization and quantification of liquid water transport in softwood by means of neutron radiography. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22) 6211–6221.
- Sedighi-Gilani, M., Vontobel, P., Lehmann, E., Carmeliet, J. and Derome, D. (2014) Liquid uptake in Scots pine sapwood and hardwood visualized and quantified by neutron radiography. *Materials and Structures*, 47(6) 1083–1096.
- Seltzer, S. (1987) *XCOM-Photon Cross Sections Database, NIST Standard Reference Database 8*.
- Shi, J. and Avramidis, S. (2017) Water sorption hysteresis in wood: I review and experimental patterns – geometric characteristics of scanning curves. *Holzforschung*, 71(4) 307–316.
- Siau, J.F. (1984) *Transport Process in Wood*. Berlin: Springer-Verlag.
- Simpson, W. (1980) Sorption Theories Applied To Wood. *Wood and Fiber Science*, 12(3) 183–195.
- Skaar, C. (1988) *Wood-Water Relations*. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Spolek, G.A. and Plumb, O.A. (1981) Capillary pressure in softwoods. *Wood Science and Technology*, 15(3) 189–199.
- Stamm, A.J. (1964) Fundamental physical approach to wood and cellulose science. *Journal of Chemical Education*, 41(4) 198.

- Suleiman, B.M., Larfeldt, J., Leckner, B. and Gustavsson, M. (1999) Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology*, 33(6) 465–473.
- Tarmian, A. and Perré, P. (2009) Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Holzforschung*, 63(3) 352–356.
- Tarmian, A., Remond, R., Dashti, H. and Perré, P. (2012) Moisture diffusion coefficient of reaction woods: compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Wood Science and Technology*, 46(1–3) 405–417.
- Tesoro, F.O., Choong, E.T. and Kimbler, O.K. (1974) Relative Permeability and the Gross Pore Structure of Wood. *Wood and Fiber Science*, 6(3) 226–236.
- Tesoro, F.O., Kimbler, O.K. and Choong, E.T. (1972) Determination of the relative permeability of wood to oil and water. *Wood science*, 5(1) 21–26.
- Tietze, A., Ott, S., Boulet, S., Gradeci, K., Labonnote, N., Grynning, S., Noreen, J. and Anna, P. (2017) *Tall timber facades - Identification of cost-effective and resilient envelopes for wood constructions*.
- Tiitta, M. and Olkkonen, H. (2002) Electrical impedance spectroscopy device for measurement of moisture gradients in wood. *Review of Scientific Instruments*, 73(8) 3093–3100.
- Tiitta, M., Savolainen, T., Olkkonen, H. and Kanko, T. (1999) Wood Moisture Gradient Analysis by Electrical Impedance Spectroscopy. *Holzforschung*, 53(1) 68–76.
- Tondi, G., Thevenon, M.F., Mies, B., Standfest, G., Petutschnigg, A. and Wieland, S. (2013) Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity and wood anatomy in wood infiltration. *Wood Science and Technology*, 47(3) 615–626.
- Trouy, M.-C. (2015) *Anatomie du bois: formation, fonctions et identification*. Synthèses. Versailles: Éditions Quæ.
- Tyree Melvin T and Zimmermann, M.H. (2002) *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer series in wood science. 2nd edition. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, and Population Division (2019) *World urbanization prospects: 2018: highlights*.
- Vahtikari, K., Rautkari, L., Nojonen, T., Lillqvist (née Laine), K. and Hughes, M. (2017) The influence of extractives on the sorption characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Materials Science*, 52(18) 10840–10852.
- Viitanen, H. (1994) Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. *Materials and Structures*, 27(8) 483–493.
- Vololonirina, O., Coutand, M. and Perrin, B. (2014) Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials*, 63 223–233.

- Wardrop, A.B. and Davies, G.W. (1961) *Morphological Factors Relating to the Penetration of Liquids into Wood*. 15(5) 129–141.
- Warensjö, M. (2003) *Compression wood in Scots pine and Norway spruce: distribution in relation to external geometry and the impact on dimensional stability in sawn wood*. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria 298. Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Wilson, K. and White, D.J.B. (1986) *The anatomy of wood: its diversity and variability*. London: Stobart & Son Ltd.
- Zelinka, S.L., Glass, S.V. and Boardman, C.R. (2016) Improvements to Water Vapor Transmission and Capillary Absorption Measurements in Porous Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(6) 20150209.
- Zhang, Xiaobo, Künzel, H.M., Zillig, W., Mitterer, C. and Zhang, Xu (2016) A Fickian model for temperature-dependent sorption hysteresis in hygrothermal modeling of wood materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100 58–64.
- Zhou, M., Caré, S., Courtier-Murias, D., Faure, P., Rodts, S. and Coussot, P. (2018) Magnetic resonance imaging evidences of the impact of water sorption on hardwood capillary imbibition dynamics. *Wood Science and Technology*, 52(4) 929–955.
- Zillig, W. (2009) *Moisture Transport in Wood Using a Multiscale Approach*. Thesis thesis. Lauen: .
- Zohoun, S. (1998) *Détermination de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique du bois: comparaison des mesures en régime permanent et transitoire*. Thèse de doctorat thesis. Vandoeuvre-les-Nancy: INPL.
- Zohoun, S., Agoua, E., Degan, G. and Perré, P. (2003) An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime. *Heat and Mass Transfer*, 39(2) 147–155.



**Titre :** Dynamique des transferts d'humidité au sein de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) : mesures par imagerie X et simulations numériques

**Mots clés :** épicéa, transferts d'humidité, imbibition, sollicitations thermiques, tomographie par rayons X

**Résumé :** Les outils numériques sont couramment utilisés par les entreprises de construction pour concevoir et valider les systèmes constructifs en vue de répondre aux exigences thermiques et environnementales des bâtiments. Dans le cas du bois massif, des disparités demeurent entre les simulations numériques et les données expérimentales vis-à-vis des transferts d'humidités. Leur bonne prise en compte est pourtant une donnée essentielle pour garantir la pérennité des ouvrages bois et assurer les performances thermiques de l'ouvrage. Ce travail vise à mieux comprendre les transferts d'humidités au sein du bois massif en vue d'améliorer la capacité prédictive des modèles. Ainsi, plusieurs dispositifs expérimentaux ont été développés pour étudier la dynamique des transferts d'humidité à l'échelle matériau à l'aide de l'imagerie X. Dans un premier temps, des expériences d'imbibition ont été menées pour étudier la migration capillaire dans des échantillons d'épicéa afin de reproduire une exposition à de l'eau liquide lors de la phase de construction. Les images tomographiques 3D ont permis de suivre le cheminement de l'eau et ainsi de mieux comprendre l'effet de l'anatomie sur les transferts. Dans un second temps, la dynamique des transferts d'humidité en conditions non-isothermes a été étudiée en appliquant une séquence de sollicitations thermiques aux bornes d'un échantillon cylindrique se rapprochant des conditions rencontrées dans une paroi extérieure. L'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau au sein de l'échantillon – initialement avec une teneur en eau homogène – a mis en évidence l'effet de la température sur la redistribution de l'humidité. Enfin, ces données expérimentales ont été confrontées aux valeurs issues de simulations numériques suivant différentes configurations illustrant les capacités prédictives et les limites des modèles utilisant une formulation macroscopique pour simuler les transferts couplés chaleur-masse dans le milieu poreux.

**Title:** Dynamics of moisture transfer in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): X-ray imaging measurements and numerical simulations

**Key words:** Norway spruce; moisture transfer; imbibition; thermal solicitations; X-ray tomography

**Abstract:** Numerical tools are commonly used by construction companies to design and validate building systems to meet thermal and environmental requirements of buildings. In the case of solid wood, discrepancies remain between numerical simulations and experimental data regarding moisture transfer. However, their correct consideration is essential to guarantee the durability of wood structures and ensure their thermal performance. This work aims to better understand moisture transfer in solid wood in order to improve the predictive capacity of models. For this purpose, several experimental setups were developed to study the dynamics of moisture transfer in wood samples using X-ray imaging. Firstly, imbibition experiments were conducted to study capillary migration in spruce samples to reproduce exposure of wooden construction components to liquid water during the construction phase. The results – from 3D  $\mu$ CT images – allowed to follow the liquid pathways in the pore network of wood and thus to better understand the effect of anatomy on the water migration. Secondly, the dynamics of moisture transfer under non-isothermal conditions was studied by applying a sequence of thermal solicitations to the ends of a cylindrical sample similar to the conditions encountered in an external wall. The spatio-temporal evolution of the moisture content within the sample – initially with a homogeneous moisture content – showed the effect of temperature on the moisture redistribution. Finally, these experimental data were compared with values from numerical simulations in different configurations, illustrating the predictive capacities and limitations of models using a macroscopic formulation to simulate coupled heat-mass transfers in a porous medium.