



HAL
open science

Optimisation du dimensionnement des structures en bois en fonction de l'humidité

Nihal Ghanem

► **To cite this version:**

Nihal Ghanem. Optimisation du dimensionnement des structures en bois en fonction de l'humidité. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. École des Ponts ParisTech, 2022. Français. NNT : 2022ENPC0014 . tel-03968106

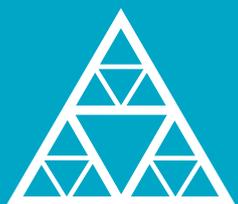
HAL Id: tel-03968106

<https://pastel.hal.science/tel-03968106>

Submitted on 1 Feb 2023

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.



École des Ponts
ParisTech

THÈSE DE DOCTORAT
de l'École des Ponts ParisTech

Optimisation du dimensionnement des structures en bois en fonction de l'humidité

École doctorale Science, Ingénierie et Environnement

Génie Civil

Thèse préparée au laboratoire Navier

Thèse soutenue le 21/04/2022, par
Nihal GHANEM

Composition du jury:

Laurent, BLERON
Professeur des universités, ENSTIB

Rapporteur

Antonin, FABRI
Directeur de recherche, ENTPE

Rapporteur

Farid, BENBOUDJEMA
Professeur des universités, ENS Paris-Saclay

Examineur

Marianne, PERRIN
Maîtresse de conférences, Université Toulouse III

Examinatrice

Nicolas, ANGELLIER
Maître de conférences, Université de Limoges

Examineur

Stéphane, HAMEURY
Docteur et Ingénieur au CSTB, CSTB

Examineur

Sabine, CARE
Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel

Directrice de thèse

Loïc, PAYET
Ingénieur, CSTB

Co-encadrant de thèse

Benjamin, MAILLET
Ingénieur de recherche, Université Gustave Eiffel

Invité

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une contribution significative de nombreuses personnes que je tiens ici à remercier.

Cette thèse a été financée par le CSTB de Marne-la-Vallée au sein de la Direction Sécurité, Structures et Feu (DSSF) et elle a été réalisée en collaboration avec le laboratoire Navier à l'école des Ponts et Chaussées (équipe Matériaux et Structures Architecturés).

Je tiens à exprimer tout d'abord ma profonde gratitude à mes encadrants de thèse, Sabine CARE et Loïc PAYET, pour leur accompagnement, leur soutien et de m'avoir donné la possibilité de travailler sur un sujet très passionnant. Merci pour tous nos échanges très enrichissants sur la science du bois et sur les aspects normatifs. Je suis très reconnaissante pour tous vos conseils, encouragements pendant les moments difficiles et votre écoute pendant ces dernières années.

Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail de thèse et pour nos échanges lors de la soutenance. Je remercie chaleureusement Laurent BLERON et Antonin FABBRI d'avoir accepté d'être rapporteur de mon travail de thèse et d'avoir consacré du temps pour évaluer mon travail et de lire ce manuscrit d'une manière approfondie. Un grand merci à Marianne PERRIN, Nicolas ANGELLIER, Farid BENBOUDJEMA, Stéphane HAMEURY et Benjamin MAILLET pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de mon travail.

J'ai eu l'honneur d'avoir Farid BENBOUDJEMA comme président de mon jury de thèse. Merci Farid pour ta grande gentillesse et ton soutien depuis mon arrivée en Master 2 à l'ENS Paris-Saclay. Je serai toujours très reconnaissante pour ton aide!

J'adresse mes vifs remerciements à l'équipe IRM du laboratoire Navier : Jaime, Benjamin, Pascal et Rahima. Merci de m'avoir formée sur l'IRM ainsi que l'aide sur le traitement de données, pour votre attention lors de mes nombreuses questions et pour la bonne humeur lors de mes passages à l'IRM. Merci Jaime pour ton aide et pour les nombreuses blagues qui ont toujours rendu les heures des mesures IRM très courtes! Merci à Benjamin pour le chocolat, le café et pour toutes nos discussions!

Je souhaite remercier chaleureusement l'ensemble des membres de l'équipe SMP et EA2R du CSTB pour m'avoir facilité l'intégration dans les deux équipes.

J'exprime ma reconnaissance à l'ensemble des membres du laboratoire Navier. Merci à Hocine DELMI pour m'avoir aidé à la découpe de mes échantillons et à la réalisation des montages expérimentaux et pour les dépannages en tout genre. Merci à Gilles MOREAU et Christophe BERNARD pour votre aide et votre bonne humeur lors de mes essais mécaniques. Merci à Marie-Françoise KASPI pour ta grande gentillesse, ton écoute et ton aide administratif. Merci à Gilles FORET pour les échanges enrichissants. Un grand merci à Michel BORNERT pour ses conseils et son aide concernant l'utilisation de la corrélation d'images numériques. Merci également à Julien ARCHEZ pour son aide lors des mesures de Corrélation d'images.

Un grand merci à tous les collègues de l'Ecole des Ponts et du CSTB avec qui j'ai travaillé, discuté ou partagé un café avec. Merci pour tous les moments qu'on a passé ensemble. Je pense en particulier à Abdessamad, Élodie, Miora, Nagham, Omar, Alma, Bunthan, Aya, Antoine, Elisa, Charlotte, May, Leila, Hussein, Hassan et Youssef. J'ai eu la chance de partager mon bureau pendant ma thèse avec les meilleurs co-bureaux qu'on peut souhaiter avoir : merci Kadidja, Insaf, Ilias, Yassine et Hussein d'avoir rendu le quotidien à l'école très conviviale, pour nos discussions et pour tous les moments qu'on a partagé et qu'on partage toujours ensemble!

J'exprime ma profonde gratitude également à mes amis pour tous les moments précieux passé ensemble et pour leur support.

Je remercie du fond de mon cœur ma chère famille au Liban et en France pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements pendant ces trois années de thèse.

Pour finir, j'adresse mes plus grandes remerciements à mon mari pour sa présence précieuse tout au long de la thèse. Merci Omar pour ta patience, ton aide, ton soutien et ton écoute. Je dédie ce travail à toi.

RÉSUMÉ

Le bois est un matériau hygroscopique dont les propriétés mécaniques dépendent de sa teneur en humidité. Les normes de dimensionnement actuelles (Eurocode 5) prennent en considération la sensibilité du bois aux variations climatiques par l'intermédiaire d'un coefficient de modification de la charge à la rupture (k_{mod}) déterminé en fonction des classes de service. Cependant, l'Eurocode 5 ne prend pas en compte la présence de gradients hydriques qui peuvent se développer au sein du matériau. Dans ce travail, on étudie l'impact de gradients hydriques sur le comportement mécanique en flexion d'éléments en bois et en particulier sur leurs charges à la rupture. Dans un premier temps, on s'intéresse à l'étude de la diffusion hydrique dans le bois selon les directions d'anisotropie et pour différents cas de sollicitations hydriques. À partir des mesures par Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), on montre que la distribution spatiale de la teneur en humidité a lieu différemment selon les directions d'anisotropie. En effet, un gradient fort se développe selon le sens transversal contrairement au sens des fibres. Par ailleurs, on montre que dans le cas d'exposition à des climats réels, un élément en bois pour lequel la diffusion de l'humidité pénètre selon les directions transversales présentera un gradient hydrique en quasi-permanence, contrairement à ce qui est supposé aujourd'hui dans les règles de calcul en fonction des classes de service. Dans un deuxième temps, on étudie l'impact de la présence de différents gradients hydriques sur le comportement mécanique du bois en flexion 4 points. On montre ainsi que la présence de l'humidité induit un comportement non linéaire dans l'élément. Par ailleurs, la présence des contraintes induites par la diffusion hydrique engendre une augmentation remarquable de la charge à la rupture des éléments. Finalement, on propose une modélisation numérique du comportement des éléments en bois pour calculer la charge à la rupture dans différents cas de sollicitations hydriques. L'ensemble des résultats est discuté par rapport aux règles de dimensionnement de l'Eurocode 5 et notamment par rapport aux classes de service.

Mots clés : Bois, Comportement mécanique, Eurocode 5, Diffusion hydrique, IRM, Gradient hydrique.

ABSTRACT

Water transport in wood material plays a key role regarding its mechanical and physical properties in various situations, especially in outdoor conditions. Correct estimation of moisture content (MC) inside wooden elements is an essential step to design timber structures. Eurocode 5 considers this sensitivity to average climatic conditions (depending on Temperature (T) and Relative Humidity (RH) variations) through three service classes. Specifying wood to one of these service classes will induce the modification of its mechanical resistances by means of a modification coefficient (k_{mod}). However, this approach does not consider the effect of the kinetics of moisture transport in wood and the variations of climatic conditions on the development of moisture gradients within a wooden member. This work aims to develop a better understanding and specification on how climatic variations and direction of anisotropy can impact the moisture distribution especially in large wooden elements and hence the strength of these elements in order to evaluate and optimize the actual dimensioning method of timber structures. Moisture diffusion in the hygroscopic state was studied using Magnetic Resonance Imaging (MRI) measurements. The obtained profiles showed that moisture gradients develop differently along the anisotropic directions of wood. On the other hand, experimental and numerical study of moisture diffusion in various conditions showed that moisture gradients exist almost permanently in the wooden element. Furthermore, four point bending tests on wooden beams subjected to transversal moisture diffusion showed that the presence of moisture can in fact enhance the wood's ductility. On the other hand, the presence of moisture induced stresses generate a remarkable increase in the breaking load of the elements. Finally, we propose a numerical modeling of the behavior of wooden elements to calculate the breaking load in various moisture penetration scenarios. All the results of this work are discussed with regard to Eurocode 5 and especially to the service classes.

Key words : Wood, Eurocode 5, Mechanical behavior, Moisture diffusion, Moisture gradient, MRI, Four point bending.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	16
I État de l'art	17
1 État de l'art	19
1.1 Généralités sur le matériau bois	21
1.1.1 Structure du bois	22
1.1.2 Microstructure des résineux	22
1.1.3 Composition chimique et organisation de la paroi cellulaire	23
1.2 Caractéristiques hydriques du bois	25
1.2.1 États de l'eau dans le bois et leurs modes de transport . . .	25
1.2.2 Teneur en humidité moyenne du bois	26
1.2.3 Isotherme de sorption	27
1.2.4 Méthodes de caractérisation des profils hydriques	28
1.3 Comportement mécanique du bois en fonction de son état hydrique	29
1.3.1 Généralités sur le comportement mécanique du bois	30
1.3.2 Déformations hydriques du bois	32
1.3.3 Effet de la teneur en humidité sur le comportement méca- nique du bois	33
1.4 Comportement des éléments en bois selon l'Eurocode 5	40
1.4.1 Origine de l'abaque de l'Eurocode 5	41
1.4.2 Validité de l'abaque	43
1.4.3 K_{mod} et K_{def}	48
1.5 Objectifs de la thèse	49

II	Étude de la diffusion hydrique dans le bois	53
2	Matériaux et méthodes	57
2.1	Matériaux - l'épicéa	58
2.1.1	Isothermes de sorption	58
2.1.2	Coefficients de dilatation hydrique	61
2.2	Protocole expérimental	62
2.3	Résonance magnétique nucléaire du proton	64
2.3.1	Principe de la RMN	65
2.3.2	Séquences RMN	67
2.3.3	Principe de l'IRM	68
2.3.4	Méthode de calibration du signal	70
2.3.5	Estimation de l'incertitude de mesure	72
2.4	Mesure des variations dimensionnelles	74
3	Transfert hydrique : Résultats expérimentaux IRM	75
3.1	Introduction	77
3.2	Validation des mesures IRM	77
3.2.1	Évolution de l'intensité du signal en fonction de la variation de masse d'eau	77
3.2.2	Évolution de la teneur en humidité moyenne par pesée et par IRM	77
3.3	Humidification	80
3.4	Séchage	83
3.5	Comparaison entre les différents échantillons	85
3.6	Conclusions	91
4	Modélisation numérique des transferts hydriques dans le domaine hygroscopique	93
4.1	Introduction	95
4.2	Modes de diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique	95
4.3	Modélisation de la diffusion hydrique isotherme	97
4.3.1	Méthodes d'identification des paramètres de l'équation de Fick (modèle global de diffusion)	98
4.3.2	Identification des coefficients du modèle de diffusion par la méthode des éléments finis	103
4.4	Résultats	106
4.4.1	Identification du coefficient de diffusion longitudinal	106
4.4.2	Identification du coefficient de diffusion transversal	111

4.4.3	Discussion	115
4.5	Simulation des profils d'humidité dans un cas réel	116
4.5.1	Hypothèses de calcul	116
4.5.2	Résultats et discussion par rapport à l'Eurocode 5	118
4.6	Conclusions	121
III Comportement mécanique des éléments de structures en bois en fonction du gradient d'humidité		123
5	Matériaux et méthodes	127
5.1	Matériaux : le bois lamellé-collé	128
5.2	Conditionnement des poutres	130
5.2.1	Cas 1 : conditionnement en classe de service 3 (HR=99%)	130
5.2.2	Cas 2 : conditionnement en milieu externe	133
5.3	Mesures de l'état hydrique	134
5.3.1	Échantillons de référence	134
5.3.2	Mesures par résonance magnétique nucléaire	135
5.3.3	Mesures avec un humidimètre à pointe	135
5.4	Essais de flexion 4 points	137
5.5	Mesures de champs par corrélation d'images numériques	138
6	Diffusion hydrique dans les poutres	141
6.1	Profils hydriques expérimentaux	142
6.1.1	Cas 1 : diffusion hydrique en milieu contrôlé	142
6.1.2	Cas 2 : diffusion hydrique en milieu extérieur	150
6.1.3	Effet de bord dans l'IRM	157
6.2	Modélisation des transferts hydriques	161
6.2.1	Cas de diffusion isotherme (dans la caisse)	162
6.2.2	Cas de la diffusion non isotherme (à l'extérieur)	168
6.2.3	État d'humidité des poutres avant les essais mécaniques	178
6.3	Conclusions	180
7	Essais de flexion sur poutres en présence de gradient d'humidité	181
7.1	Introduction	183
7.2	Résultats des essais de flexion	184
7.2.1	Courbes force-flèche	184
7.2.2	Évolution du module de Young en fonction de l'humidité	187
7.2.3	Évolution de la flèche à la rupture en fonction de l'humidité	189

7.2.4	Évolution de la charge à la rupture en fonction de l'état hydrique	190
7.3	Effet de l'humidité sur le comportement non-linéaire en flexion . . .	192
7.3.1	Observations à partir des courbes force-flèche et des jauges de déformations	192
7.3.2	Origine du comportement non linéaire	194
7.3.3	Observations à partir des mesures DIC	195
7.4	Conclusions	201
8	Mesures des champs de déformations hydriques par corrélation d'images numériques	203
8.1	Introduction	204
8.2	Dispositif de mesure des déformations par CIN du lamellé collé . .	205
8.2.1	Dispositif de maintien de l'échantillon	205
8.2.2	Paramètres de prise d'images et du calcul DIC	207
8.2.3	Chargement hydrique	207
8.3	Analyse des champs de déformations	208
8.3.1	Étude de la déformée	208
8.3.2	Évolution de la déformation au cours du temps	210
8.4	Modélisation numérique de l'effet de gradient hydrique sur le champ de déformations	212
8.4.1	Propriétés des matériaux	213
8.4.2	Effet de la colle sur la déformation du lamellé-collé	213
8.4.3	Validation du modèle	215
8.5	Conclusions	220
9	Modélisation numérique des effets du gradient d'humidité sur le comportement mécanique des éléments en bois	221
9.1	Introduction	222
9.2	Lois de comportement mécanique du bois	223
9.2.1	Traction	223
9.2.2	Compression	226
9.2.3	Flexion	228
9.3	Modélisation du comportement mécanique du bois	230
9.3.1	Comportement élastique	230
9.3.2	Expansion hydrique	231
9.3.3	Modélisation du comportement plastique en compression . .	231
9.3.4	Modèle numérique	232
9.3.5	Contraintes induites par la diffusion hydrique	236

9.4	Confrontation modèle-expérience	237
9.4.1	Estimation de la charge à la rupture	237
9.4.2	Estimation de la limite élastique	240
9.4.3	Comportement non-linéaire avant la rupture	240
9.5	Discussion	243
9.5.1	Estimation de la charge à la rupture en fonction de différents cas de pénétration de l'humidité	243
9.5.2	Discussion par rapport à l'Eurocode 5	244
9.6	Conclusions	247
	Conclusion générale et perspectives	249
	Bibliographie	262
	Annexes	263
	A Profils de diffusion hydrique	265
	B Résultats des essais mécaniques	275
	Table des figures	294
	Liste des tableaux	296

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Selon des statistiques récentes, le secteur du bâtiment constitue la deuxième source d'émission de CO_2 en France avec un pourcentage de 38% du total des émissions. Face aux urgences climatiques actuelles, l'ensemble des secteurs économiques recherche des solutions pour faire face au changement climatique. Par exemple, le secteur de la construction tend à remplacer de plus en plus les matériaux de construction traditionnels tels que le béton et l'acier par des matériaux de construction biosourcés. Dans ce contexte, le bois s'impose comme une solution incontournable puisqu'il présente de nombreux avantages tant sur le plan environnemental que sur le plan technique. En effet, le bois constitue un matériau de construction naturel, renouvelable et il possède des propriétés mécaniques très intéressantes. Cependant, plusieurs facteurs limitent le bon positionnement du bois sur le marché des matériaux de construction tel que la sensibilité de ses propriétés mécaniques à l'humidité ambiante.

Le bois est en effet un matériau hygroscopique : il absorbe de l'humidité quand le milieu ambiant est humide et il la restitue quand le milieu devient plus sec. Cette adsorption et désorption de l'humidité engendre un transfert hydrique au sein du bois et un changement de l'ensemble de ses propriétés mécaniques en fonction de la quantité d'humidité présente dans ce dernier. En effet, d'une manière générale, les propriétés mécaniques du bois diminuent quand sa teneur en humidité augmente. Cette dépendance des performances mécaniques à la teneur en humidité est prise en compte par les normes de dimensionnement actuelles (notamment la NF EN 1995-1-1, Eurocode 5). Par exemple, l'Eurocode 5 propose 3 classes de services en fonction de l'humidité relative et la température du milieu ambiant : la classe de service 1 correspond à un intérieur chauffé et sec (l'humidité relative est inférieure à 65% pour une température égale à 20°C) ; la classe de service 2 correspond à une humidité relative dépassant 85% que quelques semaines par an et la classe de service 3 correspond à des teneurs en humidité dans le bois supérieures à celles de la classe de service 2. Une fois que la structure bois est classée dans l'une de ces classes de service, ses propriétés mécaniques sont modifiées par l'intermédiaire d'un coefficient de modification de la charge à la rupture (k_{mod}) qui dépend de la classe de service considérée.

Selon les normes actuelles, la modification de la charge à la rupture se fait d'une manière forfaitaire en fonction de la valeur de la teneur en humidité moyenne dans l'élément. La possibilité qu'un gradient hydrique se développe dans l'élément est négligée par la suite. En réalité, du fait du caractère hygroscopique et de la diffusion hydrique dans le bois, un gradient hydrique peut se former au sein du matériau. Par ailleurs, l'effet d'un tel gradient sur la charge à la rupture du bois a été peu étudié dans la littérature, ce qui peut expliquer que les normes de dimensionnement actuelles ne tiennent pas compte des éventuels gradients hydriques. Ceci nous permet de se poser les questions suivantes : Est-ce que la méthode de dimensionnement actuelle est trop sécuritaire ? Est-ce qu'un dimensionnement qui prend en compte l'effet de l'anisotropie de bois sur le changement des classes de service et de la présence de gradients d'humidité ne serait pas plus pertinent ?

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier l'impact d'un gradient hydrique sur le comportement mécanique du bois. Nous nous intéressons dans un premier temps à étudier et caractériser les transferts de l'humidité en absence de l'eau libre dans des conditions climatiques menant à la classe de service 3 de l'Eurocode 5. Nous utiliserons l'Imagerie par Résonance Magnétique afin de réaliser un suivi non destructif et régulier des transferts hydriques. Ensuite, nous étudions l'influence de la présence des gradients hydriques sur le comportement mécanique du bois à partir d'essais de flexion 4 points.

Ce travail est composé de neuf chapitres regroupés en trois parties :

La partie **I**, qui est composée uniquement d'un seul chapitre (chapitre 1), est consacrée à la présentation de l'état de l'art. Nous présentons tout d'abord, une description de la structure multi-échelle du bois ainsi que ses caractéristiques hydriques. Ensuite, nous présentons une revue bibliographique de l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présentons l'approche proposée par l'Eurocode 5 pour réaliser le dimensionnement des structures en bois en fonction de l'état hydrique du bois. Finalement, nous présentons l'objectif de la thèse ainsi que la stratégie adoptée au cours de ce travail.

La partie **II** de la thèse est consacrée à l'étude de la diffusion hydrique dans le bois en fonction de la teneur en humidité. Cette partie est composée de 3 chapitres :

Le chapitre 2 est dédié à la présentation des matériaux et méthodes employés pour l'étude des transferts hygroscopiques isothermes dans le bois. Nous décrivons tout d'abord les échantillons étudiés et le conditionnement hydrique mis en œuvre au cours de ces essais. Nous détaillons ensuite les méthodes expérimentales de caractérisation de transfert. Le suivi par l'Imagerie par Résonance Magnétique représente la méthode la plus utilisée au cours de la thèse pour réaliser le suivi régulier. Elle représente une méthode de mesure non destructive et non invasive du transfert de l'humidité.

Au cours du chapitre 3, nous présentons les principaux résultats de l'étude du

transfert hydrique au cours de phases d'humidification et de séchage. Ces résultats nous permettent d'étudier la cinétique de transfert selon les directions d'anisotropie du bois et pour différents cas de sollicitations hydriques (humidification et séchage).

Le chapitre 4 est consacré à la modélisation numérique des transferts hydriques isothermes du bois. Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographique des différents modes de transport de l'humidité dans le bois, les différents modèles existants ainsi que les méthodes de résolution des modèles dans la littérature. Nous présentons ensuite le modèle de diffusion mis en œuvre dans ce travail ainsi que notre méthode d'identification des paramètres de ce modèle. Dans la troisième partie de ce chapitre une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques est proposée. Les résultats de cette identification nous permettent ensuite d'estimer les profils hydriques au sein d'une poutre (dans sa section) dans le cas d'un climat réel de 4 villes en France. Les résultats de ces simulations nous permettent de conclure sur le changement de classe de service en cas de diffusion réelle.

L'analyse du comportement mécanique des éléments en bois selon différents états hydriques est l'objectif de la partie III de la thèse. Nous nous intéressons en particulier à l'étude du comportement mécanique en présence de gradients hydriques résultants de deux types de sollicitations hydriques : une diffusion dans un milieu ambiant contrôlé et humide et une diffusion non isotherme dans un milieu extérieur (protégé de la pluie).

Le chapitre 5 présente l'ensemble des matériaux et méthodes utilisés dans cette partie. Nous présentons un descriptif des poutres étudiées, des protocoles de conditionnement hydrique, des méthodes de caractérisation du transfert hydrique, de l'essai de flexion 4 points réalisé ainsi que de la méthode de Corrélation d'images numériques utilisée.

Dans le chapitre 6, on présente dans un premier temps les résultats expérimentaux de l'étude de la diffusion hydrique isotherme et non isotherme à partir des mesures par l'IRM et par l'humidimètre à pointe (méthode utilisée sur chantier). Dans un deuxième temps, nous avons recours à la modélisation numérique des transferts hydriques isothermes et non-isothermes afin d'accéder au champ complet de la distribution de la teneur en humidité dans la section des poutres étudiées.

Au cours du chapitre 7, nous présentons les résultats des essais mécaniques de flexion 4 points sur les poutres étudiées dans différents états hydriques en présence de gradients d'humidité. On montre ainsi que la présence d'un gradient hydrique a un effet non négligeable sur le comportement mécanique du bois en général et notamment sur la charge à la rupture.

Nous nous intéressons ensuite à la modélisation des poutres en présence d'un gradient hydrique.

Afin de mettre en œuvre un modèle couplé hydro-mécanique, nous réalisons, dans le chapitre 8, un suivi par corrélation d'images numériques d'un échantillon ayant la même section que celle des poutres testées en flexion et soumis à des sollicitations hydriques similaires. Cette étude nous permet de valider les coefficients d'expansion hydriques déterminés par ailleurs et la capacité du modèle de diffusion à prévoir les déformations induites par la diffusion hydrique.

Enfin, le chapitre 9 fait l'objet d'une modélisation numérique du comportement hydromécanique des poutres. Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographique sur le comportement mécanique du bois en fonction de l'humidité. Nous proposons un modèle numérique qui tient compte de la différence de comportement en compression et en traction en fonction de l'humidité et des contraintes induites par la diffusion hydrique. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous étudions numériquement l'effet de la présence de plusieurs types de gradients hydriques sur la charge à la rupture d'une poutre en bois en flexion 4 points. Le chapitre se termine par une discussion des résultats par rapport à l'Eurocode 5.

À la fin de ce manuscrit de thèse, une synthèse du travail et une conclusion générale sont présentées. Nous proposons ensuite des perspectives.

Première partie

État de l'art

Dans ce chapitre, nous proposons une revue bibliographique pour préciser les aspects à prendre en compte lors du dimensionnement de structures en bois. Nous décrivons, tout d'abord, la microstructure et les constituants du bois. Ensuite nous présentons les principales caractéristiques hydriques du bois ainsi que l'effet de la teneur en humidité sur son comportement mécanique. Finalement, nous présentons les principaux objectifs de la thèse ainsi que la démarche globale mise en œuvre dans ce travail.

Sommaire

1.1	Généralités sur le matériau bois	21
1.1.1	Structure du bois	22
1.1.2	Microstructure des résineux	22
1.1.3	Composition chimique et organisation de la paroi cellulaire	23
1.2	Caractéristiques hydriques du bois	25
1.2.1	États de l'eau dans le bois et leurs modes de transport	25
1.2.2	Teneur en humidité moyenne du bois	26
1.2.3	Isotherme de sorption	27
1.2.4	Méthodes de caractérisation des profils hydriques	28
1.3	Comportement mécanique du bois en fonction de son état hydrique	29
1.3.1	Généralités sur le comportement mécanique du bois	30
1.3.2	Déformations hydriques du bois	32
1.3.3	Effet de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois	33
1.4	Comportement des éléments en bois selon l'Eurocode 5	40

1.4.1	Origine de l'abaque de l'Eurocode 5	41
1.4.2	Validité de l'abaque	43
1.4.3	K_{mod} et K_{def}	48
1.5	Objectifs de la thèse	49

1.1 Généralités sur le matériau bois

Le bois est un matériau naturel composite fortement hétérogène et hygroscopique. Il possède une structure cellulaire, poreuse, hiérarchique et anisotrope. La structure du bois affecte significativement ses propriétés physiques telles que sa perméabilité, sa conductivité thermique, la diffusion de l'humidité, ses propriétés mécaniques et biologiques. Par ailleurs, la complexité de sa structure s'étend à plusieurs échelles (voir figure 1.1). À l'échelle macroscopique, nous pouvons considérer que le bois est un matériau orthotrope avec des propriétés homogènes selon une direction. Il est défini selon 3 directions principales : Longitudinale (L), Radiale (R) et transversale (T) (figure 1.2).

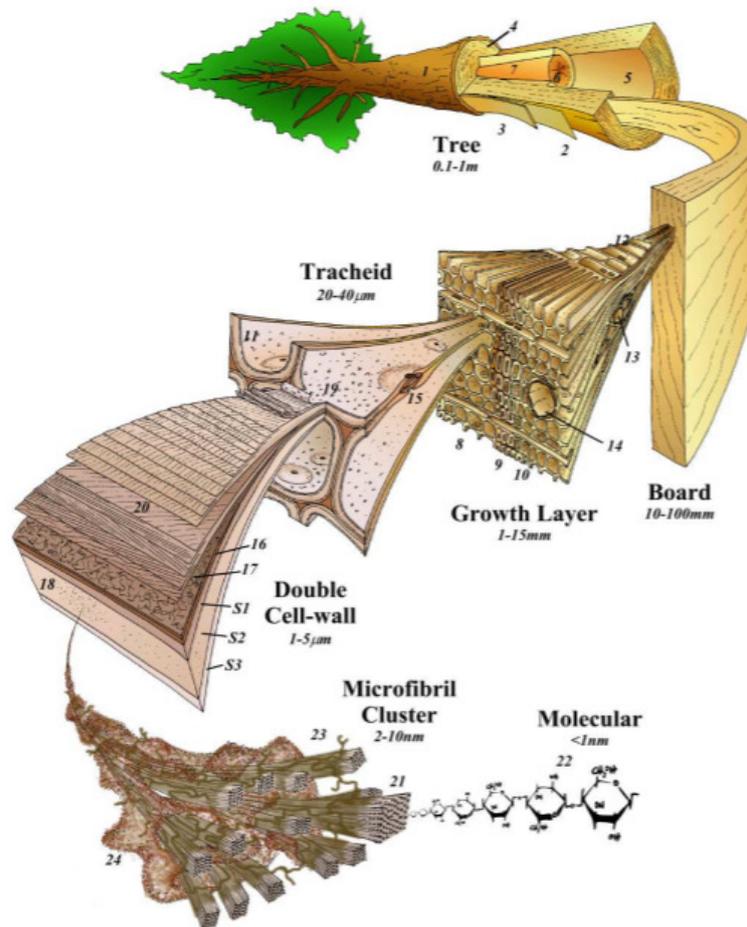


FIGURE 1.1 – Représentation schématique de la structure multi-échelle du bois résineux, figure extraite de (Harrington 2002).

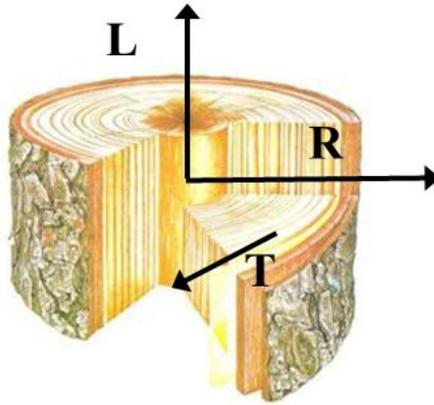


FIGURE 1.2 – Directions principales d’anisotropie du bois. Figure d’après <https://slideplayer.fr/slide/10229491/>.

1.1.1 Structure du bois

On distingue deux grandes familles d’arbres : les résineux et les feuillus. Nous nous intéressons en particulier aux résineux au cours de cette thèse et nous présentons dans la suite une description de leurs microstructures. Les résineux ou les conifères, sont des gymnospermes, c’est-à-dire des plantes ayant des graines nues non incluses dans des fruits fermés. Ils occupent un tiers de la forêt française actuellement et sont largement exploités dans les constructions modernes aujourd’hui.

1.1.2 Microstructure des résineux

La microstructure typique d’un résineux est donnée par la figure 1.3. Les résineux sont composés principalement de trachéides (qui représentent 90 à 95% du volume total du bois résineux), de rayons ligneux et éventuellement de canaux résinifères. Les trachéides longitudinales mesurent 3 mm de longueur en moyenne (les longueurs peuvent varier entre 2 et 9 mm). Les trachéides sont des cellules orientées selon le sens longitudinal. Elles ont une forme allongée, de section transversale polygonale et creuse (lumen). Elles se croisent au niveau des extrémités ce qui permet d’assurer la conduction de la sève brute grâce à la présence de ponctuations. Par ailleurs, elles offrent un soutien mécanique à l’arbre. On note deux types de trachéides au sein d’un arbre résineux : trachéides de bois de printemps et trachéides de bois d’été. Les trachéides de bois de printemps (bois initial) et celles de bois d’été (bois final) se différencient par leurs diamètres et leurs masses

volumiques. Celles du bois de printemps sont caractérisées par des parois minces et un diamètre intérieur important. Les trachéides de bois d'été sont caractérisées par des parois épaisses et un diamètre intérieur faible. Ceci engendre une masse volumique beaucoup plus importante des trachéides de bois d'été.

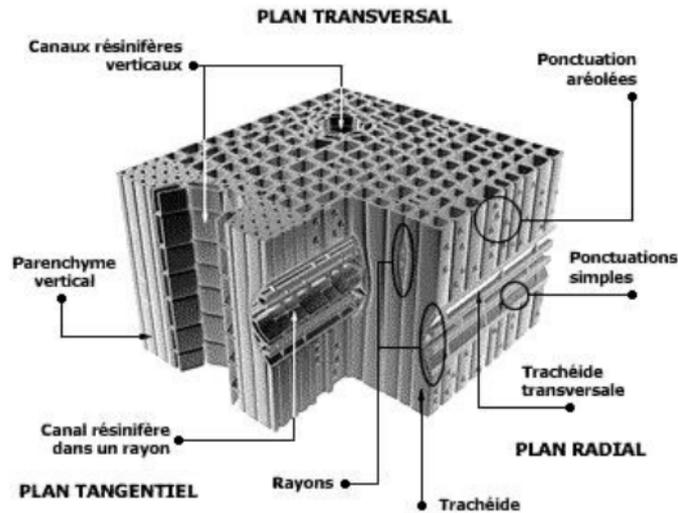


FIGURE 1.3 – Vue schématique de la microstructure du bois résineux d'après (Bonnet 2017).

Des ponctuations aréolées (ouvertures) existent dans le plan RL et permettent la création d'un chemin de passage de la sève brute dans l'arbre (figure 1.4).

1.1.3 Composition chimique et organisation de la paroi cellulaire

Le bois est formé essentiellement de plusieurs matières :

- La cellulose ($(C_6H_{10}O_5)_n$) représente le constituant principal du bois. Sa proportion varie entre 40 et 50% de la matière composante du bois. Elle est présente sous forme de microfibrilles.
- Les hémicelluloses sont des molécules ramifiées amorphes qui constituent entre 20 et 25% de composants du bois.
- La lignine représente environ 20 à 30% des constituants du bois. Sa présence confère au bois une bonne résistance mécanique.

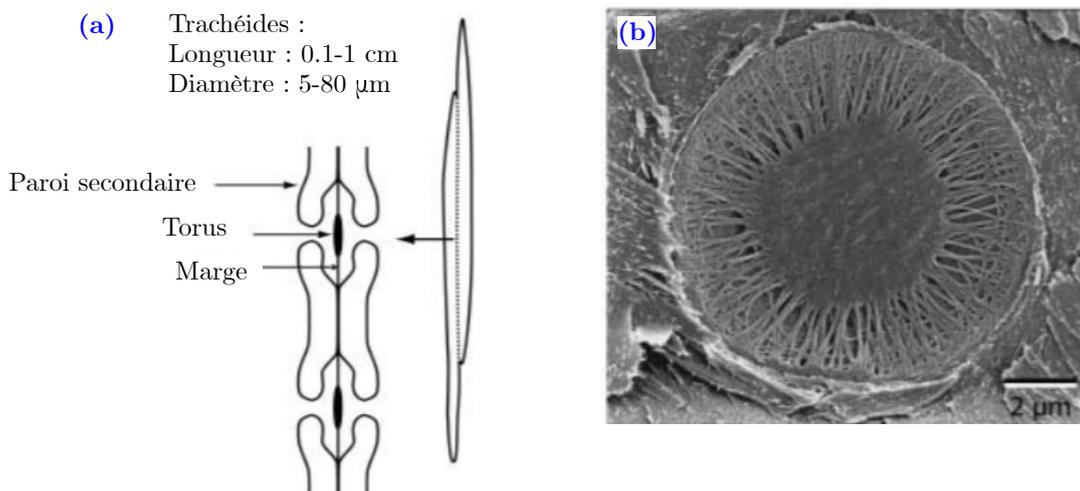


FIGURE 1.4 – (a) Représentation schématique d’une ponctuation aréolée située sur la paroi radiale d’un résineux. (b) Image au microscope électronique à balayage (MEB) d’une ponctuation d’un résineux montrant la zone d’épaississement central (torus) et la région extérieure poreuse (marge). Extrait de (Choat ; Cobb ; Jansen 2008).

- Les extractibles sont présents avec une proportion entre 0 et 10%. Ils rendent le bois parfait (duramen) plus résistant aux attaques biologiques (champignons, insectes ..).

À l’échelle de l’ultra structure (échelle du micron) la paroi cellulaire du bois (la matière englobante des vides tels que les lumens ...) est formée de plusieurs constituants (voir figure 1.5) :

- La paroi inter-cellulaire : Elle est extérieure à la paroi cellulaire et rassemble les cellules entre elles. Elle est composée majoritairement de lignine et son épaisseur varie de 0.5 µm à 1.5 µm (Navi ; Heger 2005).
- La paroi primaire est une couche mince constituée de fibres de cellulose non ordonnées dans une matrice de lignine. Son épaisseur est d’environ 0.1 µm.
- La paroi secondaire est constituée de trois couches : S1, S2 et S3 (voir figure 1.5). Le pourcentage de distribution de ces trois couches est non identique. En effet, la couche centrale (S2) représente 60 à 80% de l’épaisseur totale de la paroi secondaire (Siau 1984). L’orientation des microfibrilles de cellulose dans cette paroi secondaire prend la forme d’une spirale et est différente pour les trois couches. Elle est d’environ 80° et 90° par rapport à l’axe verticale de la cellule pour les couches S1 et S3. Pour la couche S2, une orientation entre 10° et 30° est souvent observée. Cette couche a une influence significative sur les propriétés mécaniques du matériau. L’orien-

tation des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe des cellules est à l'origine du phénomène d'anisotropie du retrait-gonflement du bois (Siau 1984).

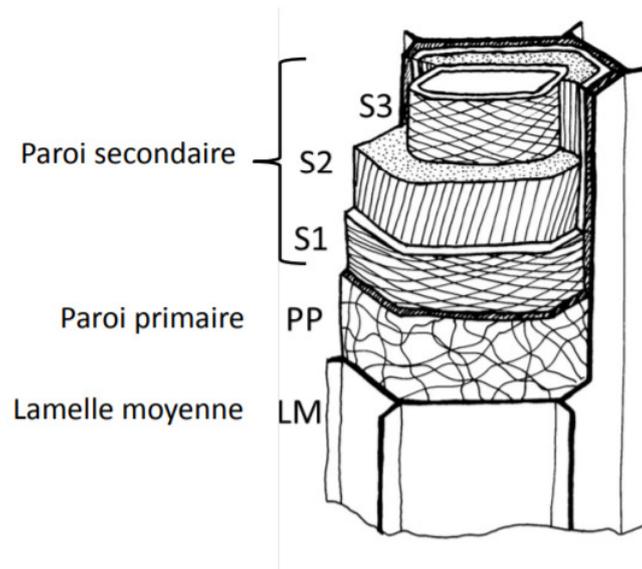


FIGURE 1.5 – Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire.

1.2 Caractéristiques hydriques du bois

La cellulose et l'hémicellulose présentent des groupes hydroxyles (-OH). Ces groupes hydroxyles qui se situent dans les zones amorphes de la cellulose ou dans les molécules de l'hémicellulose peuvent interagir avec les molécules d'eau et créent ainsi un « pont hydrogène ». L'hydrophilie des polymères constituant le bois (notamment l'hémicellulose et la partie amorphe de la cellulose) lui confère, donc, son caractère hygroscopique : il adsorbe ou désorbe de l'humidité au niveau de la paroi cellulaire afin de s'équilibrer avec son milieu ambiant.

1.2.1 États de l'eau dans le bois et leurs modes de transport

Dans le bois, l'eau peut exister sous trois états différents (hormis l'eau de constitution) :

Eau libre (ou eau capillaire)

C'est l'eau présente sous forme liquide. Elle occupe les vides cellulaires du bois (lumens) ainsi que les micropores des parois cellulaires. Elle est présente dans le bois vert ou dans le cas d'un contact avec de l'eau liquide. L'extraction de l'eau libre (sans perte d'eau liée) ne provoquera pas un retrait du bois. Il est communément admis que le transport de l'eau libre se fait à partir d'effets capillaires, même si des déviations à la loi Washburn sont observées (D. M. Nguyen ; Care ; Courtier-Murias ; Zhou ; Coussot 2021). Ce mode de transport reste une question ouverte et des résultats récents ont montré que c'est l'eau liée qui pilote le transport de l'eau libre (Penvern ; Zhou ; Maillet ; Courtier-Murias ; Scheel ; J. Perrin ; Weitkamp ; Bardet ; Caré ; Coussot 2020). Dans le cadre de ce travail, l'eau libre n'est pas considérée.

Eau liée

Elle représente l'eau adsorbée à partir des liaisons hydrogènes au niveau des constituants chimiques des parois cellulaires du bois. Elle est à l'origine des phénomènes de retrait-gonflement du bois. Elle peut être présente en absence d'eau libre (domaine hygroscopique).

La diffusion d'eau liée se fait des régions de fortes concentrations vers les régions de faibles concentrations. Ce transport d'eau liée s'effectue tout au long de la paroi cellulaire du matériau.

Vapeur d'eau

Elle est présente dans les vides et les pores non-saturés en eau libre. Si l'eau libre n'existe pas dans les cavités, la vapeur est en équilibre thermodynamique avec l'eau liée présente sur les parois cellulaires (Zhou 2018).

Dans le domaine hygroscopique, le transfert de l'humidité dépend du transfert de la vapeur (Engelund ; Thygesen ; Svensson ; Hill 2013). La diffusion de la vapeur dans le bois est contrôlée essentiellement par les propriétés microstructurelles du bois (tels que les longueurs des fibres et la taille d'autres cavités par exemple). Comme pour l'eau liée, le transport de vapeur se fait par diffusion.

1.2.2 Teneur en humidité moyenne du bois

La teneur en humidité moyenne du bois (MC_{moyen}) est une mesure quantitative de la présence de l'humidité (sans distinction entre les états d'eau liée et eau libre) dans l'ensemble du volume du bois. Elle est exprimée comme étant le rapport entre la masse d'eau présente dans le volume du bois et la masse du bois anhydre (voir équation 1.1). La masse d'eau présente dans le bois est égale à la différence entre la masse du bois humide (m_h) et la masse du bois sec (m_{anhy}). La masse du bois

anhydre est obtenu après un séchage à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse mesurée.

$$MC_{moyen} [\%] = \frac{m_{eau}}{m_{anhy}} \times 100 = \frac{m_h - m_{anhy}}{m_{anhy}} \times 100 \quad (1.1)$$

La teneur en humidité peut varier entre 0% (état anhydre) et des valeurs entre 150-200% à l'état vert (i.e. bois fraîchement abattu).

La notion du point de saturation des fibres (PSF) est proposée par (Tiemann 1906). Elle représente la teneur en humidité à partir de laquelle l'eau liquide est complètement évacuée du bois vert tout en ayant les parois cellulaires saturées en eau liée. Au dessus du PSF, nous retrouvons alors les trois états de l'eau. En revanche, en dessous du PSF, l'humidité existe sous deux formes : vapeur et eau liée. Cependant, des travaux récents basés sur la technique de la résonance magnétique révèlent qu'en réalité les parois cellulaires du bois peuvent sécher même en présence de l'eau libre (Almeida ; Gagné ; Hernández 2007).

Les valeurs du PSF dépendent de l'espèce concernée. Nous retrouvons des valeurs entre 20 et 42% (Siau 1984). Généralement, le PSF est considéré être égal à 30% dans le cas des régions tempérées (Siau 1984).

1.2.3 Isotherme de sorption

Dans le bois, un changement de milieu ambiant (HR et T) engendre une modification de sa teneur en humidité. Cela est dû au caractère hygroscopique du bois. Une augmentation de la teneur en humidité relative HR (en %) engendre une absorption de l'humidité par le bois (phase d'adsorption). Dans le cas contraire, le bois cède de l'humidité (phase de désorption).

On appelle isotherme de sorption (dans le domaine hygroscopique, et en absence d'eau libre), la courbe qui relie le taux d'humidité à l'équilibre du bois ($MC_{équilibre}$) à l'humidité relative HR pour une température donnée T. La figure 1.7 montre un exemple de courbes de sorption obtenues par (Peralta 1995). Les courbes révèlent deux caractéristiques importantes des isothermes de sorption du matériau bois :

- L'isotherme de sorption du bois montre une hystérèse : l'équilibre atteint au cours de la phase de désorption est toujours supérieur à celui obtenu au cours de la phase d'adsorption.
- L'amplitude de l'hystérèse est délimitée par le premier cycle de sorption complet (adsorption depuis l'état anhydre et désorption depuis l'état vert).

Hormis l'effet de l'humidité relative HR et le premier cycle depuis l'état vert, l'hystérèse de sorption dépend de la température et de l'état des contraintes appliquées sur le bois. Des études ont montré que l'augmentation de la température aboutit à une diminution de la teneur en humidité à l'équilibre du bois (figure 1.7).

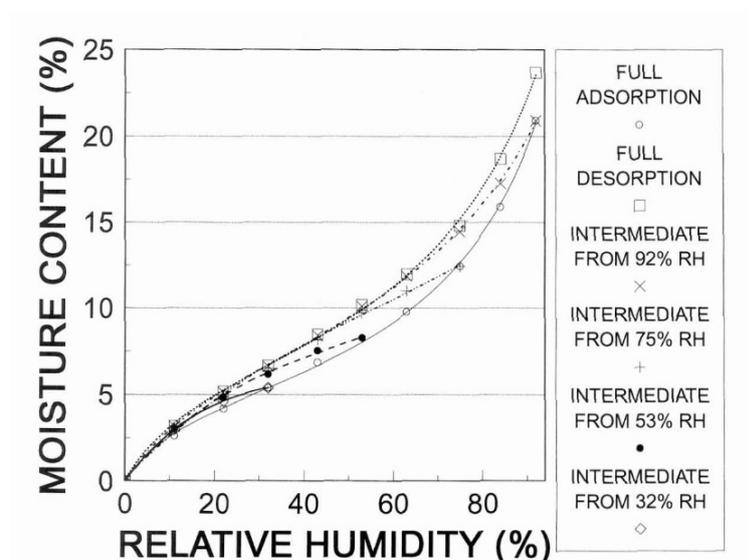


FIGURE 1.6 – Isotherme de sorption au cours de l'adsorption et la désorption du chêne rouge à $T=30^{\circ}\text{C}$. Extrait de (Peralta 1995)

Par ailleurs, l'état des contraintes (compression ou traction) affecte les isothermes de sorption : une diminution de la teneur en humidité à l'équilibre est attendue en présence de contraintes de compression (Skaar 1988 ; Merakeb 2006). L'inverse est vrai dans le cas de contraintes de traction (Skaar 1988). Ceci est essentiellement observé dans le cas où les contraintes sont appliquées selon le sens tangentiel.

1.2.4 Méthodes de caractérisation des profils hydriques

En réalité, sous l'effet des variations climatiques, un élément en bois (par exemple une poutre) n'est jamais complètement en équilibre avec HR et T extérieurs. Par conséquent, les transferts hydriques résultants induisent des gradients d'humidité au sein du matériau.

La méthode la plus fréquemment utilisée dans la littérature pour l'étude des transferts hydriques est la mesure par pesée de l'évolution de la teneur en humidité moyenne. Afin de calculer les profils hydriques, un choix de modèle est nécessaire afin d'identifier les coefficients du modèle de diffusion. Toutefois, cette approche nécessite l'emploi de plusieurs hypothèses sur les modes de transferts hydriques présents (présence ou non de l'échange convectif par exemple), sur le milieu de transfert (infini, semi-infini...), sur les formes de dépendance des coefficients de diffusion à la teneur en humidité (et parfois sur les valeurs d'un coefficient du modèle). Rajoutons à cela que cette méthode requiert quelquefois l'emploi de fonctions objectives afin d'identifier plusieurs coefficients (coefficient de diffusion

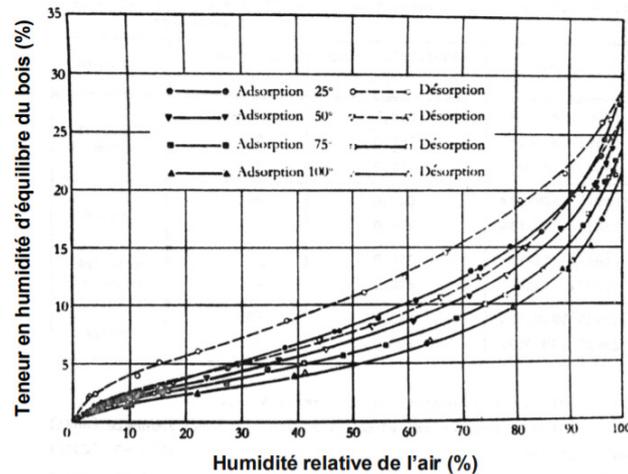


FIGURE 1.7 – Isothermes d’adsorption et de désorption du bois de hêtre à plusieurs températures (Weichert 1963) cité par (Almeida 2006).

et coefficient d’échange surfacique) qui minimisent l’écart entre l’évolution de l’humidité obtenue expérimentalement (par la pesée) et celle calculée numériquement (Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017).

Des méthodes de mesure directes des profils hydriques sont parfois proposées dans la littérature. Nous retrouvons par exemple des méthodes destructives telles que la découpe des échantillons, des méthodes non destructives telles que la gamma-densimétrie (T. A. Nguyen 2014) et la résonance magnétique nucléaire du proton (Zhou 2018) ainsi que des méthodes résistives (Uwizeyimana ; M. Perrin ; Laügt ; Eyma 2021 ; T. A. Nguyen 2014). Ces méthodes permettent de mesurer les profils hydriques du bois sans hypothèses préalables sur les modèles et les coefficients de diffusion.

1.3 Comportement mécanique du bois en fonction de son état hydrique

On a vu précédemment que les polymères constituant le bois le rendent sensible aux variations de la teneur en humidité et de la température. Ces derniers ont un effet non négligeable sur les propriétés mécaniques du bois.

1.3.1 Généralités sur le comportement mécanique du bois

Une conséquence directe de l'arrangement microstructural du bois est son comportement mécanique anisotrope. Le bois est significativement plus résistant selon le sens des fibres (L) en comparaison aux deux autres sens (R et T). Le tenseur des déformations s'exprime dans le domaine élastique selon la loi de Hooke à partir de la relation suivante (notation de Kelvin Voigt) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Avec ε_L , ε_R et ε_T les déformations selon les trois directions d'anisotropie ; γ_{RT} , γ_{LT} et γ_{LR} les déformations de cisaillement selon les trois plans ; E_L , E_R et E_T les modules d'élasticité selon les trois directions d'anisotropie ; G_{RT} , G_{LT} et G_{LR} les modules de cisaillement selon les trois plans ; σ_L , σ_R et σ_T les contraintes normales selon les trois directions d'anisotropie et τ_{RT} , τ_{LT} et τ_{LR} les contraintes de cisaillement selon les trois plans.

Les modules élastiques vérifient la relation suivante :

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}; \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}; \quad \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad (1.3)$$

Avec ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{TL} , ν_{LT} , ν_{LR} , ν_{RL} représentent les coefficients de Poisson.

Le tableau 1.1 montre des valeurs typiques des propriétés élastiques du bois.

TABLE 1.1 – Ordres de grandeur des propriétés élastiques du bois résineux et feuillus à 12% de teneur en humidité d'après (Guitard 1987).

	densité	E_L	E_R	E_T	G_{RT}	G_{TL}	G_{RL}
Unité	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Feuillus	0.65	14400	1810	1030	366	971	1260
Résineux	0.45	13100	1000	636	83.6	745	861

Facteurs influençant la résistance mécanique du bois

Les propriétés élastiques et les résistances du bois sont sensibles à plusieurs facteurs tels que la densité, la teneur en humidité, la température et la présence

des défauts tels que les nœuds. L'effet de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois sera discuté dans la section 1.3.3.

Effet de la densité : L'effet de la densité du bois sur ses propriétés élastiques est direct : plus la densité est élevée plus ses propriétés mécaniques sont meilleures. La figure 1.8 représente un exemple sur l'effet de la densité sur le module élastique longitudinal. La régression effectuée par (Guitard ; El Amri 1987) sur des données expérimentales du module d'Young des résineux montre qu'une correction avec une loi linéaire permet de reproduire la variation du module d'Young des résineux avec la densité.

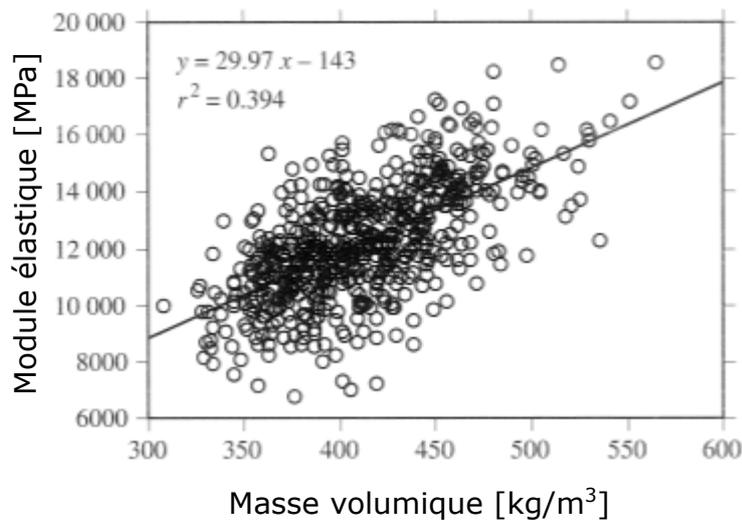


FIGURE 1.8 – Effet de la densité sur le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa d'après (Natterer ; Sandoz 1987).

Effet de la température : La résistance mécanique et la rigidité du bois diminuent avec l'augmentation de la température (WoodHandbook United States 1987). La figure 1.9 illustre l'effet de la température sur le module d'élasticité et la contrainte à la rupture en flexion d'après (Gerhards 1982) .

Effet de la présence de défauts : Les propriétés élastiques et la résistance du bois sont considérablement influencées par les nœuds et par la pente du fil. L'influence des nœuds dépend de leurs tailles, de leurs positions, de leurs formes et du type de contraintes auquel l'élément en bois est soumis. À noter qu'un nœud a un effet plus important sur la plupart des propriétés de résistance que sur la rigidité (WoodHandbook United States 1987).

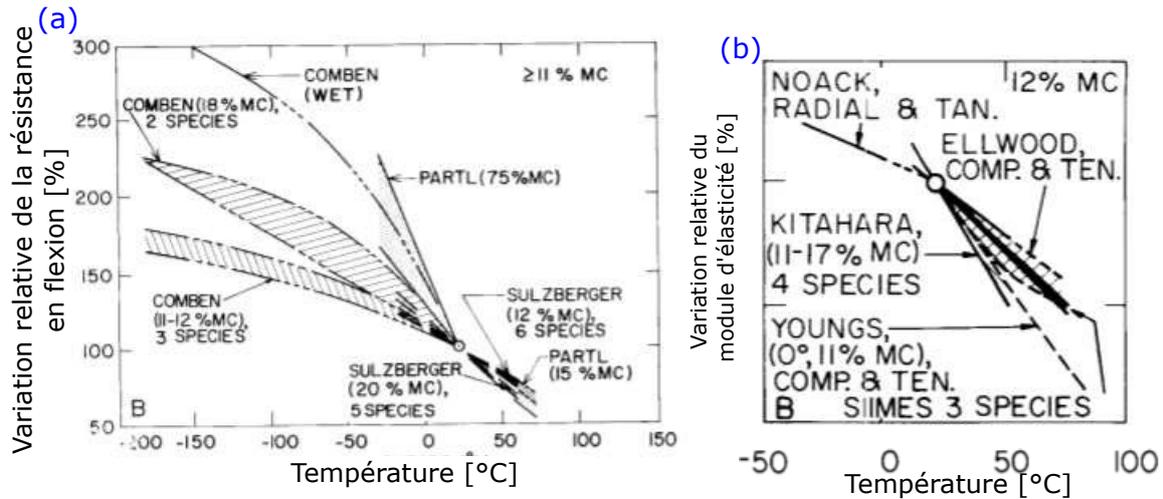


FIGURE 1.9 – Effet de la température sur le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa d'après (Gerhards 1982).

1.3.2 Déformations hydriques du bois

Un élément en bois subit des variations dimensionnelles suite à une adsorption (gonflement) ou une désorption de l'humidité (retrait). Ces variations dimensionnelles n'ont lieu que dans le domaine hygroscopique (i.e. en dessous de PSF) et elles sont dues à une prise ou une perte d'eau liée.

De plus, étant donné que le bois est un matériau anisotrope, ses variations dimensionnelles sont différentes selon la direction considérée (R, T ou L). Les déformations observées sont généralement deux fois moins importantes selon le sens radial que celles selon le sens tangentiel et sont beaucoup plus faibles selon le sens longitudinal. La figure 1.10 montre les courbes typiques obtenues lors d'un retrait ou d'un gonflement du bois selon les 3 directions principales L, R et T. Une relation linéaire existe entre les déformations du bois dans chaque direction et la teneur en eau. Cette linéarité n'est valable qu'entre 4 et 25% (Navi; Heger 2005).

Il est à noter qu'une variabilité des coefficients de dilatation hydrique se trouve au sein d'un même arbre en fonction de la position de l'échantillon prélevé. La figure 1.11 illustre un exemple de la variabilité du coefficient de dilatation longitudinal en fonction de la position initiale de l'échantillon.

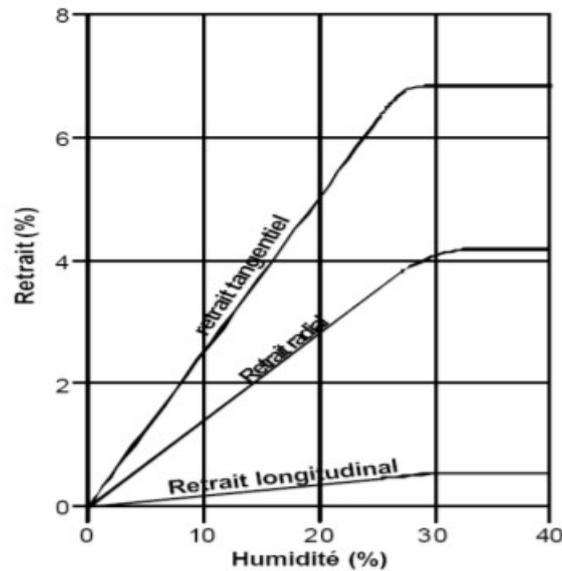


FIGURE 1.10 – Déformations hydriques du bois en fonction des directions d'anisotropie d'après (Merakeb 2006).

1.3.3 Effet de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois

Au-dessus du point de saturation des fibres, l'eau libre remplissant les porosités du bois n'affecte pas sa résistance et ses propriétés élastiques. En revanche, en dessous du PSF, les propriétés élastiques et la résistance du bois dépendent de la teneur en humidité.

Humidité homogène dans le matériau

Il est généralement admis que presque toutes les propriétés mécaniques du bois augmentent lorsque la teneur en humidité (MC) diminue en dessous du point de saturation des fibres (PSF) (figures 1.12 et 1.13). Nous retrouvons de nombreux travaux sur l'étude de l'effet de l'humidité sur les charges à la rupture du bois et sur sa rigidité sous différents types de sollicitations mécaniques.

La revue bibliographique sur l'effet de la teneur en humidité et la température sur les différentes propriétés mécaniques du bois effectuée par (Gerhards 1982) montre qu'une variation de la teneur en humidité entre 12% et 20% provoque une diminution de l'ensemble des propriétés mécaniques du bois dans des proportions différentes. Une diminution de presque 13% est obtenue ainsi pour le module élastique longitudinal, 23% pour le module élastique transversal, 25% pour la charge à rupture en flexion, 35% en compression selon le sens longitudinal et 8% pour

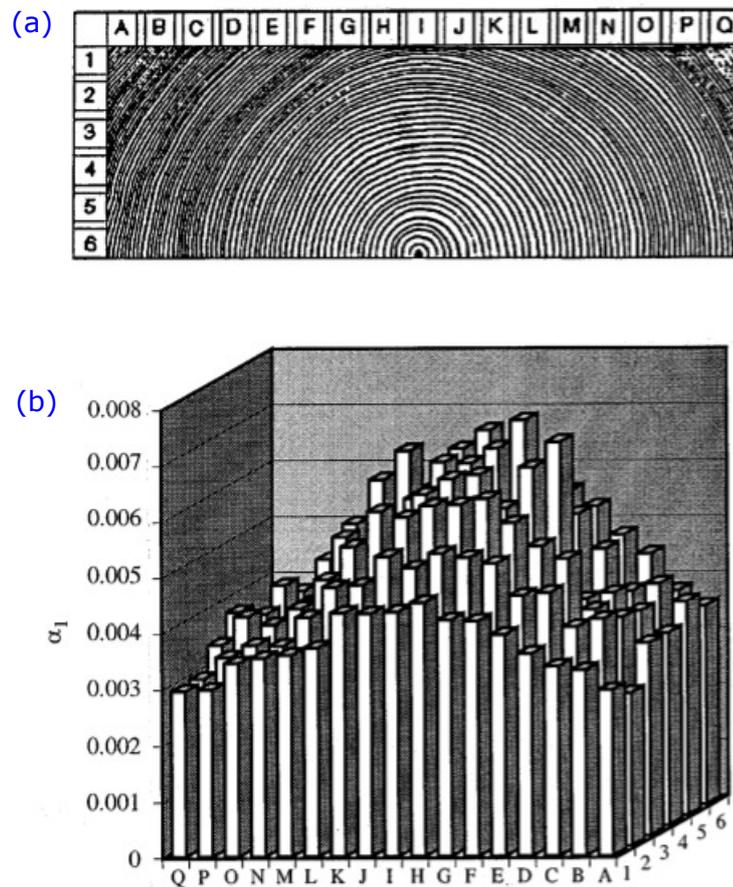


FIGURE 1.11 – Effet de la position originale d'un échantillon en bois sur le coefficient de dilatation hydrique selon la direction L d'après (Ormarsson ; Dahlblom ; Petersson 1998).

une traction longitudinale (voir figure 1.14). Toutefois, les travaux concernés par l'étude bibliographique de (Gerhards 1982) sont limités à l'étude d'un bois clair (i.e. sans défauts) ayant des dimensions centimétriques (section ne dépassant pas les $5 \times 5 \text{ cm}^2$ au maximum et majoritairement en dessous de $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$) et une distribution uniforme de l'humidité dans le volume de l'échantillon.

D'autre part, (Madsen 1982) a étudié l'effet de différentes teneurs en humidité (10, 15, 20 et 25%) sur les charges à la rupture en compression, traction, flexion et cisaillement du bois d'épicéa et du sapin ayant une section de $4 \times 14 \text{ cm}^2$. Il a observé que la dépendance à la teneur en humidité est différente en compression et en traction. En effet, le bois est peu sensible (et même insensible) à la variation de la teneur en humidité en traction. En revanche, une augmentation de 1% de

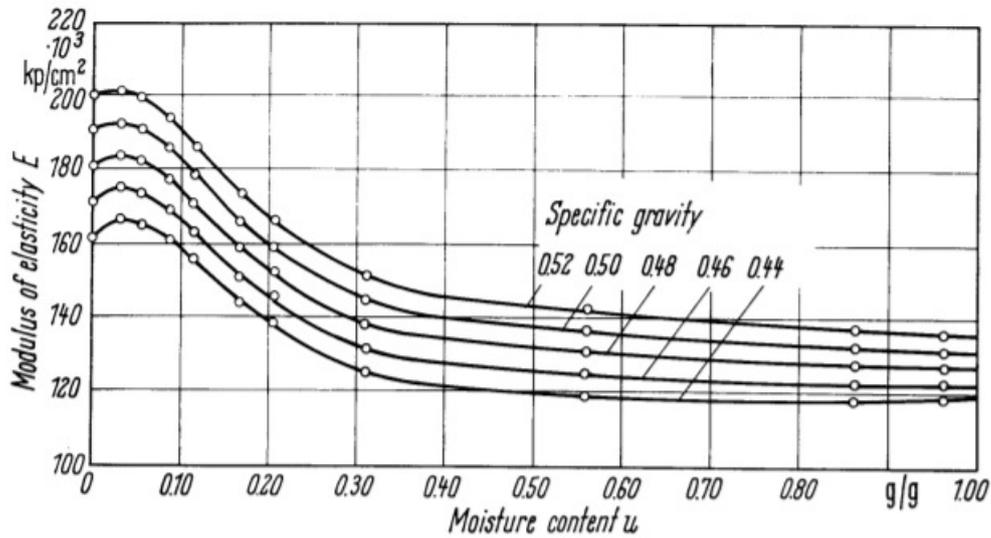


FIGURE 1.12 – Évolution du module d'élasticité axial en fonction de la teneur en humidité pour de l'épicéa de différentes densités d'après (Kollmann ; Côté 1968).

MC entraîne une diminution de presque 3,5% de la résistance en compression. Ces résultats lui ont permis d'expliquer la forme de dépendance de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en humidité obtenues lors d'un travail précédent (Madsen 1975). Pour les éléments en flexion régis par la traction (i.e. les éléments ayant une résistance en traction plus faible que celle en compression), aucun changement dû aux variations de la teneur en humidité est constaté. Toutefois, plus le comportement en flexion est régi par la compression, plus l'effet de l'humidité est prononcé sur la résistance en flexion. Cette dernière diminue donc quand la teneur en humidité augmente (figure 1.15). Par exemple, pour une résistance en flexion supérieur à 55,2 MPa, la teneur en humidité affecte la résistance de la même manière que celle pour un bois sans défaut.

De même, le (Wood Handbook United States 1987), en se basant sur la figure 1.16, propose d'adapter les coefficients d'affectation des propriétés mécaniques du bois ayant une épaisseur supérieure à 51 mm et contenant des nœuds à la qualité de ce bois. Par exemple, le (Wood Handbook United States 1987) recommande aucun ajustement en fonction de la teneur en humidité pour un bois ayant une charge à la rupture inférieure à 16,7 MPa en flexion, 21,7 MPa en traction ou 9,7 MPa en compression.

Pour des variations de la teneur en humidité entre 6 et 20% pour un bois clair et une distribution homogène de l'humidité, (Guitard 1987) recommande de corriger les modules d'élasticité selon les équations suivantes :

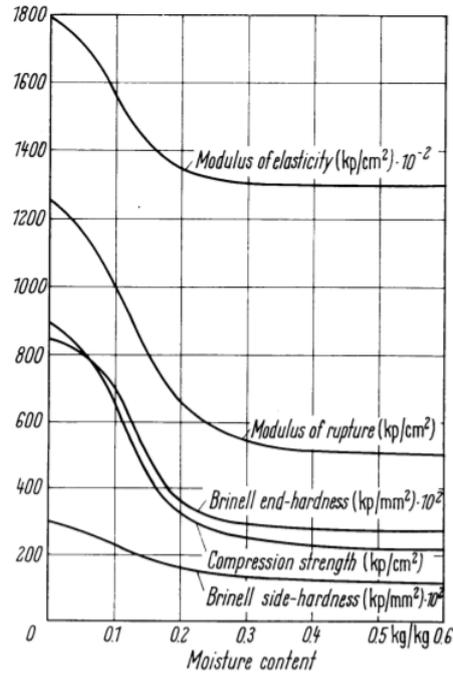


FIGURE 1.13 – Évolution de plusieurs propriétés mécaniques en fonction de la teneur en humidité pour de l'épicéa d'après (Kollmann ; Côté 1968).

$$E_L^{MC} = E_L^{12} \times (1 - 0,015 \times (MC - 12)) \quad (1.4)$$

$$E_{R,T}^{MC} = E_{R,T}^{12} \times (1 - 0,03 \times (MC - 12)) \quad (1.5)$$

$$G_\nu^{MC} = G_\nu^{12} \times (1 - 0,03 \times (MC - 12)) \quad (1.6)$$

Avec E et G les modules d'élasticité et de cisaillement longitudinaux (L) et transversaux (R ou T), MC la teneur en humidité du bois, et ν le plan LR, TL ou RT.

(Hanhijärvi ; Galimard ; Hoffmeyer 1998) ont réalisé des essais de flexion à différentes teneurs en humidité (entre 9 et 16,5%) sur des poutres de LVL (lamibois) ayant deux sections différentes ($45 \times 100 \text{ mm}^2$ et $45 \times 150 \text{ mm}^2$) et une longueur égale à 2 m. Les résultats ont montré que la résistance en flexion des poutres diminue de 16 % pour un passage de 12% à 16,5% de teneur en humidité.

(Babiak ; Gaff ; Sikora ; Hysek 2018) a étudié l'effet de la méthode d'identification sur les caractéristiques élastiques du bois d'épicéa et du chêne identifiés. Les essais ont consisté en des essais de flexion 3 et 4 points réalisés à différentes teneurs

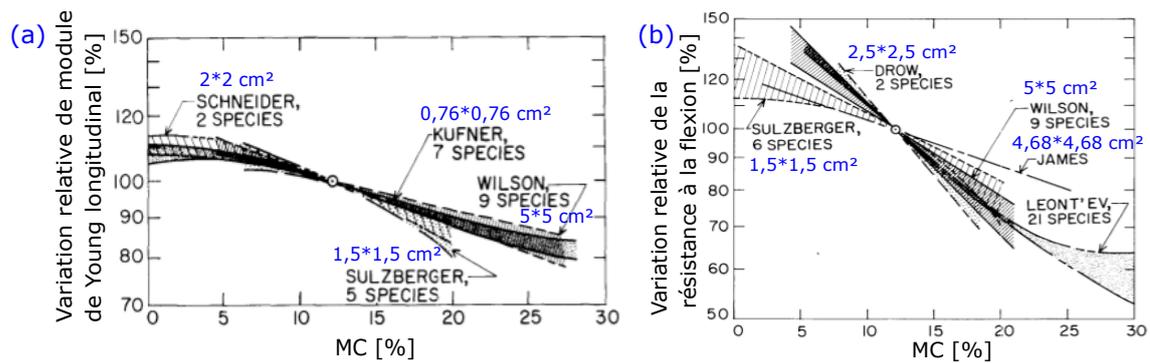


FIGURE 1.14 – Variation relative du (a) module de Young longitudinal et (b) de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en humidité pour différentes essences. Figures adaptées d'après (Gerhards 1982).

en humidité (0, 8, 16, PSF et au dessus du PSF). L'étude a montré que la méthode expérimentale d'identification des modules élastiques a un effet non négligeable sur les valeurs identifiées et sur la forme de dépendance de ses propriétés à la teneur en humidité.

Il est à noter que même si le bois sec a une résistance plus élevée que le bois humide, et que cette tendance est généralement admise, il existe cependant une limite de teneur en humidité (différente selon les essences et la direction de la sollicitation mécanique) en dessous de laquelle les propriétés mécanique du bois n'augmentent pas en séchant. Par exemple, pour du pin du sud, le (Wood Handbook United States 1987) propose une teneur en humidité égale à 12,6% pour la résistance en traction selon le sens longitudinal, 10,2 pour le cas de tension transversale et 4,3 pour le module d'élasticité en compression et en traction. Généralement le bois est considéré avoir sa résistance maximale aux alentours de 10% (Ranta-Maunus 2003).

En présence de gradients d'humidité

En réalité, des gradients d'humidité sont susceptibles de se développer dans le bois en raison des fluctuations saisonnières et quotidiennes de température et d'humidité relative. Cependant, on retrouve très peu d'études dans la littérature concernant l'effet du gradient hydrique sur les propriétés mécaniques du bois. Les seuls travaux identifiés se limitent à (Conners 1985 ; Wilson 1932 ; Madsen 1975).

(Wilson 1932) a étudié l'effet de gradients d'humidité unidimensionnels (gradients issus du séchage du matériau à partir de l'état vert) sur la charge à la rupture des échantillons de bois ayant une section égale à $5 \times 10 \text{ cm}^2$ et sans défauts. Il a constaté que les éléments étudiés (surfaces extérieures sèches et le centre

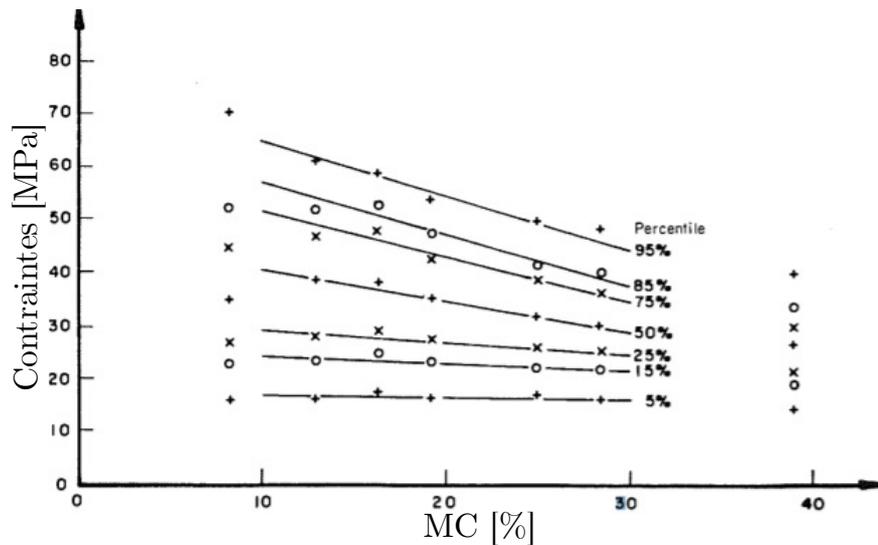


FIGURE 1.15 – Effet de la teneur en humidité sur la contrainte à la rupture du bois en flexion (Madsen 1982).

humide) sont plus résistants que ceux ayant la même teneur en humidité moyenne homogène dans le volume.

En revanche, (Madsen 1975) a réalisé des essais de flexion sur des échantillons (de section égale à $4 \times 14 \text{ cm}^2$) contenant des gradients hydriques. Les échantillons avaient initialement une teneur en humidité homogène entre 9 et 12%. Ils sont placés ensuite dans un milieu extérieur pendant 20 semaines. Ce conditionnement a amené à une teneur en humidité égale à 15% (en présence de gradients). Il a constaté que l'effet de la teneur en humidité était presque négligeable sur la charge à la rupture. Cependant, aucune information sur la distribution de la teneur en humidité était connue lors de ces essais.

(Connors 1985) a proposé une démarche pour calculer la charge à la rupture en flexion d'éléments en bois à partir de la connaissance du comportement en traction et en compression en fonction de l'humidité sur du peuplier. Par ailleurs, il a réalisé des essais de flexion (3 points), sur des échantillons de section $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$ afin de comparer le module élastique et la charge à la rupture en flexion expérimentales et numérique. Les gradients hydriques (2D) sont générés à partir du séchage de l'état vert et ils sont mesurés ensuite par découpe de petits morceaux. La figure 1.17 montre une régression des données expérimentales obtenues dans le cas d'une teneur en humidité homogène dans le volume et en présence de gradients hydriques. On remarque ainsi qu'en dessous d'une teneur en humidité aux alentours de 20%, la charge à la rupture en présence d'un gradient est légèrement plus faible que celle obtenue à une teneur en humidité équivalente mais homogène dans la section. Au

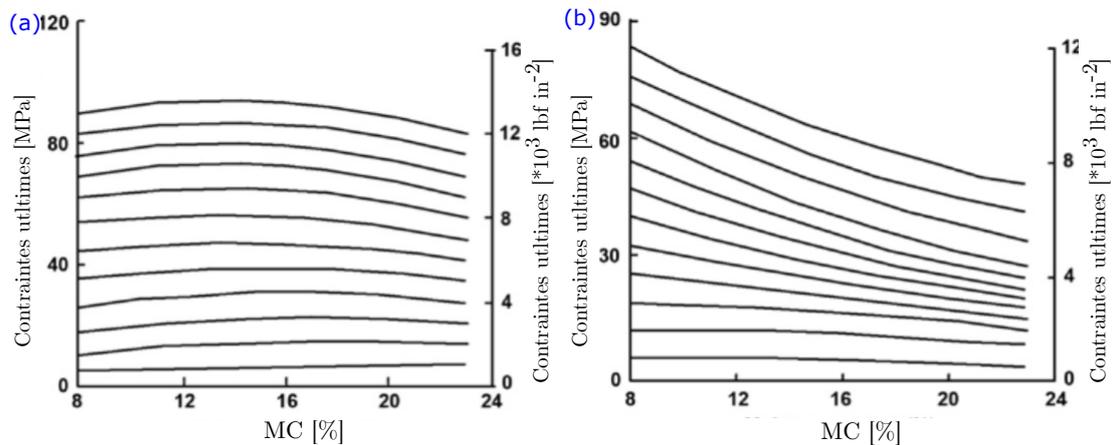


FIGURE 1.16 – Effet de la teneur en humidité sur : (a) la charge à la rupture en traction et (b) la charge à la rupture en compression (Wood Handbook United States 1987).

delà de 20%, l'effet de la teneur en humidité devient non négligeable et la présence d'un gradient hydrique issue d'un séchage à partir de l'état vert augmente la charge à la rupture par rapport à l'état défini par une teneur en humidité homogène dans l'échantillon.

Ces études montrent que la présence de gradients hydriques a un impact sur la charge à la rupture. Cependant il ne semble pas y avoir un consensus.

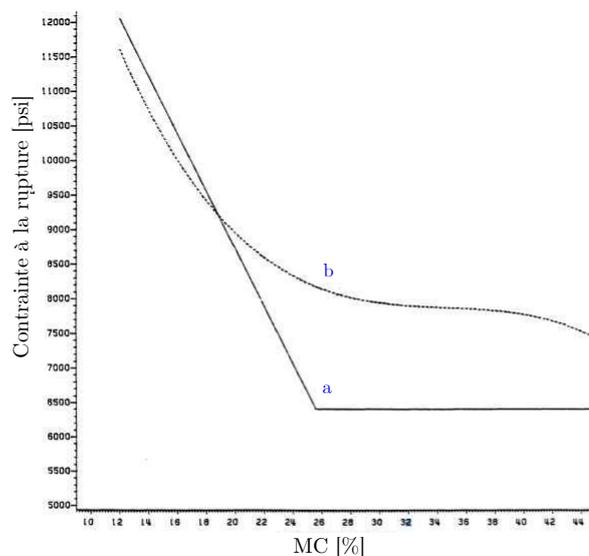


FIGURE 1.17 – Évolution de la contrainte à la rupture en flexion du peuplier en fonction de la teneur en humidité (a) pour des échantillons ayant une teneur en humidité homogène et (b) en présence d'un gradient hydrique issu d'un séchage à partir de l'état vert (Connors 1985).

1.4 Comportement des éléments en bois selon l'Eurocode 5

L'Eurocode 5 constitue la norme européenne pour le dimensionnement des éléments en bois (Eurocode-5 2005). Il prend en considération l'effet de l'hygroscopicité du bois sur son comportement mécanique d'une manière forfaitaire en fonction de la classe de service des éléments en bois. Les trois classes de service sont définies en fonction de la teneur en humidité moyenne des éléments en bois.

Les trois classes de services sont :

1. Classe de service 1 : l'humidité dans le bois correspond à une température de 20 °C et une humidité relative de l'air environnant ne dépassant 65 % que quelques semaines par an. Dans ce cas l'humidité d'un bois résineux est supposé ne pas être supérieur à 12%.
2. Classe de service 2 : l'humidité dans le bois correspond à une température de 20 °C et une humidité relative de l'air ne dépassant 85 % que quelques semaines par an. Dans ce cas l'humidité d'un bois résineux est supposé ne pas être supérieur à 20%.
3. Classe de service 3 correspond à des conditions climatiques amenant à des

humidités supérieures à celles de la classe de service 2. Dans ce cas l’humidité d’un bois résineux est supposée être supérieur à 20%.

L’humidité du bois est déterminée à partir d’un abaque de l’Eurocode 5 qui donne la teneur en eau dans le bois en fonction de la température et de l’humidité relative de l’air ambiant (figure 1.18). Cette courbe constitue une base importante pour le dimensionnement des structures en bois puisque la connaissance de la teneur en eau du bois permet de le classer dans une des trois classes de service que propose l’Eurocode 5 et donc de déterminer ensuite les coefficients affectant la résistance (k_{mod}) et la déformabilité du bois (k_{def}) en fonction de l’état hydrique et de la durée de chargement.

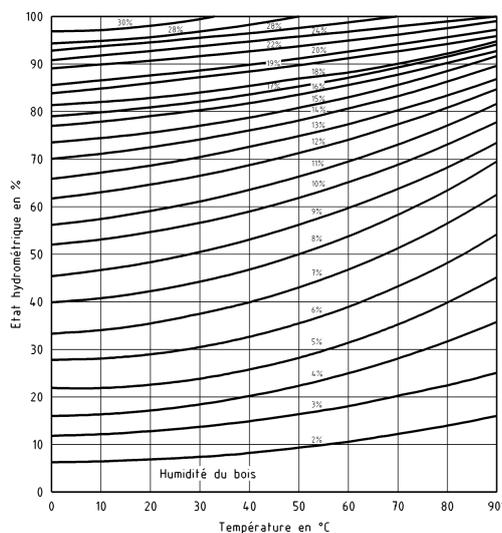


FIGURE 1.18 – Abaque de l’équilibre hygroscopique du bois selon l’Eurocode 5.

1.4.1 Origine de l’abaque de l’Eurocode 5

WoodHandbook (USA)

Le (WoodHandbook United States 1987) fournit un abaque et un tableau qui relie l’humidité du bois en fonction des caractéristiques de l’air ambiant (figure 1.19 et tableau 1.2). Ces données sont analysées en particulier dans l’article de (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014) où les auteurs présentent une recherche bibliographique concernant les données du (WoodHandbook United States 1987). Rajoutons à cela que le (WoodHandbook United States 1987) propose des formules pour calculer la teneur en humidité à l’équilibre du bois en fonction des conditions climatiques.

Les données fournies par le Woodhanbook en 1955 ont fait l’objet d’une étude de régression par (Simpson 1973) afin de proposer des formules mathématiques

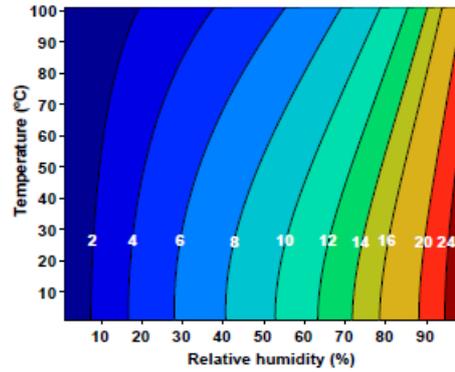


FIGURE 1.19 – Abaque du (WoodHandbook United States 1987).

pour la prédiction de la teneur en humidité. Il propose les équations 1.7 à 1.11. Le (WoodHandbook United States 1987) propose d'employer la même équation mais avec des paramètres K_1 et K_2 différents de celles de Simpson (équations 1.12 et 1.13). Cependant, il n'est pas expliqué pourquoi d'autres paramètres ont été utilisés dans le WoodHandbook.

$$EMC = \frac{180}{M_p} \left(\frac{K \times h}{1 - K \times h} + \frac{K_1 \times K \times h + 2 \times K_1 \times K_2 \times K^2 \times h^2}{1 + K_1 \times K \times h + K_1 \times K_2 \times K^2 \times h^2} \right) \quad (1.7)$$

Avec :

$$M_p = 330 + 0,452 \times T + 0,00415 \times T^2 \quad (1.8)$$

$$K = 0,791 + 0,00436 \times T - 0,000000844 \times T^2 \quad (1.9)$$

$$K_1 = 6,17 + 0,000313 \times T - 0,0000926 \times T^2 \quad (1.10)$$

$$K_2 = 1,65 + 0,0202 \times T - 0,0000934 \times T^2 \quad (1.11)$$

$$K_1 = 6,34 + 0,000775 \times T - 0,0000935 \times T^2 \quad (1.12)$$

$$K_2 = 1,09 + 0,0284 \times T - 0,0000904 \times T^2 \quad (1.13)$$

Avec h l'humidité relative (-) et T la température (°F).

La formule proposée par Simpson a montré une bonne correspondance avec les données de sorption issues de WoodHandbook en 1955 (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014).

TABLE 1.2 – Valeurs d'équilibre hygroscopique du bois en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air (WoodHandbook United States 1987)

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C)	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

Avramidis 1987 (Canada)

(Avramidis 1989) a réalisé un ajustement des paramètres des 4 modèles de sorption utilisés pour prédire la teneur en humidité à l'équilibre du bois en fonction de la température et de l'humidité relative et de données de sorption issues de WoodHandbook en 1955. Son étude a montré que le modèle donné par l'équation 1.14 présente la meilleure représentation des données du WoodHandbook.

$$EMC = \left(\frac{-T \times \ln(1-h)}{0.13 \times \left(1 - \left(\frac{T}{647.1}\right)^{-6.46}\right)} \right)^{\frac{1}{110 \times T^{-0.75}}} \quad (1.14)$$

Avec h l'humidité relative (-) et T la température (°K).

1.4.2 Validité de l'abaque

Comparaison des abaques

La figure 1.21 (a) montre l'abaque obtenu avec les paramètres issus de (Simpson 1973) (équations 1.7, 1.10 et 1.11 pour les paramètres K1 et K2) et la figure 1.21

(b) montre l'abaque obtenu en utilisant les paramètres des équations 1.12 et 1.13. La figure 1.20 montre l'abaque obtenu à partir de l'équation 1.14.

En comparant les figures 1.18, 1.21 (a), 1.21 (b) et 1.20 on peut observer :

- Une correspondance générale entre les différents abaques calculés et celui de l'Eurocode 5.
- Une similarité plus forte entre les courbes de la figure 1.21 et celle de l'Eurocode 5 (malgré la présence des certains points différents entre les deux courbes surtout pour les hautes températures).

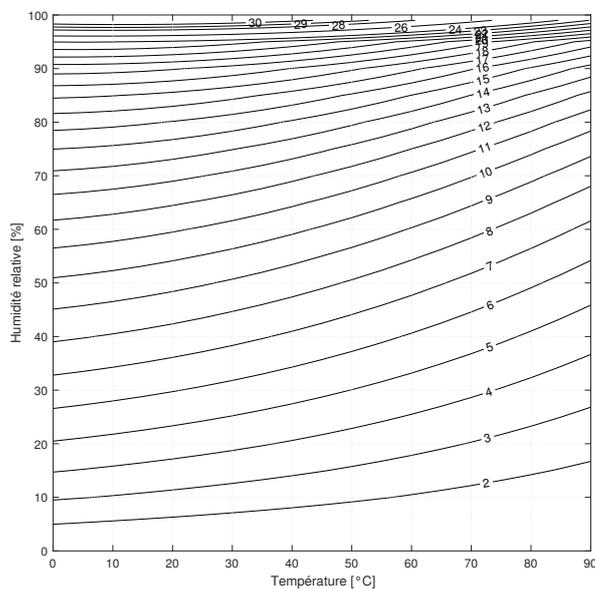


FIGURE 1.20 – Abaque de l'équilibre hygroscopique du bois selon l'équation fournie par (Avramidis 1989).

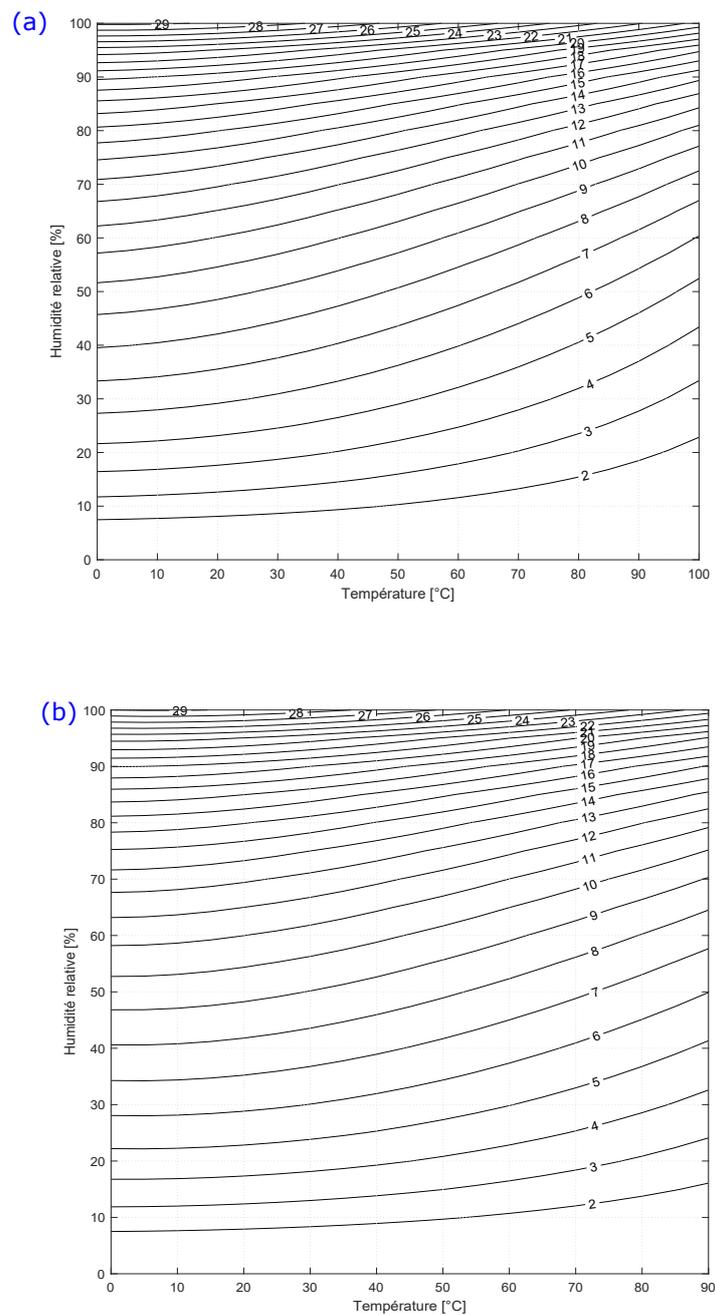


FIGURE 1.21 – (a) Abaque de l'équilibre hygrosopique du bois selon les équations fournies par (Simpson 1973), (b) Abaque de l'équilibre hygrosopique du bois selon les équations fournies par le WoodHandbook.

La figure 1.22 montre une comparaison entre les trois approches de calcul des abaques à différentes températures. Nous remarquons qu'à une température donnée et aux humidités relatives inférieures à 90%, la différence entre les approches est faible. Cependant, au delà de 90% d'HR, l'équation 1.14 montre des valeurs significativement supérieures par rapport aux deux autres approches.

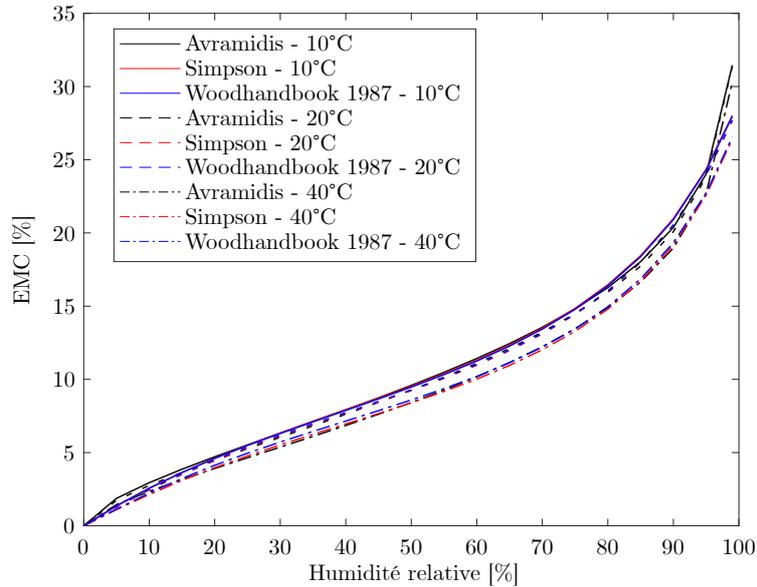


FIGURE 1.22 – Comparaison entre les trois différentes approches pour le calcul de l'équilibre hygroscopique à trois températures 10°C, 20°C et 40°C.

Validité par rapport aux essences (Feuillus, résineux)

Plusieurs types de bois sont utilisés en structure. Puisque la connaissance de la teneur en eau du bois est essentielle pour le dimensionnement, il est important aussi de vérifier l'applicabilité de l'abaque sur les différentes types de bois visés par l'Eurocode 5.

D'après (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014), nous retrouvons plusieurs auteurs qui se sont intéressés à la détermination de l'humidité dans le bois en fonction des conditions climatiques (HR et T). Certains de ces auteurs ont travaillé sur différents types de bois. Ces études, dont les résultats sont discutés par (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014), ont indiqué que la différence entre les différentes essences de bois reste mineure pour les faibles et les moyennes humidités relatives mais elle devient non négligeable pour les hautes humidités relatives. (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014) comparent des résultats expérimentaux obtenus sur 16 essences différentes de bois (6 ou 7 échantillons ont été mesurés en désorption et adsorption à 32 °C pour chaque type de bois) avec la formule issue de (Simpson 1973). La figure 1.23

montre les 32 courbes expérimentales obtenues (pour les 16 types en désorption et adsorption) en gris clair avec la courbe obtenue à l’aide de la formule de (Simpson 1973).

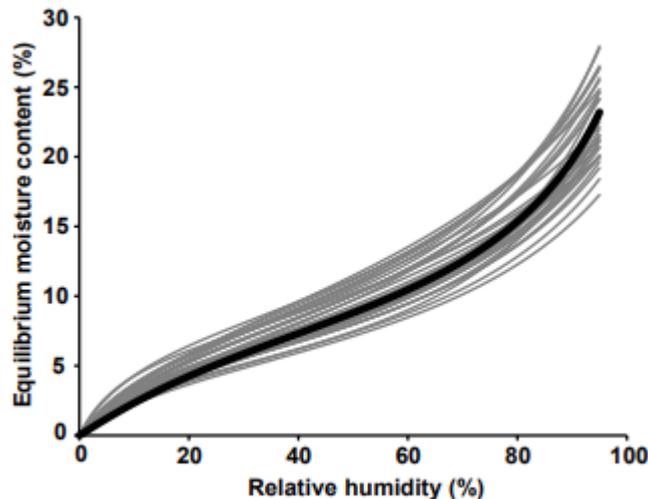


FIGURE 1.23 – Humidité d’équilibre des 16 types de bois en adsorption et désorption obtenue par Spalt (1958) en gris et la courbe issue de la formule (Simpson 1973) en noir d’après (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014).

Cette comparaison permet de déduire que :

1. Pour une humidité relative $< 65\%$ toutes les essences présentent une humidité à l’équilibre proche.
2. Au delà de 65% d’humidité relative, la différence entre les essences est importante.
3. Les équations de (Simpson 1973) fournissent une moyenne pour les différentes espèces.

Discussion par rapport à l’hystérèse de sorption

Une comparaison entre les formules analytiques présentées ci-dessus pour le calcul de l’abaque de l’Eurocode 5 et des valeurs obtenues expérimentalement pour des isothermes de sorption pour différentes essences est donnée par la figure 1.24. Les travaux réalisés par (Loulou 2013 ; Bonnet 2017 ; Varnier 2019 ; D. M. Nguyen ; Care ; Courtier-Murias ; Zhou ; Coussot 2021) sont employés pour réaliser la comparaison. Cette comparaison montre que, pour les études mentionnées, les ordres de grandeur sont cohérents avec les données de l’abaque de l’Eurocode 5 (courbes issues des équations de Simpson et Avramidis) même si les courbes de l’abaque ne

correspondent ni à la désorption ni à l'adsorption. On peut considérer donc que l'abaque de l'Eurocode 5 permet d'avoir une bonne estimation des isothermes de sorption pour toutes les essences, sans pouvoir distinguer toutefois la désorption et l'adsorption.

En revanche, nous constatons que l'abaque issu des travaux de Avramidis (équation 1.14) montre des valeurs supérieures aux valeurs expérimentales pour des HR élevées. Nous employons, donc, dans la suite les formules issues des travaux de Simpson pour le calcul de la teneur en humidité à l'équilibre en fonction de HR et T.

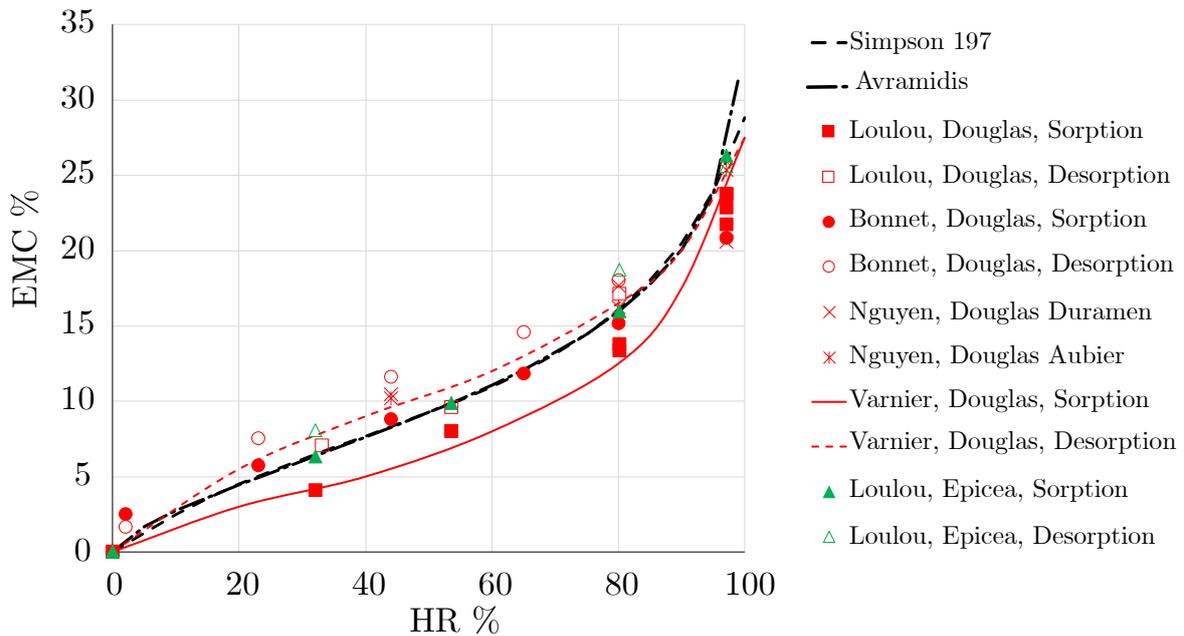


FIGURE 1.24 – Comparaison entre deux approches de calcul de l'abaque de l'équilibre hygroscopique et des données issues de la bibliographie (cas des résineux).

1.4.3 K_{mod} et K_{def}

L'Eurocode 5 prend en considération la dépendance à la teneur en humidité et la durée de chargement des propriétés mécaniques du bois et de sa déformation par l'intermédiaire des deux coefficients k_{mod} et k_{def} . Notre travail se limite à l'étude de l'effet de l'humidité sur la charge à la rupture des éléments en bois et par suite nous nous intéressons uniquement au facteur k_{mod} .

Le facteur k_{mod} représente le coefficient de modification de la charge à la rupture (résistance) en fonction de MC et la durée de chargement. Le tableau 1.3 montre

les coefficients proposés par l’Eurocode 5 pour les différentes classe de service et durée de chargements mécaniques.

TABLE 1.3 – Valeurs du coefficient de modification de la résistance k_{mod} en fonction de la classe de service et du durée de chargement.

Durée de chargement	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Permanente (> 10 ans)	0.6	0.6	0.5
Long terme (6 mois à 10 ans)	0.7	0.7	0.55
Moyen terme (1 semaine à 6 mois)	0.8	0.8	0.65
Court terme (< 1 semaine)	0.9	0.9	0.7
Instantanée	1.1	1.1	0.9

Les travaux de (Hanhijärvi ; Galimard ; Hoffmeyer 1998 ; Hoffmeyer ; Sørensen 2007 ; Morlier ; Ranta-Maunus 1998) constituent une base pour le calcul de ces coefficients. Le coefficient k_{mod} représente le produit des deux coefficients k_{mc} et k_{DOL} ($k_{mod} = k_{mc} \times k_{DOL}$). L’effet de l’humidité sur les propriétés mécaniques est pris en compte par le facteur k_{mc} . Le facteur k_{DOL} représente l’effet de la durée de chargement sur la charge à la rupture (rupture par fluage) étant donné que le fluage affecte significativement le comportement du bois. Nous remarquons ainsi que le passage de la classe de service 1 ou 2 à la classe de service 3 engendre une réduction aux alentours de 22% de la charge à la rupture. Le reste de la réduction étant constitué par la rupture différée (par fluage).

Néanmoins, il est à noter que l’approche de l’Eurocode 5 consiste à négliger l’effet de la présence de gradients hydriques dans le matériau.

1.5 Objectifs de la thèse

Au cours de ce premier chapitre, nous avons pu voir que le bois est sensible à son milieu ambiant. Ses propriétés mécaniques (rigidité et résistances) diminuent en fonction de sa teneur en humidité dans le domaine hygroscopique. L’étude bibliographique a montré que cette dépendance est généralement établie pour du bois sans défauts et de petites dimensions où l’humidité est homogène dans le volume. L’Eurocode 5 (norme de calcul européenne) prend en compte la dépendance des propriétés mécaniques du bois à la durée de chargement et la teneur en humidité à l’aide du coefficient k_{mod} . Cependant cette approche néglige la présence des gradients hydriques développés au cours de la vie d’une structure en bois.

Le domaine hygroscopique représente l'état le plus pertinent lors du dimensionnement des structures en bois. Quant au transfert hydrique dans l'état hygroscopique, nous avons vu au cours de ce chapitre que le transfert d'humidité dans le bois regroupe plusieurs modes de diffusion avec des processus compliqués et constitue un sujet de recherche toujours actif.

Dans cette optique, la problématique principale de la thèse est de mieux préciser l'influence des variations climatiques sur la tenue des structures en bois (notamment la charge à la rupture en flexion).

Cette thèse présente deux objectifs principaux :

1. Caractériser les gradients hydriques susceptibles de se reproduire dans un élément dans différents cas de chargements hydriques.
2. Étudier l'influence de la présence de gradients hydriques sur le comportement mécanique des éléments en bois.

Dans un premier temps nous nous intéressons à l'étude des transferts hydriques dans le domaine hygroscopique des éléments en bois massif et lamellé-collé par l'intermédiaire de méthodes non destructives et non invasives. Nous proposons ainsi de caractériser les transferts hydriques par la méthode de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et par mesures des variations dimensionnelles macroscopiques. Ces mesures sont réalisées suivant les différentes directions d'anisotropie du bois sur des échantillons ayant des dimensions proches de l'échelle d'emploi (échelle centimétrique) au cours d'une phase d'humidification suivie d'une phase de séchage.

La partie 2 de la thèse est consacrée à la présentation de cette étude. Le chapitre 2 présente les matériaux et méthodes employés. Ensuite, le chapitre 3 est consacré à la présentation des résultats expérimentaux des profils IRM au cours de la phase d'humidification et du séchage. Les résultats mettent en évidence la différence de transfert hydrique selon les directions d'anisotropie du bois. Finalement le chapitre 4 est dédié à la modélisation numérique des transferts hygroscopiques. Nous présentons tout d'abord une description des modèles employés dans la littérature ainsi que les méthodes d'identification des paramètres des modèles dans la littérature. Nous présentons ensuite le modèle mis en œuvre au cours de la thèse pour les transferts hygroscopiques isothermes et la méthode d'identification utilisée. Nous employons ainsi un modèle relativement simple permettant de représenter les phénomènes de diffusion majeurs ayant lieu simultanément. Enfin, nous nous intéressons à déterminer les profils hydriques dans le cas de climats réels (données climatiques fournies par le CSTB) pour en déduire l'épaisseur des éléments en classe de service 3. L'ensemble des résultats de cette partie est discuté par rapport aux classes de service de l'Eurocode 5.

Dans la partie 3, nous étudions l'effet de la présence de différentes classes de service (présence de gradients hydriques) dans des poutres en lamellé-collé. Nous présentons au cours du chapitre 5 les matériaux et méthodes employés pour le

conditionnement hydrique des poutres (transferts isotherme et non isotherme). Le chapitre 6 est consacré à la présentation des profils hydriques mesurés par IRM et avec un humidimètre à pointe. Les essais de transfert non isotherme font l'objet d'une modélisation plus complète afin de prendre en compte l'effet de la température sur la diffusion hydrique. Nous présentons ainsi les résultats de la modélisation des transferts. Le chapitre 7 est consacré à la présentation des résultats des essais de flexion 4 points réalisés sur les poutres à différents degrés d'hygrométrie et en présence de gradients hydriques. Au cours du chapitre 8, nous présentons un essai de mesure de champ par corrélation d'images numériques sur un échantillon ayant la même section que les poutres et soumis à des conditions climatiques similaires afin d'en déduire les déformations induites par la diffusion hydrique au cours de l'humidification et du séchage. Finalement, le chapitre 9 est dédié à la modélisation numérique hydromécanique des poutres en tenant compte des non-linéarités plastiques en compression et du comportement fragile en traction ainsi que de la dépendance des propriétés mécaniques à la teneur en humidité.

Deuxième partie

Étude de la diffusion hydrique dans le bois

INTRODUCTION

La diffusion hydrique du bois est un phénomène complexe qui constitue toujours un sujet de recherche actif. Dans le domaine hygroscopique (i.e. dans la plage de l'humidité du bois entre 0% et 30%), les propriétés mécaniques du bois sont affectées par la variation de sa teneur en humidité. Pour cette raison, l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1) propose différentes classes de service en fonction de la teneur en humidité moyenne du bois (en supposant que cette dernière est une fonction de la durée d'exposition aux variations climatiques). La NF EN 1995-1-1 propose de considérer un élément en bois en classe de service 3 dès qu'il est soumis à un climat humide ($HR > 85\%$ à $T > 20^{\circ}\text{C}$) pendant plusieurs semaines.

Le but de cette partie est d'étudier la diffusion hydrique isotherme du bois dans le domaine hygroscopique selon les différentes directions d'anisotropie. Nous étudions ainsi l'humidification du bois pour une durée de 35 jours dans des conditions climatiques qui se situent dans la classe de service 3 de l'Eurocode 5 ($HR > 85\%$ à $T = 20^{\circ}\text{C}$ pour plusieurs semaines). Ensuite, nous étudions le séchage du bois pour une durée de 52 jours à $HR = 33\%$. Nous mesurons au cours de cette étude la distribution spatiale de la teneur en humidité à l'aide de l'Imagerie par Résonance Magnétique. Elle permet d'identifier la teneur en humidité et par suite le changement de la classe de service qui a lieu en fonction de la direction d'anisotropie sollicitée et du temps de diffusion. Cette mesure est accompagnée par une mesure globale de la teneur en humidité moyenne et une mesure des variations dimensionnelles des échantillons perpendiculairement à la direction de pénétration de l'humidité.

Nous présentons dans un premier temps les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés au cours des essais (chapitre 2). Le chapitre 3 est dédié à la présentation des profils de teneur en humidité issus des mesures par IRM. Finalement, au cours du chapitre 4 nous présentons le modèle numérique de la diffusion hydrique isotherme adopté au cours de ce travail. Nous comparons alors les profils expérimentaux de teneur en humidité et des variations dimensionnelles aux profils simulés. Ce modèle sera employé ensuite dans le cas des variations climatiques réelles. Ceci nous permettra de démontrer qu'en cas de sollicitations hydriques réelles, une épaisseur limitée de l'échantillon est affectée par le changement de

classes de service (de la classe 2 vers la classe 3).

2

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Dans ce chapitre, nous décrivons les matériaux et les méthodes expérimentales employées afin d'étudier les transferts hydriques (humidification et séchage) dans l'état hygroscopique du bois. On se propose d'étudier les transferts unidimensionnels selon les directions d'anisotropie par IRM et par mesure des variations dimensionnelles. Les méthodes employées pour chaque type de mesure sont explicitées au cours de ce chapitre.

Sommaire

2.1	Matériaux - l'épicéa	58
2.1.1	Isothermes de sorption	58
2.1.2	Coefficients de dilatation hydrique	61
2.2	Protocole expérimental	62
2.3	Résonance magnétique nucléaire du proton	64
2.3.1	Principe de la RMN	65
2.3.2	Séquences RMN	67
2.3.3	Principe de l'IRM	68
2.3.4	Méthode de calibration du signal	70
2.3.5	Estimation de l'incertitude de mesure	72
2.4	Mesure des variations dimensionnelles	74

2.1 Matériaux - l'épicéa

Nous étudions les transferts hydriques dans le domaine hygroscopique à partir de 4 échantillons d'épicéa : 1 échantillon en bois massif et 3 échantillons en bois lamellé-collé. Les transferts sont étudiés selon les directions d'anisotropie des échantillons. La figure 2.1 montre une illustration des échantillons lamellé-collé (LC) et bois massif (BM) étudiés ainsi que leurs dimensions. Les dimensions des échantillons sont choisies de sorte que leur taille soit suffisamment représentative des dimensions d'emploi du bois pour étudier les transferts à une échelle représentative. Notons que la surface de pénétration de l'humidité de l'échantillon LC-R contient un nœud. Ceci permet d'étudier l'effet du nœud sur le transfert hydrique.

La direction de transfert d'humidité est suivant l'axe Z (figure 2.1). Nous étudions ainsi la diffusion selon :

- La direction longitudinale du bois lamellé collé (échantillon LC-L) ;
- La direction transversale parallèle à la colle (échantillon LC-R) ;
- La direction transversale perpendiculaire à la colle (échantillon LC-T) ;
- La direction radiale d'un échantillon du bois massif (échantillon BM-R).

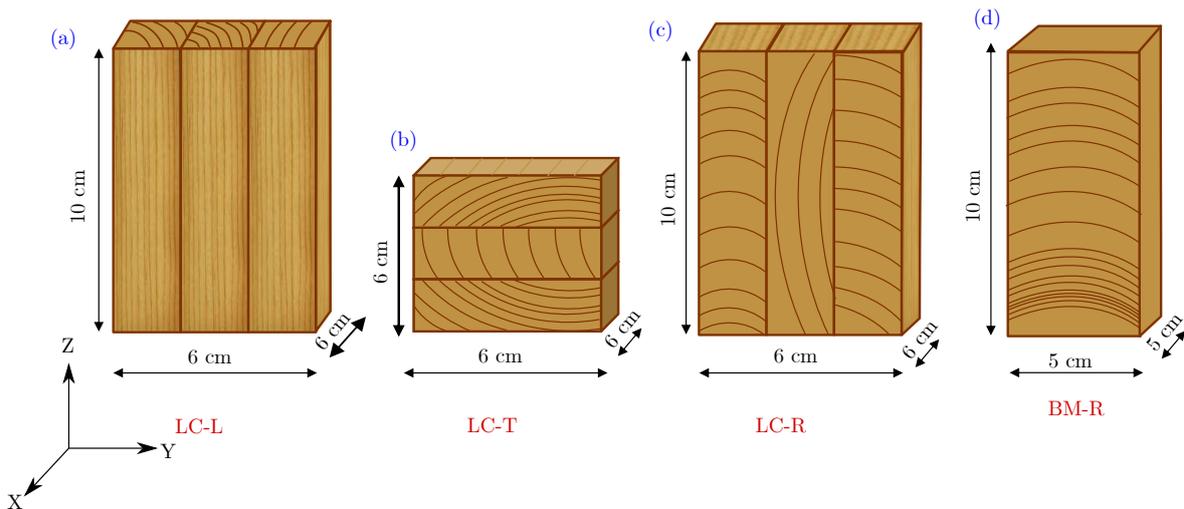


FIGURE 2.1 – Schématisation des échantillons étudiés.

La densité et la teneur en humidité initiales de chaque échantillon sont données dans le tableau 2.1.

2.1.1 Isothermes de sorption

Les courbes de sorption de l'épicéa sont déterminées avec des cubes ayant des petites dimensions (environ 1,5 cm de chaque côté). Nous mesurons la teneur en

Échantillon	Densité [kg/m^3]	MC [%]
LC-L	432	9,3
LC-R	462	9,3
LC-T	484	9,3
BM-R	426	9,3

TABLE 2.1 – Densité et teneur en humidité initiales des échantillons étudiés.

eau à l'équilibre sur 8 cubes d'épicéa de deux provenances différentes (4 cubes de chaque provenance). Les échantillons sont placés dans des enceintes hermétiques où l'humidité relative est contrôlée par des solutions salines saturées et où la température est égale à 20°C (∓ 1 °C). Le tableau 2.2 montre les solutions salines utilisées ainsi que l'humidité relative associée à chaque solution à 20°C. À la fin des cycles de sorption, nous déterminons la masse anhydre de chaque échantillon. Cette masse sèche est déterminée après un séchage à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse.

Solution saline	HR [%]
Gel de silice	2
Chlorure de lithium	12
Acétate de potassium	23
Chlorure de magnésium	33
Carbonate de potassium	44
Nitrate de magnésium	55
Nitrite de sodium	65
Sulfate d'ammonium	81
Chlorure de potassium	86
Sulfate de potassium	97

TABLE 2.2 – Solutions salines utilisées et humidité relative théorique correspondante à la température 20°C.

La figure 2.2 montre les résultats obtenus pour les 8 échantillons au cours de l'adsorption et de la désorption. Nous remarquons une bonne cohérence entre les différents échantillons où l'écart relatif maximale est égale à 9% (échantillon P1-2).

Étant donné que la connaissance de la teneur en humidité à l'équilibre représente une donnée essentielle pour la modélisation numérique des transferts hydriques, nous comparons les valeurs obtenues expérimentalement à celles de l'abaque de l'Eurocode 5 afin de vérifier l'applicabilité de cette dernière. La figure 2.3 montre la comparaison entre la teneur en humidité à l'équilibre issue de l'abaque de l'Eurocode 5 et celles issues des mesures expérimentales. Les mesures expérimentales sont représentées par une moyenne sur les 4 échantillons pour chaque cas. Nous constatons ainsi que la courbe de l'abaque reflète mieux la phase d'adsorption de l'humidité pour les faibles valeurs de l'humidité relative ($HR < 65\%$). En revanche, aux HR élevées, la courbe de l'abaque représente une moyenne entre l'adsorption et la désorption. Un écart absolu maximal de 2% est observé entre l'abaque et les mesures expérimentales.

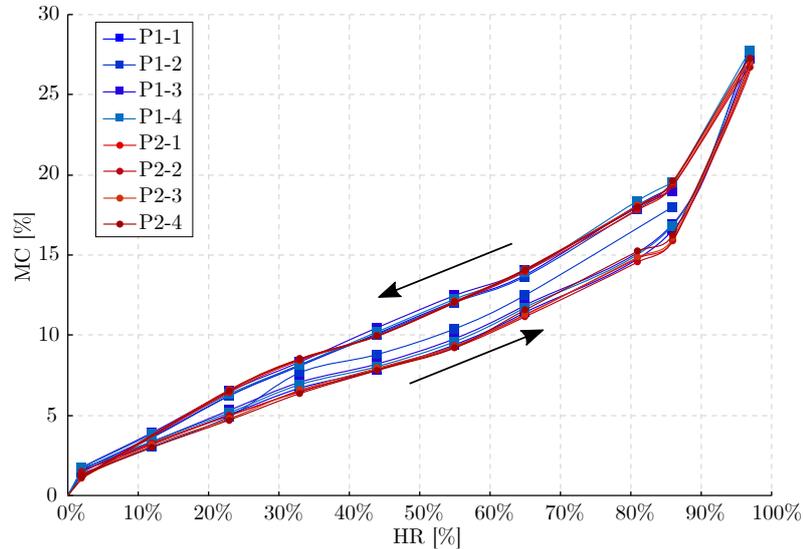


FIGURE 2.2 – Isotherme de sorption de l'épicéa de deux provenances différentes (P1 et P2) à $T=20$ °C. Les courbes en bleu correspondent aux échantillons de provenance 1 et les courbes en rouge correspondent aux échantillons de provenance 2.

Étant donné la bonne capacité de l'abaque à reproduire une moyenne des cycles de sorption complets et que le cycle complet représente un cas extrême (puisqu'on a rarement des cycles complets dans la réalité), la formule de l'abaque sera donc utilisée dans la modélisation numérique des transferts hydriques.

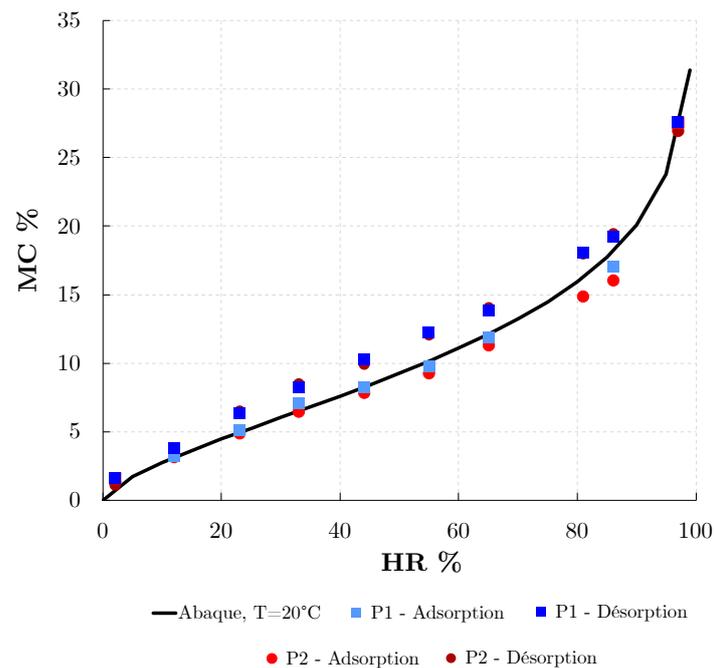


FIGURE 2.3 – Comparaison entre les isothermes de sorption et désorption expérimentales et l'abaque de l'Eurocode 5.

2.1.2 Coefficients de dilatation hydrique

Au cours des mesures des isothermes de sorption précédentes, nous mesurons également les variations dimensionnelles de chaque échantillon par rapport à l'état anhydre. Les figures 2.4 (a) et (b) montrent l'évolution de la moyenne des déformations des 4 échantillons de chaque provenance pour chaque direction d'anisotropie. Les résultats montrent, comme attendu, une proportionnalité entre les déformations T, R et L et la teneur en humidité moyenne. Nous obtenons ainsi les coefficients de retrait/dilatation donnés dans le tableau 2.3. Ceux-ci seront utilisés au cours de la modélisation numérique des transferts hydriques dans le bois (chapitre 4) afin de comparer les profils des variations dimensionnelles expérimentales et numériques et de valider l'identification des coefficients de diffusion et d'échange surfacique.

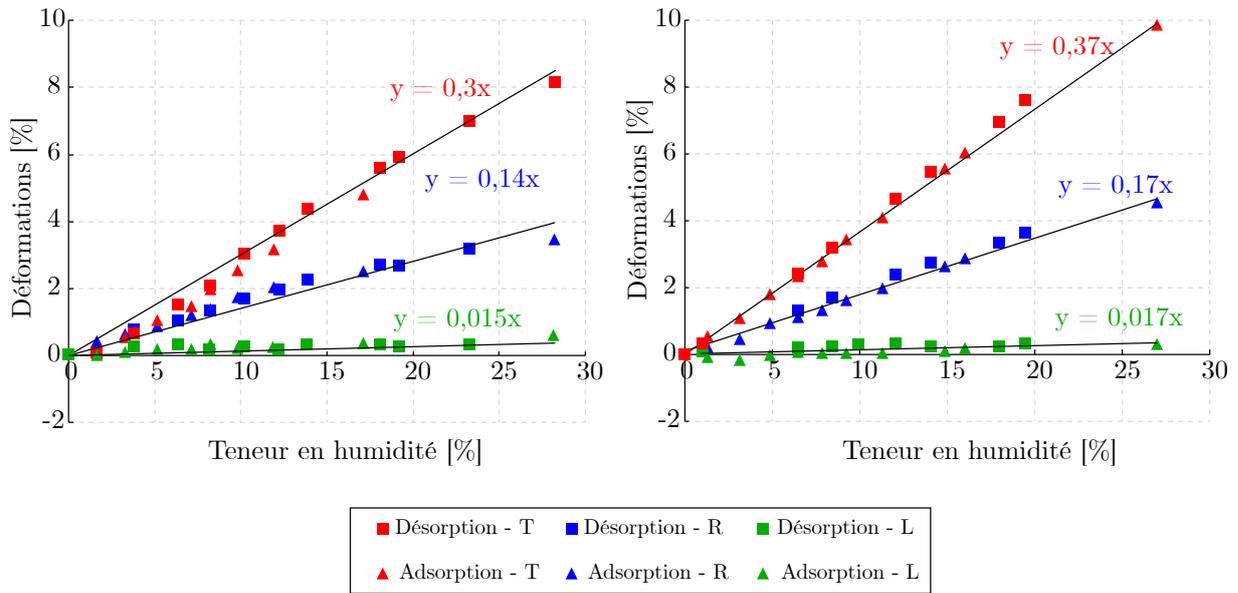


FIGURE 2.4 – Mesure expérimentale des coefficients de dilatation hydrique pour le bois d'épicéa de deux provenances.

TABLE 2.3 – Coefficients de dilatation hydrique pour le bois d'épicéa mesurés dans les trois directions L, R et T.

Coefficient [%/%MC]	Provenance 1	Provenance 2	Moyenne
α_L	0,015	0,017	0,016
α_R	0,14	0,17	0,155
α_T	0,3	0,37	0,335

2.2 Protocole expérimental

Conditionnement des échantillons

Préalablement aux essais, les échantillons sont conditionnés à une teneur en humidité de 9,3 % (voir tableau 2.1) et à une température égale à 20°C. Les échantillons sont ensuite placés durant 5 semaines dans une enceinte hermétique contenant une solution saline saturée de sulfate de potassium qui permet d'obtenir une HR = 97% à 20°C. Ensuite, les échantillons sont placés dans une enceinte contenant une solution saline saturée de chlorure de magnésium où l'humidité relative est égale à 33%. À noter que les échantillons sont placés deux par deux dans deux enceintes différentes afin d'établir un équilibre hygrométrique plus rapide

après l'introduction des échantillons. Le suivi de HR et T dans les 4 enceintes utilisées est assuré par des thermohygromètres. Les figures 2.5 et 2.6 montrent l'évolution de la température et de l'humidité relative à l'intérieur des enceintes au cours de l'humidification et du séchage. À noter que lors des expérimentations une panne de la climatisation est survenue. Ceci explique l'instabilité de la température au cours du temps. Cependant, même si la température varie entre 22°C et 26°C, l'HR imposée reste constante car la solution saline saturée utilisée est peu sensible dans cette plage de température. On considère que l'évolution de l'humidité relative et de la température sont identiques dans les deux enceintes (à la précision près de l'appareil de mesure (testo 174) $\pm 3\%$ de HR et $\pm 0.5\%/^{\circ}\text{C}$) au cours de l'humidification et du séchage.

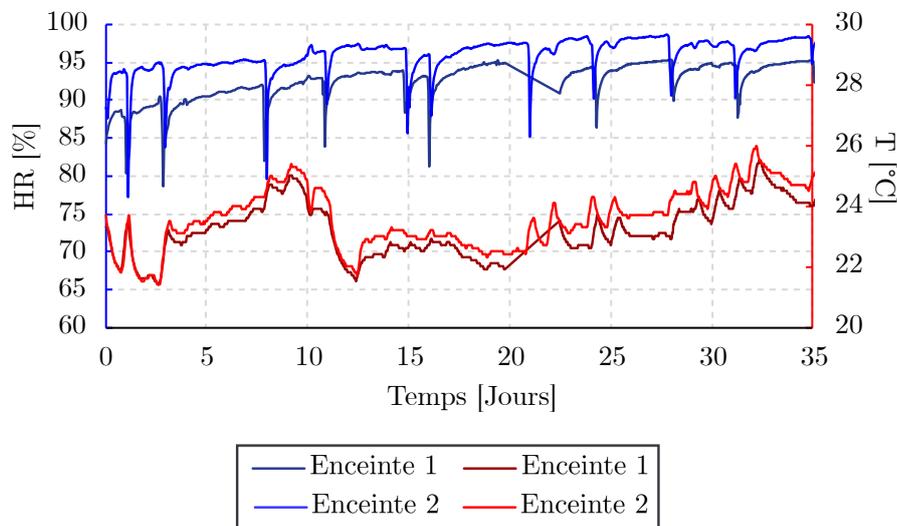


FIGURE 2.5 – Évolution de HR et T dans les deux enceintes utilisées au cours de l'humidification.

Méthode d'étanchéification

Afin d'assurer une diffusion unidirectionnelle, nous étanchéifions 5 faces des échantillons à l'aide de deux couches d'un ruban adhésif. L'imperméabilité du ruban adhésif a été vérifiée par la méthode suivante : nous plaçons un échantillon en bois complètement couvert par 2 couches du ruban adhésif dans un dessiccateur climatique ayant un HR = 97%. Nous plaçons également 2,35 g de couche adhésif dans la même enceinte. Le suivi de masse nous a permis de mesurer une augmentation d'environ 0,19% de la masse de l'échantillon au cours d'une semaine. Celle-ci reste dans le même ordre de grandeur que la variation de masse mesurée pour le ruban adhésif seul. Ceci nous permet de vérifier la bonne capacité d'étanchéification du ruban adhésif employé.

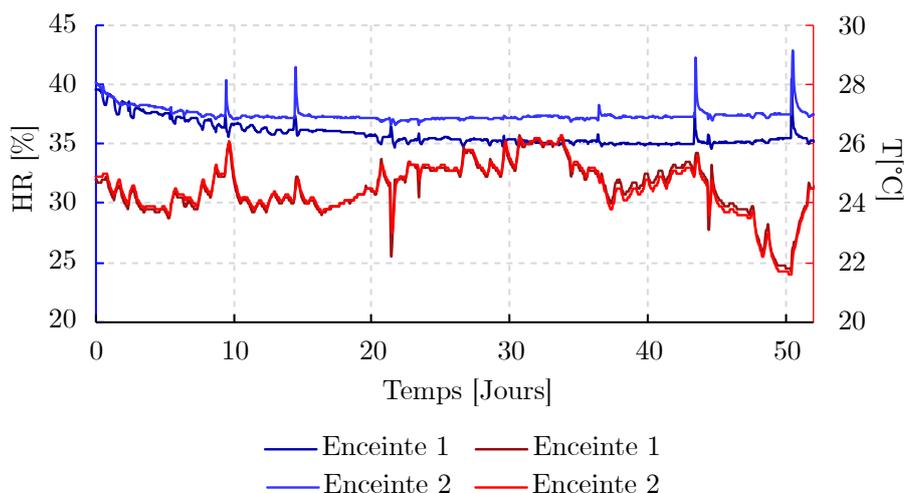


FIGURE 2.6 – Évolution de HR et T dans les deux enceintes utilisées au cours du séchage.

Mesures effectuées

L'essai consiste à réaliser :

- Un suivi régulier de l'évolution des masses des échantillons à l'aide d'une balance de précision de 0.0001 g.
- Un suivi de la distribution spatiale de l'humidité par IRM (voir section 2.3)
- Un suivi de la déformation macroscopique selon les directions perpendiculaires à la direction de transfert (voir section 2.4).

2.3 Résonance magnétique nucléaire du proton

La résonance magnétique nucléaire (RMN) a été largement utilisée au cours de ce travail. Elle nous permet de fournir une mesure robuste et rapide¹ d'un signal RMN induit par les noyaux d'hydrogène de l'état liquide (eau liée ou eau libre). Les différents aspects de la RMN permettent d'étudier des matériaux à différentes échelles (de l'échelle atomique avec la spectroscopie à l'échelle macroscopique avec l'IRM et aux échelles intermédiaires par les mesures de temps de relaxation). Ceci fait de l'IRM un outil très pertinent pour mesurer la teneur en humidité locale (MC) du bois. L'utilisation de l'IRM nous a permis d'étudier les transferts hydriques isothermes et non isothermes (chapitre 3 et chapitre 6). Cette section est dédiée à la présentation de cette méthode de mesure et des paramètres utilisés au cours des mesures.

1. Le temps de mesure est généralement entre 10 et 30 min. Ceci reste très court par rapport à la cinétique de transfert.

L'IRM constitue une technique non destructive, non invasive, puissante et largement employée avec succès en sciences médicales et des matériaux. Quant au bois, cette technique est employée depuis plusieurs années pour étudier la distribution spatiale des différentes populations d'eau libre et d'eau liée présentes dans le matériau (Macmillan; Schneider; Sharp; Balcom 2002; Dvinskikh; M. Henriksson; Berglund; Furó 2011;2010; Zupanc; Mikac; Serša; Merela; Humar 2019; Gezici-Koç; Erich; Huinink; Ven; Adan 2017; Hameury 2006; Zhou 2018; Penvern; Zhou; Maillet; Courtier-Murias; Scheel; J. Perrin; Weitkamp; Bardet; Caré; Coussot 2020).

2.3.1 Principe de la RMN

Le principe de la résonance magnétique nucléaire est présenté brièvement ici. Le lecteur pourra se référer à (Kastler; Vetter 2018) pour une description exhaustive.

En absence de tout champ magnétique extérieur, les moments magnétiques des protons d'un échantillon sont orientés de manière aléatoire (voir figure 2.7 (a)).

Chaque nucléon (proton ou neutron) d'un atome est animé d'une rotation individuelle autour d'un axe qui passe par son centre. Un moment magnétique microscopique $\vec{\mu}$ est associé à chaque nucléon. La résultante macroscopique de cette aimantation microscopique (que l'on note \vec{M}) est donc nulle en absence de tout champ magnétique extérieur.

En présence d'un champ magnétique extérieur, chaque moment magnétique du proton aura tendance à avoir un mouvement de précession autour de l'axe du champ. Ce mouvement de précession se fait à une fréquence privilégiée qui dépend de l'intensité du champ magnétique extérieur et du rapport gyromagnétique du noyau (défini comme le coefficient de proportionnalité entre le moment magnétique et le moment cinétique de spin). Actuellement, les méthodes d'imagerie utilisées (tels que l'IRM) sont basées sur une mesure de protons d'hydrogène. Le noyau d'hydrogène est constitué d'un unique proton. On lui associe alors un moment magnétique $\vec{\mu}$ et un spin égal à 1/2.

Au cours d'une expérience RMN, nous appliquons tout d'abord un champ magnétique extérieur fixe et élevé que l'on appelle \vec{B}_0 . Ce champ est orienté selon l'axe Z comme indiqué sur la figure 2.7 (b). Suite à l'application de ce champ magnétique deux sens d'alignement des moments magnétiques apparaissent dans l'échantillon : un sens d'alignement selon le même sens du champ magnétique (ces protons ont une « énergie basse ») et le deuxième selon le sens opposé (« énergie haute »). Cette distribution ne se fait pas d'une manière égale : nous retrouvons toujours un léger excès de protons dans le niveau de basse énergie. Malgré le nombre infime de protons en excès (4 pour 2 millions de protons dans un champ magnétique égale à 0.5 Tesla et à température ambiante), leur présence engendre une aimantation macro-

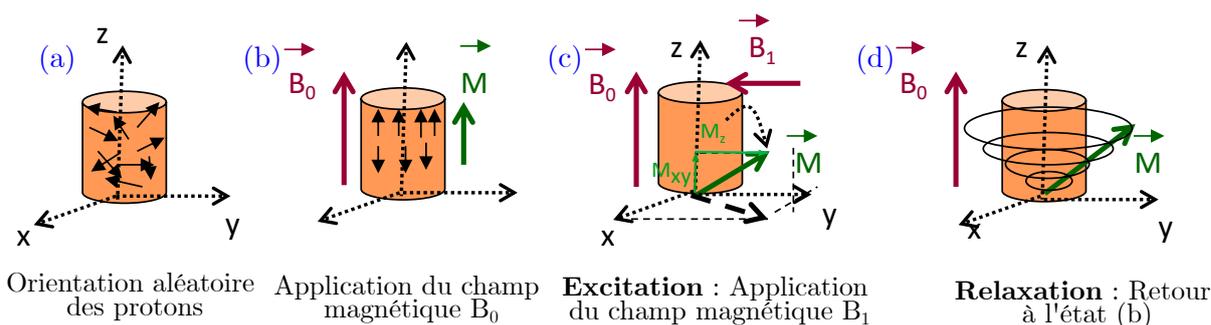


FIGURE 2.7 – Principe d'une mesure par IRM.

scopique (que l'on note \vec{M}_z). Par ailleurs, même si l'aimantation est alignée selon l'axe \vec{B}_0 , les moments magnétiques ne le sont pas. En effet, les protons tournent individuellement autour de \vec{B}_0 avec une fréquence angulaire ω_0 appelée fréquence de Larmor. Ce phénomène est appelé précession.

Suite à l'application du champ \vec{B}_0 , nous allons perturber cet état d'équilibre par l'application d'un autre champ magnétique (plus faible) tournant \vec{B}_1 (onde de radiofréquence (RF)) dans le plan xOy (perpendiculaire à l'axe d'application du champ \vec{B}_0 , voir figure 2.7).

Le phénomène de résonance magnétique est obtenu uniquement quand la fréquence de rotation ω_r du champ tournant \vec{B}_1 est égale à ω_0 . De même, les protons subissent le phénomène de précession autour de \vec{B}_1 . Ce phénomène de double précession est explicité par (Kastler ; Vetter 2018).

L'application de ce nouveau champ \vec{B}_1 aboutit au basculement dans le plan du vecteur \vec{M}_z . Par suite, la composante verticale (selon l'axe Z) du vecteur diminue et la composante transversale augmente (\vec{M}_{xy}) (voir figure 2.7). Le champ \vec{B}_1 est appliqué uniquement pour des périodes spécifiques de sorte que cette impulsion (appelée aussi excitation) bascule le moment d'un angle θ que l'on peut régler selon le besoin.

Une fois l'excitation terminée, un retour à l'état d'équilibre a lieu (voir figure 2.7 (d)). Deux types de relaxation sont observés lors de ce retour à l'équilibre : un décroissement rapide de la composante \vec{M}_{xy} (relaxation spin-spin avec un temps caractéristique « T_2 ») et une augmentation progressive de la composante verticale \vec{M}_z jusqu'à retrouver sa valeur initiale (relaxation spin-réseau avec un temps de relaxation caractéristique « T_1 »). Notons que le temps de relaxation T_2 est toujours inférieur ou égal à T_1 . Un signal RMN représente une mesure de la composante transverse \vec{M}_{xy} .

En réalité, les inhomogénéités de champ magnétique \vec{B}_0 (inhomogénéités d'origine "instrumentale") et les inhomogénéités à l'échelle moléculaire causent une

accélération de la décroissance de la composante transversale. Les deux effets induisent un déphasage des protons ce qui aboutit à une disparition de l'aimantation transversale plus rapide que le temps T_2 obtenu en absence d'inhomogénéités de champ magnétique local. On note alors T_2^* avec $T_2^* < T_2 < T_1$.

2.3.2 Séquences RMN

Séquence FID

La séquence «impulsion-acquisition» est l'une des séquences les plus basiques de la RMN. Elle consiste à appliquer une impulsion RF ayant un angle égal à 90° sur l'échantillon (voir figure 2.8). Cette impulsion est appliquée pendant un temps de quelques μs . Ensuite un temps mort (de l'ordre de quelques μs) est respecté. La bobine passe en mode récepteur pour mesurer le signal émis par l'échantillon lors de son retour à l'équilibre (pendant quelques ms). Après chaque impulsion RF, le spectromètre doit rester inactif pendant un certain temps afin de revenir à l'équilibre (temps de repos (TR)). Le temps de repos est supérieur à $5 \times T_1$ afin d'assurer un retour à l'équilibre. Cette mesure est répétée plusieurs fois pour augmenter le rapport signal/bruit.

Le signal mesuré est appelé signal de précession libre ou Free Induction Decay (« FID »). Il correspond ainsi à la décroissance de la composante transversale \vec{M}_{xy} . Étant donné que le vecteur \vec{M} continue toujours de précesser autour de \vec{B}_0 , le signal mesuré représente une sinusoïde amortie par une exponentielle de temps ayant T_2^* comme temps caractéristique.

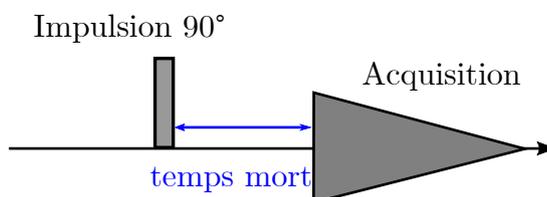


FIGURE 2.8 – Principe de la séquence FID.

Séquence « Inversion – Récupération »

Cette séquence est utilisée afin de mesurer le temps de relaxation T_1 de l'échantillon étudié. Elle consiste à évaluer la relaxation de la composante longitudinale du vecteur d'aimantation. Pour mesurer le temps T_1 , on applique tout d'abord une impulsion de 180° afin d'inverser l'aimantation. Il est à noter que l'application de l'impulsion 180° permet de doubler la quantité de signal. Après un certain temps T_i (temps d'inversion), nous appliquons une impulsion de 90° (voir figure 2.9). Ce cycle est répété pour plusieurs valeurs de T_i afin d'obtenir suffisamment

de points pour tracer le rétablissement de l'aimantation longitudinal. Un temps de repos TR doit être appliqué entre deux cycles pour permettre à l'aimantation de retrouver son état d'équilibre. La récupération de l'aimantation dans un cas idéal d'un échantillon liquide constitué à partir d'une seule population de protons est donnée par l'équation 2.1 :

$$M_z(t) = M_0(1 - 2 * \exp(-\frac{t}{T_1})) \quad (2.1)$$

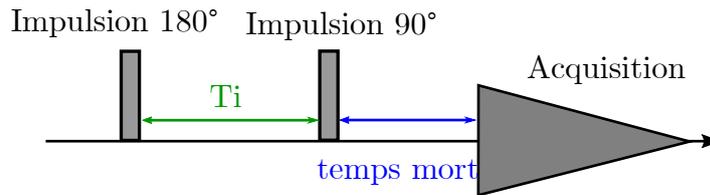


FIGURE 2.9 – Principe de la séquence inversion-récupération.

À noter qu'un traitement de signal à l'aide d'une transformée de Laplace inverse via le traitement CONTIN a été employée (Whittall ; MacKay 1989). Ce traitement est couramment utilisé pour les milieux poreux (Penvern ; Zhou ; Maillet ; Courtier-Murias ; Scheel ; J. Perrin ; Weitkamp ; Bardet ; Caré ; Coussot 2020).

2.3.3 Principe de l'IRM

La technique de RMN présentée ci-dessus traite l'échantillon dans son ensemble. Par ailleurs, l'IRM (basée sur le principe de RMN couplée à l'application d'un gradient de champ magnétique) permet d'obtenir une distribution spatiale de la répartition des protons dans l'échantillon. Pour cela, une localisation spatiale du signal est nécessaire au cours d'une mesure IRM. Ceci se fait en appliquant des gradients linéaires de champ magnétique, qui se superposent au champ magnétique principal \vec{B}_0 , afin d'obtenir des images ou des profils. Ces gradients de champ magnétiques peuvent être appliqués dans les 3 directions X, Y et Z. Nous appliquons uniquement un gradient vertical afin d'obtenir un profil vertical. Les données sont obtenues dans le plan de Fourier. Les données brutes offertes par l'IRM ne sont jamais que l'espace réciproque (au sens de Fourier) du profil recherché. On doit donc appliquer une transformée de Fourier inverse.

Obtention des profils 1D par IRM : séquence SPI

Dans le cadre de ce travail, nous obtenons des profils unidimensionnels (1D) de la distribution de la densité de protons dans les échantillons. Ceci est réalisé par application d'un gradient de champ magnétique selon un axe défini. Nous obtenons

ainsi un signal RMN donné par chaque tranche perpendiculaire à la surface libre. Dans notre cas d'étude, cet axe est aligné avec la direction de diffusion. Les mesures sont réalisées à l'aide de la séquence Single Point Imaging (que l'on note « SPI »). Elle représente une séquence point par point. Ceci signifie que chaque tranche de l'échantillon donne du signal. Dans notre cas, les paramètres de cette séquence ont été choisis afin que la densité de protons mesurée est proportionnelle à la teneur en eau liée.

La séquence SPI est une séquence non standard dédiée à l'étude des échantillons ayant des populations d'eau dont le temps de relaxation (T_2) est court et ne permet pas d'employer des séquences plus classique. La figure 2.10 montre le principe de la séquence SPI. Un gradient G_z , permettant de sélectionner une coupe transversale (dans le plan XY), est initialement appliqué à l'échantillon. Ensuite une impulsion RF ayant un angle θ est appliquée (dans notre cas $\theta = 50^\circ$). Généralement, l'angle θ est inférieur à 90° . L'acquisition du signal est ensuite réalisée à un temps appelé t_p . Il représente le temps d'encodage fixé de l'IRM. Ce paramètre est principalement une caractéristique de l'IRM et il est choisi en fonction de la valeur de T_2^* de l'échantillon étudié. Il est réglé d'une manière à être le minimum possible pour avoir le maximum de signal. À noter que la valeur minimale dépend de la montée du gradient. Cette dernière dépend de la résolution spatiale choisie. Nous considérons un t_p égale à $235 \mu s$.

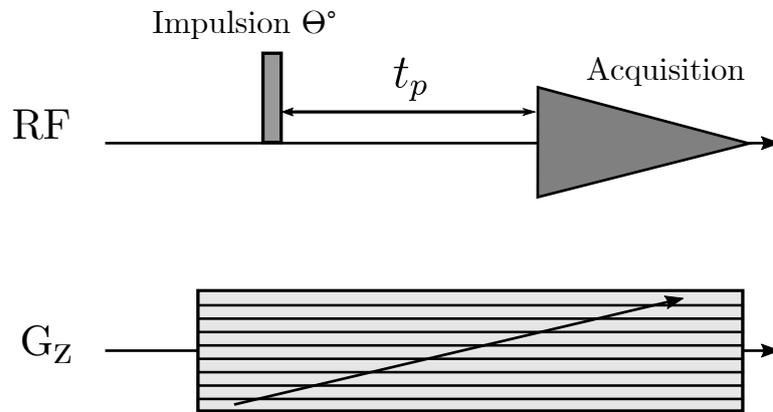


FIGURE 2.10 – Principe de la séquence SPI.

L'intensité du signal déduit à partir de la transformée de Fourier est donnée par :

$$S(x) = \rho(x) \times \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*(x)}\right) \times \left(\frac{1 - \exp\left(-\frac{T_R}{T_1(x)}\right)}{1 - \cos(\theta) \cdot \exp\left(-\frac{T_R}{T_1(x)}\right)}\right) \times \sin(\theta) \quad (2.2)$$

Les valeurs de T_2^* et T_1 sont déterminées expérimentalement. Les valeurs des paramètres T_R et θ sont considérées de sorte que le 3ème terme de l'équation 2.2 soit le plus proche possible de 1. Ceci nous permet de simplifier l'équation 2.2 et de considérer ensuite la relation suivante :

$$S(x) = \rho(x) \cdot \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*(x)}\right) \cdot \sin(\theta) \quad (2.3)$$

Par ailleurs, étant donné que l'angle θ (que l'on note « flip angle ») est égale à 50° , ceci aboutit à la présence d'un effet appelé « blurring effect ». Cet effet est représenté par une transition douce entre les zones de faible fréquence et haute fréquence (par exemple aux bords des échantillons). Ceci implique que le signal obtenu n'aura pas la même forme que l'échantillon selon l'axe Z (un rectangle) mais plutôt un parallélogramme (voir figure 2.11). Le « blurring effect » peut être diminué en diminuant le « flip angle », en revanche la quantité de signal recueillie sera moins importante dans ce cas. Étant donné qu'au cours de ce travail nous mesurons uniquement l'eau liée dans le bois (teneur en humidité d'emblée faible), un compromis est donc nécessaire afin de mesurer quantitativement le signal. Le choix d'un angle $\theta = 50^\circ$ représente un compromis entre le rapport signal/bruit et l'artefact obtenu.

Le champ de vue au cours des mesures est égale à 16 cm. Un total de 128 pixels est utilisé pour encoder l'échantillon selon l'axe Z (axe de mesure, voir figure 2.11 (a)). Ceci aboutit à une résolution (taille de pixel) de 1,25 mm. Pour chaque mesure, 256 scans sont réalisés afin d'augmenter le rapport signal/bruit, ce qui aboutit à un temps de mesure égale à 27 min. Ce temps de mesure est supposé inférieur au temps de variations typiques de l'humidité dans le bois.

Caractéristiques de l'imageur utilisé

Nos études IRM présentées au cours de ce travail sont réalisées avec un imageur 24/80 DBX Brüker au sein du laboratoire Navier (voir figure 2.11 (b)). Cet imageur est équipé d'une sonde proton accordée à 20 MHz et d'un aimant permanent de 0,5 T homogène sur 20 cm de hauteur et 20 cm de diamètre.

2.3.4 Méthode de calibration du signal

Étant donné que le signal RMN mesuré est proportionnel à la densité locale de protons, nous pouvons exprimer le signal initial $S_0(z)$ (mesuré sur le bois à l'état initial sans la présence du ruban d'adhésif) dans l'équation 2.4. L'échantillon est ensuite mesuré en présence de la couche d'adhésif. Nous obtenons ainsi le signal total $S_0^{total}(z)$ où z représente la position de la tranche d'épaisseur 1.25 mm.

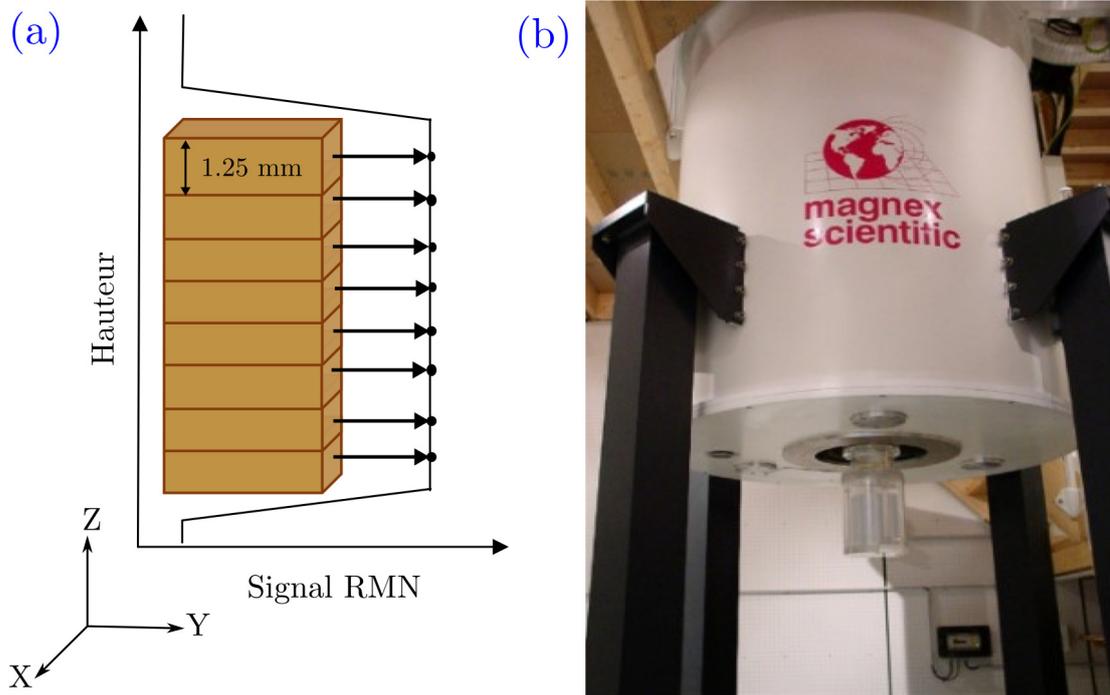


FIGURE 2.11 – (a) Illustration de principe de mesure d'un profil 1D par IRM. La résolution spatiale est considérée égale à 1,25 mm. (b) imageur par Résonance Magnétique du laboratoire Navier

$$S_0^{totale}(z) = S_0(z) + S^p(z) = \beta * MC_0(z) + S^p(z) \quad (2.4)$$

Avec $S^p(z)$ le signal additionnel dû à la présence du ruban adhésif, β une constante et $MC_0(z)$ la teneur en humidité du bois à l'instant initial. À noter que $S^p(z)$ est mesuré en retranchant le signal de l'échantillon avec adhésif à celui sans adhésif pour $t = 0$.

Étant donné que les mesures au cours du conditionnement hydrique se font en présence du ruban adhésif, le signal totale $S_t^{totale}(z)$, mesuré à l'instant t et à une position donnée z , s'écrit sous la forme suivante :

$$S_t^{total}(z) = \beta * MC_t(z) + S^p(z) \quad (2.5)$$

Avec $MC_t(z)$ la teneur en humidité locale du bois à l'instant t . Nous supposons que le signal $S^p(z)$ (mesuré à l'instant initial) reste constant.

La teneur en humidité locale peut être définie à partir de la relation suivante (sous l'hypothèse que le signal issu de l'adhésif n'évolue pas avec l'humidité) :

$$MC_t(z) = \frac{S_t^{total}(z) - S^p(z)}{S_0^{total}(z) - S^p(z)} \times MC_0(z) \quad (2.6)$$

Cette méthode de calibration nous permet de corriger la dépendance du signal à la variation de densité locale du bois. En effet, la concentration d'eau liée dépend fortement de la densité locale de l'échantillon (i.e. la concentration d'eau liée est plus importante dans le bois d'été (Bonnet 2017; Hameury 2006)). Cependant, la teneur en humidité est peu dépendante de la densité locale, sauf aux HR élevées (Bonnet 2017).

2.3.5 Estimation de l'incertitude de mesure

Rapport signal sur bruit

Afin d'estimer le rapport signal/bruit, nous effectuons des mesures à l'aide de la séquence SPI en utilisant les mêmes paramètres cités ci-dessus avec une solution de sulfate de cuivre ayant un temps de relaxation similaire à celui de l'eau liée. Le liquide est ajouté dans un tube cylindrique en verre de diamètre intérieur égal à 1,65 cm. Les mesures sont réalisées avec plusieurs hauteurs de solution à l'intérieur du tube.

La figure 2.12 montre l'évolution du signal RMN, pour les 3 hauteurs de solution mesuré en fonction de la position. Tout d'abord, nous remarquons d'après les profils que bien que la solution dans les 3 tubes soit homogène sur toute la hauteur, le signal RMN n'est pas constant. Ceci est dû aux inhomogénéités instrumentales (dus à l'aimant, l'antenne et le gradient appliqué) qui sont plus importantes lorsqu'on s'éloigne du centre de l'aimant. D'autre part, nous remarquons que le signal présente une certaine « variabilité » malgré la quantité constante d'eau par pixel. Ceci provient du bruit de la mesure. Nous pouvons en déduire une erreur relative de 5% sur la mesure RMN. On obtient alors un rapport signal sur bruit égal à 20 dans le cas du tube contenant la solution de sulfate de cuivre.

Étant donné que le signal RMN initial du bois représente 33% (échantillon BM-R) et 50% (échantillons LC-L et LC-R) de celui obtenu avec le tube contenant de la solution de sulfate de cuivre et que le bruit au cours des essais est constant, nous pouvons en déduire le rapport signal/bruit au cours des essais. On obtient alors un rapport signal sur bruit des mesures effectuées sur les échantillons en bois de 6,6 pour l'échantillon BM-R et de 10 pour les échantillons LC-L et LC-R.

Incertitude sur le calcul des profils d'humidité

L'incertitude sur le calcul de la teneur en eau locale s'exprime en fonction des incertitudes sur les mesures de l'intensité du signal RMN. Nous supposons que les incertitudes de mesures sont nulles sur la teneur en humidité initiale. En appliquant

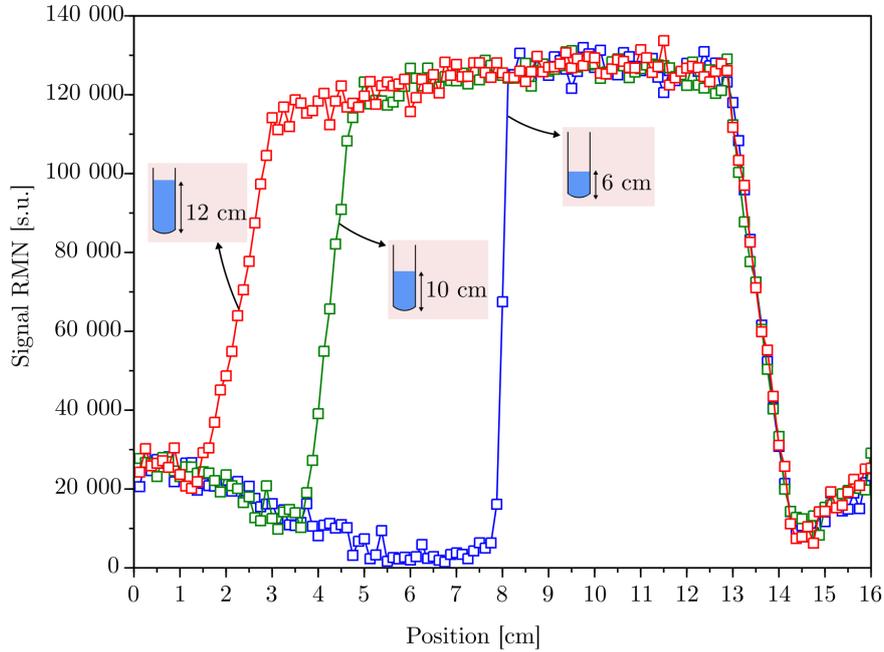


FIGURE 2.12 – Signal RMN obtenu pour 3 hauteurs différentes de la solution de sulfate de cuivre.

la méthode différentielle logarithmique nous obtenons la relation suivante (équation 2.7) pour le calcul d'incertitude :

$$\Delta MC_t(z) = \left(\frac{\Delta S_t^{total}(z) + \Delta S^p(z)}{S_t^{total}(z) - S^p(z)} + \frac{\Delta S_0^{total}(z) + \Delta S^p(z)}{S_0^{total}(z) - S^p(z)} \right) \times \frac{S_t^{total}(z) - S^p(z)}{S_0^{total}(z) - S^p(z)} \times MC_0(z) \quad (2.7)$$

Avec $\Delta MC_t(z)$ l'incertitude sur la mesure de la teneur en humidité à un instant t et une position z , $\Delta S_t^{total}(z)$ l'incertitude de mesure sur le signal mesuré à un instant t , $\Delta S^p(z)$ l'incertitude de mesure sur le signal du ruban adhésif et $\Delta S_0^{total}(z)$ l'incertitude de mesure sur le signal initial du bois. Ces incertitudes représentent le bruit de la mesure RMN pour chaque cas.

Cette relation montre que l'incertitude du calcul de la teneur en humidité augmente en fonction du signal mesuré. En d'autres termes, l'incertitude sur les profils de teneur en humidité locale en fin de la phase d'humidification sera importante. À noter qu'au cours d'une expérience IRM, le bruit est déjà présent dans le signal brut mesuré suite à l'application de la transformée de Fourier. Rajoutons à cela que le bruit est important dans notre cas d'étude puisqu'on travaille avec des faibles

quantités d'eau (nous travaillons dans le domaine hygroscopique d'un matériau poreux). Ceci constitue une source d'erreur inévitable sur les profils.

2.4 Mesure des variations dimensionnelles

Sur les mêmes échantillons, nous réalisons des mesures des variations dimensionnelles dans le plan perpendiculaire à la direction de transfert. Ces mesures nous permettent d'avoir une information sur l'évolution spatiale de la teneur en eau en fonction du temps. Une approche similaire a été appliquée par (Zhou 2018) afin d'en déduire la distribution de l'eau liée au cours de l'imbibition du bois à partir des profils de déformations (conversion des déformations en teneur en humidité). Nous l'appliquons dans notre cas afin de comparer les déformations issues de la modélisation numérique de transfert hydrique du bois et celles issues des mesures. Ceci représente une méthode annexe alternative moins coûteuse que l'IRM et qui permet de discuter les résultats obtenus par IRM et avec le modèle numérique en utilisant les coefficients du modèle de diffusion identifiés au cours du chapitre 4.

Les dimensions de l'échantillon perpendiculaires à la direction de transfert sont mesurées en deux points afin d'éviter les variations liées à l'hétérogénéité du bois (voir figure 2.4). Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un micromètre Mitutoyo avec une précision de 0,01 mm et une capacité de mesure de 25-50 mm.

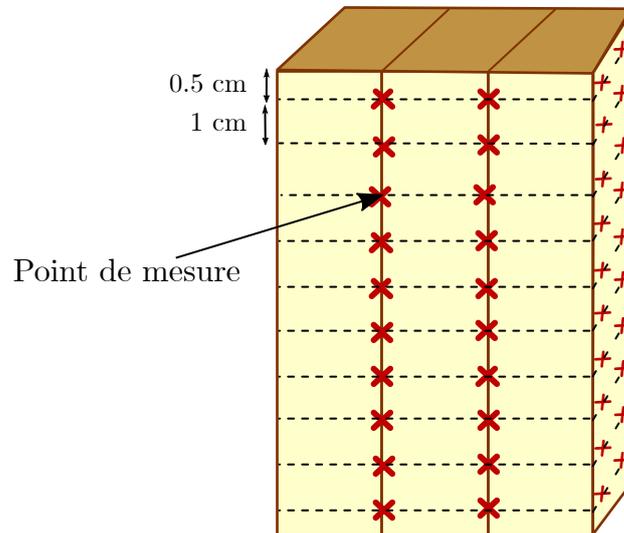


FIGURE 2.13 – Illustration de la méthode pour la mesure des dimensions de l'échantillon dans le plan perpendiculaire à la direction de transfert .

3

TRANSFERT HYDRIQUE : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX IRM

Dans ce chapitre, nous étudions le transfert hydrique du bois au cours de l'humidification et du séchage selon les différentes directions d'anisotropie (L et TR) à l'aide des mesures IRM avec la séquence SPI. On propose de caractériser et de discuter les profils d'humidité par les mesures IRM. Les résultats montrent une différence de cinétique de transfert entre le sens longitudinal et le sens transversal du bois. Nous verrons que même après 5 semaines dans des conditions hydriques qui amènent à la classe de service 3 de l'Eurocode 5, seule une épaisseur limitée de l'échantillon est affectée par le changement de classe de service dans le cas de transfert selon la direction transversale. Par ailleurs, nous verrons que dans le sens longitudinal aucune épaisseur de l'échantillon ne se retrouve en classe de service 3.

Sommaire

3.1	Introduction	77
3.2	Validation des mesures IRM	77
3.2.1	Évolution de l'intensité du signal en fonction de la variation de masse d'eau	77
3.2.2	Évolution de la teneur en humidité moyenne par pesée et par IRM	77
3.3	Humidification	80
3.4	Séchage	83

3.5	Comparaison entre les différents échantillons	85
3.6	Conclusions	91

3.1 Introduction

Nous présentons dans cette section les résultats des mesures IRM. Ces mesures sont effectuées à l'aide de la séquence SPI qui quantifie l'eau liée présente dans le bois au cours de l'humidification et du séchage. Nous vérifions tout d'abord la bonne cohérence de l'ensemble des mesures (section 3.2). Ensuite nous présentons les profils issus de l'humidification à $HR = 97\%$ (section 3.3) et du séchage à $HR = 33\%$ (section 3.4). Dans ces deux sections, pour faciliter la lecture, seuls les profils des échantillons LC-L et LC-T sont présentés. Les profils LC-R et BM-R (similaires à ceux de l'échantillon LC-T) sont donnés en annexe. Enfin une comparaison est réalisée et les résultats sont discutés pour l'ensemble des échantillons (section 3.5)

3.2 Validation des mesures IRM

3.2.1 Évolution de l'intensité du signal en fonction de la variation de masse d'eau

Nous avons vu précédemment que le signal mesuré par IRM est directement proportionnel à la quantité de protons présents dans l'échantillon. Ceci implique qu'une variation linéaire est attendue entre la variation de l'aire sous le signal mesuré et l'évolution de la masse d'eau absorbée ou désorbée par l'échantillon.

La figure 3.1 montre l'évolution de l'intensité du signal RMN en fonction de la masse d'eau pour les 4 échantillons étudiés au cours de l'humidification et du séchage. Nous observons une dépendance linéaire entre la variation du signal RMN et la variation de la masse d'eau des échantillons. Cette variation suit l'évolution de la solution de sulfate de cuivre ayant un temps de relaxation proche de celui de l'eau liée du bois. Ce résultat nous permet de vérifier la bonne cohérence des mesures effectuées sur les 4 différents échantillons et de procéder par la suite à la calibration du signal RMN selon la méthode présentée précédemment (section 2.3.4).

3.2.2 Évolution de la teneur en humidité moyenne par pesée et par IRM

Dans un second temps, nous comparons l'évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée¹ et celle issue des profils IRM². Les figures

1. Cette teneur en humidité est calculée par rapport à la masse anhydre de l'échantillon

2. Cette teneur en humidité est calculée à partir de l'intégrale du profil sur la hauteur de l'échantillon

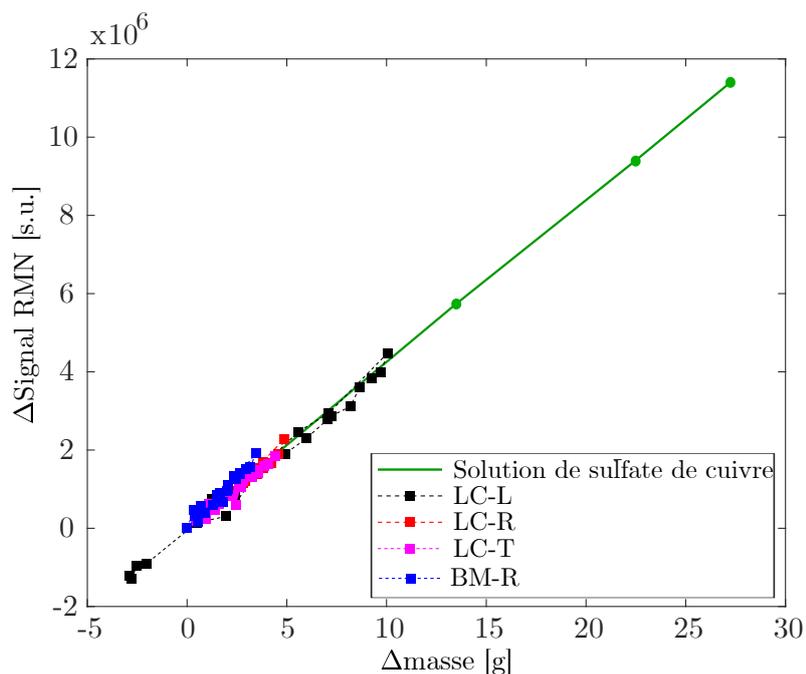


FIGURE 3.1 – Évolution de la variation du signal RMN en fonction de la variation de masse pour les 4 échantillons étudiés au cours de l'adsorption et de la désorption. La ligne verte représente le signal donné par une solution de sulfate de cuivre ayant un temps de relaxation du même ordre de grandeur que celui de l'eau liée.

3.2 et 3.3 montrent cette comparaison pour les deux échantillons LC-L et LC-T. Nous constatons ainsi la présence d'un écart (relatif) plus important vers la fin de la phase de l'humidification où il peut atteindre 12% pour LC-L, 10% pour LC-T, 9% pour LC-R et 11% pour BM-R. Cet écart tend à diminuer au cours de la phase de séchage. L'origine de cette différence peut être due aux incertitudes liées au calcul du profil de la teneur en humidité, notamment au niveau des extrémités du profil (« blurring effect ») et au bruit qui se rajoute au signal au cours des mesures (section section 2.3.5).

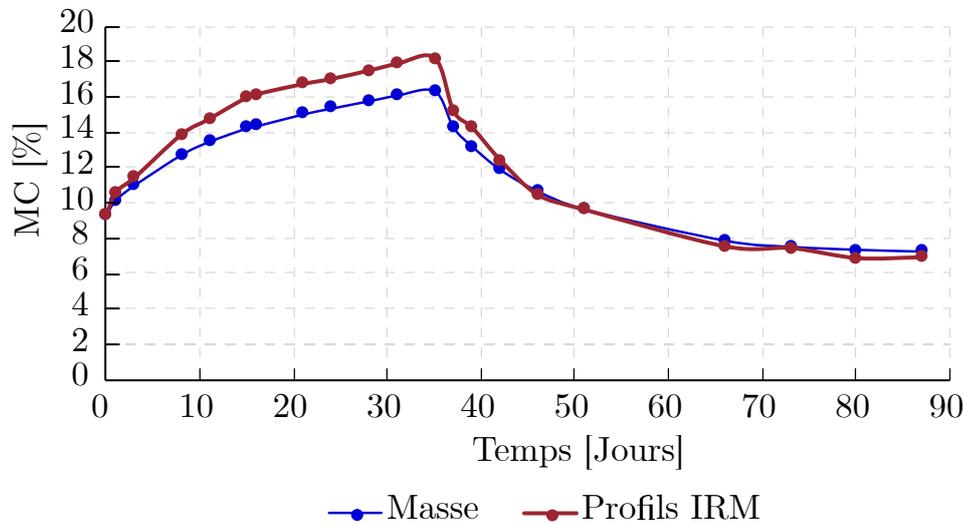


FIGURE 3.2 – Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour l'échantillon LC-L lors de l'humidification et du séchage.

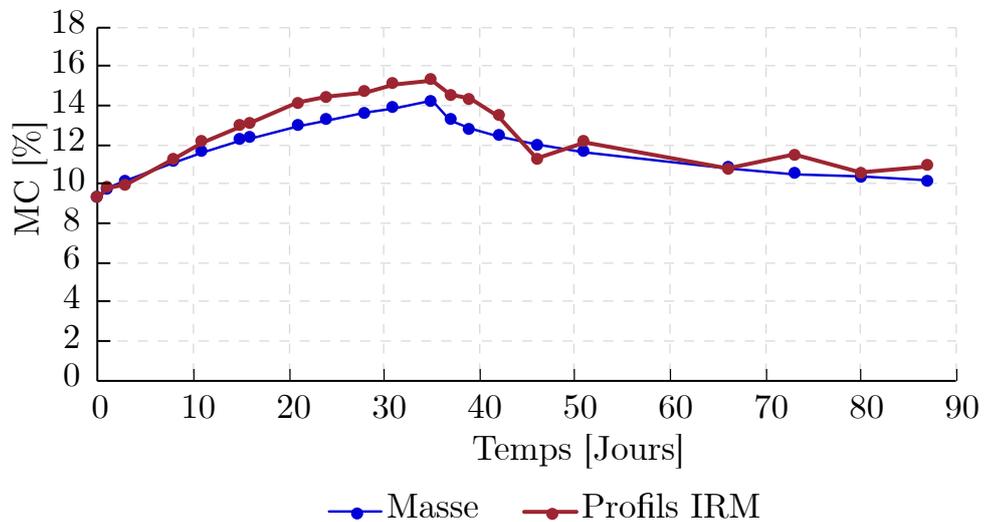


FIGURE 3.3 – Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour l'échantillon LC-T lors de l'humidification et du séchage.

3.3 Humidification

Nous présentons, au cours de cette section, les mesures quantitatives de la distribution de l'eau liée dans les échantillons. La teneur en humidité (MC) est déterminée suivant l'axe de l'échantillon (direction de diffusion) en calibrant le signal obtenu par la séquence SPI selon la méthode présentée dans la section 2.3.4.

Analyse des résultats

Les figures 3.4 et 3.5 montrent l'évolution des profils hydriques des échantillons LC-L et LC-T. Les échantillons LC-R et BM-R (profils en annexe A) présentent un comportement similaire à celui de LC-T. Pour plus de clarté, nous ne présentons que quelques profils pour chaque échantillon. Les profils présentés sont filtrés à l'aide d'une moyenne glissante sur 10 pixels. Par ailleurs, nous détectons la présence d'un effet de bord sur quelques mesures. La zone susceptible d'avoir subi cet effet de bord est montrée en rouge sur l'ensemble des figures. Cet effet sera explicitement étudié au cours de la Partie III section 6.1.3.

Les profils expérimentaux permettent de distinguer clairement le transfert hydrique selon les sens des fibres et les directions transversales. Nous remarquons tout d'abord une cinétique de transfert significativement supérieure selon le sens L par rapport au sens TR. Par exemple, entre 3 et 8 jours depuis le début de la diffusion, l'humidité pénètre l'ensemble de l'échantillon LC-L (voir figure 3.4) et le gradient hydrique existant selon cette direction a tendance à diminuer avec la progression du phénomène de diffusion. 35 jours après le début de l'humidification, nous remarquons que l'humidité est presque homogène sur l'ensemble de la hauteur de l'échantillon. En revanche, le transfert selon les directions transversales (i.e. pour les 3 échantillons restants) montre la présence d'un gradient hydrique important même après 35 jours. On peut ainsi observer que la différence entre la teneur en humidité en surface et à l'intérieur de l'échantillon est d'environ 12 % de MC.

Quant à l'humidité en surface, nous remarquons que les valeurs sont supérieures dans le cas de transfert selon le sens TR à celles obtenues dans le cas de transfert selon la direction longitudinale. Ceci montre que dans le cas de la diffusion transversale, une concentration plus importante d'humidité est attendue à la surface par rapport à une diffusion longitudinale. Cela sera confirmé plus tard à l'aide de la modélisation numérique du transfert hydrique (chapitre 4). Par ailleurs, l'humidité en surface augmente progressivement au cours du temps. Cette observation confirme la présence de la convection surfacique.

Tout ce qui précède montre clairement la différence de la cinétique de transfert d'humidité selon les directions d'anisotropie du bois :

- selon le sens L : une diffusion beaucoup plus rapide a lieu amenant ainsi à

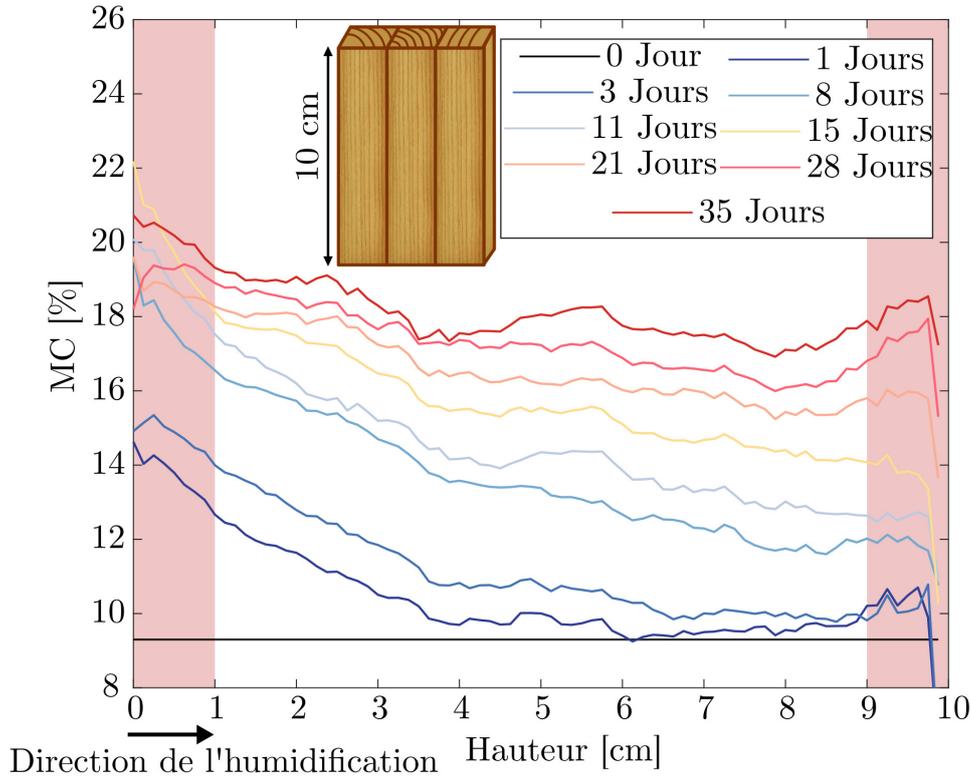


FIGURE 3.4 – Évolution des profils d’humidité en fonction du temps pour un échantillon de lamellé-collé pour lequel la direction d’humidification a lieu selon la direction longitudinale (échantillon LC-L). La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

une répartition de l’humidité presque homogène sur l’ensemble de l’échantillon.

- selon le sens transversal : la faible vitesse de diffusion engendre une concentration plus importante de l’humidité dans la zone proche de la surface de pénétration.

Nous remarquons qu’au cours du premier jour de diffusion, l’épaisseur de pénétration de l’humidité est égale à 6 cm pour l’échantillon LC-L contre une épaisseur d’environ 1,5 cm pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R. Un rapport égal à 16 est donc attendu entre le coefficient de diffusion selon le sens longitudinal et le sens transversal. Ceci est en cohérence avec les résultats de la littérature concernant le rapport entre le coefficient de diffusion selon la direction longitudinale et celui des autres directions (Loulou 2013).

Par ailleurs, le transfert hydrique à travers la colle (visible sur l’échantillon LC-

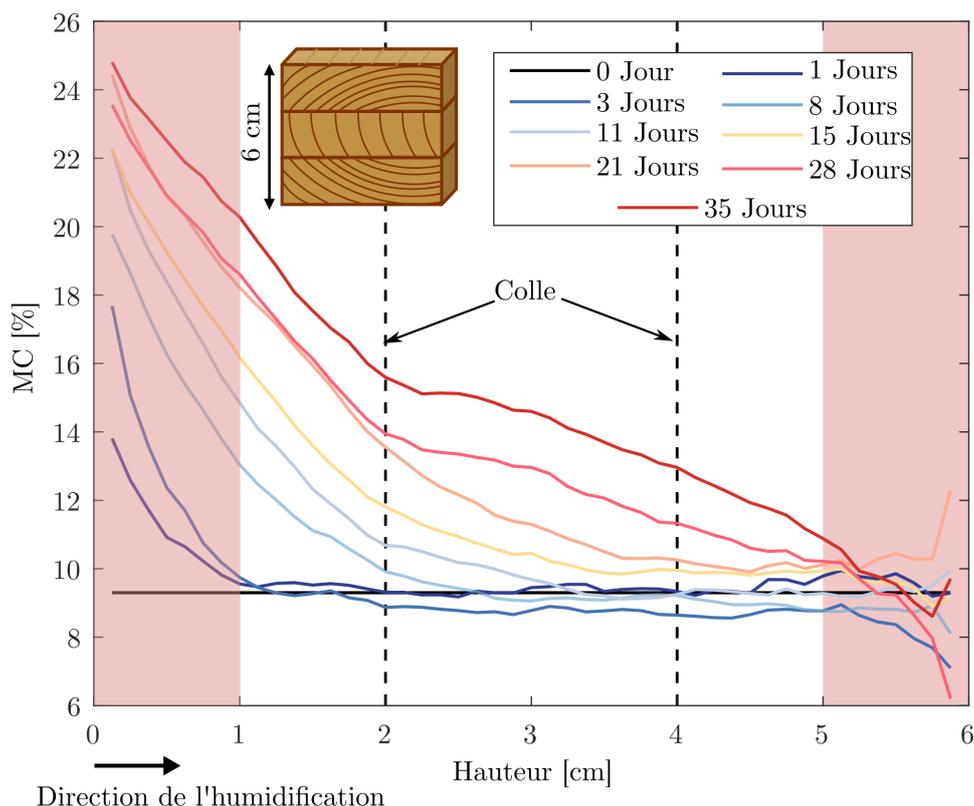


FIGURE 3.5 – Évolution des profils d’humidité en fonction du temps d’un échantillon de lamellé-collé pour lequel la direction d’humidification a lieu selon la direction transversale perpendiculaire à la colle (échantillon LC-T). La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

T, voir figure 3.5) montre que cette dernière ne constitue pas une barrière pour la diffusion de l’eau liée et de la vapeur.

Changement de classe de service

Quant à la classe de service du bois selon l’Eurocode 5, les résultats précédents montrent que le changement de classe de service n’affecte qu’une épaisseur limitée de l’échantillon et ceci selon les directions d’anisotropie considérées. En effet, un élément ayant le sens transversal (TR) comme sens de diffusion n’aura qu’un 1 cm en classe de service 3 après 5 semaines de conditionnement hydrique à très haute humidité relative. En revanche, le reste de l’échantillon est en classe de service 1 ou 2. Une diffusion selon le sens longitudinal amène à un résultat différent : bien que l’humidité pénètre plus rapidement selon le sens longitudinal par rapport au

sens transversal, la teneur en humidité locale reste inférieure à 20% sur l'ensemble de l'échantillon (même pendant une période à une humidité relative élevée). Ainsi, en cas d'humidification le changement de classe de service se fera d'une manière homogène sur l'échantillon et aucune épaisseur ne sera dans la classe de service 3.

3.4 Séchage

Au cours de cette section, nous étudions le séchage. Après avoir subi une humidification à $HR = 97\%$ pendant 35 jours, les échantillons sont placés dans une enceinte ayant un $HR = 33\%$. Les figures 3.6 et 3.7 montrent l'évolution des profils de la teneur en humidité au cours du séchage des échantillons LC-L et LC-T respectivement. Les profils pour les échantillons LC-R et BM-R sont donnés en annexe.

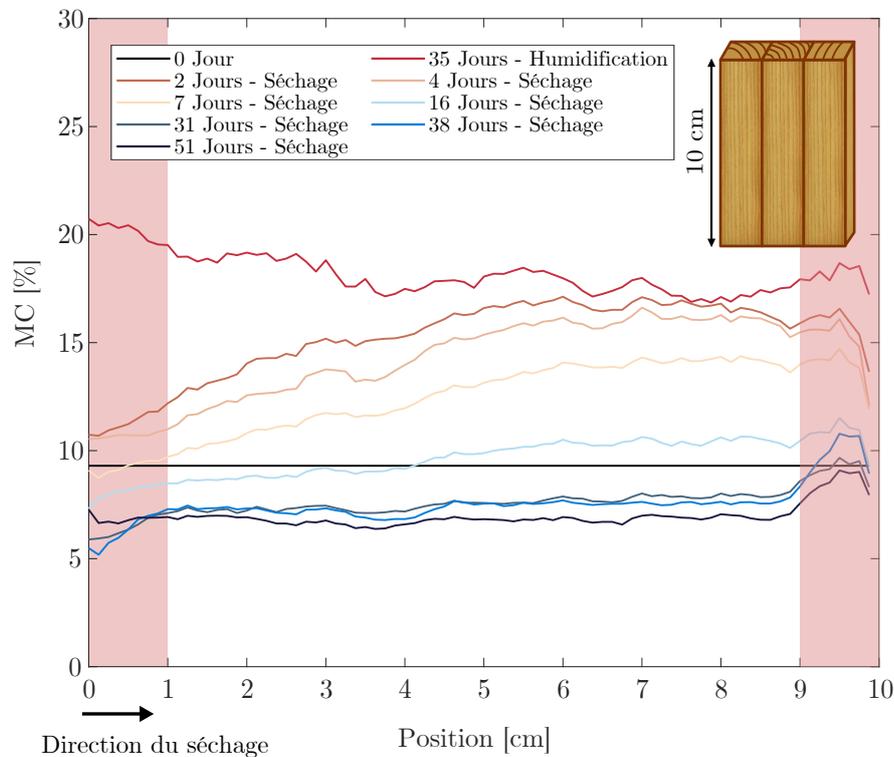


FIGURE 3.6 – Évolution des profils d'humidité en fonction du temps d'un échantillon de lamellé-collé ayant un sens de diffusion selon la direction longitudinale (échantillon LC-L) au cours de la désorption. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

Dans un premier temps, on remarque que, à l'instar de la phase d'humidifi-

cation, l'humidité en surface des 4 échantillons varie graduellement au cours du temps. Ceci montre la présence de la convection surfacique en adsorption et en désorption.

Le séchage selon la direction longitudinale montre toujours une cinétique de diffusion plus importante que celle suivant les directions transversales : après 16 jours de séchage, l'humidité semble être quasi uniforme sur la hauteur de l'échantillon. La différence de teneur en humidité entre la surface et l'intérieur est d'environ de 2%. L'humidité de l'échantillon diminue ensuite de façon homogène en fonction du temps. En revanche, selon les directions transversales, on constate une diminution plus lente de la teneur en humidité d'une manière similaire à ce qui a été observé au cours de l'humidification.

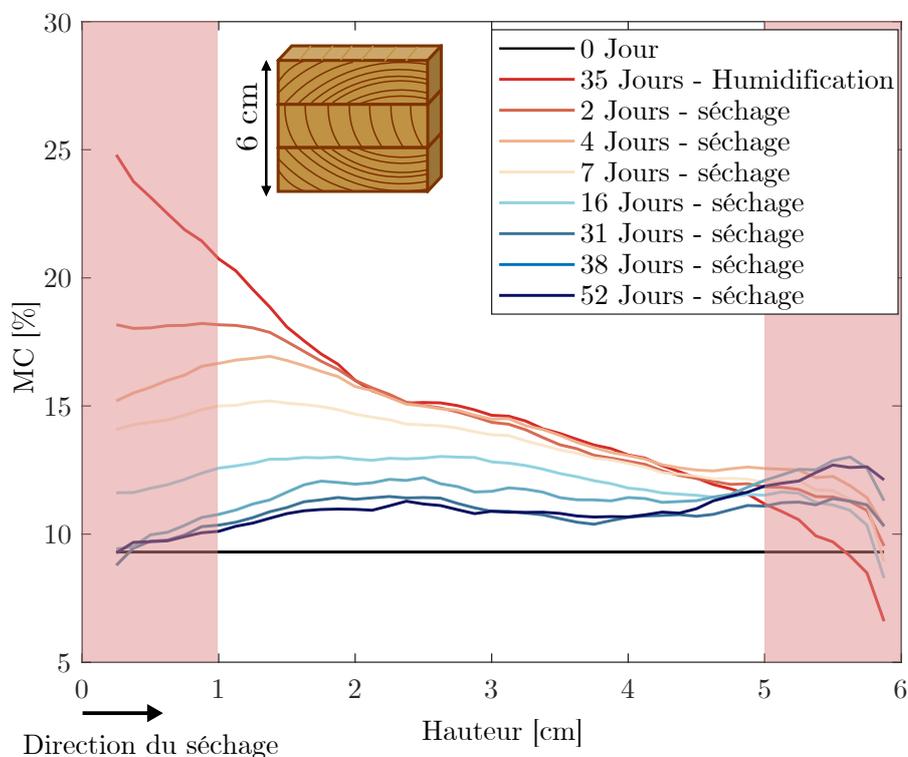


FIGURE 3.7 – Évolution des profils d'humidité en fonction du temps d'un échantillon de lamellé-collé ayant un sens de diffusion selon la direction transversale, perpendiculaire à la colle (échantillon LC-T) au cours de la désorption. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

3.5 Comparaison entre les différents échantillons

Effet de la variabilité inter-échantillons sur le transfert hydrique selon le sens transversal (échantillons LC-R, LC-T et BM-R)

Nous nous intéressons maintenant à déterminer si la variabilité inter-échantillons (différence d'orientations des cernes, différence de provenance, présence de nœuds ...) affecte significativement le transfert hydrique au cours de l'adsorption et de la désorption de l'humidité.

Adsorption de l'humidité

La figure 3.8 montre l'évolution des profils hydriques des échantillons LC-R, LC-T et BM-R au cours des différents instants (1 jour, 8 jours, 15 jours et 35 jours). Nous remarquons une similarité en terme d'épaisseur de pénétration de l'humidité entre les différents échantillons. À 35 jours à 97% d'HR, un écart relatif maximale de l'ordre de 11% existe entre l'échantillon BM-R et LC-R. Cet écart reste du même ordre de grandeur que la précision de la mesure.

La figure 3.9 montre l'évolution de la variation de la masse des échantillons étudiés rapportée à l'aire de la section de l'échantillon en fonction du temps. Nous remarquons que les 3 échantillons (LC-R, LC-T et BM-R) pour lesquels le transfert d'humidité a lieu perpendiculairement à la direction des fibres (direction L) présentent la même évolution au cours du temps. Ceci montre que la quantité d'eau adsorbée est la même pour ces 3 échantillons et est inférieure à celle adsorbée dans l'échantillon LC-L.

Ces résultats nous permettent de conclure que la variabilité représentée par différentes orientations de cernes, présence de nœuds, provenance du bois, présence de la colle (MUF de 1 mm d'épaisseur) affecte faiblement le transfert hydrique dans le bois. Ainsi, nous pouvons considérer qu'à l'échelle de la structure des coefficients de transferts transversaux uniques pour l'épicéa au cours de l'adsorption peuvent être envisagés. Ce résultat sera confirmé dans le chapitre 4.

Désorption de l'humidité

La figure 3.10 montre l'évolution de la variation de masse (valeur absolue) des échantillons étudiés rapportée à l'aire de la section de l'échantillon en fonction du temps. Les résultats des échantillons LC-R, LC-T et BM-R montrent que leur prise de masse évolue de manière similaire et qu'elle est significativement différente de celle de l'échantillon LC-L. Cependant, l'échantillon LC-T montre une évolution légèrement moins importante que les deux autres échantillons (LC-R et BM-R) avec un écart relatif d'environ 12%.

La comparaison des profils hydriques des 3 échantillons au cours de la désorption (voir figure 3.11) confirme que l'humidité diminue moins rapidement pour

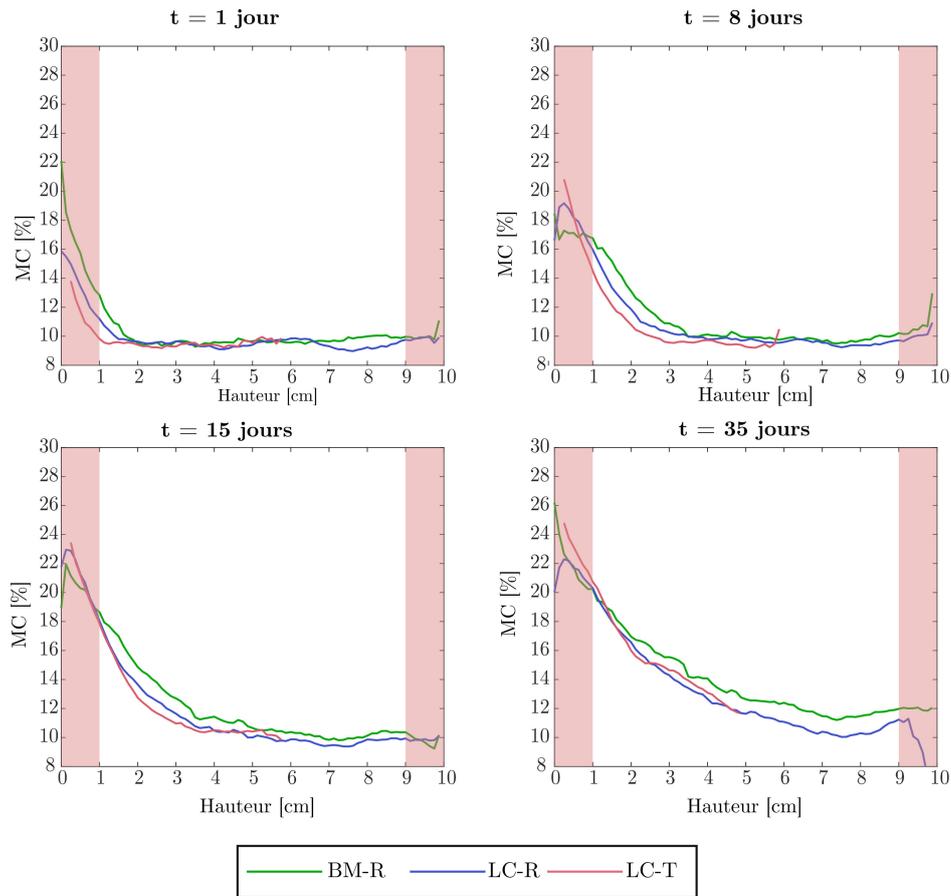


FIGURE 3.8 – Comparaison entre les profils de teneur d’humidité obtenus par IRM pour les 3 échantillons LC-R, LC-T et BM-R pour 4 instants différents : 1 jour, 8 jours, 15 jours et 35 jours depuis le début de la diffusion hydrique.

l’échantillon LC-T que pour les deux autres tant à la surface qu’à l’intérieur de l’échantillon. En revanche, les échantillons LC-R et BM-R montrent une évolution très similaire des profils hydriques et de la prise de masse.

Ceci montre que même si un coefficient de diffusion unique peut être considéré au cours de l’adsorption, en désorption des coefficients de diffusion différents doivent être considérés pour l’échantillon LC-T et les échantillons BM-R et LC-R.

Comparaison entre la cinétique d’humidification et la cinétique de séchage

Nous comparons maintenant la cinétique d’adsorption et de désorption du bois. L’évolution de la cinétique de diffusion est donnée par la relation : $\frac{MC_t - MC_{initial}}{MC_{équilibre} - MC_{initial}}$ où MC_t représente la teneur en humidité moyenne à un temps t , $MC_{initial}$ et

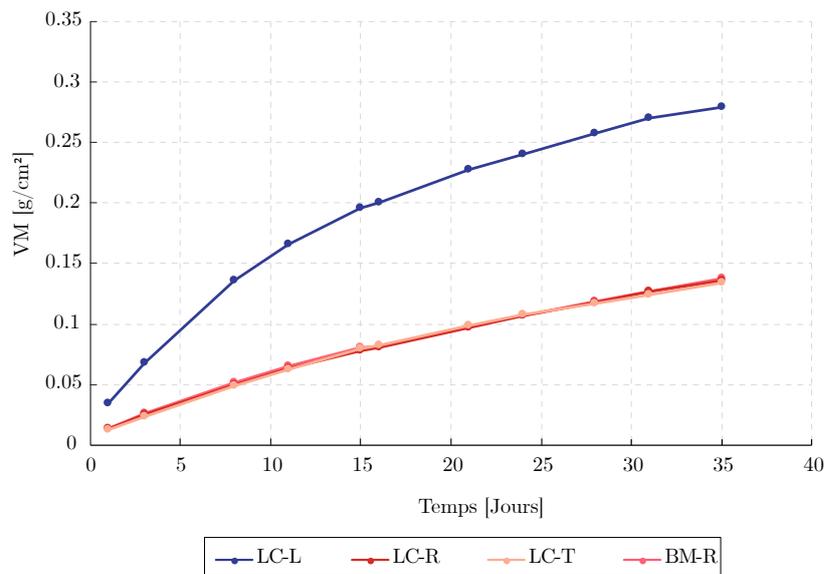


FIGURE 3.9 – Évolution de la masse d'eau adsorbée rapportée à l'aire de la section de l'échantillon au cours de l'adsorption en fonction du temps.

$MC_{\text{équilibre}}$ représentent respectivement les teneurs en humidité initiale et à l'équilibre. La figure 3.12 montre l'évolution de la cinétique de diffusion pour les 4 échantillons au cours de la désorption et de l'adsorption.

Nous constatons une différence significative de la cinétique de diffusion entre la désorption et l'adsorption de l'humidité et ceci pour l'ensemble des échantillons étudiés. La désorption de l'humidité semble être 2 à 3 fois plus rapide que l'adsorption de l'humidité. Ceci peut être expliqué d'une part par l'évacuation plus rapide des molécules d'eau faiblement liée quand le bois est humide et d'autre part par les phénomènes de retrait/gonflement accompagnant la diffusion hydrique du bois (Merakeb 2006).

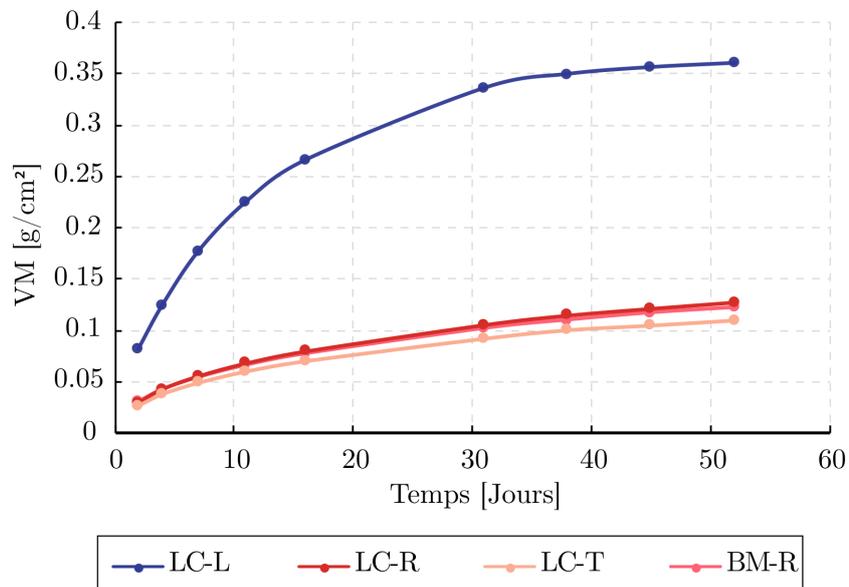


FIGURE 3.10 – Évolution de la masse d'eau désorbée (en valeur absolue) rapportée à l'aire de la section de l'échantillon au cours de la désorption de l'humidité en fonction du temps.

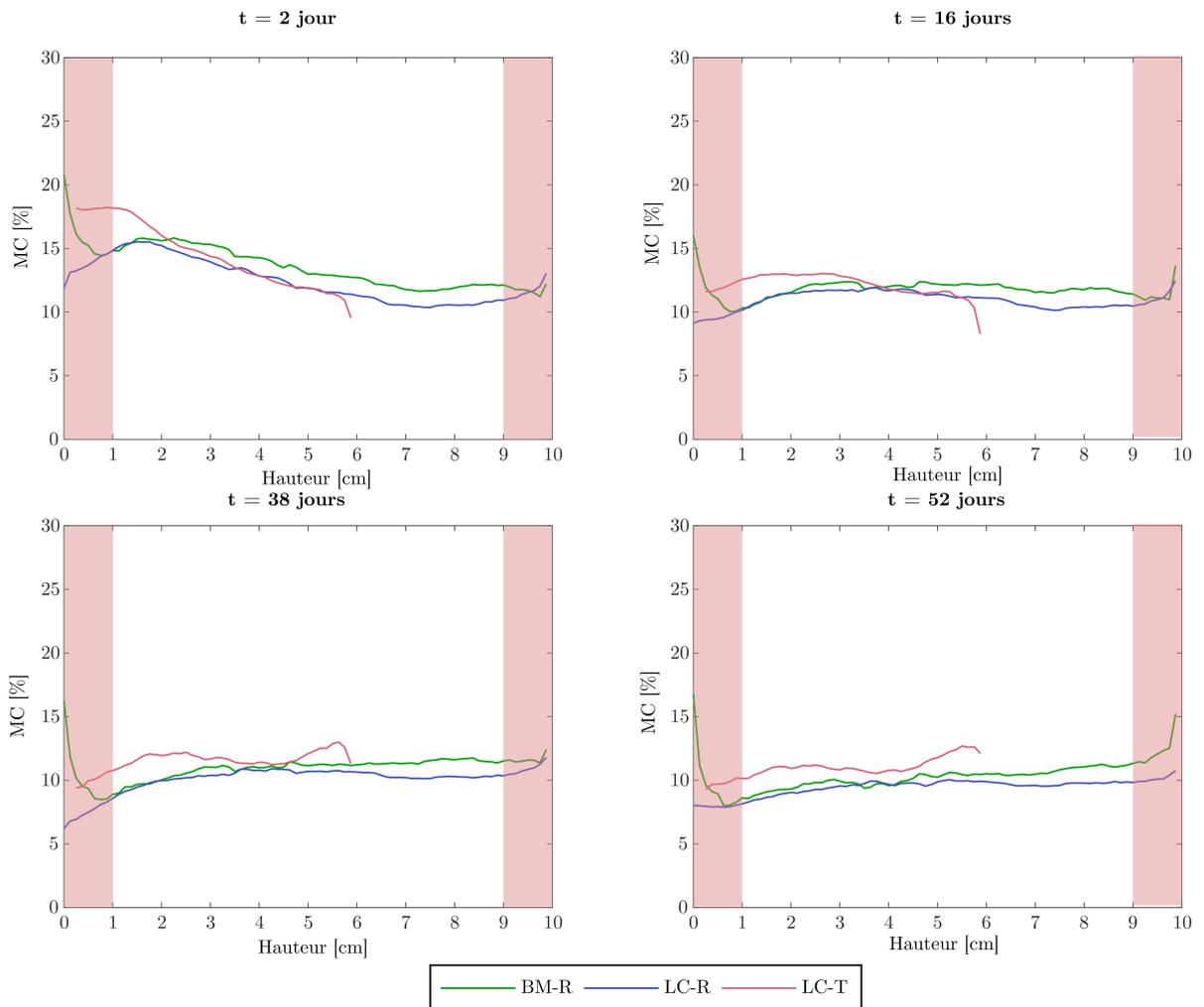


FIGURE 3.11 – Comparaison entre les profils de teneur d’humidité obtenus par IRM pour les 3 échantillons LC-R, LC-T et BM-R pour 4 échéances : 2 jours, 16 jours, 38 jours et 52 jours depuis le début du séchage.

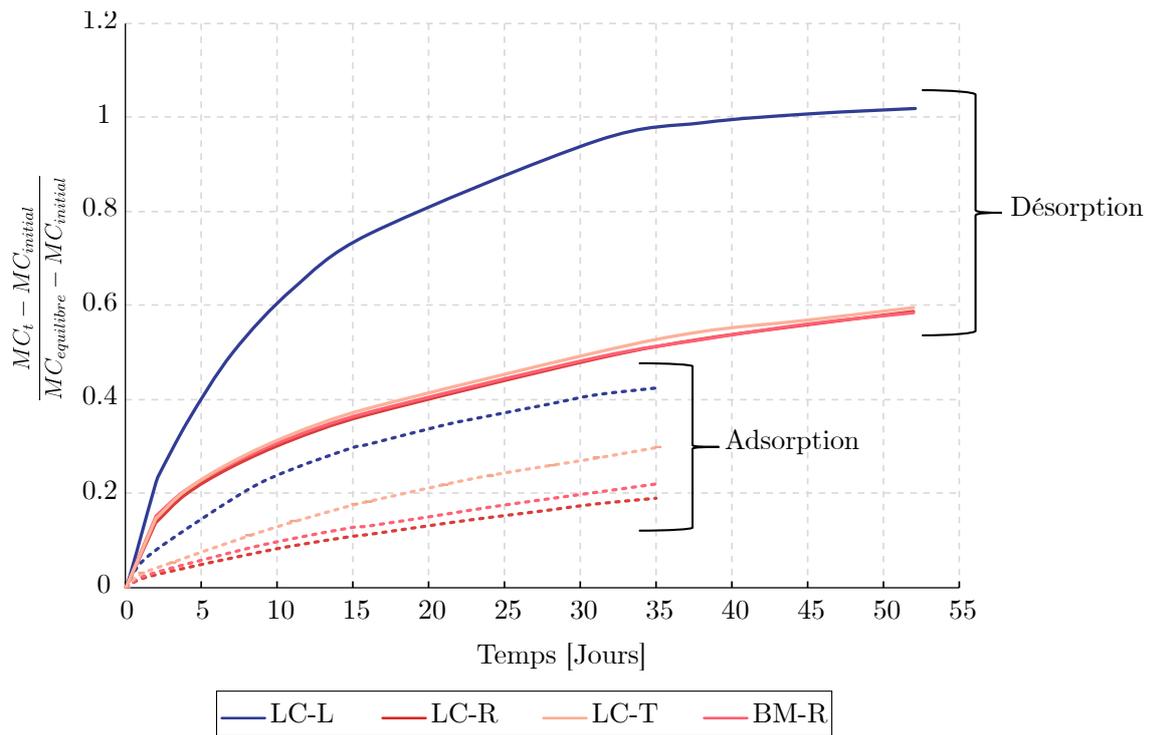


FIGURE 3.12 – Comparaison entre la cinétique d'adsorption (lignes en tirets) et de désorption (lignes continues) de l'humidité des échantillons étudiés.

3.6 Conclusions

Au cours de ce chapitre, nous avons mesuré les profils hydriques des éléments selon les différentes directions d'anisotropie du bois en utilisant l'IRM. Nous avons pu mettre en évidence la différence de cinétique de diffusion selon les directions d'anisotropie et selon l'adsorption et la désorption de l'humidité. Les résultats ont montré, que pour les conditions d'essais, qu'une épaisseur limitée se retrouve en classe de service 3 même après quelques semaines à 97% d'HR si le transfert a lieu selon le sens transversal. Dans le cas d'une diffusion selon le sens longitudinal, la teneur en humidité reste inférieure à 20% et donc aucun changement de classe de service a lieu. Par ailleurs, cette étude a montré que le transfert hydrique dans le bois LC est similaire à celui dans le bois massif. En d'autres termes, la colle ne constitue pas une barrière contre la diffusion hydrique. Les profils mesurés seront utilisés pour identifier les coefficients de diffusion des éléments en bois dans le chapitre suivant.

4

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LE DOMAINE HYGROSCOPIQUE

Dans ce chapitre, nous modélisons le transfert hydrique du bois au cours de l'humidification et du séchage selon les différentes directions d'anisotropie. Nous présentons tout d'abord le modèle employé. Ensuite nous présentons les résultats d'identification. Les coefficients du modèle identifiés mettent en évidence l'influence de l'anisotropie et du cas de diffusion (humidification/séchage) sur la diffusion hydrique du bois. Enfin, les coefficients identifiés sont utilisés afin de déterminer les profils hydriques dans la section d'une poutre dans le cas de climats réels. Ces résultats sont discutés par rapport à l'Eurocode 5 (classes de service).

Sommaire

4.1	Introduction	95
4.2	Modes de diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique	95
4.3	Modélisation de la diffusion hydrique isotherme	97
4.3.1	Méthodes d'identification des paramètres de l'équation de Fick (modèle global de diffusion)	98
4.3.2	Identification des coefficients du modèle de diffusion par la méthode des éléments finis	103
4.4	Résultats	106
4.4.1	Identification du coefficient de diffusion longitudinal	106
4.4.2	Identification du coefficient de diffusion transversal	111

4.4.3	Discussion	115
4.5	Simulation des profils d'humidité dans un cas réel	116
4.5.1	Hypothèses de calcul	116
4.5.2	Résultats et discussion par rapport à l'Eurocode 5	118
4.6	Conclusions	121

4.1 Introduction

Les essais de transfert hydrique réalisés au cours du chapitre 3 mettent en évidence la faible cinétique de diffusion vis-à-vis les changements des conditions climatiques. Ainsi, nous avons pu observer que même en conditions climatiques aboutissant à la classe de service 3 sur une longue période (plusieurs semaines), seule une épaisseur limitée de l'élément est impactée par le changement de classe de service selon l'Eurocode 5. Ceci permet d'en déduire que dans le cas de transfert réel (i.e. cycles de température/humidité relative), une structure bois ne se retrouvera que très rarement en classe de service 3 dans l'ensemble de sa section. La distribution réelle ressemblera à ce qu'on a pu observer précédemment : une épaisseur en classe de service 3 avec le reste de l'élément en classe de service 2 et/ou 1. Cette distribution est négligée lors du dimensionnement selon l'Eurocode 5 où l'on se place dans le cas le plus défavorable (classe de service 3 appliquée d'une manière homogène sur tout l'élément). Ces résultats montrent que la méthode de classement selon l'Eurocode 5 semble très sécuritaire pour les structures bois.

Afin d'améliorer la méthode de classification des structures en bois, nous proposons dans un premier temps de modéliser les transferts hydriques hygroscopiques isothermes du bois et d'identifier les coefficients (anisotropes) du modèle. Nous présentons alors un résumé des grandeurs physiques influençant la diffusion hydrique du bois et ensuite la méthode d'identification des paramètres du modèle choisi. Finalement, nous employons ces coefficients pour simuler un cas réel de diffusion.

4.2 Modes de diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique

Dans le domaine hygroscopique, nous retrouvons l'eau sous deux phases : phase vapeur et eau liée. La diffusion de l'humidité consiste en une diffusion simultanée des deux phases ainsi qu'à un couplage entre les deux (Engelund ; Thygesen ; Svensson ; Hill 2013). Le mouvement de la phase vapeur se fait au niveau de toutes les porosités du bois (lumens, ponctuations ...). L'eau liée se diffuse au sein de la paroi cellulaire uniquement. À l'interface entre les porosités et la paroi cellulaire du bois un changement de phase réversible (eau liée \longleftrightarrow vapeur) a lieu (voir figure 4.1).

La diffusion effective macroscopique est le résultat de ces différents mécanismes microscopiques concomitants. Il est généralement admis que dans le sens longitudinal du bois (sens L), la phase vapeur contribue majoritairement à la diffusion hydrique (Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017). Cependant, selon les sens transversaux (R et T), les deux mécanismes coexistent simultanément.

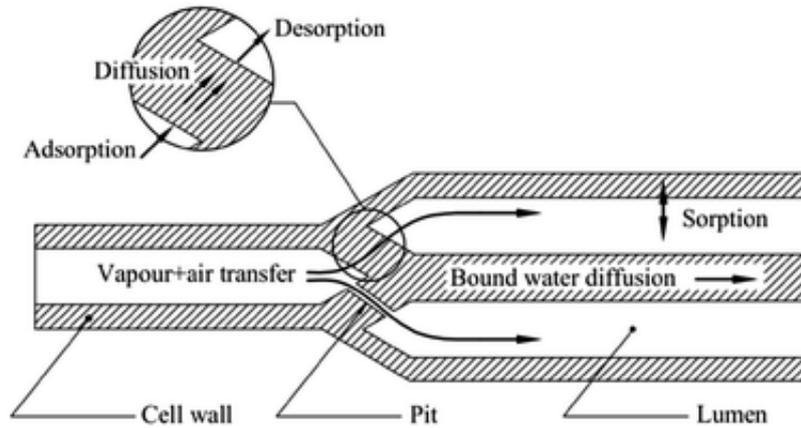


FIGURE 4.1 – Modes de transfert de l’humidité au sein de la microstructure du bois d’après (Krabbenhøft 2004).

Des modèles de diffusion appelés « Non fickiens » proposent de séparer la diffusion des deux phases vapeur et eau liée et de considérer le couplage entre la diffusion des deux phases au phénomène de sorption (Frandsen 2007 ; Eitelberger ; Hofstetter 2011). Généralement, le coefficient de diffusion de la phase vapeur dans le bois ($D_{v,b}$) est considéré proportionnel au coefficient de diffusion de vapeur dans l’air $D_v = 2,31 \times 10^{-5} \times \left(\frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_v}\right) \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81}$ donné par (Schirmer 1938). Ce coefficient de proportionnalité dépend généralement de la complexité du chemin de diffusion. En effet, la structure poreuse complexe du bois tels que sa tortuosité et le diamètre des pores affecte la diffusion (diffusion en régime de Knudsen (Zillig 2009 ; Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017)). Cependant, les coefficients proposés dans la littérature peuvent être très variables : (Frandsen 2007 ; Dvinskikh ; M. Henriksson ; Berglund ; Furó 2011 ; 2010 ;) proposent un coefficient égal à 0,9 pour le sens longitudinal mais divergent pour les coefficients dans le sens transversal (0,03 dans (Frandsen 2007) et 0,11 dans (Dvinskikh ; Ma. Henriksson ; Mendicino ; Fortino ; Toratti 2011)). Le coefficient de diffusion de l’eau liée est estimé égal à $D_{eau liée} = D_0 \times \exp^{-\frac{E_b}{R \times T}}$ avec $D_0 [m^2/s]$ une constante qui dépend de la direction de diffusion ($D_{0,T} = 7 \times 10^{-6}$ et $D_{0,L} = 17,5 \times 10^{-6}$), E_b l’énergie d’activation $E_b = (38,5 - 29 \times m) \times 10^3 [J/mol]$, R la constante universelle des gaz et T la température [$^{\circ}K$] (Frandsen 2007). Ceci aboutit à un coefficient de diffusion de l’eau liée $\sim 10^{-12} m^2/s$ à la température ambiante (Engelund ; Thygesen ; Svensson ; Hill 2013). Néanmoins, la contribution de l’eau liée à l’ensemble de la diffusion globale reste limitée (Thybring ; Fredriksson 2021 ; Krabbenhøft 2004) et peut être négligée lors de la modélisation de diffusion multi-phasique (Hozjan ; Svensson 2011).

En pratique, lors des essais de transfert, on ne peut pas séparer les deux phases

et une diffusion effective macroscopique est ainsi considérée. On identifie alors un coefficient de diffusion effectif.

L'hypothèse de sorption instantanée par rapport à la vitesse de diffusion permet de négliger l'aspect de changement de phase lors de la modélisation du transfert de l'humidité et de considérer uniquement la diffusion de la matière au sein du bois. Selon (Krabbenhøft 2004), ceci est vrai pour un bois ayant des dimensions selon le sens de diffusion de l'ordre de quelques centimètres. En se basant sur cette hypothèse, le transport de l'humidité peut être modélisé par un modèle de diffusion standard (par l'équation de Fick).

Le dernier phénomène de transport à considérer est l'échange par convection hydrique au niveau de la surface de l'échantillon. Ce phénomène représente une résistance au transfert hydrique externe et il est dû à la présence d'une couche d'air en écoulement laminaire à proximité de la surface de pénétration de l'humidité (Varnier 2019 ; Merakeb 2006) par analogie avec le transfert thermique. Il se traduit par une variation progressive de la teneur en humidité à la surface des éléments et sur le plan pratique par une condition aux limites de type Neumann. Par ailleurs, il est généralement admis que ce phénomène dépend fortement de la vitesse de l'air ambiant. En présence d'une vitesse d'air supérieur à 3m/s, une condition aux limites de type Dirichlet peut être appliquée (MC surface = MC équilibre du milieu ambiant).

4.3 Modélisation de la diffusion hydrique isotherme

D'une manière générale, la diffusion représente le mouvement aléatoire de la matière d'une zone où la concentration est élevée vers une zone de faible concentration. Elle est décrite par la loi de Fick (équation 4.1). Une condition aux limites de type convective est prise en compte à l'aide de l'équation 4.2.

$$\frac{\partial(F)}{\partial t} = \nabla \cdot (D(F)\nabla(F)) \quad (4.1)$$

$$q = S_F \times (F_{surface} - F_{équilibre}) \quad (4.2)$$

Avec D le coefficient de diffusion hydrique, F la force motrice responsable du mouvement de la matière considérée, q le flux hydrique à la surface, S_F le coefficient d'échange surfacique relié à la force motrice, $F_{surface}$ et $F_{équilibre}$ représentent les valeurs de la force motrice à la surface et la valeur à l'équilibre respectivement. Les unités des coefficients D et S dépendent de la force motrice choisie.

Dans le cas de transfert hydrique dans le bois, la diffusion se fait des zones les plus humides vers les zones les plus sèches afin de retrouver un équilibre dans

l'élément. La bibliographie montre une vaste variabilité sur le choix de la force motrice (F) pour ce transfert hydrique. Nous trouvons à titre d'exemple la concentration d'humidité c (kg/m^3), la teneur en eau ($kg_{eau}/kg_{Bois\ anhydre}$), la pression de vapeur... Nous trouvons également une variété de modèles employés reposant toujours sur l'équation de Fick (résolution du transfert global de l'humidité en considérant une équation de Fick unique, couplage de deux équations de Fick où l'on considère la diffusion de vapeur et la diffusion de l'eau liée et un terme de couplage entre les deux équations).

Nous considérons une équation de diffusion globale de la matière en se reposant sur l'hypothèse de la sorption instantanée au niveau de la paroi cellulaire. Ceci permet l'utilisation d'un modèle relativement simple. Nous choisissons d'employer la teneur en eau (MC (%)) comme force motrice puisqu'elle constitue une grandeur physique simple à mesurer (à partir des mesures des pesés et des profils hydriques). Le modèle de diffusion employé représente alors un modèle simplifié où l'on considère que le bois est un matériau homogène (selon une direction) et le phénomène de diffusion est un simple phénomène de transport des molécules d'une région de haute concentration vers une région de faible concentration.

4.3.1 Méthodes d'identification des paramètres de l'équation de Fick (modèle global de diffusion)

Plusieurs approches analytiques et numériques sont employées dans la littérature pour identifier les coefficients de diffusion en se basant sur la résolution de l'équation de Fick (modèle de diffusion global). Dans cette section, nous présentons quelques approches d'identification que l'on peut trouver dans la bibliographie.

La mesure de l'évolution de la teneur en humidité par pesée constitue la méthode la plus employée pour identifier le coefficient de diffusion (Perkowski; Świrska-Perkowska; Gajda 2017; Merakeb 2006; Time 1998; Hozjan; Svensson 2011; Loulou 2013; Olek; Perré; Weres 2005; Agoua; Zohoun; Perré 2001). Dans ce cas, il est nécessaire d'établir certaines hypothèses notamment sur la forme de la dépendance du coefficient de diffusion à la teneur en humidité ainsi que sur l'importance de l'échange convectif de l'humidité à la surface et sur la nature du milieu dans lequel la diffusion aura lieu (infini, semi-infini..).

Des méthodes analytiques sont parfois employées dans le cas de l'hypothèse de diffusion dans un milieu semi-infini/infini et en absence d'échanges convectifs. Par ailleurs, plusieurs auteurs étudient différentes formes de dépendance du coefficient de diffusion à la teneur en humidité (MC) afin de choisir celle qui correspond le mieux à la courbe d'évolution de la masse (Perkowski; Świrska-Perkowska; Gajda 2017; W. P. Da Silva; L. D. Da Silva; De Oliveira Farias; C. M. D. P. Da Silva; Ataide et al. 2013; Olek; Perré; Weres 2005). Le coefficient de diffusion prend

souvent une forme exponentielle en fonction de la teneur en humidité (Olek ; Perré ; Weres 2005 ; T. A. Nguyen 2014 ; Florisson ; Vessby ; Ormarsson 2021). Cependant, d'autres formes de dépendance sont proposées telles que les formes quadratiques (Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017), linéaires (W. P. Da Silva ; L. D. Da Silva ; De Oliveira Farias ; C. M. D. P. Da Silva ; Ataide et al. 2013 ; Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017), constantes dans un domaine d'humidité relative (Loulou 2013) et même des valeurs constantes indépendantes de l'humidité (Olek ; Perré ; Weres 2005 ; Perkowski ; Świrska-Perkowska ; Gajda 2017 ; W. P. Da Silva ; L. D. Da Silva ; De Oliveira Farias ; C. M. D. P. Da Silva ; Ataide et al. 2013 ; Loulou 2013). Au cours de ces études, une minimisation d'une fonction objective est souvent réalisée afin d'en déduire les coefficients du modèle de diffusion.

Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques de la résolution du modèle de diffusion reposent souvent sur des hypothèses simplificatrices telles que la considération d'un coefficient de diffusion constant, une condition aux limites de type Dirichlet et une diffusion dans un milieu infini ou semi-infini. Nous présentons ici quelques approches (les plus utilisées dans la littérature). Les méthodes présentées ci-dessous sont essentiellement basées sur les méthodes de résolution fournis par (Crank 1979). À noter que toutes les méthodes cherchent à résoudre l'équation de la même forme que l'équation 4.1 mais avec des conditions aux limites variées.

Cas d'un milieu semi-infini : Dans un milieu semi-infini, la quantité adsorbée ou désorbée est directement proportionnelle à la racine carrée du temps. Cette relation reste valable quelle que soit la relation qui relie le coefficient de diffusion à la concentration. La méthode de résolution dans ce cas nécessite une substitution dans l'équation de Fick de la variable F par la teneur en eau adimensionnelle. L'équation de Fick devient alors (Agoua ; Zohoun ; Perré 2001) :

$$\frac{\partial(E)}{\partial x} = D \frac{\partial^2(E)}{\partial^2 x} \quad (4.3)$$

$$E = \frac{MC - MC_{initial}}{MC_{equilibre} - MC_{initial}} \quad (4.4)$$

En supposant que la résistance externe est nulle, les conditions aux limites de l'équation de diffusion seront :

- $E = 0, \forall x \text{ à } t = 0$
- $E_{x=0} = 1, t \succ 0$

En appliquant un changement de variable tel que $\eta = \frac{x}{\sqrt{4Dt}}$ (appelée variable de Boltzmann) dans l'équation 4.3, la résolution analytique dans ce cas donne :

$$E(t) = \frac{\Delta m_t}{\Delta m_{total}} = \frac{4}{e} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} \quad (4.5)$$

Avec e l'épaisseur totale de l'échantillon, t le temps, Δm_t la variation de masse à l'instant t et Δm_{total} la variation de masse totale.

Finalement, le coefficient de diffusion D sera déterminé en utilisant la pente de la partie linéaire de la courbe expérimentale de la variation de E en fonction de \sqrt{t} (voir figure 4.2 (a)).

En réalité, et comme on a pu le constater d'après les mesures de profils dans le chapitre 3, l'hypothèse d'un milieu de diffusion semi-infini n'est valable que pour les premiers temps de diffusion. Rajoutons à cela, qu'avec cette méthode nous négligeons la résistance externe aux transferts ce qui ne représente pas toujours le cas réel.

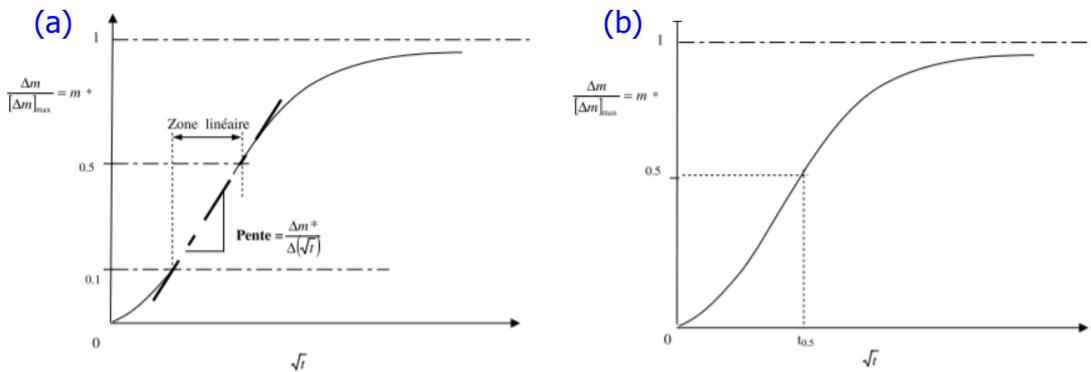


FIGURE 4.2 – Méthodes de détermination du coefficient de diffusion dans le cas d'un milieu semi-infini (a) et dans le cas d'un milieu infini (b) d'après (Agoua; Zohoun; Perré 2001).

Cas d'une plaque fini : Cette méthode est utilisée pour estimer la diffusion dans un milieu dont l'épaisseur est suffisamment plus petite que les deux autres dimensions. La solution dans ce cas peut être décrite par un produit d'une fonction dépendante de la position x (prise par rapport à une des faces de l'échantillon) et du temps t :

$$E(x, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left(\frac{-D \times (2n+1)^2 \pi^2}{e^2} t\right) \times \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{e}\right) \quad (4.6)$$

L'humidité moyenne adimensionnelle de l'échantillon correspond à l'intégrale

de l'équation 4.6 sur l'ensemble de l'échantillon. Nous obtenons ainsi l'équation 4.7.

$$\bar{E}(t) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{e^2}\right) \quad (4.7)$$

L'équation 4.7 peut être simplifiée en prenant le premier terme du développement de la série et en considérant la valeur déterminée au temps de demi-sorption (voir figure 4.2 (b)). Nous obtenons ainsi la relation 4.8 pour déterminer le coefficient de diffusion D.

$$D = 0,049 \times \frac{e^2}{t_{0,5}} \quad (4.8)$$

Avec e l'épaisseur totale de l'échantillon et $t_{0,5}$ est le temps de demi-sorption déterminé lorsque $\bar{E}(t) = 0,5$.

L'application de l'équation 4.6 repose sur l'hypothèse que dès que l'échantillon est placé dans son milieu, la concentration au niveau des surfaces ($x = 0$ et/ou $x = e$) est égale à la valeur d'équilibre pour une pression de vapeur imposée et reste constante pendant le processus de diffusion. Par ailleurs, le coefficient de diffusion est supposé indépendant de l'humidité.

Une autre manière de déterminer le coefficient de diffusion à partir de la formule complète 4.7 consiste à minimiser l'écart entre le résultat expérimental et le résultat numérique puisque le résultat obtenu par l'équation 4.7 est valable quel que soit le temps t considéré (Agoua ; Zohoun ; Perré 2001). Une courbe théorique $\bar{E}(t)$ peut être construite en partant d'un coefficient de diffusion estimé et ensuite l'écart entre la courbe expérimentale et la courbe théorique est calculé en utilisant un critère de minimisation tel que :

$$critère = \frac{\sum (\bar{E}_i^{exp}(t) - \bar{E}_i^{calcul}(t))^2}{n} \quad (4.9)$$

Avec n le nombre de points expérimentaux.

Le coefficient de diffusion sera identifié ensuite à partir de ce critère de minimisation.

Prise en compte de l'échange convectif (coefficient S) : Cette méthode prend en considération l'échange externe dans le cas d'une plaque finie. La solution est donnée par l'équation suivante :

$$E = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \times B \times \cos(\beta_n \times \frac{x}{B}) \times \exp\left(\frac{-\beta_n^2 \times D \times t}{e^2}\right)}{\beta_n (\beta_n + B^2 + B) \times \cos(\beta_n)} \quad (4.10)$$

Avec β_n les racines positives de :

$$\beta \times \tan(\beta) = B = \frac{S \times e}{2 \times D} \quad (4.11)$$

S représente le coefficient d'échange surfacique et e l'épaisseur de l'élément.

Les racines de l'équation 4.11 sont données pour différentes valeurs de B chez (Crank 1979).

Méthode de séparation du coefficient de diffusion (D) et du coefficient d'échange surfacique (S) : (S. Avramidis ; Siau 1987) proposent une méthode analytique pour calculer le coefficient de diffusion D et le coefficient d'échange surfacique S à partir d'une formule empirique proposée initialement par (Choong ; Skaar 1972) :

$$\frac{t_{0,5} \times D}{a^2} = 0,2 + \frac{0,7}{H \times a} \quad (4.12)$$

Avec a la moitié de l'épaisseur de l'échantillon, $t_{0,5}$ le temps de demi-sorption, et $H=S/D$.

Le coefficient D' représente le coefficient de diffusion apparent (qu'on peut calculer analytiquement quand $H \times a = \infty$). la relation suivante est ainsi trouvée :

$$\frac{t_{0,5} \times D'}{a^2} = 0,2 \quad (4.13)$$

Enfin, en faisant une substitution de l'équation 4.13 dans l'équation 4.12, la relation suivante est trouvée :

$$\frac{1}{D'} = \frac{1}{D} + \frac{3,5}{Sa} \quad (4.14)$$

Les auteurs réalisent ainsi des essais sur des échantillons de plusieurs tailles. Une courbe linéaire donnant $1/D'$ en fonction de $1/a$ est ainsi obtenue. La pente de cette droite renseigne sur la valeur de S et l'intersection avec l'axe des y renseigne sur D. (S. Avramidis ; Siau 1987) ont déterminé le coefficient D' en utilisant la résolution analytique dans un milieu infini (c.à.d en prenant la pente de la courbe donnant E en fonction de \sqrt{t} dans le calcul). Les travaux de (Liu 1989 ; Liu ; Simpson 1997 ; Liu ; Simpson 1996) ont permis de développer une méthode analytique pour séparer les coefficients S et D. Cette méthode nécessite la détermination de la courbe d'adsorption et désorption pour une seule épaisseur seulement. Cette approche de calcul a été appliquée par (Merakeb 2006) afin d'en déduire les coefficients de diffusion en adsorption et en désorption.

Méthodes numériques

Étant donné les limites des méthodes analytiques et la complexité des équations à résoudre, le calcul numérique par éléments finis est plus adaptée à la détermination de la diffusivité massique en régime transitoire puisqu'il permet de résoudre le système d'équations aux dérivées partielles non linéaires dans un domaine fini. Ceci permettra également la prise en compte des conditions initiales et aux limites plus compliquées que celles considérées lors des solutions analytiques. Un des avantages des méthodes numériques est qu'elles permettent d'intégrer la totalité des données expérimentales dans la résolution et l'identification des paramètres de diffusion.

4.3.2 Identification des coefficients du modèle de diffusion par la méthode des éléments finis

Dans la bibliographie, l'identification des coefficients du modèle se fait généralement à partir de la seule donnée de l'évolution de la teneur en humidité moyenne en fonction du temps (Perkowski ; Świrski-Perkowska ; Gajda 2017 ; W. P. Da Silva ; L. D. Da Silva ; De Oliveira Farias ; C. M. D. P. Da Silva ; Ataide et al. 2013 ; Olek ; Perré ; Weres 2005). Or, il peut exister plusieurs solutions pour D et S qui donneront des résultats conformes à l'évolution de la teneur en humidité moyenne expérimentale (T. A. Nguyen 2014).

Nous proposons alors de réaliser l'identification à partir de l'évolution de la teneur en humidité locale et moyenne. Nous vérifions ainsi la capacité des coefficients identifiés à reproduire l'évolution de la moyenne de la teneur en humidité (mesure globale) et les profils locaux de teneur en humidité. L'identification des coefficients se fait par une résolution du modèle de diffusion (donné par l'équation de Fick) à l'aide de la méthode des éléments finis. Le choix des coefficients optimum est réalisé manuellement à partir d'une comparaison simulation/expérience de l'évolution de la teneur en humidité moyenne ainsi qu'avec les profils hydriques obtenus par IRM.

Modèle numérique

La modélisation des transferts hydriques est réalisée à l'aide du logiciel Abaqus. Nous nous servons de l'analogie entre les équations du transfert thermique (basées sur l'équation de Fourier) et celles du transfert hydrique (équations 4.1 et 4.2). L'équation de transfert thermique est donnée par :

$$\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.15)$$

Avec C_p représente la chaleur spécifique massique du matériau, T la température, λ la conductivité thermique et ρ la masse volumique. Par analogie, nous

considérons que $\rho = 1$, $C_p = 1$ et $\lambda = D$.

Au cours des calculs des profils hydriques, la modélisation géométrique des échantillons est faite en 2D. Le maillage est défini par des éléments standards quadratiques de taille 2.5 mm (voir figure 4.3). Nous considérons qu'initialement le champ hydrique est uniforme et égale à 9,3% pour tous les échantillons.

Au cours des simulations numériques des échantillons LC, la colle n'est pas prise en compte dans le calcul de diffusion et des déformations induites par le transfert hydrique.

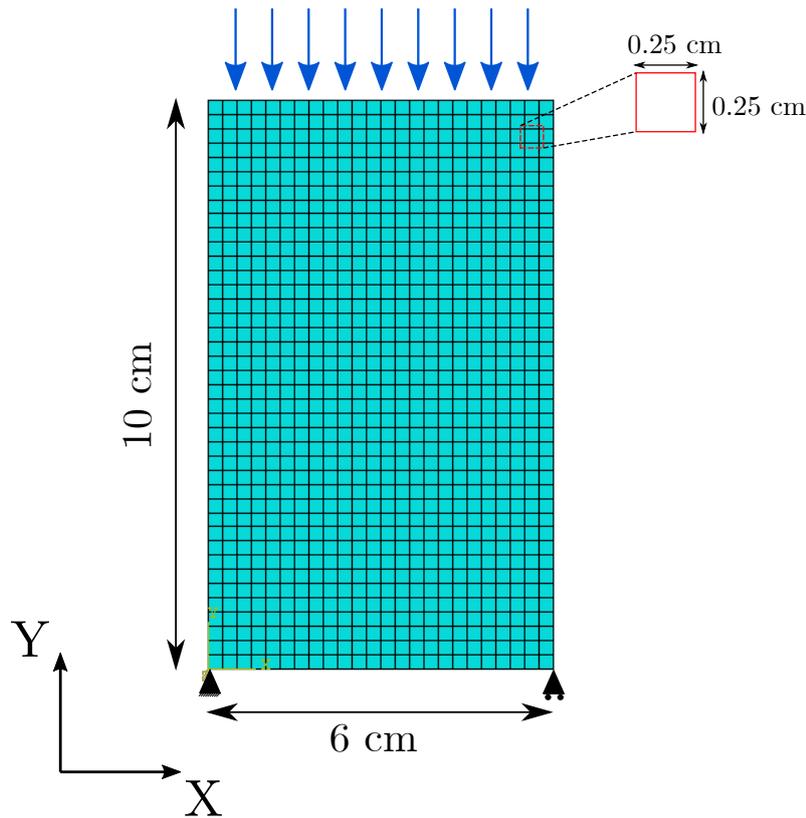


FIGURE 4.3 – Maillage et conditions aux limites hydriques et mécaniques.

Teneur en humidité à l'équilibre au cours de l'humidification et du séchage

L'évolution de la teneur en humidité à l'équilibre est calculée en utilisant la formule de l'abaque de l'Eurocode 5 et l'évolution de la température et l'humidité relative mesurées dans les enceintes. Les figures 4.4 et 4.5 donnent l'évolution de $MC_{\text{équilibre}}$ au cours de l'absorption et de la désorption respectivement.

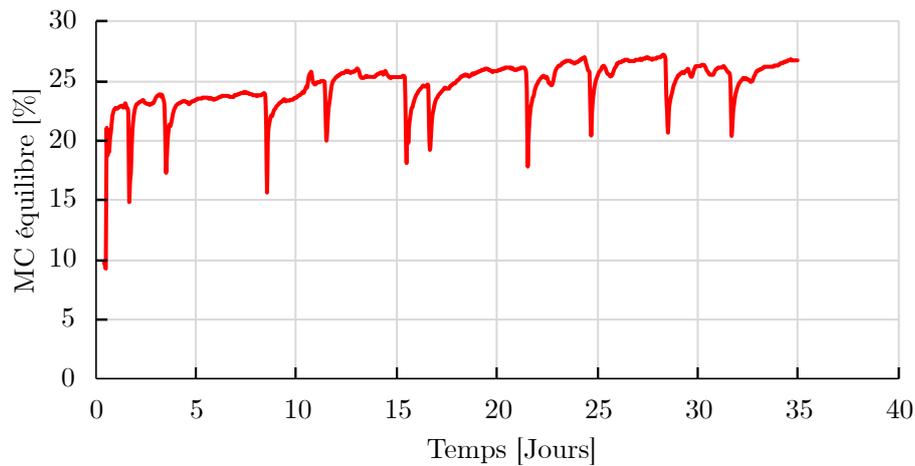


FIGURE 4.4 – Évolution de $MC_{\text{équilibre}}$ au cours de l'adsorption. Les chutes brutales de MC correspondent à l'ouverture de l'enceinte.

Évaluation des déformations induites par le transfert hydrique

Une méthode complémentaire de validation des coefficients de diffusion et d'échanges surfaciques identifiés consiste à réaliser une comparaison entre les profils de variations dimensionnelles surfaciques mesurés expérimentalement et ceux simulés à l'aide d'un calcul de couplage hydro-mécanique.

Nous utilisons les coefficients d'expansion hydriques identifiés au cours de la section 2.1.2. Les propriétés élastiques employées pour chaque direction d'anisotropie au cours du calcul sont prises égales aux valeurs typiques couramment admises pour le bois d'épicéa.

Dans le cas de l'échantillon LC-L, nous réalisons des calculs en 3D afin d'en déduire la déformation de la surface perpendiculairement à la direction de diffusion. En revanche, pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R, nous réalisons les calculs en 2D étant donné que les déformations selon le sens longitudinal (L) sont très limitées et par la suite nous négligeons la déformation selon cette direction. Les orientations des cernes sont prises en compte lors du calcul des déformations pour chaque échantillon.

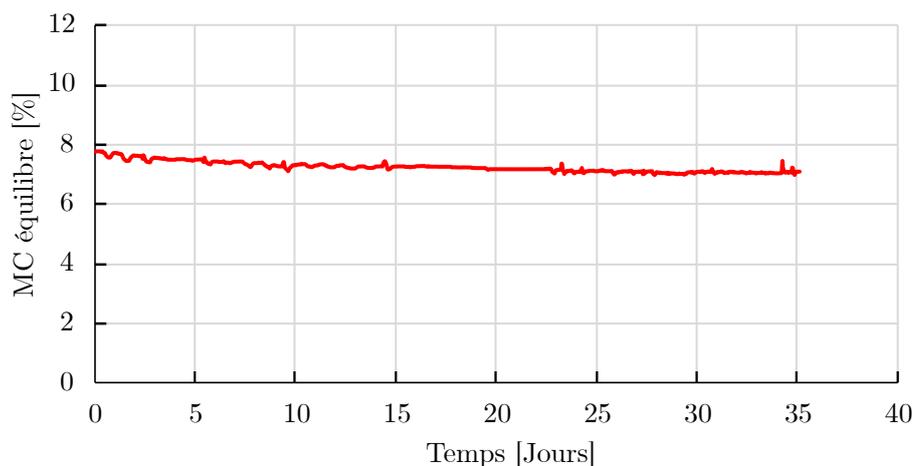


FIGURE 4.5 – Évolution de $MC_{\text{équilibre}}$ au cours de la désorption.

4.4 Résultats

Dans cette section, nous présentons les coefficients de diffusion et d'échanges surfaciques identifiés au cours de l'adsorption et de la désorption des échantillons étudiés. L'identification repose sur les données mesurées à toutes les échéances. Pour des raisons de clarté de représentation, nous montrons uniquement la comparaison entre les profils expérimentaux et ceux issus de l'identification pour 4 échéances, à savoir $t = 1, 8, 15, 35$ jours pour l'adsorption et $t = 2, 16, 31$ et 52 jours pour la désorption. Nous présentons également les courbes pour deux échantillons uniquement : LC-L et LC-T. La comparaison avec les autres échantillons se trouve en Annexe A. À noter que l'identification des coefficients de diffusion est réalisée à partir des profils IRM dont on a exclu les premier et dernier centimètres à cause des effets de bord mentionnés dans le chapitre 3. Enfin les résultats seront discutés par rapport à la littérature dans une dernière section.

4.4.1 Identification du coefficient de diffusion longitudinal

La figure 4.6 montre l'évolution de la teneur en humidité moyenne calculée à partir de la pesée et de l'identification des paramètres de diffusion pour l'échantillon LC-L (le sens de diffusion est selon la direction des fibres).

Les figures 4.7 et 4.8 montrent la comparaison entre les profils expérimentaux (issus de la mesure IRM et par les déformations) et les profils simulés à partir des paramètres identifiés (humidification et séchage).

L'identification permet d'obtenir sur la durée des essais des écarts relatifs pour l'humidité locale entre les mesures et le calcul inférieurs à 20 % pour les profils

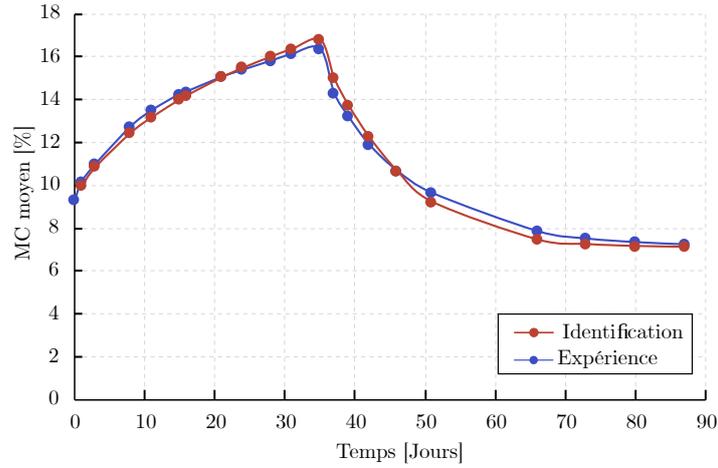


FIGURE 4.6 – Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-L.

d'humidité et 5 % pour la teneur en humidité moyenne. De manière générale, nous constatons que le modèle de diffusion (simplifié) permet de reproduire à la fois la cinétique de la diffusion et les profils hydriques. En ce qui concerne les mesure IRM, les écarts sont plus importants que les écarts sur l'évolution de la moyenne. Ceci est dû au fait que l'IRM surestime la teneur en humidité quand celle-ci est importante (section 2.3.5). Quant aux profils de déformations, nous observons une bonne correspondance entre les profils expérimentaux et ceux issus de la modélisation numérique.

Nous trouvons que le coefficient de diffusion et le coefficient d'échanges surfaciques décroissent de manière exponentielle avec la teneur en humidité pour l'adsorption et la désorption. Les coefficients de diffusion identifiés au cours de l'adsorption et de la désorption sont donnés par les équations 4.16 et 4.17. Les coefficients d'échanges convectifs identifiés sont donnés par les équations 4.18 et 4.19.

$$D_L^{adsorption} = 4 \times 10^{-8} e^{-0,19 \times MC} \quad (4.16)$$

$$D_L^{désorption} = 7 \times 10^{-8} e^{-0,19 \times MC} \quad (4.17)$$

$$S_L^{adsorption} = 4 \times 10^{-7} e^{-0,175 \times MC} \quad (4.18)$$

$$S_L^{désorption} = 2,5 \times 10^{-7} e^{-0,022 \times MC} \quad (4.19)$$

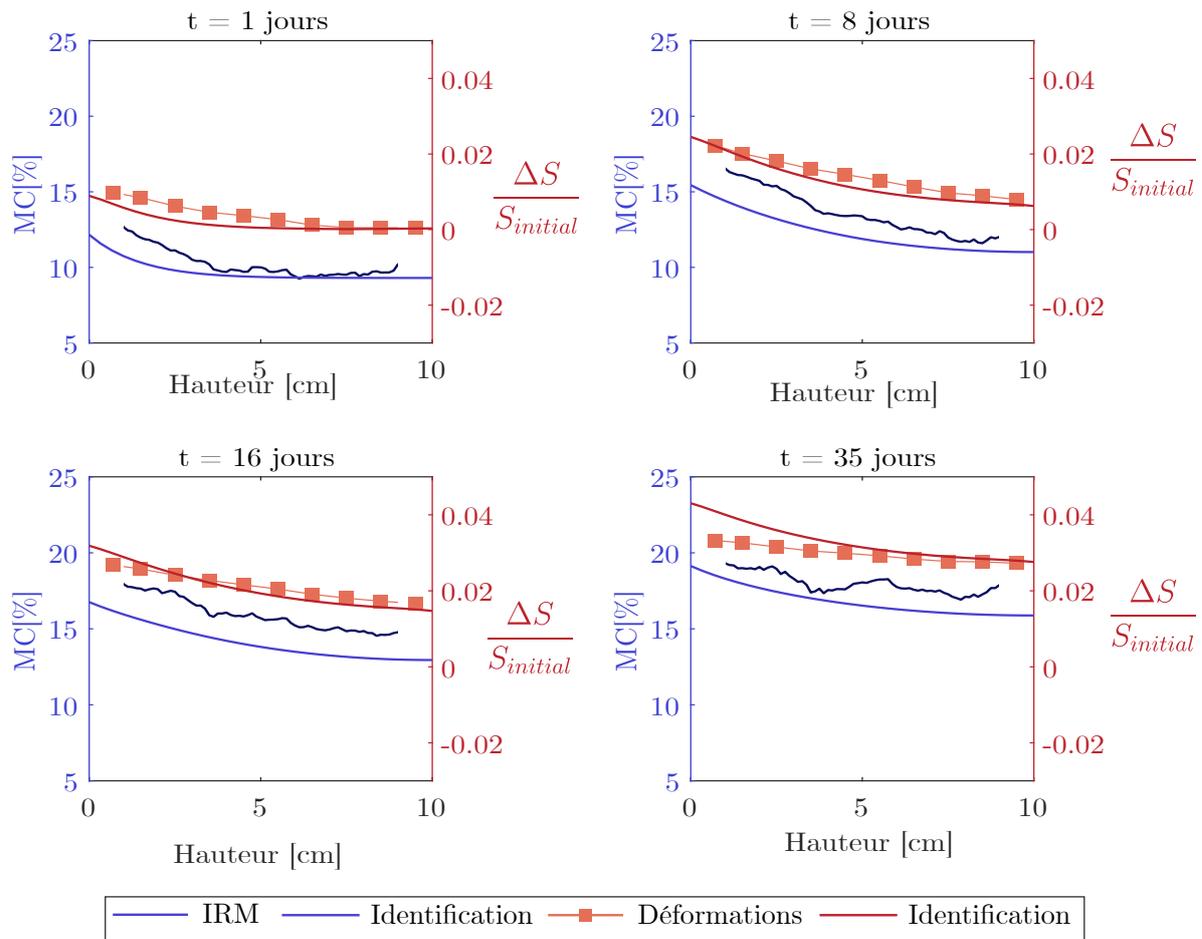


FIGURE 4.7 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations surfaciques) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l’humidification de l’échantillon LC-L. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres sont exclus.

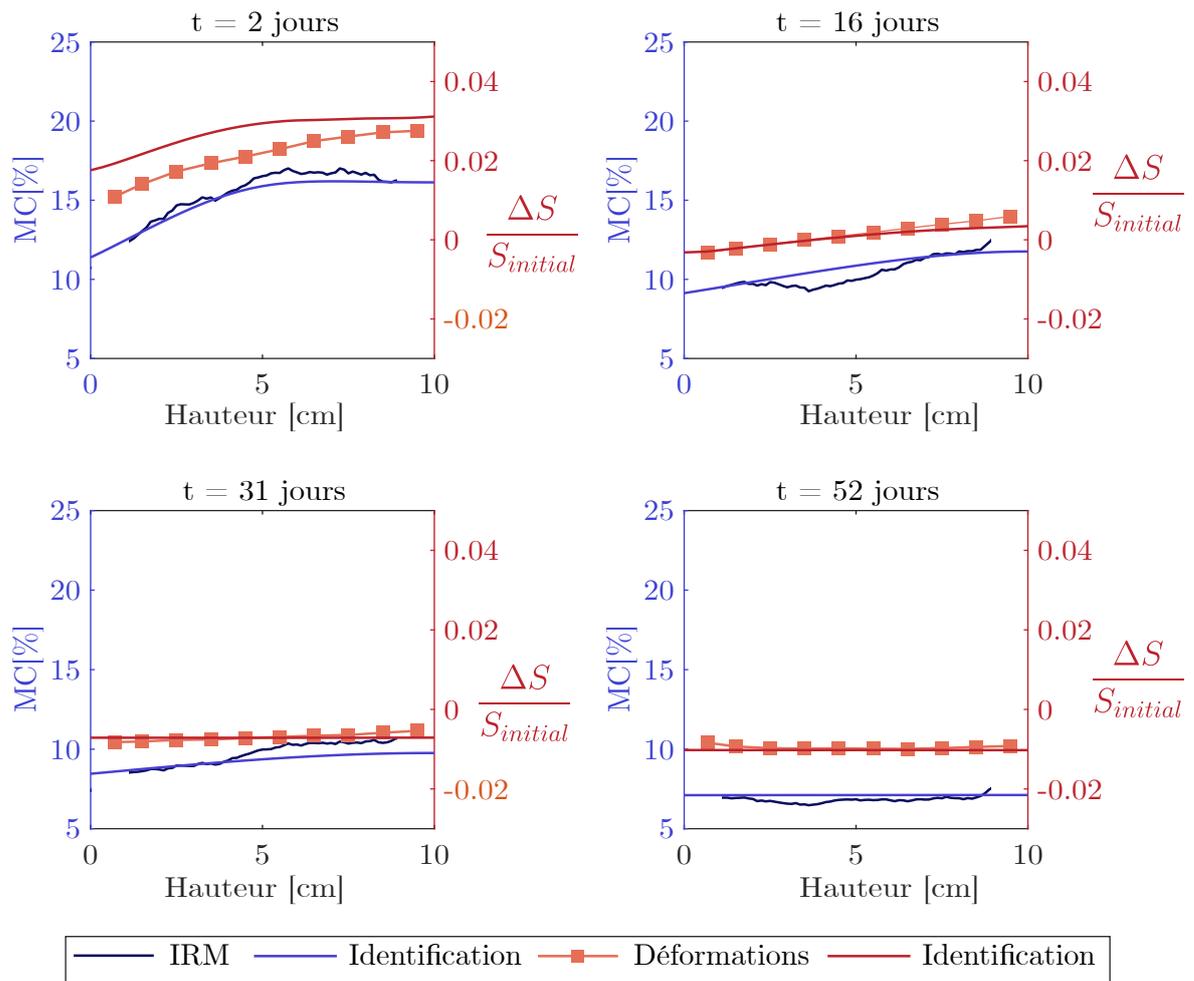


FIGURE 4.8 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations surfaciques) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesures au cours du séchage de l'échantillon LC-L. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres sont exclus.

Les coefficients de diffusion et d'échanges surfaciques identifiés sont montrés dans les figures 4.9 et 4.10 respectivement.

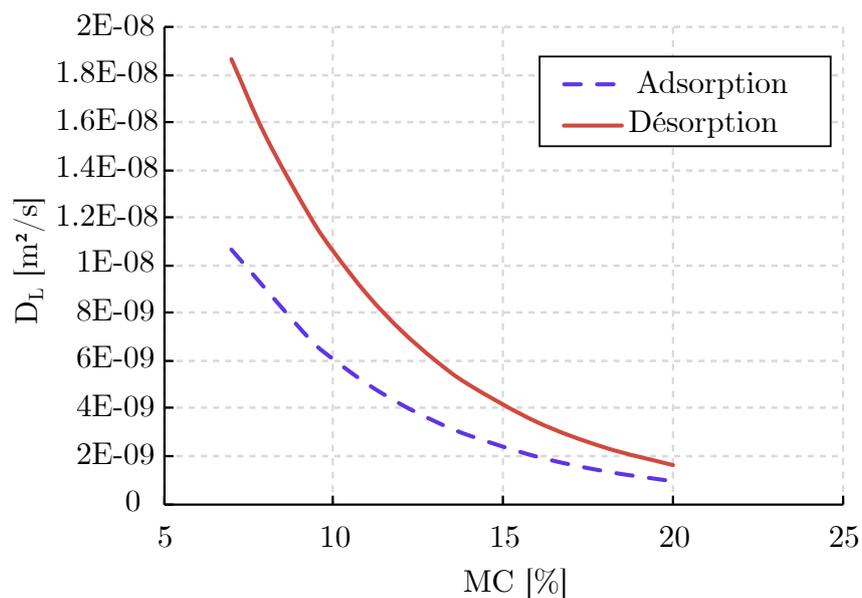


FIGURE 4.9 – Évolution du coefficient de diffusion longitudinal (échantillon LC-L) en fonction de la teneur en humidité au cours de l’humidification et du séchage.

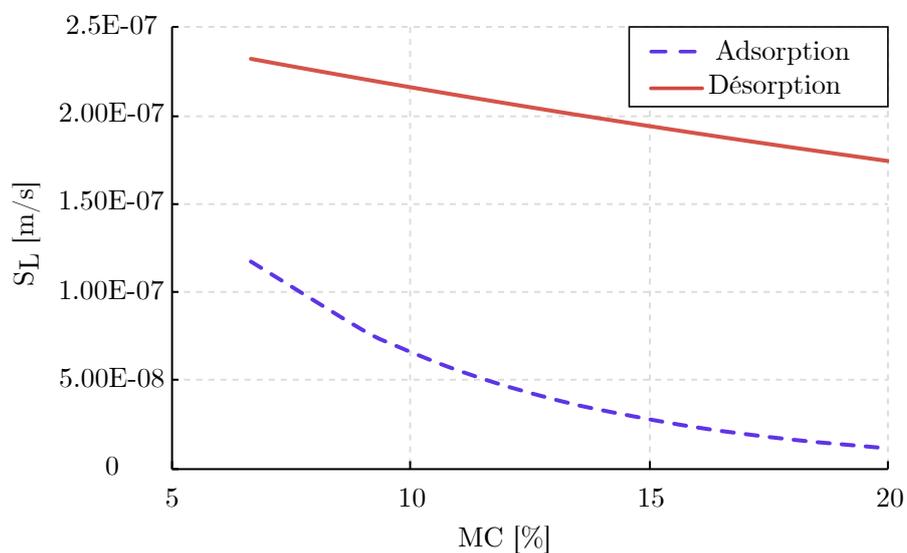


FIGURE 4.10 – Évolution du coefficient d’échange surfacique longitudinal (échantillon LC-L) en fonction de la teneur en humidité au cours de l’humidification et du séchage.

4.4.2 Identification du coefficient de diffusion transversal

La figure 4.11 montre la comparaison entre l'évolution de la teneur en eau moyenne calculée à partir de la pesée et celle obtenue à partir de l'identification des paramètres de diffusion pour l'échantillon LC-T (diffusion selon le sens transversal). Les figures 4.12 et 4.13 montrent la comparaison entre les profils expérimentaux (issus de la mesure par IRM et par les déformations surfaciques) et les profils simulés à partir des paramètres identifiés. Nous obtenons ainsi des écarts relatifs pour l'humidité entre les mesures et le calcul inférieurs à 20 % et 4 % pour la teneur en humidité moyenne. Les profils de déformations ainsi que les profils hydriques issus de la simulation numérique permettent de reproduire les profils expérimentaux de déformations ainsi que les profils IRM. La méthode de mesure des déformations surfaciques représente, alors, une alternative peu coûteuse pour la détermination de la distribution spatiale de l'humidité dans le bois.

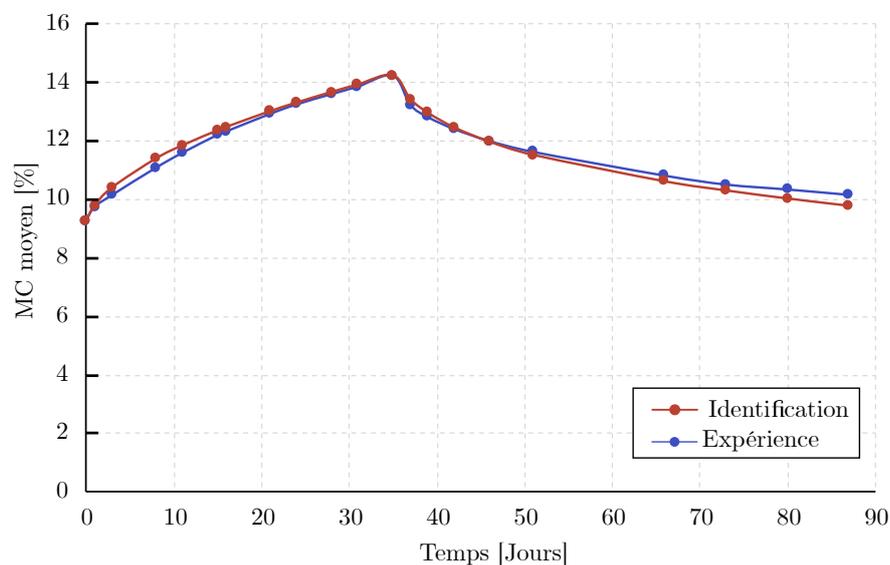


FIGURE 4.11 – Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-T.

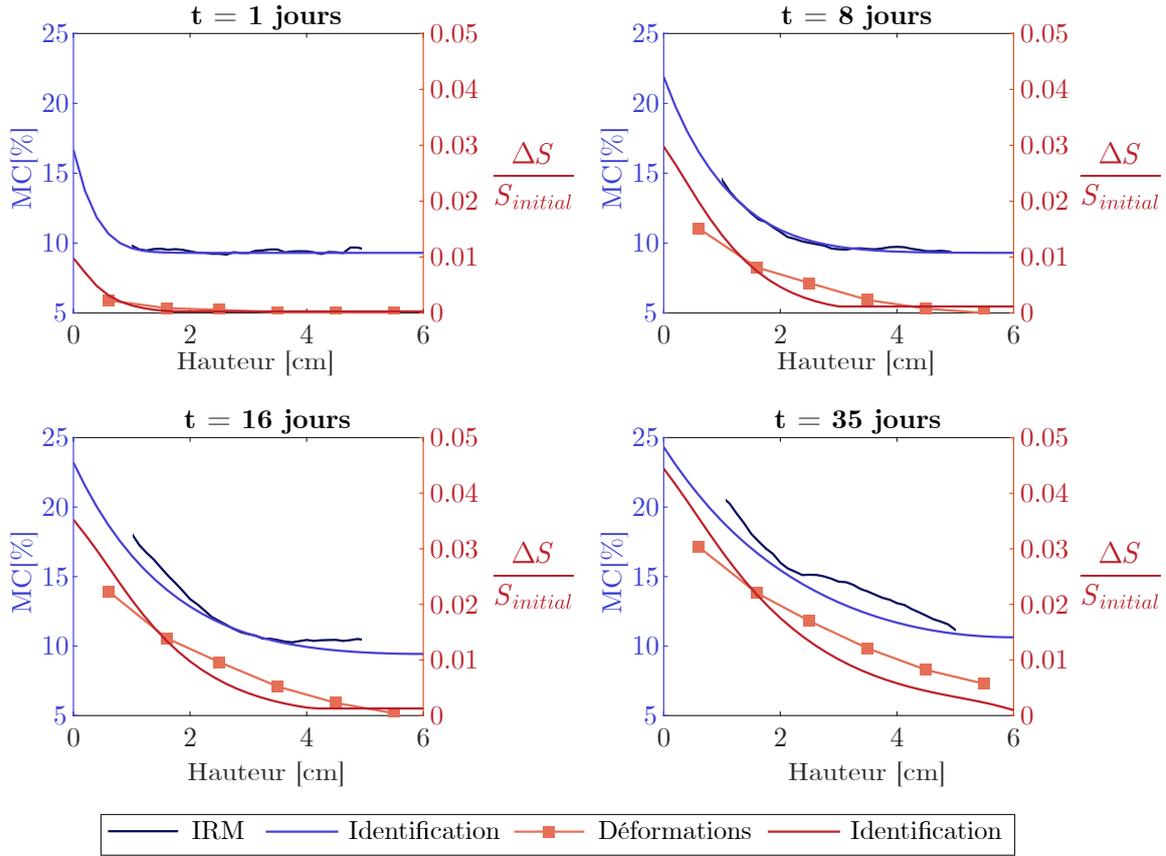


FIGURE 4.12 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l’humidification de l’échantillon LC-T. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.

Nous trouvons une dépendance exponentielle et décroissante du coefficient de diffusion en fonction de la teneur en humidité. Les coefficients identifiés au cours de l’adsorption et de la désorption sont données dans les équations 4.20 à 4.24.

$$D_{TR}^{adsorption} = 3 \times 10^{-10} e^{-0,06 \times MC} \quad (4.20)$$

$$S_{TR}^{adsorption} = S_{LC-T}^{desorption} = 3,5 \times 10^{-8} \quad (4.21)$$

$$D_{LC-T}^{desorption} = 4,5 \times 10^{-10} e^{-0,06 \times MC} \quad (4.22)$$

$$D_{LC-R, BM-R}^{desorption} = 6 \times 10^{-10} e^{-0,06 \times MC} \quad (4.23)$$

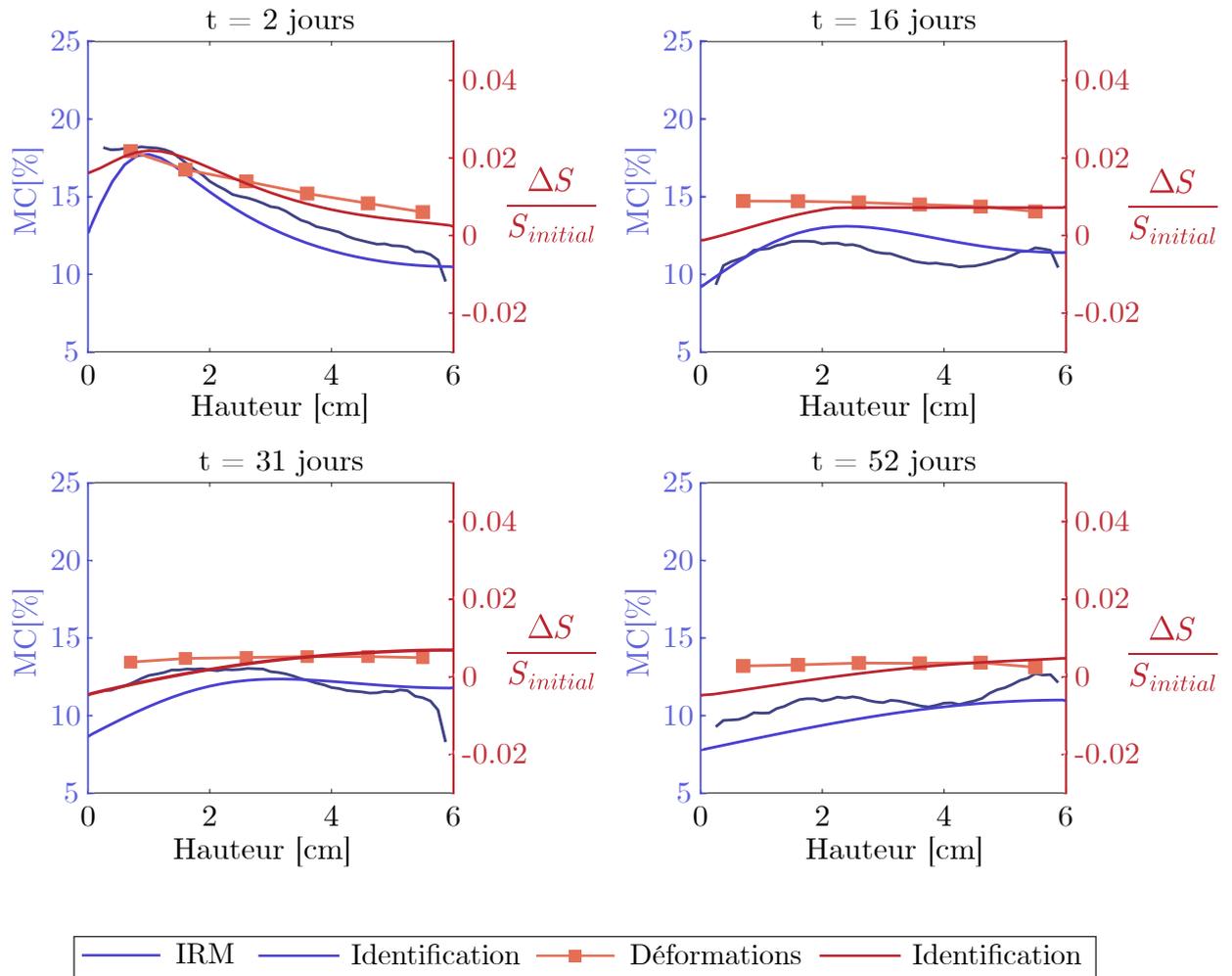


FIGURE 4.13 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours du séchage de l'échantillon LC-T. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.

$$S_{LC-R, BM-R}^{desorption} = 5 \times 10^{-8} \quad (4.24)$$

Les figures 4.14 et 4.15 montrent une représentation des coefficients de diffusion et d'échange convectif respectivement.

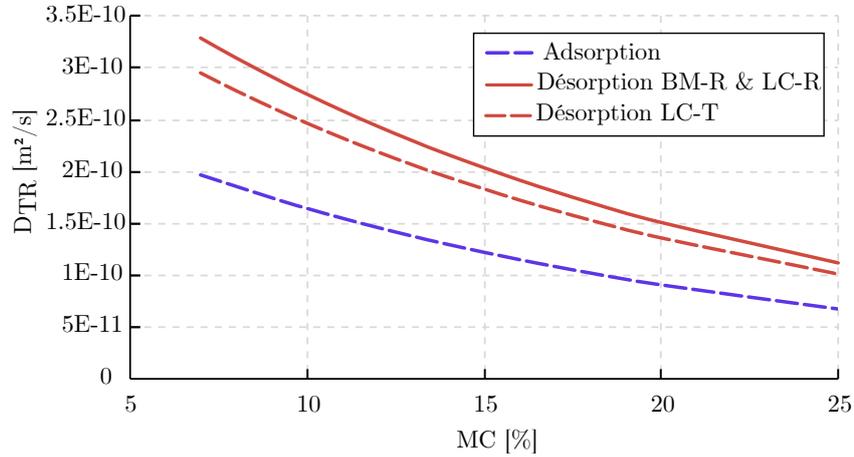


FIGURE 4.14 – Variation du coefficient de diffusion transversal identifié au cours de l'adsorption et de la désorption en fonction de la teneur en humidité pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R.

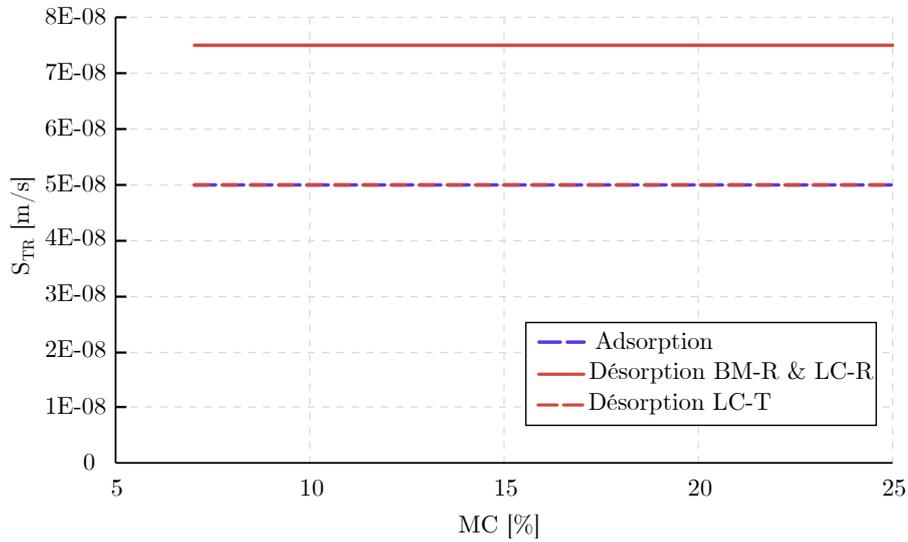


FIGURE 4.15 – Variation du coefficient d'échange surfacique transversal identifié au cours de l'adsorption et de la désorption en fonction de la teneur en humidité pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R.

4.4.3 Discussion

Les coefficients de diffusion identifiés ci-dessus montrent une dépendance exponentielle et décroissante en fonction de la teneur en humidité pour l'ensemble des échantillons que ce soit pour l'humidification ou le séchage et quelle que soit la direction d'anisotropie. En revanche, la forme de dépendance du coefficient d'échange surfacique dépend de la direction d'anisotropie pour les deux cas de sorption (adsorption et désorption). En effet, nous observons une dépendance exponentielle et décroissante à la teneur en humidité selon le sens longitudinal. Cependant, selon le sens transversal et pour les 3 échantillons testés (BM-R, LC-R et LC-T), nous obtenons des coefficients d'échanges surfaciques constants.

Par ailleurs, l'identification d'un coefficient de diffusion décroissant en fonction de la teneur en humidité selon le sens TR va à l'encontre de la plupart des coefficients identifiés et employés dans la littérature. En effet, le sens transversal est souvent associé à une diffusion d'eau liée à travers les parois cellulaires du bois avec une cinétique de diffusion qui augmente avec l'augmentation de la teneur en humidité du matériau. On peut citer à titre d'exemple les travaux réalisés par (Loulou 2013 ; Droin-Josserand ; Taverdet ; Vergnaud 1988 ; Simpson ; Liu 1991). En revanche, la diminution du coefficient de diffusion transversale en fonction de la teneur d'humidité a été obtenue par (Perkowski ; Świrski-Perkowska ; Gajda 2017 ; Olek ; Perré ; Weres 2005). Cette différence de forme de dépendance peut être attribuée à la méthode d'identification des coefficients de diffusion et les hypothèses associées.

D'autre part, les valeurs des paramètres du modèle de diffusion montrent, comme attendu, une vitesse de diffusion nettement plus grande selon le sens longitudinal par rapport au sens transversal. Nous observons que le coefficient de diffusion selon le sens longitudinal est environ 40 fois supérieur au coefficient de diffusion selon le sens transversal à de faibles humidités (inférieurs à 9,3%). Ce rapport diminue jusqu'à 5 aux hautes humidités (aux alentours de 20%). De même les coefficients d'échanges surfaciques sont globalement supérieurs dans le cas de la diffusion longitudinal par rapport à ceux obtenus selon le sens transversal. Ceci peut être attribué à la porosité apparente en surface qui est plus importante dans le cas de diffusion longitudinale et qui favorise par la suite la pénétration de l'humidité.

Pour l'ensemble des coefficients, nous observons que les valeurs obtenues pour la désorption sont plus importantes que celles obtenues au cours de l'humidification (sauf pour l'échantillon LC-T en séchage où $S_{humidification} = S_{séchage}$). Le coefficient de diffusion au cours du séchage est 1,5 à 1,7 fois supérieur à celui au cours de l'humidification. Ceci confirme l'observation au cours du chapitre 3 sur la différence de cinétique de diffusion selon l'adsorption et la désorption. Cette dépendance des coefficients de diffusion au séchage/humidification a été observée précédemment par (Kouchade 2004 ; Merakeb 2006 ; Agoua ; Zohoun ; Perré 2001). Elle peut être

due aux phénomènes de retrait et gonflement qui accompagnent les variations de l'humidité. En effet, le gonflement accompagnant le phénomène d'adsorption de l'humidité empêche le transport des molécules d'eau et provoque ensuite une faible cinétique d'adsorption par rapport à la désorption (Kouchade 2004).

4.5 Simulation des profils d'humidité dans un cas réel

Dans cette partie du travail, nous utilisons les résultats d'identification obtenus précédemment afin d'en déduire les épaisseurs affectées par l'humidité dans une structure en bois placée dans un climat réel. Nous considérons les climats de 4 régions situées en France : Brest, Paris, Nice et Strasbourg. Les variations climatiques (HR et T) sont données dans la figure 4.16 et le tableau 4.1 pour les 4 climats. L'environnement climatique est enregistré sur une période de 12 mois consécutifs. Nous remarquons que dans les régions de Brest et Strasbourg, un élément en bois est soumis constamment à des conditions climatiques conduisant à la classe de service 3. À Nice, l'élément sera soumis rarement à des conditions qui se situent dans la classe de service 3.

Région	MC équilibre moyen sur 1 an
Brest	18,47
Paris	16,39
Nice	14
Strasbourg	16,56

TABLE 4.1 – Teneur en humidité moyenne sur 1 an dans les 4 régions étudiées.

4.5.1 Hypothèses de calcul

Au cours du calcul numérique réalisé, nous avançons plusieurs hypothèses :

- Nous déterminons la teneur en humidité d'équilibre en fonction de l'humidité relative et la température. Ajoutons à cela que l'isotherme considérée représente une moyenne entre l'adsorption et la désorption. Tout cela est pris en compte en utilisant l'équation 1.7 de l'abaque de l'Eurocode 5 pour déterminer la teneur en humidité à l'équilibre du bois.
- L'influence de la température sur le coefficient de diffusion est négligée. En effet, une augmentation de la température entraîne une accélération de la

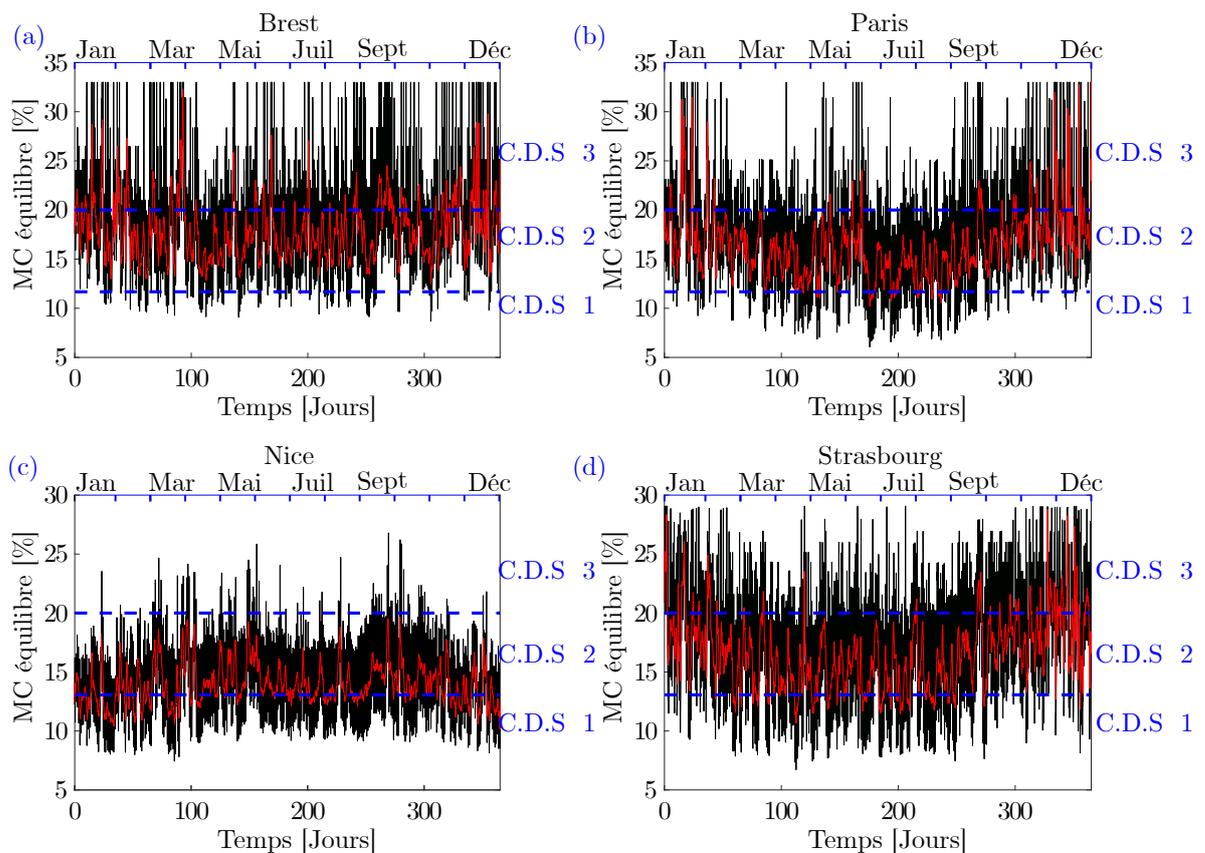


FIGURE 4.16 – Évolution de la teneur en humidité à l'équilibre des 4 régions étudiées : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiqués sur chaque graphique en bleu.

diffusion (voir chapitre 8). Étant donné que les coefficients de diffusion sont caractérisés à une température de 23°C et que généralement la température dans les régions considérées est majoritairement inférieure à la température de caractérisation, le choix de considérer le coefficient de diffusion identifié à 23°C offre une surestimation des profils mesurés et des profondeurs de pénétration (i.e. cas sécuritaire).

- Le pas de calcul est fixé à 1 heure afin de prendre en compte les variations climatiques quotidiennes.
- Dans un premier temps, nous calculons l'enveloppe de l'épaisseur affectée par les variations climatiques max/min pour 1 an. Ensuite, nous supposons que le même climat est répété pour 3 ans et nous calculons l'enveloppe dans ce cas.

- Nous considérons une diffusion selon le sens transversal uniquement (i.e. aucun transfert a lieu selon le sens longitudinal). Étant donné les résultats précédents, nous considérons un coefficient d'échange surfacique et un coefficient de diffusion différents en adsorption et en désorption avec $S_{désorption} = 7,5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $S_{adsorption} = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (voir figures 4.14 et 4.15). Nous considérons le même coefficient de diffusion au cours de l'adsorption que celui identifié sur les échantillons LC-T, LC-R et BM-R. Le coefficient de diffusion au cours de la désorption est considéré comme égal à la moyenne des coefficients présentés précédemment.
- La teneur en humidité initiale de l'élément est considérée égale à 12% conformément aux normes de construction qui préconisent une teneur en humidité initiale égale à 12% ($\pm 2\%$) à la sortie de l'usine.

Les simulations numériques sont réalisées en 2D sur une section ayant une largeur égale à 10 cm selon la direction de pénétration de diffusion (unidirectionnelle).

4.5.2 Résultats et discussion par rapport à l'Eurocode 5

La figure 4.17 montre les enveloppes max et min de la teneur en humidité dans la section après $t = 1$ an et $t = 3$ ans d'exposition aux climats étudiés. L'évolution de la teneur en humidité au cours de 3 années pour plusieurs épaisseurs est montrée dans la figure 4.18 pour les 4 régions.

Les résultats montrent clairement qu'en cas d'exposition réelle, un élément en bois n'est jamais en équilibre avec le milieu ambiant. Par ailleurs, nous remarquons que même dans les régions dans lesquelles une exposition à des conditions climatiques en classe de service 3 est fréquente (tels que Brest ou Strasbourg), une épaisseur limitée de l'élément voit son humidité dépasser les 20% (environ 1 cm de l'échantillon) et pour une faible durée de temps due aux cycles journaliers d'humidification/séchage. Le reste de l'élément réside toujours dans la classe de service 2. Ceci montre que l'application d'une classe de service 3 sur l'ensemble de l'élément représente une approche sécuritaire. De plus, nous remarquons une différence importante selon la localisation de l'élément. Un élément en région climatique plus modérée (tel que Nice) sera quasiment tout le temps en classe de service 2.

Étant donné que l'homogénéisation de la teneur en humidité dépend de la durée d'exposition (à partir de 2 années d'exposition à un climat, nous retrouvons que l'humidité à $X = 4,5$ et $X = 10$ cm tend vers la teneur en humidité moyenne de la région) et de la longueur caractéristique de la section, le dimensionnement usuel selon l'Eurocode 5 est adapté pour les sections de petites dimensions. Par ailleurs, dans le cas des sections importantes, le dimensionnement selon l'Eurocode 5 semble sécuritaire. Un dimensionnement tenant en compte les différentes classes

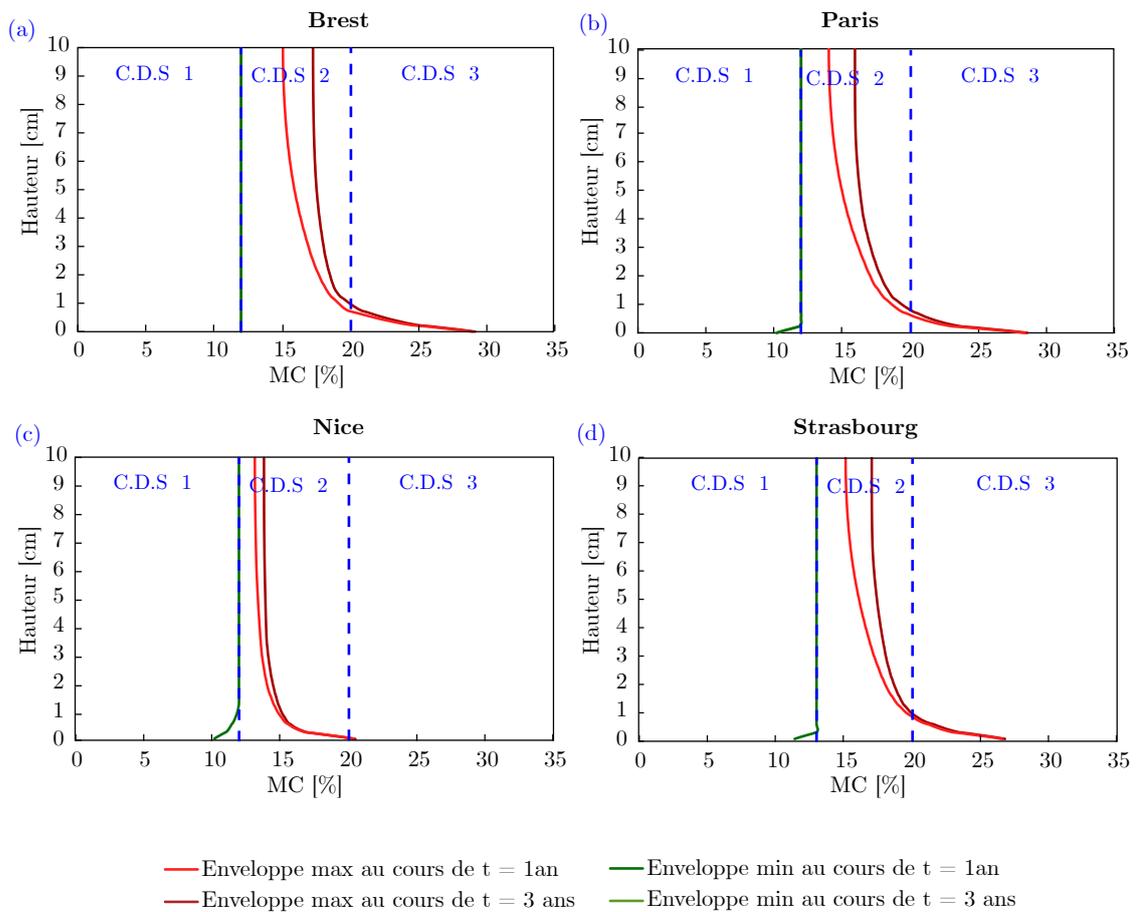


FIGURE 4.17 – Enveloppes max et min de la teneur en humidité pour les 4 régions étudiées : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiquées sur chaque graphique en bleu.

de service dans la section et les éventuels effets (tels que les contraintes induites par la diffusion, effet de l'humidité sur le comportement mécanique) semble nécessaire afin d'optimiser le dimensionnement des structures en bois.

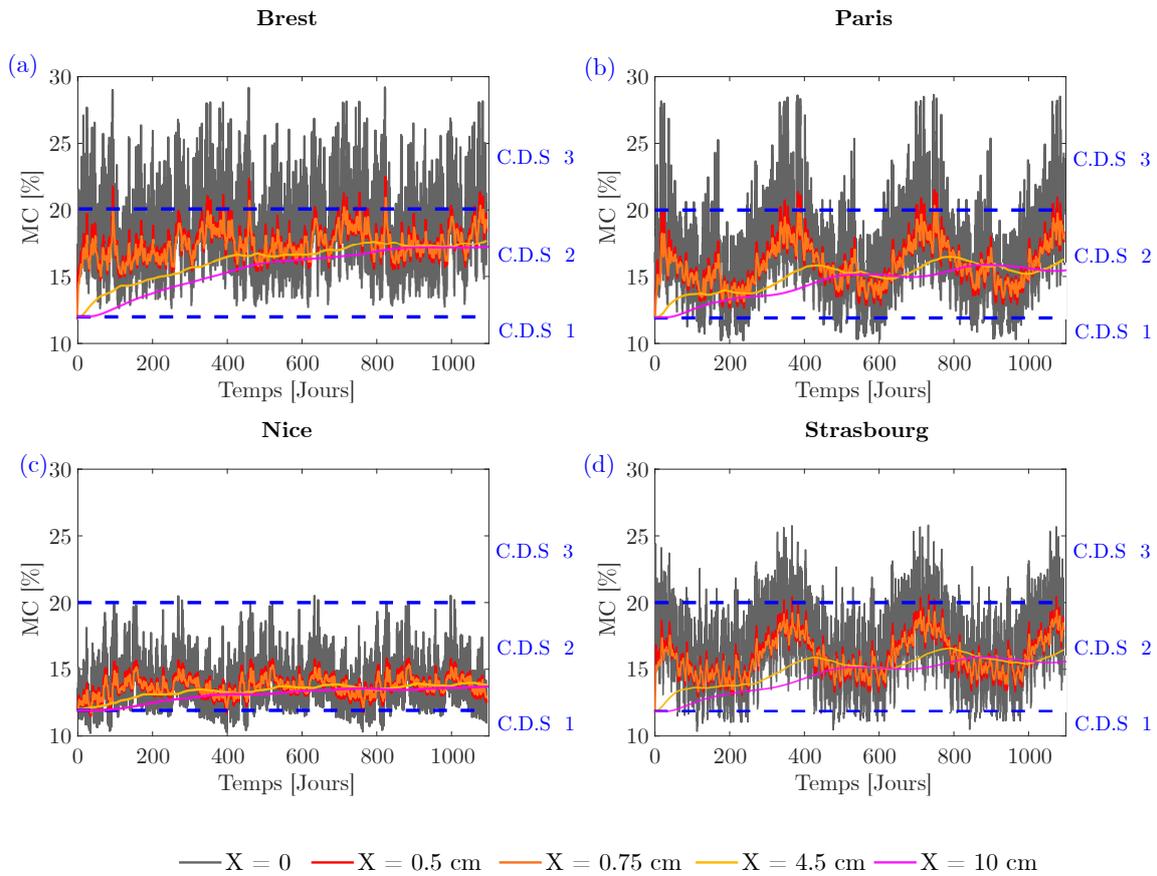


FIGURE 4.18 – Évolution de la teneur en humidité pour 4 positions ($X = 0, 0,5, 0,75, 4,5$ et 10 cm) pour les 4 régions étudiées : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiquées sur chaque graphique en bleu.

4.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le comportement hydrique du bois en utilisant la loi de Fick et une condition aux limites convective. L'identification des coefficients du modèle confirme la différence de cinétique de diffusion selon les directions d'anisotropie et selon le cas d'humidification ou de séchage. Le coefficient de diffusion est 1,5 à 1,7 fois supérieur en cas de séchage à celui au cours de l'humidification. Par ailleurs, le coefficient de diffusion selon la direction longitudinale est 22 fois (en moyenne) supérieur à celui dans le cas transversal. Les résultats d'identification (dans le cas de diffusion transversale) ont été utilisés pour déterminer les profils hydriques dans le cas de climats réels dans 4 villes : Brest, Paris, Nice et Strasbourg. Les résultats montrent qu'une épaisseur limitée de l'élément réside dans la classe de service 3 même si les conditions climatiques conduisent à un dimensionnement en classe de service 3 (tel que le cas de Brest). Par ailleurs, nous avons pu voir qu'un élément en bois est rarement en équilibre hygroscopique : un gradient hydrique existe toujours. Nous étudions dans la suite l'effet de la présence d'un gradient hydrique sur la charge à la rupture et le comportement mécanique en flexion de poutres en bois lamellé collé.

Troisième partie

Comportement mécanique des
éléments de structures en bois en
fonction du gradient d'humidité

INTRODUCTION

Le bois est connu pour avoir ses propriétés physico-mécaniques dépendantes de sa teneur en humidité. En effet, de manière générale, les propriétés mécaniques du bois augmentent avec la diminution de sa teneur en humidité entre l'état vert et aux alentours de $MC = 8$ ou 10% . Cette dépendance est définie dans les documents normatifs actuels, ainsi que dans plusieurs études (Gerhards 1982) pour un bois ayant une distribution d'humidité uniforme. Cependant, un élément de structure en bois se trouve rarement en équilibre hydrique avec le milieu ambiant, et par conséquent cet élément est soumis à un gradient d'humidité, ce qui aura un impact sur le comportement mécanique du bois. De plus, les travaux présents dans la littérature sont réalisés à l'échelle centimétrique du matériau sur du bois clair (i.e. sans défauts) (Gerhards 1982) mais celle-ci n'est pas toujours représentative du comportement mécanique du bois étant donné l'hétérogénéité intrinsèque du matériau.

Nous avons vu dans la partie I que la classe de service 3 de l'Eurocode 5 est la plus pénalisante pour la résistance mécanique des éléments en bois. La norme ne spécifie pas de durée d'une manière précise¹ pour laquelle un élément initialement en classe de service 1 ($MC < 12\%$) peut être considéré en classe de service 3. Dans la partie II, nous avons pu voir que même après 5 semaines dans un milieu ambiant très humide, le bois présente toujours un gradient d'humidité important selon le sens transversal TR (où l'on voit par ailleurs que la moitié de l'échantillon reste dans sa classe de service initiale). Cela démontre qu'une structure en bois, soumise à des variations climatiques réelles, présente systématiquement un gradient d'humidité. Tout cela nous incite à nous poser la question suivante : comment ces gradients d'humidité affectent le comportement mécanique des éléments en bois ?

Le but de cette partie est d'étudier l'impact de la présence d'un gradient d'humidité sur le comportement mécanique d'un élément structural en bois. On s'intéresse en particulier aux poutres en flexion ayant des dimensions représentatives de l'échelle d'emploi (en l'occurrence une échelle de section de poutres décimétrique

1. Selon la NF EN 1995-1-1, un dimensionnement en classe de service 3 est réalisé lorsque l'humidité dans le bois correspond à une température de 20 °C et une humidité relative de l'air ne dépassant 85% que quelques semaines par an.

pour le bâtiment). Par ailleurs, ce choix de dimension des sections est pertinent pour la représentativité de l'hétérogénéité intrinsèque du bois (nœuds, pente de fil, orientation aléatoire des cernes).

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps l'approche expérimentale des essais de flexion 4 points sur des poutres soumises à différentes sollicitations hydriques. Nous présentons ainsi les matériaux et méthodes employés au cours de cette étude dans le chapitre 5. Le chapitre 6 est dédié à la présentation de la distribution spatiale de la teneur en humidité (expérimentale et numérique) dans la section des poutres dans les différents cas de sollicitations hydriques (isothermes et non isothermes). Au cours du chapitre 7, nous présentons les résultats des essais mécaniques. Ces essais permettent de caractériser le comportement élastique, inélastique et à la rupture des poutres en fonction du gradient hydrique imposé. Nous étudions ensuite les déformations induites par la diffusion hydrique sur les poutres conditionnées sous HR et T contrôlées dans le chapitre 8. Finalement, nous présentons le modèle numérique qui complète l'approche expérimentale précédente au cours du chapitre 9. Ce modèle tient compte de l'état hydrique, du comportement mécanique anisotrope élastique et inélastique du bois. L'exploitation de ce modèle numérique permet tout d'abord de démontrer l'impact qu'a le gradient hydrique sur la rupture en flexion des poutres et ensuite de traiter l'effet d'un gradient hydrique quelconque sur la rupture en flexion. Enfin, l'ensemble de ces résultats est discuté par rapport à l'Eurocode 5.

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Dans ce chapitre nous présentons les matériaux et méthodes employés au cours de l'étude de l'effet de gradients d'humidité sur le comportement mécanique des poutres lamellé-collé. Nous présentons ainsi la méthode de caractérisation des gradients d'humidité développés dans deux cas de sollicitation hydrique (diffusion isotherme dans un milieu très humide et diffusion dans un milieu non contrôlé). Finalement, nous décrivons les essais de flexion 4 points réalisés.

Sommaire

5.1	Matériaux : le bois lamellé-collé	128
5.2	Conditionnement des poutres	130
5.2.1	Cas 1 : conditionnement en classe de service 3 (HR=99%)	130
5.2.2	Cas 2 : conditionnement en milieu externe	133
5.3	Mesures de l'état hydrique	134
5.3.1	Échantillons de référence	134
5.3.2	Mesures par résonance magnétique nucléaire	135
5.3.3	Mesures avec un humidimètre à pointe	135
5.4	Essais de flexion 4 points	137
5.5	Mesures de champs par corrélation d'images numériques	138

5.1 Matériaux : le bois lamellé-collé

L'étude est réalisée sur des poutres lamellé-collé d'épicéa. Nous avons choisi l'épicéa car celle-ci est l'une des essences les plus employées dans la construction en France. Par ailleurs, nous avons choisi d'étudier le lamellé-collé (LC) puisque celui-ci présente plusieurs avantages par rapport au bois massif. Par exemple, il permet d'atteindre des sections et des portées plus importantes tout en présentant des propriétés mécaniques et physiques relativement plus homogène que le bois massif (Colling 1995 ; Dietsch ; Tannert 2015). D'autre part, le LC présente une sensibilité à l'humidité similaire à celle de bois massif. Cela est pris en compte par l'utilisation des mêmes coefficients de modification de résistance et de la déformation à long terme (k_{mod} et k_{def}) employés dans l'Eurocode 5. Toutes ces raisons ont motivé le choix des poutres en lamellé collé pendant ce travail.

Au total 18 poutres sont testées dans cette étude. 3 poutres ont été testées pour chaque état hydrique . Les poutres étudiées sont conformes à la norme NF EN 14080 et sont de classe GL 28h. Le tableau 5.1 montre les propriétés mécaniques des poutres GL 28h selon EN 14080. La masse volumique des poutres est égale à 450 kg/m^3 .

TABLE 5.1 – Caractéristiques mécaniques des poutres GL 28h selon EN 14080

	Propriété	Valeur	unité
Résistances	Flexion	28	MPa
	Traction axiale	19,5	MPa
	Traction transversale	0,45	MPa
	Compression axiale	26,5	MPa
	Compression perpendiculaire	3	MPa
	Cisaillement	3,2	MPa
Modules	Module d'élasticité moyen	12,5	GPa
	Module d'élasticité transversal	10,42	GPa
	Module de cisaillement moyen	0,78	GPa

Afin d'être le plus représentatif de la réalité, les poutres étudiées ont une section de $13,1 \times 11,5 \text{ cm}^2$, ce qui représente une section proche de l'échelle d'emploi. Chaque poutre, de longueur 120 cm, est formée de 3 lames d'épaisseur 4,3 cm chacune (Voir figure 5.1). Ceci aboutit ainsi à un élancement inférieur à 10. Par conséquent, l'effort tranchant aura un effet non négligeable sur la flèche de la poutre lors des essais de flexion. Cet aspect est pris en compte dans le calcul de la flèche et du module de Young. À noter que le choix de cet élancement, tout en ayant

une section représentative de l'échelle d'emploi, a été contraint par les dispositifs expérimentaux (section 5.2).

Compte tenu du fait que le bois structural est un matériau hétérogène ayant des propriétés mécaniques dépendant des défauts macroscopiques (différence de pente de fil entre poutres, présence de fissures initiales, présence de nœuds, présence des aboutages . . .), nous avons cherché à minimiser cet effet sur les résultats des essais mécaniques. Dans cette optique, tous les défauts des poutres ont été identifiés avant le début des essais. Cette identification permet ainsi de choisir les poutres présentant les caractéristiques physiques les plus proches, de les répartir ensuite dans les différents cas de chargement hydrique étudiés et de choisir ainsi les faces en tension des poutres. Pendant cette procédure, on a vérifié que les poutres présentent une pente de fil droite (angle proche de 0° , sauf autour des nœuds, voir figure 5.1). Nous observons ainsi deux orientations de cernes différentes : orientation convexe et orientation concave (comme illustré sur la figure 5.2).

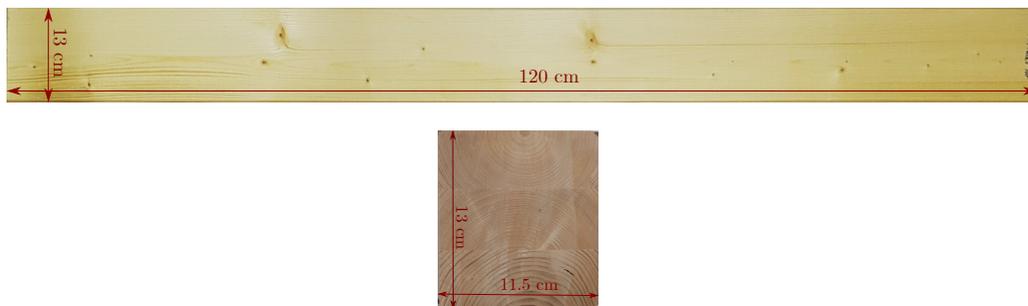


FIGURE 5.1 – Dimensions des poutres testées

Les poutres ont été stockées préalablement pendant quelques mois dans un laboratoire régulé en température et en humidité. Ainsi, la teneur en humidité des poutres avant le début des chargements hydriques est située entre 9,4 et 9,7%. Ces valeurs ont été mesurées à l'aide d'un humidimètre à pointe et en plusieurs points afin de s'assurer de l'homogénéité de MC dans le volume.

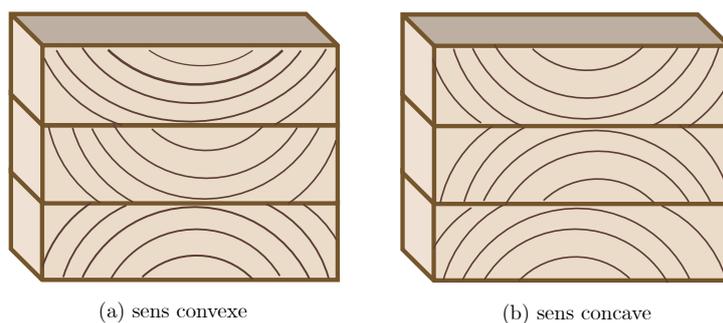


FIGURE 5.2 – Orientations des cernes des poutres testées : (a) orientation convexe et (b) orientation concave

5.2 Conditionnement des poutres

L'étude du comportement mécanique des poutres se fait pour trois cas de sollicitations hydriques :

- État initial : les poutres sont testées à l'état initial ($MC = 9,7\%$).
- Cas 1 : la diffusion se fait en environnement contrôlée et humide ($T = 20\text{ °C}$ et $HR = 99\%$) afin de se mettre dans les conditions de la classe de service 3 de l'Eurocode 5.
- Cas 2 : la diffusion se fait dans un milieu non contrôlé. Les poutres sont mises à l'extérieur à l'abri des intempéries.

Dans les deux derniers cas de sollicitation hydrique, la diffusion se fait dans le sens transversal du bois. En effet, les structures en bois (poutres, colonnes ..) sont souvent soumis à des transferts hydriques dans les sens transversaux de la poutre (qui sont confondus avec les directions TR du bois). Pour cela, nous avons choisi d'empêcher la diffusion dans le sens longitudinal des poutres. Les sections aux extrémités sont imperméabilisées à l'aide de 7 couches de pare-vapeur collées sur la section avec du scotch double face.

5.2.1 Cas 1 : conditionnement en classe de service 3 ($HR=99\%$)

Deux séries de mesures sont réalisées dans ce cas : la première série est réalisée après 29 jours de conditionnement en milieu humide et la deuxième est réalisée après 54 jours. Dans chaque série, 3 poutres sont placées dans une caisse (voir figure 5.3) dans laquelle des bacs remplis d'eau sont placés au fond afin de réguler le HR et de saturer l'air ambiant.

Un thermohygromètre permettant d'enregistrer à la fois l'humidité relative et la température est placé également dans la caisse (voir figure 5.4). Les bacs d'eau sont



FIGURE 5.3 – Caisse utilisée pour le conditionnement des poutres

placés dans la caisse avant le lancement des essais afin d'atteindre le HR souhaité. Ensuite les 3 poutres appartenant à la première série de mesures sont placées dans la caisse. Après avoir réalisé les essais mécaniques, les 3 poutres appartenant à la deuxième série de mesures sont placées dans la caisse (voir figure 5.4).



FIGURE 5.4 – Vue du dessus du dispositif de conditionnement des poutres dans la caisse. À gauche : vue globale du dispositif. À droite : un focus sur la partie inférieure de la caisse où se trouvent l'hygromètre et les échantillons de référence.

La figure 5.5 montre l'évolution de HR et T dans la caisse pendant la première et la deuxième série. Les essais de flexion sont réalisés 29 jours et 54 jours après la mise en conditionnement des poutres. La température est maintenue à 20°C tout au long du conditionnement des poutres.

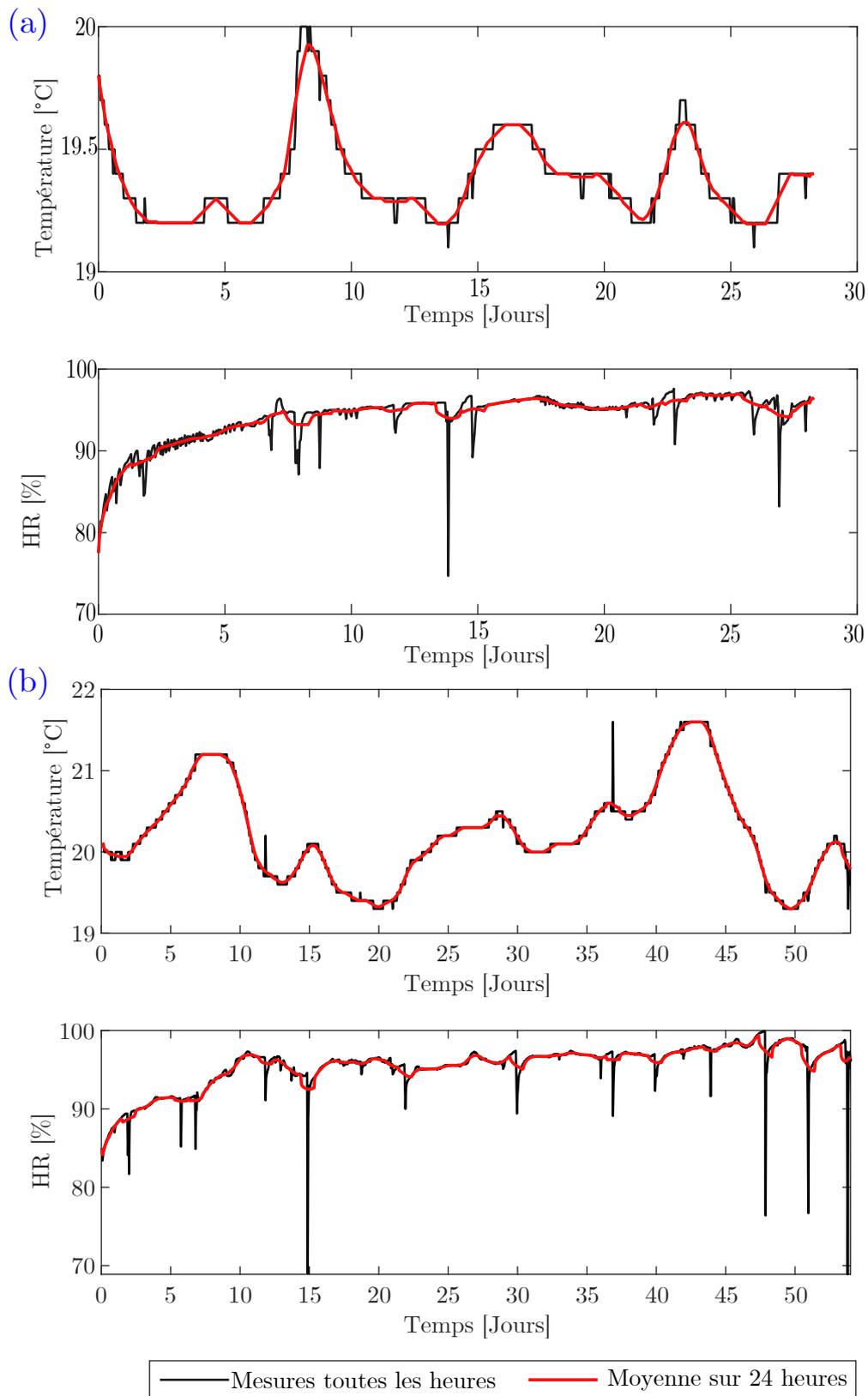


FIGURE 5.5 – Évolution de l’humidité relative et de la température dans la caisse au cours de la première série (a) et au cours de la deuxième série (b).

5.2.2 Cas 2 : conditionnement en milieu externe

Dans cette seconde configuration, nous considérons une diffusion hydrique plus représentative des cas d'emplois c'est-à-dire lorsque les poutres sont soumises aux conditions de HR et T externes (les poutres sont à l'abri de la pluie). Cet essai nous permettra de déterminer d'une part les profils de MC en conditions climatiques réelles (cas de diffusion non isotherme) et d'autre part l'impact sur le comportement mécanique et la charge à la rupture des poutres. Dans notre cas, les poutres sont mises à l'extérieur à Champs-sur-Marne moyennant un dispositif qui permet de supporter les 9 poutres en même temps (voir figure 5.6) tout en restant à l'abri de la pluie. Les poutres ont été mises à l'extérieur en janvier 2021. Les évolutions de HR et T en fonction du temps sont mesurées avec une fréquence de 1 heure à l'aide d'un thermohygromètre mis dans les mêmes conditions que les poutres (voir figure 5.6).



FIGURE 5.6 – Poutres à l'extérieur

Les essais mécaniques sont réalisés conformément au tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Planning des essais mécaniques réalisés. À noter qu'à l'état initial, l'humidité est homogène dans les poutres (MC = 9,7%).

Type de chargement hydrique	Temps à partir du début de chargement
État initial	–
Cas 1	29 jours
	54 jours
Cas 2	29 jours
	84 jours
	258 jours

5.3 Mesures de l'état hydrique

5.3.1 Échantillons de référence

Afin de pouvoir déterminer les coefficients de diffusion des poutres ainsi que le profil hydrique d'une manière régulière, nous avons placé deux échantillons de référence soumis aux mêmes conditions climatiques que les poutres pour chacun des cas de sollicitations hydriques. Les échantillons de référence ont la même section que les poutres ($13,1 \times 11,5 \text{ cm}^2$) et une épaisseur de 6 cm (dans le sens longitudinal).

Afin de réaliser des mesures de profils IRM, un des deux échantillons, qu'on note ER1, est protégé sur les 4 faces latérales ce qui permet d'avoir une seule direction de diffusion de l'humidité (voir figure 5.7). Cet échantillon permettra surtout d'identifier le coefficient de diffusion dans le sens perpendiculaire à la colle d'une manière non destructive.

Le deuxième échantillon permettra d'avoir une mesure de référence sur l'état hydrique des poutres. La pénétration a lieu suivant les 4 faces latérales uniquement (voir figure 5.7) qu'on note ER2. Les mesures de profils d'humidité sur cet échantillon se font à l'aide d'un humidimètre à pointe.

Nous détaillerons dans les deux paragraphes suivants les mesures effectuées sur ces deux échantillons.

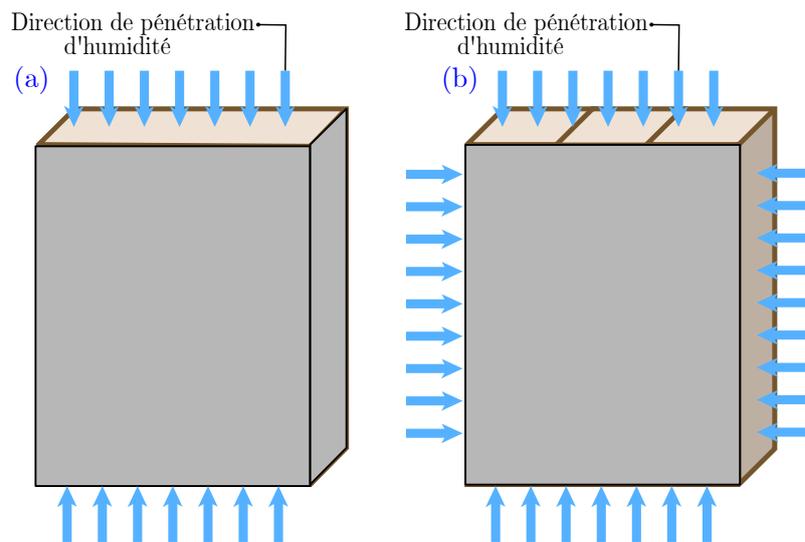


FIGURE 5.7 – Schéma montrant les directions de pénétration de l'humidité sur les deux types des échantillons de référence : (a) échantillon de référence (ER1) : l'humidité pénètre uniquement selon la direction verticale, (b) échantillon de référence (ER2) : l'humidité pénètre selon les 4 faces transversales

5.3.2 Mesures par résonance magnétique nucléaire

Nous avons utilisé la technique d'IRM afin d'obtenir des mesures non destructives de profils hydriques. Sachant qu'avec l'IRM nous ne pouvons obtenir qu'un profil unidimensionnel (1D), la diffusion sur le premier échantillon de référence se fait selon une seule direction (voir la figure 5.7. (a)). Comme nous l'avons mentionné au paragraphe précédent, l'étude sur cet échantillon permettra d'identifier le coefficient de diffusion dans la direction étudiée et de vérifier a posteriori si ce coefficient est le même dans l'autre direction.

Les mesures sont réalisées une fois par semaine en utilisant la séquence SPI. Les paramètres de la séquence SPI sont les mêmes que ceux utilisés au cours de la partie II.

5.3.3 Mesures avec un humidimètre à pointe

L'utilisation de l'humidimètre à pointe est particulièrement simple et adaptée pour une utilisation sur chantier afin de mesurer l'humidité dans plusieurs matériaux de construction (plâtre, mortier, différentes essences de bois ...). Il fournit une mesure directe permettant d'afficher la teneur en humidité instantanément après pénétration de deux électrodes dans l'échantillon (voir figure 5.8). L'humid-

dimètre à pointe affiche la teneur en humidité dans le matériau en pourcentage de la masse (en %).

Cet outil est utilisé afin de déterminer l'humidité initiale des poutres ainsi que le profil d'humidité dans les échantillons de références ER2 (voir figure 5.7) au cours du temps. L'humidité est déterminée à différentes distances par rapport au bord de l'échantillon et selon 3 lignes de mesure : A, B1 et B2 (voir figure 5.9). Les deux lignes de mesures A et B1 permettent de déterminer si une différence de coefficient de diffusion existe entre les deux directions. La ligne B2 permet d'évaluer l'état de l'humidité au cœur de l'échantillon. Étant donné que cette mesure est destructive (puisque les électrodes doivent être enfoncées dans l'échantillon) et afin d'éviter de créer un nombre important de vides dans l'échantillon, les mesures sont effectuées au maximum 1 fois par semaine.



FIGURE 5.8 – Humidimètre à pointe

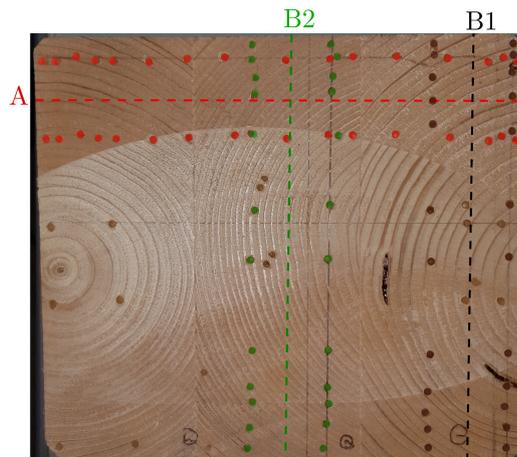


FIGURE 5.9 – Schéma montrant la répartition des points de mesures sur l'échantillon de référence type 2. Les ronds montrent les points de pénétration de l'humidimètre et la ligne tiretée entre les points représente le milieu entre les deux points de pénétration des électrodes.

5.4 Essais de flexion 4 points

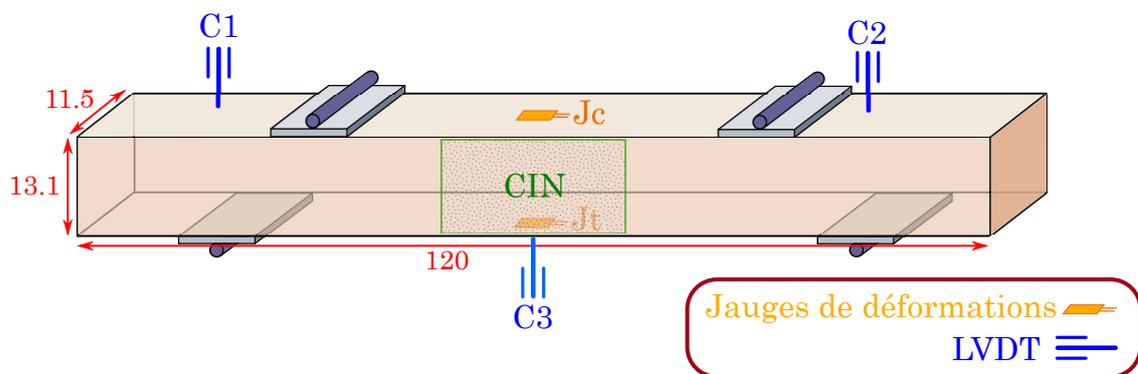


FIGURE 5.10 – Schéma des essais de flexion 4 points réalisés

Nous nous sommes intéressés à caractériser le comportement mécanique des poutres en présence d'un gradient d'humidité à travers des essais de flexion 4 points. La figure 5.10 illustre schématiquement le montage utilisé lors des essais de flexion. Les essais sont réalisés à l'aide d'une presse de capacité 450 kN. La machine d'essai est équipée d'un capteur permettant de mesurer la force et le déplacement du vérin au cours de l'essai avec une fréquence de 10 Hz. En parallèle, un système d'acquisition (programmé sur Labview) a permis de récupérer les données mesurées

par les capteurs LVDT, les jauges de déformations, le capteur de force ainsi que le déplacement de vérin avec une fréquence de 100 Hz.

Les essais sont réalisés à la vitesse de 0,015 mm/s conformément à la norme EN 384 qui préconise de choisir la vitesse de façon à provoquer la rupture après 5 min de chargement. Cette vitesse est maintenue au cours de tous les essais de flexion afin d'éviter une variabilité entre les différentes échéances mesurées.

Des cycles de charge/décharge avec une limite de chargement croissante, suivis d'un dernier chargement jusqu'à la rupture sont appliqués. Ces cycles permettent de détecter la présence d'un comportement non-élastique à partir de la décharge (déplacement résiduel ou déformations résiduelles mesurées par les jauges).

La distance entre appuis est égale à 100 cm et la distance entre les points de chargement est égale à 50 cm. Des plaques en acier sont placées entre les points d'application de force et la poutre afin de limiter le poinçonnement local. Trois capteurs LVDT sont utilisés afin de mesurer le déplacement au niveau des appuis (C1 et C2) ainsi que le déplacement au milieu de la poutre (capteur C3) pour mesurer la flèche de la poutre.

Deux jauges de déformations sont utilisées au cours de l'essai : une jauge sur la face en compression et une autre sur la face en traction afin de mesurer les déformations locales et pour détecter la présence de déformations résiduelles.

Afin de détecter la présence de singularités particulières dues à la présence des nœuds, nous avons besoin d'avoir accès au champ complet de déformation. Pour cette raison, nous avons utilisé la technique de Corrélation d'Images Numériques (CIN) sur la face avant de la poutre durant les essais de flexion. La caméra utilisée au cours de cet essai est une GX3300 avec une résolution de 3296×2472 pixels. La fréquence d'acquisition d'images a été fixée à 10 Hz. On observe ainsi la zone entre les points d'application de force (largeur de 50 cm). Le traitement des images se fait ensuite avec le logiciel GOM Correlate (GmbH 2016).

5.5 Mesures de champs par corrélation d'images numériques

La corrélation d'images numériques (CIN) est une méthode de mesure à distance, optique et relativement nouvelle qui permet de mesurer des déformations sans contact. Le champ de déplacement est mesuré lors des sollicitations à partir de deux images : la première étant l'image de référence (prise à l'instant $t = 0$) et la deuxième étant l'image déformée (prise à un instant t). Ceci est réalisé, dans le cas 2D, en suivant le déplacement (naturellement associé au déplacement local) d'un motif (mouchetis) d'un petit domaine de l'image (que l'on appelle imagerie) sur la surface de l'échantillon entre les deux images. Afin d'améliorer le calcul du

déplacement, le mouchetis doit être aléatoire afin de permettre une identification unique de la zone étudiée (chaque imagerie est différente de ses voisines). L'application d'un mouchetis aléatoire est une exigence de base pour les analyses par corrélation d'images pour obtenir une solution unique du champ de déplacement.

Nous citons deux approches de calcul dans la littérature : approche locale et approche globale. Dans la première, plusieurs zones d'intérêt sont définies sur la surface de l'échantillon et le déplacement de chaque zone est calculé indépendamment des autres régions. Cette approche est adaptée pour des mesures de champs en présence des fissures par exemple. Il est à noter que des discontinuités sur le champ de déformation sont susceptibles de se produire en utilisant cette approche. L'approche globale repose sur l'ajout d'hypothèses cinématiques (par exemple on suppose un déplacement 2D continu) et la résolution du problème de corrélation sur l'ensemble de l'image. Nous définissons ainsi un maillage éléments finis qui s'étend sur la totalité de la zone d'intérêt (zone d'étude). Cette approche permet d'obtenir des champs de déplacement continus.

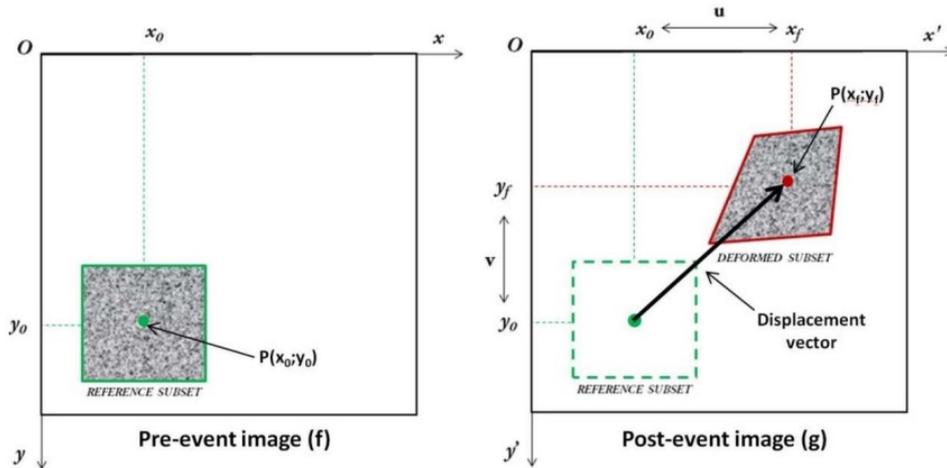


FIGURE 5.11 – Principe de la CIN d'après (Caporossi ; Mazzanti ; Bozzano 2018).

Le principe de la corrélation d'images numériques (voir figure 5.11) repose sur la détermination de la fonction de transformation φ qui permet de relier les coordonnées d'un pixel sur les deux images de référence (\vec{x}_i) et déformée (\vec{X}_i) .

$$\vec{x}_i = \varphi(\vec{X}_i) \quad (5.1)$$

L'image de référence est décrite par la fonction f et les images déformées par la fonction g . En supposant que les niveaux de gris sur les images ne sont pas altérés au cours de la sollicitation, nous pouvons appliquer le principe de la conservation du flot optique :

$$g(\varphi(\vec{X}_i)) = f(\vec{X}_i) \quad (5.2)$$

Cependant, en pratique, un bruit est toujours présent (changement d'éclairage au cours de l'essai, bruit provenant de la caméra, déformation du motif, changement d'aspect de la surface de l'échantillon au cours de l'essai...). Afin de tenir compte du bruit, l'équation 5.2 peut être écrite sous la forme suivante :

$$g(\varphi(\vec{X}_i)) = f(\vec{X}_i) + b \quad (5.3)$$

Avec b représente un terme regroupant toutes les sources de bruit.

Ainsi, l'objectif de la corrélation d'images est de résoudre l'équation 5.3 afin de retrouver la transformation φ et de remonter ensuite au champ de déformations. Cependant le problème décrit par l'équation 5.3 est mal posé. Sa résolution nécessite des hypothèses additionnelles (par exemple sur le bruit, sur le champ de déplacements recherché ...). Pour pallier ce problème, on résout l'équation 5.3 sous la forme d'un problème de minimisation fonctionnelle où l'on recherche la meilleure approximation de φ (Yoneyama ; Murasawa 2009).

Nous utilisons la méthode locale de corrélation d'images numériques afin de déterminer les champs de déplacement (et éventuellement les champs de déformation) au cours des essais de flexion (chapitre 7) et des mesures de champs au cours du transfert hydrique du bois (chapitre 8). Ces champs sont calculés à l'aide du logiciel commercial GOM Correlate 2020 (GmbH 2016).

6

DIFFUSION HYDRIQUE DANS LES POUTRES

Le but de cette partie est de caractériser la distribution spatiale de l'humidité dans la section des poutres au moment des essais mécaniques et après exposition aux sollicitations hydriques. Nous validons dans un premier temps la représentativité de l'échantillon de référence ER2 par rapport aux poutres. Ensuite nous présentons les profils expérimentaux issus des mesures IRM et avec l'humidimètre à pointe pour chaque cas de sollicitation hydrique. Nous montrons finalement que la loi de Fick est capable de représenter le transfert isotherme et non isotherme dans les éléments en bois.

Sommaire

6.1	Profils hydriques expérimentaux	142
6.1.1	Cas 1 : diffusion hydrique en milieu contrôlé	142
6.1.2	Cas 2 : diffusion hydrique en milieu extérieur	150
6.1.3	Effet de bord dans l'IRM	157
6.2	Modélisation des transferts hydriques	161
6.2.1	Cas de diffusion isotherme (dans la caisse)	162
6.2.2	Cas de la diffusion non isotherme (à l'extérieur)	168
6.2.3	État d'humidité des poutres avant les essais mécaniques	178
6.3	Conclusions	180

6.1 Profils hydriques expérimentaux

6.1.1 Cas 1 : diffusion hydrique en milieu contrôlé

Nous présentons dans les sections suivantes les résultats des mesures expérimentales effectuées sur les échantillons soumis au conditionnement en classe de service 3 (cas des poutres dans la caisse avec un environnement humide et contrôlé).

Représentativité des échantillons de référence

On commence par analyser l'évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres et des échantillons de référence (échantillon ER2 de la figure 5.7). La masse des poutres est mesurée à l'aide d'une balance dont la précision est de 0,1 g. Pour des raisons de simplicité, nous comparons l'évolution de la teneur en humidité moyenne des trois poutres testées pour les deux séries et l'échantillon de référence associé à chaque série. Cette évolution est donnée dans la figure 6.1.

Les courbes montrent une bonne reproductibilité de l'évolution de la teneur en humidité moyenne mesurée sur les poutres. Par ailleurs, on constate que l'évolution de l'humidité moyenne des échantillons de référence est très proche de celles des poutres avec un écart relatif maximal égal à 6,8 %. Cet écart peut être dû soit à l'inhomogénéité (transitoire) du degré d'humidité dans la caisse ou éventuellement à la taille réduite de l'échantillon de référence par rapports aux poutres. Cet écart reste néanmoins faible, ce qui permet d'assurer une bonne représentativité des échantillons de référence ER2 par rapport aux poutres.

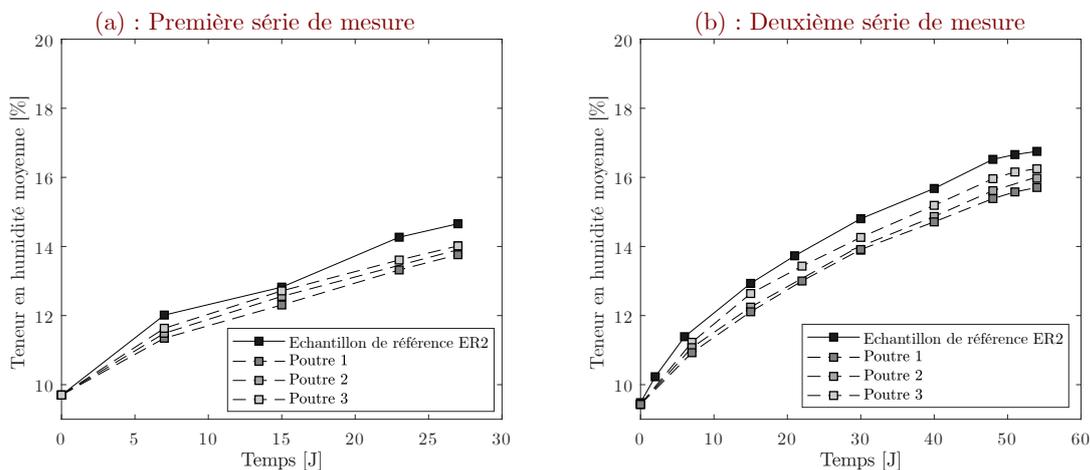


FIGURE 6.1 – Évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres et de l'échantillon de référence ER2 pendant les deux séries de mesures pour les poutres en environnement contrôlé.

Répétabilité de la mesure de variation de masse

Au cours des essais de conditionnement des poutres dans la caisse, deux séries de mesures sont réalisées. Dans chacune des séries, différents échantillons de référence (ER1 et ER2) sont utilisés. Nous comparons la variation de masse pour chacun des échantillons de référence (ER1 et ER2) ainsi que pour les poutres employées. Cette comparaison est donnée dans la figure 6.2. La variation de masse représentée dans cette figure est définie comme étant la différence entre la masse de l'échantillon à un instant t et sa masse initiale au début de l'essai.

L'ensemble des résultats indique une bonne répétabilité de la mesure et donc une faible influence des hétérogénéités du bois (orientations de cernes différents entre échantillons, présence de nœuds et fissures initiales).

Mesures des profils d'humidité par IRM

Un suivi de l'évolution du processus de diffusion est réalisé par IRM. Ce suivi a l'avantage de fournir une information non destructive sur la pénétration de l'humidité dans les échantillons. Il permettra aussi de valider les mesures obtenues à l'aide de l'humidimètre à pointe et d'identifier les paramètres du modèle de diffusion. Ces mesures sont effectuées avec l'échantillon de référence ER1 (voir figure 5.7).

Dans un premier temps, nous vérifions la linéarité entre la variation du signal RMN et la variation de masse des échantillons avant d'en déduire les profils d'humidité. Nous avons déjà vu dans la partie II que la variation du signal RMN est proportionnelle à la variation du nombre de protons présents dans l'échantillon. Ceci implique que l'aire sous le signal du profil RMN est proportionnelle à la quantité d'eau présent dans l'échantillon. La figure 6.3 montre l'évolution du signal RMN en fonction de la masse d'eau absorbée par l'échantillon. Cette masse est définie comme la différence entre la masse de l'échantillon juste avant la mesure IRM et la masse sèche de l'échantillon. La masse sèche est obtenue après séchage de l'échantillon à 103°C. Les courbes de la figure 6.3 montrent une dépendance linéaire entre le signal RMN et la masse d'eau absorbée pour les échantillons ER1 des deux séries dans les conditions climatiques de la caisse ($HR = 99\%$ et $T = 20^\circ\text{C}$) avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,99. Ce résultat nous permet de vérifier la cohérence globale entre les mesures à différents instants et par la suite de déterminer les profils d'humidité de ces échantillons en fonction de temps.

Après avoir vérifié la bonne cohérence entre les mesures, nous procédons à déterminer la distribution locale de l'humidité en utilisant le même traitement proposé dans la section 2.3.4. La figure 6.4 montre l'évolution des profils d'humidité de l'échantillon référence ER1 des deux séries de mesures en fonction du temps.

Les courbes de la figure 6.4 montrent tout d'abord une asymétrie au niveau des profils se produisant sur presque toutes les échéances de mesures (en particulier

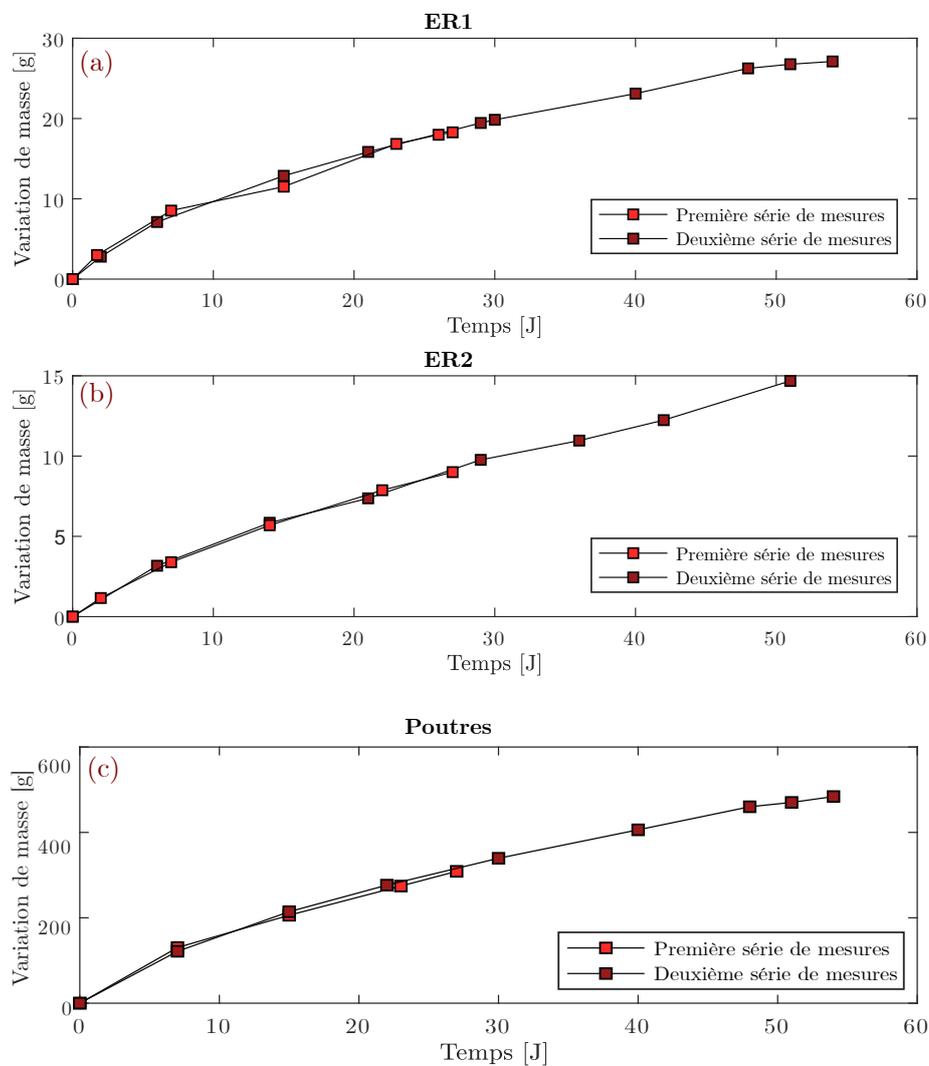


FIGURE 6.2 – Répétabilité de la prise de masse des échantillons ER1 (figure (a)), ER2 (figure (b)) et des poutres (figure (c)) utilisés pour les deux séries de conditionnement en classe de service 3. Les courbes de la figure (c) proviennent de la moyenne effectuée sur les 3 poutres pour chaque série.

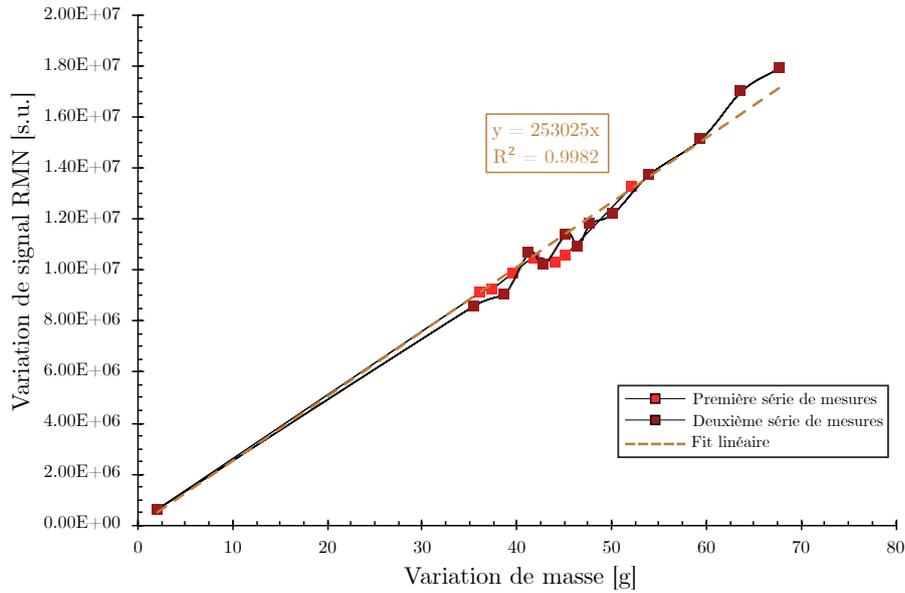


FIGURE 6.3 – Évolution du signal RMN en fonction de la variation de masse pour les deux séries de mesures. La variation de masse est définie comme étant la différence entre la masse à un instant et la masse sèche (calculée après étuvage à 103°C) de l'échantillon.

dans le premier cm au niveau de chaque bord). Nous cherchons à vérifier si cette asymétrie est due à un effet de bord ou à l'hétérogénéité intrinsèque du bois. Une méthode de vérification consiste à calculer la teneur d'humidité moyenne à partir des profils expérimentaux IRM, puis à la comparer à la teneur d'humidité mesurée par la masse. Cette comparaison est donnée dans la figure 6.5. Par ailleurs, on superpose sur cette figure 6.5 une troisième évolution de la teneur en humidité calculée à partir de la première moitié (entre $X=0$ et $X=6.5$ cm) du profil IRM. Les résultats des deux séries de mesure montrent que tenir compte du profil complet de l'IRM aboutit à une sur-estimation de la teneur en humidité moyenne de l'échantillon. En revanche, tenir compte de la première moitié du profil IRM est plus proche de la courbe de la masse (malgré la présence d'une sur-estimation qui est probablement dû à la méthode de calcul des profils comme l'on a montré au cours de la section 2.3.5). Étant donnée que la courbe de masse est une mesure fiable où les erreurs attendues sont plus faibles que celles des mesures de profils par IRM, elle constitue la référence pour déterminer la teneur d'humidité moyenne. Ajoutons, par ailleurs, que l'asymétrie observée sur les profils de la figure 6.4 ne peut avoir une raison physique puisque les valeurs atteintes à la surface proche de $X=13$ cm sont très élevées par rapport à la teneur d'humidité de bois à l'équilibre à 97 % d'HR (estimée entre 26% et 28%) et qu'on récupère bien la symétrie si on

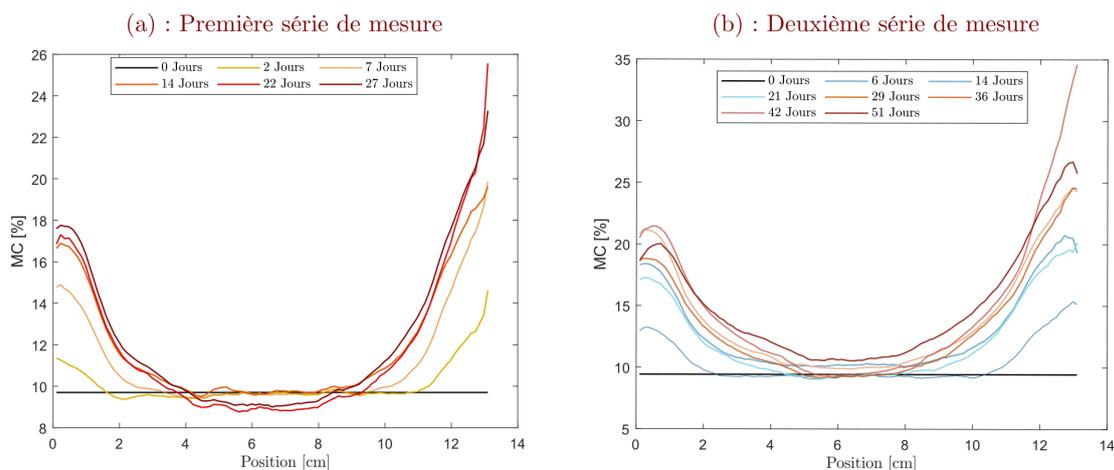


FIGURE 6.4 – Profils hydriques mesurés par IRM suivant la direction de diffusion des échantillons ER1 à différents instants. L’axe des X de la figure est confondue avec la direction de pénétration de l’humidité dans l’échantillon.

enlève les premiers et derniers centimètres.

Les raisons citées ci-dessus nous amènent à investiguer l’origine de la présence d’un effet de bord à partir de mesures complémentaires. Cette étude sera explicitée dans la section 6.1.3 où nous avançons des hypothèses sur l’origine de ces observations. Remarquons cependant que la présence de l’effet de bord n’empêche pas d’avoir une bonne estimation quantitative des profils d’humidité si on se limite à la région entre $X = 1$ cm et $X = 12$ cm du profil.

Par ailleurs, les profils de la figure 6.4 nous permettent de remarquer que l’humidité au bord ($X=0$) n’atteint pas directement la valeur d’humidité d’équilibre du bois avec les conditions climatiques (l’humidité de la surface augmente progressivement avec le temps d’exposition). Ceci met en évidence un phénomène de convection hydrique surfacique. D’un autre côté, les profils reflètent la lente cinétique de transfert dans la direction perpendiculaire au sens des fibres. On observe un fort gradient hydrique entre le bord de l’échantillon et le centre. La région centrale de l’échantillon reste dans la classe de service 1 (MC inférieur à 12%) tandis que la région au voisinage des bords est en classe de service 3 (MC supérieur à 20%).

En parallèle, nous étudions l’effet de la colle sur le transfert de l’humidité dans les échantillons étudiés. Afin de vérifier son influence, nous poursuivons les mesures de transferts d’humidité sur l’échantillon ER1 (deuxième série de mesure) au delà de 51 jours. La figure 6.6 montre l’évolution des profils d’humidité ainsi que la position des interfaces de la colle pour cet échantillon. Nous remarquons que les profils obtenus présentent une légère variation de pente au voisinage des deux

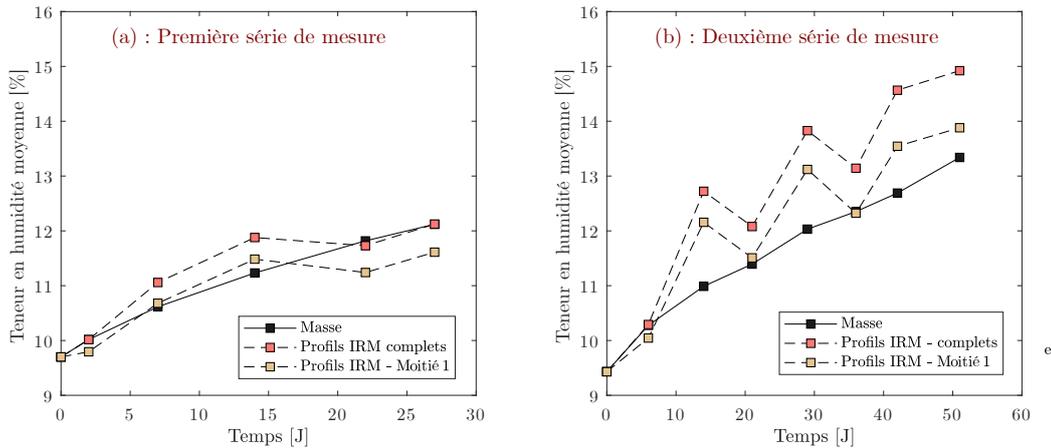


FIGURE 6.5 – Évolution de la teneur d’humidité moyenne calculée à partir de la masse, du profil IRM complet et de la et de la moitié du profil entre $X = 0$ et $X = 6.5$ cm pour la première série (figure (a)) et la deuxième série (figure (b)) respectivement.

interfaces de colle. Cela indique que l’influence de la colle (fonction du type de colle, épaisseur et méthode de dépôt) est minime sur le transfert hydrique et sa présence ne constitue pas une barrière contre la diffusion de l’humidité.

Les résultats présentés ci-dessus seront utilisés pour identifier le coefficient de diffusion dans le cas de transfert isotherme à 20°C .

Mesures de profils d’humidité par humidimètre à pointe

Un autre suivi de l’évolution de la diffusion est effectué sur l’échantillon ER2. Ce suivi est réalisé par une mesure de masse ainsi qu’une mesure de profil hydrique en utilisant l’humidimètre à pointe. Le principe de mesure par humidimètre à pointe est décrit dans 5.3.3. Cette mesure à l’avantage d’être une mesure directe et instantanée de la distribution de l’humidité dans la section des poutres. Cependant, elle présente le désavantage de fortement altérer la surface de mesure (la mesure consiste à faire pénétrer les électrodes dans l’échantillon) et qu’elle ne permet qu’une mesure en surface.

La figure 6.7 montre l’évolution au cours du temps des profils d’humidité mesurés selon la direction A de la figure 5.9 pour les deux séries de mesures. Nous remarquons des « pics » dans les profils aux alentours de la colle. Cependant, les « pics » observés ne peuvent pas avoir une origine physique étant donnée la nature de la diffusion attendue dans les lamelles de bois. Étant donné que l’humidimètre est une mesure de résistivité locale du matériau, on peut raisonnablement supposer que cette mesure soit faussée par la présence de deux matériaux de propriétés

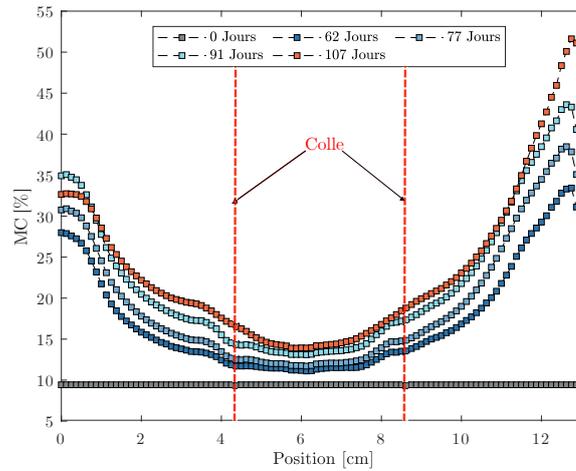


FIGURE 6.6 – Profils hydriques mesurés sur l'échantillon ER1 de la deuxième série de mesures. La localisation de la colle (estimée) est représentée par les tirets.

résistives très différentes (colle et bois). Par conséquent, pour pouvoir exploiter ces profils, on se propose d'appliquer un lissage local (voir figure 6.8).

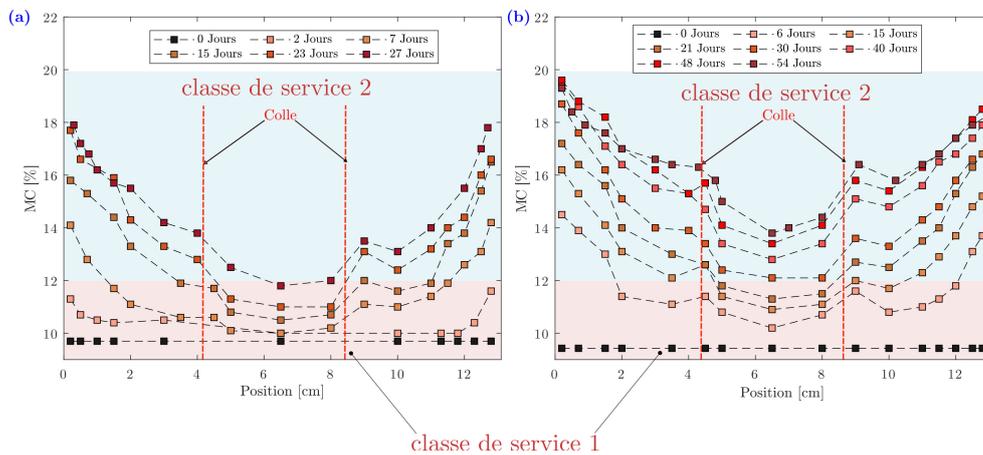


FIGURE 6.7 – Profils d'humidité mesurés sur l'échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure. Les valeurs sont mesurées selon la direction A. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l'échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.

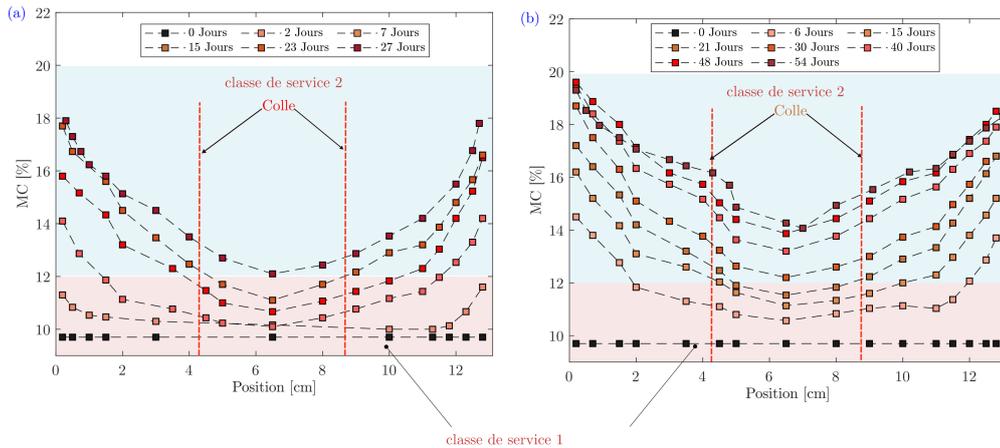


FIGURE 6.8 – Profils d’humidité mesurés sur l’échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure après l’application d’un lissage. Les valeurs sont mesurées selon la direction A. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l’échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.

Les figures 6.9 et 6.10 montrent les évolutions de l’humidité selon les directions B1 et B2 respectivement (voir figure 5.9). Nous remarquons une similarité pour les valeurs de la teneur en humidité mesurées sur la direction A et B1 (pour le même temps et la même série de mesure). Ceci nous permet de montrer que les coefficients de diffusion sont les mêmes dans les deux directions perpendiculaires de la section.

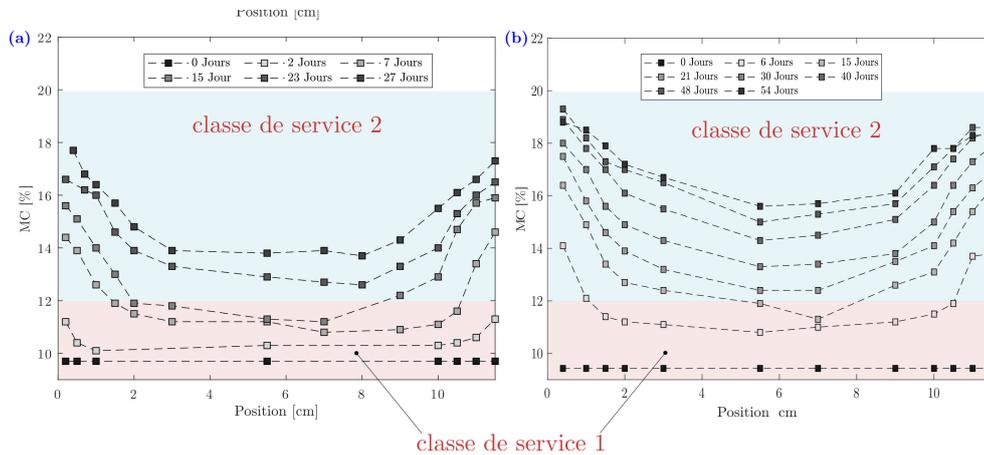


FIGURE 6.9 – Profils d’humidité mesurés sur l’échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure. Les valeurs sont mesurées selon la direction B1. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l’échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.

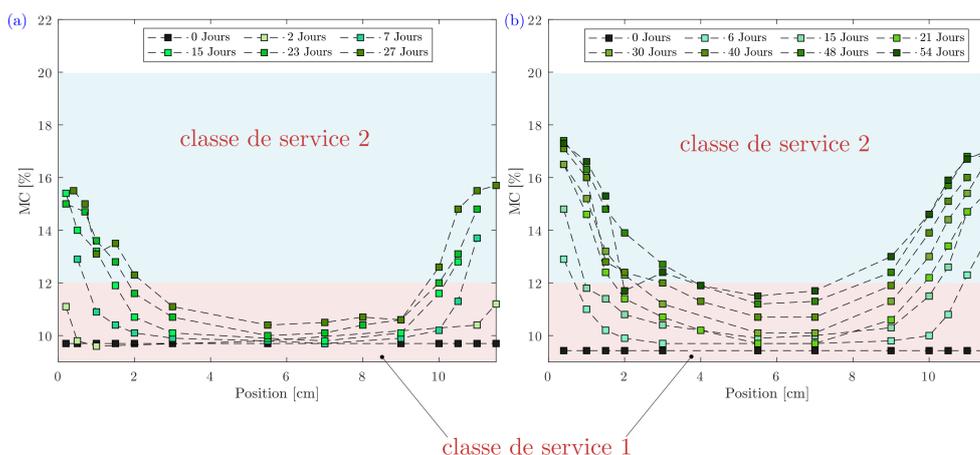


FIGURE 6.10 – Profils d’humidité mesurés sur l’échantillon ER2 de la figure 5.7 au cours de la première (a) et la deuxième série (b) de mesures. Les valeurs sont mesurées selon la direction B2. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l’échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.

Les mesures effectuées selon la direction B2 (figure 6.10) reflètent la faible pénétration d’humidité au centre de l’échantillon. Prenons comme exemple les courbes mesurées à 27 et 54 jours. Nous remarquons que le cœur de l’échantillon (entre 4 et 6 cm) reste à une humidité située dans la classe de service 1 (MC inférieur à 12%) contrairement aux bords de l’échantillon qui se situent en classe de service 2 (ou 3).

6.1.2 Cas 2 : diffusion hydrique en milieu extérieur

Nous nous intéressons maintenant à l’étude du transfert hydrique en milieu non contrôlé en HR et T pour les échantillons conditionnés à l’extérieur.

Mesure de l’environnement extérieur entre janvier et septembre 2021 (Champs-Sur-Marne)

Les courbes de la figure 6.11 montrent l’évolution de la température, l’humidité relative ambiantes et la teneur en humidité à l’équilibre pendant la période des mesures. Les mesures ont commencé à Champs-Sur-Marne au début janvier 2021.

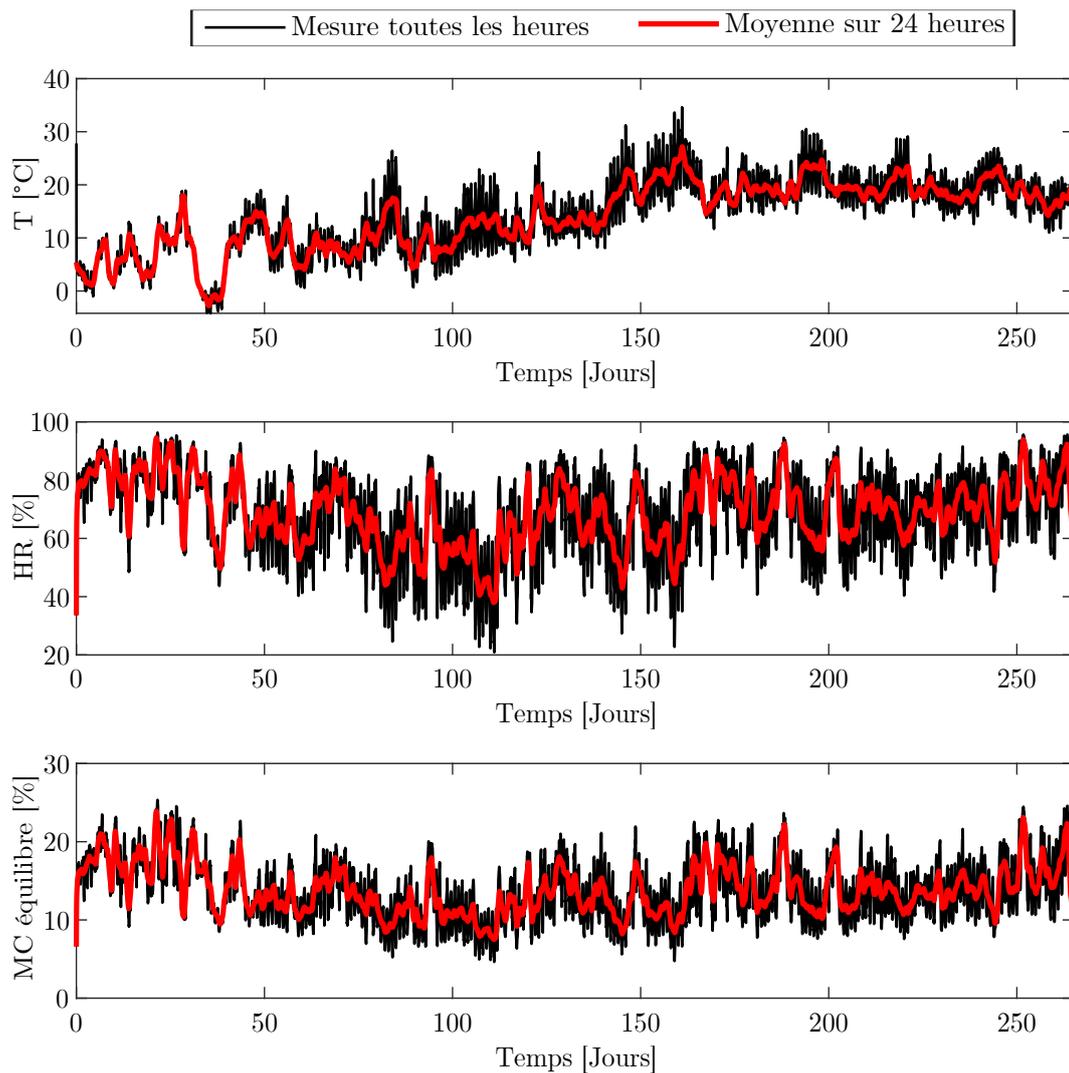


FIGURE 6.11 – Évolution de la température, de l’humidité relative ambiantes et de la teneur en humidité d’équilibre sur la période de mesure.

Représentativité des échantillons de référence

Afin de valider la représentativité de l’échantillon de référence ER2 soumis aux mêmes conditions que les poutres (i.e. diffusion uniquement selon les 4 faces latérales), nous comparons l’évolution de la teneur en humidité moyenne (évaluée par prise de masse) des poutres et celle de l’échantillon ER2. La figure 6.12 montre l’évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres à l’extérieur pour les deux séries de mesure. Nous remarquons une similarité de l’évolution de la teneur d’humidité entre les poutres et l’échantillon de référence avec un écart maximum égale à 1,7% . Ceci nous permet de considérer dans la suite que les profils mesurés

sur l'échantillon de référence (ER2) représentent l'état hydrique dans la section des poutres.

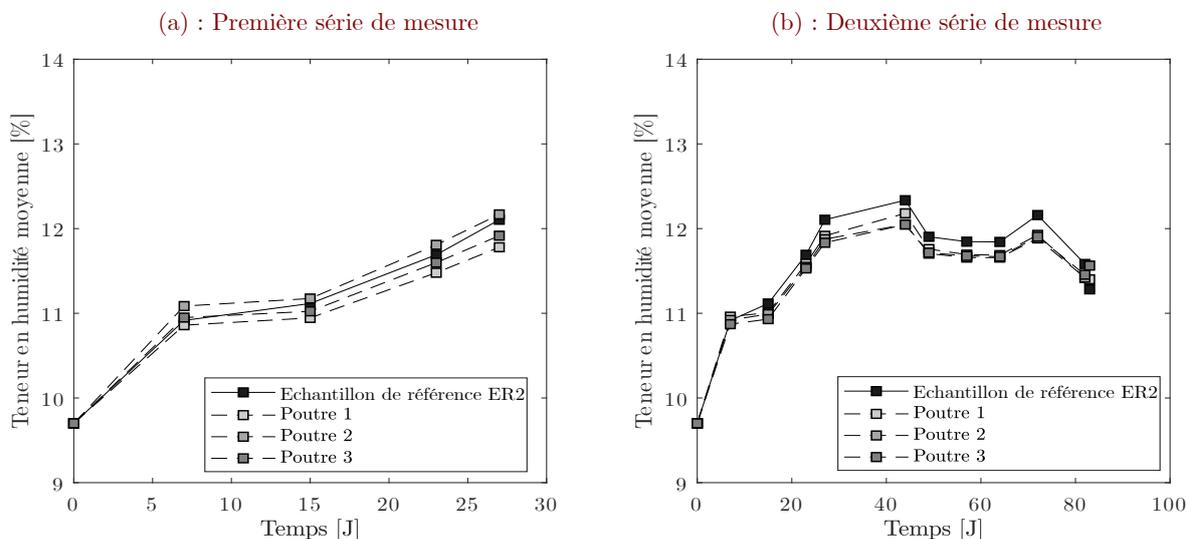


FIGURE 6.12 – Évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres à l'extérieur pour deux séries de mesures (28 jours et 84 jours).

Mesures par IRM

Comme dans le cas de la diffusion en environnement contrôlé, on procède ici à une mesure par IRM sur l'échantillon de référence (ER1) soumis au même environnement extérieur que les poutres.

La figure 6.13 montre l'évolution du signal RMN en fonction de la masse d'eau présente dans l'échantillon. Nous remarquons une dépendance linéaire entre la variation du signal et la variation de la masse malgré la présence de fluctuations dans le signal. Ces fluctuations peuvent être le résultat du bruit de l'IRM (qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 5% du signal) et qui sera remarquable sur cet échantillon puisque sa variation de masse est faible (prise de masse égale à 4,3 g au maximum). Ajoutons à cela les variations de température que subit cet échantillon en milieu externe et qui peuvent engendrer une variation de quelques pourcents sur le signal (une diminution de 3°C engendre une augmentation de 1% du signal). Les profils présentés au cours de ce travail ne sont pas corrigés vis à vis de la température.

La figure 6.14 montre l'évolution des profils de teneur en humidité mesurés sur l'échantillon de référence à l'extérieur par IRM. L'évolution de la teneur d'humidité moyenne mesurée à partir de la masse et des profils IRM est donnée dans la figure 6.15. Un effet de bord est observé également sur quelques profils. Nous rappelons que l'étude menée sur l'effet de bord sera présentée dans la section 6.1.3.

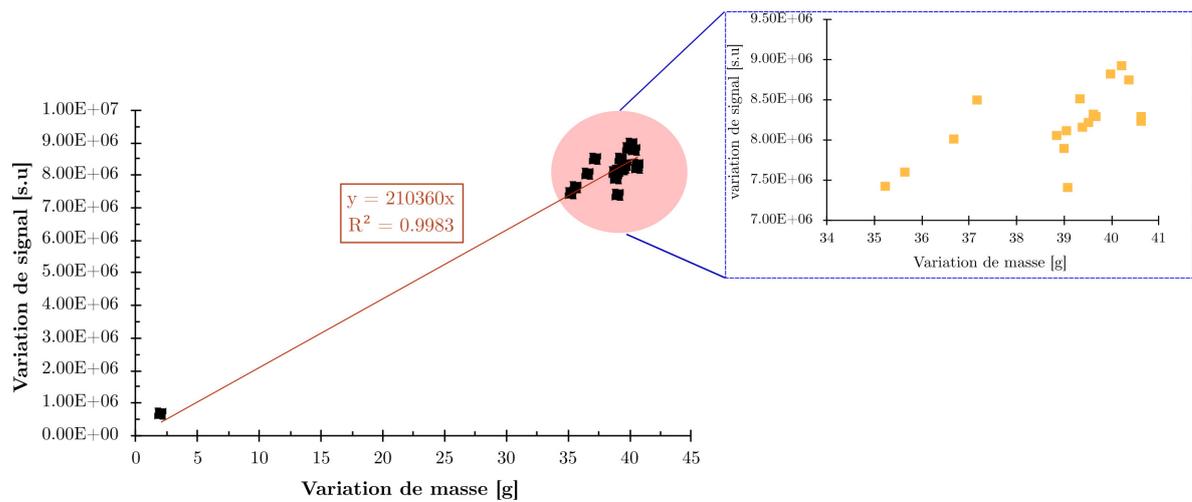


FIGURE 6.13 – Signal RMN en fonction de la variation de masse de l'échantillon de référence ER1.

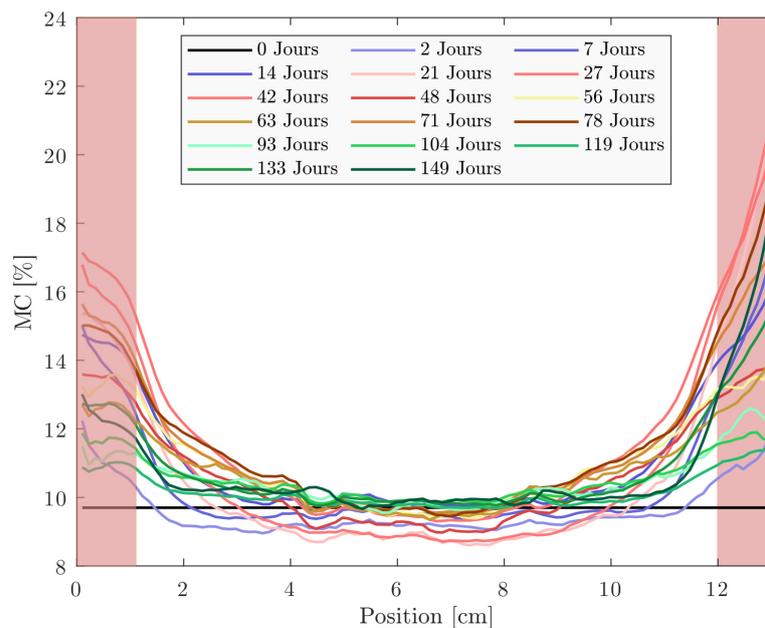


FIGURE 6.14 – Profils de teneur en humidité locale mesurés sur l'échantillon ER1 dans le cas de diffusion dans un milieu externe.

Évolution de la teneur d'humidité jusqu'à 2 jours

L'évolution de la masse à $t = 2$ jours, montre que l'échantillon ER1 perd de l'humidité. Cela est également observable sur les profils IRM. Cette perte de l'humidité

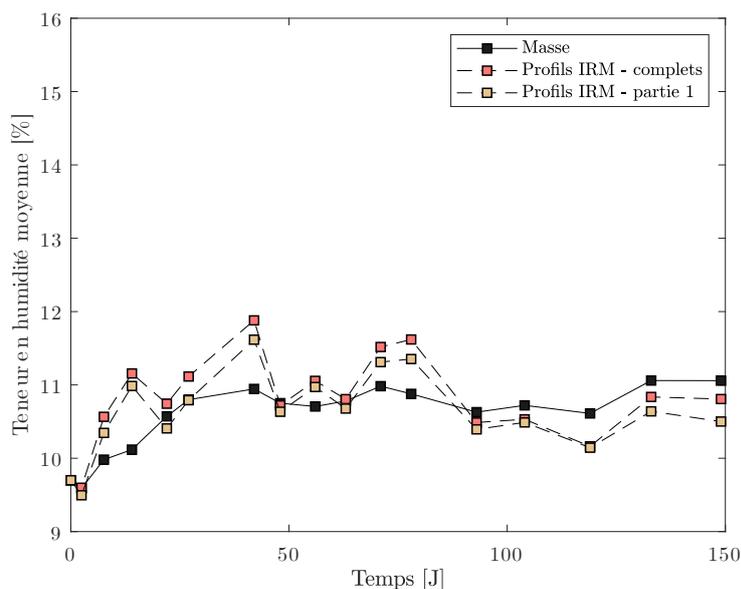


FIGURE 6.15 – Évolution de la teneur en humidité moyenne déterminée par la masse et par les profils IRM

se produit bien qu'une adsorption est attendue puisque $MC_{\text{équilibre}} = 15$ (HR = 80 % & $T < 5$ °C) (voir figure 6.11) est supérieure à sa valeur initiale. Le profil de la teneur en humidité de ce jour montre qu'une adsorption a lieu en surface, tandis qu'à l'intérieur de l'échantillon (de $X=1.4$ cm jusqu'à 11.4 cm) l'humidité locale diminue. En effet, avant le début de l'essai, l'échantillon était en équilibre à la température 20 °C. Ensuite l'échantillon est mis à l'extérieur en janvier 2021 où la température est égale à 5°C. Ce changement brusque de température extérieur génère un gradient thermique transitoire intense sur les premières heures suivant la mise à l'extérieur de l'échantillon¹. L'effet Soret stipule que la présence d'un gradient de température engendre une migration de l'humidité des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides (S. Avramidis ; Hatzikiriakos ; Siau 1994). Donc, nous pouvons supposer que le profil d'humidité obtenu à 2 jours est lié à l'effet Soret.

Évolution de la teneur d'humidité au delà de 2 jours

D'autres profils montrent une baisse de la teneur d'humidité au milieu de l'échantillon, comme les profils à 21 et 27 jours. Au cours de ces jours, nous avons également constaté une baisse de profil IRM sur l'échantillon à l'humidité contrôlée

1. Une simulation numérique de diffusion thermique nous donne un gradient thermique intense de 10°C sur la première heure après la mise à l'extérieur de l'échantillon. Le champ de température s'homogénéise complètement après 7 heures de diffusion thermique

(voir figure (a) 6.4). Étant donné que cette baisse est constatée le même jour sur deux échantillons de référence conditionnés différemment, nous considérons alors que cet effet provient de l'IRM elle-même. Ces observations pourraient être liées à une variation de la température dans la salle de l'IRM.

Les profils hydriques issus de l'IRM montrent que la diffusion de l'humidité affecte uniquement une épaisseur limitée dans la section de l'échantillon. Le changement significatif de l'humidité a lieu uniquement dans les 2 premières centimètres de l'échantillon. Au delà de 2 cm, les changements de l'humidité au cours du temps sont plus faibles.

Mesures de profils d'humidité par humidimètre à pointe

Nous mesurons les profils hydriques en milieu externe sur l'échantillon ER2 en utilisant l'humidimètre à pointe. Les figures 6.16, 6.17 montrent les profils d'humidité mesurés selon les trois directions A, B1 et B2 présentées sur la figure 5.9. À noter que le profil hydrique mesuré à 258 jours à l'extérieur est montré dans l'annexe B.

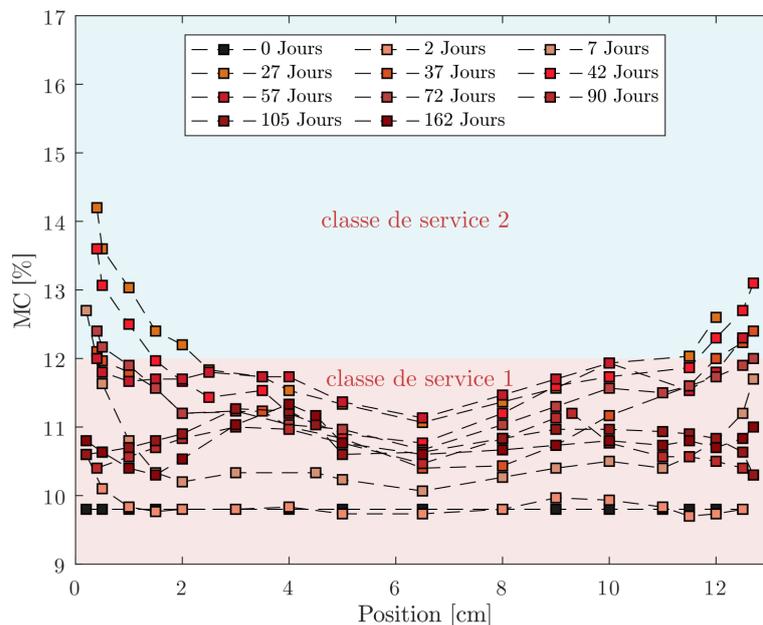


FIGURE 6.16 – Profils d'humidité mesurés avec l'humidimètre à pointe sur l'échantillon de référence ER2 dans le cas de transfert hydrique en milieu externe. Les profils sont mesurés selon la direction A comme indiqué sur la figure 5.9

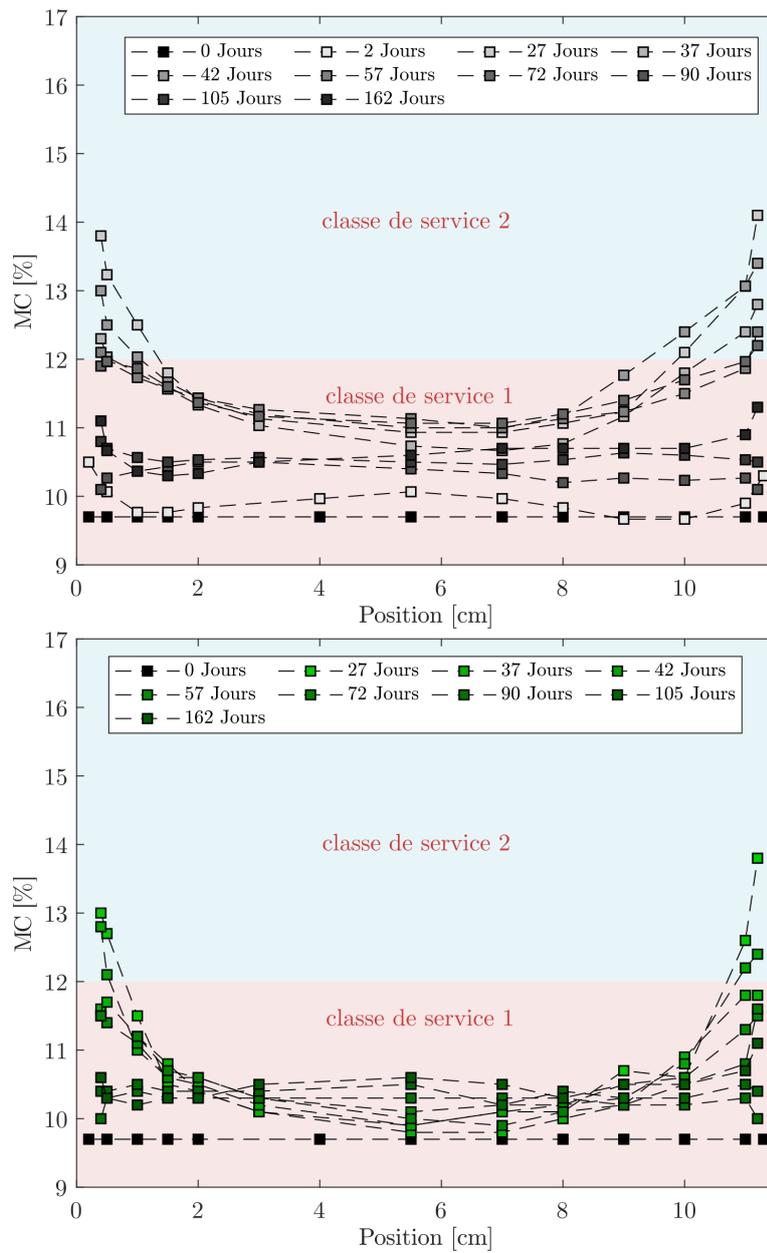


FIGURE 6.17 – Profils d’humidité mesurés avec l’humidimètre à pointe sur l’échantillon de référence ER2 dans le cas de transfert hydrique à l’extérieur. Les profils sont mesurés selon les directions B1 et B2 respectivement comme indiqué sur la figure 5.9

Conformément aux mesures effectuées par IRM sur ER1 ci-dessus, les profils mesurés par l’humidimètre à pointe montrent qu’une épaisseur limitée de l’échan-

tillon interagit avec le changement hydrique du milieu ambiant. En effet, nous pouvons définir une épaisseur de 2 cm de la section des poutres (voir figure 6.18) où l'humidité est fortement affectée par les variations climatiques externes. L'humidité du reste de la section (zone marron) change plus lentement et est moins sensible aux changements hydriques externes.

Cette épaisseur est le résultat des cycles journaliers de sorption/désorption puisque la présence de ces cycles empêche l'humidité d'atteindre le cœur des sections. Ceci engendre la présence en quasi-permanence d'un gradient hydrique dans les éléments à l'extérieur.



FIGURE 6.18 – Épaisseur affectée par la pénétration de l'humidité dans le cas des essais à l'extérieur.

6.1.3 Effet de bord dans l'IRM

Les résultats présentés dans les parties 6.1.1 et 6.1.2 nous amènent à étudier la présence d'un effet de bord pendant les mesures IRM. Pour faire cela nous effectuons des mesures additionnelles afin d'étudier les origines de cet effet de bord. Nous investiguons l'effet de l'orientation de l'échantillon dans l'IRM. La figure 6.19 montre les axes locaux qu'on attribue à l'IRM pendant cette exploitation. L'axe Z est confondu avec la verticale (et la direction de pénétration de l'humidité de l'échantillon). Les axes X et Y définissent le plan horizontal. Pendant toutes les mesures présentées ci-dessous, nous utilisons un échantillon ayant les mêmes dimensions que ceux de l'échantillon ER1 employé pour le suivi IRM sur les poutres.

Effet de l'orientation verticale de l'échantillon dans l'IRM

Dans un premier temps nous étudions l'effet de la position verticale de l'échantillon sur le signal RMN. La mesure est réalisée selon le principe schématisé dans la figure 6.20 : nous effectuons une première mesure (mesure 1) avec une première orientation selon l'axe vertical (nous obtenons ainsi le signal « A »). Ensuite, nous



FIGURE 6.19 – Axes locaux attribués à l'imageur IRM.

effectuons une deuxième mesure en inversant le sens de l'échantillon (mesure 2) (nous obtenons ainsi le signal « B»). Pour comparer l'effet de l'orientation verticale sur le profil IRM, nous comparons le signal A et le signal B1 (le signal B1 résulte d'une inversion du signal B). Nous définissons l'erreur comme étant le rapport entre la différence de mesure entre les deux signaux et le signal A.

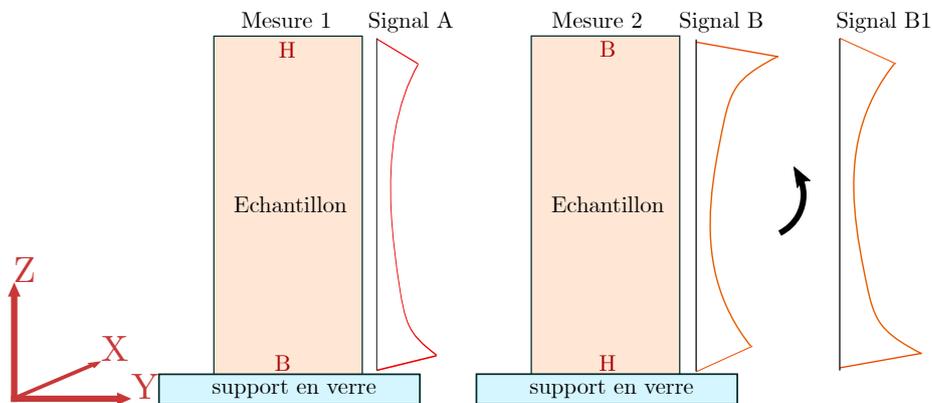


FIGURE 6.20 – Principe de mesure de l'effet de l'orientation verticale sur le signal IRM

La figure 6.21 montre l'erreur calculée pour cette mesure. Nous remarquons ainsi qu'un effet existe sur le premier centimètre de l'échantillon (zone en rouge) où une erreur d'environ 20% existe. Le reste de l'échantillon ne semble pas être

très impacté par cette mesure (l'erreur reste aux alentours de 5%).

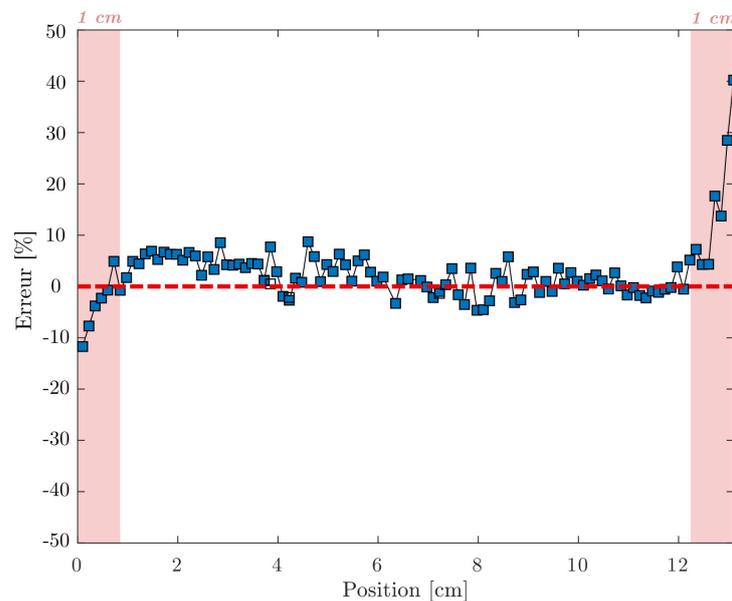


FIGURE 6.21 – Erreur calculée pour l'effet de l'orientation verticale de l'échantillon à l'IRM

Les origines de cet effet peuvent être nombreuses. Cela peut être dû à un effet d'interface puisque le haut de l'échantillon (H) et le bas (B) sont en contact avec deux matières différentes, comme on peut le voir sur la figure 6.21. Un support en verre (le verre ne donne pas de signal RMN) est placé en dessous de l'échantillon pour le supporter. Cela implique que l'échantillon possède deux interfaces : interface bois-air et une interface bois-verre. Cette différence d'interface peut avoir un effet sur le transfert de magnétisation avec l'échantillon et affecte ainsi le signal obtenu. Des effets de non symétrie des défauts d'inhomogénéités de champ peuvent se rajouter également.

Effet de la position dans le plan XY de l'IRM

Dans un second temps nous étudions l'effet de la position de l'échantillon dans le plan XY. Les mesures réalisées pendant ce travail consistent à faire un suivi à long terme où l'échantillon est placé ponctuellement à l'IRM afin de réaliser la mesure. Dans ce sens, le positionnement dans le plan XY peut être légèrement différent d'une mesure à une autre. Nous cherchons à voir si la position de l'échantillon dans le plan XY (voir figure 6.19) a un effet sur le signal obtenu. Alors, nous réalisons deux mesures à deux positions différentes selon l'axe X. La figure 6.22 montre l'erreur obtenue pour cette mesure.

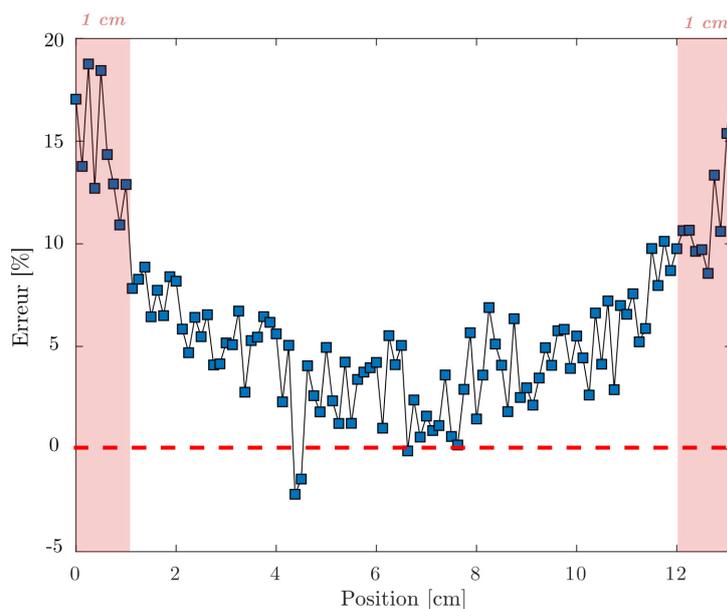


FIGURE 6.22 – Erreur calculée pour l’effet de la position dans le plan de l’échantillon à l’IRM

Nous observons ainsi que le changement de la position de l’échantillon dans le plan XY a un effet sur le signal obtenu surtout sur le bord où nous observons une erreur de l’ordre de 15%. Cependant, en dehors de zones « rouges » sur la figure, l’erreur de la mesure est aux alentours de 5% ce qui représente une erreur acceptable pour la mesure.

Origine potentielle des effets de bords

Nous remarquons que les deux effets observés précédemment ont lieu sur les bords et plus précisément sur le premier centimètre de l’échantillon. La figure 6.23 montre la superposition des deux effets de bords observés avec un signal IRM brut (courbe en bleue). Nous remarquons ainsi que ces effets se produisent dans la partie « inclinée » du signal. En effet, cette partie du signal provient de la séquence SPI elle même. C’est le résultat de l’application de la transformée de Fourier dans une zone de transition entre les hautes fréquences et basses fréquences. Dans cette zone, nous pouvons retrouver des pixels partiellement remplis. Ajoutons à ce qui précède, la taille importante de l’échantillon ($13 \times 11,5 \times 6 \text{ cm}^3$) qui rend les inhomogénéités de champs magnétique plus visibles sur le signal.

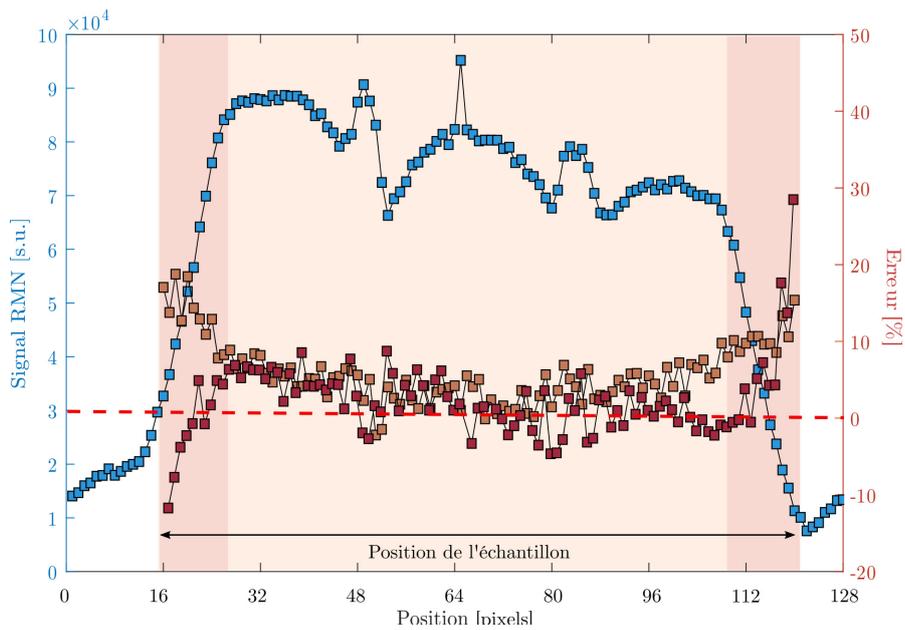


FIGURE 6.23 – Superposition des deux effets de bords mesurés précédemment avec un signal brut IRM (en bleu). La position de l'échantillon par rapport au signal brut est représenté par la double flèche.

Tout ce qui précède montre qu'aux bords de l'échantillon, les profils d'humidité présentent des erreurs aux niveaux des bords de l'échantillon. En revanche, les profils restent précis dans la partie courante de l'échantillon et comparables entre eux dans la mesure où la plupart des défauts sont reproductibles d'une mesure à l'autre.

6.2 Modélisation des transferts hydriques

Afin d'accéder au champ hydrique complet de la section des poutres au moment des essais de flexion, nous avons recours à la modélisation des transferts hydriques. L'objectif de cette partie est d'identifier les coefficients de diffusion et d'échanges surfaciques dans les deux cas de sollicitation hydrique. Les profils hydriques issus des mesures IRM et des mesures à l'aide de l'humidimètre à pointe constituent une base pour cette identification. Les simulations numériques présentés ci-dessous sont réalisés à l'aide d'Abaqus en utilisant l'analogie entre les équations de transfert thermique et hydrique de la même manière que dans le chapitre 4.

Nous réalisons tout d'abord la simulation dans le cas de transfert isotherme ($T = 20^\circ\text{C}$). Ensuite, nous modélisons les transferts hydriques dans le cas non-isotherme. Finalement, nous montrons l'état hydrique des poutres juste avant les

essais mécaniques.

6.2.1 Cas de diffusion isotherme (dans la caisse)

Un suivi de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la caisse est effectué à l'aide d'un thermohygromètre. L'évolution de la température et de l'humidité relative pour les deux séries de mesures (figure 5.5) montrent que les conditions climatiques des essais correspondent à la classe de service 3 de l'Eurocode 5. La température moyenne est de $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant la première série de mesure et de $20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant la deuxième série de mesure. L'évolution de la teneur d'humidité d'équilibre pour les deux séries de mesure est donnée dans la figure 6.24. Les baisses ponctuelles et brutales sur MC équilibre correspondent à l'ouverture de la caisse.

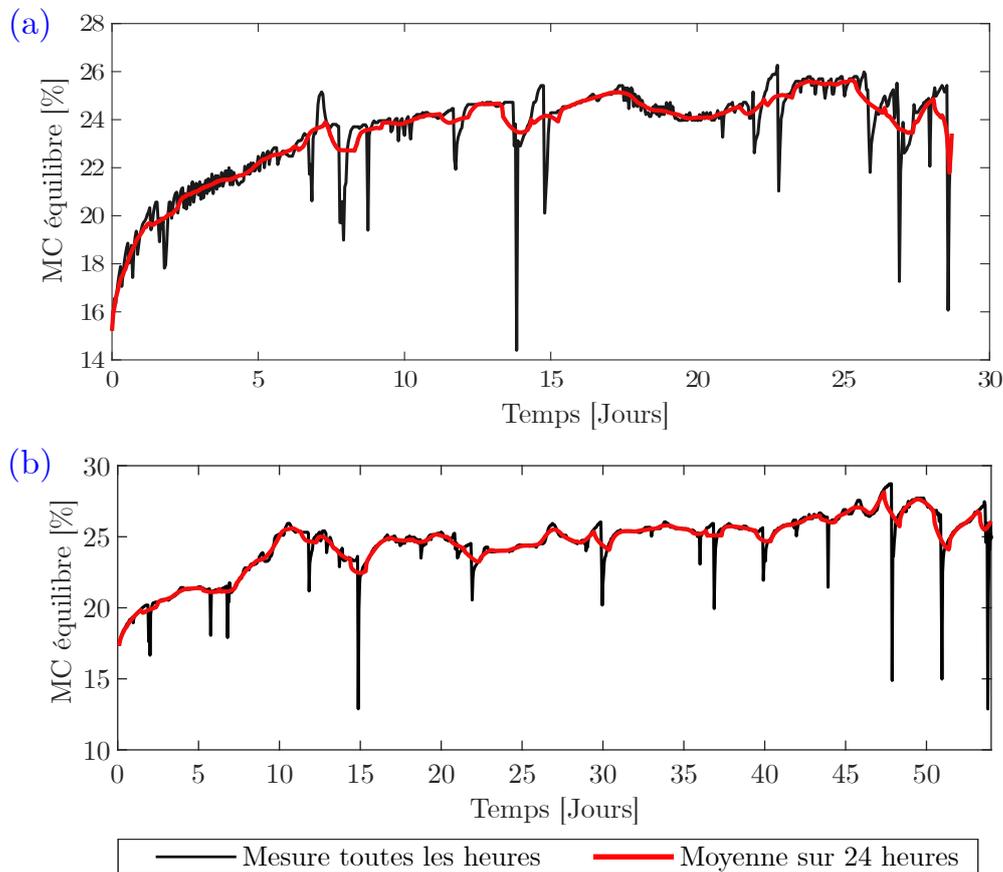


FIGURE 6.24 – Évolution de MC équilibre en fonction de temps mesuré au cours de la première série (a) et de la deuxième série (b).

Le modèle de diffusion est le même que celui mis en œuvre dans le chapitre 4

en conditions isothermes. Les étapes de l'identification des paramètres du modèle de diffusion sont les suivantes :

1. Nous identifions tout d'abord le coefficient d'échange surfacique à partir des profils IRM sur l'échantillon ER1 (diffusion 1D) sur la zone exempt de l'effet de bord. Le coefficient de diffusion utilisé est le même que celui identifié au cours de la phase d'humidification pour les échantillons LC-T, LC-R, BM-R.
2. Nous employons les mêmes coefficients identifiés avec ER1 pour simuler le transfert hydrique dans l'échantillon ER2 (diffusion 2D). Ces simulations sont comparées avec les mesures effectuées à l'aide de l'humidimètre à pointe et la variation de la teneur d'humidité moyenne. L'objectif est de s'assurer que les mêmes coefficients s'appliquent pour les deux directions de diffusion.

Étant donné que les résultats précédents ont montré que la présence de la colle entre les lamelles (colle MUF d'épaisseur < 1 mm) a un effet limité sur la diffusion, nous réalisons donc l'identification des coefficients de transfert sans considérer la colle dans le calcul numérique. Le coefficient de diffusion identifié est un coefficient de diffusion « homogène », c'est à dire sans distinction entre les directions locales R et T.

Nous présentons ici les résultats pour la première série de mesure dans la mesure où les deux séries ont montré des résultats similaires.

Identifications des coefficients du modèle de diffusion dans le cas unidirectionnel (ER1)

L'identification des paramètres du modèle de diffusion donne un coefficient d'échange surfacique $S = 1,35 \times 10^{-8}$ m/s. Le coefficient de diffusion transversal $D = 3 \times 10^{-10} e^{-0,06*MC}$, identifié au cours de la section 4.4.2 (équation 4.20), donne une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés. La figure 6.25 montre la comparaison entre la teneur en humidité moyenne calculée à partir de la masse et des profils simulés pour le cas de diffusion unidirectionnelle (échantillon ER1). Nous remarquons que la simulation montre une bonne prédiction de l'évolution de la teneur en humidité moyenne issue de la masse avec un écart relatif maximum entre les deux égal à 3,7%. D'un autre côté, les courbes de la figure 6.26 montre la comparaison entre les profils IRM et les profils simulés pour les deux séries de mesures. La partie en rouge clair des figures représente la zone susceptible d'avoir un effet de bord. Nous jugeons donc la qualité de la simulation en négligeant cette zone. Nous trouvons ainsi une bonne correspondance entre les profils simulés et les profils expérimentaux. Un écart relatif maximum de l'ordre de 11% et 23 % est retrouvé pour les deux séries de mesures respectivement. Cet écart se reproduit aux alentours de la zone susceptible d'avoir un effet de bord.

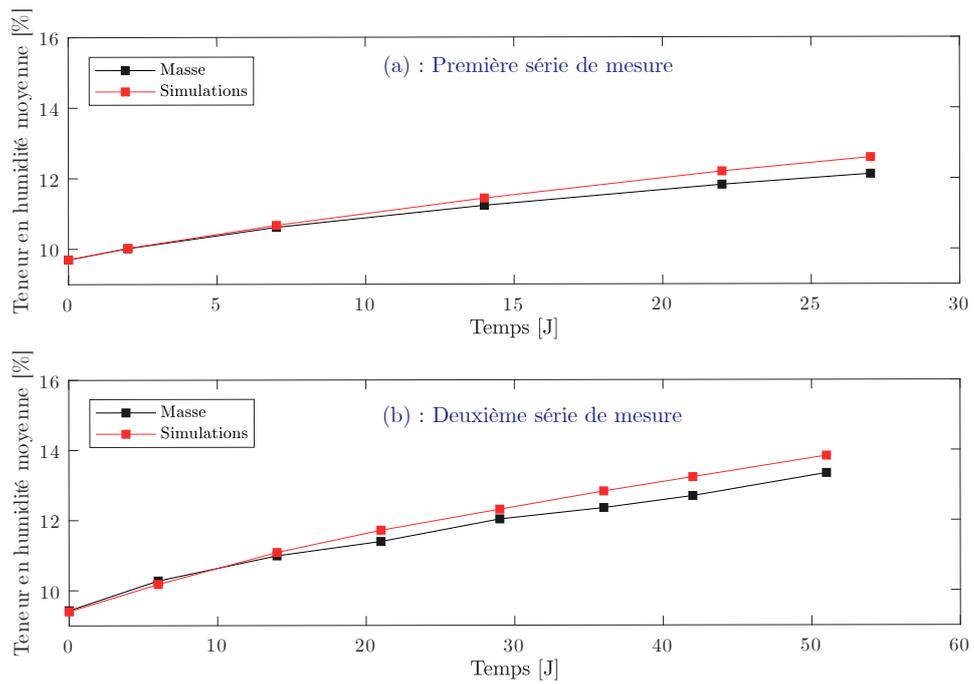


FIGURE 6.25 – Évolution de la teneur en humidité moyenne pour l'échantillon ER1 issue de la masse (en noir) et des simulations (en rouge)

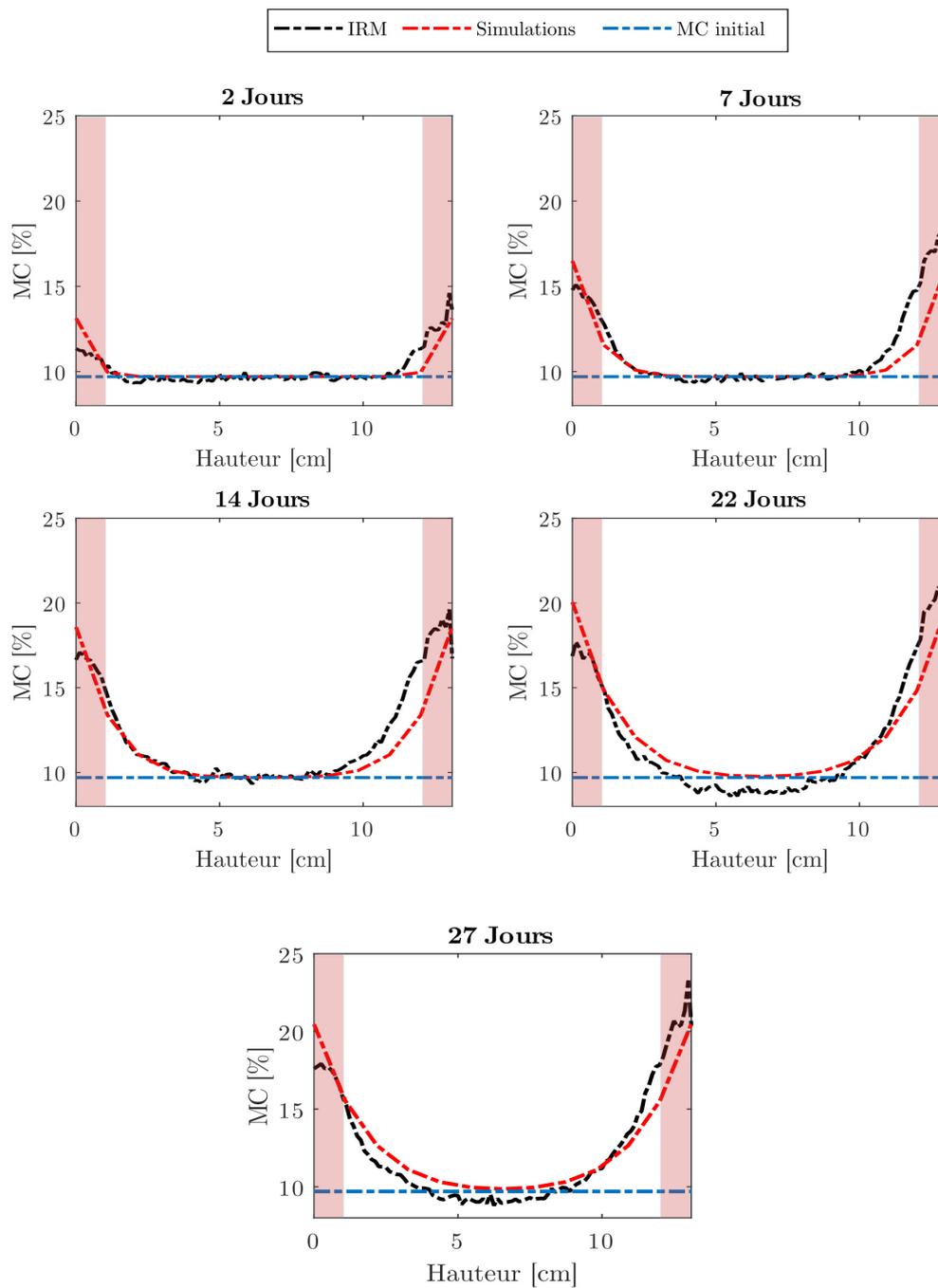


FIGURE 6.26 – Comparaison entre les profils expérimentaux mesurés par IRM au cours de la première série de mesure et les profils simulés pour l'échantillon ER1.

Vérification des coefficients du modèle de diffusion appliqué au cas 2D (ER2)

Nous cherchons à savoir si les mêmes coefficients du modèle peuvent être employés dans les deux directions. Afin de répondre à cette question, on réalise une simulation de diffusion 2D. On compare le résultat de la simulation 2D avec les profils issus des mesures avec l'humidimètre à pointe. Les profils hydriques issus des mesures avec l'humidimètre au cours de la première série de mesure et ceux issus de la modélisation (voir figure 6.27) montrent une correspondance très satisfaisante surtout par rapport au caractère destructif de la mesure expérimentale et les biais induits sur la mesure.

Concernant l'évolution de la teneur d'humidité moyenne de l'échantillon, nous remarquons un bon accord entre mesures et simulations (un écart relatif maximum de 4,4% est observé entre mesures et simulations, voir la figure 6.25). Ceci valide l'utilisation d'un seul coefficient de diffusion « effectif » dans la direction perpendiculaire au sens du fil, peu importe l'orientation des cernes.

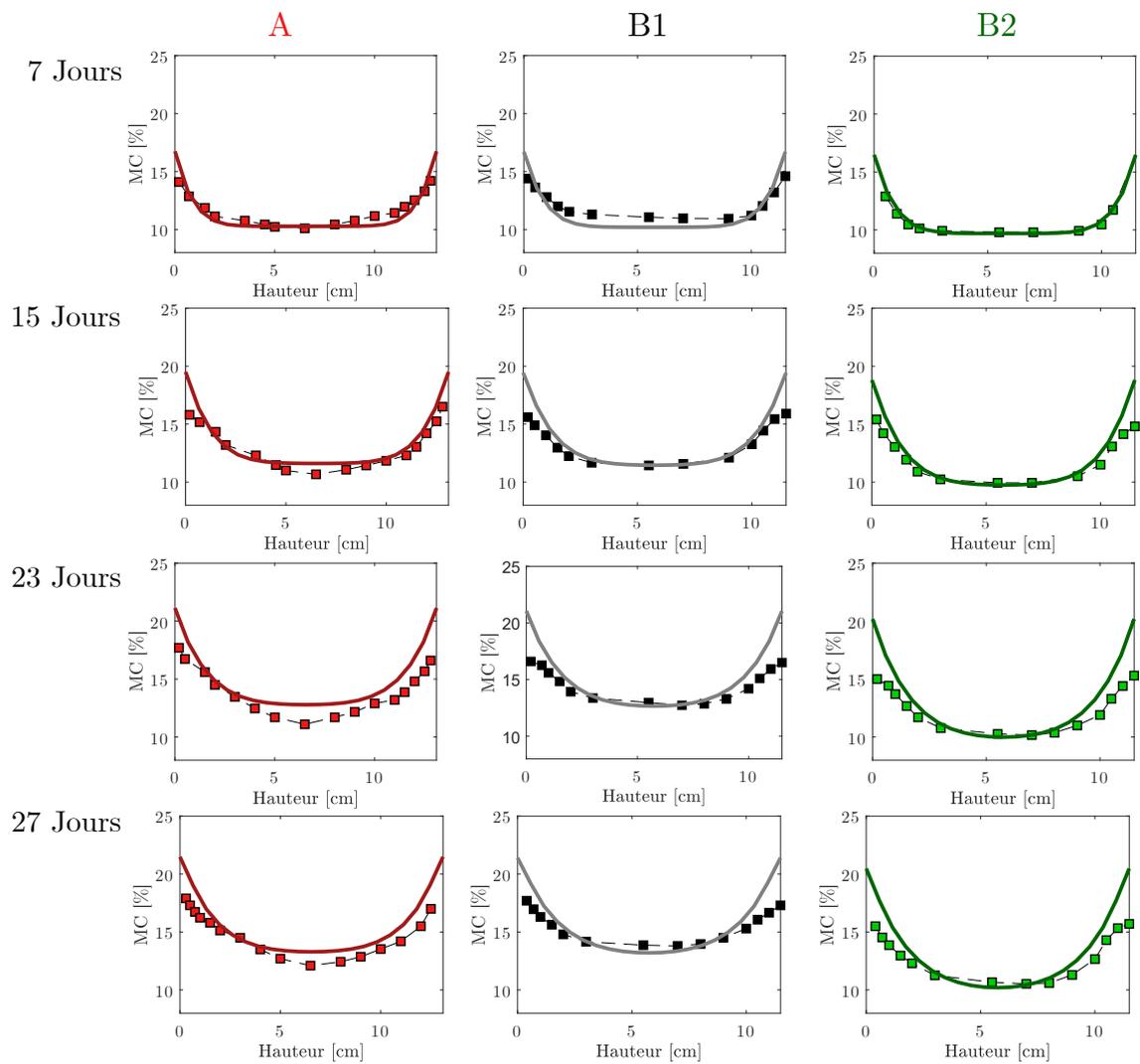


FIGURE 6.27 – Profils de teneur en humidité à différents instants suivant les directions A, B1 et B2 de la figure 5.9 au cours de la première série de mesure en ambiance contrôlée (échantillon ER2). Les lignes continues représentent les courbes issues de la simulation numérique et les lignes tiretées avec symboles représentent les mesures expérimentales.

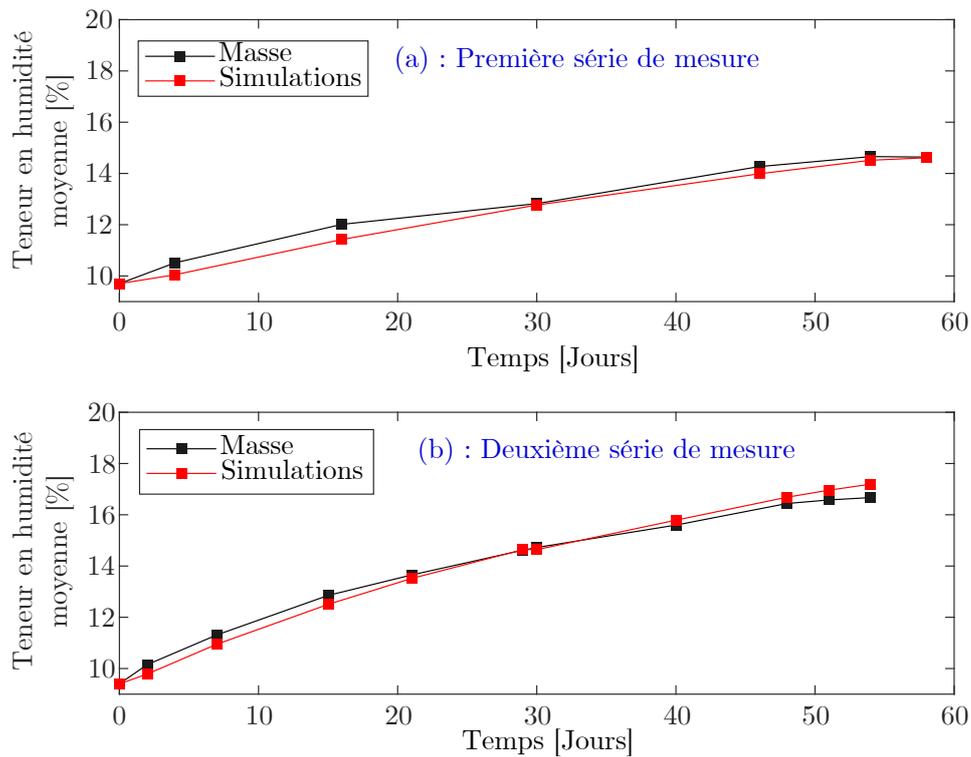


FIGURE 6.28 – Évolution de la teneur en humidité moyenne issue de la masse (en noir) et des simulations (en rouge) pour l'échantillon ER2.

6.2.2 Cas de la diffusion non isotherme (à l'extérieur)

La diffusion hydrique non-isotherme constitue un problème plus compliqué que celui du cas isotherme puisqu'elle engendre la présence de plusieurs phénomènes simultanés. Dans ce cas de transfert, la température joue un rôle primordial au cours de la diffusion hydrique. Un changement de la température affecte l'équilibre hydrique et vice versa (Hameury 2006). Par ailleurs, la présence d'un gradient de température au sein du matériau engendre une diffusion hydrique afin d'obtenir un équilibre, cet effet est connu sous le nom « d'effet Soret ». De plus, la température joue un rôle sur la vitesse de la diffusion et par conséquent sur le coefficient de diffusion d'humidité lui-même (Varnier 2019). D'une manière générale, la diffusion est un phénomène de transport des molécules d'un endroit ayant une concentration élevée d'un constituant vers un endroit ayant une faible concentration de ce constituant afin de retrouver l'équilibre. Une augmentation de la température signifie une agitation thermique plus élevée ce qui favorise le transport de ces molécules. On peut alors s'attendre à une augmentation du coefficient de diffusion avec la température.

Modèle choisi

Il est généralement admis que la diffusion dans le cas non-isotherme peut être donnée par l'équation 6.1 (dans le cas de la teneur en humidité comme force motrice) (Hameury 2006 ; S. Avramidis ; Hatzikiriakos ; Siau 1994) :

$$\frac{d(MC)}{dt} = -\frac{d}{dx}\left(D_{MC,T}\frac{d(MC)}{dx}\right) - \frac{d}{dx}\left(D_T\frac{dT}{dx}\right) \quad (6.1)$$

avec $D_{MC,T}$ le coefficient de diffusion dépendant à la fois de la teneur en humidité et de la température, D_T le coefficient de diffusion hydrique dû à la présence d'un gradient thermique et T la température.

En résumé, la modélisation numérique des phénomènes de transferts hydriques en milieu extérieur non contrôlé (non-isotherme en présence des variations climatiques) nécessite plusieurs connaissances préalables :

1. L'effet de la teneur en humidité sur les coefficients de transferts d'humidité (coefficient de diffusion et le coefficient d'échange surfacique) : cette dépendance est déjà établie suite à l'étude précédente réalisée dans le cas isotherme à 20°C.
2. La variation de la teneur en humidité d'équilibre en fonction de l'humidité relative et la température : cette variation est considérée connue et est donnée par l'abaque de l'Eurocode 5 (équation 1.7). Comme explicité dans le chapitre 4, la présence de l'hystérésis de sorption est négligé.
3. L'effet de la température sur le coefficient de diffusion et le coefficient d'échange surfacique
4. L'effet du gradient thermique sur la diffusion hydrique caractérisé par le coefficient D_T
5. La prise en compte de l'effet des cycles désorption/adsorption sur le coefficient de diffusion et le coefficient d'échange surfacique, étant donné qu'en milieu externe l'échantillon subit des cycles de sorption/désorption.

Plusieurs études expérimentales ont étudié l'effet de la température (homogène) sur le coefficient de diffusion. Nous citons parmi ces études les travaux réalisés par (S. Avramidis ; Siau 1987 ; Skaar 1988 ; Chiniforush ; Valipour ; Akbarnezhad 2019). (S. Avramidis ; Siau 1987) ont réalisé des essais de sorption sur des échantillons de pin ayant 3 épaisseurs différentes (0,5, 1 et 2cm). Les essais de sorption sont menés à différentes humidités relatives et à différentes températures (30, 45, 60 et 70°C). Les coefficients de diffusion et les coefficients d'échanges surfaciques identifiés augmentent en fonction de la température. (Skaar 1988) cite également des travaux montrant une dépendance linéaire entre le logarithme de D et l'inverse de la température. Plus récemment, (De Meijer ; Militz 2001) ont réalisé des essais

d'adsorption sur de l'épicéa à différentes températures (5, 23, 28 et 55°C). Le coefficient de diffusion identifié dépend positivement de la température sous forme exponentielle. Cette dépendance est liée à la loi d'Arrhenius.

En parallèle, de nombreux travaux sur la modélisation de transfert d'humidité considèrent l'effet de la température sur la diffusion, peu importe le modèle de diffusion choisi. (Simpson 1993 ; Florisson ; Vessby ; Ormarsson 2021) modélisent le transfert humidité à l'aide de la loi de Fick avec la teneur en humidité comme paramètre pour la diffusion. Ils considèrent alors un coefficient de diffusion effectif qui augmente exponentiellement avec l'augmentation de la température. De même, (Varnier 2019) modélise le transfert hygro-thermique à l'aide d'une loi de Fick avec la pression de la vapeur d'eau comme potentiel. Le coefficient de diffusion utilisé augmente exponentiellement avec la température selon la loi d'Arrhenius. (Baronas ; Ivanauskas ; Juodeikienė ; Kajalavičius 2001) modélise le transfert en utilisant la loi de Fick et la teneur en humidité comme potentiel. Le coefficient de diffusion employé est un coefficient homogénéisé qui dépend à la fois du coefficient de diffusion de la vapeur et l'eau liée où chacun augmente avec la température selon deux lois différentes (le coefficient de diffusion de la vapeur varie selon la loi de Schirmer, en revanche celui de l'eau liée varie selon la loi d'Arrhenius). D'autre part, (Frandsen 2007) modélise les transferts en séparant les deux phases de l'humidité présentes dans le bois à l'état hygroscopique : diffusion de la vapeur et diffusion de l'eau liée. Deux lois de Fick sont employées avec un couplage entre elles. Le coefficient employé pour décrire la diffusion de la vapeur varie selon la loi de Schirmer avec la température et la pression de vapeur tandis que celui employé pour la diffusion de l'eau liée varie selon la loi d'Arrhenius.

Par ailleurs, l'effet de la présence de gradients de température sur la diffusion de l'humidité dans le bois (l'effet « Soret ») est peu abordé dans la littérature. Cela est dû essentiellement aux difficultés expérimentales pour effectuer des essais de transferts hydriques non-isothermes (Time 1998). L'étude réalisée par (Kang ; Chung ; Eom ; Yeo 2008) offre une synthèse bibliographique sur les modèles calculant le coefficient D_T . La figure 6.29 montre la variation du coefficient D_T en fonction de la teneur en humidité d'après (Kang ; Chung ; Eom ; Yeo 2008). Les courbes présentées dans la figure 6.29 montrent que les références indiquent une augmentation du coefficient avec l'augmentation de la teneur en humidité et de la températures à la fois. A 20°C, le coefficient est de 3 ordres de grandeur plus faible que le coefficient de diffusion à 80°C.

Hypothèses de calcul

En général, dans les cas d'emplois usuels, les éléments en bois subissent rarement un gradient de température important. Ce qui nous permet de négliger le deuxième terme de l'équation 6.1 dans la suite.

L'équation 6.1 sera réduite à l'équation 6.2 :

$$\frac{d(MC)}{dt} = -\frac{d}{dx}\left(D_{MC,T}\frac{d(MC)}{dx}\right) \quad (6.2)$$

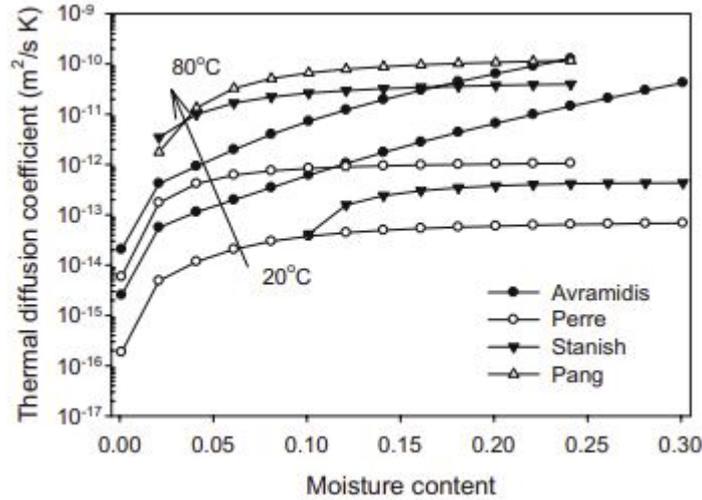


FIGURE 6.29 – Évolution du coefficient D_T en fonction de la teneur d'humidité et de la température d'après Kang ; Chung ; Eom ; Yeo 2008

L'étude bibliographique présentée ci-dessus nous permet d'écrire le coefficient de diffusion sous la forme suivante :

$$D_{MC,T} = D_{MC,20^\circ C} \times e^{C \times (T-20)} \quad (6.3)$$

Où $D_{MC,20^\circ C}$ le coefficient de diffusion identifié à partir des essais de diffusion isothermes (à $20^\circ C$), C est une constante qui exprime la dépendance du coefficient de diffusion à la température et T la température en $^\circ C$. Une bonne correspondance avec les résultats expérimentaux est obtenue à l'aide d'un coefficient C égal à 0,07. Ce même coefficient est considéré dans Florisson ; Vessby ; Ormarsson 2021.

D'autre part, les éléments en milieu externe subissent des cycles répétitifs d'humidification-séchage. La figure 6.11 peut servir comme exemple pour illustrer les variations que ces éléments peuvent subir dans la région parisienne. Comme on a pu voir au cours de la partie II les coefficients de diffusion au cours de l'humidification et du séchage ne sont pas identiques. Dans le dernier cas le coefficient de diffusion ainsi que le coefficient d'échange surfacique sont supérieurs à ceux du premier cas. Nous considérons alors un coefficient de diffusion différent au cours des phases d'adsorption et de désorption dans les simulations numériques.

Les conditions aux limites de type convectif sont prises en compte. Le coefficient d'échange surfacique est supposé constant et indépendant de la température. Par contre, nous considérons des valeurs différentes de S en adsorption et en désorption étant donné que les coefficients d'échanges surfaciques identifiés précédemment dans la partie II sont différents selon le cycle séchage/humidification.

Les simulations du modèle ci-dessus sont réalisées en utilisant Abaqus. La colle est négligée dans le modèle numérique étant donné qu'elle influence faiblement le transfert hydrique de l'échantillon (voir section 6.2.1). Les étapes de calcul consistent à estimer premièrement le champ de température, ensuite nous vérifions l'absence de gradient de température. En effet, un gradient de température fort existe dans les premières heures de conditionnement des échantillons (un écart de 10°C entre la surface et le cœur de la section). Ensuite cet écart diminue et reste inférieur à 3°C . Cet écart est supposé être faible et par la suite la température est supposée homogène sur toute la section de l'échantillon et est égale à la moyenne calculée sur cet échantillon. Cette hypothèse est vérifiée par la suite avec les comparaisons entre les profils simulés et mesurés (voir figure 6.30).

Finalement, le champ de la teneur en humidité est calculé en utilisant le coefficient de diffusion $D_{MC,T}^{adsorption}$ ou $D_{MC,T}^{désorption}$ et le coefficient d'échange surfacique $S^{désorption}$ ou $S^{adsorption}$ selon le cas. Le même coefficient de diffusion transversale est utilisé dans les 4 directions de transfert.

Résultats pour l'échantillon ER1

La comparaison entre les mesures expérimentales de la teneur en humidité moyenne et des profils est présentée dans la figure 6.31. À noter qu'on se limite à la modélisation des transferts hydriques à l'extérieur jusqu'à 150 jours. La figure 6.30 montre la superposition entre les profils simulés et les profils expérimentaux mesurés par IRM de l'échantillon ER1. Nous remarquons tout d'abord un bon accord global entre l'évolution de la teneur en eau moyenne et celle issue de la simulation. Les profils simulés montrent une bonne capacité à reproduire les profils expérimentaux mesurés par IRM malgré un écart visible sur les bords parfois (par exemple les profils de $t = 42$ jours, $t = 78$ jours, $t = 149$ jours). L'effet de bord, discuté dans la section 6.1.3, est probablement à l'origine de cet écart observé couplé à un effet lié au changement de la température de cet échantillon. Cela est justifié par le fait que la teneur d'eau moyenne issue des profils IRM montre aux temps cités un écart non négligeable avec la masse (qui constitue une mesure fiable de la teneur d'eau moyenne). Par contre l'écart relatif entre les teneurs d'eau moyennes issues des simulations et de la pesée reste faible (moins de 5%).

À 2 jours, nous observons une perte de masse de l'échantillon bien que les conditions climatiques (voir figure 6.11) prédisent une adsorption. En comparant le profil IRM avec la teneur d'eau initiale, nous pouvons remarquer une diminution

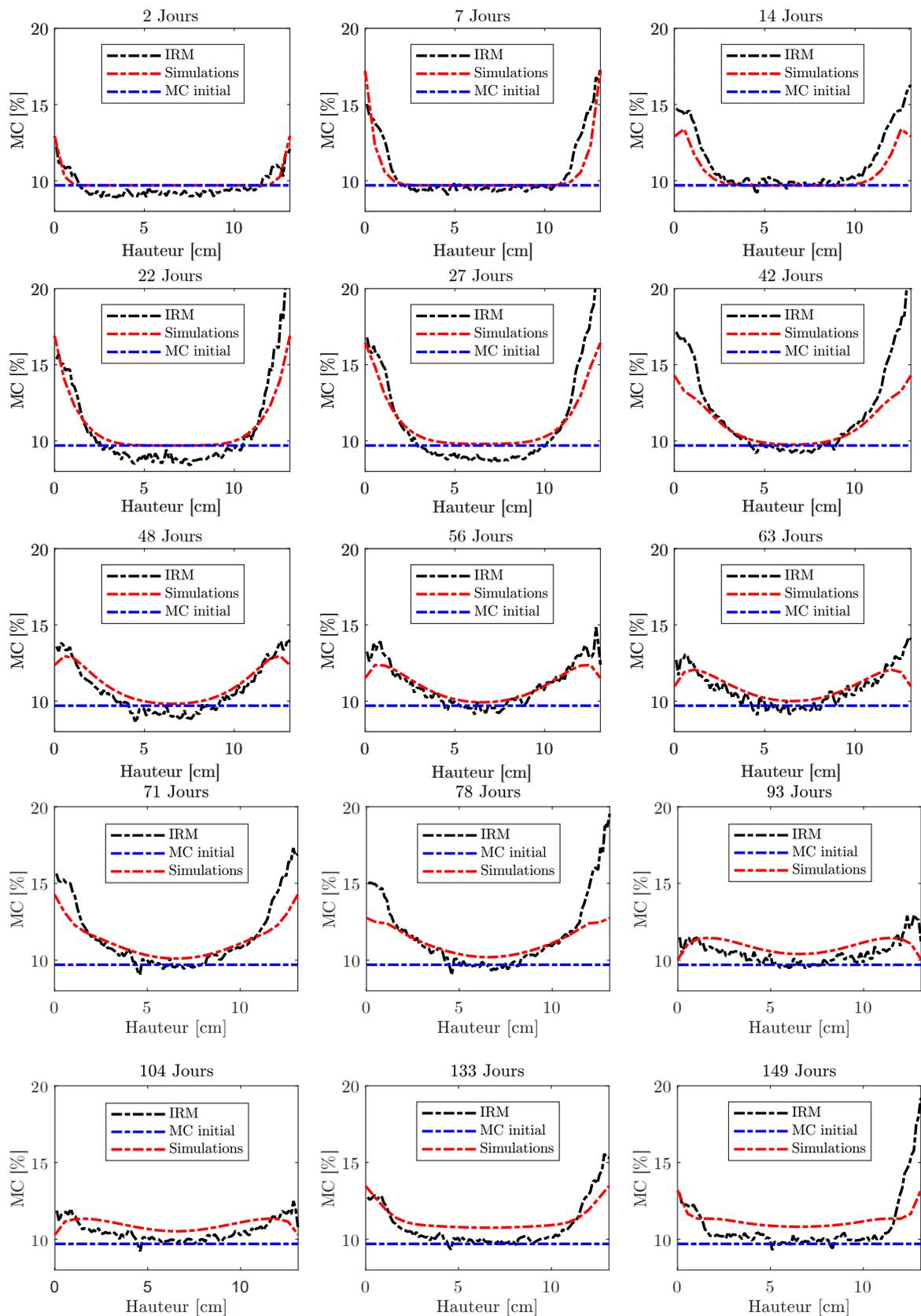


FIGURE 6.30 – Comparaison entre les profils de MC mesurés par IRM (en noir) et profils de MC simulés (en rouge) à différentes échéances (échantillon ER1).

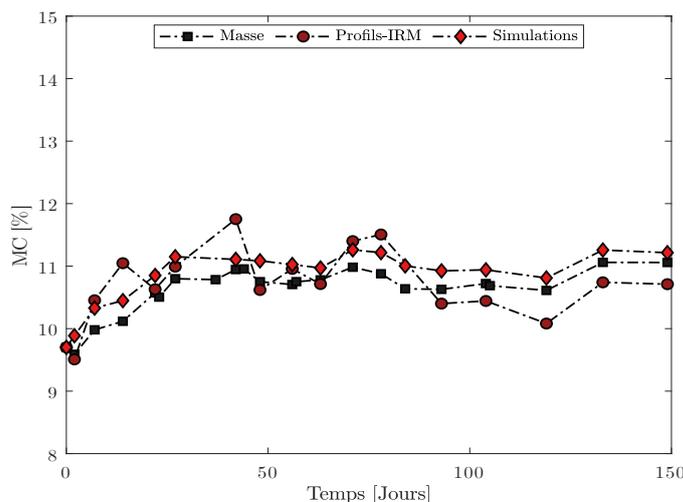


FIGURE 6.31 – Évolution de la teneur en eau moyenne obtenue par les pesées, les profils IRM et les profils simulés. Ces mesures sont effectuées sur l'échantillon ER1.

de la teneur d'eau locale dans l'échantillon (pour $1,5 < \text{Hauteur} < 11,5$) malgré une adsorption de l'humidité aux bords. Cela est dû probablement à l'effet Soret comme discuté précédemment. Même si cet effet n'est pas pris en compte dans le modèle, l'écart entre les valeurs mesurées et simulées reste faible, comme on peut le remarquer sur les courbes.

Résultats pour l'échantillon ER2

La figure 6.35 montre l'évolution de la teneur en humidité moyenne expérimentale issue de la masse et la moyenne issue des profils numériques. Les figures 6.32, 6.33, 6.34 montrent la comparaison entre les profils simulés et les profils expérimentaux mesurés par l'humidimètre à pointe sur l'échantillon ER2.

Nous constatons tout d'abord que le modèle utilisé permet de reproduire les courbes expérimentales dans les cas d'adsorption ainsi qu'en désorption. Nous remarquons une très bonne correspondance entre les profils simulés et expérimentaux pour les 3 directions A, B1 et B2 jusqu'à $t = 42$ jours. Au delà de 42 jours, un écart se manifeste sur les profils. En revanche, l'évolution de la moyenne issue des profils simulés reproduit bien l'évolution de la masse (avec un écart relatif maximal égal à 3%). Nous pouvons alors supposer que l'écart observé sur les profils est probablement dû à la nature intrusive et partiellement destructive de l'humidimètre puisqu'on vient créer des « vides » sur la surface. Ces « vides » peuvent accélérer la désorption du matériau lors des mesures et altèrent ainsi le profil expérimental. Malgré cela, l'accord entre le modèle et les simulations reste très satisfaisant.

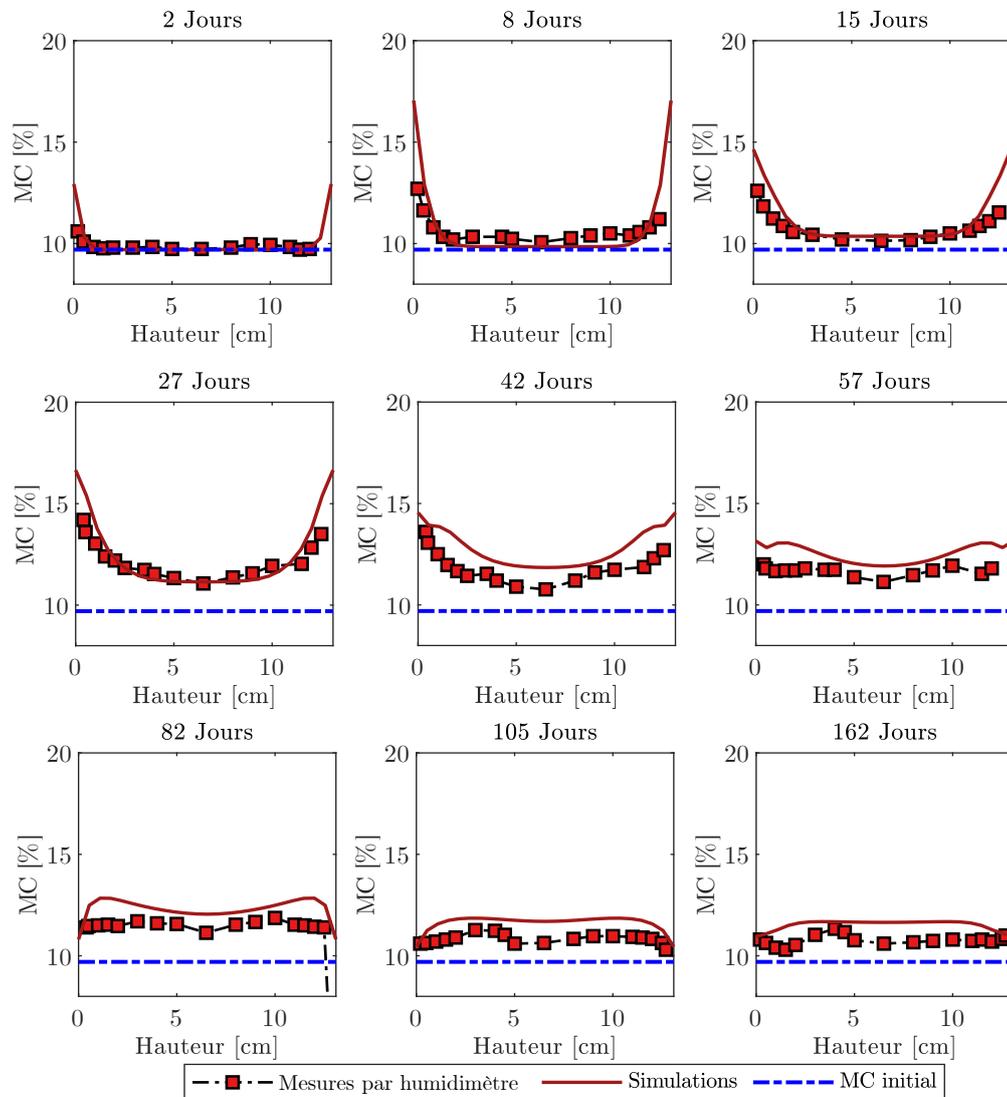


FIGURE 6.32 – Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction A de la figure 5.9 (échantillon ER2).

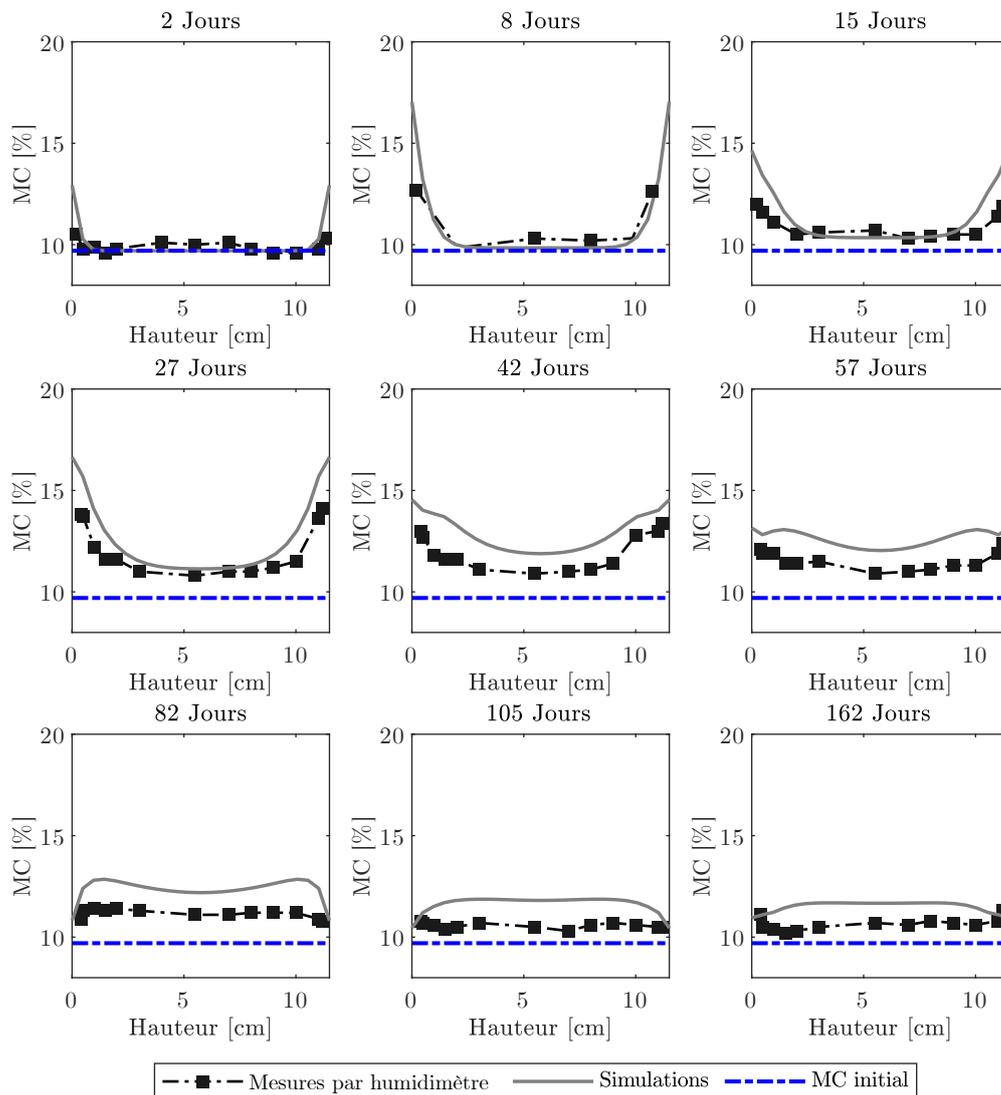


FIGURE 6.33 – Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction B1 de la figure 5.9 (échantillon ER2).

Finalement, nous pouvons conclure qu'un modèle de diffusion utilisant la loi de Fick, la teneur en humidité comme force motrice et tenant compte de la dépendance du coefficient de diffusion à la température et les cycles de sorption/désorption est capable de reproduire l'évolution de la teneur d'humidité locale et moyenne des structures subissant des variations climatiques non isothermes. Ceci est important d'un point de vue ingénierie d'avoir un modèle relativement simple, tenant compte des phénomènes majeures et ayant un accord satisfaisant avec les expériences.

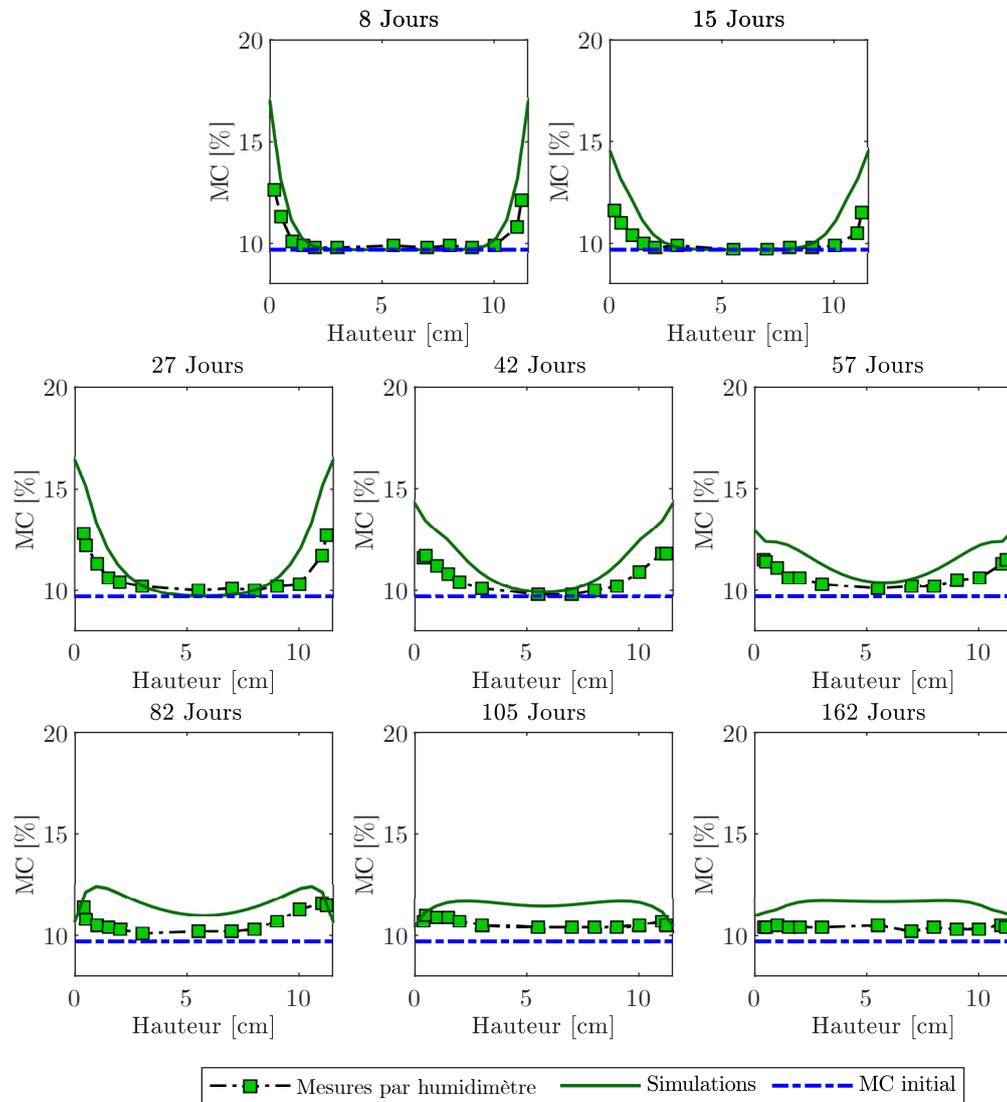


FIGURE 6.34 – Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction B2 de la figure 5.9 (échantillon ER2).

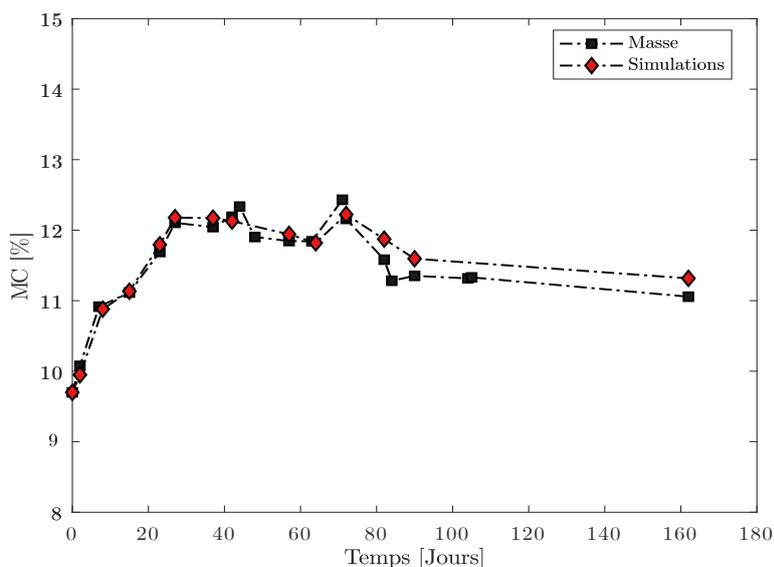


FIGURE 6.35 – Évolution de la teneur en eau moyenne calculée avec la mesure de masse et à partir des profils simulés. Ces mesures sont effectuées sur l'échantillon ER2 (échantillon de référence) dans le cas de diffusion non-isotherme.

6.2.3 État d'humidité des poutres avant les essais mécaniques

Les essais de flexion sont réalisés sur les poutres ayant 6 configurations d'humidité différentes selon le tableau 5.2. Un récapitulatif de l'état d'humidité des poutres (4 configurations parmi les 6 configurations étudiées) juste avant la réalisation des essais mécaniques est présenté ci-dessous.

La figure 6.36 montre l'état des poutres mises dans la caisse pendant 29 et 54 jours respectivement. Dans les deux cas, le cœur de la poutre reste dans la zone de classe de service 1 où l'humidité ne dépasse pas 12% localement. En revanche, la surface extérieure de la poutre dans les deux cas est en classe de service 3. À 29 jours une épaisseur de 5 mm de la poutre est en classe de service 3 tandis qu'à 54 jours une épaisseur de 1 cm est en classe de service 3.

La figure 6.37 montre l'état des poutres soumises aux variations extérieures pendant 28 et 83 jours respectivement. Nous constatons qu'aucune épaisseur en classe de service 3 est détectée dans le cas de diffusion à l'extérieur. À 28 jours, l'état des poutres est similaire à celui des poutres dans la caisse, c'est à dire que la surface est plus humide que le cœur et un gradient existe dans la poutre où la surface est entre 16 et 17% de MC et le cœur est quasiment à l'humidité initiale (MC = 9.7%). L'état d'humidité à 83 jours est différent des 3 précédents. Un gradient « faible » existe dans la poutre (l'humidité locale de l'échantillon varie

entre 9 et 13%) et un front de séchage existe à la surface.

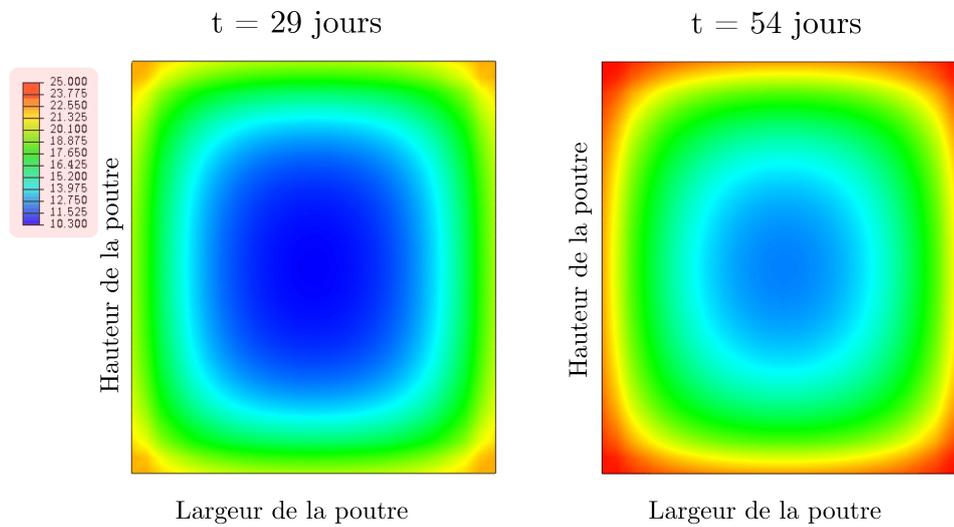


FIGURE 6.36 – État d'humidité dans les sections des poutres subissant les transferts d'humidité contrôlés dans la caisse juste avant la réalisation des essais mécaniques

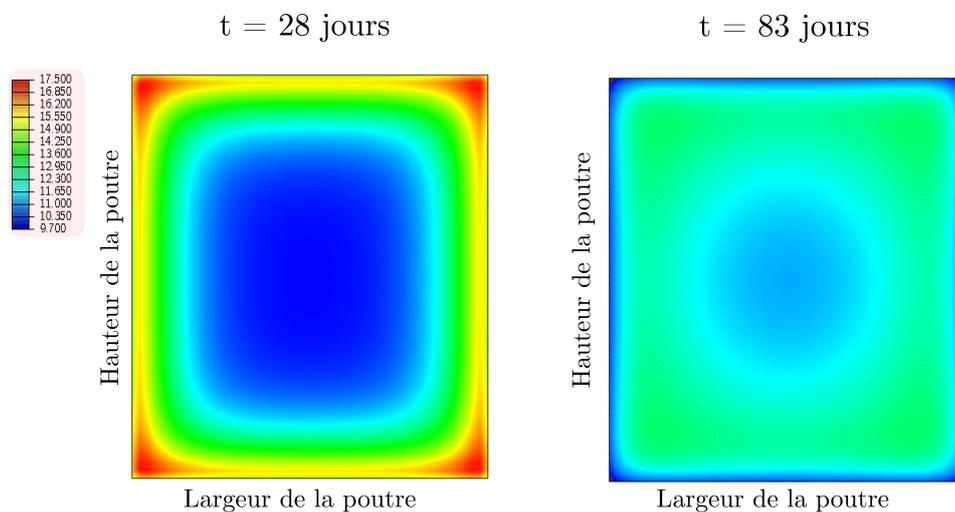


FIGURE 6.37 – État d'humidité dans les sections des poutres subissant les transferts d'humidités non-contrôlés à l'extérieur juste avant la réalisation des essais mécaniques

6.3 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux des profils d'humidité mesurés dans une ambiance humide et contrôlée et dans une ambiance non contrôlée sur des échantillons représentatifs des poutres étudiées. Ainsi nous avons pu montrer que l'humidimètre à pointe (méthode de mesure sur chantier) permet de mesurer d'une manière efficace les profils de teneur en humidité dans le bois. En outre, les mesures effectuées par IRM et avec l'humidimètre à pointe ont permis de suivre la diffusion hydrique dans les 4 directions de la section des échantillons de référence. Les résultats présentés ci-dessus montrent qu'en ambiance non contrôlée la pénétration d'humidité est partielle (même après quelques semaines d'exposition aux conditions climatiques ambiantes) du fait des cycles thermo-hydriques.

Par ailleurs, nous avons pu démontrer que l'emploi d'un modèle de diffusion général qui prend en compte l'effet de la température sur le coefficient de diffusion permet de simuler l'état hydrique en conditions climatiques réels afin d'obtenir l'état hydrique des poutres juste avant les essais mécaniques. Nous verrons par la suite l'effet de la présence de ce gradient sur la charge à la rupture et le comportement mécanique des poutres en bois lamellé collé.

7

ESSAIS DE FLEXION SUR POUTRES EN PRÉSENCE DE GRADIENT D'HUMIDITÉ

Dans ce chapitre, nous étudions l'effet de la présence d'un gradient hydrique sur le comportement mécanique des poutres par une approche expérimentale. Dans cette optique, nous réalisons des essais de flexion 4 points sur des poutres à différents états hydriques (poutres dans une ambiance contrôlée dans la caisse et en ambiance non contrôlée à l'extérieur). Les courbes force-flèche sont présentés dans un premier temps, puis la flèche et la charge à la rupture sont discutées en fonction de l'état hydrique. Enfin, le comportement non-linéaire observé est analysé.

Sommaire

7.1	Introduction	183
7.2	Résultats des essais de flexion	184
7.2.1	Courbes force-flèche	184
7.2.2	Évolution du module de Young en fonction de l'humidité	187
7.2.3	Évolution de la flèche à la rupture en fonction de l'humidité	189
7.2.4	Évolution de la charge à la rupture en fonction de l'état hydrique	190
7.3	Effet de l'humidité sur le comportement non-linéaire en flexion	192
7.3.1	Observations à partir des courbes force-flèche et des jauges de déformations	192
7.3.2	Origine du comportement non linéaire	194
7.3.3	Observations à partir des mesures DIC	195
7.4	Conclusions	201

7.1 Introduction

L'état d'humidité influence le comportement mécanique des éléments en bois. L'effet de la présence d'une humidité homogène dans la section a été largement étudié dans la littérature. La synthèse bibliographique effectuée par (Gerhards 1982) montre que le passage de 12% à 20% de teneur en humidité du bois provoque une décroissance de la charge à la rupture en flexion ainsi que du module de Young parallèle au sens des fibres de 25 et 13% respectivement. Ces observations sont basées sur des essais réalisés sur des échantillons de bois sans défaut, ayant une distribution hydrique homogène ainsi qu'une section ne dépassant pas $2 \times 2 \text{ cm}^2$ dans la majorité des études. Cependant, l'influence de gradient d'humidité est très peu étudiée, comme explicité dans le chapitre 1.

Nous avons vu précédemment que la cinétique de transfert de l'humidité dans le bois est lente et que par conséquent un gradient hydrique est présent en quasi-permanence. Dans ce chapitre, nous étudions l'effet de ce gradient hydrique sur le comportement mécanique des poutres en flexion. Dans cette optique, nous réalisons des essais de flexion sur des poutres ayant un champ hydrique homogène et égale à 9,7 % (que l'on nomme « état initial » dans la suite) et sur des poutres ayant les gradients d'humidité présentés dans les figures 6.36 et 6.37. Les essais de flexion sont réalisés selon les méthodes décrites dans la section 5.4. La figure 7.1 montre les cycles de chargement mécanique imposé à chaque poutre. Les montées et descentes de charge sont réalisées à la même vitesse. Le premier cycle consiste à un chargement monotone jusqu'à 43 kN et le second cycle jusqu'à 72 kN. Ces valeurs correspondent à 53 % et 90% de la charge à la rupture théorique calculée. La rampe de charge du dernier cycle est maintenue jusqu'à la rupture de la poutre. Le mode de rupture est identifié au cours de chaque essai. On s'intéresse en particulier à l'évolution de la charge à la rupture, au module élastique ainsi qu'au changement de comportement mécanique en fonction du gradient hydrique.

L'essai de flexion est réalisé environ 30 minutes après la sortie de la poutre de son environnement climatique. Au cours de ce temps, nous supposons que le champ hydrique reste le même. Nous supposons également qu'au cours de l'essai de flexion (d'une durée totale entre 30 et 50 minutes) le champ hydrique n'est pas modifié¹. Le tableau 7.1 récapitule les conditions hydriques ainsi que la nomenclature employée pour les poutres testées dans les différents cas. Il est à noter que nous étudions uniquement la charge à la rupture des poutres testées après 258 jours de conditionnement à l'extérieur. Cet état n'est pas présenté dans le tableau 7.1.

1. Une simulation de diffusion sur 1 heure et demi a été réalisée pour vérifier cette hypothèse.

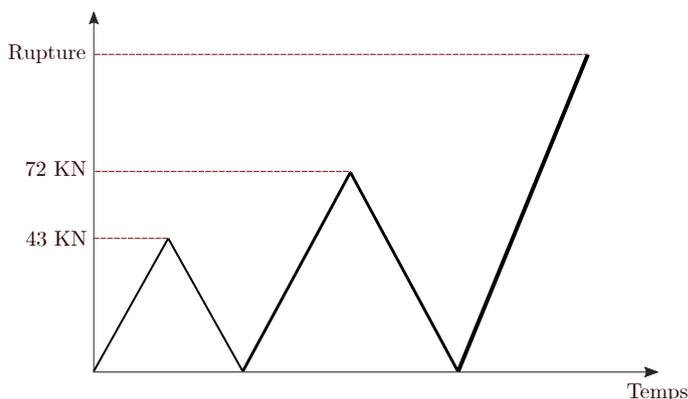


FIGURE 7.1 – Cycles de chargement pendant les essais de flexion.

État des poutres	Nomenclature	MC moyen [%]
État initial	P.I.x	9,7
29 jours à 97% d'HR	P.C.1.x	14
54 jours à 97% d'HR	P.C.2.x	16
28 jours à l'extérieur	P.E.1.x	12
83 jours à l'extérieur	P.E.2.x	11,6

TABLE 7.1 – Conditions hydriques des poutres testées et nomenclature associée à chaque état hydrique. x (= 1, 2 ou 3) désigne le numéro de la poutre dans chaque cas.

7.2 Résultats des essais de flexion

7.2.1 Courbes force-flèche

Courbes force-flèche

La figure 7.2 montre l'évolution des courbes force-flèche pour les 5 états hydriques testés (la mesure de la flèche est corrigée en tenant compte des enfoncements aux appuis (voir ci-dessous)). Pour plus de clarté, on représente l'évolution force-flèche pour une seule poutre dans chaque état hydrique. Les autres courbes pour chaque état se trouvent dans l'annexe B. .

Les courbes présentées dans la figure 7.2 mettent en évidence l'effet de l'humidité sur le comportement mécanique des poutres en flexion. L'état sec (représenté par la poutre P.I.2) montre un comportement linéaire avec une rupture fragile.

Les cycles charge/décharge ne produisent aucune flèche résiduelle. En revanche, en présence de gradient d'humidité, des flèches résiduelles apparaissent au fur et à mesure des cycles, ce qui indique la présence potentielle de déformations plastiques. Par ailleurs, en présence de l'humidité, le comportement linéaire est suivi d'une phase de non linéarité. Cette phase de non-linéarité est d'autant plus importante que le bois est humide. La rupture fragile à l'état initial est donc remplacée par une rupture ductile en présence de l'humidité avec un allongement à la rupture plus important que celui à l'état initial. Ces différents aspects seront détaillés dans les paragraphes suivants.

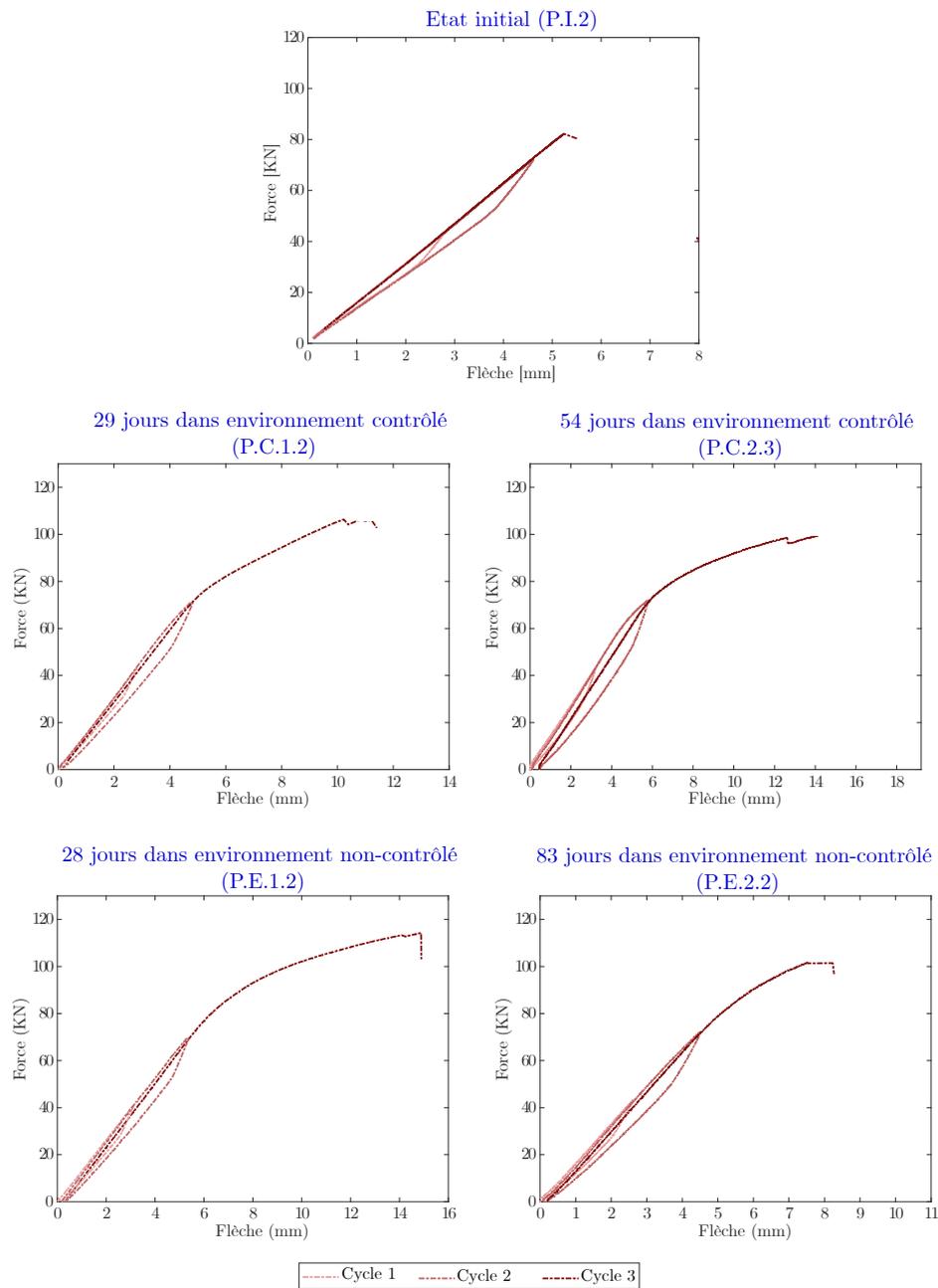


FIGURE 7.2 – Évolution des courbes force-flèche au cours des essais de flexion pour les différents états hydriques testés. Chaque état hydrique est représenté par les courbes provenant d'une poutre. La nomenclature en parenthèse représente les poutres auxquelles les courbes appartiennent.

Enfoncement aux appuis

La mesure de l'enfoncement aux appuis (dû à la compression au niveau de ceux-ci) est effectuée à l'aide de deux capteurs LVDT. La figure 7.3 montre l'évolution de l'enfoncement mesuré à 43 kN et à 72 kN pour tous les états hydriques testés. Nous remarquons que l'enfoncement est d'autant plus prononcé que le bois est humide. Ceci met en évidence la diminution du module d'Young transversal en fonction de l'humidité.

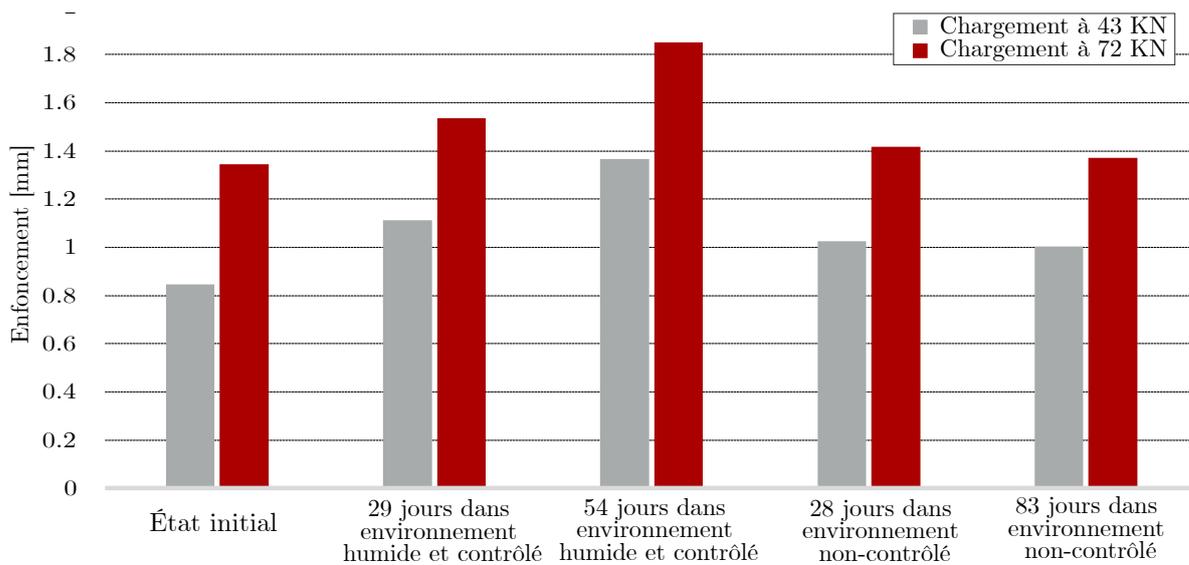


FIGURE 7.3 – Enfoncement aux appuis mesuré à partir des capteurs LVDT pour les différents états hydriques pour deux valeurs de chargement. Chaque enfoncement représente la moyenne effectuée sur tous les poutres testés.

7.2.2 Évolution du module de Young en fonction de l'humidité

L'élançement des poutres testées au cours de ce travail est inférieur à 10. Cela implique que l'effort tranchant aura un effet non négligeable sur la flèche mesurée pendant l'essai de flexion. Cet effet est pris en compte lors de l'identification du module de Young. L'Eurocode 5 propose la formule 7.1 pour déterminer le module d'Young global d'élasticité en prenant en compte l'effet de cisaillement :

$$E_{0,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{24I \left(2 \frac{\Delta w}{\Delta F} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (7.1)$$

avec a la distance entre le point de chargement et l'appui le plus proche, L la portée de la poutre, I son inertie de flexion, b la largeur et h la hauteur de la poutre.

Δw et ΔF représentent l'accroissement de la flèche et de la force respectivement. Cet accroissement doit être choisi dans la plage linéaire de la courbe force-flèche et couvrant au moins la zone entre $0,2 \times F_{max}$ et $0,3 \times F_{max}$. Enfin, G représente le module de cisaillement.

Nous calculons le module d'Young à partir de la mesure de la flèche. Cette mesure est effectuée à l'aide des trois capteurs LVDT. Les propriétés mécaniques des poutres testées sont fournies par la norme NF EN 14081 pour une humidité égale à 12%. Ces propriétés sont présentées dans le tableau 5.1 où le module de cisaillement est égale à 780 MPa. La synthèse bibliographique présentée par (Gerhards 1982) montre que l'humidité affecte le module de cisaillement de la même manière que le module élastique dans le sens transversal. (Guitard 1987) propose une formule de correction des modules de cisaillement longitudinaux et transversaux en fonction de l'humidité pour du bois clair (équation 1.6). Ces corrections sont applicables dans la plage de MC entre 6 et 20%.

L'identification du module d'Young est menée en considérant un module de cisaillement constant². Le tableau 7.2 montre la variation du module d'Young calculé à partir de la formule 7.1 en fonction de l'état hydrique des poutres. L'état hydrique est donné dans le tableau par la teneur en humidité moyenne.

Les résultats présentés dans le tableau 7.2 confirment la dépendance du module d'Young à l'état d'humidité. Nous observons ainsi une diminution du module d'Young en fonction de la teneur en humidité.

TABLE 7.2 – Module de Young des poutres en fonction de l'état hydrique. Ce module de Young est identifié à partir des mesures LVDT et est calculé selon l'équation 7.1. Nous rappelons qu'à l'état initial, la teneur en eau est homogène dans le volume de la poutre.

État des poutres	MC _{moyen}	Module d'Young global	Écart type
Unité	[%]	[GPa]	[GPa]
État initial	9,7	14,2	1,8
29 jours à 97% d'HR	14	11,9	0,5
54 jours à 97% d'HR	16	12	2,7
28 jours à l'extérieur	12	12,3	1,9
83 jours à l'extérieur	11,6	13,9	0,2

2. Un calcul a permis de vérifier que la diminution attendue du module de cisaillement a un influence faible (inférieur à 5%) sur le calcul du module de Young ce qui a permis de valider l'utilisation d'un module de cisaillement unique pour tous les états hydriques mesurés.

L'écart type calculé pour chaque cas est probablement dû à la variabilité du bois (densité, présence des nœuds ...).

7.2.3 Évolution de la flèche à la rupture en fonction de l'humidité

Le tableau 7.3 montre l'évolution de la flèche à la rupture en fonction de l'état hydrique moyen des poutres. La figure 7.4 montre l'évolution de la flèche mesurée expérimentalement en fonction de la teneur en humidité ainsi que le gradient hydrique estimé au cours de chaque état. Nous remarquons que l'augmentation de l'humidité accroît fortement la ductilité des poutres où l'allongement à la rupture peut atteindre 2,25 fois celui de l'état initial.

TABLE 7.3 – Évolution de la flèche ultime mesurés sur les poutres en fonction de leurs états hydriques. Les valeurs des flèches représentent la moyenne sur les 3 poutres testées pour chaque état hydrique. * L'écart type important est dû à la présence d'une poutre qui a donné un résultat aberrant.

État des poutres	MC moyen	Gradient MC	Flèche	Écart type
Unité	[%]	[%]	[mm]	[mm]
Initial	9,7	0	5,4	0,16
29 jours à 97% d'HR	14	9,75	12,2	1,8
54 jours à 97% d'HR	16	10,14	11,8	6,3*
28 jours à l'extérieur	12	5,46	11,2	2,6
83 jours à l'extérieur	11,6	-0,25	7,8	1,8

Nous remarquons que la ductilité des poutres est d'autant plus élevée que le gradient d'humidité dans les sections est fort. Ceci est visible sur les poutres à l'extérieur à 28 et 83 jours. La teneur en humidité moyenne dans les deux cas est proche avec un écart relatif de 3% entre les deux teneurs en humidité moyenne. Par contre, l'écart entre les deux flèches respectives est de 30%. En effet, même si les deux teneurs en humidité moyenne sont proches, le gradient hydrique des deux cas est différent : à 28 jours à l'extérieur l'humidité à la surface est de 15% et le cœur est à 9,7%. En revanche, à 83 jours à l'extérieur l'humidité est plus homogène dans la section de la poutre. Ceci nous amène à relier cette différence de flèche à la rupture à la présence du gradient hydrique important à 28 jours à l'extérieur et de son absence à 83 jours à l'extérieur. Cette conclusion est plus difficile à étendre

pour le cas de diffusion à humidité contrôlé compte tenu de l'écart type important sur la flèche à la rupture à 54 jours.

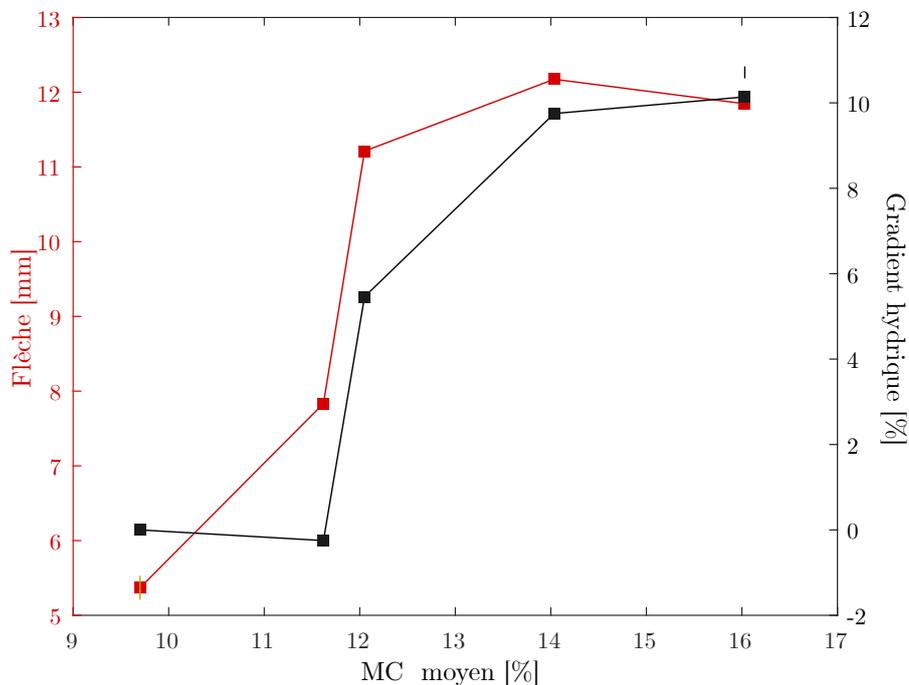


FIGURE 7.4 – Évolution de la flèche ultime mesurée en fonction de la teneur en humidité moyenne. Les valeurs représentent la moyenne effectuée sur les poutres testées à chaque état hydrique. Le gradient hydrique présenté sur la figure représente la différence entre la teneur en humidité au centre de la poutre et celle à la surface.

7.2.4 Évolution de la charge à la rupture en fonction de l'état hydrique

La résistance à la rupture en flexion est une propriété mécanique critique pour caractériser la tenue mécanique d'une structure en bois. Au cours de ce travail, nous considérons la force à la rupture comme étant la force à partir de laquelle la poutre manifeste un événement de rupture macroscopique, telle que l'apparition de la première fissure. Ceci se traduit par une chute de l'effort dans la courbe force-déplacement du vérin.

Le tableau 7.4 ainsi que la figure 7.5 montrent l'évolution de la charge à la rupture moyenne pour chaque état hydrique. Nous observons que la charge à la rupture à l'état sec est inférieure aux charges à la rupture des poutres contenant

un gradient hydrique. En présence d'un gradient hydrique développé après 28 jours dans un environnement non contrôlé et 29 jours dans un environnement contrôlé, la charge de rupture est 21,2% supérieure à celle de l'état sec. Après 54 jours à 97% d'HR, la charge à la rupture reste supérieure à celle à l'état sec de 9,5%. Ces résultats expérimentaux montrent que la présence d'un gradient d'humidité, provenant d'une absorption d'humidité, aboutit à une augmentation de la charge à la rupture par rapport à celle de l'état initial.

TABLE 7.4 – Évolution de la force à la rupture moyenne en fonction de l'état hydrique des poutres. La force à la rupture présentée dans le tableau pour chaque cas de sollicitation hydrique représente la moyenne sur les 3 poutres testées.

État des poutres	MC _{moyen}	Force à la rupture	Écart type
Unité	[%]	[kN]	[kN]
État initial	9,7	92,2	8,7
29 jours à 97% d'HR	14	111,7	10
54 jours à 97% d'HR	16	100,9	12,5
28 jours à l'extérieur	12	111,3	16
83 jours à l'extérieur	11,6	107,3	19,3
258 jours à l'extérieur	13,2	113,7	9,9

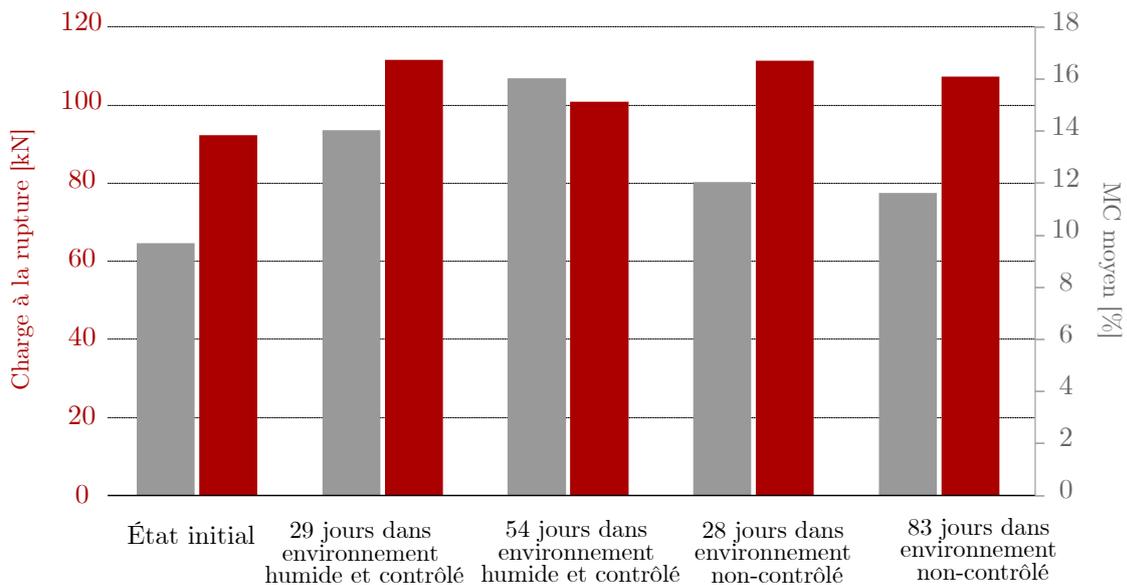


FIGURE 7.5 – Évolution des charges à la rupture moyennes des poutres ainsi que la teneur en humidité moyenne aux différents états de sollicitations hydriques.

7.3 Effet de l'humidité sur le comportement non-linéaire en flexion

7.3.1 Observations à partir des courbes force-flèche et des jauges de déformations

D'après les courbes force-flèche mesurées sur les poutres à l'état initial, nous remarquons que les trois poutres montrent un comportement élastique-linéaire suivi d'une faible perte de linéarité avant la rupture. Le tableau 7.5 montre l'évolution de la limite élastique³ moyenne sur les trois poutres étudiées à chaque échéance de mesure ainsi que l'écart type de cette mesure. La figure 7.6 montre l'évolution du rapport entre la limite élastique et la charge à la rupture en fonction de la teneur d'humidité moyenne. Nous remarquons ainsi que ce rapport est égal à 0,9 à l'état sec ce qui signifie que la rupture aura lieu peu après la perte de linéarité. Par ailleurs, les cycles de charge-décharge pour ces 3 poutres ne montrent aucun déplacement résiduel en fin de décharge. Tout ce qui précède permet d'affirmer que le comportement mécanique des poutres à l'état initial s'apparente à un comportement élastique-linéaire suivi d'une rupture fragile.

3. La limite élastique est définie comme étant la force à partir de laquelle une non-linéarité sur la courbe force-flèche apparaît.

État hydrique	Limite élastique	Écart type
Unité	[kN]	[kN]
Initial	83,8	10,2
29 jours à 97% d'HR	44,3	4
54 jours à 97% d'HR	39	1,7
28 jours à l'extérieur	63,3	8,7
83 jours à l'extérieur	68,7	21,2

TABLE 7.5 – Évolution de la limite élastique moyenne en fonction de l'état hydrique des poutres.

En revanche, nous constatons l'apparition d'une zone non linéaire sur une partie non négligeable de l'ensemble des courbes force-flèche mesurées sur les poutres dans les autres états hydriques. La figure 7.6 montre la diminution du rapport entre la limite élastique et la charge à la rupture en fonction de la teneur en humidité où il passe de 0,9 à l'état initial à 0,35 à l'état hydrique généré au cours des 54 jours dans la caisse. Sur l'ensemble des courbes force-flèche, nous remarquons que le comportement non linéaire est d'autant plus important que le bois est humide. Cette non linéarité est plus forte dans le cas des poutres soumises à un environnement humide contrôlé que celles à l'extérieur. De plus, nous remarquons que le comportement non linéaire est plus faible pour les poutres ayant l'état hydrique généré après 83 jours à l'extérieur que celles à 28 jours. En effet, à 83 jours, les poutres soumises à l'environnement extérieur ont subi un séchage suite au changement des conditions climatiques et par conséquent un changement de répartition de l'humidité a eu lieu dans la section des poutres. Ceci est donné par la figure 6.37 où on voit que la teneur en humidité locale est presque homogène dans la section à 83 jours. Par contre, à 28 jours, le profil hydrique présente un gradient (la surface est presque à 15% de MC et le cœur est à l'état initial (9,7%)). Ce changement dans le gradient hydrique (même si la moyenne est similaire) provoque un changement de comportement où la présence de l'humidité plus élevée en surface favorise le comportement non linéaire des poutres tout en augmentant leur ductilité.

Les jauges de déformation mises sur les faces en compression et en traction fournissent une mesure locale de déformation du matériau. la figure 7.7 montre l'évolution des déformations mesurées par les jauges en face de compression et traction pour les 5 états hydriques (chaque poutre correspond à un état hydrique). Les déformations mesurées par les jauges montrent qu'à l'état initial aucune déformation résiduelle est détectée à la fin de la décharge. En présence de l'humidité à 29 jours et 54 jours dans l'environnement humide contrôlé, nous détectons des

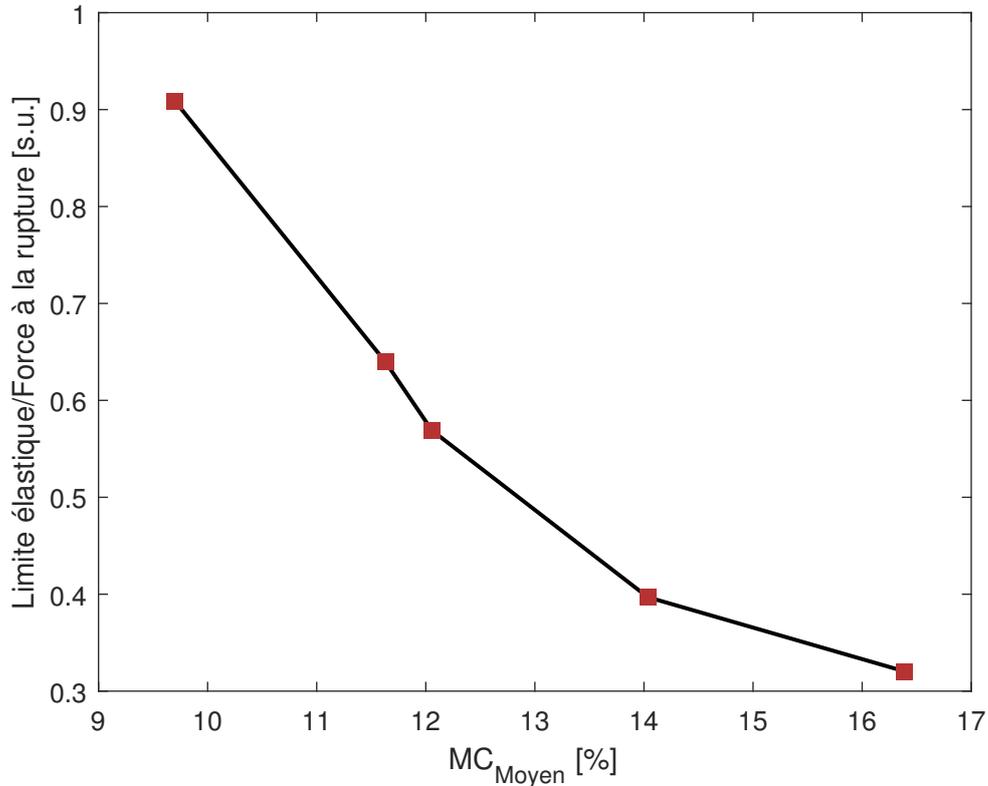


FIGURE 7.6 – Évolution du rapport entre la limite d'élasticité et la charge à la rupture en fonction de la teneur d'humidité moyenne pour les 5 états hydriques.

déformations résiduelles sur au moins une des jauges (et parfois sur les deux). Cela n'est pas observé sur les poutres laissées à l'extérieur. De plus, les courbes force-flèche indiquent la présence d'un déplacement résiduel qui est plus prononcé en cas de présence d'humidité. Ceci met en évidence que le comportement est non linéaire et non élastique (i.e. non réversible).

7.3.2 Origine du comportement non linéaire

Les courbes de force-flèche de toutes les poutres présentent une pente presque constante au début des montées de chargement (ceci est directement lié au module de Young de la poutre). Le fait d'avoir la même pente indique que le comportement non linéaire ne provient pas d'un endommagement du matériau mais d'une plasticité qui a lieu en présence d'humidité.

7.3.3 Observations à partir des mesures DIC

Des mesures de champs sont effectuées sur toutes les poutres (excepté celles à l'état initial et après 256 jours à l'extérieur). Le but de cette mesure est d'identifier les éventuels effets dus à la présence de l'humidité et de l'hétérogénéité du bois (présence de nœuds). Les mesures de champs sont effectuées à l'aide d'une caméra GX3300 et le calcul du champs de déformation est réalisé à l'aide du logiciel GOM 2020. Nous présentons pour chaque cas une poutre représentative du comportement.

Les figures 7.8 - 7.11 montrent l'évolution du champ des déformations (dans la direction longitudinale à la poutre) en même temps que la courbe de force-flèche pour chaque état hydrique. L'axe neutre (qui est par définition l'axe de déformation nulle) est représenté sur les figures par une ligne rouge.

Les figures 7.8, 7.9 et 7.10 montrent que dans la zone non linéaire, l'axe neutre se déplace vers le bas. Ce changement de position d'axe neutre est représentatif d'une plastification en compression du matériau au dessus de l'axe neutre. En revanche, les résultats de la corrélation d'images sur les poutres à 83 jours de transfert à l'extérieur (voir figure 7.11) montrent que la rupture a lieu sans provoquer de plastification « visible » en compression. Ceci met en évidence l'effet de l'humidité sur le comportement mécanique en particulier sur le comportement en compression.

Par ailleurs, nous remarquons que la présence d'humidité aboutit à une augmentation des déformations mesurées. Nous remarquons aussi à partir des résultats de corrélation d'images que les nœuds constituent une zone de concentration de déformations. Cette concentration est d'autant plus importante que le nœud est proche du bord (face supérieure en compression ou en traction).

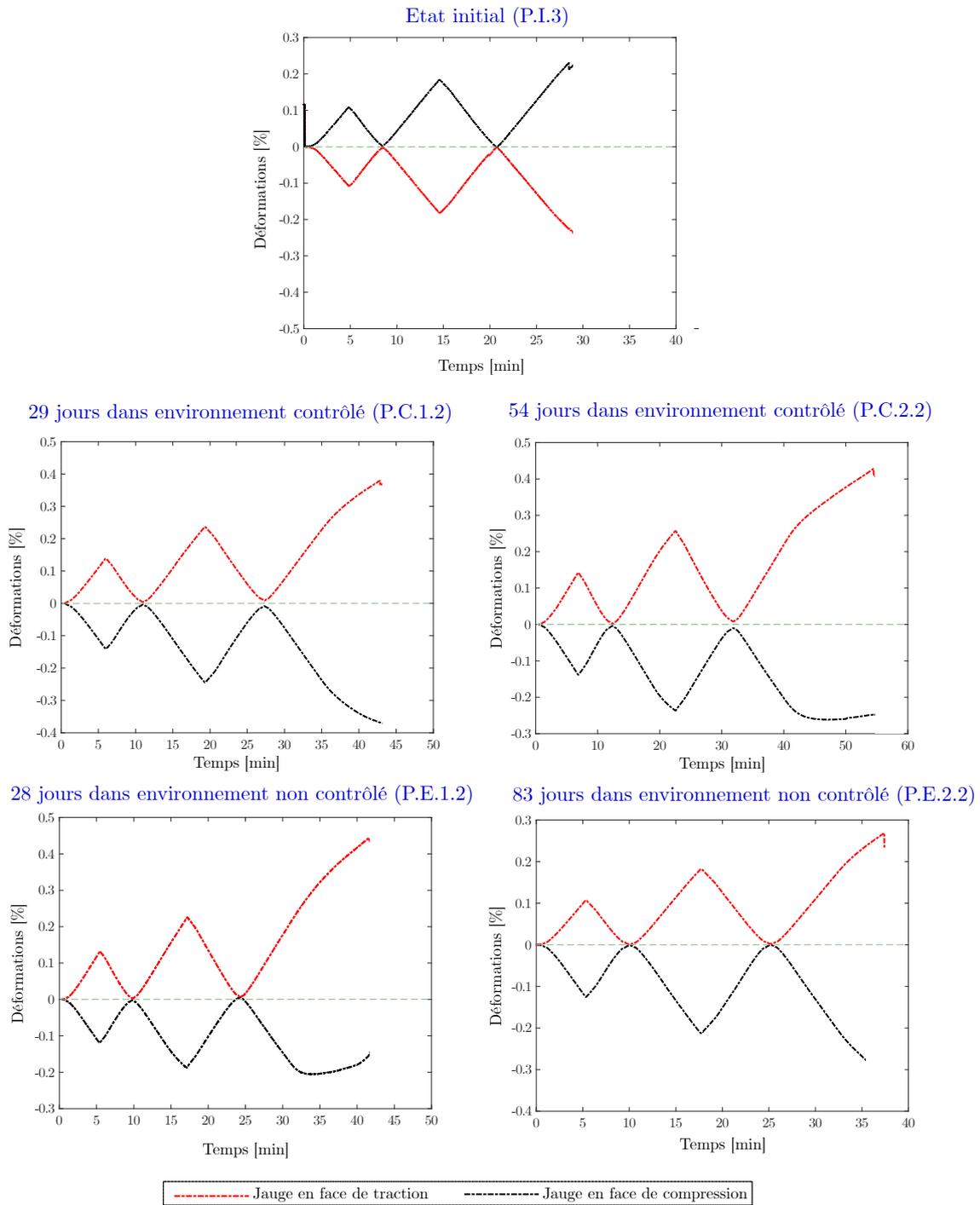


FIGURE 7.7 – Évolution des déformations mesurées par les jauges en face de compression et traction.

P.C.1.3

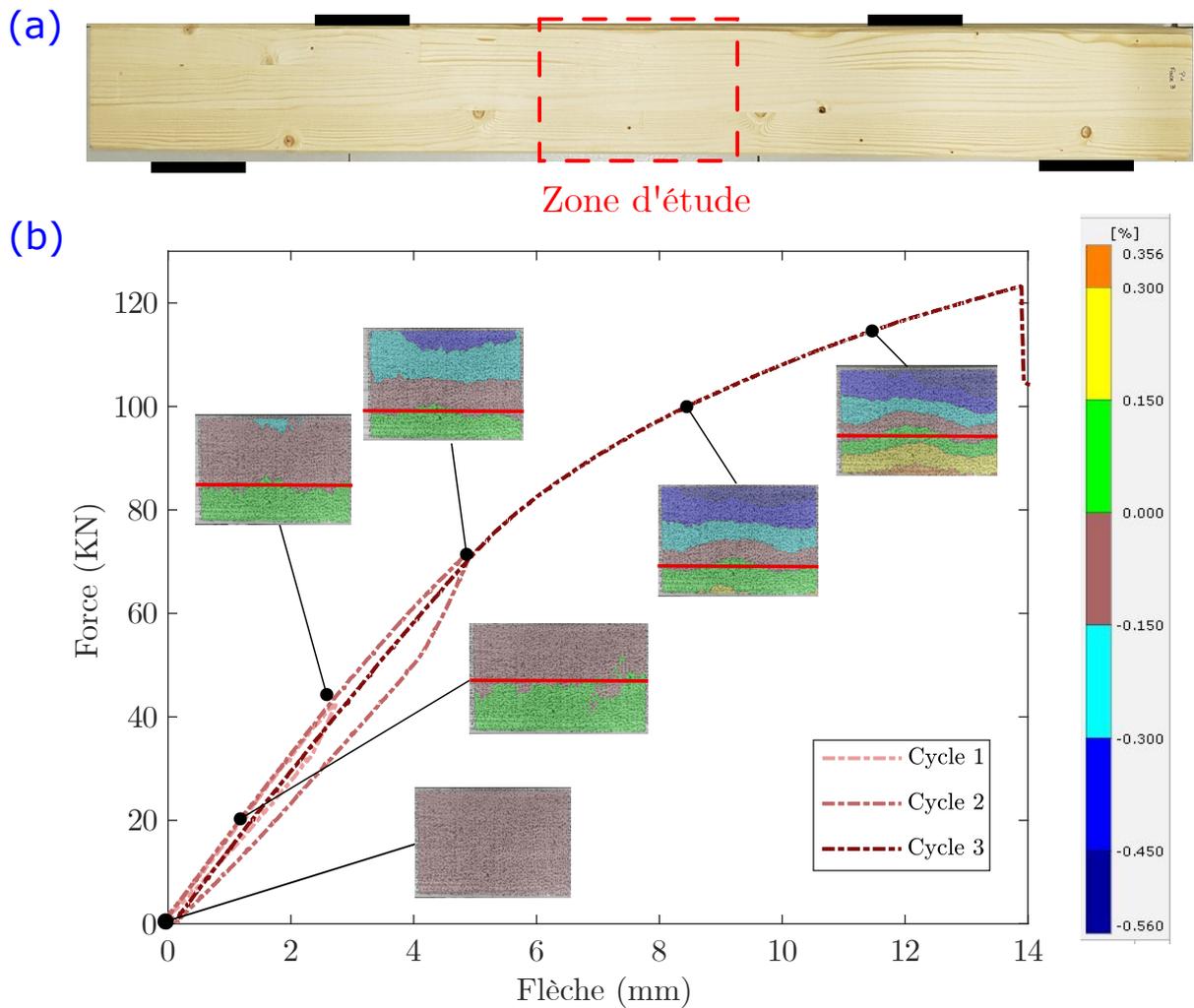


FIGURE 7.8 – (a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.C.1.3) après conditionnement pour 29 jours dans un environnement humide et contrôlé. La limite élastique est égale à 44,3 kN.

P.C.2.3

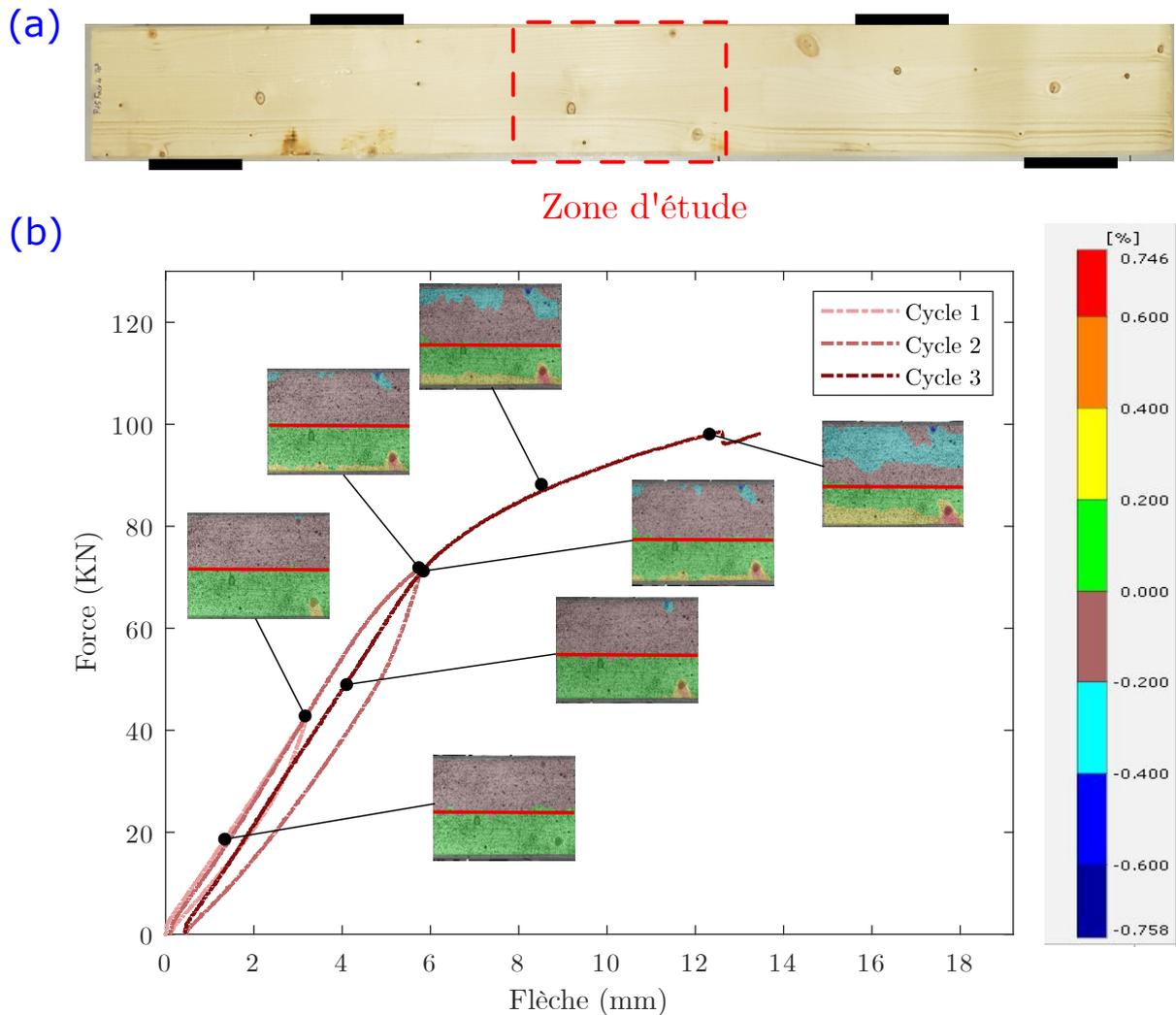


FIGURE 7.9 – (a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.C.2.3) après conditionnement pour 54 jours dans un environnement humide et contrôlé. La limite élastique est égale à 39 kN.

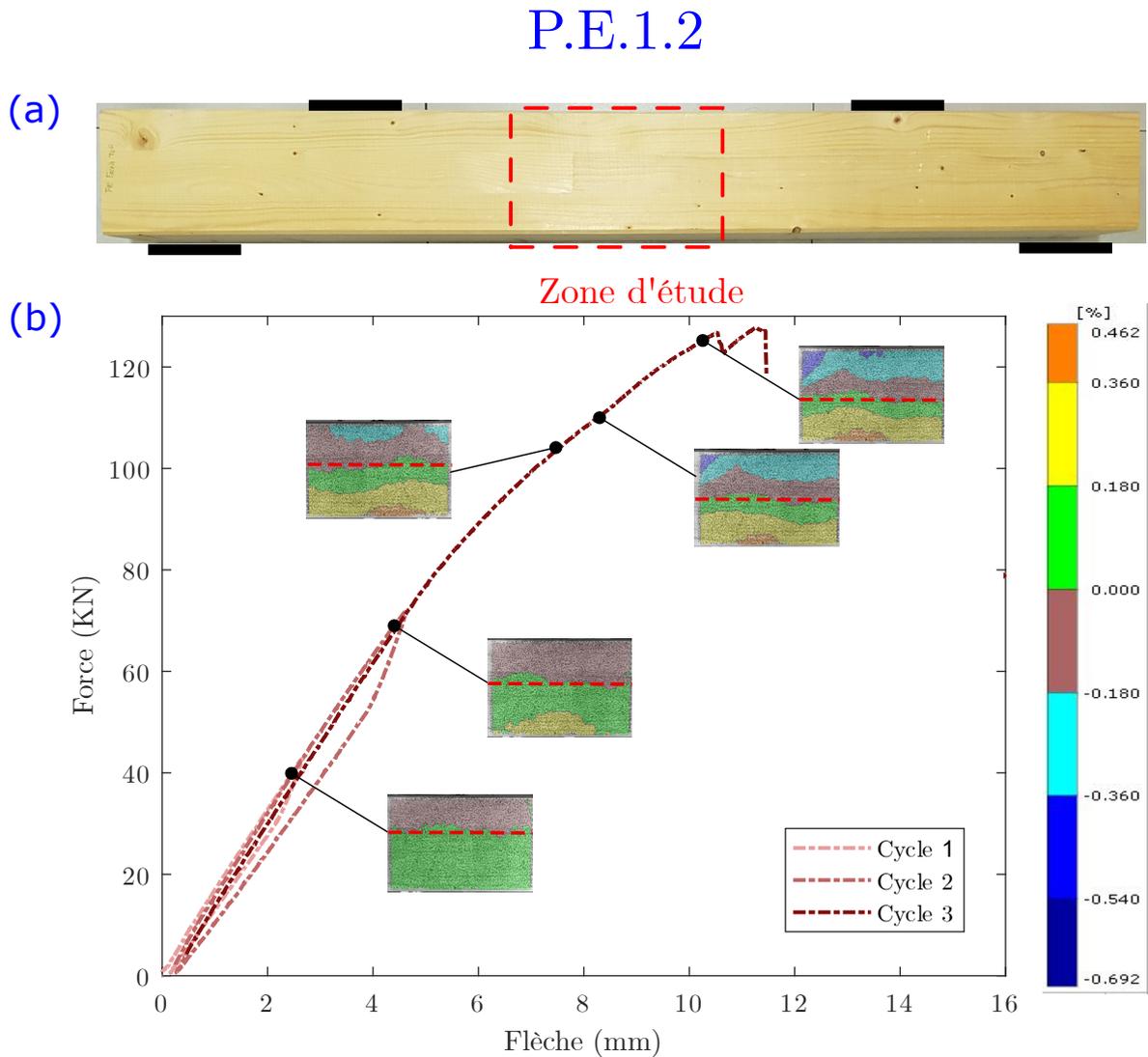


FIGURE 7.10 – (a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.E.1.2) après conditionnement pour 28 jours dans un environnement non contrôlé. La limite élastique est égale à 63,3 kN.

P.E.2.2

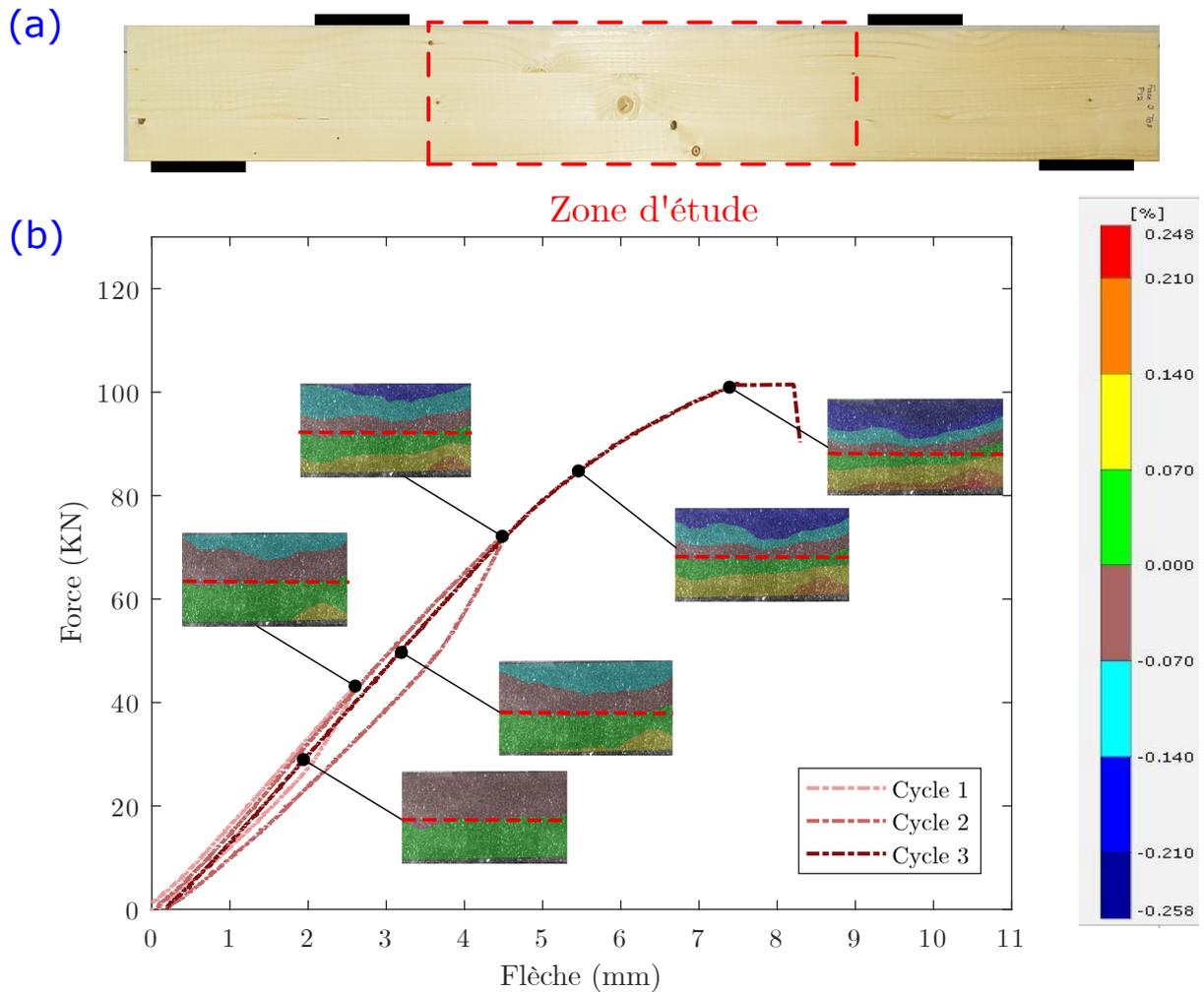


FIGURE 7.11 – (a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.E.2.2) après conditionnement pour 83 jours dans un environnement non contrôlé. La limite élastique est égale à 68,7 kN.

7.4 Conclusions

Nous avons présenté les résultats des essais de flexion réalisés sur des poutres dans plusieurs états hydriques. Nous avons pu voir que la présence de gradients d'humidité issus d'une humidification aboutit à une augmentation de la charge à la rupture. Cette augmentation peut atteindre 21,4% selon les conditions des essais. En outre, les résultats présentés ci-dessus montrent que la présence de l'humidité diminue la rigidité en flexion des poutres tout en augmentant leur ductilité d'une manière considérable. Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence le passage d'un comportement élastique linéaire avec une rupture fragile dans le cas d'humidité faible (9,7%) vers un comportement élasto-plastique avec une rupture ductile en présence de l'humidité. Ainsi, les mesures de champ de déformations par CIN ont montré que la plasticité en compression est principalement à l'origine du comportement non linéaire observé.

L'étude des déformations induites par la diffusion hydrique présentée dans le chapitre 8 ainsi que la modélisation du comportement hydromécanique au cours du chapitre 9 permettent de modéliser les effets de gradients hydriques sur le comportement en flexion des éléments en bois.

8

MESURES DES CHAMPS DE DÉFORMATIONS HYDRIQUES PAR CORRÉLATION D'IMAGES NUMÉRIQUES

Dans ce chapitre, nous étudions les déformations induites par la diffusion hydrique au cours de l'humidification et du séchage d'une section en bois lamellé-collé. Nous mesurons alors le champ de déformations à l'aide de la technique de corrélation d'images numériques (CIN). Ces mesures sont ensuite comparées aux champs des déformations obtenus par la modélisation hydro-mécanique.

Sommaire

8.1	Introduction	204
8.2	Dispositif de mesure des déformations par CIN du lamellé collé	205
8.2.1	Dispositif de maintien de l'échantillon	205
8.2.2	Paramètres de prise d'images et du calcul DIC	207
8.2.3	Chargement hydrique	207
8.3	Analyse des champs de déformations	208
8.3.1	Étude de la déformée	208
8.3.2	Évolution de la déformation au cours du temps	210
8.4	Modélisation numérique de l'effet de gradient hydrique sur le champ de déformations	212
8.4.1	Propriétés des matériaux	213
8.4.2	Effet de la colle sur la déformation du lamellé-collé	213
8.4.3	Validation du modèle	215
8.5	Conclusions	220

8.1 Introduction

Le caractère hygroscopique du bois engendre une diffusion hydrique lors des changements climatiques dans son milieu ambiant. Cette diffusion est accompagnée par des variations dimensionnelles du bois (retrait ou gonflement) qui dépendent fortement de la direction d'anisotropie sollicitée. La mesure des coefficients d'expansion hydrique effectuée sur de l'épicéa dans le chapitre 2 a montré qu'un changement de 1% de teneur d'humidité aboutit à une déformation de 0,33% dans le sens tangentiel (T), 0,15% dans le sens radial (R) et 0,016% dans le sens longitudinal (L).

Par ailleurs, les chapitres précédents montrent que la faible cinétique de transfert hydrique du bois dans le plan TR aboutit à la présence d'un gradient hydrique et, par conséquent, d'un gradient de déformations. De plus, étant donné que la déformation hydrique dépend de l'orientation locale des cernes (due au caractère orthotrope de l'expansion hydrique dans les éléments en bois), les déformations d'une section de lamellé-collé dépendent donc également de l'orientation des cernes dans chaque lamelle. Dans ce contexte, nous cherchons à évaluer les déformations induites par la diffusion hydrique dans les poutres étudiées précédemment.

Dans ce chapitre, on présente une méthode expérimentale sans contact permettant d'évaluer le comportement hydromécanique d'une section isolée de lamellé collé dans un environnement hydrique contrôlé. La technique repose sur des mesures par corrélation d'images numérique d'une section de lamellé collé libre de contraintes (i.e. en déformation libre) lors d'une phase d'humidification, suivie d'une phase de séchage.

Ce travail a pour objectif d'estimer le gradient de déformations généré par la diffusion hydrique, d'évaluer l'influence de la colle sur la déformation du matériau et l'effet des orientations des cernes sur les déformations. Ceci permettra d'estimer éventuellement les contraintes initiales induites par la diffusion hydrique dans les poutres avant de réaliser les essais de flexion. Afin de réaliser cela, on procède à une comparaison des champs de déformations mesurés par la CIN avec ceux obtenus par modélisation numérique. La bonne concordance quantitative entre la mesure et le modèle numérique permet de valider certaines hypothèses discutées précédemment :

- les interfaces de colle entre les lamelles sont suffisamment rigides (même en présence d'humidité élevée) pour être considérées indéformables.
- les propriétés hydromécaniques choisies pour les lamelles dans le modèle numérique (expansion hydrique, orthotropie) sont représentatives de la section réelle.

Nous présentons brièvement le dispositif expérimental employé pour la mesure par CIN dans la section 8.2. La particularité du dispositif réside dans le maintien de

l'échantillon entre deux plaques de plexiglas via des cordons de silicone souples. Ce maintien permet de suivre la déformation de la section transversale de la section tout en l'isolant des transferts hydriques (les transferts ne se font que par les faces latérales). Par ailleurs, ce montage a la particularité de ne pas bloquer la déformation de l'échantillon Loulou (2013). L'analyse des champs de déformations lors des phases d'humidification et de séchage sera présentée dans la section 8.3. Enfin, la comparaison avec le modèle numérique et les conclusions sur la validité des hypothèses sur les interfaces (colles) et les propriétés hydromécaniques du lamellé collé seront présentées dans les sections 8.4 et 8.5 respectivement.

8.2 Dispositif de mesure des déformations par CIN du lamellé collé

Dans cette section, on présente le dispositif expérimental employé pour la mesure sans contact de la déformation induite par le chargement hydrique d'une section de lamellé-collé. L'échantillon est prélevé dans une poutre identique à celles étudiées au chapitre 5 (tranche de 6 cm d'épaisseur et de section $13,1 \times 11,5 \text{ cm}^2$). Les conditions de transfert hydrique de l'échantillon sont similaires à celles des poutres (i.e. le transfert est empêché dans le sens longitudinal du bois). L'échantillon est placé dans une enceinte hermétique dont le degré d'humidité est contrôlé et imposé selon le profil illustré dans la figure 8.2.

8.2.1 Dispositif de maintien de l'échantillon

Le dispositif employé pour le maintien de l'échantillon pendant le transfert hydrique doit vérifier les conditions suivantes :

1. Le transfert hydrique entre l'échantillon et l'environnement extérieur ne s'opère que par les faces latérales.
2. La face de l'échantillon doit rester visible pour une mesure par CIN.
3. Aucune contraintes mécaniques externes (autres que celles provenant du gradient hydrique) ne doit être appliquée à l'échantillon pendant l'expérience.
4. Le dispositif doit pouvoir être inséré dans une enceinte dont l'hygrométrie est imposée.

Le dispositif est présenté dans la figure 8.1. L'échantillon est placé entre deux plaques de plexiglas (les plaques sont exempts de rayures pour éviter les erreurs dans la mesure CIN). Un cordon de silicone est déposé sur le contour de l'échantillon de façon à assurer une liaison souple avec le plexiglas tout en isolant la face

de l'échantillon d'un éventuel transfert hydrique. L'ensemble est placé dans l'enceinte dont les parois sont transparentes. Notons qu'avec ce montage, toutes les déformations de l'échantillon sont libres (assurées par la souplesse du cordon de silicone). Pour se prévenir d'un éventuel mouvement hors plan de l'échantillon qui serait préjudiciable pour la validité de la mesure par CIN¹ on empêche le déplacement hors plan de la face mesurée via des cales fixées au fond du caisson (voir fig 8.1).

La prise de vue est réalisée par une caméra placée à l'extérieur de l'enceinte dont les parois sont transparentes. Les paramètres de la prise de vue et ceux du calcul CIN sont donnés dans le paragraphe suivant.

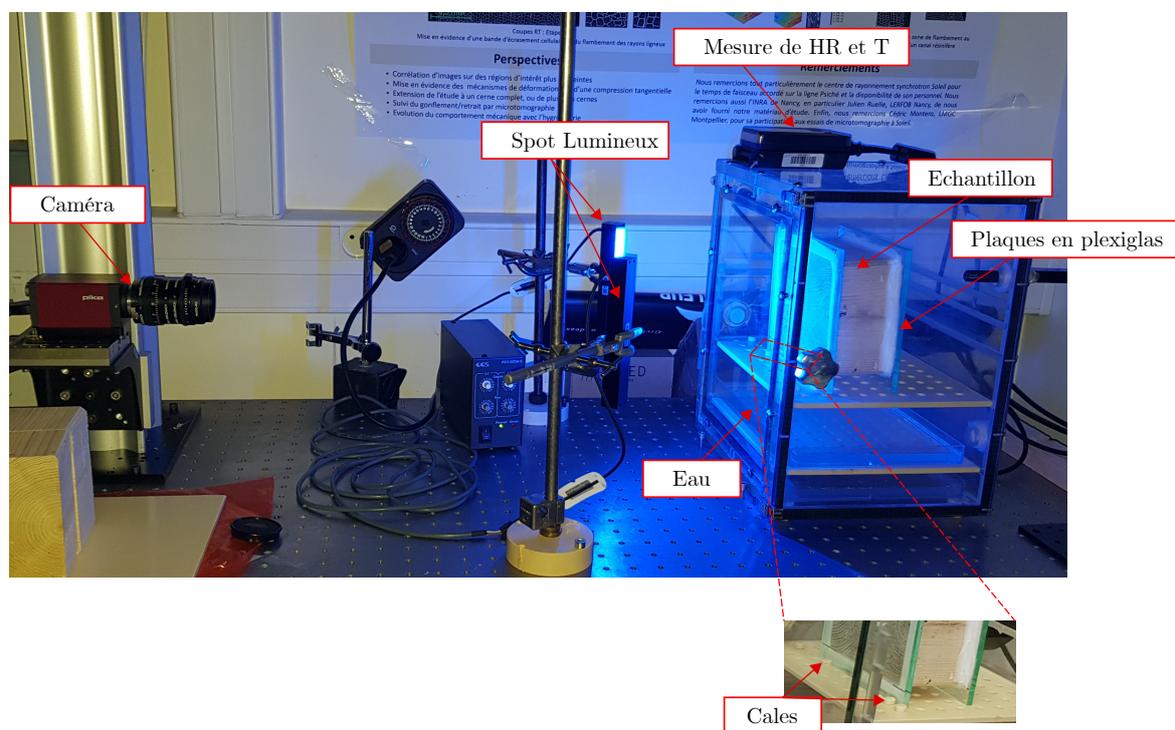


FIGURE 8.1 – Dispositif expérimental de mesure des déformations en surface par la technique de corrélation d'images. À noter que le bac d'eau en bas de l'enceinte est utilisé pour régler le HR au cours de la phase d'humidification et il est ensuite retiré de l'enceinte au cours du séchage.

1. Un mouvement hors plan de l'échantillon se traduirait par une déformation dans le plan sur les images. Ce problème est bien connu sur les mesures par CIN. Il provient du biais optique qui fait apparaître un objet plus grand sur les photos lorsque celui-ci se rapproche de la caméra. Lors d'une mesure par CIN, les déplacements hors plan doivent être empêchés pour ne pas fausser la mesure de déformation dû au transfert hydrique.

8.2.2 Paramètres de prise d'images et du calcul DIC

La prise de vue est réalisée à l'aide d'une caméra AVT PIKE F-421B. On réalise une image toutes les 8 min, à la résolution 2048×2048 pixels. Les champs de déplacement sont calculés via le logiciel GOM (méthode CIN locale) sur des images en niveau de gris. Les imagerie de corrélation d'images ont une taille de 75 pixels (0,53 cm) et sont espacées de 10 pixels (espacement en grille régulière). Cette taille d'imagerie est considérée suffisamment plus grande que la largeur maximale des cernes sur la section observée (d'environ 0,28 cm). L'espacement de 10 pixels entre chaque imagerie permet d'avoir le plus de points possible pour les mesures de champs. Les champs de déplacement sont systématiquement calculés par rapport à l'image de référence requise au début d'expérience. Le mouchetis est appliqué sur la face observée (avant la mise en place des plaques en plexiglass) à l'aide d'une peinture noire. Les champs de déplacement et de déformations obtenus sont présentés dans la section suivante.

8.2.3 Chargement hydrique

L'humidité relative imposée dans l'enceinte est donnée dans la figure 8.2 : l'échantillon initialement à l'équilibre aux conditions de laboratoire (HR = 55% et $T = 20^\circ\text{C}$) est placé dans une enceinte où le HR est réglé à 99% (le réglage de l'humidité est assuré par le bac d'eau au fond de l'enceinte) et la température est maintenue constante à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Cette phase d'absorption est ensuite suivie par une phase de séchage où l'HR est égale à celle du laboratoire.

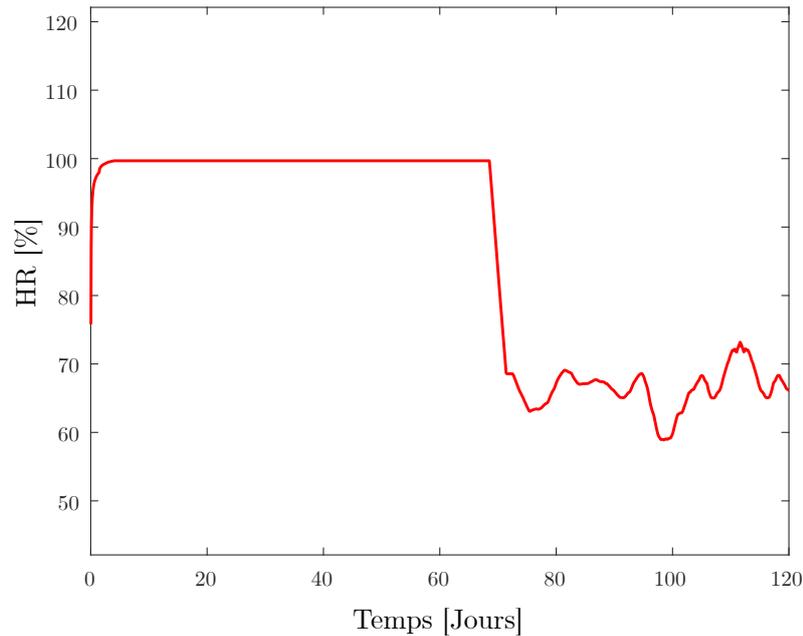


FIGURE 8.2 – Évolution de l’humidité relative dans l’enceinte de conditionnement hydrique. L’échantillon subit une phase d’humidification pendant 70 jours. Au delà de 70 jours, l’échantillon subit un séchage.

8.3 Analyse des champs de déformations

Dans cette partie, on présente l’analyse des champs de déformations lors des phases d’humidification et de séchage. Dans un premier temps, nous étudions l’effet de la colle sur la déformation de la section du lamellé-collé. La face observée de l’échantillon est donnée dans la figure 8.3 où les orientations de cernes de chaque lamelle sont visibles ainsi que le numéro de la lamelle attribuée. Cette section montre plusieurs éléments de variabilité du bois : la présence d’un nœud dans la lamelle 1, une partie de moelle dans la lamelle 3, et une variabilité dans l’épaisseur des cernes. L’étude en présence de ces « défauts » permettra d’investiguer leurs effets sur les champs de déformations induits par la diffusion hydrique.

8.3.1 Étude de la déformée

La figure 8.4 montre le contour de la section étudiée au temps initial ($t=0$), après 70 jours d’humidification (contour en rouge) et après 42 jours de séchage (contour en bleu). La forme de la déformée est amplifiée par un facteur égal à 8. Le numéro de chaque lamelle est indiqué sur la figure.

Nous observons une continuité dans la forme de la déformée (continuité de



FIGURE 8.3 – Section de lamellé-collé observée au cours de l'essai.

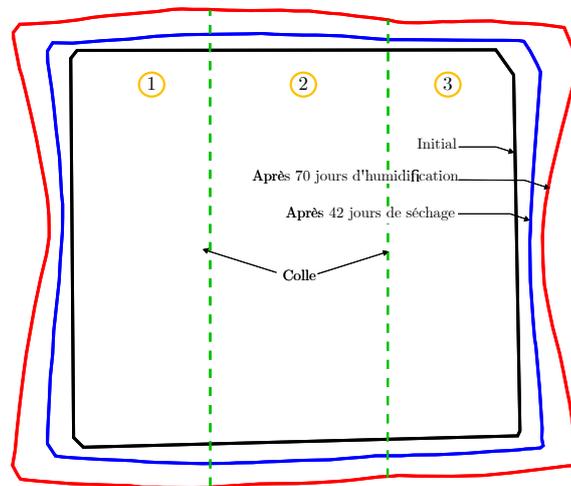


FIGURE 8.4 – Schématisation de la forme de la section initiale (en noir) avec la déformée après 70 jours d'absorption hydrique (en rouge) et après 42 jours de séchage (en bleu). Un facteur d'amplification égal à 8 est appliqué à la déformée. Les joints de colle sont illustrés par les tirets verts.

déplacement) au niveau de la colle. Ceci indique que le joint de colle (constitué avec de la colle MUF d'épaisseur de 0.1 mm) lie parfaitement les lamelles de bois et constitue un joint d'adhésion rigide. En revanche, la forme de la déformée montre la présence d'un point d'inflexion aux alentours de l'interface entre les lamelles 2 et 3. En effet, le sens d'orientation des cernes des lamelles 1 et 2 est différent de celui de la lamelle 3 comme le montre la figure 8.3. La présence de ce point d'inflexion sur le champ de déformation est donc le résultat de la différence d'orientation des cernes entre les lamelles qui ont tendance à se déformer différemment.

8.3.2 Évolution de la déformation au cours du temps

La figure 8.5 montre les champs de déformations équivalentes observés à différentes échéances au cours de l'absorption et de la désorption de l'humidité. La déformation équivalente est donnée par l'équation 8.1 (définition donnée par le logiciel GOM (GmbH 2016)). L'utilisation de cette déformation a l'avantage de représenter les déformations résultantes sur une seule carte de déformation.

$$\varepsilon_{\text{équivalente}} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum \phi_i} \quad (8.1)$$

Avec $\phi_i = \ln(1 + \varepsilon)$ représente les grandes déformations en logarithmique.

Les différentes figures mettent en évidence le caractère transitoire de la diffusion hydrique dans les éléments en bois où les déformations évoluent graduellement dans le temps. Plus précisément, nous constatons que la déformation au niveau des bords extérieurs augmente progressivement au fur et à mesure de l'essai. Étant donné que cette déformation résulte essentiellement de la diffusion de l'humidité, ceci montre la présence du phénomène de convection hydrique où l'humidité évolue à la surface de l'échantillon.

Par ailleurs, les résultats de CIN indiquent la présence d'un gradient de déformation important même après 70 jours d'absorption de l'humidité. En effet, la déformation au centre de l'échantillon est de 2.8% et celle au niveau des bords extérieurs est aux alentours de 6%. Ce gradient de déformation aboutit à la présence de contraintes hydriques : la périphérie de la section analysée sera soumise à des contraintes de compression et le cœur de l'échantillon sera soumis à des contraintes de traction. Ceci implique que les poutres en flexion étudiées précédemment sont précontraintes initialement à cause de la diffusion hydrique. Les contraintes induites par la diffusion seront identifiées dans le chapitre 9 afin d'en déduire l'état initial des poutres pour chaque état hydrique avant leur chargement mécanique.

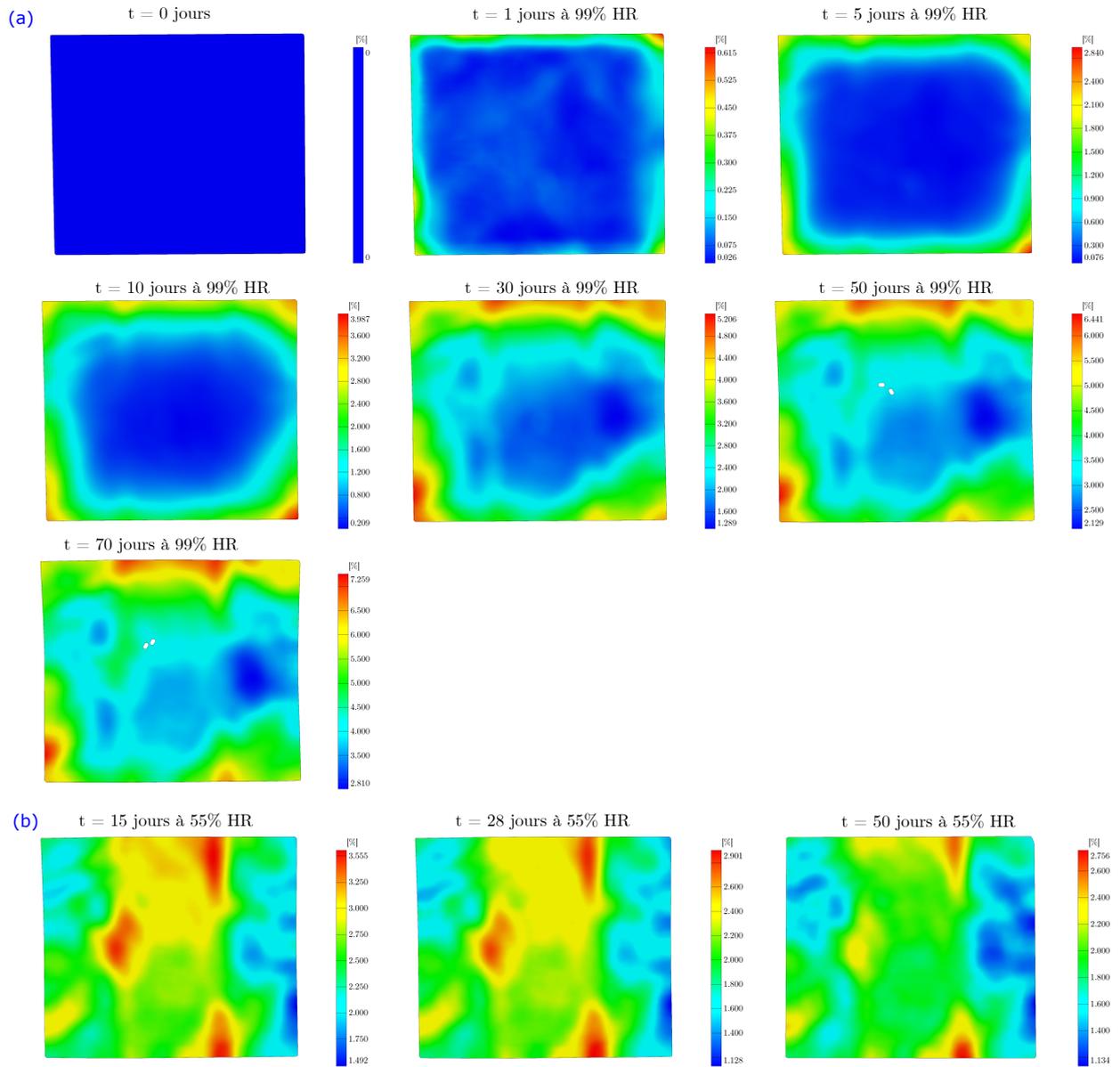


FIGURE 8.5 – Champs de déformations équivalentes au cours de l’humidification (a) et du séchage (b) de la section de lamellé-collé.

8.4 Modélisation numérique de l'effet de gradient hydrique sur le champ de déformations

Dans cette section nous modélisons l'effet du transfert hydrique sur le champ de déformations. Dans ce calcul, on suppose que la loi de comportement du bois est élastique orthotrope et celle de la colle est élastique isotrope. Nous considérons dans le modèle que l'épaisseur de la colle est égale à 0,1 mm. La diffusion hydrique est modélisée par la loi de Fick avec une condition au limite de type convective.

Le calcul est réalisé en 2D (hypothèse de déformation plane) sur Abaqus afin d'observer la déformation de la section et de se rapprocher des conditions expérimentales. Le centre d'orthotropie est précisé pour chaque lamelle. La figure 8.6 montre les orientations des axes locaux (R et T). La taille du maillage quadratique est égale à 0,56 cm. Ceci est proche de la taille des imogettes utilisées avec GOM.

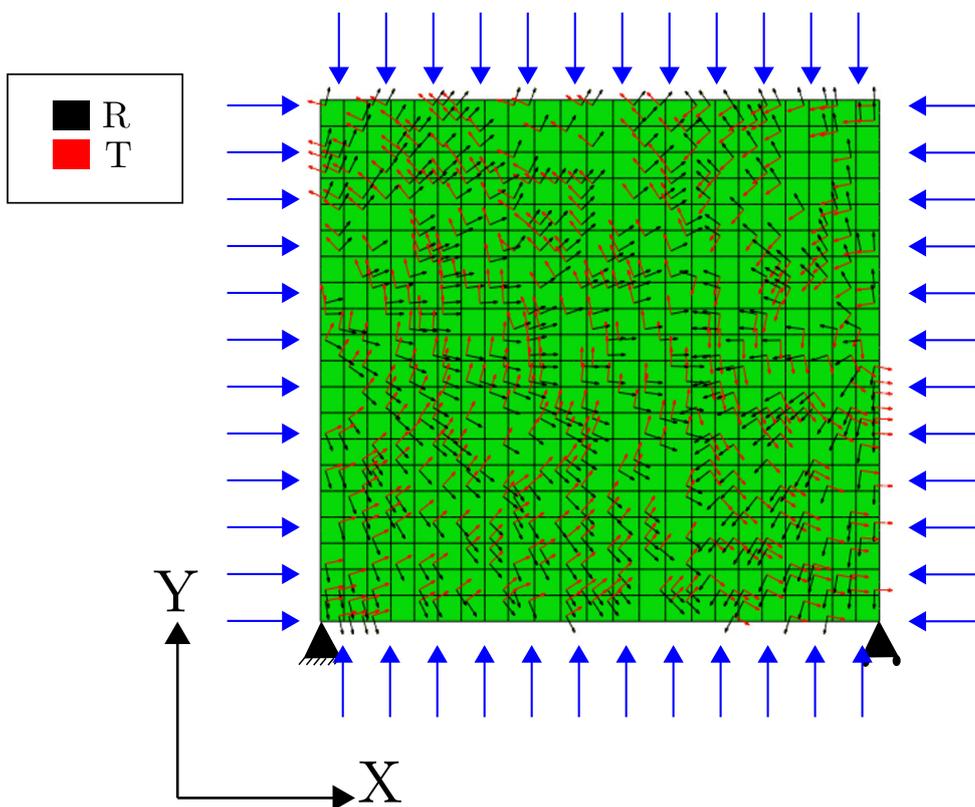


FIGURE 8.6 – Orientations des axes d'anisotropie locaux de la section observée ainsi que les axes globaux.

8.4.1 Propriétés des matériaux

Bois lamellé-collé

Dans ce calcul nous considérons que les propriétés mécaniques du bois (à la teneur en humidité égale à 12%) sont celles données par la norme NF EN 14080 (voir tableau 5.1). Le tableau 8.1 montre les coefficients de Poisson utilisés au cours des simulations. Nous supposons que l'humidité influence les modules élastiques de la même manière que celle donnée par (Guitard 1987). Les paramètres du modèle de diffusion dans le bois sont les mêmes que ceux identifiés pour les poutres au cours du chapitre 6. Les coefficients d'expansion hydrique utilisés sont donnés dans le tableau 2.3.

TABLE 8.1 – Coefficients de Poisson

Propriété	Valeur	unité
μ_{RL}	0,04	-
μ_{RT}	0,435	-
μ_{LT}	0,025	-

Colle MUF

Les propriétés mécaniques et hydriques de la colle sont prises égales à celles données par (Hassani 2015). Le module de Young de la colle est considéré dépendant de la teneur en humidité et est donné par l'équation 8.2. L'expansion hydrique de la colle est prise égale à 0,0019 [$-\%/MC$]. Le coefficient de diffusion de la colle (unité $\frac{mm^2}{h}$) est pris égale à $D_{MC} = 9,79 * 10^{-4} e^{0,231MC}$.

$$E_{MUF} = 53355 - 604,1MC + 33,27MC^2 - 0,6805MC^3 \quad (8.2)$$

8.4.2 Effet de la colle sur la déformation du lamellé-collé

Nous avons pu voir précédemment que la colle assure une continuité de la déformée de la section observée. Dans cette partie du travail, nous cherchons à confirmer cela numériquement. Nous réalisons alors deux calculs numériques : un premier en négligeant la présence de la colle (i.e. l'interface entre les lamelles est considérée comme étant parfaitement rigide) et un deuxième en prenant en compte la présence de la colle. Les figures 8.7 et 8.8 montrent la comparaison entre les champs des déformations ε_{11} et ε_{22} respectivement obtenues par les deux calculs.

Nous remarquons une similarité qualitative et quantitative dans le champ de déformations pour les deux calculs. Cela permet de confirmer que la colle (d'épaisseur 0.1 mm) constitue une liaison parfaitement rigide entre les différentes lamelles de bois et qu'elle peut être donc négligée dans le calcul par la suite. Par ailleurs, ce calcul met en évidence l'influence significative des orientations des cernes de chaque lamelle sur la répartition des déformations dans la section de l'échantillon.

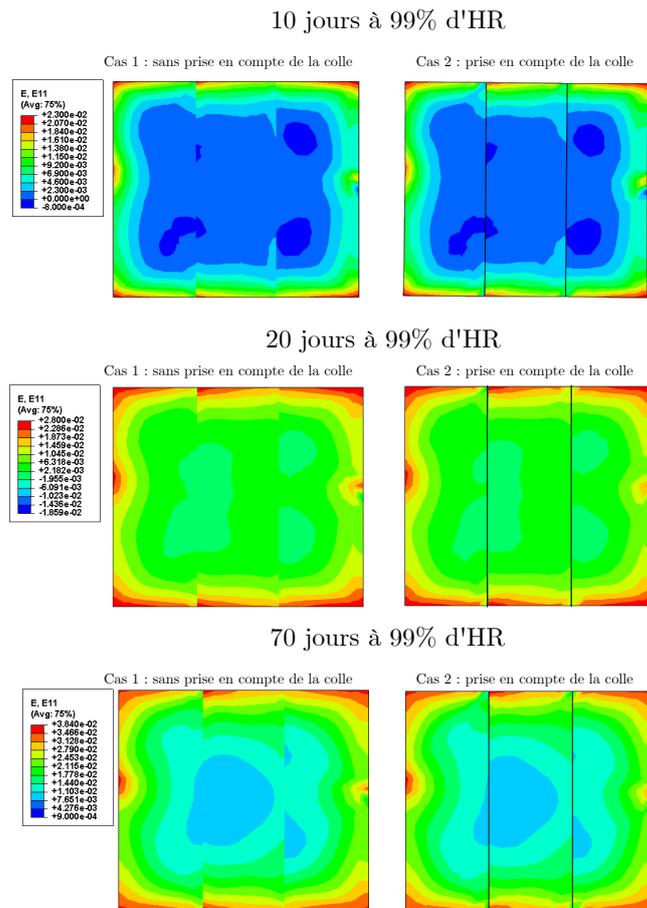


FIGURE 8.7 – Champs de déformation selon la direction X (ϵ_{11}) pour les deux cas du calcul numérique : avec et sans la colle. La colle est montrée sur les cartes de déformations par l'intermédiaire des lignes noires continues.

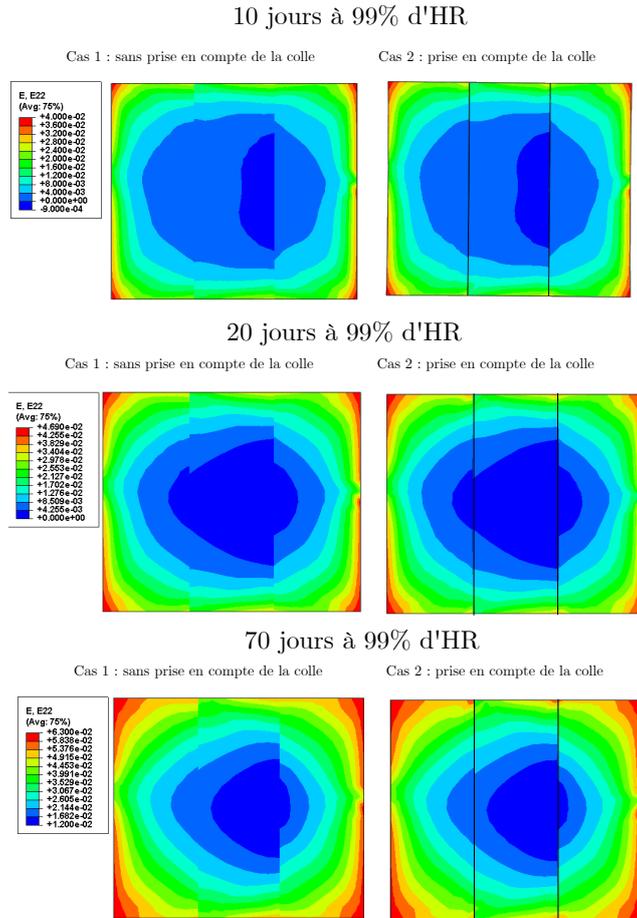


FIGURE 8.8 – Champs de déformation selon la direction Y (ε_{22}) pour les deux cas de calcul numérique : avec et sans la colle. La colle est montrée sur les cartes de déformations par l'intermédiaire des lignes noires continues.

8.4.3 Validation du modèle

Dans cette section de travail, nous présentons les résultats des déformations obtenues avec le modèle numérique (sans prendre en compte la présence de la colle) comme présenté ci-dessus et nous les comparons avec ceux obtenus expérimentalement afin de valider le modèle numérique employé. Il est à noter qu'au cours des simulations les coefficients de diffusion et d'échanges surfacique en désorption sont considérés supérieurs à ceux en adsorption de la même manière qu'au cours de la partie II, chapitre 4. Nous négligeons les hystérésis de sorption, la teneur en humidité à l'équilibre est calculée à partir de l'abaque (équation 1.7).

Les figures 8.9 et 8.10 montrent respectivement l'évolution de la moyenne de

la déformation principale maximale (ε_I) et minimale (ε_{II}) obtenues par le modèle numérique et la CIN au cours de l'humidification et du séchage. Nous remarquons un bon accord entre les valeurs expérimentales et numériques malgré la présence d'un écart relatif (aux alentours de 13 % pour la déformation maximale et 36% pour la déformation minimale). Cet écart est considéré comme étant relativement faible compte tenu des incertitudes qui peuvent se reproduire au cours de l'essai de CIN et des hypothèses de calcul numérique. Ajoutons à cela l'effet des variabilités locales de l'échantillon (présence du nœud et de la moelle et la variation locale de l'épaisseur des cernes) qui ne sont pas prisent en compte dans le modèle numérique.

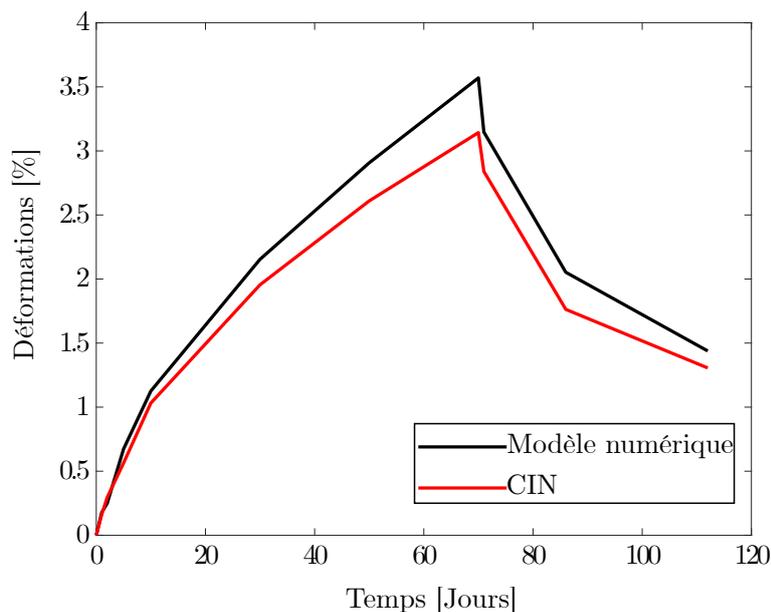


FIGURE 8.9 – Évolution de la déformation principale maximale (ε_I) moyenne en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (en noir) et expérimentalement (en rouge)

Les figures 8.12 et 8.12 montrent la comparaison entre les champs de déformations principales obtenus par le modèle numérique et la corrélation d'images à différentes échéances au cours de l'humidification et du séchage de la section étudiée.

Nous remarquons globalement une bonne correspondance quantitative et qualitative entre les deux méthodes malgré la présence d'un écart de déformation au centre de la face étudiée. Cet écart peut être le résultat d'une incertitude dans le calcul de CIN, une isolation imparfaite au niveau des joints silicones utilisés pour étanchéifier la section ou en raison des variabilités locales du bois. D'autre part, la comparaison entre les cartes des déformations numériques et expérimentales

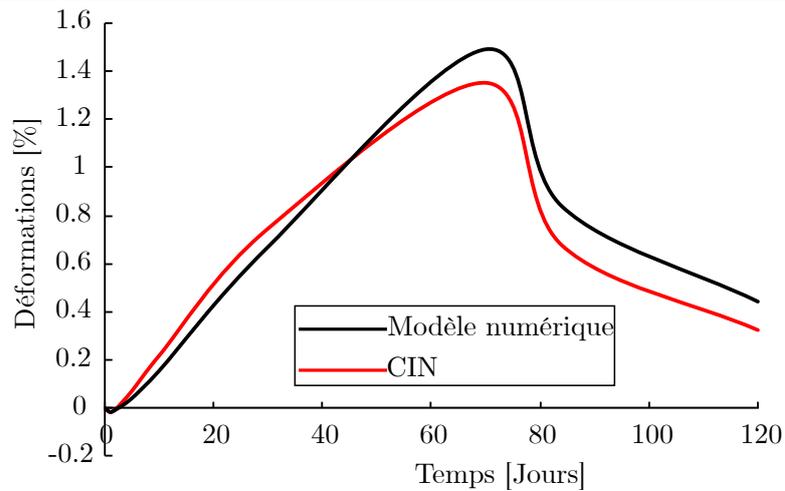


FIGURE 8.10 – Évolution de la déformation principale minimale (ε_{II}) moyenne en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (en noir) et expérimentalement (en rouge)

montre que la présence de nœud à la surface de l'échantillon a un effet faible sur la déformation induite.

Tout ce qui précède montre que le modèle numérique employé reste suffisamment précis afin d'en déduire les contraintes induites par la diffusion hydrique dans les poutres en bois.

Humidification

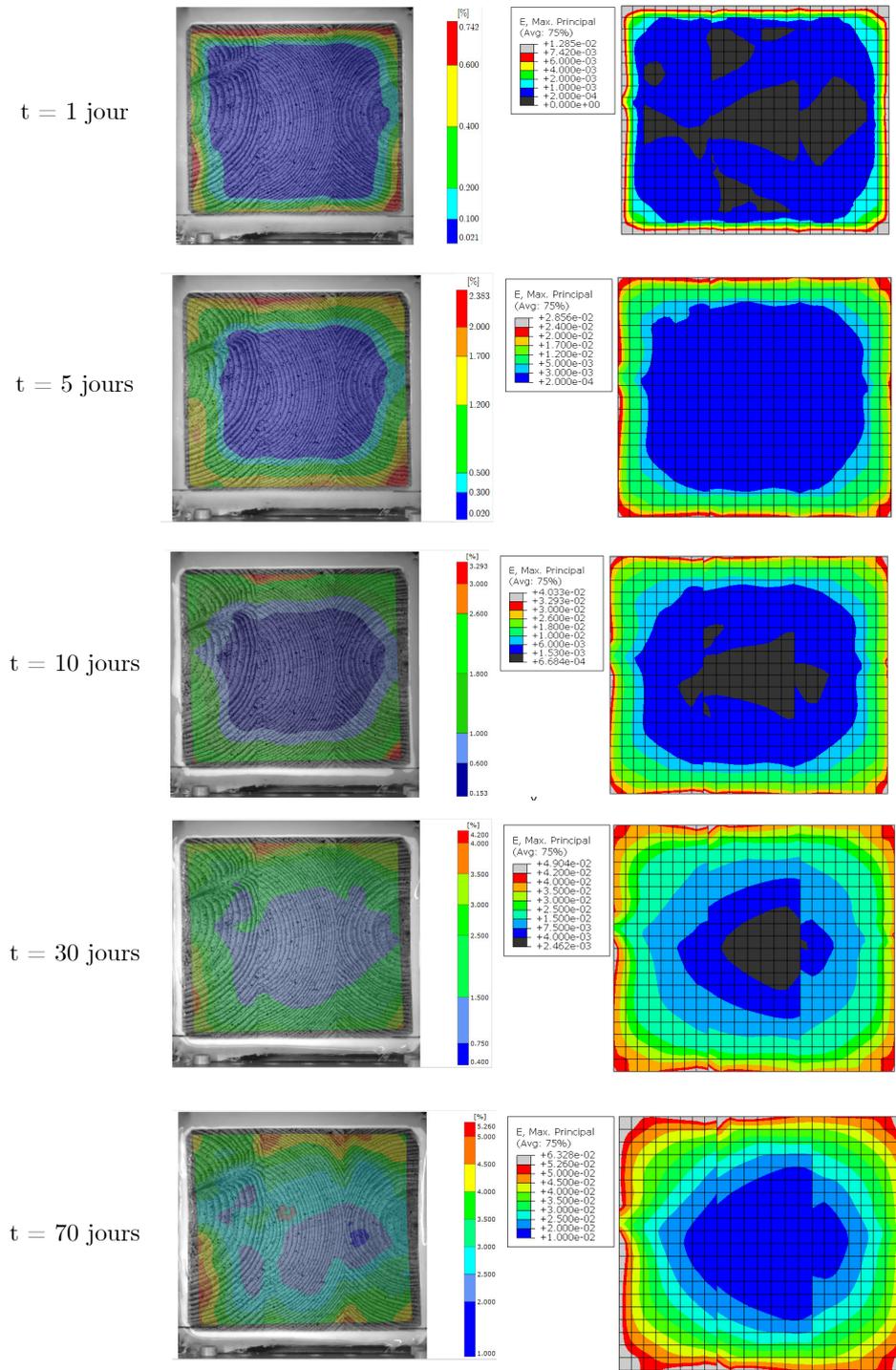


FIGURE 8.11 – Évolution de la déformation principale (ε_I notée E_{max}) en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (à droite) et expérimentalement (à gauche) pour différentes échéances au cours de la phase d'humidification.

Séchage

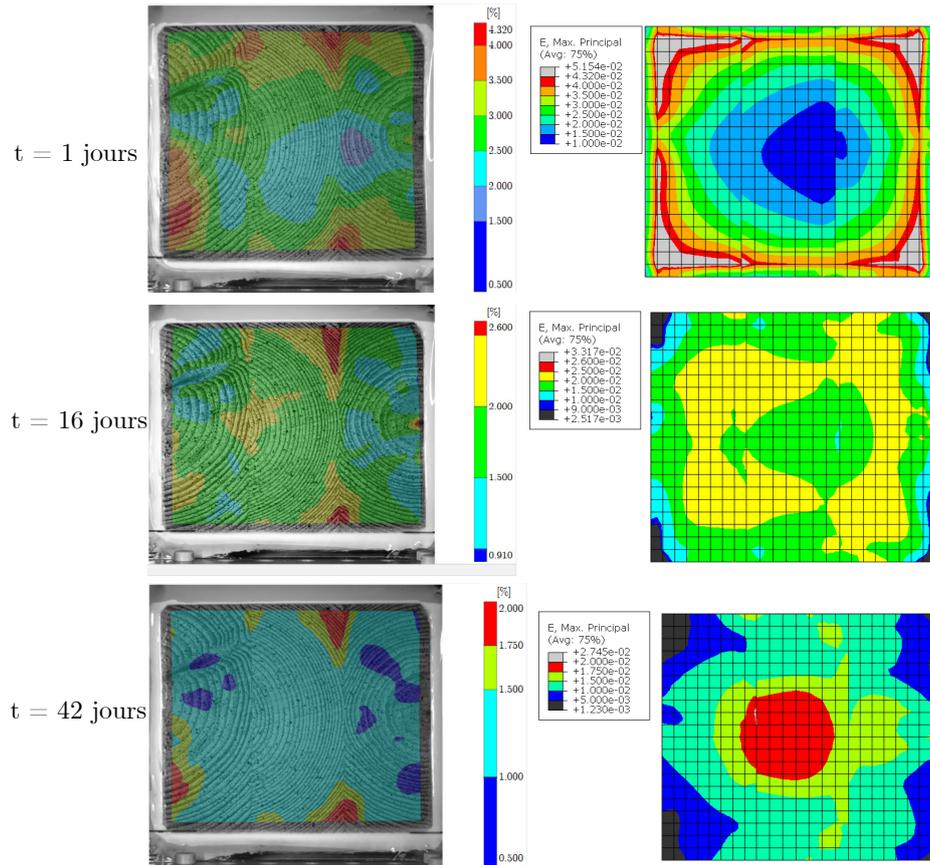


FIGURE 8.12 – Évolution de la déformation principale (ε_I notée E_{max}) en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (à droite) et expérimentalement (à gauche) pour différentes échéances au cours du séchage.

8.5 Conclusions

Dans cette partie, nous avons déterminé les déformations induites par la diffusion hydrique dans une section de lamellé-collé ayant la même section que celle des poutres étudiées précédemment. Nous avons pu valider expérimentalement et numériquement l'absence de l'influence de la colle sur la déformation du lamellé-collé. Ensuite, la comparaison des champs de déformations numériques et expérimentales a permis de valider l'emploi du modèle numérique utilisé afin d'avoir une bonne approximation des déformations induites par la diffusion hydrique. Nous avons pu voir que même après 70 jours depuis le début de la diffusion hydrique, un gradient de déformation existe dans la section et par la suite des contraintes dues à la diffusion hydrique existent également. Les mêmes hypothèses et paramètres d'expansion hydrique seront employés dans le chapitre suivant afin d'estimer le champ de contraintes initial dans les poutres pour chaque état hydrique.

9

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES EFFETS DU GRADIENT D'HUMIDITÉ SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ÉLÉMENTS EN BOIS

Dans ce chapitre, nous modélisons le comportement hydromécanique des poutres précédemment testées en flexion. On propose alors un modèle de comportement élastoplastique tenant compte des variations d'humidité et de l'asymétrie du comportement en traction et en compression. Ce modèle est validé avec les essais présentés précédemment et appliqué à différents cas de charges hydriques.

Sommaire

9.1	Introduction	222
9.2	Lois de comportement mécanique du bois	223
9.2.1	Traction	223
9.2.2	Compression	226
9.2.3	Flexion	228
9.3	Modélisation du comportement mécanique du bois	230
9.3.1	Comportement élastique	230
9.3.2	Expansion hydrique	231
9.3.3	Modélisation du comportement plastique en compression	231
9.3.4	Modèle numérique	232
9.3.5	Contraintes induites par la diffusion hydrique	236
9.4	Confrontation modèle-expérience	237
9.4.1	Estimation de la charge à la rupture	237
9.4.2	Estimation de la limite élastique	240

9.4.3	Comportement non-linéaire avant la rupture	240
9.5	Discussion	243
9.5.1	Estimation de la charge à la rupture en fonction de différents cas de pénétration de l'humidité	243
9.5.2	Discussion par rapport à l'Eurocode 5	244
9.6	Conclusions	247

9.1 Introduction

Les essais de flexion réalisés dans le chapitre 7 ont montré une augmentation de la charge à la rupture en présence d'un gradient d'humidité¹ par rapport à celle mesurée à l'état initial. Des augmentations relatives pouvant atteindre 20% ont été ainsi observées. Par ailleurs, les essais mettent en évidence une différence significative du comportement mécanique avant rupture : en présence d'un gradient hydrique, un comportement fortement non linéaire accompagne l'augmentation de la charge à la rupture (par opposition à la rupture quasi-fragile à l'état initial). D'autre part, le chapitre 8 a pu mettre en évidence la présence d'un gradient de déformations important lors de l'humidification du bois. Ceci souligne l'importance de prendre en compte les contraintes induites par le gradient hydrique lors de la modélisation du comportement des éléments en bois.

Dans ce contexte, le but de ce chapitre est de modéliser le comportement hydromécanique des poutres soumises à un chargement hydrique afin de prédire leur charges à la rupture en flexion.

Le mode de rupture du bois clair (i.e. sans défauts) dépend fortement du type de sollicitation (compression, traction, cisaillement ...). La loi de comportement en traction, cisaillement et en compression est significativement différente dans la plage non élastique pour toutes les directions d'anisotropie du matériau. En effet, quand le bois est sollicité en traction ou cisaillement, une rupture fragile survient. En revanche, en compression, le bois présente une rupture ductile avec la présence de déformations irréversibles. Différents modes de comportement non-linéaire sont observés en compression selon la direction de sollicitation : adoucissement-ductile sous une force de compression parallèle aux fibres et un durcissement-ductile (densification) non linéaire sous compression perpendiculaire aux fibres (Oudjene ; Khe-lifa 2009). Ce comportement est généralement assimilé à un comportement plastique apparent. En flexion, le mode de rupture dépend de la résistance en traction et en compression du bois.

1. Ceci est valable quand la teneur en humidité en surface est supérieure à celle dans le cœur de l'échantillon.

Quant au bois de structure, son comportement mécanique est affecté par la présence de défauts tels que les nœuds. Ces derniers affectent la charge à la rupture du bois différemment selon le type de sollicitation : cela affecte en premier lieu la rupture en traction longitudinale puis dans une moindre mesure la résistance en flexion et enfin celle en compression longitudinale (Guindos ; Guaita 2013 ; United States 1987). En flexion, la présence d'un nœud sur la zone proche de l'axe neutre n'affecte pas le comportement du bois. Cependant, sa présence en zone de traction diminuera sa charge à la rupture (WoodHandbook United States 1987).

L'utilisation d'un modèle approprié est nécessaire si l'on souhaite prédire avec précision les performances structurales du bois. Cependant, étant donné la complexité du matériau, sa modélisation mécanique complète nécessite un grand nombre de caractérisations expérimentales (comportement hydromécanique orthotrope en régime non-linéaire en tenant compte des défauts structuraux et du phénomène de diffusion). Par ailleurs, les travaux antérieurs dans ce domaine considèrent généralement des sollicitations uniques sur du bois sans défauts (éprouvettes de laboratoire) et proposent une grande variété de modèles phénoménologiques simplifiés qui ne font pas l'unanimité dans ce domaine.

Dans ce chapitre, on propose un modèle élastique-plastique « apparent » anisotrope dont les paramètres matériau dépendent de l'humidité. La diffusion hydrique est modélisée par une loi de Fick avec une condition aux limites du type convective en employant les coefficients identifiés sur les poutres dans le chapitre 6. Nous introduisons dans un premier temps les lois de comportement employées lors de la simulation des essais de flexion ainsi que les hypothèses utilisées au cours de ce travail. Ensuite, nous comparons la réponse mécanique simulée du comportement hydromécanique en flexion aux résultats expérimentaux. Pour finir, nous employons le modèle hydromécanique afin d'estimer l'effet de plusieurs configurations de diffusion sur la charge à la rupture d'une poutre en flexion 4 points.

9.2 Lois de comportement mécanique du bois

Dans cette partie nous présentons une revue bibliographique sur le comportement mécanique du bois selon les différents types de sollicitation mécanique ainsi que l'effet de l'humidité sur les propriétés.

9.2.1 Traction

En traction uniaxiale dans le sens longitudinal, le comportement mécanique du bois clair est généralement considéré comme élastique linéaire suivi d'une phase d'endommagement correspondant à une rupture successive des fibres (voir figure 9.1). La figure 9.1 montre une représentation typique du comportement d'un

échantillon en bois sollicité en traction (en déplacement imposé). La courbe force-déplacement montre un comportement linéaire suivi d'une phase d'adoucissement en conséquence de la présence d'un endommagement localisé dans l'éprouvette (Navi ; Sandberg 2012 ; Khennane ; Khelifa ; Bleron ; Viguier 2014 ; Guitard 1987). Étant donné que le bois de structure est un bois avec un degré élevé d'hétérogénéité puisqu'il contient encore des nœuds, la présence de ces nœuds peut réduire l'apparition de cette non-linéarité en zone de traction due à la concentration de contraintes autour de ces nœuds. On peut imaginer que la rupture peut arriver plus vite et l'apparition de cette zone de non-linéarité sera limitée dans ce cas. En conséquent, nous considérons uniquement le comportement linéaire élastique et fragile en zone de traction au cours de ce travail.

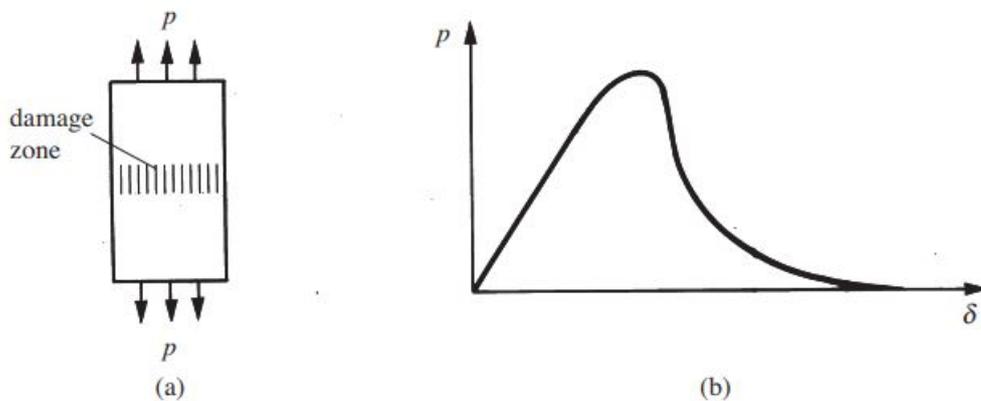


FIGURE 9.1 – Représentation « typique » de la courbe force-déplacement d'un échantillon de bois soumis à une force de traction selon la direction parallèle aux fibres de bois. Figure extrait de (Navi ; Sandberg 2012).

Effet de la teneur en humidité sur la rupture en traction

La charge à la rupture du bois clair en traction dépend faiblement de la teneur en humidité : le passage de 12 à 20% de teneur en humidité (homogène dans le volume) aboutit à une diminution de 12% de la charge à la rupture en traction (Gerhards 1982) et de 3 à 4% selon les essais réalisés par (Curry 1952) sur de l'épicéa (voir figure 9.2). Cette diminution est encore plus faible pour un bois de faible qualité (i.e. bois de structure contenant des nœuds) (Madsen 1975 ; United States 1987). Pour les faibles résistances en traction, (Madsen 1975) et (United States 1987) recommandent de négliger l'effet de l'humidité puisque la concentration de contraintes au niveau de ces singularités aura la plus grande influence et provoquera la rupture sans voir d'effet lié à l'humidité. Le Woodhanbook (United States

1987) néglige l'effet de la teneur en humidité sur la résistance en traction pour une résistance plus faible que 21,7 MPa. Dans le cas contraire une formule est proposée pour adapter la contrainte à la rupture du bois en traction à la teneur en humidité (équation 9.1) :

$$P_2 = P_1 + \left(\frac{P_1 - B_1}{B_2 - M_1} \right) (M_1 - M_2) \quad (9.1)$$

Avec : M_1 représente la teneur en humidité à l'état 1, M_2 représente la teneur en humidité à l'état 2 et B_1 , B_2 sont des constantes données par le tableau 9.1.

TABLE 9.1 – Coefficients pour l'ajustement des propriétés en compression et en traction en fonction de la teneur en humidité, d'après WoodHandbook (United States 1987).

Coefficients	Compression (MPa)	Traction (MPa)
B1	9,6	21,7
B2	0,234	0,552

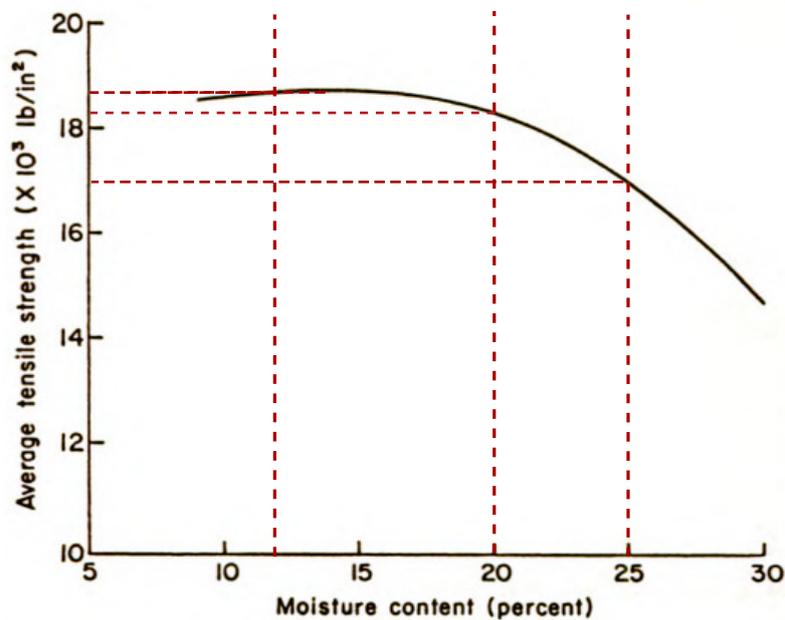


FIGURE 9.2 – Évolution de la résistance moyenne en traction de l'épicéa en fonction de la teneur en humidité, (Curry 1952) cité par (Green 1990).

Au cours de ce travail nous supposons que la résistance mécanique du bois en zone de traction suit la formule proposée par le woodhanbook (équation 9.1). Par ailleurs, nous supposons que même en présence d'humidité le comportement du bois reste élastique linéaire fragile. Cette approche va dans le sens de la sécurité et aboutit à une faible sous estimation de la charge à la rupture et de la ductilité des éléments (si le bois est de bonne qualité) étant donné que les constituants chimiques du bois peuvent montrer un faible comportement non linéaire en présence d'humidité (Navi ; Heger 2005). Cette hypothèse est maintenue pour le comportement en traction du bois dans le sens transversal. Nous considérons le même rapport de résistance (égale à 0,023) entre la direction longitudinale et transversale que celui proposé par l'Eurocode 5.

9.2.2 Compression

En compression le bois montre un comportement ductile. Ce comportement est différent selon la direction de sollicitation du matériau. En effet, dans le sens parallèle aux fibres, la courbe contrainte-déformation peut être décomposée en trois zones distinctes (voir figure 9.3) : la première zone représente le comportement élastique linéaire, elle est suivie par une phase de faible décroissance de contraintes en fonction des déformations, ensuite un plateau est observé.

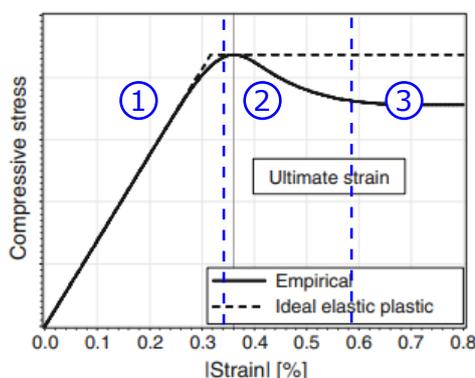


FIGURE 9.3 – Représentation du comportement en compression longitudinale selon (Frese ; Enders-Comberg ; Blaß ; Glos 2012).

En revanche, dans le sens radial et tangentiel, nous remarquons un comportement différent : la phase d'élasticité linéaire (zone 1) est suivie par un plateau (zone 2). Ensuite nous observons une densification dans la zone 3 où les contraintes augmentent en fonction de la déformation du matériau (voir figure 9.4).

Étant donné que la déformation locale mesurée en flexion 4 points reste inférieure à 1%, un comportement élastique parfaitement plastique peut être employé

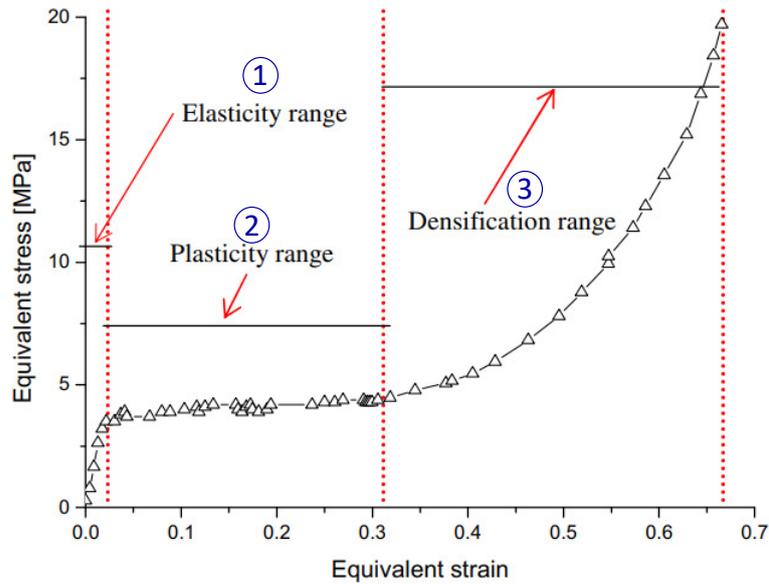


FIGURE 9.4 – Représentation « typique » du comportement en compression transversale selon (Oudjene ; Khelifa 2009).

en compression longitudinale et transversale afin de reproduire le comportement en compression parallèle et perpendiculaire au sens longitudinal. Il est important de rappeler que même si ce comportement ductile peut être décrit phénoménologiquement comme de la plasticité, les déformations irréversibles du bois n'ont pas la même origine physique que celles de l'acier (Navi ; Sandberg 2012). Nous considérons un rapport de 0.12 entre la résistance à la compression transversale et longitudinale (Kawecki ; Podgórski 2020).

Effet de la teneur en humidité sur le seuil de plasticité en compression

La teneur en humidité affecte le comportement en compression en favorisant le flambement des fibres du bois et aboutissant ainsi à une diminution de la charge à la rupture des éléments sollicités en compression. La synthèse bibliographique présentée dans (Gerhards 1982) montre qu'un passage de 12 à 20% de la teneur en humidité (homogène dans le volume) aboutit à une diminution de 35% de la charge à la rupture. Ces résultats reposent sur des essais réalisés sur du bois clair de petites dimensions. Le Woodhanbook (United States 1987) propose une correction en fonction de l'humidité et de la qualité du bois selon la même équation 9.1 (voir représentation graphique 9.5). Récemment, des essais de compression sur des échantillons de différentes tailles et à différents degrés d'humidité réalisés par (Aicher ; Stapf 2016) ont montré que les bois de structure (échantillons de grandes

tailles contenant des nœuds) sont moins affectés par l'humidité (la présence de gradient d'humidité n'a pas été discutée). Pour le bois de structure, une diminution de 35% a été observée lorsque l'humidité passe l'état vert à 12%. En revanche le bois clair a montré une diminution de l'ordre de 50%.

Pour tenir compte de ces résultats, nous considérons une dépendance linéaire de la résistance à la compression en fonction de la teneur en humidité comme proposé par le Woodhanbook (United States 1987) tout en prenant en compte des résultats de (Aicher ; Stapf 2016). Nous proposons ainsi de considérer qu'entre 12% et le PSF (considéré égal à 30%) la résistance en compression du bois diminue de 35%. Cela aboutit à la relation qu'on peut visualiser sur la figure 9.5 où une variation entre 9.7 et 25% de la teneur en humidité provoque une diminution de 39% de la charge à la rupture en compression. Par la suite, nous admettons cette relation afin de prédire l'influence de l'humidité sur le seuil de plasticité apparente en compression.

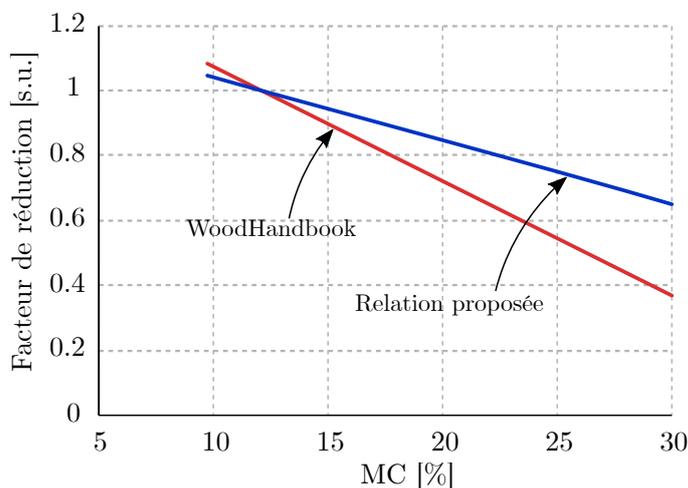


FIGURE 9.5 – Influence de l'humidité sur la contrainte max en compression selon la relation proposée par le WoodHandbook (en rouge) et la relation utilisée dans cette étude (en bleue) adaptée des résultats du Woodhandbook et de (Aicher ; Stapf 2016).

9.2.3 Flexion

La réponse générale force-déplacement d'une poutre de bois en flexion dépend du comportement individuel en traction et en compression. La figure 9.6 montre la courbe force-flèche pour une poutre en bois soumise à un moment de flexion pour plusieurs cas de rupture selon (Buchanan 1990) :

1. Dans le cas 1, le comportement est qualifié linéaire jusqu'à rupture (zone 1). On retrouve ce cas lorsque la force à la rupture est inférieure en traction à celle en compression.
2. Dans le cas 2, la rupture est précédée d'une phase non linéaire plastique « apparente » (zones 1 et 2). On retrouve ce cas lorsque le matériau présente un seuil de plasticité en compression du même ordre de grandeur que la résistance en traction. La rupture dans ce cas est toujours associée à une rupture fragile en traction mais précédée d'une plasticité en compression.
3. Le cas 3 représente le cas d'un bois plus résistant en traction qu'en compression. Dans ce cas, la résistance ultime à la flexion dépend essentiellement du comportement en compression. La rupture se produit toujours dans la zone en tension mais avec une charge à la rupture plus faible que la charge maximale.
4. Le cas 4 représente le cas extrême d'un matériau considérablement plus résistant en traction qu'en compression et pour lequel la rupture aura lieu dans la zone en compression.

Étant donné la réponse des poutres obtenues expérimentalement au chapitre 7, nous pouvons considérer que :

- Pour les poutres à l'état initial, on se situe dans le premier cas où le seuil de plasticité en compression est supérieur à la résistance en traction.
- Pour les poutres présentant un gradient hydrique, on se situe dans le deuxième cas où le seuil de plasticité en compression est du même ordre de grandeur que la résistance en traction.

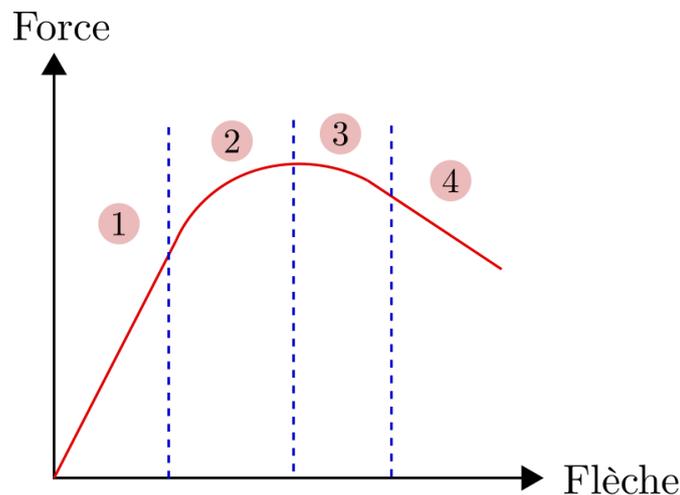


FIGURE 9.6 – Représentation « typique » de la courbe force-flèche d'une poutre en bois soumise à des efforts de flexion. Figure inspirée de (Buchanan 1990).

Étant donné que l'humidité affecte différemment le bois en compression et en traction, nous modélisons le comportement en flexion du bois en modélisant séparément le comportement en compression et en traction. Nous détaillons le modèle numérique employé dans la section suivante.

9.3 Modélisation du comportement mécanique du bois

La modélisation nécessite l'identification de plusieurs paramètres de comportement du matériau à savoir :

1. Les paramètres du modèle de diffusion hydrique (coefficients de diffusion, coefficients d'échanges surfaciques et coefficients d'expansion hydrique)
2. Les paramètres élastiques du matériau à l'état initial ainsi que la contrainte à la rupture
3. La contrainte de plasticité dans le sens longitudinal et transversal du bois en compression à l'état initial
4. L'effet de la teneur en humidité sur les propriétés élastiques et plastiques du bois

La diffusion hydrique est modélisée par la loi de Fick avec une condition aux limites de type convective, comme nous l'avons vu précédemment. Les coefficients identifiés dans le chapitre 6 sur les poutres sont utilisés dans ce modèle.

Une description du comportement mécanique du bois nécessite la prise en compte de sa nature orthotrope. Les composants de la matrice d'élasticité du bois sont directement liés à l'orientation du référentiel local matériel (i.e. référentiel RTL). Pour évaluer les conséquences du comportement hygroscopique du bois, toutes les propriétés mécaniques le long des directions principales d'anisotropie (R, L et T) sont exprimées en fonction de la teneur en humidité.

9.3.1 Comportement élastique

La déformation élastique est une déformation réversible du matériau bois. Le tenseur de contraintes (en notation de Voigt) dans la base orthotrope s'exprime en fonction des déformations à l'aide des neuf constantes élastiques selon la relation 1.2 (voir chapitre 1).

Les modules élastiques sont considérés égaux en compression et en traction pour le bois d'épicéa. La dépendance des propriétés élastiques du bois à sa teneur en humidité est décrite par les relations établies par (Guitard 1987). À noter que

ces relations sont établies pour du bois clair (i.e. sans défauts visibles). Au cours de ce travail, nous appliquons ces relations pour le bois de structure.

En ce qui concerne les paramètres d'élasticité orthotrope du bois, nous considérons que le module élastique longitudinal à l'état initial du matériau est égal à celui identifié lors des essais de flexion à l'état initial. Ensuite, nous calculons les modules élastiques radiaux et tangentiels selon les rapports proposés par (Guitard 1987) pour les résineux (équations 1.4 jusqu'à 1.6). Le module de cisaillement longitudinal est considéré égal à celui proposé par l'Eurocode 5 pour une teneur d'humidité égale à 12%. Les modules de cisaillement dans les autres plans sont calculés selon la loi présentée par l'équation 9.3 (Guitard 1987). Quant aux coefficients de Poisson, nous considérons les mêmes coefficients que ceux proposés par (Guitard 1987).

L'ensemble des paramètres d'élasticité sont donnés dans le tableau 9.2.

$$E_L : E_R : E_T = 21 : 1.6 : 1 \quad (9.2)$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} = 10.3 : 8.9 : 1 \quad (9.3)$$

9.3.2 Expansion hydrique

Les variations dimensionnelles du bois engendrées par un changement de la teneur en humidité sont décrites par l'équation 9.4.

$$\varepsilon_x^{hyd} = \alpha_x(MC - MC_0) \quad (9.4)$$

Les coefficients de dilatation hydrique sont supposés constants et indépendants des valeurs de teneur en humidité de MC_0 à MC . Les valeurs des coefficients de dilatation hydrique employées correspondent à celles mesurées dans le chapitre 2 et qui sont données dans le tableau 2.3 (voir section 2.1.2).

9.3.3 Modélisation du comportement plastique en compression

Généralement, la modélisation du comportement plastique en compression considère le critère de Hill afin de prendre en compte l'anisotropie du comportement (Iraola; Cabrero 2016; Wang; Song; Gu 2018; Kawecki; Podgórski 2020). Ce critère représente la généralisation du critère de von-Mises pour les matériaux anisotropes. Le critère de Hill est donné par l'équation 9.5 (dans le repère de la poutre) :

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2} \quad (9.5)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (9.6)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (9.7)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (9.8)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (9.9)$$

$$M = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (9.10)$$

$$N = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (9.11)$$

Avec $R_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\sigma_c^0}$ pour $i=j$, $R_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}\sqrt{3}}{\sigma_c^0}$ pour $i \neq j$, σ_c^0 représente une contrainte de plasticité de référence et $\bar{\sigma}_{ij}$ représente la contrainte de plasticité dans la direction considérée.

9.3.4 Modèle numérique

Compte tenu du fait que le modèle de plasticité de Hill ne permet pas de séparer le comportement dans la zone en compression et en traction et afin de prendre cela en compte, nous proposons de séparer les lois de comportement appliquées selon la méthode présentée dans la figure 9.7. Dans la zone de compression, nous modélisons le comportement en compression comme étant élastique parfaitement plastique dans les 3 directions d'orthotropie (i.e. L, R et T). Les propriétés mécaniques dépendent de la teneur en humidité du matériau. En revanche, dans la zone de traction, nous considérons que le matériau est élastique fragile ayant les mêmes propriétés mécaniques élastiques et hydriques que le matériau défini dans la zone de compression. Cette séparation est justifiée par le fait qu'au cours de l'essai de flexion, une épaisseur limitée de l'échantillon plastifie et par suite cette hypothèse n'affecte pas le résultat.

L'orientation des cernes pour chaque lamelle est prise en compte au cours des simulations numériques. D'autre part, dans ce modèle nous ne considérons pas la

présence de la colle, étant donné qu'au cours du chapitre 8 nous avons vu qu'elle est suffisamment rigide par rapport au bois et qu'elle permet une transmission parfaite du chargement entre les différentes lamelles. Par ailleurs, la présence des nœuds est prise en compte implicitement par l'identification du module élastique et de la contrainte à la rupture sur des poutres ayant des nœuds. Le maillage est constitué à partir des éléments de formes cubiques et de type quadratiques C3D20R. Leurs taille caractéristique est égale à $14,4 \text{ mm}^2$

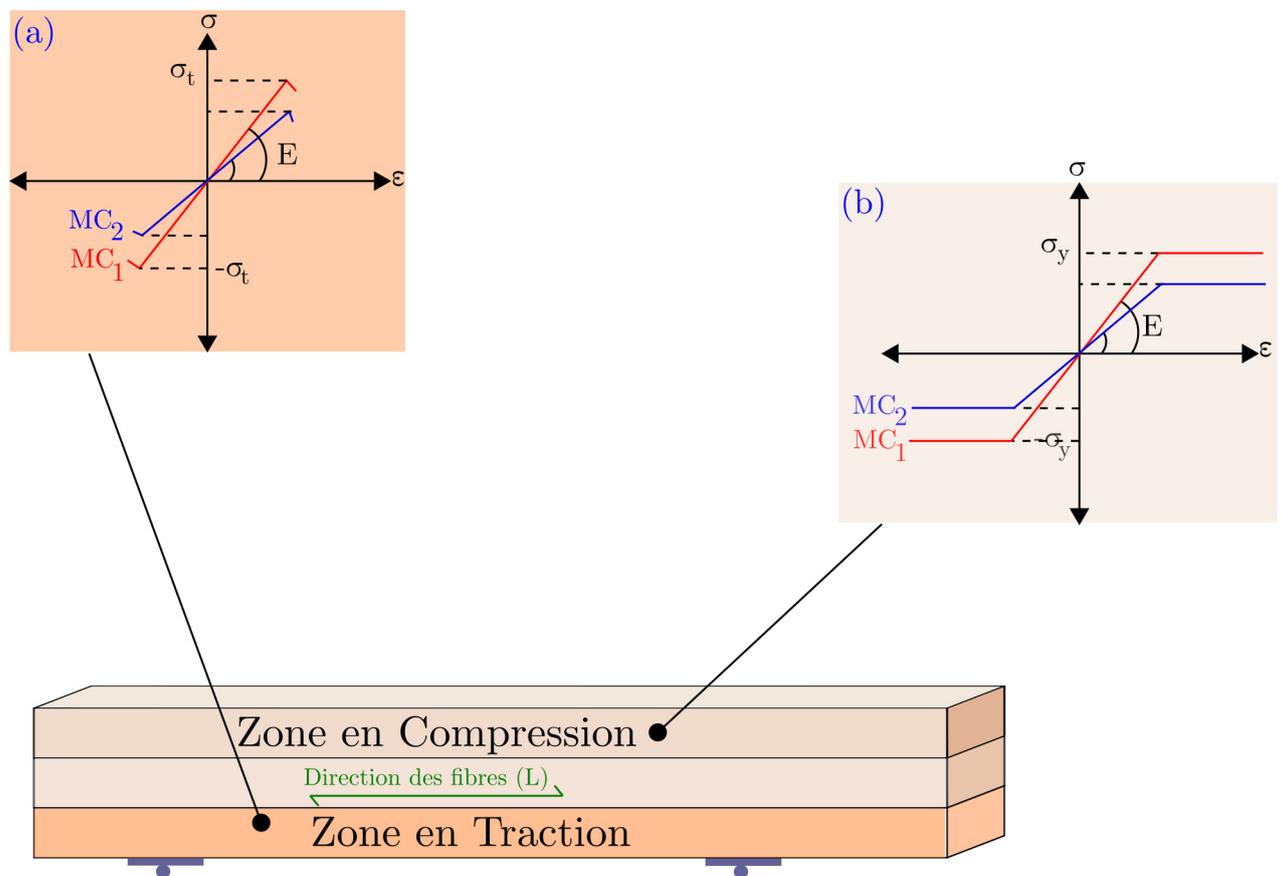


FIGURE 9.7 – Schématisation du modèle numérique employé au cours des simulations numériques. Une loi de comportement élastique linéaire est appliquée pour la zone en tension ((a)) et une loi de comportement élastoplastique est employée dans la zone en compression ((b)). Les lois de comportement en rouge sont celles pour l'état initial (MC_1) et en bleu pour un état hydrique différent (MC_2)

Propriétés du matériau

Le tableau 9.2 présente les propriétés matériau de la modélisation numérique (modules élastiques orthotropes à l'état initial).

Propriété	Valeur	unité
$E_{L, MC=9.7\%}$	14,2	GPa
$E_{R, MC=9.7\%}$	0,9	GPa
$E_{T, MC=9.7\%}$	0,57	GPa
$G_{LR, LT, MC=9.7\%}$	833	MPa
$G_{TR, MC=9.7\%}$	80,9	MPa
μ_{RL}	0,04	-
μ_{RT}	0,435	-
μ_{LT}	0,025	-

TABLE 9.2 – Caractéristiques mécaniques du bois lamellé-collé pour $MC_0 = 9,7\%$ (état hydrique initial des poutres).

Pour le modèle de plasticité nous utilisons la relation donnée par l'équation 9.12 afin de modéliser les seuils de plasticité du matériau selon les différentes directions L, R et T. Ces rapports sont similaires à ceux employés dans la littérature (Kawecki ; Podgórski 2020 ; Oudjene ; Khelifa 2009).

$$R_L : R_R : R_T = 1 : 0,12 : 0,12 \quad (9.12)$$

Dans les paragraphes suivants nous identifions la contrainte de rupture en traction et le seuil de plasticité en compression à l'état initial ($MC_0 = 9,7\%$).

Estimation de seuil de plasticité en compression à l'état initial

Généralement, le seuil de plasticité en compression est identifié à partir d'essais de compression. Nous nous basons sur la bibliographie afin d'en déduire cette valeur. (Frese ; Enders-Comberg ; Blaß ; Glos 2012) a réalisé des essais sur du bois lamellé-collé de classe de résistance GL 24h et d'une densité moyenne de $0,457g/cm^3$ pour une teneur en humidité égale à 12%. Ces essais montrent que la résistance en compression axiale du GL 24h est supérieure à celle spécifiée par la norme NF EN 14080 et est égale en moyenne à $\sigma_c^0 = 45$ MPa pour une teneur en humidité égale à 10,2 %. Nous considérons ainsi cette valeur pour la résistance

en compression à l'état initial, même si les poutres testées sont de la classe de résistance GL 28h.

Identification de contrainte de rupture en traction à l'état initial

Nous identifions la contrainte de rupture en traction à l'état initial à partir du calcul numérique réalisé avec une charge égale à 92,2 kN. La contrainte de rupture est égale à celle obtenue au niveau de la face inférieure de la poutre. La figure 9.8 montre l'évolution de la courbe force-flèche pour les 3 poutres testées expérimentalement ainsi que le résultat du calcul numérique. Nous remarquons une bonne correspondance entre les courbes expérimentales et simulées. Ceci nous permet de conclure que la contrainte à rupture en traction à l'état initial est égale à $\sigma_{t,MC=9,7\%} = 37$ MPa selon la direction longitudinale.

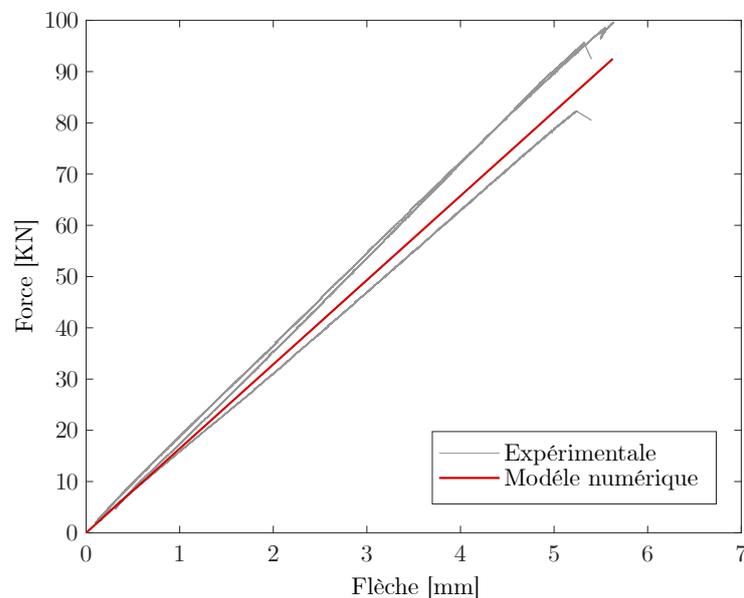


FIGURE 9.8 – Évolution de la courbe force-flèche à l'état initial pour les 3 poutres testées (en gris) et celle issue de la modélisation numérique.

Critères de rupture pour la modélisation numérique

Pour la dépendance du critère de rupture à la teneur en humidité, nous employons la relation 9.1 représentée par la figure 9.9. Nous estimons que la rupture a lieu quand la contrainte de Von Mises en zone de traction dépasse la contrainte admissible en fonction de la valeur de la teneur en humidité locale.

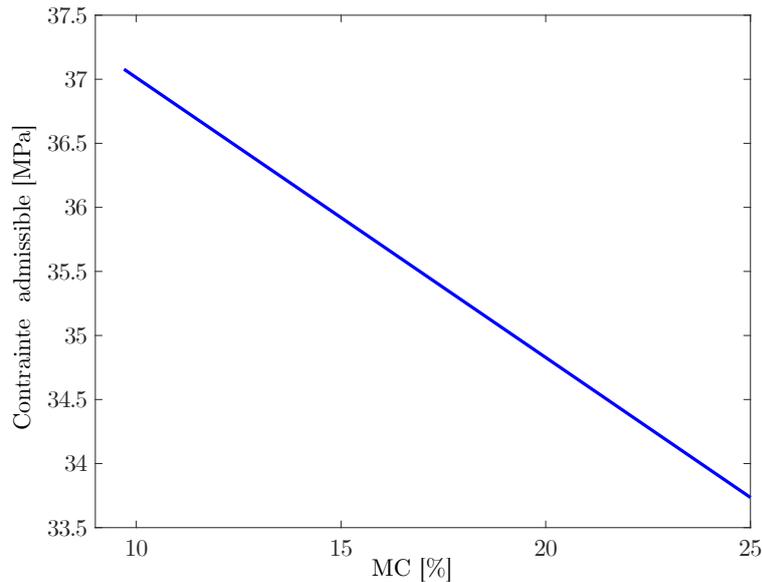


FIGURE 9.9 – Critère de rupture employé en zone de traction dans le modèle numérique.

9.3.5 Contraintes induites par la diffusion hydrique

Dans cette section nous nous intéressons aux contraintes induites par la diffusion pour les différents états hydriques étudiés. La figure 9.10 montre l'évolution des contraintes longitudinales (cette direction est confondue avec l'axe X présentée sur la figure) dans la poutre pour chaque état hydrique avec une vue sur la section au milieu de la poutre. D'après les champs présentés sur cette figure, nous remarquons que les contraintes induites dans cette direction sont non négligeables. Prenons l'exemple d'une poutre ayant initialement une teneur en humidité de 9,7% et ensuite placé pendant 29 jours dans un milieu humide et contrôlé (figure (a)). Cette poutre présentera des contraintes de compression sur les zones périphériques et des contraintes de traction au milieu de la section de l'ordre d'une dizaine de MPa.

D'après la figure 9.10, nous remarquons que les poutres conditionnées pendant 29 et 54 jours à 97% d'HR et celles placées à l'extérieur pendant 28 jours sont soumises à des contraintes de compression importantes induites par la pénétration de l'humidité dans les poutres. Cependant, après 83 jours à l'extérieur nous remarquons la présence de contraintes de traction de l'ordre de 3 MPa en surface. Ces résultats montrent que les poutres testées précédemment sont précontraintes suite à la diffusion de l'humidité. Ces contraintes seront prises en compte dans la section suivante lors de la simulation du comportement des poutres en flexion présentant des gradients d'humidités.

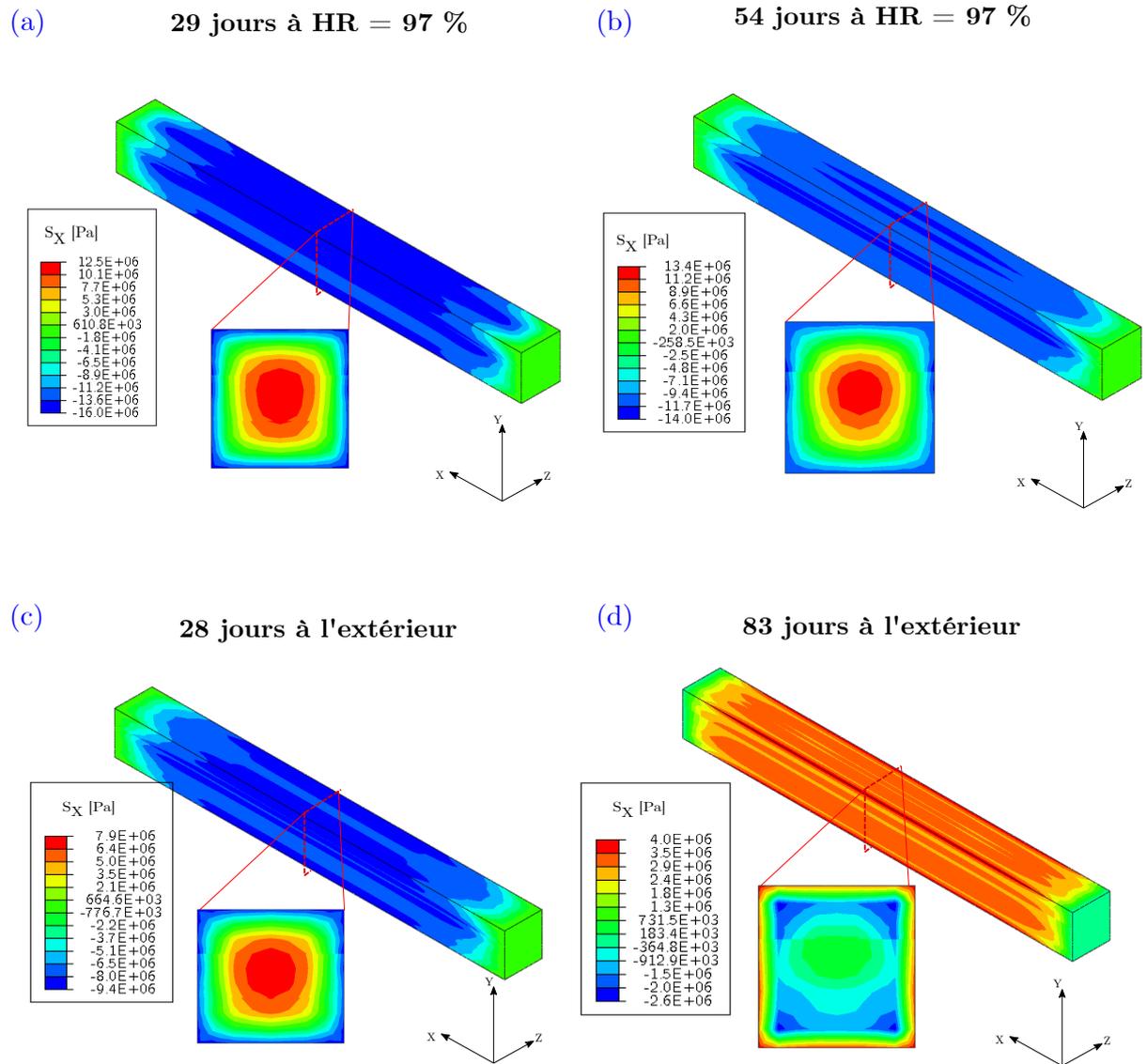


FIGURE 9.10 – Contraintes dans le sens longitudinal de la poutre (direction X) pour différents états hydriques.

9.4 Confrontation modèle-expérience

9.4.1 Estimation de la charge à la rupture

Dans cette partie nous présentons les forces à la rupture estimées à partir des simulations numériques. Les simulations sont menées avec le même modèle présenté

dans la figure 9.7 et en prenant en compte les propriétés mécaniques présentées ci-dessus. Au cours de ces simulations pour chaque état hydrique, nous considérons que la rupture a lieu quand la contrainte de Von Mises dans la zone en traction dépasse la contrainte admissible. Cette contrainte admissible dépend de la teneur d'humidité locale selon la formule proposé par le Woodhanbook et présentée dans la figure 9.9.

État hydrique des poutres	Expérimental [kN]	Modélisation [kN]	écart [%]
29 jours dans la caisse	111,7	107,5	-3,7
54 jours dans la caisse	100,9	107	6
29 jours extérieur	111,3	109	2,1
83 jours extérieur	107,3	93	-13,1

TABLE 9.3 – Comparaison entre la charge à la rupture moyenne provenant des essais de flexion et celle estimée à partir de la modélisation numérique pour les différents états hydriques.

La comparaison entre les efforts simulés et expérimentaux est donnée dans le tableau 9.3. La figure 9.11 montre la superposition des forces mesurées et calculées pour chaque état avec les contraintes calculées à la surface et au milieu de la section de la poutre.

Nous constatons que le modèle permet de reproduire l'augmentation de la charge à la rupture des poutres lors de la présence d'un gradient hydrique. Cette augmentation est due à la présence de contraintes induites par la diffusion. Étant donné que ces contraintes dans notre cas d'étude consistent en des contraintes de compression en surface et de traction au milieu de la poutre, la capacité portante des poutres augmente ainsi.

Cependant, un écart de 13% est observé entre les efforts simulés et expérimentaux pour l'état hydrique obtenu après 83 jours pour les poutres à l'extérieur. Cet écart peut être dû d'une part à l'écart type expérimental important de (écart type = 19,3 kN) et d'autre part à la manière d'appliquer le mouchetis pour réaliser les mesures de CIN pour cet état et qui était différent des autres (pour cet état, le mouchetis est appliqué à l'aide d'une bombe de peinture en appliquant tout d'abord une couche de peinture mate noire et ensuite un mouchetis à l'aide de la peinture blanche). Il est possible que l'application du mouchetis de cette manière entraîne une pénétration de la peinture au niveau des porosités du bois. Ceci peut changer la microstructure et entraîner ensuite un changement sur le comportement mécanique. D'autre part, ce mouchetis (ayant une base formée d'eau) peut augmenter localement la teneur en humidité en surface et annuler par la suite les

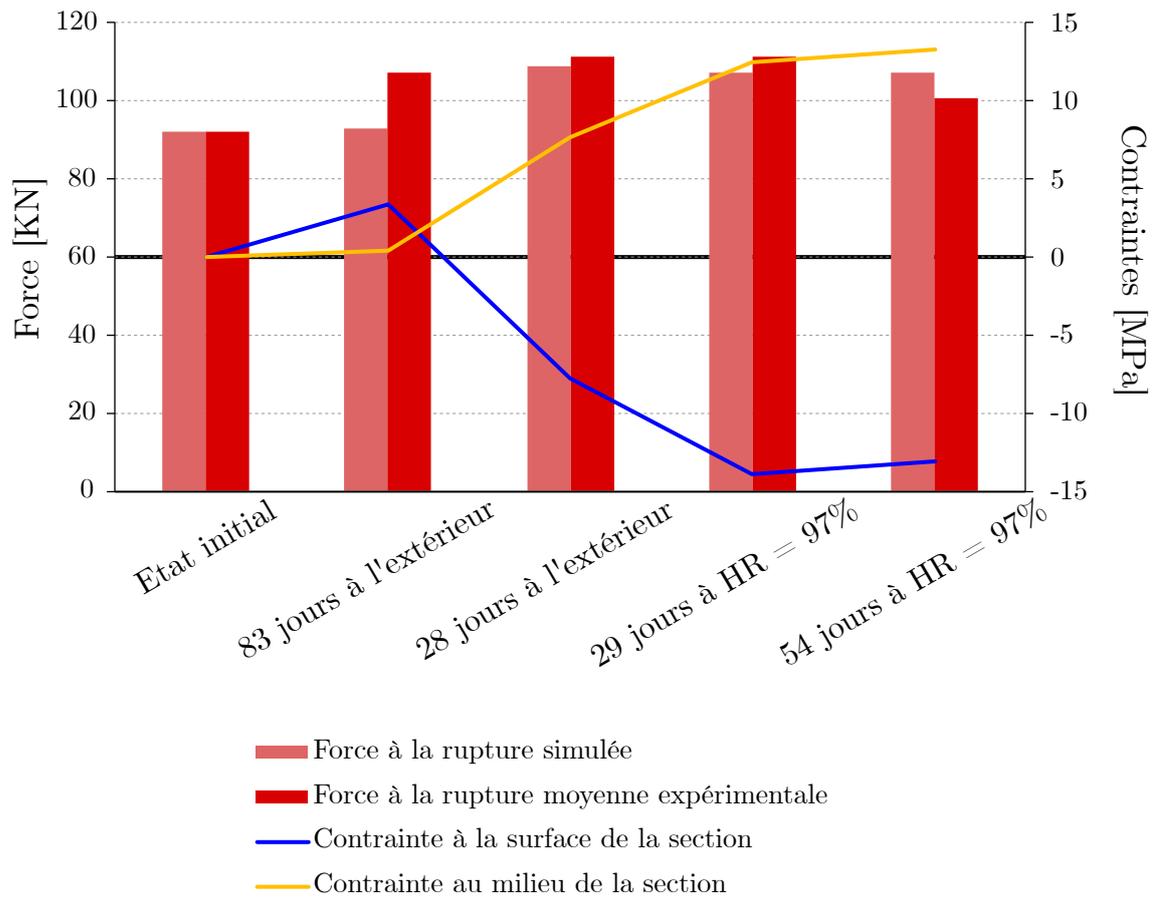


FIGURE 9.11 – Évolution des forces à la rupture expérimentales et simulées en fonction des différents états hydriques testés. L'évolution des contraintes induites par la diffusion est représentée par les courbes en bleue et en jaune.

contraintes de traction générées lors du conditionnement hydrique. Cela peut provoquer finalement une augmentation de la charge à la rupture par rapport à celle obtenue par le modèle numérique.

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que le modèle permet d'estimer avec une précision suffisante la force à la rupture.

9.4.2 Estimation de la limite élastique

Le tableau 9.4 montre la comparaison entre la limite élastique expérimentale et numérique. La limite élastique numérique est définie comme étant la charge à partir de laquelle une plasticité apparaît dans le modèle. Nous remarquons ainsi que le modèle reproduit les limites élastiques expérimentales avec un écart relatif maximal de 23% se reproduisant à deux échéances. À 54 jours dans la caisse, même si l'écart relatif est égal à 23%, l'écart absolu est égal à 9 kN ce qui reste acceptable quant à la détermination de la charge élastique. En revanche, à 83 jours à l'extérieur, l'écart relatif (égal à 21,3 %) peut être expliqué par l'écart type expérimental important survenant au cours des essais. Rajoutons à cela que la méthode de la détermination de la limite élastique expérimental et le nombre de poutres testées à chaque échéance (3 poutres) peuvent influencer les valeurs expérimentales obtenues.

TABLE 9.4 – Comparaison entre la limite élastique moyenne provenant des essais de flexion et celle estimée à partir de la modélisation numérique pour les différents états hydriques.

État hydrique	Expérimental	Écart type	Modélisation	écart relatif
Unité	[kN]	[kN]	[kN]	[%]
29 jours dans la caisse	44,3	4	51	12,9
54 jours dans la caisse	39	1,73	48	23
28 jours extérieur	63,3	8,7	58	-8,3
83 jours extérieur	68,7	21,2	83,7	21,3

9.4.3 Comportement non-linéaire avant la rupture

Nous avons pu voir précédemment que le modèle du couplage hydromécanique décrit précédemment fournit une bonne prédiction de la charge à la rupture. Nous nous intéressons maintenant à la capacité du modèle à prédire le comportement avant rupture.

La figure 9.12 montre l'évolution des courbes force-flèche pour les 3 poutres testées et celles issues du calcul numérique pour chaque état hydrique. Tout d'abord, nous remarquons que le modèle permet de reproduire la zone quasi-linéaire des courbes expérimentales. Par ailleurs, nous remarquons que le modèle reproduit les déplacements résiduels observés au cours de l'essai. Ceci montre que le modèle reproduit avec une bonne précision le comportement plastique de la poutre jusqu'au chargement de 72,5 kN (correspondant à l'effort maximal du deuxième cycle). Dès que cet effort est dépassé, une déviation importante apparaît entre les courbes expérimentales et numériques. Ceci montre qu'un autre phénomène se produit à ce stade et accentue le comportement non linéaire.

Un endommagement progressif du matériau au cours du chargement mécanique est potentiellement à l'origine de l'écart observé. En effet, certains travaux dans la littérature comme (Khennane ; Khelifa ; Bleron ; Viguié 2014) indiquent la présence d'un endommagement du matériau au cours du chargement mécanique. Cet endommagement peut avoir lieu en compression ou en traction. L'absence de loi d'endommagement dans notre modélisation peut expliquer la faible ductilité prédite par le modèle. Par ailleurs, notons que l'ajout d'une phase d'endommagement aura un effet plus important sur la flèche à la rupture que sur la force à la rupture.

Afin de compléter la modélisation précédente, des essais complémentaires seraient nécessaires pour caractériser la phase d'endommagement avant rupture à différents taux d'humidité. La réponse mécanique théorique attendue en flexion serait celle illustrée par la figure 9.13 où l'on voit un adoucissement supplémentaire dû à l'endommagement.

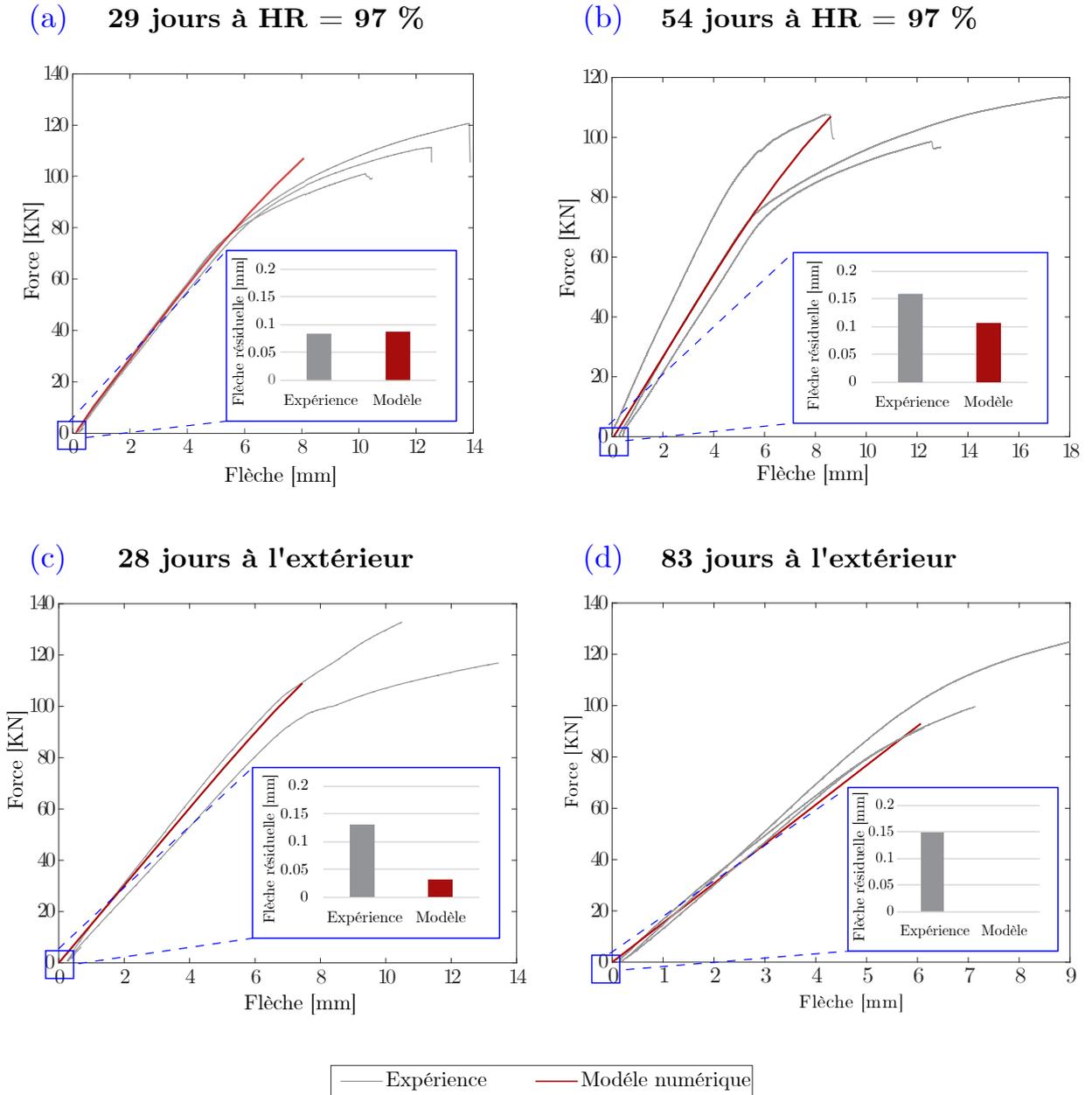


FIGURE 9.12 – Comparaison entre l'évolution de la courbe force-flèche expérimentale des 3 poutres testées (en gris) et celle issue de la modélisation numérique (en rouge) pour les différents états hydrique. Insert : zoom sur les flèches résiduelles après la deuxième décharge.

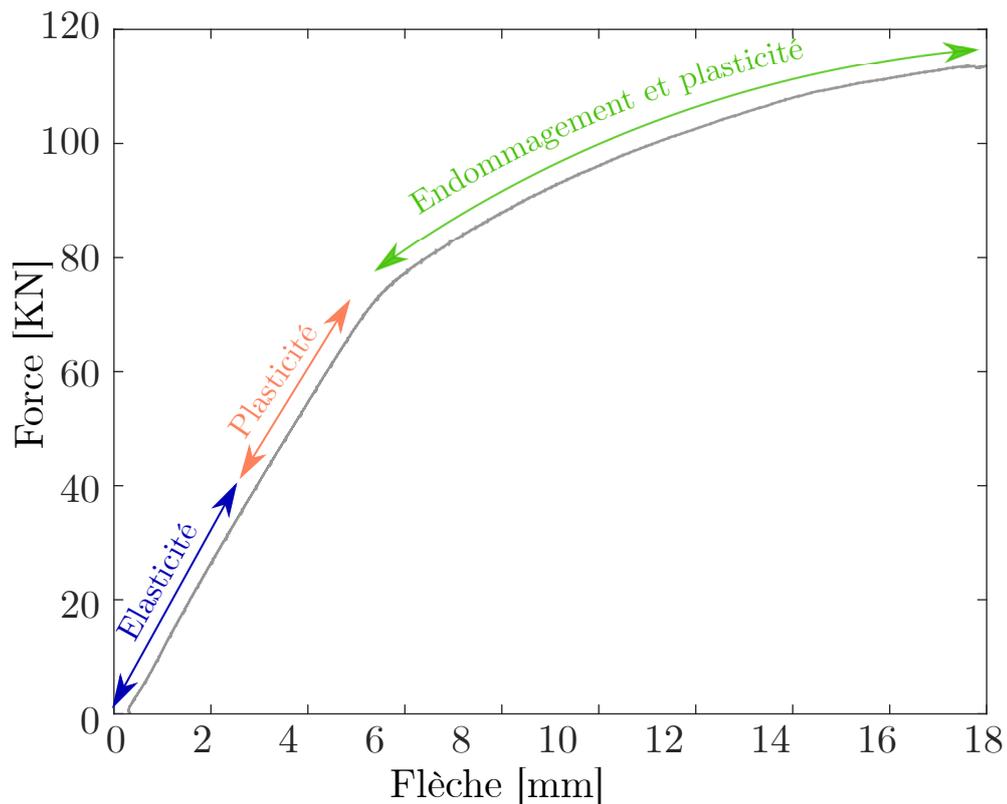


FIGURE 9.13 – Hypothèses sur les régimes élastique-plastique et sur l’endommagement observés expérimentalement.

9.5 Discussion

9.5.1 Estimation de la charge à la rupture en fonction de différents cas de pénétration de l’humidité

Étant donné que le modèle précédent fournit une bonne estimation de la charge à la rupture, on se propose de l’employer pour extrapoler la rupture d’une poutre en flexion 4 points soumise à différents scénarios de chargements hydriques.

On simule la diffusion hydrique d’une poutre ayant une teneur en humidité initiale de 9,7% et placée ensuite dans un milieu ambiant humide aboutissant à un MC équilibre = 26%. On utilise le modèle hydro-mécanique développé précédemment.

Nous investiguons l’effet de la direction de la pénétration d’humidité sur la charge à la rupture des poutres. Nous considérons ainsi 4 types de pénétration d’humidité : (a) une pénétration selon la face inférieure de la poutre, (b) une

pénétration selon la face supérieure de la poutre, (c) une pénétration selon les deux faces (supérieures et inférieures) et (d) une pénétration selon les 4 faces transversales de la poutre (voir figure 9.14).

La figure 9.14 donne l'évolution du rapport entre la force à la rupture estimée pour chaque cas et celle à l'état initial en fonction du temps.

Nous remarquons que l'état (a) représente le cas le plus favorable concernant la charge à la rupture de la poutre. En effet, au bout de 50 jours de diffusion de l'humidité une augmentation de plus de 30% de la charge à la rupture est estimée. La présence de ces contraintes générées par la diffusion de l'humidité empêche la zone en traction d'atteindre la limite de rupture et provoque ainsi une augmentation considérable de la charge à la rupture. Au delà de 50 jours, la charge à la rupture diminue mais reste toujours supérieure à la charge à la rupture de la poutre dans son état initial.

Le cas (b) montre également une augmentation de la charge à la rupture prédite mais d'une manière bien moins importante que celle du cas (a). Ceci est dû à la forte plasticité en compression qui se produit beaucoup plus tôt du fait de la contrainte de compression hydrique générée sur la face supérieure.

Le cas (c), qui combine les deux cas précédents, montre une augmentation importante de la charge à la rupture au début de la phase de diffusion (dans les 10 premiers jours). Cette augmentation est du même ordre de grandeur que celle observée dans le cas (a) mais elle est ensuite accompagnée d'une diminution de la charge à la rupture qui tend vers la charge à la rupture de la poutre dans son état initial, à cause de la répartition des contraintes suite à la plasticité du matériau en compression.

Finalement, la diffusion hydrique selon le cas (d) montre une augmentation intermédiaire de la charge à la rupture suivie par une diminution progressive où nous remarquons à partir de 200 jours que la force nécessaire pour rompre la poutre est inférieure à celle de l'état initial. Ceci est dû à la diminution des contraintes induites par la diffusion avec la progression du phénomène de diffusion.

9.5.2 Discussion par rapport à l'Eurocode 5

L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus remet en perspective le dimensionnement hydromécanique des éléments en bois selon l'Eurocode 5. Nous avons pu voir, dans un premier temps, que la présence de gradients hydriques (issus d'une phase d'humidification) augmentent la charge à la rupture des poutres en flexion. Ceci a lieu malgré la diminution de la limite de chargement élastique (de presque 60%) par rapport à celle à l'état initial et l'apparition d'une phase de comportement non-linéaire non négligeable au cours des essais.

Dans un deuxième temps, nous avons pu voir (expérimentalement) au cours de

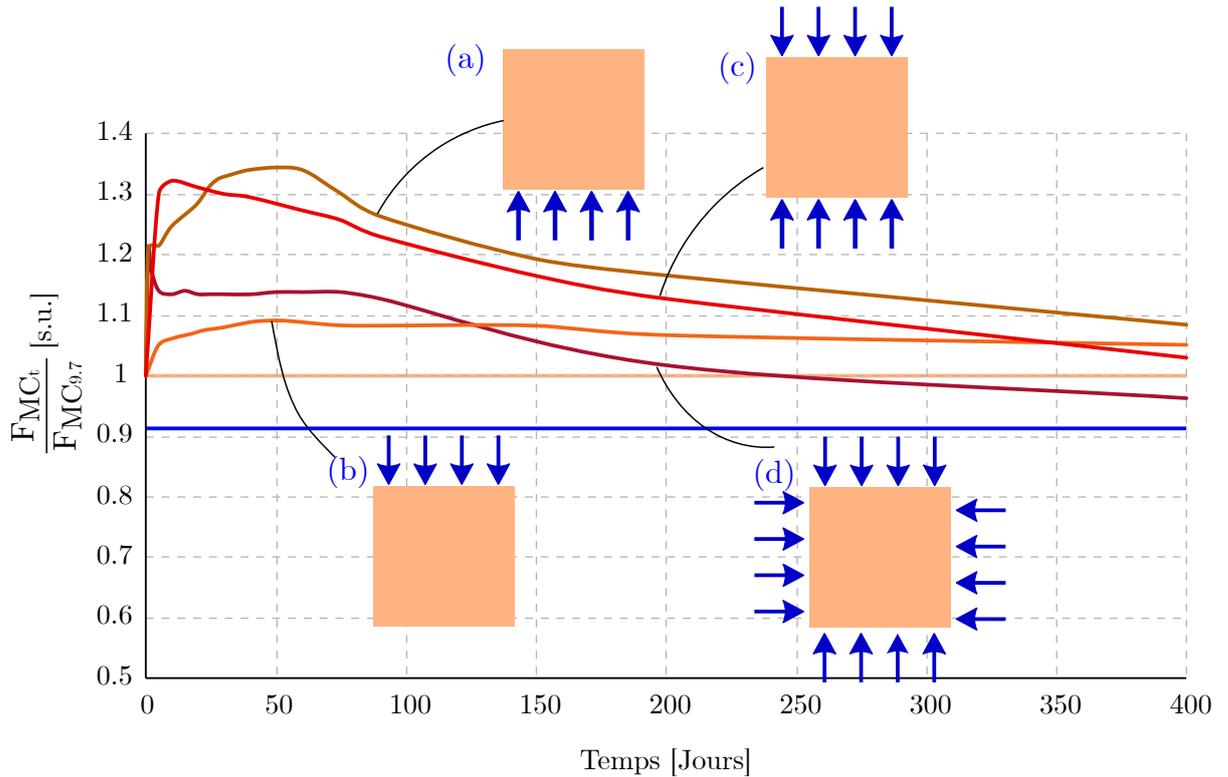


FIGURE 9.14 – Évolution du rapport entre la force à la rupture (à court terme) simulée et celle à l'état initial pour différents cas en fonction du temps. La ligne beige continue représente la charge à la rupture (à court terme) à l'état initial ($MC = 9,7\%$) et la ligne bleue continue représente celle à l'état complètement humide ($MC = 26\%$).

cette partie que le changement vers la classe de service 3 n'impacte qu'une épaisseur très limitée de l'échantillon pour les durées d'étude et les sections considérées. Ceci est en accord avec les résultats des calculs réalisés au cours de la partie II dans le cas de diffusion réelle. Ceci permet ainsi de démontrer qu'un élément en bois se retrouve rarement en classe de service 3 de l'Eurocode 5. Rajoutons à cela que même en conditions climatiques aboutissants à un dimensionnement en classe de service 3 (i.e. milieu très humide pour plusieurs semaines), l'homogénéité de la teneur en humidité dans la section nécessite un temps supérieur à « quelques semaines » (durée de conditionnement considérée par l'Eurocode 5). Tout cela démontre que des gradients hydriques sont présents en permanence dans la section d'un élément en bois.

Un exemple de plusieurs villes en France est donné par le tableau 9.15. Le nombre de semaines correspondants à la classe de service 3 varie entre 9 et 15

semaines pour trois de ces villes (Paris, Strasbourg et Brest). Dans le cas de ces villes, le dimensionnement selon l'Eurocode 5 se fait en classe de service 3. Cependant, des calculs réalisés au cours de la partie II et les expériences de diffusion dans la région parisienne réalisées au cours de cette partie montrent qu'un dimensionnement en classe de service 2 est plus pertinent puisque les valeurs de la teneur en humidité dans les sections ne dépassent les 20% qu'au bord de la section.

Ville	Nombre de semaines en classe de service 3	Classe de service selon l'Eurocode 5	Classe de service simulée
Brest	14,8	Classe 3	Classe 2
Paris	9,6	Classe 3	Classe 2
Strasbourg	12	Classe 3	Classe 2
Nice	1,7	Classe 2	Classe 2

FIGURE 9.15 – Dimensionnement pour plusieurs villes en France selon l'Eurocode 5 et selon les résultats des simulations.

Ces résultats suggèrent tout d'abord que le dimensionnement de structures en fonction de l'état hydrique peut être optimisé en réalisant un dimensionnement plus avancé que celui proposé par l'Eurocode 5 en prenant en compte un modèle de comportement plus réaliste, les dimensions des éléments considérés et les variations climatiques réelles que l'élément subit.

9.6 Conclusions

Dans cette partie, nous avons modélisé le comportement hydromécanique des poutres en tenant compte des non-linéarités plastiques apparentes en compression et du comportement fragile en traction. Par ailleurs, la dépendance à l'humidité des paramètres des lois de comportement (élasticité, seuil de plasticité en compression et rupture en traction) a été prise en compte dans la modélisation. La confrontation avec les essais en flexion 4 points montre que le modèle proposé et implémenté dans Abaqus fournit une bonne estimation de la force à la rupture. Cependant, la flèche à la rupture étant sous-estimée par le modèle numérique, une amélioration de la prédiction du modèle dans la phase non linéaire est possible par l'ajout d'une phase d'endommagement du matériau.

Pour situer ces travaux dans le cadre normatif de l'Eurocode 5 dédié au dimensionnement des structures en bois sous chargement hydromécanique, nous avons évalué la force à la rupture d'une poutre sous différentes charges hydriques. Pour les différents cas de charges étudiés, on observe que les gradients hydriques améliorent la tenue mécanique (charge à la rupture) à court terme (sous l'hypothèse d'absence des effets visco-élastiques).

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Conclusions générales

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre les effets de gradients hydriques sur le comportement mécanique du bois de structure. On s'intéresse en particulier à déterminer leurs effets sur la charge à la rupture en flexion des éléments en bois. Ce travail s'inscrit dans un contexte d'optimisation de la démarche du dimensionnement proposée par les normes actuellement en vigueur (Eurocode 5).

Nous avons commencé ce travail par le chapitre 1 qui a été dédié à une synthèse bibliographique. Ce chapitre a permis de présenter certaines caractéristiques hydriques du bois ainsi qu'une description de leurs effets sur son comportement mécanique. Il a été montré qu'il existe très peu d'études dans la littérature sur l'effet de la présence de gradients hydriques sur le comportement du bois. Nous avons également présenté l'approche proposée par l'Eurocode 5. Dans cette approche, on suppose une teneur en humidité uniforme dans l'élément dont la valeur correspond à la teneur en humidité la plus élevée atteinte dans le matériau tout en négligeant les phénomènes de diffusion hydrique dans le bois.

Le comportement hydrique du bois a été étudié dans la partie II du travail. Ceci constitue une étape importante afin d'en déduire la pertinence des hypothèses considérées par l'Eurocode 5. Nous nous sommes limités à l'état hygroscopique puisque l'étude bibliographique montre que les changements des propriétés mécaniques du bois se font majoritairement dans ce domaine.

Cette étude a permis de montrer une différence significative de la diffusion hydrique en fonction des phases d'humidification et de séchage et selon les directions d'anisotropie. Nous retrouvons ainsi une vitesse de diffusion importante suivant le sens des fibres ne donnant pas lieu à un gradient hydrique important. En revanche, nous retrouvons une diffusion plus lente selon la direction perpendiculaire au sens des fibres. Ceci engendre un fort gradient d'humidité dans l'élément. Par conséquent, dans le sens longitudinal et pour les dimensions étudiés, le changement de classe de service s'effectue d'une manière homogène dans l'élément. Cependant, le changement de classe de service selon le sens transversal ne peut pas s'appliquer sur l'ensemble de la section. En effet, une épaisseur limitée de l'échantillon peut

se retrouver en classe de service 3 alors que le reste de l'échantillon est en classe 2 et/ou 1.

Les profils expérimentaux de distribution de teneur en humidité ont ensuite fait l'objet d'une modélisation numérique au cours du chapitre 4. L'étude bibliographique présentée en début de ce chapitre a permis de justifier l'emploi d'un modèle de diffusion simple pour décrire le transfert hydrique dans le bois. Par ailleurs, l'identification des paramètres du modèle ont montré que la vitesse du séchage est plus élevée que celle en humidification. Ceci se traduit par des coefficients du modèle au cours du séchage 1,6 fois (en moyenne) supérieurs à ceux au cours de l'humidification.

Les paramètres du modèle identifiés ont ensuite été utilisés pour prédire la distribution de la teneur en humidité dans le cas de climats réels dans 4 villes en France. Cette modélisation a montré qu'un gradient hydrique existe en quasi-permanence dans l'élément et qu'une épaisseur limitée se trouve en classe de service 3 alors que le dimensionnement selon l'Eurocode 5 suppose une classe de service 3 homogène sur toute la section.

À l'issue des résultats de la partie II, nous avons cherché à déterminer l'influence de la présence de gradients hydriques sur le comportement mécanique d'éléments en bois. On s'est intéressé particulièrement au comportement en flexion 4 points de poutres de dimensions représentatives de l'échelle d'emploi. La partie III est dédiée à la présentation de cette étude. Étant donné la taille des poutres étudiées, l'emploi d'un dispositif expérimental spécifique pour contrôler et suivre la diffusion de l'humidité dans la structure a été nécessaire. Suite aux résultats de la partie II, la diffusion hydrique dans les poutre s'est fait selon les directions transversales afin de créer un gradient hydrique dans les éléments et de se rapprocher des conditions d'emploi des poutres en bois où le transfert selon la direction longitudinale est souvent inaccessible.

Le suivi de la diffusion de l'humidité par IRM et par humidimètre à pointe a montré qu'en conditions climatiques non contrôlées la pénétration d'humidité est partielle du fait des cycles thermo-hydriques. Nous avons pu démontrer qu'un modèle de diffusion simple qui prend en compte l'effet de la température sur le coefficient de diffusion permet de simuler l'état hydrique des éléments en conditions climatiques réelles. D'autre part, nous avons pu remarquer la présence d'un gradient hydrique important au sein de l'élément même après 54 jours à 97% d'HR. Ces résultats associés aux résultats de la deuxième partie mettent en évidence le fait qu'un élément en bois, ayant une taille décimétrique, a besoin de suffisamment de temps pour être en équilibre avec son milieu. L'hypothèse d'une durée de quelques semaines pour atteindre l'équilibre selon l'Eurocode 5 est donc très conservative.

Les essais de flexion ont montré que la présence d'un gradient hydrique issu

d'une humidification augmente la charge à la rupture des poutres par rapport à l'état initial (avant le début de la diffusion). Même si la présence de l'humidité diminue la rigidité en flexion du bois, elle contribue à une augmentation significative de sa ductilité. Un comportement élastique avec une rupture fragile a été observé dans le cas de faibles teneurs en humidité (état initial). Cependant, la présence de l'humidité entraîne la présence d'un comportement non linéaire qu'on a pu attribuer au cours du chapitre 7 à la plasticité apparente du bois en compression lorsque l'humidité augmente dans le matériau.

Nous avons cherché ensuite à modéliser le comportement hydromécanique du bois. Dans un premier temps, nous avons identifié les déformations induites par les transferts hydriques dans le bois à partir d'un essai de CIN sur du bois en cours d'humidification. La concordance des déformations mesurées à celles issues de la modélisation numérique nous a permis de valider l'emploi du modèle de diffusion et les coefficients d'expansion hydrique identifiés au cours de la thèse. Dans un deuxième temps, la modélisation du comportement hydromécanique du bois en flexion a été réalisée en prenant en compte la différence de comportement en compression et en traction (puisque l'humidité affecte les deux différemment) et les contraintes induites par la diffusion hydrique. Nous avons considéré un comportement élastique fragile en traction et un comportement élasto-plastique en compression. Le modèle proposé aboutit à une bonne estimation de la charge à la rupture malgré la sous-estimation de la flèche à la rupture. Ceci nous a amené à supposer qu'une perte de rigidité à la suite d'un endommagement progressif du matériau est peut-être à l'origine de cette différence de ductilité.

L'évaluation de la force à la rupture d'une poutre sous différentes sollicitations hydriques a montré que, pour les différents cas étudiés, les gradients hydriques induisent une augmentation la charge à la rupture à court terme (sous l'hypothèse d'absence des effets visco-élastiques) grâce à la présence des contraintes induites par la diffusion.

Par ailleurs, nous avons pu démontrer dans ce travail la capacité de plusieurs méthodes expérimentales à mesurer les profils hydriques dans le domaine hygroscopique (i.e. en présence de faibles quantités d'eau) telles que :

1. L'IRM en utilisant une séquence de mesure non standard dédiée aux milieux poreux,
2. L'humidimètre à pointe qui constitue une méthode d'ingénieur et qui a montré son efficacité au cours de ces travaux de thèse,
3. La mesure des variations dimensionnelles à l'aide d'un comparateur ou de la CIN en connaissant préalablement les coefficients d'expansions hydrique et en ayant recours à la modélisation numérique pour identifier le profil hydrique qui génère ces variations dimensionnelles.

Les aspects abordés au cours de la thèse comme la prise en compte des contraintes

induites par la diffusion hydrique dans le bois et la différence de comportement en compression et en traction sont souvent négligés lors du dimensionnement des éléments en bois. Leurs prises en compte peut constituer une étape importante dans l'optimisation du dimensionnement des structures en bois.

Cette étude a pu montrer que l'approche de l'Eurocode 5 est trop conservative puisqu'elle néglige les phénomènes de diffusion associés au comportement hydro-mécanique du bois. En effet, étant donné que la présence de gradients hydriques n'est pas transitoire, leur présence doit être prise en compte puisqu'ils ne s'homogénéisent jamais sur toute la durée de vie de la structure. En s'intéressant à la rupture (les effets viscoplastiques ne sont pas pris en compte), on a pu démontrer qu'une augmentation de la charge à la rupture et de la ductilité du bois est intrinsèquement liée à la présence d'un gradient hydrique. Par conséquent, appliquer le facteur de modification de la charge à la rupture (k_{mod}) de la classe de service 3 sur l'ensemble de la section aboutit à une sous-estimation importante de la charge à la rupture réelle de la structure. À l'issue des résultats de ces travaux, dans le cas des structures soumises à des conditions climatiques réelles, la modification de la charge à la rupture en fonction de la teneur en humidité peut être négligée (ceci revient à considérer $k_{MC} = 1$ et k_{mod} le même quelle que soit la classe de service). Une réduction d'environ 20% de la taille des sections peut être donc envisagée par rapport à un dimensionnement en classe de service 3.

Perspectives

Certains aspects ne sont pas étudiés au cours de cette thèse. Plusieurs travaux tant sur le plan expérimental que sur le plan de la modélisation peuvent être proposés afin de compléter cette étude.

Des essais complémentaires de compression et de traction à différentes teneurs en humidité permettraient de vérifier les modèles de comportement choisis au cours du chapitre 9 pour chacun des cas. Par ailleurs, la réalisation de ces essais permettrait d'étudier et de caractériser l'endommagement du matériau à différentes teneurs en humidité dans les deux cas de sollicitations. Ceci sera important afin d'évaluer l'éventuel endommagement du matériau en flexion. En outre, la réalisation de ces essais de caractérisation sur du bois de différentes qualités permettra d'évaluer l'effet de l'humidité en présence des défauts du bois. Une modélisation plus complète que celle réalisée dans le chapitre 9 en prenant en compte l'endommagement du matériau sera nécessaire afin de prédire le comportement non-linéaire complet de l'élément à court terme.

D'un autre côté, l'étude réalisée dans ce travail se limitait à l'étude du comportement mécanique des structures en bois dans le domaine hygroscopique puisque l'étude bibliographique a montré que les propriétés mécaniques varient essentiellement dans ce domaine. En revanche, il serait intéressant d'étudier le comportement

mécanique du bois en présence de toutes les phases d'eau : eau libre, eau liée et vapeur. Des premiers essais de mesures de profils hydriques en présence de l'eau libre par IRM ont été réalisées au cours de ce travail sur des échantillons de dimensions similaires à celles étudiées dans la partie II. Les résultats ont montré que même dans des conditions extrêmes en classe de service 3 (imbibition de 7 jours), l'épaisseur affectée par le changement vers la classe de service 3 reste limitée et dépend de la direction d'anisotropie sollicitée. À titre d'exemple, les résultats préliminaires ont montré que, selon le sens longitudinal, le changement de la classe de service 2 vers la classe 3 affecte une épaisseur de 3 cm après 7 jours d'imbibition. En revanche, cette épaisseur est de l'ordre de 1,6 cm selon le sens transversal. Ces épaisseurs en classe de service 3 sont formées à partir de plusieurs types d'eau : d'une épaisseur en présence d'eau libre (au dessus du PSF) et le reste est formé d'eau liée. Il serait donc intéressant d'étudier l'impact de la présence de cette distribution d'humidité dans le matériau sur son comportement et sa charge à la rupture en flexion et compression. En plus, une modélisation numérique qui prend en compte la présence de l'eau libre et de l'eau liée sur le comportement mécanique du bois sera intéressante afin d'étendre les conclusions de l'étude actuelle à d'autres aspects d'applications (i.e. en présence de la pluie). En outre, il serait intéressant d'étudier la diffusion hydrique dans le bois dans d'autres configurations dans le domaine hygroscopique. On peut envisager, par exemple, l'étude d'un élément de structure ayant une face en contact avec l'extérieur (HR et T réelles) et une autre face en contact avec un intérieur chauffé (i.e. la teneur en humidité est constante au cours du temps).

Enfin, étant donné qu'il s'agit au cours de cette thèse d'une étude à court terme, l'étude de l'influence de gradients hydriques sur le comportement à long terme des éléments en bois permettra d'estimer la durée de vie de la structure. Ceci peut se réaliser en prenant en compte l'effet du gradient hydrique sur la viscoplasticité et le comportement mécanosorptif du bois dans le modèle numérique.

BIBLIOGRAPHIE

- AGOUA, E. ; ZOHOUN, S. ; 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*. T. 44, n° 19, p. 3731-3744.
- AICHER, S. ; STAPF, G., 2016. Compressive strength parallel to the fiber of spruce with high moisture content. *European Journal of Wood and Wood Products*. T. 74, n° 4, p. 527-542.
- ALMEIDA, G., 2006. *Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées*. Thèse de doct. Université Laval.
- ALMEIDA, G. ; GAGNÉ, S. ; HERNÁNDEZ, R. E., 2007. A NMR study of water distribution in hardwoods at several equilibrium moisture contents. *Wood Science and Technology*. T. 41, n° 4, p. 293-307.
- AVRAMIDIS, S, 1989. Evaluation of three-variable models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Science and Technology*. T. 23, n° 3, p. 251-257.
- AVRAMIDIS, S. ; HATZIKIRIAKOS, S. G. ; SIAU, J. F., 1994. An irreversible thermodynamics model for unsteady-state nonisothermal moisture diffusion in wood. *Wood Science and Technology*. T. 28, n° 5, p. 349-358.
- AVRAMIDIS, S. ; SIAU, J. F., 1987. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood science and technology*. T. 21, n° 3, p. 249-256.
- BABIÁK, M. ; GAFF, M. ; SIKORA, A. ; HYSEK, Š., 2018. Modulus of elasticity in three-and four-point bending of wood. *Composite Structures*. T. 204, p. 454-465.

- BARONAS, R. ; IVANAUSKAS, F. ; JUODEIKIENĖ, I. ; KAJALAVIČIUS, A., 2001. Modelling of moisture movement in wood during outdoor storage. *Non-linear Analysis : Modelling and Control*. T. 6, n° 2, p. 3-14.
- BONNET, M., 2017. *Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne*. Thèse de doct. Paris Est.
- BUCHANAN, A. H., 1990. Bending strength of lumber. *Journal of structural engineering*. T. 116, n° 5, p. 1213-1229.
- CAPOROSSI, P. ; MAZZANTI, P. ; BOZZANO, F., 2018. Digital image correlation (DIC) analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso landslide (Basilicata, southern Italy) : Results from a multi-dataset investigation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. T. 7, n° 9, p. 372.
- CHINIFORUSH, A. A. ; VALIPOUR, H. ; AKBARNEZHAD, A., 2019. Water vapor diffusivity of engineered wood : Effect of temperature and moisture content. *Construction and Building Materials*. T. 224, p. 1040-1055.
- CHOAT, B. ; COBB, A. R. ; JANSEN, S., 2008. Structure and function of bordered pits : new discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. *New phytologist*. T. 177, n° 3, p. 608-626.
- CHOONG, E. T. ; SKAAR, C., 1972. Diffusivity and surface emissivity in wood drying. *Wood and Fiber Science*. T. 4, n° 2, p. 80-86.
- COLLING, F., 1995. Glued laminated timber-Production and strength classes. *TIMBER Engineering step*. T. 1, A8.
- CONNERS, T. E., 1985. *The effect of moisture gradients on the stiffness and strength of yellow-poplar (Finite elements, stress-strain model, elastic constants, wood, lumber)*. Virginia Polytechnic Institute et State University. Thèse de doct.
- CRANK, J., 1979. *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- CURRY, W. T., 1952. The Effect of Moisture Content on the Tensile Strength of Sitka Spruce : A Report on Research Carried Out on Aircraft Quality Sitka Spruce. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.
- DA SILVA, W. P. ; DA SILVA, L. D. ; DE OLIVEIRA FARIAS, V. S. ; DA SILVA, C. M. D. P. ; ATAIDE, J. S. P. de et al., 2013. Three-dimensional numerical analysis of water transfer in wood : determination of an expression for the effective mass diffusivity. *Wood science and technology*. T. 47, n° 5, p. 897-912.

- DE MEIJER, M. ; 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*. T. 58, n° 6, p. 467-475.
- DIETSCH, P. ; TANNERT, T., 2015. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Construction and Building Materials*. T. 101, p. 1259-1270.
- DROIN-JOSSERAND, A. ; TAVERDET, J. L. ; VERGNAUD, J. M., 1988. Modelling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. *Wood science and technology*. T. 22, n° 4, p. 299-310.
- DVINSKIKH, S. V. ; HENRIKSSON, M. ; BERGLUND, L. A. ; FURÓ, I., 2011 ;2010 ; A multinuclear magnetic resonance imaging (MRI) study of wood with adsorbed water : estimating bound water concentration and local wood density. *Holzforschung*. T. 65, n° 1, p. 103-107.
- DVINSKIKH, S. V. ; HENRIKSSON, Ma. ; MENDICINO, A. L. ; FORTINO, S. ; TORATTI, T., 2011. NMR imaging study and multi-Fickian numerical simulation of moisture transfer in Norway spruce samples. *Engineering structures*. T. 33, n° 11, p. 3079-3086.
- EITELBERGER, J. ; HOFSTETTER, K., 2011. A comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point : Physical background, implementation and experimental validation. *International journal of thermal sciences*. T. 50, n° 10, p. 1861-1866.
- ENGELUND, E.T. ; THYGESEN, L. G. ; SVENSSON, S. ; HILL, C. A. S., 2013. A critical discussion of the physics of wood–water interactions. *Wood science and technology*. T. 47, n° 1, p. 141-161.
- EUROCODE-5, 2005. *NF EN 1995-1-1-NA Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 Généralités - Règles pour les bâtiments*.
- FLORISSON, S. ; VESSBY, J. ; ORMARSSON, S., 2021. A three-dimensional numerical analysis of moisture flow in wood and of the wood's hygro-mechanical and visco-elastic behaviour. *Wood Science and Technology*, p. 1-36.
- FRANDBSEN, H. L., 2007. Selected constitutive models for simulating the hygro-mechanical response of wood.
- FRESE, M. ; ENDERS-COMBERG, M. ; BLASS, H. J. ; GLOS, P., 2012. Compressive strength of spruce glulam. *European Journal of Wood and Wood Products*. T. 70, n° 6, p. 801-809.

- GERHARDS, C. C., 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*. T. 14, n° 1, p. 4-36.
- GEZICI-KOÇ, Ö.; ERICH, S. J. F.; HUININK, H. P.; VEN, L. G. J. van der; 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*. T. 24, n° 2, p. 535-553.
- GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L.; JOHNSON, J. A., 2014. Investigation of historic equilibrium moisture content data from the Forest Products Laboratory. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-229, 2014; 37 p.* T. 229, p. 1-37.
- GMBH, GOM, 2016. *Digital Image Correlation and Strain Computation Basics*. GOM GmbH Braunschweig, Germany.
- GREEN, D. W., 1990. *Moisture content and tensile strength of Douglas fir dimension lumber*. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- GUINDOS, P.; GUAITA, M., 2013. A three-dimensional wood material model to simulate the behavior of wood with any type of knot at the macro-scale. *Wood science and technology*. T. 47, n° 3, p. 585-599.
- GUITARD, D., 1987. *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépaduès.
- GUITARD, D.; EL AMRI, F., 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. In : *Annales des sciences forestières*. T. 44, p. 335-358. N° 3.
- HAMEURY, S., 2006. *The hygrothermal inertia of massive timber constructions*. Thèse de doct. KTH.
- HANHIJÄRVI, A.; GALIMARD, P.; HOFFMEYER, P., 1998. Duration of load behaviour of different sized straight timber beams subjected to bending in variable climate. *Holz als Roh-und Werkstoff*. T. 56, n° 5, p. 285-293.
- HARRINGTON, J. J., 2002. Hierarchical modelling of softwood hygro-elastic properties.
- HASSANI, M. M., 2015. *Adhesive bonding of structural hardwood elements*. Thèse de doct. ETH Zurich.
- HOFFMEYER, P.; SØRENSEN, J. D., 2007. Duration of load revisited. *Wood Science and Technology*. T. 41, n° 8, p. 687-711.
- HOZJAN, T.; SVENSSON, S., 2011. Theoretical analysis of moisture transport in wood as an open porous hygroscopic material. *Holzforschung*. T. 65, n° 1, p. 97-102.

- IRAOLA, B. ; CABRERO, J. M., 2016. An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors. *Engineering structures*. T. 117, p. 332-343.
- KANG, W. ; CHUNG, W. Y. ; EOM, C. D. ; YEO, H., 2008. Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood : a numerical study. *Journal of Wood Science*. T. 54, n° 4, p. 267-277.
- KASTLER, B. ; VETTER, D., 2018. *Comprendre l'IRM : manuel d'auto-apprentissage*. Elsevier Health Sciences.
- KAWECKI, B. ; PODGÓRSKI, J., 2020. 3D Abaqus simulation of bent softwood elements. *Archives of Civil Engineering*. T. 66, n° 3.
- KHENNANE, A. ; KHELIFA, M. ; BLERON, L. ; VIGUIER, J., 2014. Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures. *Mechanics of Materials*. T. 68, p. 228-236.
- KOLLMANN, F. F. P. ; CÔTÉ, W., 1968. *Principles of wood science and technology*. Springer.
- KOUCHADE, A. C., 2004. *Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire*. Thèse de doct. Paris, ENGREF.
- KRABBENHØFT, K., 2004. *Moisture transport in wood : A study of physical-mathematical models and their numerical implementation*. Technical University of Denmark. Thèse de doct.
- LIU, J. Y., 1989. A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient. *Wood and fiber science*. T. 21, n° 2, p. 133-141.
- LIU, J. Y. ; SIMPSON, W. T., 1996. Mathematical relationship between surface emission and diffusion coefficients. *Drying Technology*. T. 14, n° 3-4, p. 677-699.
- LIU, J. Y. ; SIMPSON, W. T., 1997. Solutions of diffusion equation with constant diffusion and surface emission coefficients. *Drying Technology*. T. 15, n° 10, p. 2459-2477.
- LOULOU, L., 2013. *Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique*. Thèse de doct. Université Paris-Est.
- MACMILLAN, M. B. ; SCHNEIDER, Marc H. ; SHARP, Allan R. ; BALCOM, Bruce J., 2002. Magnetic resonance imaging of water concentration in low moisture content wood. *Wood and fiber science*. T. 34, n° 2, p. 276-286.
- MADSEN, B., 1975. Moisture content–strength relationship for lumber subjected to bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*. T. 2, n° 4, p. 466-473.

- MADSEN, B., 1982. Recommended moisture adjustment factors for lumber stresses. *Canadian Journal of Civil Engineering*. T. 9, n° 4, p. 602-610.
- MERAKEB, S., 2006. *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. Thèse de doct.
- MORLIER, P. ; RANTA-MAUNUS, A., 1998. DOL effect of different sized timber beams. *Holz als Roh-und Werkstoff*. T. 56, n° 5, p. 279-284.
- NATTERER, J. ; SANDOZ, J. L., 1987. *Construction en Bois : Matériaux, technologie et dimensionnement*. PPUR presses polytechniques.
- NAVI, P. ; HEGER, F., 2005. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois : Applications technologiques et dans les structures*. PPUR presses polytechniques.
- NAVI, P. ; SANDBERG, D., 2012. *Thermo-hydro-mechanical wood processing*. CRC Press.
- NGUYEN, D. M. ; CARE, S. ; COURTIER-MURIAS, D. ; ZHOU, M. ; COUS-SOT, P., 2021. Mechanisms of liquid imbibition in Douglas-fir inferred from 1H nuclear magnetic resonance methods. *Holzforschung*. T. 75, n° 3, p. 225-236.
- NGUYEN, T. A., 2014. *Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois*. Thèse de doct. Limoges.
- OLEK, W. ; PERRÉ, P. ; WERES, J., 2005. Inverse analysis of the transient bound water diffusion in wood.
- ORMARSSON, S. ; DAHLBLOM, O. ; PETERSSON, H., 1998. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 1 : Theory. *Wood Science and Technology*. T. 32, n° 5, p. 325-334.
- OUJENE, M. ; KHELIFA, M., 2009. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. *Construction and Building Materials*. T. 23, n° 11, p. 3359-3366.
- PENVERN, H. ; ZHOU, M. ; MAILLET, B. ; COURTIER-MURIAS, D. ; SCHEEL, M. ; PERRIN, J. ; WEITKAMP, T. ; BARDET, S. ; CARÉ, S. ; COUSSOT, P., 2020. How bound water regulates wood drying. *Physical Review Applied*. T. 14, n° 5, p. 054051.
- PERALTA, P. N., 1995. Sorption of moisture by wood within a limited range of relative humidities. *Wood and Fiber Science*. T. 27, n° 1, p. 13-21.
- PERKOWSKI, Z. ; ŚWIRSKA-PERKOWSKA, J. ; GAJDA, M., 2017. Comparison of moisture diffusion coefficients for pine, oak and linden wood. *Journal of building physics*. T. 41, n° 2, p. 135-161.
- RANTA-MAUNUS, A., 2003. Effects of Climate and Climate Variations on Strength. In : *Timber Engineering*. Sous la dir. de THELANDERSSON, Sven ; LARSEN, Hans J. United States : Wiley, p. 153-168. ISBN 978-0-470-84469-4.

- SCHIRMER, R., 1938. The diffusion coefficient water vapour-air mixtures and the rate of evaporation. *VDI Beihft Verfahrenstechnik*. T. 6, p. 170-170.
- SIAU, J. F., 1984. *Transport processes in wood*. Springer Science & Business Media.
- SIMPSON, W. T., 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and fiber science*. T. 5, n° 1, p. 41-49.
- SIMPSON, W. T., 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). *Wood Science and Technology*. T. 27, n° 6, p. 409-420.
- SIMPSON, W. T.; LIU, J. Y., 1991. Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content. *Wood Science and Technology*. T. 26, n° 1, p. 9-21.
- SKAAR, C., 1988. *Wood-water relations*. Springer Science & Business Media.
- THYBRING, E. E.; FREDRIKSSON, M., 2021. Wood modification as a tool to understand moisture in wood. *Forests*. T. 12, n° 3, p. 372.
- TIEMANN, H. D., 1906. *Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood*. US Department of Agriculture, Forest Service. N° 70.
- TIME, B., 1998. *Hygroscopic moisture transport in wood*. Norwegian University of Science et Technology Trondheim.
- UNITED STATES, Department of Agriculture, 1987. *Wood handbook : wood as an engineering material*. The Laboratory. N° 72.
- UWIZEYIMANA, P.; PERRIN, M.; LAÜGT, E.; EYMA, F., 2021. Durability study of glulam timber under cyclic moisture loading. *Construction and Building Materials*, p. 125715.
- VARNIER, M., 2019. *Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie*. Thèse de doct. Université de Limoges.
- WANG, M.; SONG, X.; GU, X., 2018. Three-dimensional combined elastic-plastic and damage model for nonlinear analysis of wood. *Journal of Structural Engineering*. T. 144, n° 8.
- WEICHERT, L., 1963. Untersuchungen über das Sorption-und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20 und 100 C. *Holz als Roh-und Werkstoff*. T. 21, n° 8, p. 290-300.
- WHITTALL, K. P.; MACKAY, A. L., 1989. Quantitative interpretation of NMR relaxation data. *Journal of Magnetic Resonance (1969)*. T. 84, n° 1, p. 134-152.
- WILSON, T. R. C., 1932. *Strength-moisture relations for wood*. US Department of Agriculture. N° 282.

- YONEYAMA, S. ; MURASAWA, G., 2009. Digital image correlation. *Experimental mechanics*. T. 207.
- ZHOU, M., 2018. *Compréhension des mécanismes de transferts d'eau dans le bois*. Thèse de doct. Paris Est.
- ZILLIG, W., 2009. Moisture Transport in Wood Using a Multiscale Approach (Vocht transport in hout op basis van een multischaal benadering).
- ZUPANC, M. Ž. ; MIKAC, U. ; SERŠA, I. ; MERELA, M. ; HUMAR, M., 2019. Water distribution in wood after short term wetting. *Cellulose*. T. 26, n° 2, p. 703-721.

Annexes



PROFILS DE DIFFUSION HYDRIQUE

Comparaison entre la teneur en humidité issue de la pesée et celles déterminée à partir des profils IRM

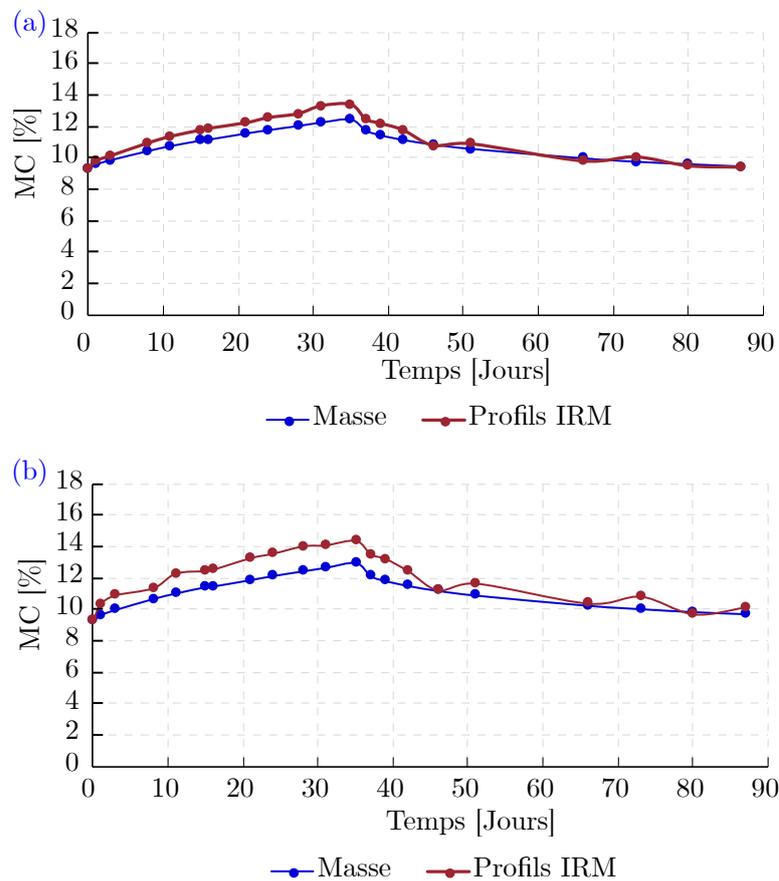


FIGURE A.1 – Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour (a) l'échantillon LC-R et (b) l'échantillon BM-R lors de l'humidification et du séchage.

Évolution des profils IRM au cours de l'humidification et du séchage des échantillons LC-R et BM-R

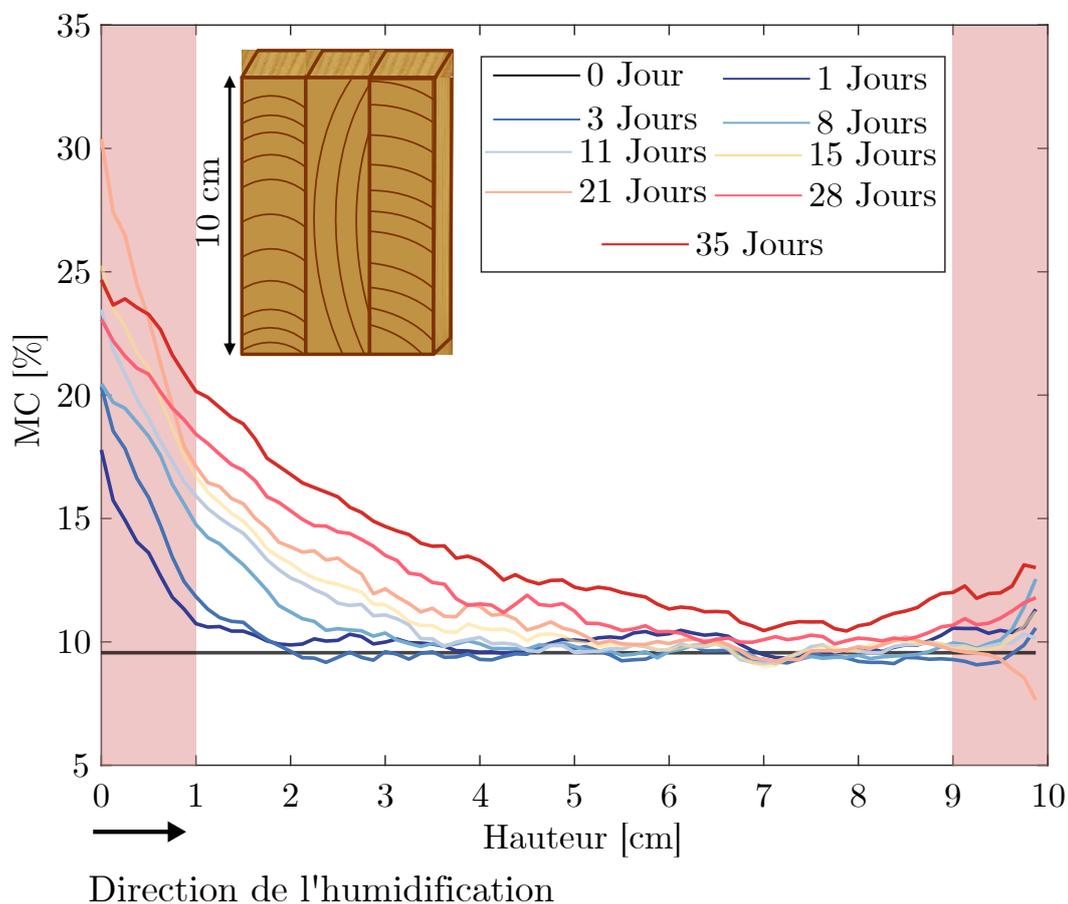


FIGURE A.2 – Évolution des profils d'humidité en fonction du temps de l'échantillon LC-R au cours de l'humidification. La direction d'humidification a lieu selon la direction transversale parallèle à la colle. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

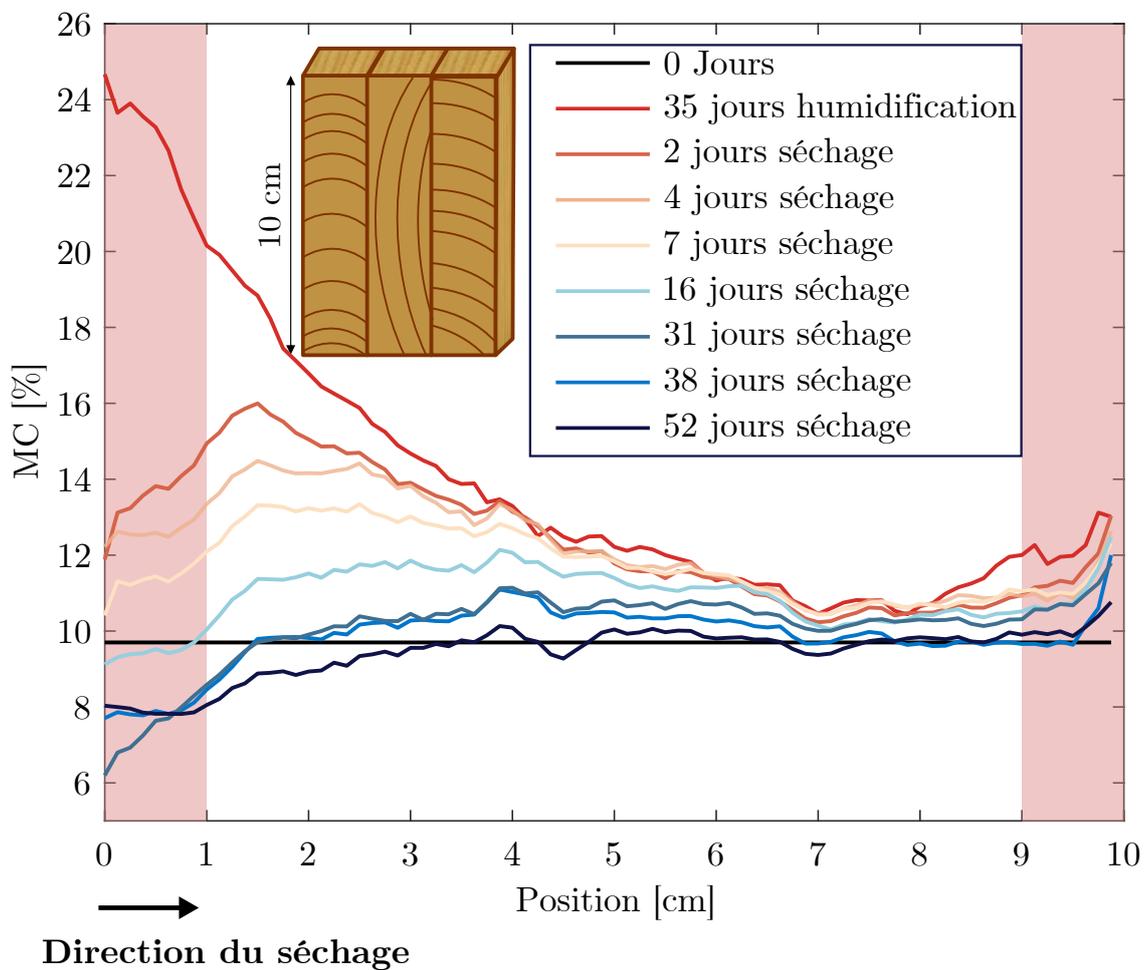


FIGURE A.3 – Évolution des profils d’humidité en fonction du temps de l’échantillon LC-R au cours du séchage. La direction de séchage a lieu selon la direction transversale parallèle à la colle. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

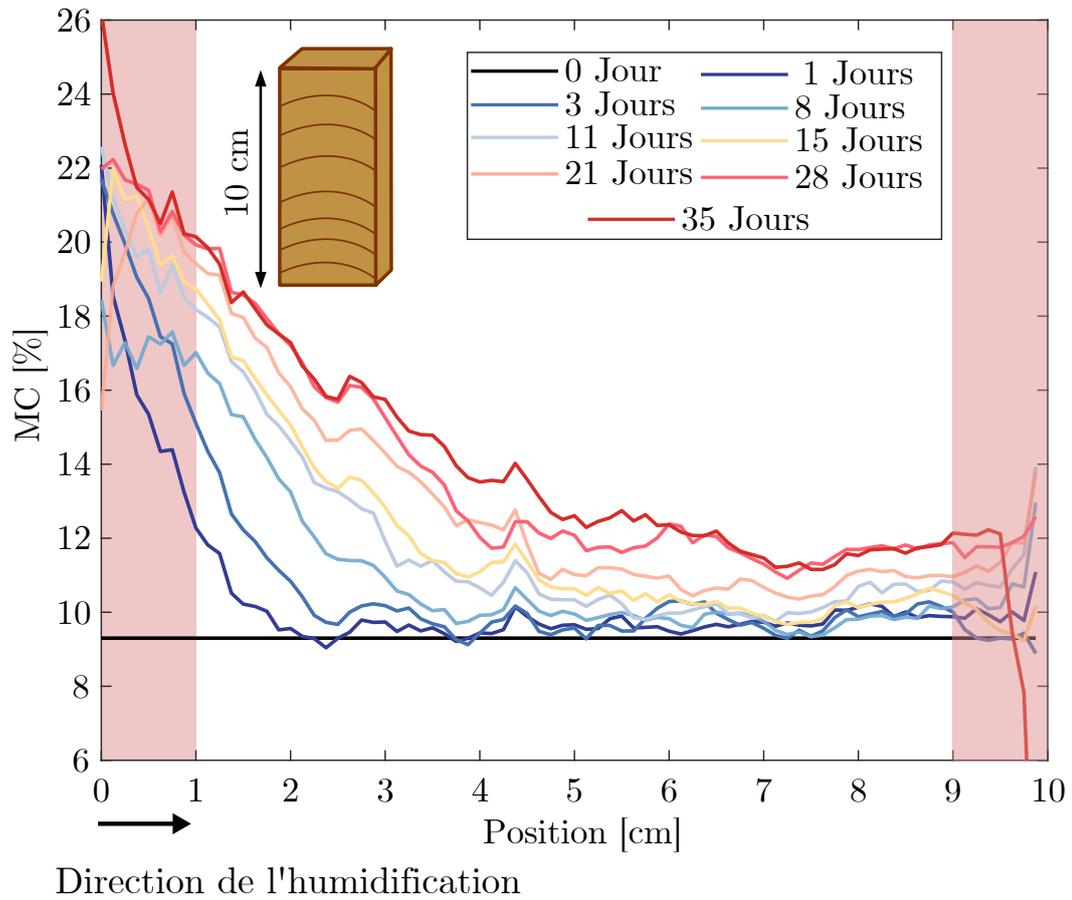


FIGURE A.4 – Évolution des profils d’humidité en fonction du temps de l’échantillon BM-R au cours de l’humidification. La direction de l’humidification a lieu selon la direction quasi-radiale. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

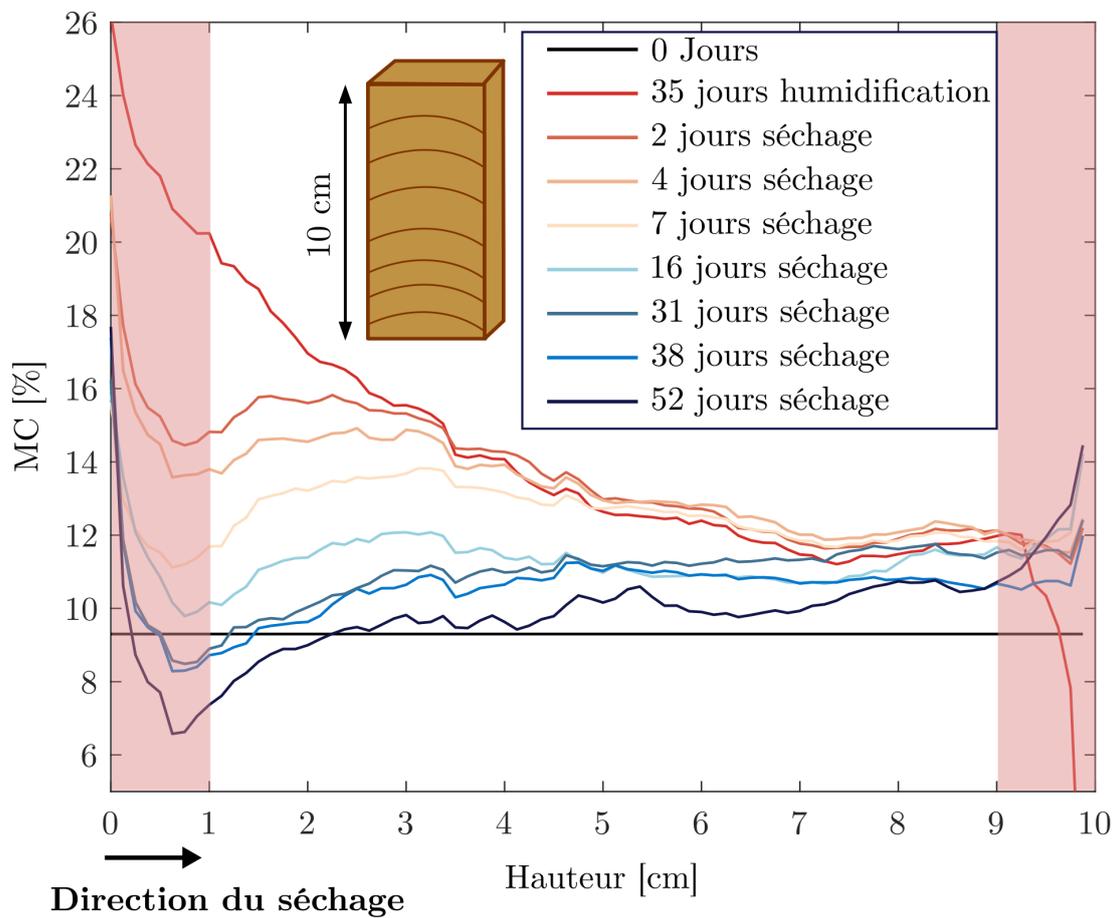


FIGURE A.5 – Évolution des profils d’humidité en fonction du temps de l’échantillon BM-R au cours du séchage. La direction de séchage a lieu selon la direction quasi-radiale. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.

Comparaison entre la teneur en humidité moyenne issue de la pesée et des simulations pour les échantillons LC-R et BM-R

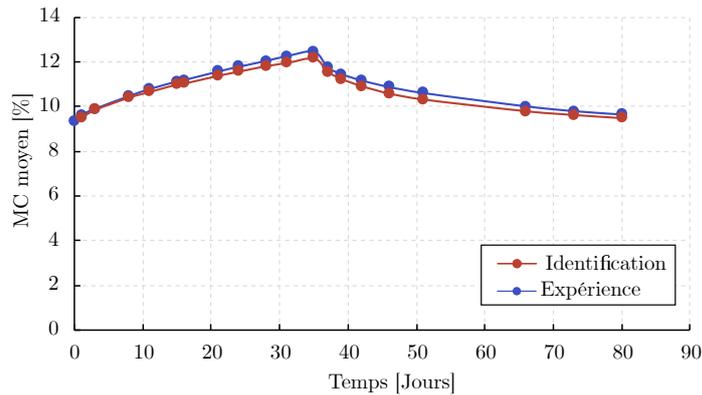


FIGURE A.6 – Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-R.

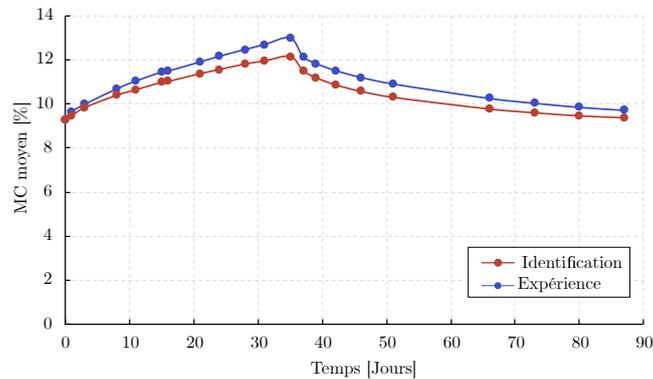


FIGURE A.7 – Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon BM-R.

Comparaison entre les profils simulés et ceux obtenus par IRM et les variations de surface pour les échantillons LC-R et BM-R

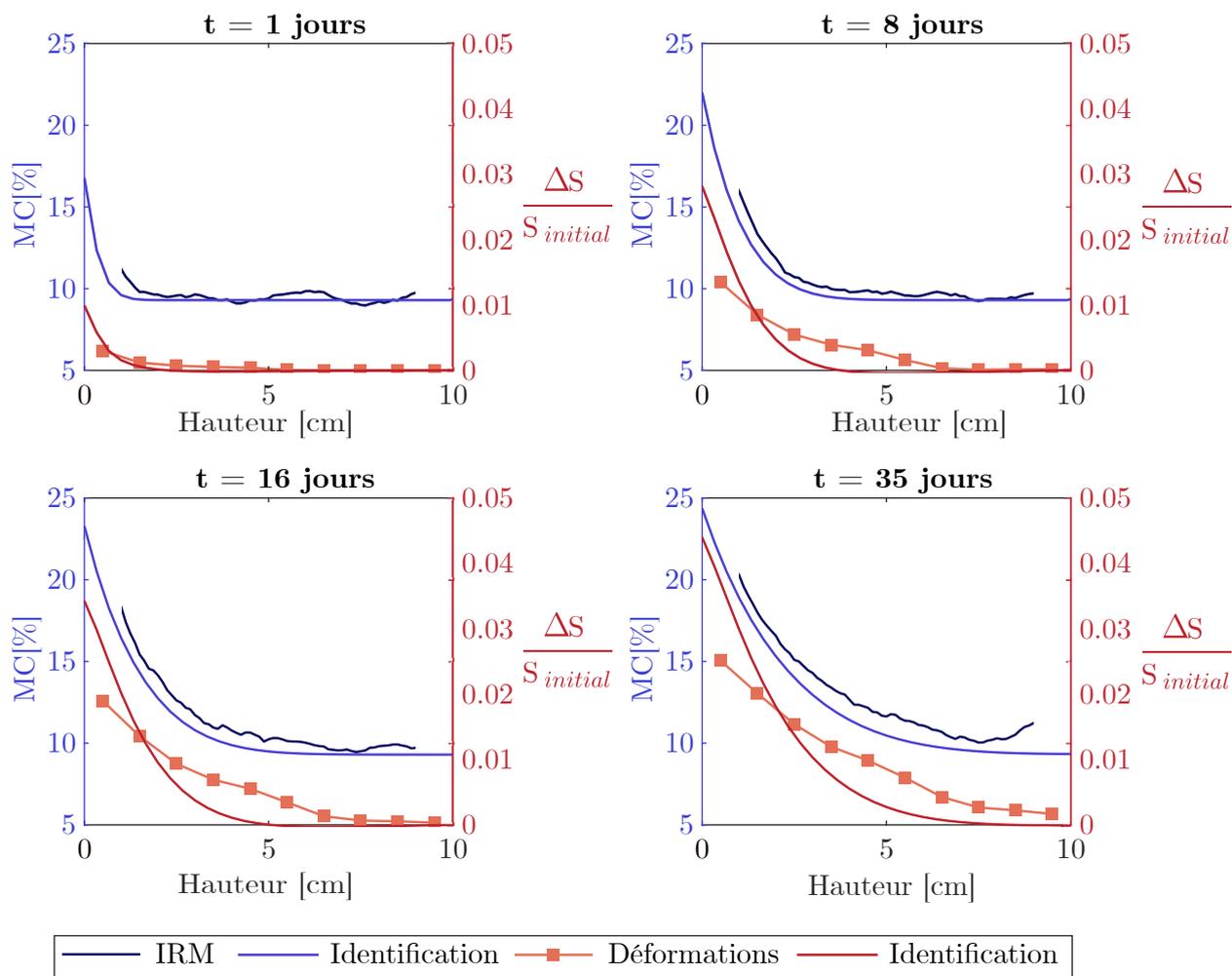


FIGURE A.8 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l’humidification de l’échantillon LC-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.

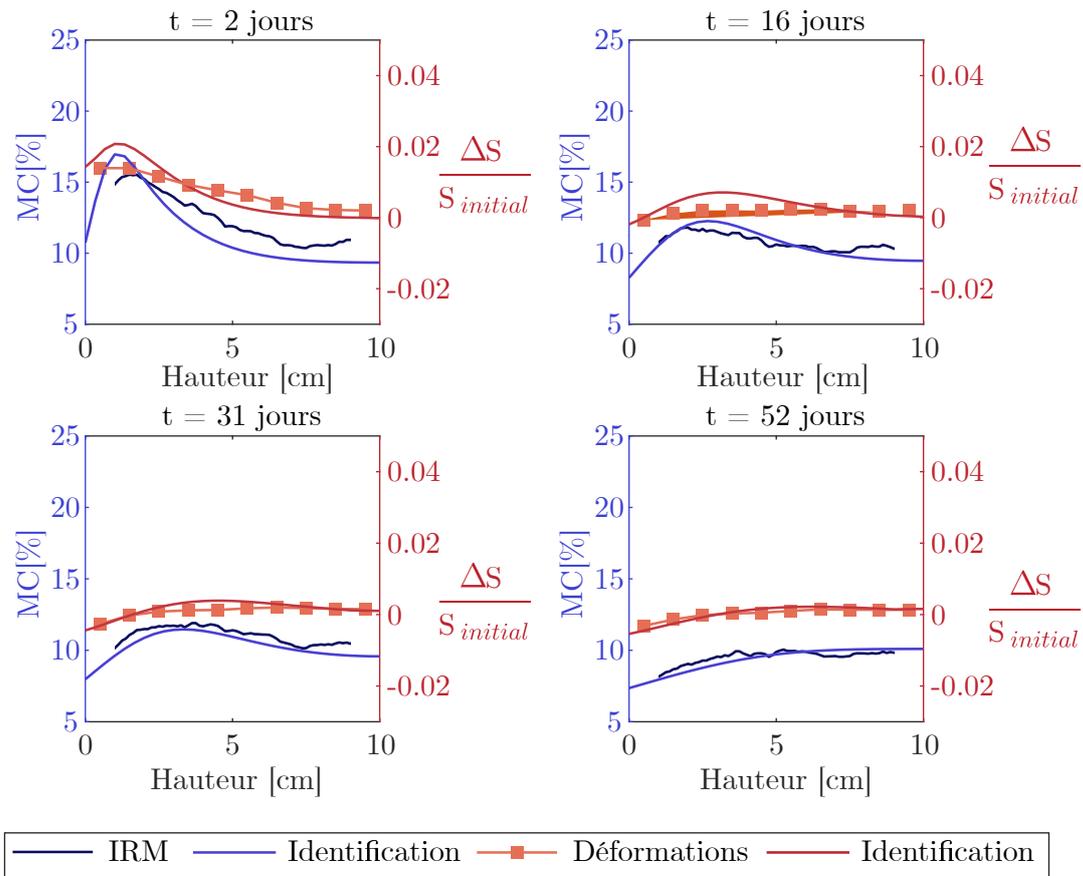
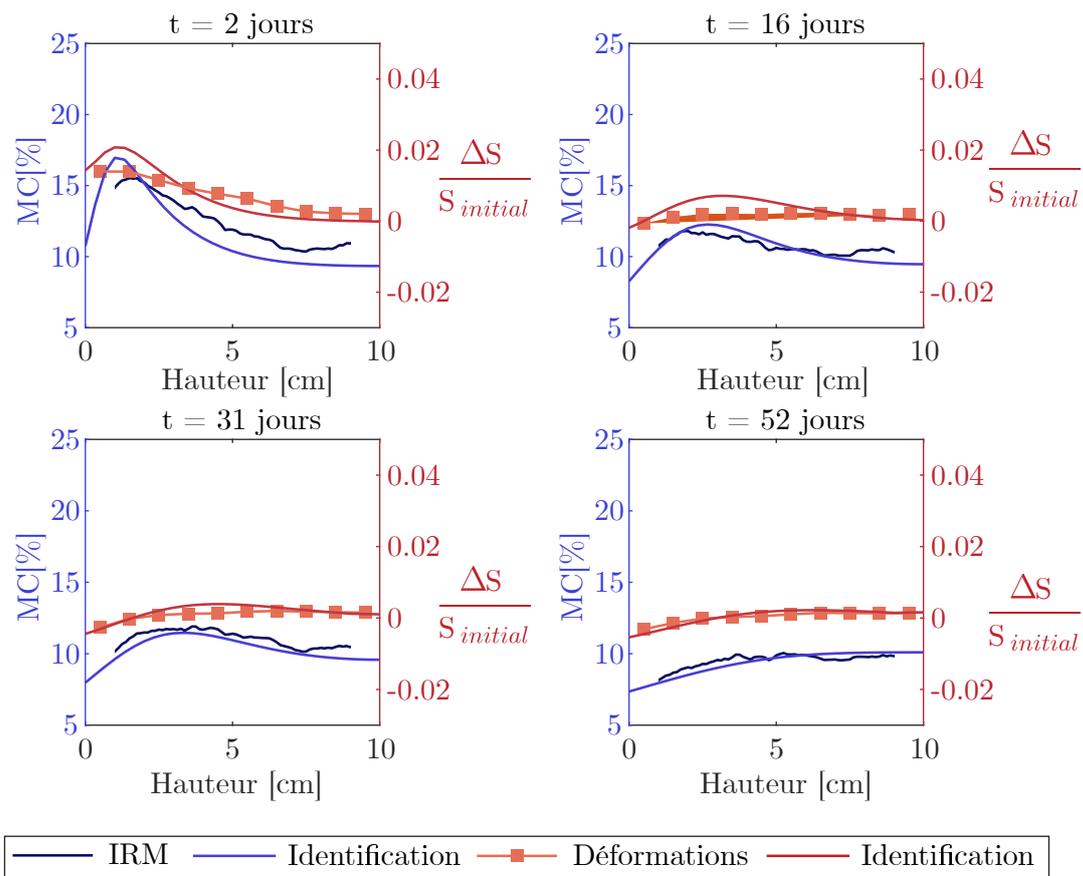


FIGURE A.9 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours du séchage de l'échantillon LC-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.



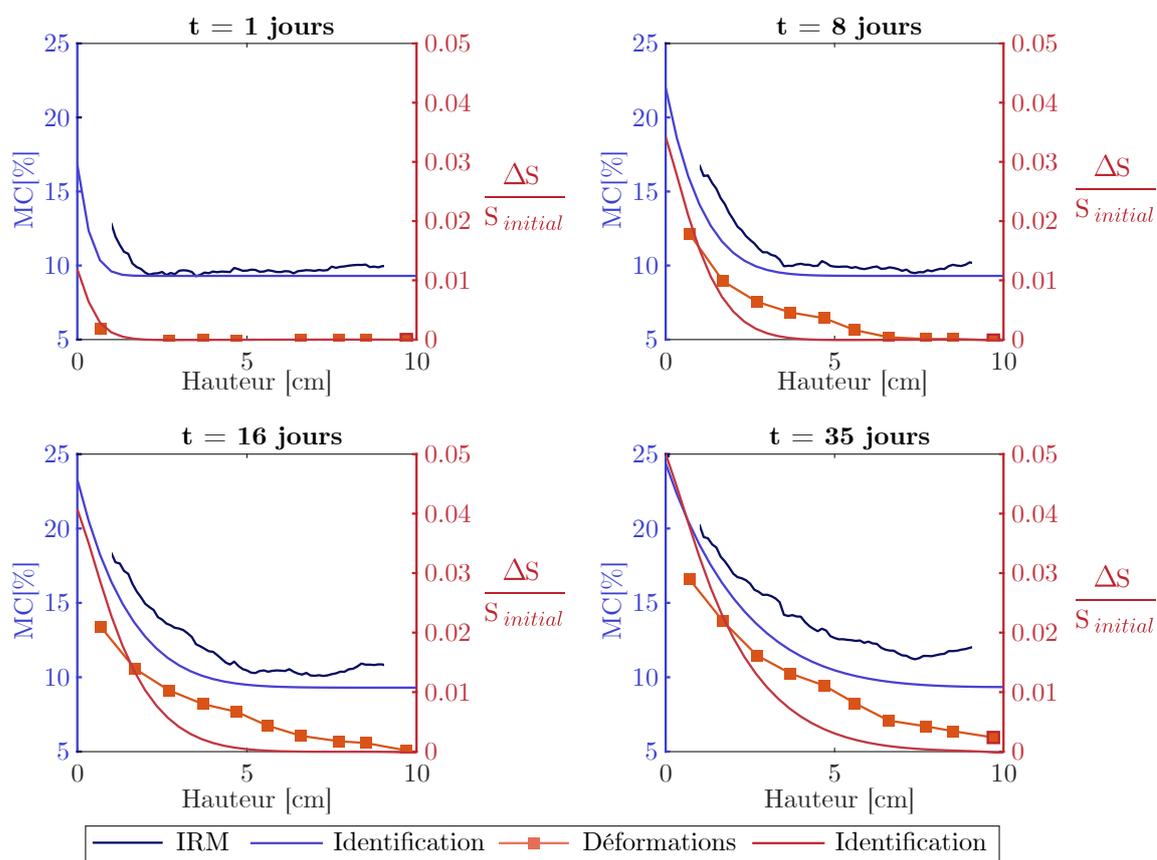


FIGURE A.10 – Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l’humidification de l’échantillon BM-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.

B

RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

Profils d'humidité mesurés après 258 jours à l'extérieur

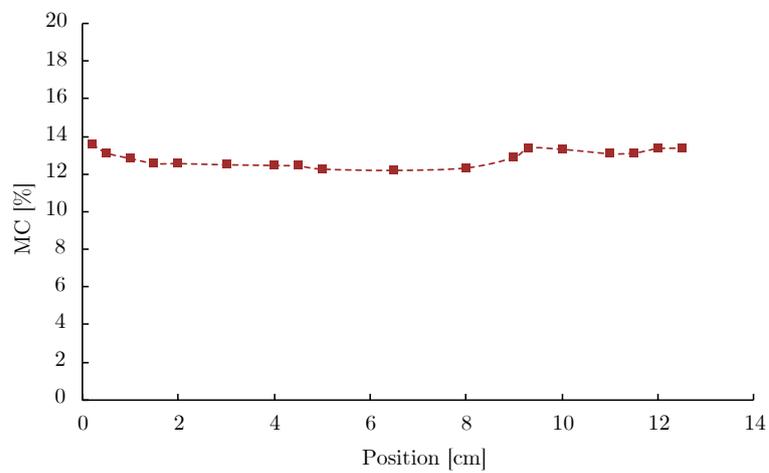


FIGURE B.1 – Profils d'humidité de l'échantillon ER2 après l'application d'un lissage. Les valeurs sont mesurées selon la direction A.

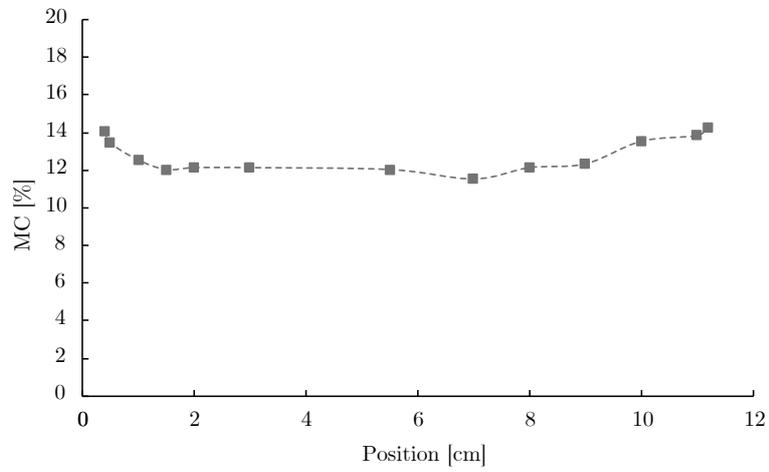


FIGURE B.2 – Profils d’humidité de l’échantillon ER2. Les valeurs sont mesurées selon la direction B1.

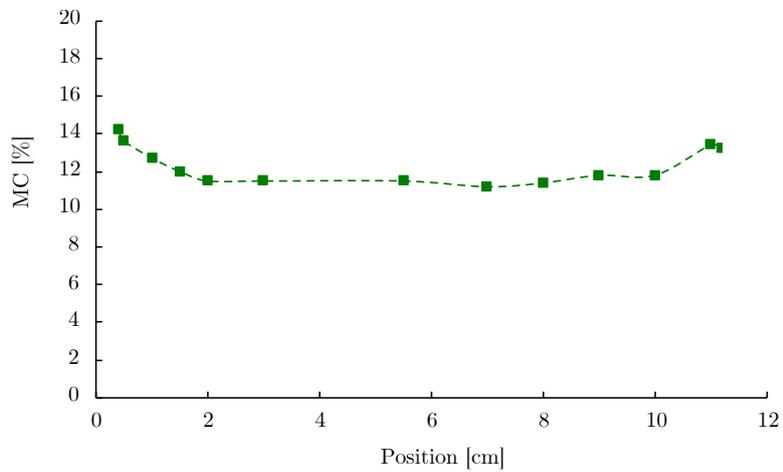


FIGURE B.3 – Profils d’humidité de l’échantillon ER2. Les valeurs sont mesurées selon la direction B2.

Courbes Force-Flèche des essais mécaniques

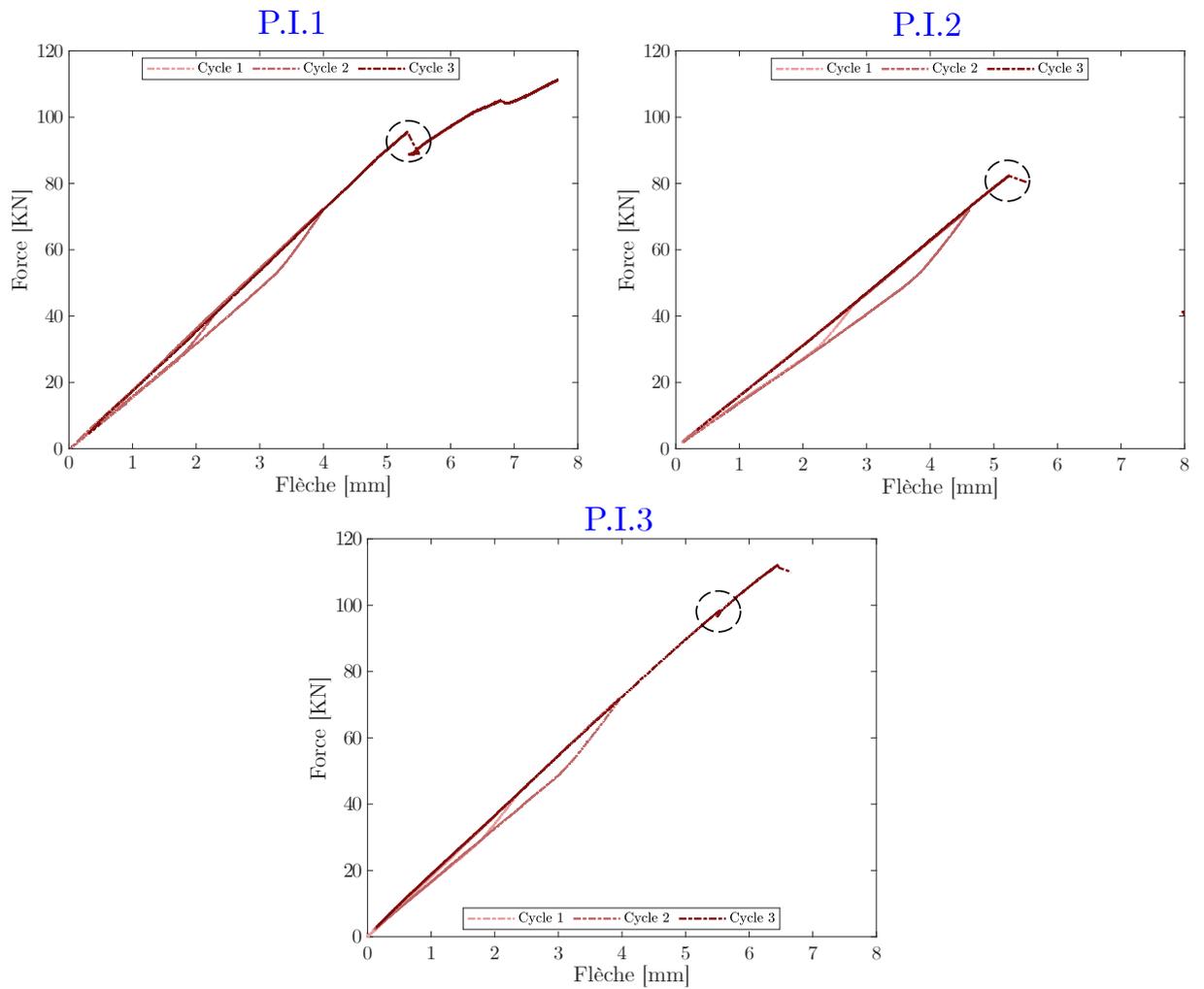


FIGURE B.4 – Courbes Force-flèche des poutres à l'état initial

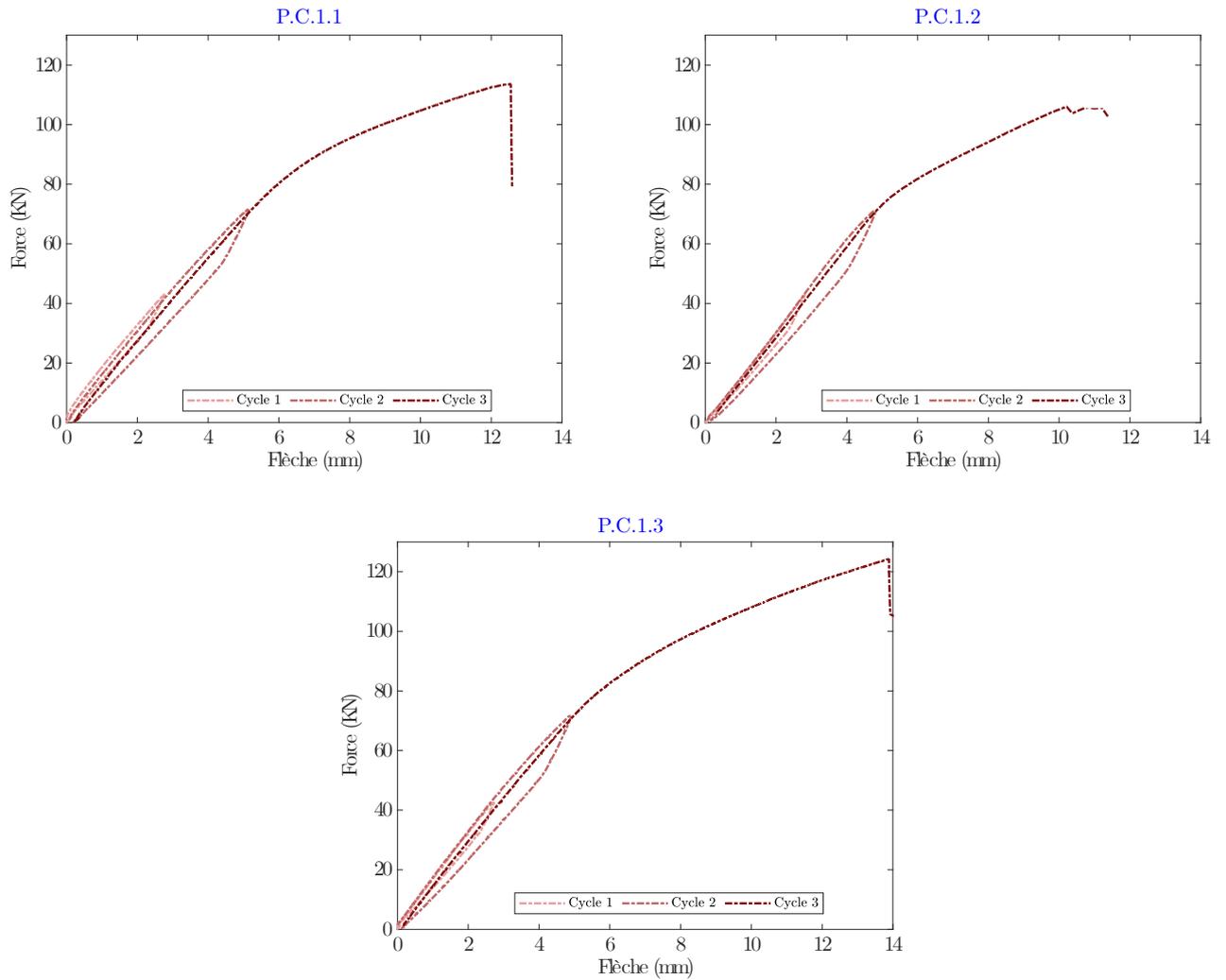


FIGURE B.5 – Courbes Force-flèche des poutres après 29 jours dans l'environnement humide contrôlé

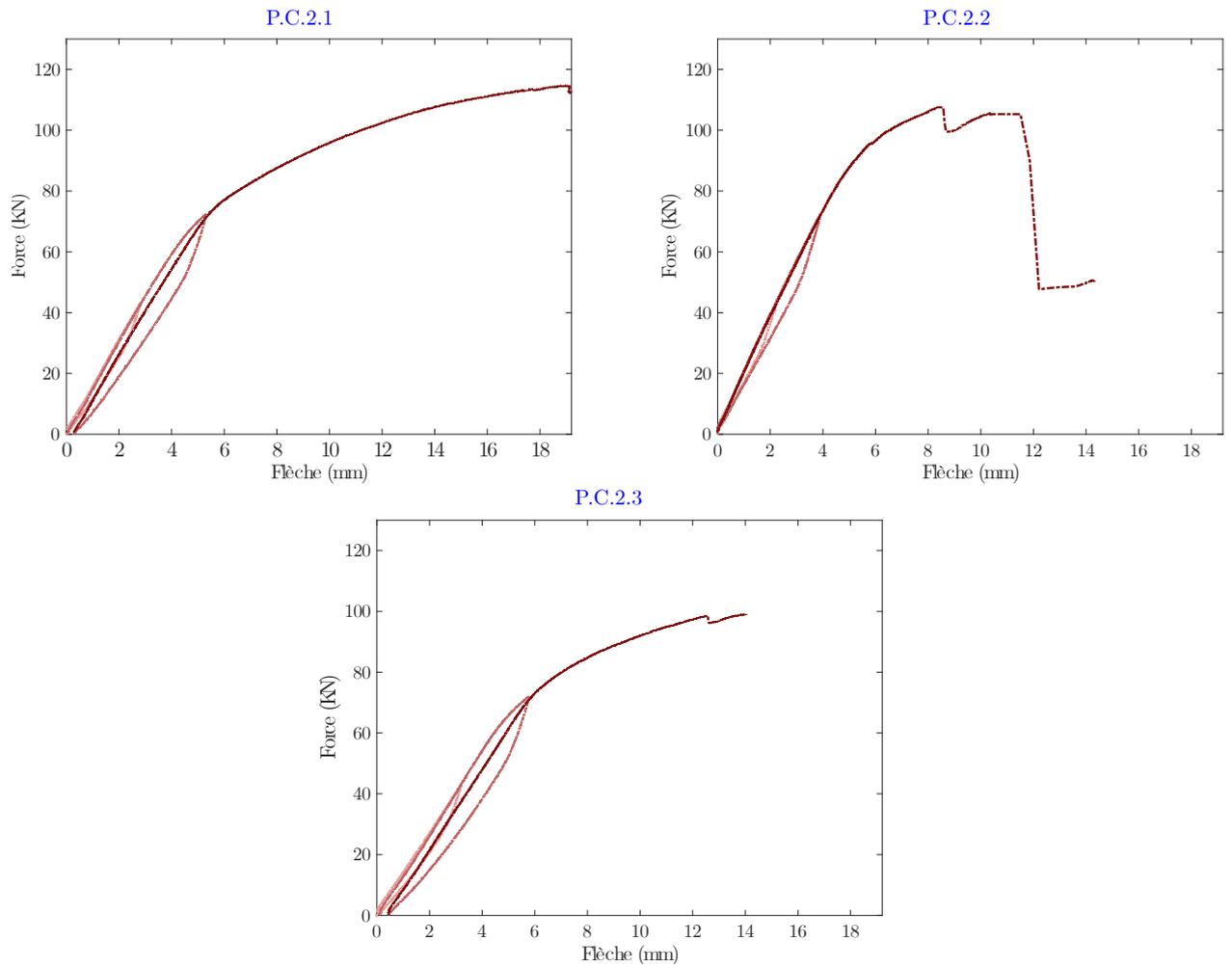


FIGURE B.6 – Courbes Force-flèche des poutres après 54 jours dans l'environnement humide contrôlé

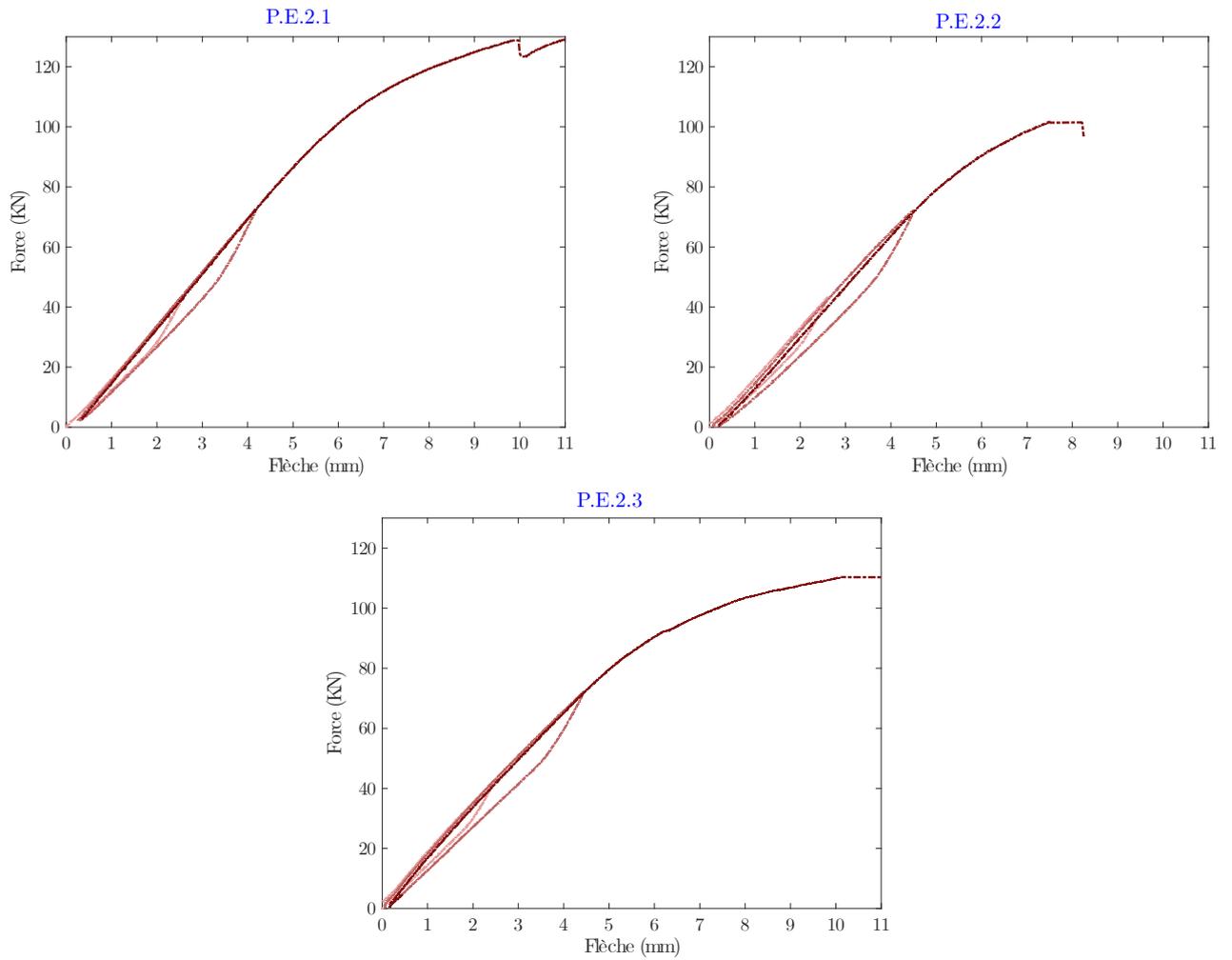


FIGURE B.7 – Courbes Force-flèche des poutres après 28 jours dans l'environnement non contrôlé.

TABLE DES FIGURES

1.1	Représentation schématique de la structure multi-échelle du bois résineux, figure extraite de (Harrington 2002).	21
1.2	Directions principales d'anisotropie du bois. Figure d'après https://slideplayer.fr/slide/10229491/	22
1.3	Vue schématique de la microstructure du bois résineux d'après (Bonnet 2017).	23
1.4	(a) Représentation schématique d'une ponctuation aréolée située sur la paroi radiale d'un résineux. (b) Image au microscope électronique à balayage (MEB) d'une ponctuation d'un résineux montrant la zone d'épaississement central (torus) et la région extérieure poreuse (marge). Extrait de (Choat ; Cobb ; Jansen 2008).	24
1.5	Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire.	25
1.6	Isotherme de sorption au cours de l'adsorption et la désorption du chêne rouge à T=30°C. Extrait de (Peralta 1995)	28
1.7	Isothermes d'adsorption et de désorption du bois de hêtre à plusieurs températures (Weichert 1963) cité par (Almeida 2006).	29
1.8	Effet de la densité sur le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa d'après (Natterer ; Sandoz 1987).	31
1.9	Effet de la température sur le module d'élasticité longitudinal de l'épicéa d'après (Gerhards 1982).	32
1.10	Déformations hydriques du bois en fonction des directions d'anisotropie d'après (Merakeb 2006).	33
1.11	Effet de la position originale d'un échantillon en bois sur le coefficient de dilatation hydrique selon la direction L d'après (Ormarsson ; Dahlblom ; Petersson 1998).	34
1.12	Évolution du module d'élasticité axial en fonction de la teneur en humidité pour de l'épicéa de différentes densités d'après (Kollmann ; Côté 1968).	35

1.13	Évolution de plusieurs propriétés mécaniques en fonction de la teneur en humidité pour de l'épicéa d'après (Kollmann ; Côté 1968).	36
1.14	Variation relative du (a) module de Young longitudinal et (b) de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en humidité pour différentes essences. Figures adaptées d'après (Gerhards 1982).	37
1.15	Effet de la teneur en humidité sur la contrainte à la rupture du bois en flexion (Madsen 1982).	38
1.16	Effet de la teneur en humidité sur : (a) la charge à la rupture en traction et (b) la charge à la rupture en compression (Wood Handbook United States 1987).	39
1.17	Évolution de la contrainte à la rupture en flexion du peuplier en fonction de la teneur en humidité (a) pour des échantillons ayant une teneur en humidité homogène et (b) en présence d'un gradient hydrique issu d'un séchage à partir de l'état vert (Connors 1985).	40
1.18	Abaque de l'équilibre hygroscopique du bois selon l'Eurocode 5.	41
1.19	Abaque du (WoodHandbook United States 1987).	42
1.20	Abaque de l'équilibre hygroscopique du bois selon l'équation fournie par (Avramidis 1989).	44
1.21	(a) Abaque de l'équilibre hygroscopique du bois selon les équations fournies par (Simpson 1973), (b) Abaque de l'équilibre hygroscopique du bois selon les équations fournies par le WoodHandbook.	45
1.22	Comparaison entre les trois différentes approches pour le calcul de l'équilibre hygroscopique à trois températures 10°C, 20°C et 40°C.	46
1.23	Humidité d'équilibre des 16 types de bois en adsorption et désorption obtenue par Spalt (1958) en gris et la courbe issue de la formule (simpson 1973) en noir d'après (Glass ; Zelinka ; Johnson 2014).	47
1.24	Comparaison entre deux approches de calcul de l'abaque de l'équilibre hygroscopique et des données issues de la bibliographie (cas des résineux).	48
2.1	Schématisation des échantillons étudiés.	58
2.2	Isotherme de sorption de l'épicéa de deux provenances différentes (P1 et P2) à T=20 °C. Les courbes en bleue correspondent aux échantillons de provenance 1 et les courbes en rouge correspondent aux échantillons de provenance 2.	60
2.3	Comparaison entre les isothermes de sorption et désorption expérimentales et l'abaque de l'Eurocode 5.	61
2.4	Mesure expérimentale des coefficients de dilatation hydrique pour le bois d'épicéa de deux provenances.	62

2.5	Évolution de HR et T dans les deux enceintes utilisées au cours de l'humidification.	63
2.6	Évolution de HR et T dans les deux enceintes utilisées au cours du séchage.	64
2.7	Principe d'une mesure par IRM.	66
2.8	Principe de la séquence FID.	67
2.9	Principe de la séquence inversion-récupération.	68
2.10	Principe de la séquence SPI.	69
2.11	(a) Illustration de principe de mesure d'un profil 1D par IRM. La résolution spatiale est considérée égale à 1,25 mm. (b) imageur par Résonance Magnétique du laboratoire Navier	71
2.12	Signal RMN obtenu pour 3 hauteurs différentes de la solution de sulfate de cuivre.	73
2.13	Illustration de la méthode pour la mesure des dimensions de l'échantillon dans le plan perpendiculaire à la direction de transfert	74
3.1	Évolution de la variation du signal RMN en fonction de la variation de masse pour les 4 échantillons étudiés au cours de l'adsorption et de la désorption. La ligne verte représente le signal donné par une solution de sulfate de cuivre ayant un temps de relaxation du même ordre de grandeur que celui de l'eau liée.	78
3.2	Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour l'échantillon LC-L lors de l'humidification et du séchage.	79
3.3	Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour l'échantillon LC-T lors de l'humidification et du séchage.	79
3.4	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps pour un échantillon de lamellé-collé pour lequel la direction d'humidification a lieu selon la direction longitudinale (échantillon LC-L). La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	81
3.5	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps d'un échantillon de lamellé-collé pour lequel la direction d'humidification a lieu selon la direction transversale perpendiculaire à la colle (échantillon LC-T). La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	82

3.6	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps d'un échantillon de lamellé-collé ayant un sens de diffusion selon la direction longitudinale (échantillon LC-L) au cours de la désorption. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	83
3.7	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps d'un échantillon de lamellé-collé ayant un sens de diffusion selon la direction transversale, perpendiculaire à la colle (échantillon LC-T) au cours de la désorption. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	84
3.8	Comparaison entre les profils de teneur d'humidité obtenus par IRM pour les 3 échantillons LC-R, LC-T et BM-R pour 4 instants différents : 1 jour, 8 jours, 15 jours et 35 jours depuis le début de la diffusion hydrique.	86
3.9	Évolution de la masse d'eau adsorbée rapportée à l'aire de la section de l'échantillon au cours de l'adsorption en fonction du temps. . . .	87
3.10	Évolution de la masse d'eau désorbée (en valeur absolue) rapportée à l'aire de la section de l'échantillon au cours de la désorption de l'humidité en fonction du temps.	88
3.11	Comparaison entre les profils de teneur d'humidité obtenus par IRM pour les 3 échantillons LC-R, LC-T et BM-R pour 4 échéances : 2 jours, 16 jours, 38 jours et 52 jours depuis le début du séchage. . . .	89
3.12	Comparaison entre la cinétique d'adsorption (lignes en tirets) et de désorption (lignes continues) de l'humidité des échantillons étudiés. . . .	90
4.1	Modes de transfert de l'humidité au sein de la microstructure du bois d'après (Krabbenhøft 2004).	96
4.2	Méthodes de détermination du coefficient de diffusion dans le cas d'un milieu semi-infini (a) et dans le cas d'un milieu infini (b) d'après (Agoua ; Zohoun ; Perré 2001).	100
4.3	Maillage et conditions aux limites hydriques et mécaniques.	104
4.4	Évolution de $MC_{équilibre}$ au cours de l'adsorption. Les chutes brutales de MC correspondent à l'ouverture de l'enceinte.	105
4.5	Évolution de $MC_{équilibre}$ au cours de la désorption.	106
4.6	Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-L.	107

4.7	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations surfaciques) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l'humidification de l'échantillon LC-L. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres sont exclus.	108
4.8	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations surfaciques) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesures au cours du séchage de l'échantillon LC-L. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres sont exclus.	109
4.9	Évolution du coefficient de diffusion longitudinal (échantillon LC-L) en fonction de la teneur en humidité au cours de l'humidification et du séchage.	110
4.10	Évolution du coefficient d'échange surfacique longitudinal (échantillon LC-L) en fonction de la teneur en humidité au cours de l'humidification et du séchage.	110
4.11	Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-T.	111
4.12	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l'humidification de l'échantillon LC-T. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	112
4.13	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours du séchage de l'échantillon LC-T. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	113
4.14	Variation du coefficient de diffusion transversal identifié au cours de l'adsorption et de la désorption en fonction de la teneur en humidité pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R.	114
4.15	Variation du coefficient d'échange surfacique transversal identifié au cours de l'adsorption et de la désorption en fonction de la teneur en humidité pour les échantillons LC-T, LC-R et BM-R.	114
4.16	Évolution de la teneur en humidité à l'équilibre des 4 régions étudiés : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiqués sur chaque graphique en bleu.	117

4.17	Enveloppes max et min de la teneur en humidité pour les 4 régions étudiées : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiquées sur chaque graphique en bleu.	119
4.18	Évolution de la teneur en humidité pour 4 positions ($X = 0, 0,5, 0,75, 4,5$ et 10 cm) pour les 4 régions étudiées : (a) Brest, (b) Paris, (c) Nice et (d) Strasbourg. Les classes de service (C.D.S) correspondantes aux valeurs de la teneur en humidité sont indiquées sur chaque graphique en bleu.	120
5.1	Dimensions des poutres testées	129
5.2	Orientations des cernes des poutres testées : (a) orientation convexe et (b) orientation concave	130
5.3	Caisse utilisée pour le conditionnement des poutres	131
5.4	Vue du dessus du dispositif de conditionnement des poutres dans la caisse. À gauche : vue globale du dispositif. À droite : un focus sur la partie inférieure de la caisse où se trouvent l'hygromètre et les échantillons de référence.	131
5.5	Évolution de l'humidité relative et de la température dans la caisse au cours de la première série (a) et au cours de la deuxième série (b).	132
5.6	Poutres à l'extérieur	133
5.7	Schéma montrant les directions de pénétration de l'humidité sur les deux types des échantillons de référence : (a) échantillon de référence (ER1) : l'humidité pénètre uniquement selon la direction verticale, (b) échantillon de référence (ER2) : l'humidité pénètre selon les 4 faces transversales	135
5.8	Humidimètre à pointe	136
5.9	Schéma montrant la répartition des points de mesures sur l'échantillon de référence type 2. Les ronds montrent les points de pénétration de l'humidimètre et la ligne tiretée entre les points représente le milieu entre les deux points de pénétration des électrodes.	137
5.10	Schéma des essais de flexion 4 points réalisés	137
5.11	Principe de la CIN d'après (Caporossi ; Mazzanti ; Bozzano 2018).	139
6.1	Évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres et de l'échantillon de référence ER2 pendant les deux séries de mesures pour les poutres en environnement contrôlé.	142

6.2	Répétabilité de la prise de masse des échantillons ER1 (figure (a)), ER2 (figure (b)) et des poutres (figure (c)) utilisés pour les deux séries de conditionnement en classe de service 3. Les courbes de la figure (c) proviennent de la moyenne effectuée sur les 3 poutres pour chaque série.	144
6.3	Évolution du signal RMN en fonction de la variation de masse pour les deux séries de mesures. La variation de masse est définie comme étant la différence entre la masse à un instant et la masse sèche (calculée après étuvage à 103°C) de l'échantillon.	145
6.4	Profils hydriques mesurés par IRM suivant la direction de diffusion des échantillons ER1 à différents instants. L'axe des X de la figure est confondue avec la direction de pénétration de l'humidité dans l'échantillon.	146
6.5	Évolution de la teneur d'humidité moyenne calculée à partir de la masse, du profil IRM complet et de la et de la moitié du profil entre $X = 0$ et $X = 6.5$ cm pour la première série (figure (a)) et la deuxième série (figure (b)) respectivement.	147
6.6	Profils hydriques mesurés sur l'échantillon ER1 de la deuxième série de mesures. La localisation de la colle (estimée) est représentée par les tirets.	148
6.7	Profils d'humidité mesurés sur l'échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure. Les valeurs sont mesurées selon la direction A. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l'échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.	148
6.8	Profils d'humidité mesurés sur l'échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure après l'application d'un lissage. Les valeurs sont mesurées selon la direction A. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l'échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.	149
6.9	Profils d'humidité mesurés sur l'échantillon ER2 au cours de la première (a) et la deuxième (b) série de mesure. Les valeurs sont mesurées selon la direction B1. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l'échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.	149
6.10	Profils d'humidité mesurés sur l'échantillon ER2 de la figure 5.7 au cours de la première (a) et la deuxième série (b) de mesures. Les valeurs sont mesurées selon la direction B2. Les zones en rouge et bleu clair représentent la partie de l'échantillon en classe de service 1 et 2 respectivement.	150

6.11	Évolution de la température, de l'humidité relative ambiantes et de la teneur en humidité d'équilibre sur la période de mesure.	151
6.12	Évolution de la teneur en humidité moyenne des poutres à l'extérieur pour deux séries de mesures (28 jours et 84 jours).	152
6.13	Signal RMN en fonction de la variation de masse de l'échantillon de référence ER1.	153
6.14	Profils de teneur en humidité locale mesurés sur l'échantillon ER1 dans le cas de diffusion dans un milieu externe.	153
6.15	Évolution de la teneur en humidité moyenne déterminée par la masse et par les profils IRM	154
6.16	Profils d'humidité mesurés avec l'humidimètre à pointe sur l'échantillon de référence ER2 dans le cas de transfert hydrique en milieu externe. Les profils sont mesurés selon la direction A comme indiqué sur la figure 5.9	155
6.17	Profils d'humidité mesurés avec l'humidimètre à pointe sur l'échantillon de référence ER2 dans le cas de transfert hydrique à l'extérieur. Les profils sont mesurés selon les directions B1 et B2 respectivement comme indiqué sur la figure 5.9	156
6.18	Épaisseur affectée par la pénétration de l'humidité dans le cas des essais à l'extérieur.	157
6.19	Axes locaux attribués à l'imageur IRM.	158
6.20	Principe de mesure de l'effet de l'orientation verticale sur le signal IRM	158
6.21	Erreur calculée pour l'effet de l'orientation verticale de l'échantillon à l'IRM	159
6.22	Erreur calculée pour l'effet de la position dans le plan de l'échantillon à l'IRM	160
6.23	Superposition des deux effets de bords mesurés précédemment avec un signal brut IRM (en bleu). La position de l'échantillon par rapport au signal brut est représenté par la double flèche.	161
6.24	Évolution de MC équilibre en fonction de temps mesuré au cours de la première série (a) et de la deuxième série (b).	162
6.25	Évolution de la teneur en humidité moyenne pour l'échantillon ER1 issue de la masse (en noir) et des simulations (en rouge)	164
6.26	Comparaison entre les profils expérimentaux mesurés par IRM au cours de la première série de mesure et les profils simulés pour l'échantillon ER1.	165

6.27	Profils de teneur en humidité à différents instants suivant les directions A, B1 et B2 de la figure 5.9 au cours de la première série de mesure en ambiance contrôlée (échantillon ER2). Les lignes continues représentent les courbes issues de la simulation numérique et les lignes tiretés avec symboles représentent les mesures expérimentales.	167
6.28	Évolution de la teneur en humidité moyenne issue de la masse (en noir) et des simulations (en rouge) pour l'échantillon ER2.	168
6.29	Évolution du coefficient D_T en fonction de la teneur d'humidité et de la température d'après Kang ; Chung ; Eom ; Yeo 2008	171
6.30	Comparaison entre les profils de MC mesurés par IRM (en noir) et profils de MC simulés (en rouge) à différentes échéances (échantillon ER1).	173
6.31	Évolution de la teneur en eau moyenne obtenue par les pesées, les profils IRM et les profils simulés. Ces mesures sont effectuées sur l'échantillon ER1.	174
6.32	Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction A de la figure 5.9 (échantillon ER2).	175
6.33	Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction B1 de la figure 5.9 (échantillon ER2).	176
6.34	Comparaison entre les profils expérimentaux et simulés de MC à différentes échéances suivant la direction B2 de la figure 5.9 (échantillon ER2).	177
6.35	Évolution de la teneur en eau moyenne calculée avec la mesure de masse et à partir des profils simulés. Ces mesures sont effectuées sur l'échantillon ER2 (échantillon de référence) dans le cas de diffusion non-isotherme.	178
6.36	État d'humidité dans les sections des poutres subissant les transferts d'humidité contrôlés dans la caisse juste avant la réalisation des essais mécaniques	179
6.37	État d'humidité dans les sections des poutres subissant les transferts d'humidités non-contrôlés à l'extérieur juste avant la réalisation des essais mécaniques	179
7.1	Cycles de chargement pendant les essais de flexion.	184

7.2	Évolution des courbes force-flèche au cours des essais de flexion pour les différents états hydriques testés. Chaque état hydrique est représenté par les courbes provenant d'une poutre. La nomenclature en parenthèse représente les poutres auxquelles les courbes appartiennent.	186
7.3	Enfoncement aux appuis mesuré à partir des capteurs LVDT pour les différents états hydriques pour deux valeurs de chargement. Chaque enfoncement représente la moyenne effectuée sur tous les poutres testés.	187
7.4	Évolution de la flèche ultime mesurée en fonction de la teneur en humidité moyenne. Les valeurs représentent la moyenne effectuée sur les poutres testées à chaque état hydrique. Le gradient hydrique présenté sur la figure représente la différence entre la teneur en humidité au centre de la poutre et celle à la surface.	190
7.5	Évolution des charges à la rupture moyennes des poutres ainsi que la teneur en humidité moyenne aux différents états de sollicitations hydriques.	192
7.6	Évolution du rapport entre la limite d'élasticité et la charge à la rupture en fonction de la teneur d'humidité moyenne pour les 5 états hydriques.	194
7.7	Évolution des déformations mesurées par les jauges en face de compression et traction.	196
7.8	(a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.C.1.3) après conditionnement pour 29 jours dans un environnement humide et contrôlé. La limite élastique est égale à 44,3 kN.	197
7.9	(a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.C.2.3) après conditionnement pour 54 jours dans un environnement humide et contrôlé. La limite élastique est égale à 39 kN.	198
7.10	(a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.E.1.2) après conditionnement pour 28 jours dans un environnement non contrôlé. La limite élastique est égale à 63,3 kN.	199

7.11	(a) zone d'étude de CIN. Les rectangles noirs sur la poutre représente l'emplacement des appuis et des points d'application des forces. (b) Évolution du champ de déformations calculé à partir des mesures CIN au cours de l'essai de flexion d'une poutre (P.E.2.2) après conditionnement pour 83 jours dans un environnement non contrôlé. La limite élastique est égale à 68,7 kN.	200
8.1	Dispositif expérimental de mesure des déformations en surface par la technique de corrélation d'images. À noter que le bac d'eau en bas de l'enceinte est utilisé pour régler le HR au cours de la phase d'humidification et il est ensuite retiré de l'enceinte au cours du séchage.	206
8.2	Évolution de l'humidité relative dans l'enceinte de conditionnement hydrique. L'échantillon subit une phase d'humidification pendant 70 jours. Au delà de 70 jours, l'échantillon subit un séchage.	208
8.3	Section de lamellé-collé observée au cours de l'essai.	209
8.4	Schématisation de la forme de la section initiale (en noir) avec la déformée après 70 jours d'absorption hydrique (en rouge) et après 42 jours de séchage (en bleu). Un facteur d'amplification égal à 8 est appliqué à la déformée. Les joints de colle sont illustrés par les tirets verts.	209
8.5	Champs de déformations équivalentes au cours de l'humidification (a) et du séchage (b) de la section de lamellé-collé.	211
8.6	Orientations des axes d'anisotropie locaux de la section observée ainsi que les axes globaux.	212
8.7	Champs de déformation selon la direction X (ε_{11}) pour les deux cas du calcul numérique : avec et sans la colle. La colle est montrée sur les cartes de déformations par l'intermédiaire des lignes noires continues.	214
8.8	Champs de déformation selon la direction Y (ε_{22}) pour les deux cas de calcul numérique : avec et sans la colle. La colle est montrée sur les cartes de déformations par l'intermédiaire des lignes noires continues.	215
8.9	Évolution de la déformation principale maximale (ε_I) moyenne en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (en noir) et expérimentalement (en rouge)	216
8.10	Évolution de la déformation principale minimale (ε_{II}) moyenne en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (en noir) et expérimentalement (en rouge)	217

8.11	Évolution de la déformation principale (ε_I notée E_{max}) en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (à droite) et expérimentalement (à gauche) pour différentes échéances au cours de la phase d'humidification.	218
8.12	Évolution de la déformation principale (ε_I notée E_{max}) en fonction du temps obtenue par le calcul numérique (à droite) et expérimentalement (à gauche) pour différentes échéances au cours du séchage.	219
9.1	Représentation « typique » de la courbe force-déplacement d'un échantillon de bois soumis à une force de traction selon la direction parallèle aux fibres de bois. Figure extrait de (Navi ; Sandberg 2012).	224
9.2	Évolution de la résistance moyenne en traction de l'épicéa en fonction de la teneur en humidité, (Curry 1952) cité par (Green 1990).	225
9.3	Représentation du comportement en compression longitudinale selon (Frese ; Enders-Comberg ; Blaß ; Glos 2012).	226
9.4	Représentation « typique » du comportement en compression transversale selon (Oudjene ; Khelifa 2009).	227
9.5	Influence de l'humidité sur la contrainte max en compression selon la relation proposée par le WoodHandbook (en rouge) et la relation utilisée dans cette étude (en bleue) adaptée des résultats du Woodhandbook et de (Aicher ; Stapf 2016).	228
9.6	Représentation « typique » de la courbe force-flèche d'une poutre en bois soumise à des efforts de flexion. Figure inspirée de (Buchanan 1990).	229
9.7	Schématisation du modèle numérique employé au cours des simulations numériques. Une loi de comportement élastique linéaire est appliquée pour la zone en tension ((a)) et une loi de comportement élastoplastique est employée dans la zone en compression ((b)). Les lois de comportement en rouge sont celles pour l'état initial (MC_1) et en bleu pour un état hydrique différent (MC_2)	233
9.8	Évolution de la courbe force-flèche à l'état initial pour les 3 poutres testées (en gris) et celle issue de la modélisation numérique.	235
9.9	Critère de rupture employé en zone de traction dans le modèle numérique.	236
9.10	Contraintes dans le sens longitudinal de la poutre (direction X) pour différents états hydriques.	237

9.11	Évolution des forces à la rupture expérimentales et simulées en fonction des différents états hydriques testés. L'évolution des contraintes induites par la diffusion est représentée par les courbes en bleue et en jaune.	239
9.12	Comparaison entre l'évolution de la courbe force-flèche expérimentale des 3 poutres testés (en gris) et celle issue de la modélisation numérique (en rouge) pour les différents états hydrique. Insert : zoom sur les flèches résiduelles après la deuxième décharge.	242
9.13	Hypothèses sur les régimes élastique-plastique et sur l'endommagement observés expérimentalement.	243
9.14	Évolution du rapport entre la force à la rupture (à court terme) simulée et celle à l'état initial pour différents cas en fonction du temps. La ligne beige continue représente la charge à la rupture (à court terme) à l'état initial (MC = 9,7%) et la ligne bleue continue représente celle à l'état complètement humide (MC = 26%).	245
9.15	Dimensionnement pour plusieurs villes en France selon l'Eurocode 5 et selon les résultats des simulations.	246
A.1	Évolution de la teneur en humidité moyenne issue des mesures par pesée et des profils IRM en fonction du temps pour (a) l'échantillon LC-R et (b) l'échantillon BM-R lors de l'humidification et du séchage.	265
A.2	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps de l'échantillon LC-R au cours de l'humidification. La direction d'humidification a lieu selon la direction transversale parallèle à la colle. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	266
A.3	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps de l'échantillon LC-R au cours du séchage. La direction de séchage a lieu selon la direction transversale parallèle à la colle. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	267
A.4	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps de l'échantillon BM-R au cours de l'humidification. La direction de l'humidification a lieu selon la direction quasi-radiale. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	268
A.5	Évolution des profils d'humidité en fonction du temps de l'échantillon BM-R au cours du séchage. La direction de séchage a lieu selon la direction quasi-radiale. La zone en rouge sur la figure représente la zone affectée par un effet de bord probable.	269

A.6	Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon LC-R.	270
A.7	Évolution de la teneur en humidité moyenne obtenue à partir des pesées et celle issue de la modélisation numérique au cours du temps pour l'échantillon BM-R.	270
A.8	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l'humidification de l'échantillon LC-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	271
A.9	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours du séchage de l'échantillon LC-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	272
A.11	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours du séchage de l'échantillon BM-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	272
A.10	Comparaison entre les profils expérimentaux (IRM et déformations) et ceux issus de la modélisation numérique pour 4 échéances de mesure au cours de l'humidification de l'échantillon BM-R. Pour les résultats obtenus par IRM les premier et dernier centimètres ne sont pas pris en compte.	273
B.1	Profils d'humidité de l'échantillon ER2 après l'application d'un lissage. Les valeurs sont mesurées selon la direction A.	275
B.2	Profils d'humidité de l'échantillon ER2. Les valeurs sont mesurées selon la direction B1.	276
B.3	Profils d'humidité de l'échantillon ER2. Les valeurs sont mesurées selon la direction B2.	276
B.4	Courbes Force-flèche des poutres à l'état initial	277
B.5	Courbes Force-flèche des poutres après 29 jours dans l'environnement humide contrôlé	278
B.6	Courbes Force-flèche des poutres après 54 jours dans l'environnement humide contrôlé	279
B.7	Courbes Force-flèche des poutres après 28 jours dans l'environnement non contrôlé.	280

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Ordres de grandeur des propriétés élastiques du bois résineux et feuillus à 12% de teneur en humidité d'après (Guitard 1987).	30
1.2	Valeurs d'équilibre hygroscopique du bois en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air (WoodHandbook United States 1987)	43
1.3	Valeurs du coefficient de modification de la résistance k_{mod} en fonction de la classe de service et du durée de chargement.	49
2.1	Densité et teneur en humidité initiales des échantillons étudiés. . .	59
2.2	Solutions salines utilisées et humidité relative théorique correspondante à la température 20°C.	59
2.3	Coefficients de dilatation hydrique pour le bois d'épicéa mesurés dans les trois directions L, R et T.	62
4.1	Teneur en humidité moyenne sur 1 an dans les 4 régions étudiées. .	116
5.1	Caractéristiques mécaniques des poutres GL 28h selon EN 14080 .	128
5.2	Planning des essais mécaniques réalisés. À noter qu'à l'état initial, l'humidité est homogène dans les poutres (MC = 9,7%).	134
7.1	Conditions hydriques des poutres testées et nomenclature associée à chaque état hydrique. x (= 1, 2 ou 3) désigne le numéro de la poutre dans chaque cas.	184
7.2	Module de Young des poutres en fonction de l'état hydrique. Ce module de Young est identifié à partir des mesures LVDT et est calculé selon l'équation 7.1. Nous rappelons qu'à l'état initial, la teneur en eau est homogène dans le volume de la poutre.	188

7.3	Évolution de la flèche ultime mesurés sur les poutres en fonction de leurs états hydriques. Les valeurs des flèches représentent la moyenne sur les 3 poutres testées pour chaque état hydrique. * L'écart type important est dû à la présence d'une poutre qui a donné un résultat aberrant.	189
7.4	Évolution de la force à la rupture moyenne en fonction de l'état hydrique des poutres. La force à la rupture présentée dans le tableau pour chaque cas de sollicitation hydrique représente la moyenne sur les 3 poutres testées.	191
7.5	Évolution de la limite élastique moyenne en fonction de l'état hydrique des poutres.	193
8.1	Coefficients de Poisson	213
9.1	Coefficients pour l'ajustement des propriétés en compression et en traction en fonction de la teneur en humidité, d'après WoodHandbook (United States 1987).	225
9.2	Caractéristiques mécaniques du bois lamellé-collé pour $MC_0 = 9,7\%$ (état hydrique initial des poutres).	234
9.3	Comparaison entre la charge à la rupture moyenne provenant des essais de flexion et celle estimée à partir de la modélisation numérique pour les différents états hydriques.	238
9.4	Comparaison entre la limite élastique moyenne provenant des essais de flexion et celle estimée à partir de la modélisation numérique pour les différents états hydriques.	240