



HAL
open science

Etude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois : application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine

Cécilia Gauvin

► To cite this version:

Cécilia Gauvin. Etude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois : application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine. Matériaux. Université Montpellier, 2015. Français. NNT : 2015MONT066 . tel-01609930

HAL Id: tel-01609930

<https://theses.hal.science/tel-01609930>

Submitted on 4 Oct 2017

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.



UNIVERSITÉ MONTPELLIER

THÈSE

pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER

Spécialité : Mécanique et Génie Civil.
Ecole doctorale : Informations, Structures, Systèmes.

**Étude expérimentale et numérique du
comportement hygromécanique
d'un panneau de bois.**
*Application à la conservation des
tableaux peints sur bois du patrimoine.*

par

Cécilia GAUVIN

Soutenue publiquement le 20 novembre 2015 devant le jury composé de :

Frédéric DUBOIS	Pr. (Université de Limoges, FR)	Rapporteur
Parviz NAVI	Pr. (EPFL, CH)	Rapporteur
Luca UZIELLI	Pr. (Università degli Studi di Firenze, IT)	Examinateur
Jean-Christophe DUPRE	C.R. (Université de Poitiers, FR)	Examinateur
Bertrand MARCON	Dr. (Arts et Métiers Paristech, FR)	Examinateur
Joseph GRIL	D.R. (LMGC, FR)	Directeur de thèse
Delphine JULLIEN	M.C. (LMGC, FR)	Encadrante de thèse
Marina BOUSVAROU	(Musée Fabre, FR)	Invitée

À la liberté d'expression et à la liberté d'offenser.

Curriculum vitae

Cécilia Gauvin

Née le 20 avril 1988 à Nîmes

Formation

Docteur en mécanique	2012 – 2015
École Doctorale Information Structures Systèmes spécialité mécanique et génie civil Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier, UMR CNRS 5508	
Ingénieur Matériaux	2008 - 2012
Double cursus Master 2 recherche Matériaux innovants Polytech'Lyon, École Polytechnique Universitaire de Lyon I	
CPGE Physique-Chimie	2006 - 2008
Lycée Leconte de Lisle, Saint-Denis, La Réunion	

Expérience

Pendant la thèse	10/2012 - 09/2015
<ul style="list-style-type: none">• Mission complémentaire d'enseignement au département Mécanique de la Faculté des sciences de l'université de Montpellier• Encadrement de quatre stagiaires (niveau Licence 2, IUT 2ème année et équivalent master 2)• Participation au Summer Program de la Japan Society for Promotion of Science, expérience de deux mois dans le Laboratory of Biomaterials Engineering, Graduate School of Life and Environmental Sciences, Tsukuba University sous la direction de Eiichi Obataya, 06-08/2013, Tsukuba, Japon• Participation à une école de formation de l'action European Cooperation in Science and Technology (Cost) FP0904 : « Numerical Implementation of Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour », 02/2014, Bordeaux, France• Participation au module de formation Forêt Tropicale Humide d'AgroParisTech, 09/2014, Guyane, France	
Stage de recherche en Mécanique de l'Arbre et du Bois	04/2012 - 08/2012
Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR CNRS 5508 Direction Delphine Jullien <i>Expérimentation hygromécanique sur maquettes de bois en vue de la compréhension des dégradations des panneaux peints du patrimoine</i>	

- Stage de chargée de mission** au sein du musée de Villèle 10/2010 - 04/2011
Conseil Général de La Réunion
Direction Jean Barbier
- *Mise en place d'une campagne de restauration du mobilier archéologique métallique du musée et son exposition*
 - *Étude de faisabilité de fouilles archéologiques sur le site du lazaret n°2*
 - *Étude de faisabilité d'un parcours d'interprétation dans les ruines de l'usine sucrière Desbassayns*
- Stage de recherche** au Laboratoire de Recherche des Monuments 04/2010 - 08/2010
Historiques, Section Pierre
Direction Ann Bourges
- Étude de faisabilité des mesures en mécanique de la rupture sur les matériaux du patrimoine, application aux mortiers de chaux*

Pour tout contact : cecilia.gauvin@gmail.com

Remerciements

On compare régulièrement un travail de thèse avec l'enfantement, la réalisation profonde de quelque chose de personnel. Effectivement, on commence par l'excitation de la nouveauté, l'émulation des idées. On a parfois des baisses de régime, des désillusions et de la fatigue, mais on mène sa barque autant que possible. La fin est souvent très compliquée, semée d'embûches. On puise dans nos réserves l'énergie nécessaire pour finir. Et finalement, le manuscrit est là, jamais vraiment fini. Il a souvent besoin de mûrir encore un peu. On attend les rapports, les critiques. Puis vient la présentation publique de ce travail si personnel.

La thèse a été depuis longtemps une expérience que je voulais vivre, d'autant plus sur un sujet traitant de la conservation du patrimoine. Les coïncidences n'étant que peu fortuites, l'une des rencontres les plus importantes de ma vie fut celle avec **Bertrand**. C'est en discutant avec lui que j'ai pu avoir la chance de rencontrer l'équipe bois du LMGC puis faire mon stage de Master 2, suivi de la thèse. Je ne te remercierai jamais assez de m'avoir ouvert la voie, de m'avoir également soutenue au cours de ses 3 années et d'être gentiment venu juger mes travaux lors de la soutenance publique. Bien que tu te sois écarté du monde des boiseux, j'espère encore pouvoir travailler avec toi, ou tout simplement échanger humainement.

Je ne peux que remercier chaleureusement mes encadrants de thèse **Joseph Gril** et **Delphine Jullien** pour m'avoir fait confiance durant ces trois années et pour m'avoir appris à faire de la sciences avec beaucoup de respect de soi et des autres. Je tiens également à remercier les membres de mon jury, avec qui j'ai pour la plupart collaboré lors de cette thèse, qui ont eu la patience de rapporter mon manuscrit.

Ces trois années de thèse se sont déroulées en très grande partie au laboratoire de mécanique et génie civil au sein de l'équipe – anciennement appelée : mécanique de l'arbre et du bois, puis renommée – bois. Lorsque je n'étais pas au laboratoire, j'étais en mission à travers le monde grâce à ce formidable réseau de sciences du bois / conservation du bois du patrimoine que possède l'équipe de Montpellier. C'est également à travers ces voyages que mon travail fut si passionnant. Je voudrais donc remercier la Japan Society for Promotion of Science (JSPS) pour m'avoir permis de participer au Summer Program au Japon et **Eiichi Obataya** pour m'avoir reçu dans son laboratoire à Tsukuba, Japon. Je remercie également les étudiant-e-s d'Eiichi qui ont été d'une ouverture d'esprit extraordinaire et qui ont su m'aider quand il le fallait. Je remercie les différentes actions COST (FP0904 et FP1302) pour avoir financé

mes allées-venues en Europe pour des collaborations scientifiques et des conférences. Merci à **Christina Young** et **Alice Aurand** pour avoir bien voulu travailler avec moi à Londres et Montpellier. Merci à **Kambiz Pourtahmasi** pour nous avoir accueilli en Iran, ce fut fantastique de pouvoir découvrir un tel pays. Merci à **Jean-Christophe Dupré** et à toute l'équipe PEM de l'institut Pprime à Poitiers pour m'avoir si souvent aidée sur mes manips de mesures de champ. Merci au labex Numev (que Joseph a su convaincre) pour m'avoir permis d'aller en Guyane française pour apprendre sur la forêt tropicale, ce nouveau monde a su m'émerveiller d'un point de vue scientifique et personnel. Merci à **Bruno Clair** pour m'avoir accueilli dans le laboratoire bois guyannais. Je remercie **Jonathan Graindorge Lamour** pour nous avoir invité, avec Delphine, lors de son tour du monde des ateliers de restauration de panneaux peints, grâce à toi j'ai pu rencontrer des personnes clés dans mon travail sur les tableaux. Merci **Marina Bousvarou** pour avoir ouvert les portes du musée Fabre de Montpellier pour de futures collaborations et à **Daniel Jaunard** pour m'avoir permise de travailler sur son travail de restauration accompli au musée Fabre. Enfin je tiens à remercier **David Hunt**, grand scientifique travaillant sur le bois qui continue ses expériences dans son jardin pour comprendre enfin les mystères du vieillissement et de ces conséquences, avec qui j'ai pu avoir des discussions très enrichissantes tout au long de ses années et qui s'est déplacé pour venir assister à ma soutenance.

Je tiens également à remercier toutes les personnes du LMGC que j'ai pu approcher de près ou de loin avec une pensée plus particulière pour l'ensemble de l'équipe bois : **Tancrède** (pour avoir été là quand tu le pouvais et pour ton esprit critique), **Carole** (pour savoir garder les pieds sur terre et le sens des priorités : le travail n'est pas tout), **Olivier** (ou *le punk*, pour m'avoir fait confiance pour les enseignements), **Sandrine** (pour avoir partagé de nombreux voyages dans la bonne humeur et pour la randonnée suédoise), **Iris** (pour ta gentillesse et ton expertise sur le bois), **Pierre** (bien que non officiel à l'équipe, tu es bien un membre à part entière, d'une grande valeur humaine, scientifique et technique), **Cédric** (merci pour ta gentillesse et ton soutien sur mes manips expérimentales, tu as grandement amélioré mon quotidien à la Halle), **Bernard** (papa de l'équipe à la retraite, mais travaillant toujours dans l'ombre), **Shanshan** (ce fut un plaisir d'avoir partagé ces années avec toi et d'avoir vu ta famille s'agrandir), **Arthur** (tu as su me guider au tout début de mon travail à Montpellier et pour ton soutien en enseignement), **Raoufe** (pour ta gentillesse et pour nous avoir montré une partie de ta culture iranienne), **Elham** (pour ta joie de vivre et les rigolades que nous avons pu avoir toutes les deux), **Marie** (la joueuse de roller derby, merci pour ton enthousiasme à toute épreuve), et enfin les casses-couilles de Montpellier : **Capucine** (ou *Capu*, ma co-bureau à capuche préférée) et **Agnès** (ou *la belle au bois dormant*, dormant plus vite que son ombre. Merci pour tout ces moments dans et hors laboratoire). Je n'oublierai pas de remercier **Chantal**, gestionnaire de l'équipe qui s'occupe des doctorant-e-s comme une mère. Un grand merci à **Gille**, technicien (ou *grand chef*) à la Halle, qui a su me supporter avec beaucoup de patience et avec qui j'ai passé de très bons moments au et hors laboratoire. Je ne te remercierai jamais assez pour ton aide précieuse et nos rigolades.

Merci aux garçons des autres équipes, malgré le sectarisme que peut susciter l'équipe bois, nous avons su vous amadouer petit à petit : **Tarick** et **Kajtek**, mes compagnons d'écriture de l'été 2015, **Paul**, pour toutes ces discussions enrichissantes, **Remy**, pour ta patience et pour avoir lutté avec moi sur TramsPore et pour tes bouquins, **Lionel**, pour avoir gentiment

financé mon addiction à la caféine et pour la plongée, et les autres bien sûr.

Mais Montpellier, ce n'était pas que la thèse, mais aussi des amis : **Carole, Sophia, Noémie, Alessio, Morgane** et **Vincent**, mes chers collocs et compagnons de vie. Merci d'avoir été là pour moi, pour nous. Merci à tous les autres qui ont su m'écouter : **Floriane, Mathilde, Damien, Thibaud, Nans**, et j'en oublie certainement. Merci à ma famille pour m'avoir soutenue, même depuis mon île presque natale, la Réunion, je ne serai pas là sans eux.

Enfin merci à mes nouveaux collègues Néerlandais qui m'ont fait confiance pour continuer à travailler sur la thématique de la conservation du bois du patrimoine. Un remerciement particulier à **Jean Barbier**, conservateur du musée de Villèle de la Réunion, qui m'a toujours soutenue dans l'avancement de mon parcours professionnel.

Table des matières

Introduction générale	1
1 L'état de l'art	5
1.1 Le bois, un matériau hygroscopique	7
1.1.1 Le bois, un matériau multi-échelle	7
1.1.1.1 Les composants du bois	7
1.1.1.2 L'arrangement des cellules de bois	9
1.1.2 La structure du bois : anisotropie et orthotropie	11
1.1.3 Le bois et l'eau	11
1.1.4 Les phénomènes de transferts dans le bois	15
1.1.5 La mécanique du bois	16
1.1.5.1 Le bois, un matériau élastique orthotrope	16
1.1.5.2 Comportement hygro-élastique	18
Anisotropie du retrait / gonflement	18
Effet des gradients d'humidité et phénomènes transitoires	21
1.1.6 Prise en compte de la variabilité du bois : mise en place d'un outil pour l'échantillonnage expérimental	23
1.1.7 Les techniques de mesures de champ par Corrélation d'Images Numériques	25
1.1.7.1 La Corrélation d'Images Numériques par mouchetis	25
1.1.7.2 Le suivi de marqueurs	26
1.1.8 Le(s) vieillissement(s)	28
1.1.8.1 Le vieillissement naturel	28
1.1.8.2 Accélération du vieillissement et traitement thermique	29
1.2 Les panneaux peints, conservation de panneaux de bois peints	30
1.2.1 L'environnement du panneau	31
1.2.2 L'histoire des techniques : assemblage des panneaux	33
1.2.3 Une structure multi-couche	36
L'encollage et la toile	37
Le gesso	37
L'imprimatura	37
La peinture et le vernis	37
1.2.4 Les problèmes de restauration-conservation d'aujourd'hui	37
1.2.4.1 Les différentes techniques en France et ailleurs	38

	La dépose des renforts, ou la dé-restauration	38
	Traitement des fissures et joints	39
	Comment rétablir la cohésion de la structure du panneau peint	40
	Remise à niveau des courbures	41
	Système de maintien du support	41
1.2.4.2	Mise en regard des pratiques	42
1.3	Conclusion sur l'état de l'art	43
2	Les matériaux constituant le panneau peint	47
2.1	Le bois du patrimoine : vieillissement du bois, caractérisation du matériau et vieillissement accéléré	49
2.1.1	Introduction	49
2.1.2	Le traitement hygrothermique : un vieillissement accéléré?	49
2.1.2.1	Matériel et méthode	50
	Première campagne d'essais	50
	Deuxième campagne d'essais	53
2.1.2.2	Une perte d'hygroscopicité	55
2.1.2.3	Une réduction du gonflement	59
2.1.2.4	Un phénomène de réversibilité des traitements hygro-thermiques	61
2.1.3	Une tentative de vieillissement hygroscopique	63
2.1.3.1	Matériel et méthode	63
2.1.3.2	Une perte d'hygroscopicité?	65
2.1.4	Discussion sur les origines du vieillissement	67
2.2	Contribution de de la structure multicouche du panneau peint	68
2.2.1	Contexte de l'étude	68
2.2.2	Expérimentation	68
2.2.2.1	Matériel et méthode	68
2.2.2.2	Comportement hygromécanique et courbure	79
2.2.3	Conclusion sur le rôle de la couche préparatoire dans le comportement global d'un panneau peint	91
3	Panneau structurel	93
3.1	Expérimentation hygromécanique sur réplikat de panneau peint	95
3.1.1	Matériel et méthode	95
3.1.1.1	Chargement hygrothermique	95
3.1.1.2	Outil de corrélation d'images	97
3.1.1.3	Mise en œuvre du panneau	98
3.1.2	Résultats étape par étape	100
3.1.2.1	Détermination des paramètres de transferts hydriques	102
	Désorption libre	102
	Désorption de la planche isolée sur les faces latérales	103
	Désorption de la planche avec la couche préparatoire	106
	Désorption du panneau avec couche préparatoire et renforts	108
	Résumé des paramètres de diffusion	110
3.1.2.2	Détermination des paramètres mécaniques	112
	Désorption libre	112

Désorption de la planche isolée sur les faces latérales	117
Désorption de la planche avec la couche préparatoire	120
Désorption de la planche peinte avec renfort	126
3.2 Simulation numérique du comportement hygromécanique du panneau peint . .	131
3.2.1 Échange de masse et de chaleur	132
3.2.1.1 Les équations d'échange de masse et chaleur dans le bois . . .	132
3.2.1.2 Modification de l'architecture du logiciel TransPore 3D	135
Note sur le dysfonctionnement de la modélisation de l'hystérésis dans le cas de petites fluctuations	137
3.2.1.3 Simulation TransPore	139
Désorption libre	140
Désorption d'une planche avec faces latérales isolées	141
Désorption de la planche avec couche préparatoire et faces laté- rales isolées	141
Désorption de la planche avec renforts	142
Conclusion et perspectives	145
Bibliographie	148
Annexes	157
Résumé	163
Abstract	165

Introduction générale

La problématique des panneaux peints est étudiée dans l'équipe Bois du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) depuis 2004. À cette époque, le Louvre avait demandé à Joseph Gril d'apporter son expertise en science du bois sur l'œuvre de Léonard de Vinci, *La Joconde*. Depuis, au vu des questionnements qu'a posé cette expertise sur l'hygromécanique du bois, le thème continue d'être étudié dans l'équipe. En effet, un des thèmes de recherche principaux de l'équipe Bois est l'effet du temps sur le comportement mécanique qui a commencé avec l'arrivée de Joseph Gril à Montpellier en 1989. L'expertise demandée par le Louvre a été regroupée avec d'autres études autour de *La Joconde* dans une publication : « Au cœur de *La Joconde* » (Mohen 2006) en 2006.

Cette première expertise a pu mettre en relation les différentes communautés (scientifiques, restaurateurs, conservateurs) et créer ainsi un réseau de collaborateurs intéressés par un même objet : le panneau peint. De cette impulsion a émergé en 2007 un projet à l'échelle européenne, financé par le COST (European Cooperation in Science and Technology), mettant en relation les acteurs culturels et scientifiques : action COST IE0601 « IE0601 Wood Science for Conservation of Cultural Heritage ». De plus, l'équipe Bois a également obtenu le financement de trois bourses de thèse : une première thèse (2006-2009) pour Bertrand Marcon (en co-tutelle avec l'Université de Florence, Italie), puis (2008-2011) Julien Colmars et enfin une dernière thèse (2009-2012) avec Julien Froidevaux (en coopération avec la Haute École Spécialisée Bernoise). La thèse de Marcon (Marcon 2009) s'est portée essentiellement sur l'instrumentation *in-situ* des panneaux peints et sur la modélisation numérique de leur hygromécanique. Puis la thèse de Colmars (Colmars 2011) a pris de relais en mettant l'accent sur la modélisation du comportement hygromécanique du panneau de bois. Enfin la thèse de Froidevaux (Froidevaux 2012) a pris le parti d'apporter une dimension d'étude du vieillissement du bois afin d'améliorer la compréhension du matériau.

Actuellement, ce genre de thématique a relancé en Europe un engouement certain pour la conservation du bois en général, et on a pu voir apparaître de nouvelles directions d'étude portées par les instruments de musiques, avec notamment l'action COST FP1302 « WoodMUSIC ».

À présent, n'ayant plus de financement réellement dédié à l'étude scientifique des panneaux peints, il a fallu élargir le réseau de collaborateurs européens. Pour cela, grâce à l'aide pré-

cieuse de Jonathan Graindorge Lamour, jeune restaurateur de panneaux peints, nous avons pu profiter de son expérience dans les différents ateliers de restauration – participant au projet de la fondation Getty, Panel Paintings Initiative (PPI)¹ – pour rencontrer et discuter avec les acteurs de ce milieu. Nous avons donc pu rencontrer les restaurateurs du musée du Prado à Madrid, Espagne, ceux de l’Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro à Florence, Italie, ou encore ceux de National Gallery à Londres, Royaume-Uni. Ces rencontres nous ont permis d’affiner notre compréhension autour de cas d’étude et également de continuer à promouvoir l’utilité de la science et de l’ingénierie comme aide à la compréhension du comportement des panneaux peints.

Bien que la prise de conscience de la conservation de notre patrimoine est né en France au XVIII^e siècle, avec une attention particulière portée sur la distinction de l’œuvre comme deux parties : la couche picturale et le support. Il faudra attendre la naissance de la chimie moderne (XIX^e siècle) pour voir apparaître une approche scientifique de la compréhension des matériaux composants une œuvre et avec l’émergence de nouveaux produits de consolidation et de restauration. Au cours du XIX^e siècle des laboratoires de recherche orientés vers notre héritage culturel en Europe ont été mis en place. En France en 1931, le Laboratoire de recherche des musées de France voit le jour, avec une fusion en 1998 avec le Service de restauration des musées de France, encore appelé Centre de Recherche et de Restauration des musées de France (C2RMF).

La dualité science / conservation n’est pas si ancienne, et les deux communautés ont parfois encore du mal à communiquer malgré tous les efforts mis en place. Dans le cas des sciences du bois, qui nous concerne, nous manquons d’objets d’études témoignant un comportement mécanique à long terme. Les objets du patrimoine sont autant de représentant de l’effet du temps sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du bois. Du point de vue du conservateur, son objectif est essentiellement de s’intéresser à tous les processus qui tendent à sauvegarder le patrimoine culturel, et l’étude théorique du comportement des matériaux peut aider à mettre en place des outils d’aide à la décision pour de futures conservations et/ou restaurations.

Il est important de se consacrer à des enjeux communs, et mettre ainsi en place des projets et réseaux de partenaires avec une visibilité européenne. Ainsi cette thèse vient s’inscrire dans un contexte scientifique bien établi et où le réseau de partenaires culturels est déjà construit. Cependant, pour ne pas laisser le sujet dépérir (le combat pour la collaboration étroite science / conservation n’est pas fini), il faut continuer à tisser les collaborations et avancer sur le sujet de façon cohérente. La problématique des panneaux peints reste encore attractive – pour les étudiants qui s’y intéressent et donc des financements de thèses – et s’oriente, ici, sur le développement d’outils de mesure et l’expérimentation visant la vérification des théories élaborées auparavant.

Nous proposons d’étudier le bois du patrimoine, objet fondamental au cœur de notre science, comme matériau à part entière. La compréhension de son comportement vis-à-vis des fluctuations microclimatiques et de son processus de vieillissement seront présentés dans le chapitre 2. Nous y étudierons quels sont les processus intervenant dans le vieillissement du bois. Pour ce

1. http://www.getty.edu/conservation/our_projects/education/panelpaintings/

faire, nous passerons par une démarche d'accélération de vieillissement naturel. Cette méthode a fait l'objet d'une étroite collaboration avec Eiichi Obataya de l'Université de Tsukuba, Japon, qui propose d'effectuer des traitements hygro-thermiques pour reproduire les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du bois ancien. Puis nous étudierons le comportement mécanique d'un élément de panneau peint considéré comme une structure multicouche composite (bois, couche préparatoire), et nous nous intéresserons à la relation bois - couche préparatoire dans la mécanique de l'objet étudié. Enfin dans le chapitre 3, nous présenterons une approche expérimentale et numérique afin de comprendre les processus mis en jeu à l'échelle d'un panneau. La partie expérimentale a pour objectif de caractériser l'hygromécanique d'un réplikat afin de déterminer les paramètres clés dans le processus de modélisation numérique mis en place dans les travaux précédents. La partie numérique vise à la mise en place d'outils de simulations hygromécaniques adaptés à la problématique des panneaux peints.

L'état de l'art

Cette partie sera basée sur deux points fondamentaux de ce travail de doctorat : **le bois** et **le panneau peint**.

Pour le premier élément, **le bois**, il s'agit de comprendre de façon fondamentale son comportement mécanique et physique. Le bois est un matériau biologique qui a d'abord servi pour la construction d'habitat durant la Préhistoire, puis lorsque la pierre et le torchis l'ont remplacé dans l'habitat, il a beaucoup été utilisé pour l'industrie navale jusqu'au XIX^e siècle. Le bois a été également une ressource essentielle à la fabrication d'objets : outils, armes, meubles . . . Une des grandes utilisations du bois est comme source d'énergie jusqu'au XIX^e siècle. Le comportement de ce matériau a donc été appréhendé au début par les artisans du bois puis étudié par les scientifiques pour répondre à la demande des industriels et améliorer les rendements. Son comportement apparaît, en bien des termes, fort singulier de part sa variabilité, son comportement vis-à-vis de l'humidité, ou son vieillissement. Cet état de l'art tente de retracer les études faites afin de comprendre ce comportement.

Pour le deuxième élément, **le panneau peint**, il s'agit d'un tableau peint sur bois appartenant au patrimoine historique. Il est généralement élaboré au XIII^e siècle jusqu'à l'apparition de la toile, au XVII^e siècle. Les panneaux peints auxquels nous nous intéressons sont principalement ceux fabriqués en Europe pendant la période de la renaissance. Nous souhaitons comprendre l'histoire des techniques employées pour la fabrication des panneaux peints afin de mieux comprendre l'objet et son comportement et ainsi pouvoir appréhender pourquoi la communauté a du mal à restaurer et conserver ces objets patrimoniaux. Un des objectifs de ce travail de thèse est de mettre au point des outils d'aide à la restauration des panneaux peints, nous allons donc présenter certaines techniques de restauration employées, en France, et ailleurs.

1.1 Le bois, un matériau hygroscopique

Le bois est un matériau hygroscopique c'est-à-dire capable d'absorber ou désorber l'humidité contenue dans l'air environnant. Nous allons, ici, tenter de poser les bases de ce comportement et ses conséquences en terme de mécanique et de rhéologie, puis nous étudierons comment ce comportement est altéré par le vieillissement.

1.1.1 Le bois, un matériau multi-échelle

1.1.1.1 Les composants du bois

Le bois, contenu dans l'arbre, est un matériau biologique mort (car ses cellules – hors cambium – n'ont plus de fonction reproductive), composite et multi-échelle, comme présenté par Harrington (Harrington 2002) dans la figure 1.1.

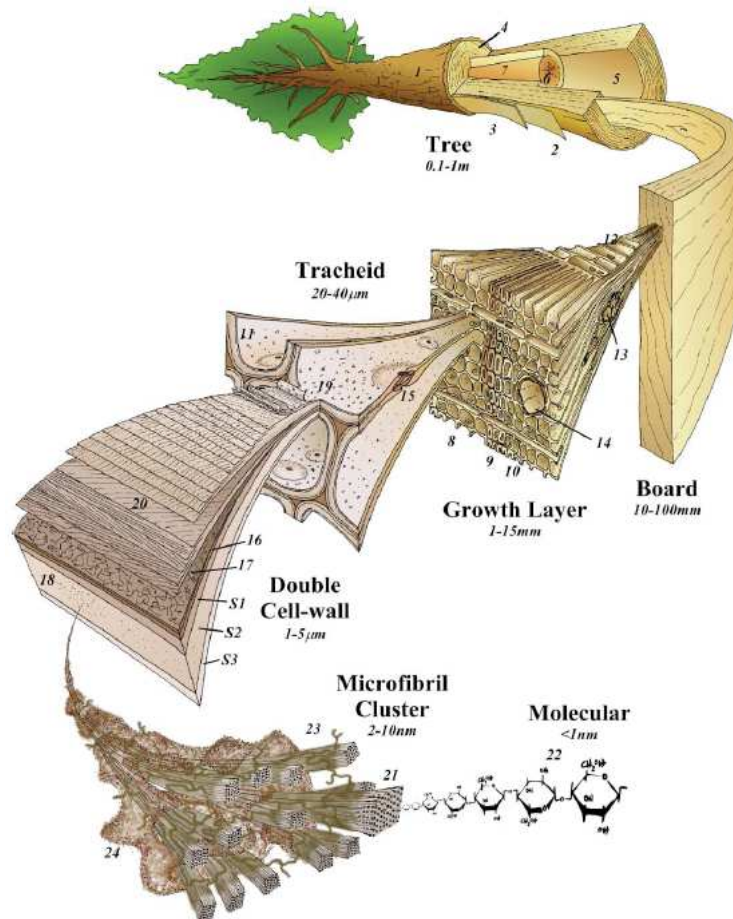


FIGURE 1.1 – Structure multi-échelle du bois, d'après (Harrington 2002).

Pour notre étude, nous étudierons surtout le bois à l'échelle de la planche, mais aussi aux échelles juste en dessous afin de décrire les phénomènes de sorption¹ de l'eau.

1. la sorption permet de décrire les phénomènes d'absorption et de désorption, qui sont dans le cas du bois des situations différentes.

Les principaux composants à l'échelle de la molécule sont des matrices polymères composites :

la cellulose : polymère linéaire (chaîne de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes), semi-cristallin dont le monomère de base est le glucose. Il joue le rôle de fibres (dans le cas d'une approche composite du matériau).

la lignine : polymère réticulé tridimensionnel amorphe dont le monomère de base est le phénolpropane. Elle joue le rôle de matrice.

l'hémicellulose : polymère ramifié amorphe dont le monomère est un sucre essentiellement non glucosé. Il joue le rôle de matrice, liant cellulose et lignine.

les extractibles : ils sont issus de la sécrétion lors de la formation du bois, ils sont des polymères dont la molécule de base est le polyphénole. Ils ont comme rôle la protection du xylème contre les attaques xylophages et moisissures

Ces polymères sont assemblés dans les différentes parois cellulaires du bois, comme présenté sur la figure 1.2.

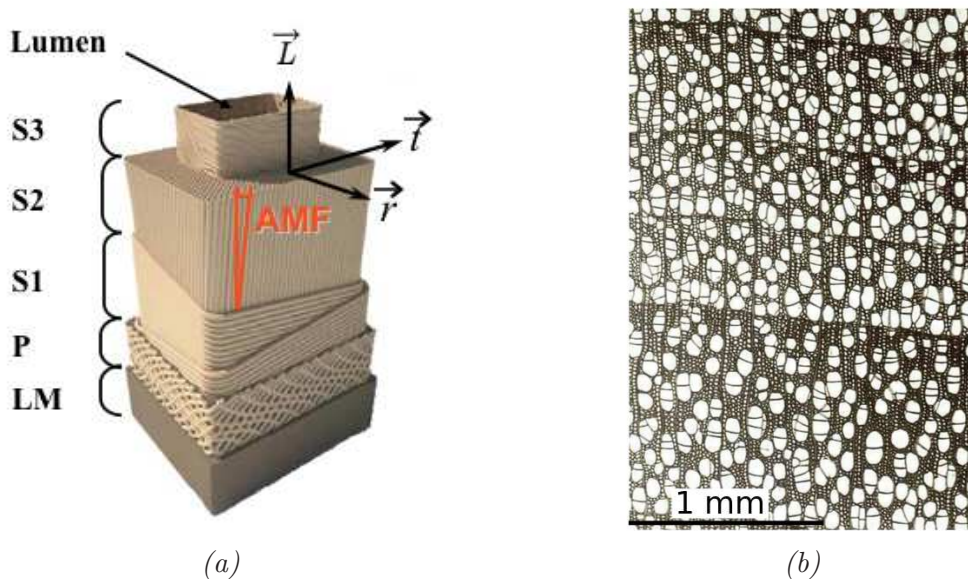


FIGURE 1.2 – Structure du bois à l'échelle de la cellule. (a) : Structure lamellaire d'une cellule contenant les différentes parois autour du lumen. (b) : *Populus alba* L., vue d'une coupe transversale de bois par microscopie optique ©WSL.

Les principaux composants du bois se distribuent dans la paroi cellulaire comme suivant la figure 1.3, qui est une représentation schématique de la répartition des composants du bois. Les proportions de cellulose, hémicellulose et lignine varient suivant le type de bois, les essences d'arbre ...

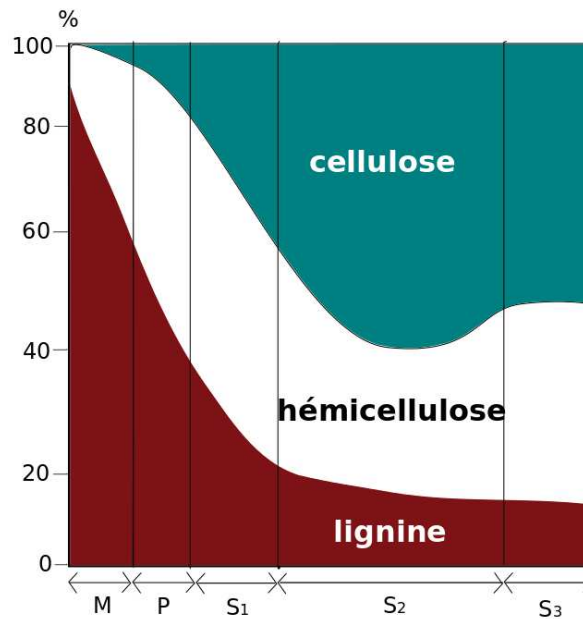


FIGURE 1.3 – Distribution des trois composants du bois : cellulose, hémicellulose et lignine, à l'intérieur de la paroi cellulaire, d'après (Navi 2005).

1.1.1.2 L'arrangement des cellules de bois

Nous venons de voir comment était composée une cellule de bois. Ces cellules se créent dans la zone cambiale, lieu où la différenciation s'effectue. Elles peuvent devenir des cellules de phloème (écorce de l'arbre), ou des cellules du xylème (bois). Dans le xylème des feuillus, elles peuvent être (figure 1.4) :

- **un vaisseau** : cellule longitudinale assurant la conduction dans l'arbre. La taille moyenne d'un vaisseau chez le peuplier : 30 – 50 μm
- **une fibre** : cellule longitudinale ayant un rôle de soutien mécanique. La taille moyenne d'une fibre chez le peuplier : 20 μm .
- **un parenchyme longitudinal** : cette cellule assure un rôle nutritif dans le xylème.
- **un parenchyme radial** : plusieurs parenchyms radiaux constituent un rayon ligneux. Ces cellules jouent également un rôle nutritif dans le bois.

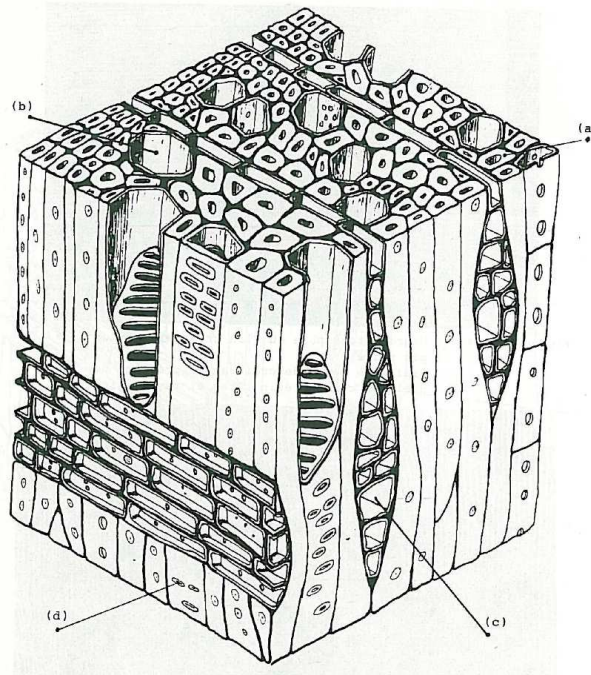


FIGURE 1.4 – Organisation des cellules d'un feuillet. (a) : fibre. (b) : vaisseau. (c) : rayon ligneux. (d) : ponctuation. D'après (Guitard 1987).

Lors de la croissance en épaisseur de l'arbre, les cellules s'épaississent et se rigidifient. Ce phénomène s'appelle la maturation (figure 1.5). La production de cellules, en région tempérée, va dépendre de la saison, l'arbre produit un cerne de croissance par an. Lors du printemps, le bois formé est le bois de printemps, ou bois initial. Cette croissance est rapide et les cellules formées sont moins épaisses. Alors qu'en été jusqu'au début de l'automne, le bois formé est le bois d'été, ou bois final. A contrario, cette phase produit lentement des cellules plus denses. Un cerne possède donc deux bandes de cellules dont la densité et les propriétés de diffusion d'eau ne sont pas les mêmes.

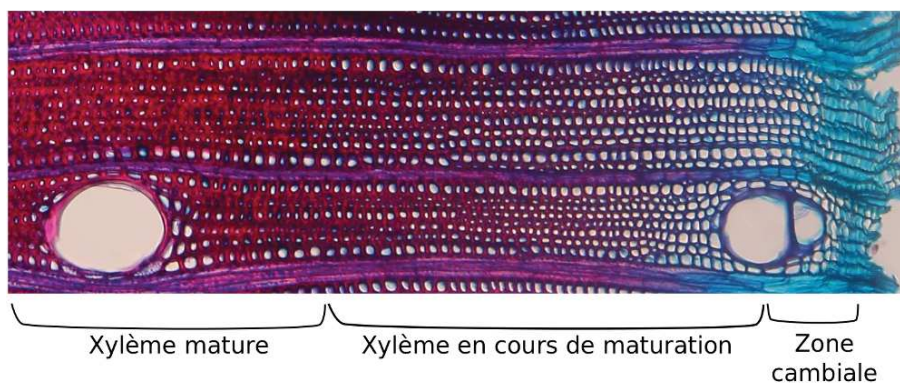


FIGURE 1.5 – Coupe transversale de bois de Bruseraceae *Protium tenuifolium* (MO \times 10). Coloration safranine (coloration de la lignine)/ bleu astra (coloration de la cellulose)

Le xylème mature devient alors de l'aubier. Puis par transformation physiologique, le bois

devient ce qu'on appelle le duramen ou encore bois parfait.

1.1.2 La structure du bois : anisotropie et orthotropie

Nous venons de voir l'organisation des cellules de bois à l'échelle microscopique et ses composants polymériques, ainsi que l'organisation des cellules lors de la formation du bois. Tous ces éléments participent à modifier les propriétés (mécaniques, physiques, hydriques, thermiques) selon le sens considéré. On considère alors que les propriétés du bois sont anisotropes. Par exemple, les caractéristiques de diffusion sont très différentes si l'on considère la direction des fibres du bois ou bien une direction transverse aux fibres.

Pour pouvoir définir ces propriétés, nous devons donc choisir un repère adapté aux orientations du bois. On a ainsi défini un repère lié à l'arbre, c'est-à-dire circulaire autour de la moelle de l'arbre. La direction longitudinale (notée **L**) est parallèle aux fibres, le long du tronc –, la direction tangentielle (notée **T**) est tangentielle aux cernes de croissance, et la direction radiale (notée **R**) est orthogonale à ces deux premières directions. Ce repère dit orthotrope est tournant suivant les cernes observés, cela est illustré dans le cas d'une planche sur dosse² figure 1.6.

Ce paramétrage (figure 1.6) sera réutilisé dans les parties suivantes.

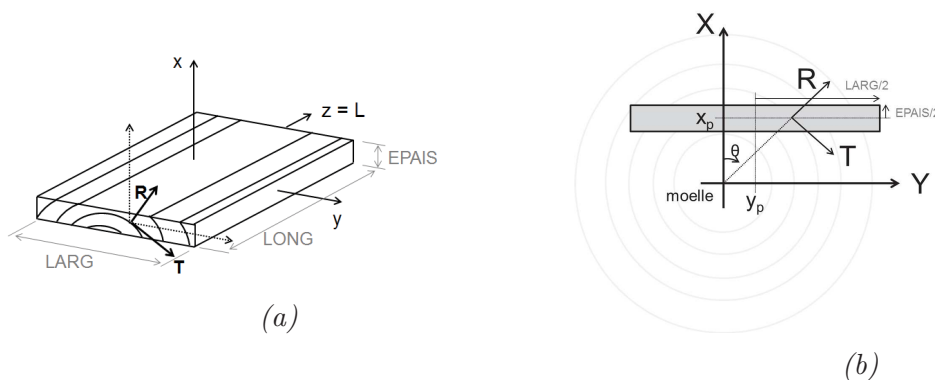


FIGURE 1.6 – Orientation d'une planche et repère d'orthotropie. (a) : Planche sur dosse. (b) : Section d'une planche dans une grume avec son repère orthotrope tournant autour de l'axe **Z** avec un angle θ . D'après (Colmars 2011).

1.1.3 Le bois et l'eau

Le bois se trouve initialement dans l'arbre à l'état dit "vert", c'est-à-dire plein d'eau sous trois phases (figure 1.7) :

1. L'eau en phase vapeur
2. L'eau en phase liquide et libre dans les cellules de bois

2. Les planches dites "sur dosse" sont découpées suivant la direction tangentielle principalement

3. L'eau en phase "semi liquide", dite "liée" car adsorbée par les sites hydroxiles (-OH) des hémicelluloses et celluloses

Il existe également l'eau de constitution qui est l'eau restant à l'état anhydre (elle est intégrée à la composition chimique de la matière). Elle ne peut être évacuée qu'avec un traitement thermique.

Lorsque l'arbre est encore sur pied, il est gorgé d'eau (libre et liée). C'est au moment de la découpe du tronc et de son séchage que l'eau libre va commencer à s'évacuer. L'état hygroscopique où l'eau libre a totalement disparu et qu'il ne reste plus que la phase vapeur en équilibre avec l'eau liée à la paroi cellulaire, s'appelle le point de saturation des fibres (**PSF**). Ces trois états de l'eau se trouvent au-dessus du PSF – autrement dit, il y a existence d'eau libre –, en-dessous, l'eau libre n'est plus présente et l'équilibre entre l'humidité de l'air environnant et l'humidité interne (sous deux phases, libre et vapeur) se fait. Nous travaillerons, pour notre étude, en-dessous du PSF.

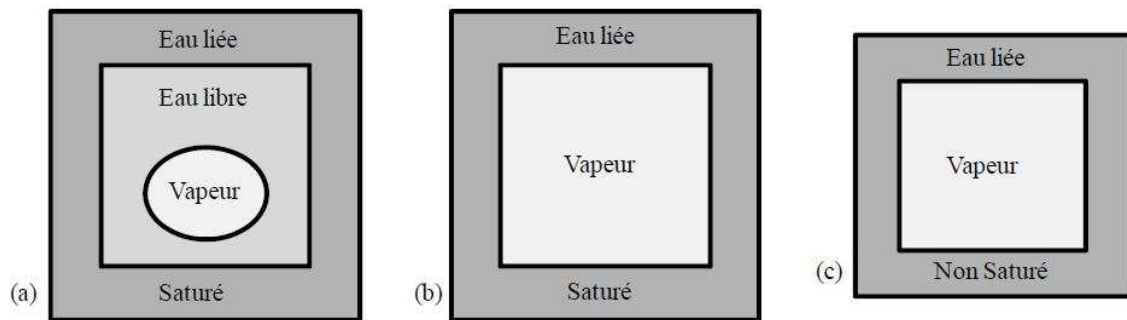


FIGURE 1.7 – Les différents états de l'eau dans le bois. (a) : au-dessus du PSF. (b) : au PSF. (c) : en-dessous du PSF, d'après (Montero 2010).

Il existe plusieurs théories visant à modéliser l'absorption³ de l'eau dans le bois. Nous ne ferons pas de description détaillée ici, mais il est important de comprendre ce qui se passe à l'échelle de la paroi cellulaire afin d'expliquer les phénomènes physiques de vieillissement par exemple.

On appelle donc teneur en eau (**mc**) (pour *moisture content*), la masse d'eau contenue dans le bois rapportée à la masse anhydre de bois. Elle se calcule comme une variation relative de masse par rapport à la masse anhydre – sans eau – du bois :

$$mc[-] = \frac{M - M_0}{M_0} \quad (1.1)$$

Avec M , la masse de bois à une certaine humidité interne ; M_0 , la masse de bois anhydre.

3. On fera la différence entre absorption du bois à l'échelle de la planche ou de l'échantillon macroscopique qui est, ici, le processus par lequel les molécules d'eau s'incorporent dans le volume du matériau ; et l'adsorption qui est le processus d'attraction des molécules d'eau par condensation sur les surfaces libres des parois cellulaires. Dans le cas de la pénétration de l'eau dans le bois massif, on ne distinguera pas le phénomène d'adsorption à la surface de ce volume macroscopique du phénomène d'absorption en tant que tel, on nommera ce processus absorption, car dominant dans ce cas.

L'échantillon de bois se met donc en équilibre avec l'humidité de l'air environnant, l'humidité relative (**HR**). Cette dernière est le rapport entre la pression partielle de vapeur p et la pression de vapeur saturante p_0 :

$$HR[-] = \frac{p}{p_0} \quad (1.2)$$

Les molécules d'eau viennent donc se greffer à la surface des parois cellulaires suivant quatre processus principaux (figure 1.8).

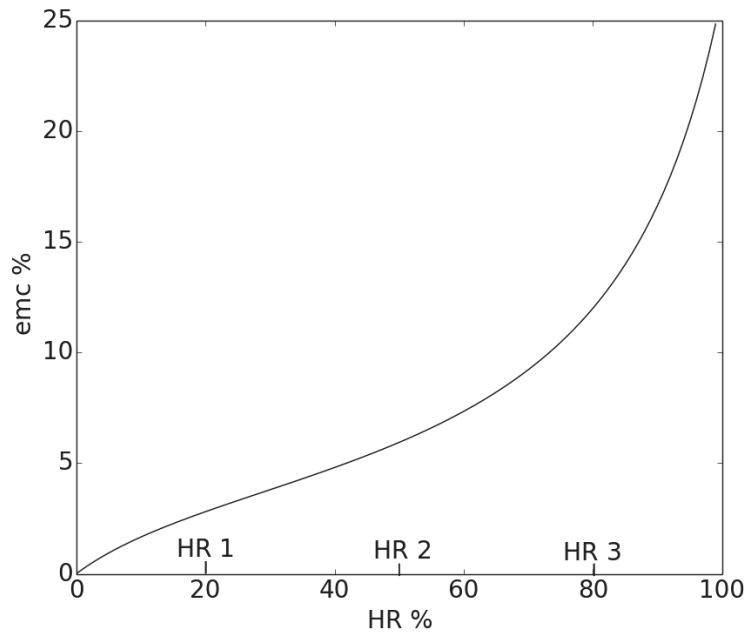


FIGURE 1.8 - Humidité relative (**HR**) en fonction de la teneur en eau du bois (**emc**). Processus de sorption à l'échelle moléculaire, d'après (Ahlgren 1972). Courbe tracée à partir de l'équation 1.3 et des paramètres du table 1.1

On peut ainsi lire dans la thèse de Time (Time 1998) qu'il y a trois humidités de référence pour distinguer les processus d'adsorption de l'eau sur les parois des cellules :

HR < HR 1 : Adsorption mono-moléculaire

HR 1 < HR < HR 2 : Adsorption poly-moléculaire

HR 2 < HR < HR 3 : Condensation par capillarité

HR > HR 3 : Création de liaisons probablement par osmose⁴

La sigmoïde observée expérimentalement lors d'une isotherme d'absorption, en mettant en relation humidité relative et teneur en eau à l'équilibre, peut s'écrire comme (Hailwood 1946) :

$$emc = \frac{HR}{A \cdot HR^2 + B \cdot HR + C} \quad (1.3)$$

4. L'osmose est le phénomène de diffusion qui apparaît lorsque deux solutés (séparés par une membrane semi-perméable) ont des concentrations (d'ions par exemple) différentes

Avec emc , la teneur en eau du bois à l'équilibre (equilibrium moisture content) ; HR , l'humidité relative de l'air ; A , B et C trois constantes. Ces dernières ont été déterminées, dans le cas du peuplier (*Populus alba* L.), par Colmars (Colmars 2011) et résumées dans le table 1.1 :

A^+	B^+	C^+
-0.169	16.126	458.676

TABLE 1.1 – Coefficients d'absorption (notés par un exposant +) adaptés, à partir des données expérimentales, au *Populus alba* L. pour tracer l'isotherme de sorption à 25°C, d'après (Colmars 2011)

Rappelons que la courbe décrivant les phénomènes de sorption dans le bois présente une hystérésis, c'est-à-dire l'absorption n'emprunte pas le même « chemin » que la désorption de l'eau dans le bois (figure 1.9).

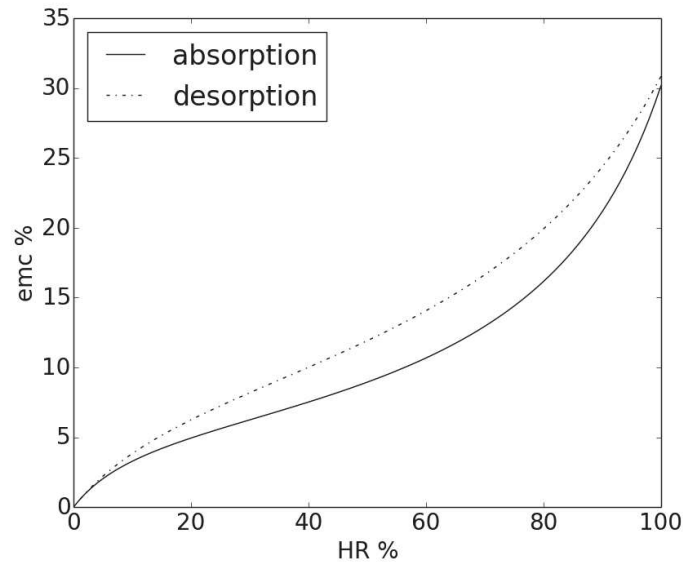


FIGURE 1.9 – La teneur en eau à l'équilibre (emc) en fonction de l'humidité relative (HR). Hystérésis d'une isotherme de sorption

Comme l'explique Skaar (Skaar 1979), la variabilité des hystérésis de sorption peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Équilibre non atteint
- Histoire passée
- Température
- Différences physico-chimiques de la paroi cellulaire
- Présence d'extractibles ...

La relation eau - bois (ou isotherme de sorption) est dépendante de la température, comme tout phénomène thermodynamique.

1.1.4 Les phénomènes de transferts dans le bois

Les phénomènes de transferts d'humidité dans le bois en-dessous du point de saturation des fibres (PSF) sont principalement gouvernés par deux mécanismes (figure 1.10) :

- La diffusion d'eau liée et vapeur à travers les lumens et les ponctuations
- La diffusion d'eau liée et vapeur à travers les parois cellulaires

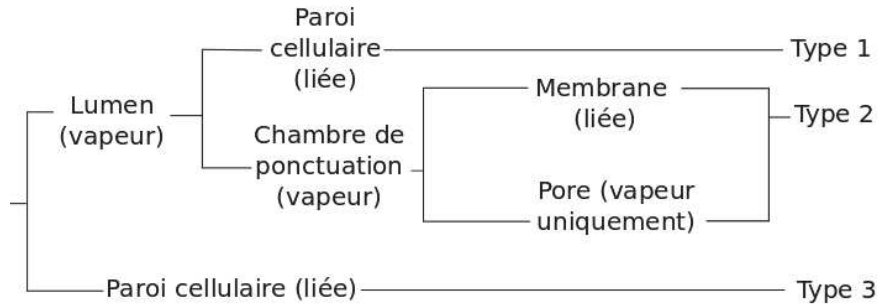


FIGURE 1.10 – Schéma de la diffusion de l'eau (liée et vapeur) dans les fibres de bois (résineux), d'après (Stamm 1961)

Type 1 : Diffusion dans les lumens et parois cellulaires

Type 2 : Diffusion dans les lumens et ponctuations

Type 3 : Diffusion continue dans les parois cellulaires

La diffusion se fait donc principalement dans le sens des fibres, et est même cent fois plus grande que dans les directions transverses aux fibres (Siau 1984). Le transfert de l'eau transversalement aux fibres se fait à travers les parois cellulaires.

Loi de Fick

Dans la plupart des cas de transfert d'humidité dans le bois, il s'agit du phénomène de diffusion gouverné par la loi de Fick. Si on considère le problème quasi-statique unidimensionnel, il s'écrit :

$$F = -D_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (1.4)$$

Avec F le flux de molécules d'eau (en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) ; D_α le coefficient de diffusion dans la direction α (en $m^2 \cdot s^{-1}$) ; et $\frac{\partial \alpha}{\partial x}$ le gradient de concentration unidirectionnel (en $kg \cdot m^{-3} \cdot m^{-1}$).

Le coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion D_α vu dans l'équation 1.4 est un paramètre dépendant de la température, de la teneur en eau et du matériau considéré (figure 1.11). Il reflète surtout la résistance interne du flux à diffuser. On définit le coefficient d'émission surfacique, S comme la résistance surfacique à la diffusion de l'eau dans le bois. Il est à prendre en compte lors de la détermination expérimentale du coefficient de diffusion D'_α qui est donc la résistance « externe » de diffusion (Siau 1984).

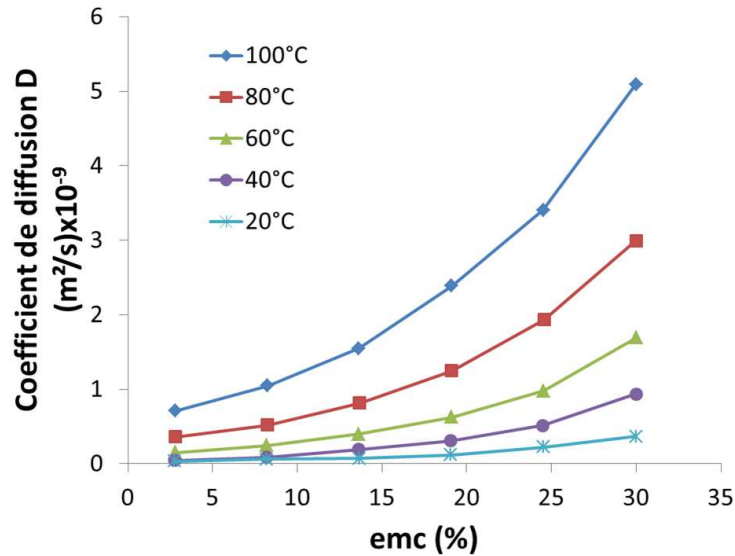


FIGURE 1.11 – Coefficient de diffusion transverse pour un bois de densité 0.5 en fonction de la teneur en eau EMC et de la température, d'après (Avramidis 2007)

Les phénomènes de transferts dans le bois sont des processus complexes que l'on peut modéliser comme des transferts dans un milieu poreux (Rémond 2004), (Perré 1987), (Perré 1990) et (Perré 2007), où les transferts d'eau et de chaleur sont couplés. Ces phénomènes ont été modélisés en trois dimensions à travers un logiciel « libre », nommé TransPore 3D, développé par Perré (Perré 1999), utilisé sur un calcul par volumes finis. Les équations relatives à cette modélisation sont développées dans la partie 3.2.1.3.

1.1.5 La mécanique du bois

La structure cellulaire et l'organisation des cellules dans le bois nous permettent de proposer une formulation mécanique basée donc sur un repère orthotrope tournant autour de l'axe de la moelle de l'arbre comme nous l'avons vu dans la partie 1.1.2. On considère que notre panneau est constitué d'un matériau continu, orthotrope. On choisit le repère cylindrique centré sur la moelle.

1.1.5.1 Le bois, un matériau élastique orthotrope

Le bois peut être considéré idéalement comme un matériau dont le comportement est principalement élastique. Nous pouvons écrire la loi de Hooke généralisée qui relie la contrainte élastique linéaire σ à la déformation ε en écrivant l'équation 1.5 :

$$\sigma = \underline{\underline{C}} \varepsilon \quad (1.5)$$

Avec σ , le champ de contraintes ; ε , le champ de déformations ; C , la matrice de rigidité. Pour des raisons de modélisation, la formulation la plus usitée est l'inverse de l'équation 1.5, c'est-à-dire :

$$\underline{\varepsilon} = \underline{S} \underline{\sigma} \quad (1.6)$$

Avec S le tenseur de complaisance élastique, qui est l'inverse de C le tenseur de rigidité. Ce dernier comporte 9 termes indépendants (Guitard 1987), qui sont :

- les modules d'Young dans les trois directions principales du bois : E_R, E_T, E_L ⁵
- les trois modules de cisaillement : G_{TL}, G_{TR}, G_{LR}
- les trois coefficients de Poisson : $\nu_{TL}, \nu_{TR}, \nu_{LR}$

On écrit alors le tenseur de rigidité comme suit :

$$(S) = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

On notera que comme nous considérons un matériau orthotrope, la matrice (S) est symétrique, ce qui implique l'égalité des termes suivants :

$$\frac{-\nu_{TR}}{E_T} = \frac{-\nu_{RT}}{E_R}, \frac{-\nu_{LR}}{E_L} = \frac{-\nu_{RL}}{E_R} \text{ et } \frac{-\nu_{LT}}{E_L} = \frac{-\nu_{TL}}{E_T} \quad (1.8)$$

Les paramètres mécaniques ont été déterminés grâce à des corrélations statistiques obtenues à partir de grandes campagnes d'essais menées par Guitard (Guitard 1987), que l'on peut résumer dans le tableau suivant :

	<i>emc</i> %	ρ $g.cm^{-3}$	E_R <i>MPa</i>	E_T <i>MPa</i>	E_L <i>MPa</i>	G_{RT} <i>MPa</i>	G_{TL} <i>MPa</i>	G_{RL} <i>MPa</i>
<i>Populus alba</i> L.	13.7	0.40	1190	493	6830	200	900	1000
Feuille standard	12.0	0.39	932	423	8509	178	556	790
	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{LR}		
	0.365	0.449	0.041	0.881	0.032	0.234		
	0.301	0.488	0.061	0.662	0.024	0.555		

TABLE 1.2 – Paramètres mécaniques du *Populus alba* L. et d'un feuillu standard, correspondant à notre espèce de peuplier. Ceux-ci sont calculés d'après le modèle de feuillu standard de Guitard (Guitard 1987) avec une correction par rapport à la densité (équation 1.9).

5. Les indices R, T, L, indiquent les directions d'orthotropie du bois : radiale, tangentielle, longitudinale respectivement.

Le travail de Guitard (Guitard 1987) a permis de collecter un très grand nombre de données expérimentales sur les valeurs des termes de la matrice (\mathbf{S}) pour beaucoup d'essences d'arbres (feuillu et résineux). Il a pu ainsi proposer une loi 1.9 afin de corriger un module suivant la densité du bois, si elle n'est pas semblable à la celle d'un feuillu dit *standard* :

$$X_\rho = X_{0.65} \left(\frac{\rho}{0.65} \right)^n \quad (1.9)$$

Avec X_ρ le module devant être corrigé dans une direction donnée, n la puissance associée à la propriété X dans la direction souhaitée. Le facteur n associé aux modules d'Young, pour un feuillu, pour les axes d'orthotropie, varie entre 1 et 1.7.

1.1.5.2 Comportement hygro-élastique

Cette section présentera la mécanique liée aux phénomènes élastiques du retrait / gonflement.

Anisotropie du retrait / gonflement

Sous le *PSF*, le bois est dans son domaine, dit hygroscopique. Dans ce domaine, nous avons vu que le comportement du bois vis à vis de l'eau suit une courbe d'hystérésis de sorption. À l'échelle d'un cerne de croissance (composé de bois de printemps et de bois d'été), cette sorption est différente suivant la direction d'orthotropie (voir figure 1.12). Par exemple, la diffusion de l'eau est plus rapide dans le sens des fibres que dans le sens transverse (équation (1.10)).

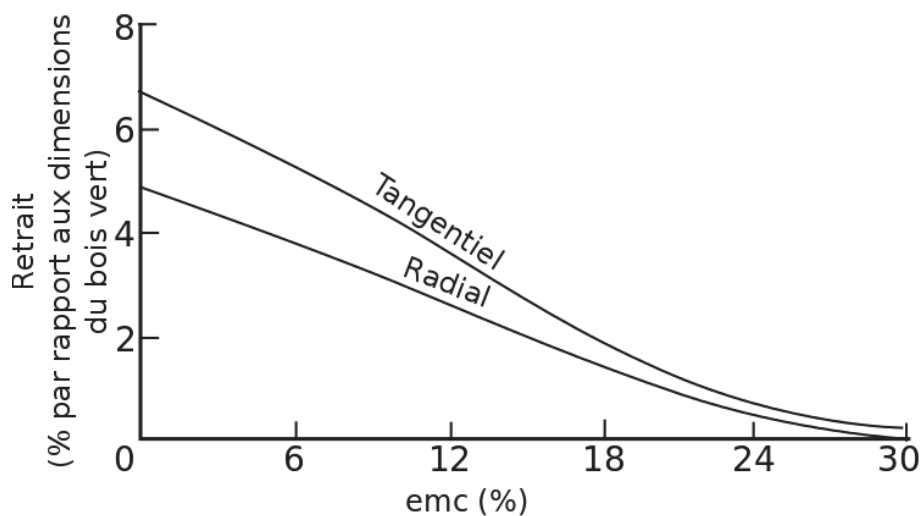


FIGURE 1.12 – *Retrait tangential et radial en fonction de l'humidité interne d'équilibre, d'après (Simpson 1999)*

On nomme le coefficient de retrait α_i dans la direction i (R, T ou L), le ratio entre le pourcentage de déformation dans la direction i et le pourcentage d'humidité interne. On peut garder à l'esprit que :

$$\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L \quad (1.10)$$

La diversité des essences de bois et donc des propriétés physiques de ceux-ci est très grande. On trouve donc une multitude de comportements lors d'un retrait. Le table 1.3 présente quelques espèces avec des retraits très variables.

Espèces	Retrait (%) de Radial	l'état vert à Tangentiel	l'état anhydre Volumique	Densité anhydre
Aulne	4.4	7.3	12.6	0.450
Cerisier	3.7	7.1	11.5	0.560
Châtaignier	3.4	6.7	11.6	0.480
Chêne rouge	4.4	11.1	15.1	0.700
Frêne noir	5.0	7.8	15.2	0.545
Hêtre	5.5	11.9	17.2	0.720
Épinette noire	4.1	6.8	11.3	0.450
Douglas	4.8	7.6	12.4	0.510
Pin rouge	3.8	7.2	11.3	0.545

TABLE 1.3 – Exemples de la variabilité des propriétés physiques de quelques essence de bois, d'après (Simpson 1999).

Pour le cas de notre peuplier, on considèrera que $\alpha_T \simeq 2 \alpha_R \simeq 0.3 \text{ \%}/\%$.

Cette anisotropie de retrait / gonflement crée dans une section de grume des courbures et formes particulières lors d'un séchage par exemple (figure 1.13). Ce retrait est particulier lors d'un premier séchage d'une pièce de bois (du passage de l'état vert, à l'humidité ambiante). Ce phénomène se rencontre également lors de phénomènes transitoires lors de changements d'humidité, mais avec moins d'intensité au retrait.

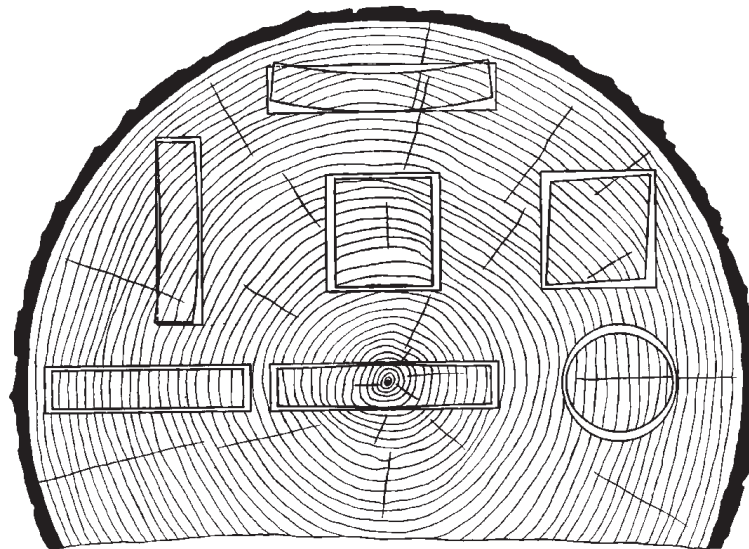


FIGURE 1.13 – Résultat d'un séchage d'une section transversale en fonction de la position dans cette grume, d'après (Simpson 1999)

Pour une planche déjà séchée, le débit de la planche (position et orientation de la planche relativement à la position de la moelle) est alors primordial afin de pouvoir déterminer sa

courbure – ou ses variations dimensionnelles – entre deux états d'équilibre, liée à un retrait / gonflement libre.

On considère une section de planche dans le plan (\vec{X}, \vec{Y}) (figure 1.6). On prendra comme repère local le repère d'orthotropie considéré précédemment, tournant autour de $(0, 0)$ (la moelle) avec un angle θ . On considère la planche entre deux états d'équilibre hydrique parfait (on ne considère pas les gradients d'humidité dans l'épaisseur). On fait donc l'hypothèse que le retrait / gonflement libre se fait à **contrainte nulle**. On veut alors quantifier le déplacement suite au nouvel état d'équilibre dans le repère (\vec{X}, \vec{Y}) :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \underline{\sigma} &= 0 \\ \operatorname{grad} \vec{U} &= \underline{\varepsilon} \\ \underline{\sigma} &= \underline{C}(\underline{\varepsilon} - \underline{\alpha}\Delta h) = \underline{0} \end{aligned} \tag{1.11}$$

Avec \vec{U} le vecteur déplacement, $\underline{\varepsilon}$ le champ de déformation, $\underline{\sigma}$ le champ de contrainte, \underline{C} le tenseur de rigidité, $\underline{\alpha}$ le vecteur coefficient de retrait, et Δh la variation d'humidité interne considérée dans ce problème.

La solution unique du problème (à un déplacement de corps rigide près) et valable dans toute la section, hormis le point $(0, 0)$, s'écrit :

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\alpha}\Delta h \tag{1.12}$$

Si l'on intègre l'expression 1.12 dans le système polaire, et que l'on projette la solution dans le repère cartésien (\vec{X}, \vec{Y}) , on obtient :

$$\begin{aligned} U_X &= r \Delta h (\cos \theta \alpha_R - (\alpha_T - \alpha_R) \theta \sin \theta) \\ U_Y &= r \Delta h (\sin \theta \alpha_R - (\alpha_T - \alpha_R) \theta \cos \theta) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{aligned} \tag{1.13}$$

Avec U_X le déplacement dans le sens \vec{X} , U_Y le déplacement dans le sens \vec{Y} , α_R le coefficient de retrait dans le sens radial, α_T le coefficient de retrait dans le sens tangentiel, x la coordonnée du point considéré suivant l'axe \vec{X} , y la coordonnée du point considéré suivant l'axe \vec{Y} .

Colmars (Colmars 2011) s'est, entre autre, intéressé à calculer la réponse d'une planche à diverses positions dans une section de grume grâce à cette solution analytique figure 1.14, en appliquant une variation d'humidité interne de $\Delta h = -0.1$ avec des coefficients de retrait de 0.3 %/% dans la direction tangentielle et de 0.15 %/% dans la direction radiale.

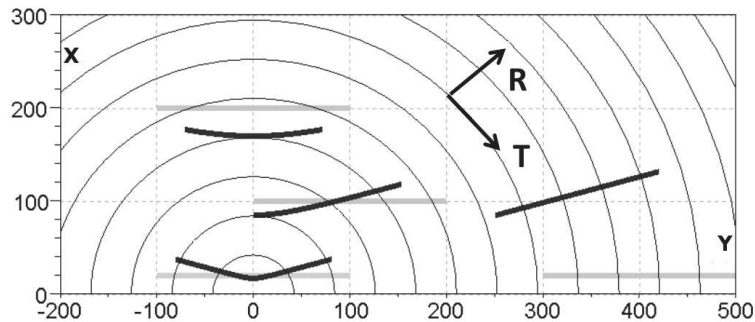


FIGURE 1.14 – Solution analytique (équation 1.13) d'une déformation libre lors d'un séchage de $\Delta h = -0.1$. L'état initial de la planche est représenté par une ligne grise, alors que sa déformée est amplifiée 10 fois et est représentée par une ligne noire; les déplacements de corps solide sont aussi représentés, d'après (Colmars 2011).

On comprend aisément que la déformation d'une planche peut conduire à une courbure dans le sens transverse aux fibres de bois (cette courbure est nommée *tuilage*), et cela même sans contrainte, juste par effet de structure combiné avec l'anisotropie de retrait / gonflement.

Effet des gradients d'humidité et phénomènes transitoires

Nous venons de voir la cinématique d'un séchage libre d'une planche entre deux états homogènes en humidité. Maintenant, on considère le phénomène transitoire, c'est-à-dire une planche qui n'est pas à l'équilibre avec l'environnement. Cet état est ce qui se rapproche le plus de la réalité car le climat fluctue continûment, donc un état homogène reste un idéal que le bois n'atteint jamais, même arrivé à l'état « d'équilibre ». Le bois garderait alors en mémoire son histoire hydrique et surtout les déformations liées à cette histoire (blocage, déformations...). Dans le cas de panneaux peints, les planches sont peintes sur une face. Cette situation asymétrique de phénomènes de transfert hydrique provoque des retraits également asymétriques, lors de changements climatiques. Considérons la planche en 2D dans le sens transverse, de manière discrète, c'est-à-dire l'épaisseur de la planche est séparée en plusieurs couches (figure 1.15.(a)). On considère la face peinte imperméable. Alors la couche, numérotée 1, prendra plus en humidité que la couche 2, qui augmentera son humidité plus que la couche 3, alors que la couche 4, directement sous la couche picturale, elle, ne changera pratiquement pas sa teneur en eau (figure 1.15.(b)). Ce gradient d'humidité, et donc de gonflement, oblige la planche à se courber (figure 1.15.(c)). La hausse de teneur en eau peut provoquer un gonflement. Dans certains cas, il est plus ou moins empêché, contrarié par les autres couches. Donc chaque couche n'est pas libre de gonfler librement. Il existe par le gradient d'humidité (et donc la différence de gonflement des différentes couches), une mise en compression de la couche sous la face peinte.

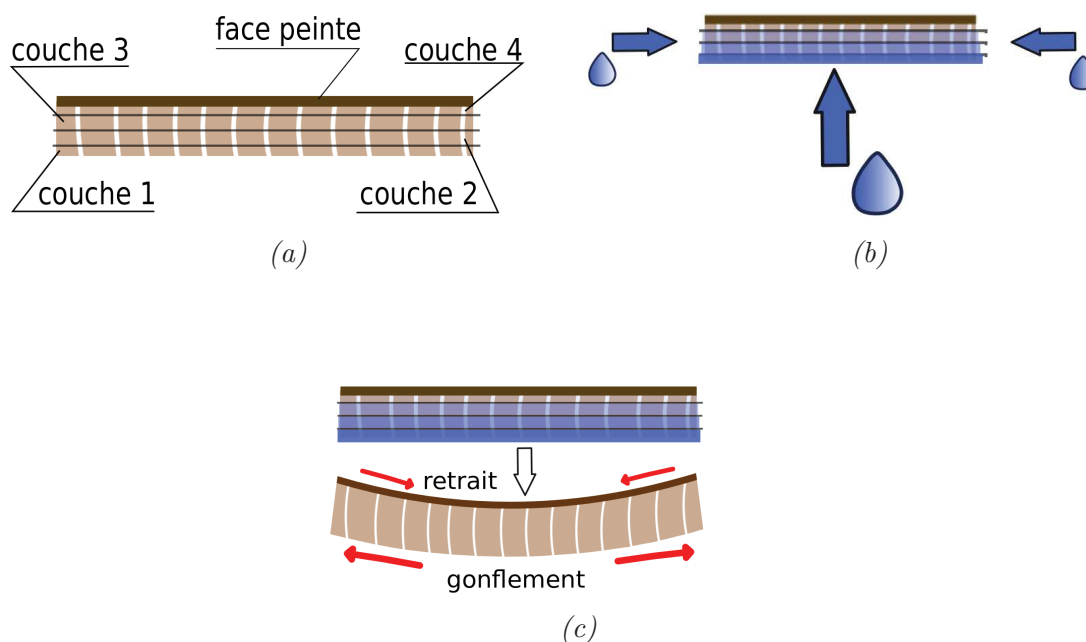


FIGURE 1.15 – Situation transitoire lors d'un gonflement par une seule face d'une planche débitée en quartier. (a) : Problème schématisé par une planche multicouche. (b) : Phénomène de gradient d'humidité interne entre les différentes couches. (c) : Tuilage de la planche sous l'effet du gonflement asymétrique.

La situation décrite est bien évidemment théorique car nous n'avons illustré qu'une situation de gonflement avec un gradient d'humidité linéaire dans l'épaisseur de la planche. Dans la réalité, avec les instabilités du climat, on imagine bien que ce gradient d'humidité dans la planche n'est pas du tout linéaire et provoque ainsi parfois des courbures singulières, c'est-à-dire que la courbure ne respecte pas le sens attendu.

Dans le cas des panneaux peints, les gradients d'humidité expliquent principalement le tuilage, or lorsque le panneau est gardé pendant plusieurs années dans des caissons climatiques (qui permettent une régulation du climat assez fine), la courbure demeure. En effet, dans cette situation, le panneau pourrait être qualifié de « à l'équilibre » (mécanique et hydrique), donc les effets transitoires ont disparu, mais le tuilage reste (expression de déformations bloquées).

C'est à cette question que la communauté des sciences du bois essaie de répondre depuis plusieurs années. Mes prédécesseurs (Marcon 2009), (Colmars 2011), (Froidevaux 2012) ou encore (Cocchi 2013), (Mazzanti 2007) et (Rachwał 2012) ont consacré une partie de leur travail de thèse pour tenter d'expliquer ce phénomène. Bien entendu, les discussions se sont tournées vers les modèles de mécanosorption qui permettraient d'expliquer les tuilages permanents.

Note sur les autres comportements mécaniques du bois

Lors d'un changement d'humidité, un chargement – hydrique – intervient. Il faut alors différencier la viscoélasticité⁶ de la mécanosorption qui a pu être mise en évidence dès les années

6. La viscoélasticité est le comportement élastique différé (dans le temps) d'un matériau soumis à un chargement. Le matériau possède une certaine viscosité, telle un fluide visqueux newtonien qui intervient lors

60 par Armstrong et Kingston (Armstrong 1960). Puis de nombreuses recherches s'y sont intéressées tels que les travaux de Hunt (Hunt 1999) ou encore de Gril (Gril 1988), pour ne citer qu'eux. Ce phénomène intervient particulièrement lorsque les phénomènes de retrait / gonflement libres sont empêchés, ce qui se passe particulièrement lorsqu'un panneau peint est restreint à l'arrière soit par des traverses, soit par un parquetage (voir chapitre 1.2).

1.1.6 Prise en compte de la variabilité du bois : mise en place d'un outil pour l'échantillonnage expérimental

Nous avons vu que le bois est un matériau multi-échelle (section 1.1.1) et peut donc avoir une variabilité importante à différentes échelles. Par exemple, dans un même arbre, le bois se trouvant près de la moelle peut avoir une densité différente que le bois se trouvant en périphérie (près du cambium). La densité n'est pas la seule propriété soumise à cette variabilité, toutes les propriétés physiques et mécaniques sont en fait affectées.

Lors de la mise en place d'expériences mettant en œuvre des comparaisons de propriétés avant et après un événement quelconque (traitement thermique, application d'un revêtement, histoire climatique ...), si le but est de comparer des moyennes de propriétés, alors la question de la représentativité est importante. La variabilité du bois peut venir affecter fortement les interprétations. Dans nos cas, on essaie de comparer une propriété liée à l'effet d'un traitement à une propriété initiale du bois. Un groupe témoin (sans traitement) est censé alors représenter cette propriété initiale. Il faut donc que le groupe témoin soit représentatif de tous les échantillons en moyenne. Il est même important que les groupes soient choisis de telle sorte qu'ils soient équivalents, c'est-à-dire que leur moyenne et leur écart-type de plusieurs propriétés soient les plus proches possibles. Alors, lors de l'interprétation des résultats, les changements de propriétés d'un groupe par rapport à un autre ne viendra pas d'un biais (dû à la variabilité) mais bien du traitement effectué sur ce groupe.

Ce travail d'échantillonnage s'est effectué avec l'aide de Tancrede Alméras, chercheur au LMGC. Il a mis au point un algorithme stochastique basé sur le tirage aléatoire multi-critères d'échantillons pour former des groupes homogènes en moyenne et en écart-type. L'algorithme se déroule comme suit :

1. Tirage aléatoire des échantillons pour former des groupes
2. Calcul d'un critère \mathbf{C} à partir du tirage effectué
3. Choix du groupe le plus pénalisant pour le critère \mathbf{C} mis en place
4. Dans ce groupe, on vient retirer aléatoirement des échantillons jusqu'à ce que le groupe ne soit plus le plus pénalisant du point de vue du critère \mathbf{C}
5. On recommence le point 4 pour le nouveau groupe le plus pénalisant

Il est donc essentiel de bien poser ce qu'est le critère \mathbf{C} . Notre but est de faire des groupes d'échantillons possédant la même moyenne et le même écart-type pour plusieurs propriétés. Donc ce critère combine la variance inter-groupe des moyennes et la variance inter-groupe

d'une charge constante, la réponse est alors différée dans le temps mais reste élastique (le matériau revient à son état initial)

des écart-types. Il s'agit donc d'un critère multi-varié avec plusieurs variables cibles. On peut écrire le critère C :

$$C = \sum_{var} p_{var} \cdot C_{var} \quad (1.14)$$

$$C_{var} = V_{inter}(M_g) + V_{inter}(\sigma_g) \quad (1.15)$$

Avec \sum_{var} la somme sur toutes les variables, p_{var} le poids donné à une variable, $V_{inter}(M_g)$ la variance inter-groupe des moyennes des groupes et $V_{inter}(\sigma_g)$ la variance inter-groupe des écart-types des groupes.

Le poids donné à une variable (ou propriété) est laissé au choix de l'expérimentateur qui décide si une propriété est plus « importante » par rapport aux autres.

Un exemple est donné figure 1.16 pour illustrer le choix des groupes d'échantillons de bois, s'il est fait de manière aléatoire ou en utilisant l'algorithme précédent. Cet exemple présente 160 échantillons de bois, 16 groupes sont formés au départ de manière aléatoire ((a) et (b)) ; après échantillonnage, nous avons 10 groupes de 10 échantillons chacun ((c) et (d)), les échantillons enlevés sont représentés en gris (groupe 11).

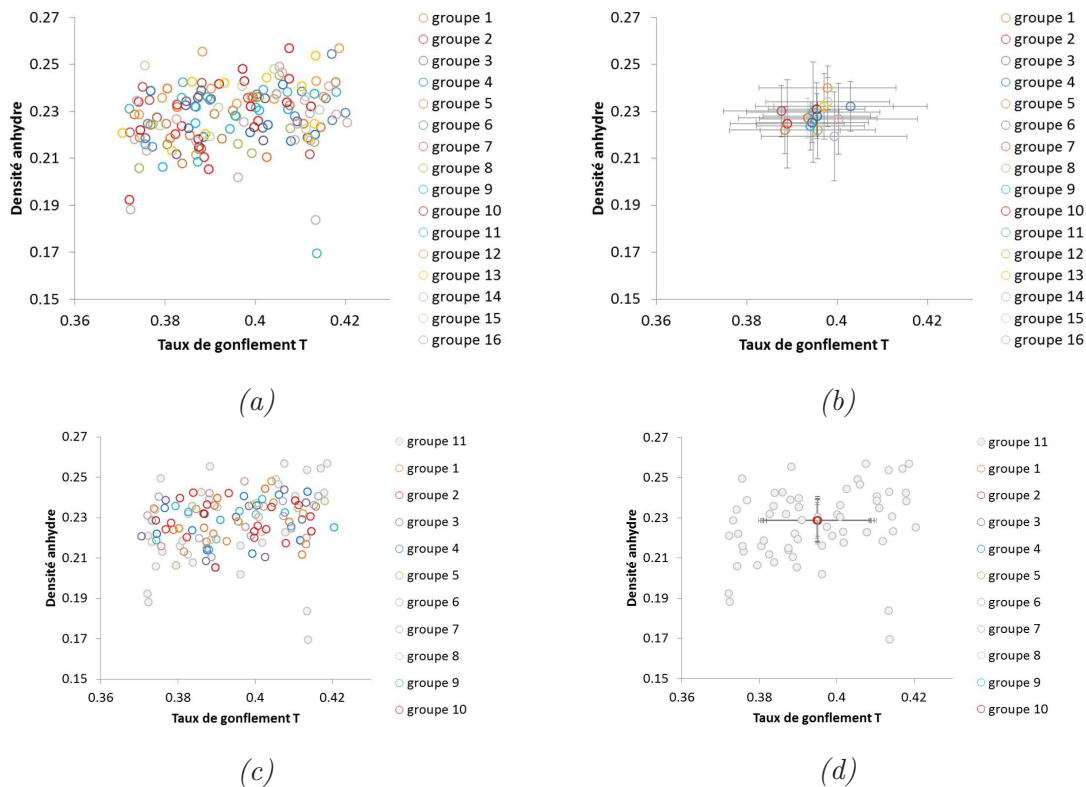


FIGURE 1.16 – Exemple d'échantillonnage de groupe d'échantillons de bois en fonction de leur densité anhydre et de leur gonflement tangentiel. (a) : Échantillonnage aléatoire des groupes. (b) : Échantillonnage aléatoire des groupes en représentant leur moyennes et écart-type. (c) : Échantillonnage utilisant l'algorithme d'Alméras. (d) : Échantillonnage utilisant l'algorithme d'Alméras en représentant leurs moyennes et écarts-type.

1.1.7 Les techniques de mesures de champ par Corrélation d'Images Numériques

Beaucoup de méthodes expérimentales pour déterminer les champs de déformation utilisent la Corrélation d'Images Numériques (CIN) (Chu 1985), (Choi 1997). Cette méthode consiste à prendre une image (ou deux images simultanément par stéréo-vision) avec une caméra numérique. Au cours du temps, lors d'un mouvement et/ou déformation de l'échantillon, les images prises permettent d'avoir l'évolution des variables cinématiques (déplacement, vitesse, déformation ...) de la surface de l'objet considéré. La méthode générale consiste donc à comparer une image de l'état déformé à une image de l'état de référence.

1.1.7.1 La Corrélation d'Images Numériques par mouchetis

Le mouchetis est un motif en niveau de gris, de tâches aléatoires, appliqué sur la surface mesurée (Barranger 2010), (Barranger 2012). Lors de l'analyse d'image, l'algorithme mis en place recherche une zone de corrélation définie à l'état de référence dans l'image de l'état déformé (figure 1.17).

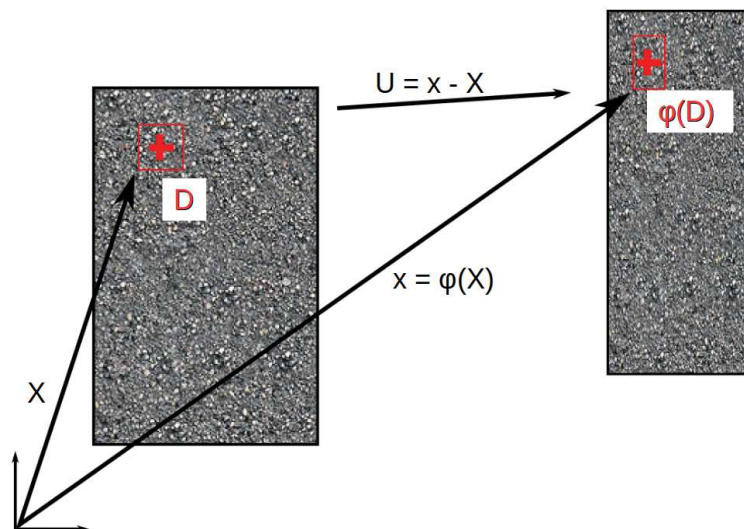


FIGURE 1.17 – Principe de la corrélation d'images numériques.

Le calcul se fait par sous-domaine D . La zone de corrélation D ayant une position initiale $X(X, Y)$, le calcul consiste à retrouver la position $x(x, y)$ dans l'image déformée, par « ressemblance » du motif de gris de chaque sous-domaine. On peut alors déterminer pour chaque sous-domaine les coordonnées du déplacement $U(u, v)$ de son centre (Brémand 2011). On peut alors écrire la transformation matérielle :

$$x = \phi(X) = X + U(X) \quad (1.16)$$

La mise en correspondance par le biais du niveau de gris des deux images s'écrit :

$$f(X) = g(x) = g(\phi(X)) \quad (1.17)$$

Où $f(X)$ et $g(x)$ sont les niveaux de gris de l'état de référence et de l'état déformé respectivement.

Afin de déterminer la transformation matérielle ϕ , on passe par un développement limité ϕ_0 sur le domaine D centré au point X_0 lors de l'état de référence.

$$\phi_0(X) = X + U_0(X_0) + \frac{\partial U}{\partial X}(X_0) \cdot (X - X_0) + \frac{1}{2} (X - X_0) \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}(X_0) \cdot (X - X_0) + \dots \quad (1.18)$$

La détermination de l'ordre de développement de ϕ_0 est un choix qui doit se faire suivant le cas étudié.

On cherche alors à minimiser le coefficient de corrélation $C = \sum_{X \in D} (f(X) - g(x))$. La minimisation de ce coefficient peut être basée sur les méthodes des moindres carrés (Barranger 2012) ou la méthode Newton-Raphson par exemple (Bruck 1989).

Pour l'application de cette méthode lors des expérimentations (dans les parties 2.1.3 et 2.2), l'objectif a été de vouloir une information continue sur la surface. En effet, cette méthode a l'avantage de fournir des champ 2D de déplacement des zones de corrélation. Si ces zones se recouvrent l'information devient alors quasi continue sur la surface considérée.

Le désavantage de cette technique est dans l'application du mouchetis, qui n'est parfois pas possible. On s'imagine bien, dans le cas de tableaux, qu'on ne peut pas recouvrir la surface de peinture. Cependant, dans certains cas, le motif naturel du bois ou des craquelures de la peinture peuvent faire office de mouchetis, mais les cas d'applications ne sont pas aussi nombreux que prévu.

1.1.7.2 Le suivi de marqueurs

Cette méthode est, comparée à la précédente, plus robuste mais détermine un champ de déformation de façon discrète sur la surface de l'échantillon considéré. Le suivi de marqueurs consiste à suivre l'évolution de taches (figure 1.18) (Rotinat 2011) (bien que certaines études aient déjà été faites avec des anneaux (Lee 1994) ou des lignes (Metwalli 1987)).

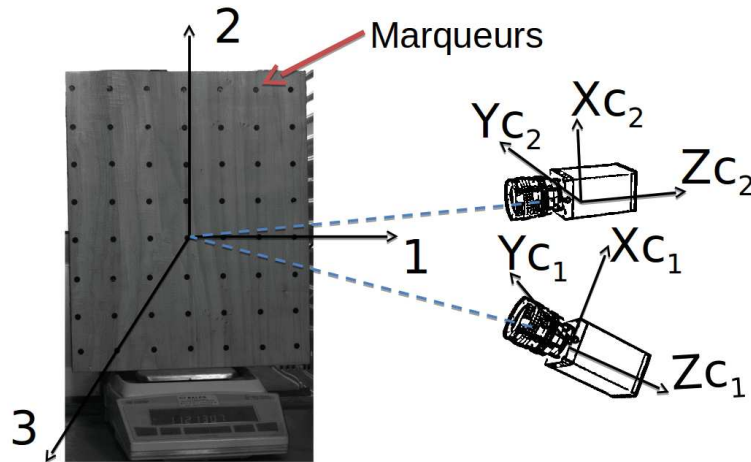


FIGURE 1.18 – Principe du suivi de marqueurs en stéréo-vision.

Le principe est de suivre le barycentre de chaque tâche. Ce barycentre, de coordonnées (x_g, y_g) est déterminé à partir du pic du signal d'intensité lumineuse.

$$x_g = \frac{\sum_i x_i (I_i - I_s)}{\sum_i (I_i - I_s)} \quad (1.19)$$

$$y_g = \frac{\sum_i y_i (I_i - I_s)}{\sum_i (I_i - I_s)} \quad (1.20)$$

Avec I_s l'intensité seuil de la zone d'étude, et I_i l'intensité lumineuse du pixel i de coordonnées (x_i, y_i) .

Lorsqu'on a les coordonnées de tous les barycentres pour tous les temps, on peut alors accéder aux valeurs cinématiques du mouvement.

Concrètement le calcul des déformations a été choisi de telle sorte qu'il se passe entre quatre marqueurs en forme de « croix » (figure 1.19). Le calcul se fait donc à partir des déplacements de ces quatre marqueurs. L'information de la déformation obtenue sera alors centrée entre ces quatre marqueurs.

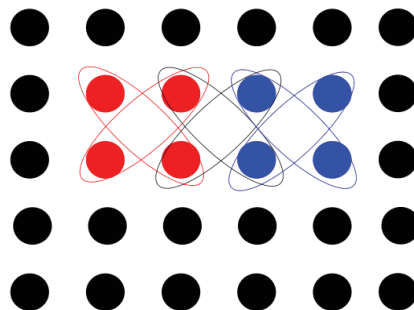


FIGURE 1.19 – Principe de calcul des déformations à partir d'une grille de marqueurs, le calcul pour la corrélation d'images numériques par mouchetis suit le même principe.

Le suivi de marqueurs ne donne pas d'information de façon continue sur la surface regardée, mais uniquement au niveau des marqueurs. Cette mesure donne une information globale sur les déplacements de l'objet. On notera tout de même que le suivi de marqueurs est une méthode robuste de mesure et adaptée au suivi en continu des tableaux car les marqueurs sont facilement applicables sur l'envers d'un tableau, et pour ce qui est de la face avant, on peut suivre les détails de la peinture – à condition que le niveau de contraste du détail regardé soit assez élevé. C'est pour ces raisons que nous avons utilisé cette méthode dans la partie 3.

1.1.8 Le(s) vieillissement(s)

Une des inconnues mécanique / physique de ce sujet de thèse est le comportement du vieux bois. En effet, ce comportement est délicat à caractériser et les propriétés de ce bois sont généralement remarquables en terme de mécanique et de physico-chimie. Les sciences du bois (construction, conservation, foresterie ...) s'intéressent à cette problématique pour prévoir le comportement d'une structure bâtie dans le temps, ou d'un tableau peint sur bois, dans notre cas, pour prédire et préserver les objets issus du passé. Or pour comprendre un comportement actuel, on essaie de modéliser et formuler des hypothèses sur l'histoire du matériau et sur ce qu'il a pu subir. Les bois anciens sont des objets rares et généralement précieux que nous ne pouvons pas trop manipuler pour les comprendre. C'est pourquoi des essais de reproduction des caractéristiques du vieux bois sont effectués. Ces essais sont généralement opérés de façon accélérée tels les traitements thermiques. Effectivement, une des façons d'accélérer les cinétiques de transformation physico-chimique d'un matériau consiste à augmenter la température, et dans le cas de matériau hygroscopique, de jouer également sur l'humidité.

Nous essaierons de voir en quoi le vieillissement naturel du bois est différent des vieillissements accélérés et ce qu'il implique d'un point de vue physico-chimique surtout. Puis nous verrons l'influence de l'accélération du vieillissement par traitement thermique.

1.1.8.1 Le vieillissement naturel

Le vieillissement est un phénomène irréversible qui modifie les propriétés physiques, chimiques et/ou mécaniques après une conservation ou un usage assez long – plusieurs dizaines voire centaines d'années. Habituellement cette modification de propriétés ne va pas dans le sens de l'amélioration de celles-ci : le vieillissement, dans les matériaux en général, crée des dommages non voulus. Or pour le bois, le vieillissement est plutôt associé à une bonification de certaines de ces propriétés. Par exemple, il est souvent observé qu'un bois ancien est plus stable dimensionnellement et hydriquement – de par la réduction de son hygroscopicité et de sa faculté à gonfler/ se rétracter – qu'un bois venant d'être coupé (Yokoyama 2009), (Obataya 2007).

Le vieillissement naturel du bois peut venir de beaucoup de paramètres comme l'endroit et la façon dont il a été conservé, son histoire hydrique durant cette conservation. En effet, le vieillissement intervient à l'échelle de la microstructure des polymères composant le bois, et il tend à changer chimiquement ces polymères et leurs interactions (Popescu 2009). Donc suivant l'histoire du vieillissement, les mécanismes mis en jeu ne sont pas les mêmes s'il y a eu apport de lumière, immersion dans l'eau, effort mécanique ... Dans notre étude, nous nous intéresserons au vieillissement sous conditions favorables, c'est-à-dire sans exposition à la lumière

ou immersion dans l'eau – ce qui arrive pour la plupart des panneaux peints. Nous excluons également le cas des attaques d'insectes xylophages et de champignons. Dans ces conditions optimales de conservation, le bois a subi pendant des centaines d'années des changements d'humidité et de température, ce qui a pu provoquer des déformations irréversibles.

1.1.8.2 Accélération du vieillissement et traitement thermique

Il existe de nombreuses façons d'essayer de reproduire les propriétés du vieux bois. L'une des plus usitées est la reproduction de fluctuations hygro-thermiques que peut subir le bois pendant son vieillissement (Esteban 2005). Ne pouvant pas effectuer des expérimentations sur plusieurs centaines d'années, les chercheurs se sont orientés dans l'accélération du processus de vieillissement par des traitements hygro-thermiques. Le but principal de ces traitements est d'améliorer la stabilité dimensionnelle (Sik 2010) et la résistance mécanique du bois (Sonderegger 2015). Les altérations des polymères du bois sont dues aux changements chimiques qu'engendrent les hautes températures (Rowell 2009).

L'effet chimique principal des traitements thermiques est l'altération des hémicelluloses, qui serait donc responsable de la réduction de l'hygroscopicité et donc de la stabilité dimensionnelle du bois. En effet, les hémicelluloses sont des polymères qui se dégradent à haute température. Ils possèdent de nombreux groupes hydroxyles, donc en dégradant les hémicelluloses, moins de sites d'adsorption sont disponibles, donc le bois devient moins hygroscopique.

Dans ces traitements, si l'on ajoute de l'humidité (traitement hors état anhydre), alors l'eau va jouer le rôle de plastifiant en diminuant les interactions entre les hémicelluloses, la lignine et les zones amorphes de la cellulose. Ces composants contiennent tous des groupements hydroxyles et sont donc tous hygroscopiques. Donc lorsqu'ils sont saturés d'eau, leur température de transition vitreuse T_g chute à température ambiante (figure 1.20) (Navi 2011).

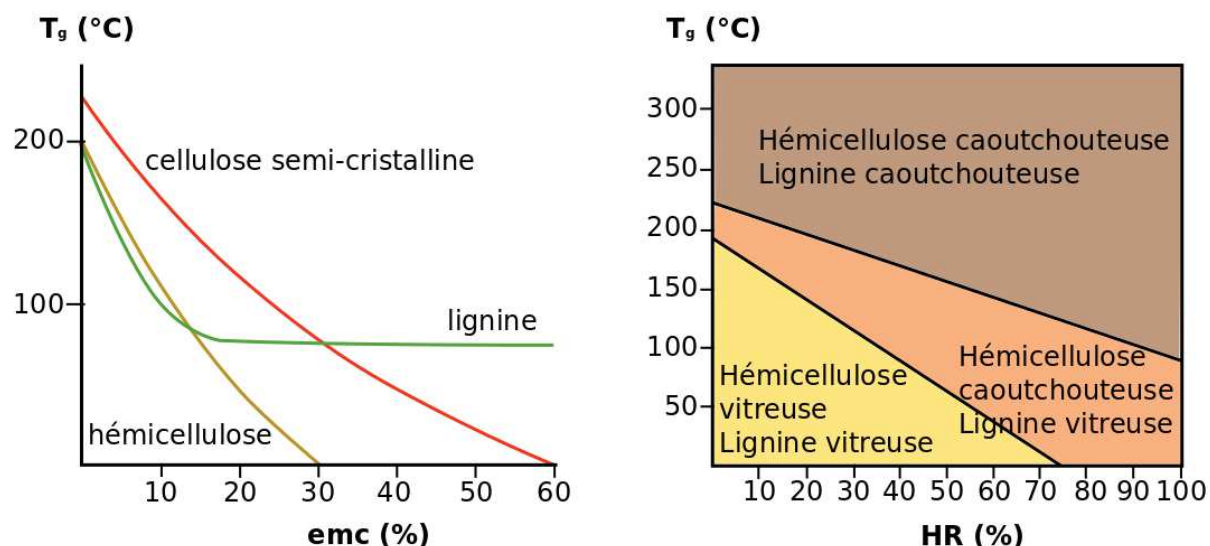


FIGURE 1.20 – Température de transition vitreuse (T_g °C) : pour chaque composant polymérique du bois, en fonction de l'humidité interne (emc %) (gauche); pour la matrice hémicellulose - lignine, en fonction de l'humidité relative (HR %) (droite), d'après (Salmén 1982) et (Salmén 1986), lu dans (Navi 2011).

Concrètement, ajouter de l'humidité dans une cellule de traitement, revient à intensifier ce phénomène.

1.2 Les panneaux peints, conservation de panneaux de bois peints

La conservation des collections nous force à nous poser plus de questions que simplement : « comment caractériser un matériau ? ». On doit pouvoir prédire le comportement d'un matériau seul et/ou d'une structure composite et le préserver de dommages irréversibles, et tout cela, dans des conditions dites « d'exposition ». Il faut donc que l'œuvre puisse être dans une position acceptable pour sa lisibilité.

Il faudra bien distinguer deux approches dans la conservation d'une collection : la conservation préventive et les interventions de restauration. La conservation préventive aide à définir une politique de conservation et évalue les conditions de conservation des œuvres et/ou monuments du patrimoine. Les interventions de restauration (parfois appelées conservation curative) sont des actes qui interviennent sur la structure même de l'objet qui est menacée. Elles sont censées respecter une déontologie comme par exemple le fait qu'un acte de restauration doit être réversible. Donc d'une part la conservation préventive est censée réguler les causes de dégradations, et d'autre part la conservation curative traite les effets de ces dégradations.

Dans le cadre du matériau principal qui nous intéresse, le bois, il s'agit non seulement de pouvoir comprendre (et donc modéliser) le comportement hygromécanique du matériau mais

aussi déterminer son comportement dans la structure dont il fait partie : le panneau peint.

Le panneau peint est une structure composite multicouche composée principalement de bois, le support, et de gesso, mélange de colle et de plâtre et servant de sous-couche entre la peinture à proprement parler et le bois. Un panneau est généralement un assemblage de planches. La structure globale peut être renforcée au revers par des traverses ou des parquetages.

1.2.1 L'environnement du panneau

L'environnement de stockage des œuvres fait partie intégrante des problèmes de conservation. Trois paramètres essentiels sont pris en compte dans l'environnement : la lumière, l'humidité relative et la température de l'air. Le premier paramètre, la lumière, pose des problèmes de dégradation des pigments, mais il est nécessaire à la visibilité des œuvres exposées. Actuellement, ce problème est bien traité car des études quantitatives ont permis la mise en œuvre de solutions (Richardson 2007). Concernant les problèmes liés à l'air, outre les soucis que pose la dépollution des climats des musées, la gestion de l'humidité et de la température reste encore à améliorer dans la plupart des musées et autres lieux de stockage. En 2007, Erhardt et al. (Erhardt 2007) dépeignent l'ensemble des études traitant du problème de gestion du climat dans les musées. En effet, l'arrivée massive des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) dans les années 40 dans le monde muséal a eu pour conséquence la détérioration de beaucoup d'œuvres composites dont les matériaux constituants étaient hygroscopiques. Ces auteurs présentent également trois étapes "fondamentales" pour réguler le climat des musées :

1. Déterminer les effets de l'environnement sur les collections
2. Mettre en place des exigences à partir des résultats de l'étape 1, en prenant bien en compte le matériau, l'endroit où l'objet est stocké et le climat et contexte économique local.
3. Maintenir et suivre en continu l'environnement mis en place à l'étape 2.

Une des premières études prenant en compte ces trois étapes, ou du moins, ayant une démarche scientifique quantitative, a été menée en 1982 par Colville et al. (Colville 1982) (lu dans (Erhardt 2007)), puis par Thomson (Thomson 1986). Colville et al. ont tenté de modéliser par éléments finis le comportement mécanique des différentes couches d'un panneau peint. Prenons l'exemple d'une couche de gel et d'une plaque de verre non solidaires (cas théorique et très simplifié) (voir figure 1.21), si l'on fait diminuer l'humidité relative de l'air, la couche de gel, matériau hygroscopique, aura tendance à se rétracter avec la perte d'eau, alors que le verre, lui, ne sera pas influencé par ce changement d'humidité. Il s'agit dans ce cas de déformation "libre", c'est-à-dire réversible dans le temps. Cependant si les deux couches sont collées l'une à l'autre, le gel ne pourra pas se rétracter librement car le verre imposera les dimensions (la rigidité du verre étant bien supérieure à la rigidité du gel, il impose donc le comportement général de l'assemblage). Dans ce cas-ci, le gel va développer des contraintes et donc des déformations qui peuvent être irréversibles et mener à des craquelures et des fissures.

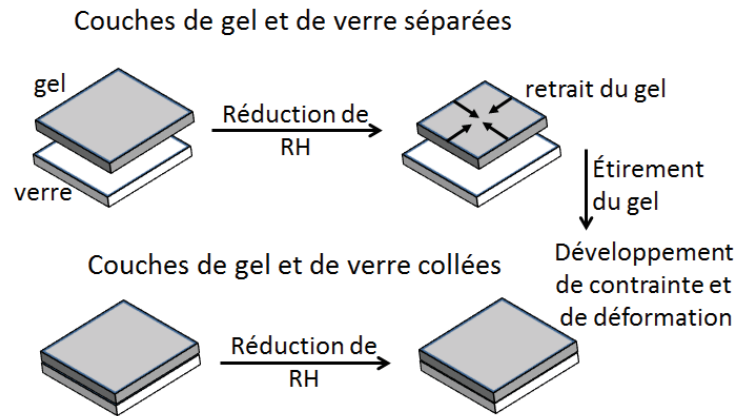


FIGURE 1.21 – Comportement d'un bi-couche lors d'un changement de climat externe, dû à une différence de coefficient de retrait des matériaux, d'après (Erhardt 2007).

Dans le cas d'un panneau peint, l'assemblage de couches de matériaux différents (bois, gesso, colle animale, peinture principalement) rend la structure fortement anisotrope d'un point de vue transfert hydrique (voir figure 1.22) (Erhardt 1995) et mécanique. Lors d'un changement d'humidité répété, le phénomène de différences de comportement s'accroît créant également des blocages mécaniques (décrit dans le chapitre 1.1.5). Ces comportements deviennent alors dangereux pour la structure, car créant alors des dommages irréversibles (type délaminations, fissures ...).

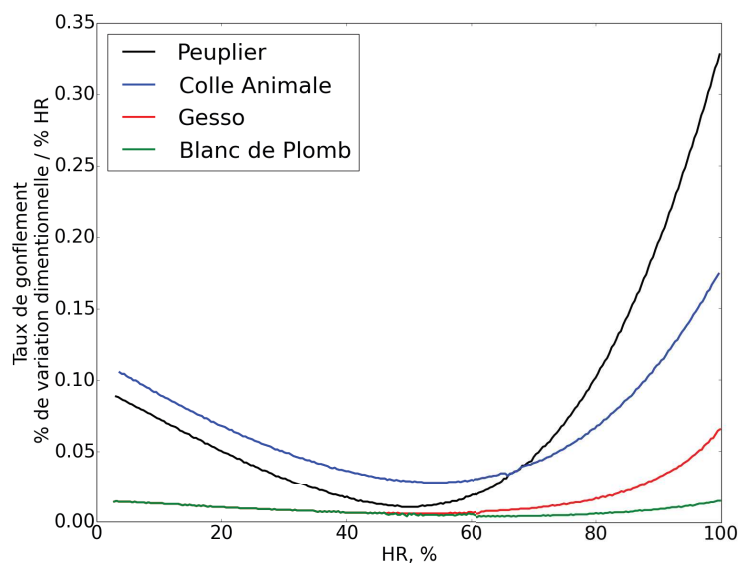


FIGURE 1.22 – Taux de gonflement en fonction de l'humidité relative de plusieurs composants d'un panneau peint. Les résultats du peuplier sont ceux correspondant à la direction tangentielle, d'après (Erhardt 1995).

La question de la régulation climatique a fait naître plusieurs rapports traçant les principes directeurs à suivre en terme de régulation climatique dans les musées, comme par exemple les *Guideline* du musée d'Alaska et des Archives Canadiennes (Ala 2000) (Michalski 2000).

Citons également le programme NOAH'S ARK (Global Climate Change Impact On Built Heritage and Cultural Landscapes) (Sabbioni 2010). Ce programme européen a permis de mettre en relation les futurs changements climatiques en Europe et l'évaluation des risques pour les œuvres patrimoniales au cours de 3 périodes : le passé récent, le futur récent et le futur lointain.

Ainsi, on peut comprendre aisément à quel point le contrôle climatique est un enjeu en soi (Martens 2012). En passant par la compréhension fine des comportements, individuels puis structurels, lors de variations d'humidité et de température, on peut ainsi définir des plages acceptables, pour les lieux de conditionnement des œuvres, par le maintien d'un climat moins dépensier en énergie et une meilleure conservation des collections.

1.2.2 L'histoire des techniques : assemblage des panneaux

Afin de pouvoir comprendre la structure complexe qu'est un panneau peint, il est important de retracer son évolution au cours des siècles.

Il existe trois grandes tendances en Europe dans la fabrication d'un support en bois peint :

- le panneau peint italien généralement en peuplier (du XIII^e siècle au XVI^e siècle) (Marette 1961) (lu dans (Graindorge Lamour 2012)) et (Uzielli 1998)
- le tableau d'origine ibérique du XVII^e siècle principalement en pin (Véliz 1998)
- le panneau peint flamand, ou du moins provenant d'Europe du Nord, en chêne, tilleul, hêtre, épicéa ou encore en pin (Wadum 1998)

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous allons principalement nous concentrer sur les panneaux italiens en peuplier. Cette essence a été la plus utilisée dans la région toscane car disponible dans ces forêts (Marette 1961). De plus, le peuplier présente une assez bonne stabilité dimensionnelle et il est également assez léger (densité autour de 0.480 g.cm^{-3}). Un des problèmes majeurs qui se pose quant à cette essence de bois, est la durabilité. Du fait de la faible présence d'extractibles, les insectes xylophages et les moisissures sont susceptibles d'infester le bois.

L'artisan qui fabriquait le panneau peint devait avoir une bonne intuition de la façon dont le bois allait se comporter vis-à-vis des fluctuations d'humidité. Donc, concernant le débit des planches dans la grume, le débit en quartier (figure 1.24) était considéré comme le débit le plus judicieux en terme d'anisotropie de retrait et donc du futur tuilage de la planche. C'est ce qu'il en était en Europe centrale et du Nord. Mais cette règle ne semblait pas s'appliquer pour les panneaux italiens en peuplier. En effet, bien que les planches sur quartier soient moins sensibles au tuilage, elles contiennent la moelle de l'arbre (figure 1.23). Cette dernière représente mécaniquement une zone à éviter et elle provoquerait des fissures le long des fibres du bois, et entraînerait donc la ruine du panneau. De plus, les débits sur dosse (figure 1.24) sont beaucoup moins coûteux que ceux sur quartier. De même, l'on peut voir des débits "faux quartier" telle la figure 1.24.

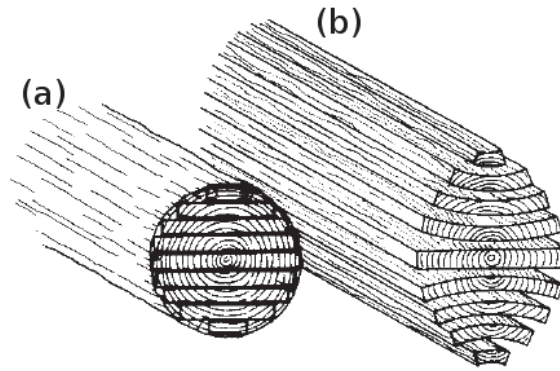


FIGURE 1.23 – Schéma de débits de planches dans une grume. (a) : Au moment de la découpe, à l'état vert. (b) : Après séchage, avec le tuilage dû à l'anisotropie de retrait, d'après (Uzielli 1998).

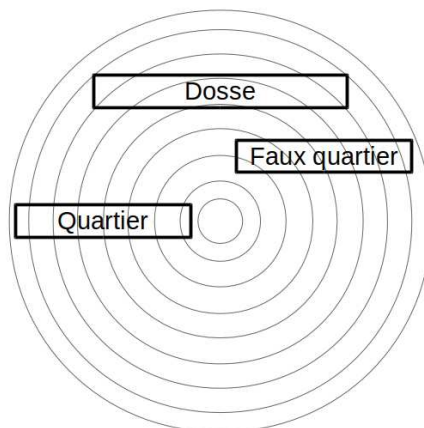


FIGURE 1.24 – Schéma de débits classiques dans une grume.

Lors de la manufacture du panneau peint, l'artisan devait également prendre garde au bon séchage de la planche avant son utilisation. Il devait attendre que les planches destinées à la fabrication d'un panneau soient séchées et stabilisées avec l'air ambiant. Pour cela, il attendait parfois plusieurs années avant d'utiliser des planches. S'il s'avère que le séchage n'est pas complet, les déformations induites par la fin de ce séchage peuvent être désastreuses dans un assemblage, et mener à des fentes traversantes comme celles observées dans le panneau *Maestà*, de Duccio (figure 1.25).



FIGURE 1.25 – Exemple de panneau peint mal séché qui continue à se déformer de façon inexplicable. Maestà de Duccio, d'après (Uzielli 1998).

Une fois cette étape respectée, l'artisan pouvait assembler les planches entre elles. Pour cela, il collait à l'aide de colle animale ou de caséine (Cennini 1899) les bords destinés à être en contact. Parfois, des incisions pouvaient être faites dans le bois afin d'augmenter la surface de contact entre la colle et le bois. Dans de plus grandes structures, des tenons cylindriques (figure 1.26.(a)) ou parallélépipédiques (figure 1.26.(b)) pouvaient être insérés entre les bords afin de guider l'assemblage et permettre la planéité du panneau.

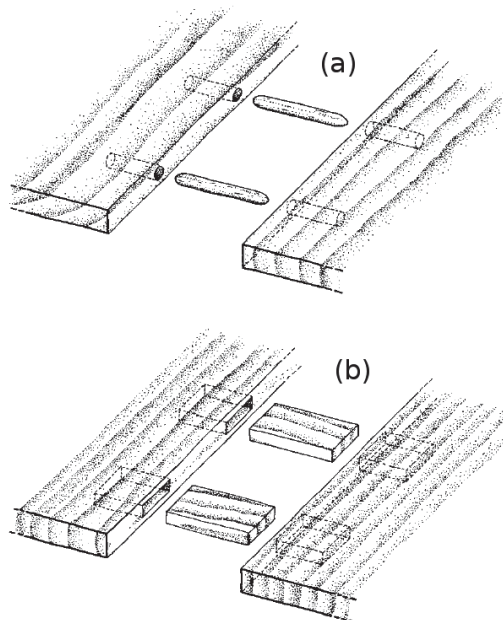


FIGURE 1.26 – Méthode d'alignement de planches de bois entre elles à l'aide de tenons. On peut trouver deux sortes de guides : (a) cylindriques et (b) parallélépipédiques, d'après (Uzielli 1998).

Les planches étant maintenant assemblées entre elles, le panneau est destiné à être déplacé puis accroché. Pour cela, le charpentier/ébéniste insérait un système de renfort à l'arrière de la structure. Le système de renfort le plus simple était l'insertion de traverses de bois à contre-fil des planches. Ces traverses pouvaient avoir plusieurs sortes de géométrie (figure 1.27). Parfois la géométrie du renfort était plus complexe, avec un système de traverses coulissantes afin de permettre le retrait / gonflement du panneau lors de fluctuations climatiques.

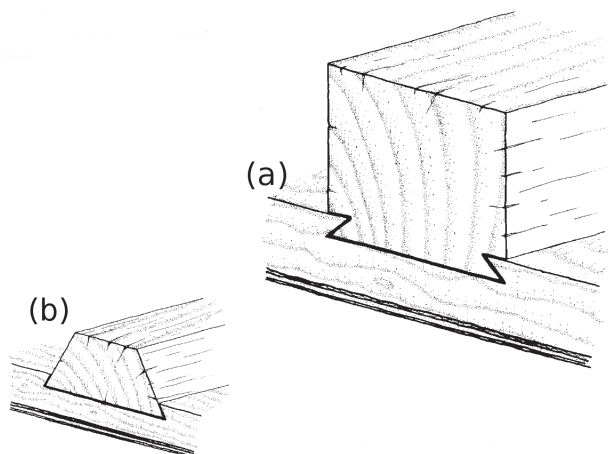


FIGURE 1.27 – Méthode de glissière encastrée entre les traverses et le panneau. (a) : Exemple lorsque la traverse est de section rectangulaire. (b) : Exemple de traverse trapézoïdale, d'après (Uzielli 1998).

Bien sûr les assemblages sont multiples et variés, à tel point que la communauté autour des panneaux peints aime bien dire que chaque cas est unique. Le paragraphe précédent retrace d'une manière non exhaustive les techniques d'assemblage.

Dans la suite de cette partie, on s'intéressera à la suite de la fabrication d'un panneau peint, c'est-à-dire, la couche picturale et son rôle mécanique au sein de l'ensemble de la structure.

1.2.3 Une structure multi-couche

Il ne faut pas oublier que l'objet qui nous intéresse, le panneau peint, est un composite multicouche composé de :

- **bois** : le support
- **encollage** : colle animale
- **toile** : en lin, parfois présente
- **gesso** : mélange de plâtre de Paris et de colle animale
- **imprimitura** : colle de poisson
- **peinture** : suivant les époques et les peintres, sa composition change (huile, tempera ...)
- **verniss** : mélange parfois à base de blanc d'œuf, mais aussi de bien d'autres choses

Les types de préparation diffèrent suivant les époques et les lieux, nous nous intéresserons à la méthode pratiquée à Florence au XIV^e siècle (Cennini 1899).

L'encollage et la toile

La toile, faite principalement de lin, est souvent visible dans les panneaux peints florentins. Dans certains cas, elle recouvre entièrement le panneau, dans d'autres cas, elle apparaît uniquement à des endroits de faiblesses de la structure, tel que les joints, les têtes de clous . . . Avant son application, elle est ébouillantée et étirée afin de relâcher les fibres la constituant, puis badigeonnée de colle animale pour l'en imprégner. Enfin elle est appliquée sur le bois, précédemment enduit de colle animale (encollage).

Le gesso

Le gesso est une préparation à base de plâtre de Paris — tamisé (gesso sottile) ou non tamisé (gesso grosso) — et de colle animale (généralement colle de lapin). L'application du gesso sur le panneau se fait par couches successives. Le gesso grosso est appliqué en premier en deux couches, puis après séchage de ces couches, le gesso sottile est badigeonné en quatre couches généralement (Cennini 1899). Chaque couche de gesso sottile est séchée puis poncée afin d'aplanir la surface totale.

L'imprimatura

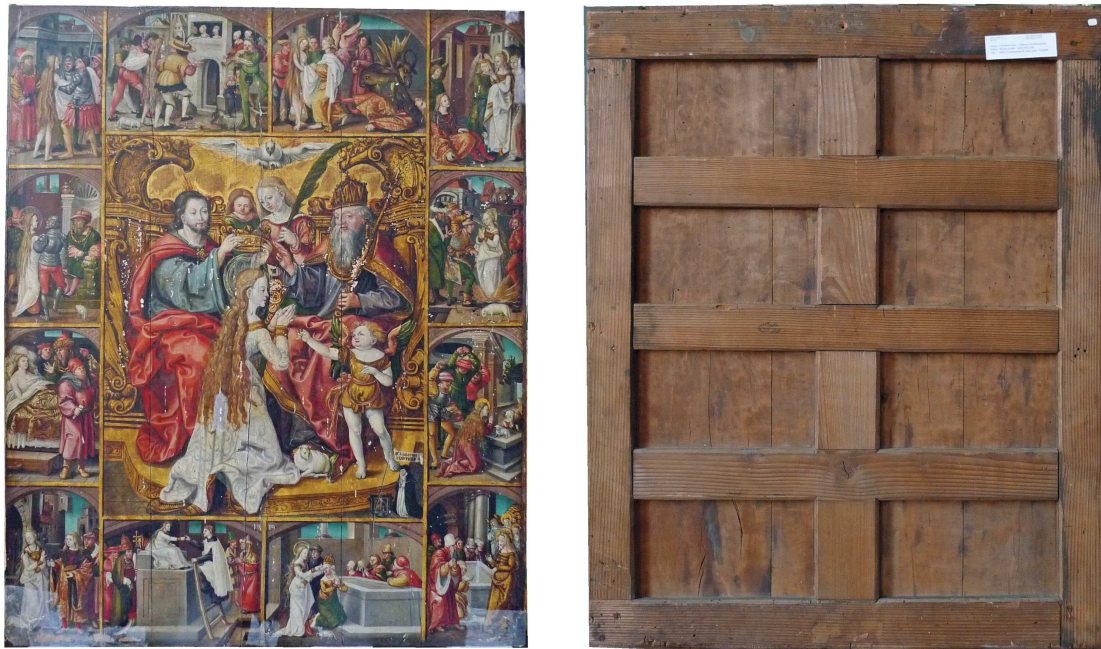
Lorsque le tout est bien sec, deux couches de colle de poisson (dans le meilleur des cas, il s'agit de colle d'esturgeon) permettent de préparer le support à recevoir la peinture. Cette étape permet également de stopper les transferts d'eau avec la surface hygroscopique du gesso.

La peinture et le vernis

Enfin le panneau était prêt à être livré à l'artiste afin d'être peint. Après l'application de la peinture à proprement parler, l'artiste devait attendre plusieurs mois, voire une année avant de pouvoir appliquer le vernis final. Cette étape était bien connue des peintres de cette époque, surtout lors de l'application de peinture à l'huile, car finalement la polymérisation de la peinture à l'huile est un processus lent.

1.2.4 Les problèmes de restauration-conservation d'aujourd'hui

Les panneaux peints sont des objets délicats et difficiles à restaurer. Depuis deux cents ans les restaurateurs s'efforcent de résoudre les problèmes de fentes, de décollements de la couche picturale, de galeries d'insectes . . . Au début de ces campagnes de restauration (après la révolution française), les restaurateurs n'avaient pas beaucoup de liens avec les scientifiques du bois, et faisaient au mieux pour : garder la couche picturale intacte et renforcer le support. Les moyens alors mis en œuvre ont été drastiques pour le bois (et donc pour l'œuvre) : rétrécissement de l'épaisseur du panneau, aplanissement, remplacement des renforts par du bois plus rigide, parquetage (figure 1.28) . . .



(a)

(b)

FIGURE 1.28 – *Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie, XV^e siècle, Allemagne. Huile sur bois (tilleul), 3 planches de fil vertical assemblées à plat joint collés, 97 × 78 × 0.8 cm³. (a) : Lumière directe avant restauration. (b) : Revers du panneau parqueté. Oeuvre de l'évêché de Montpellier. Restauration effectuée au musée Fabre de Montpellier.*

Depuis maintenant un peu plus d'une trentaine d'années, le monde des restaurateurs s'est rapproché du monde des scientifiques. Ces deux sphères tentent de s'entre-aider sur la problématique de la conservation et la restauration des panneaux peints. Ces objets présentent actuellement de nombreux problèmes de conservation et aussi de nombreux problèmes dus aux anciennes restaurations. En effet, la création d'un Service de Restauration des Peintures au Louvre en 1965 (Bergeon 1998), a pu amener le dialogue avec les sciences, et permettre d'aborder le problème de la conservation de l'œuvre de façon plus globale et avec un souci déontologique (tout acte de restauration doit être réversible).

1.2.4.1 Les différentes techniques en France et ailleurs

Si l'on a l'occasion de demander à un restaurateur de support bois s'il existe une pratique type lors de leur intervention, il nous répondra que non. En ce sens, chaque œuvre est unique et possède une histoire propre (bien souvent peu connue) et donc un comportement particulier. Au gré des rencontres et des lectures, nous pouvons dégager quelques pratiques communes en Europe (France, Italie, Grande-Bretagne, Belgique) pour le traitement structurel des panneaux.

La dépose des renforts, ou la dé-restauration

L'amincissement suivi de la pose d'un parquetage était une technique usuelle pour renforcer la structure d'un panneau et le rendre plat. Or, l'on sait maintenant que ce genre d'interventions

a été fatal pour un grand nombre d'œuvres. Actuellement, un grand nombre d'interventions sur ces objets passe par la dépose des éléments exerçant les contraintes mécaniques tels que renforts, châssis trop rigide, parquetage . . .



(a)



(b)

FIGURE 1.29 – Photo du travail de restauration effectué sur *Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie*, vu à la figure 1.28, par Daniel Jaunard et Gilles Tournillon au musée Fabre à Montpellier. (a) : Lors de la dépose du châssis trop rigide. (b) : Après la dépose du châssis.

En général, l'artisan prend garde à redonner la structure originale de l'œuvre, c'est-à-dire que s'il y avait originellement des traverses de renforts, elles sont alors remises ou refabriquées — en prenant garde de ne pas trop contraindre la structure. L'enlèvement de tout ce qui a été posé après la création du panneau est alors mis en œuvre.

Traitement des fissures et joints

Il existe plusieurs types de pathologies provoquées par l'ouverture de fissures. Dans le cas des fissures qui sont non traversante dans la longueur (elles ne permettent pas aux planches de se séparer en deux morceaux distincts) figure 1.30, les pratiques, suivant le pays, changent. En France, on privilégiera la pose de taquets⁷ afin de stabiliser les fissures déjà présentes, car elles peuvent parfois amener des distorsions. Si les fissures ont besoin d'être nettoyées ou renforcées, alors une incision en forme de « V » est mise en œuvre – sa profondeur ne dépassera pas les deux-tiers de l'épaisseur du panneau (Bret 1998). L'incision sera enfin obstruée en collant des morceaux de bois taillés à la forme de l'entaille.

7. Les taquets sont de petits morceaux de bois collés au niveau des fissures afin d'en limiter la propagation.



(a)



(b)

FIGURE 1.30 – Photo du travail de restauration effectué sur *Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie*, vu à la figure 1.28 par Daniel Jaunard et Gilles Tournillon au musée Fabre à Montpellier. (a) : Detail de fissure traversante. (b) : Stabilisation des fissures par pose de taquets au revers.

Pour le cas des fissures séparant les planches entre elles, si les joints sont plats, alors, après nettoyage, le collage des planches est refait. Par contre, si les joints possèdent des tenons et mortaises, il est parfois nécessaire de remplacer les tenons par du nouveau bois.

Comment rétablir la cohésion de la structure du panneau peint

Les lacunes de taille importante sont remplies directement avec du bois (figure 1.31) tandis que les lacunes plus petites sont remplies avec une pâte de remplissage.

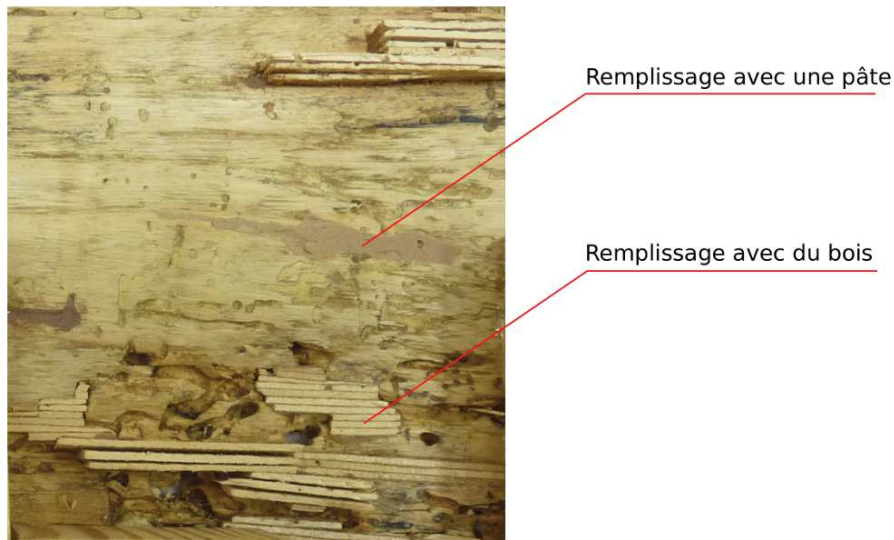


FIGURE 1.31 – Photo du travail de restauration de Brita New à la National Gallery à Londres.

Remise à niveau des courbures

Puis vient tout un travail de remise à niveau des surfaces, par homogénéisation de la courbure globale et locale figure 1.32.

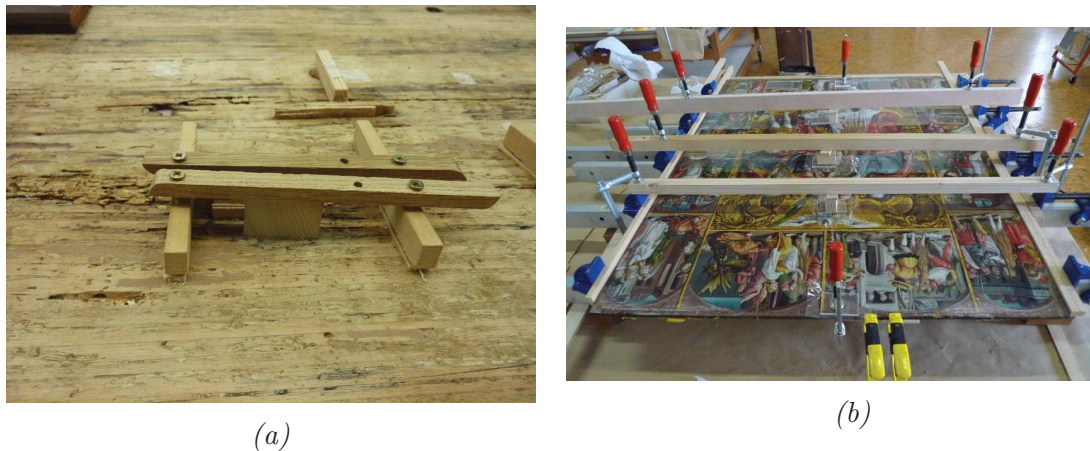


FIGURE 1.32 – Travail de remise à niveau de la courbure locale (a) (travail effectué par Brita New à la National Gallery de Londres) et globale (b) (travail effectué par Daniel Jaunard et Gilles Tournillon au musée Fabre de Montpellier).

Par la suite, tout travail de re-structuration ou de maintien du panneau s'effectuera en prenant garde à épouser la nouvelle courbure du panneau.

Système de maintien du support

Dans le cadre de panneaux peints dont la structure globale se supporte par elle-même, le travail de maintien de l'œuvre sera plutôt basé sur la réappropriation des éléments originaux

de renforts avec quelquefois une amélioration en donnant à ceux-ci la possibilité de glisser. Ce travail vise à permettre au panneau de gonfler et se rétracter lors de fluctuations climatiques.

Pour les panneaux peints ne pouvant plus se maintenir par eux-mêmes (dû à l'amincissement de l'épaisseur par exemple), les restaurateurs mettent parfois en place un système de cadre auxiliaire au revers (figure 1.33). La conception de ce cadre auxiliaire change suivant le restaurateur, et peut demander de hautes compétences en ingénierie mécanique.

Ces cadres sont généralement dotés de systèmes de ressorts, reliant le cadre auxiliaire et le panneau de bois, permettant au panneau un retrait/gonflement lié aux changements d'humidité relative, tout en donnant une structure rigide pour maintenir l'intégrité du panneau.

A noter également l'utilisation de doublage en balsa dans certains cas où l'œuvre aurait besoin d'un maintien mécanique tout en permettant les mouvements de retrait/gonflement. L'utilisation du balsa, ici, est liée à sa faible rigidité, qui lui permet de ne pas bloquer les mouvements du support bois.

1.2.4.2 Mise en regard des pratiques

Dans la description des actes de restauration donnés ci-dessus, certains d'entre eux présentent des variantes suivant les pays, voire les artisans eux-mêmes. Cette sous-section vise à mettre en regard une pratique rencontrée régulièrement lors de ce doctorat.

Nous venons de mentionner que les cadres auxiliaires étaient utilisés chez les restaurateurs mais de conception toujours différente. Par exemple au musée du Prado à Madrid, Espagne, le restaurateur José de la Fuente utilise un système de cadre à ressorts (figure 1.34) afin de permettre un mouvement latéral du panneau. De plus, des entailles transversales au renfort du cadre sont remplies de silicone afin de donner encore plus de flexibilité au cadre.



FIGURE 1.34 – (a) : Photo d'un cadre auxiliaire utilisé par José de la Fuente au musée du Prado à Madrid. ©Museo nacional del Prado. (b) : Exemple de ressort utilisé avec le cadre auxiliaire présenté en (a). ©Museo nacional del Prado.

De même, l'Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro à Florence a mis en place un autre système de cadre auxiliaire à ressorts (figure 1.35).



(a)



(b)

FIGURE 1.35 – Photo du cadre auxiliaire élaboré par l'Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro (OPD) à Florence et mis en place lors du projet Panel Project Initiative de la Fondation Getty, à l'institut Courtauld à Londres. (a) : Photo de l'ensemble de la face arrière du panneau peint. (b) : Détail du même panneau.

L'utilisation des ressorts est assez répandue car ils peuvent être réglés pour autoriser plus ou moins de mouvement à l'œuvre suivant la situation. Par exemple, lors du déplacement de la peinture en salle d'exposition, pour supporter les diverses manipulations, le cadre, alors *réglé rigide*, permet un bon maintien de la structure ; une fois installé dans la salle d'exposition, les ressorts peuvent être un peu détendus afin de permettre au bois de gonfler ou se rétracter légèrement.

D'un point de vue mécanique, le réglage de la tension de ces ressorts n'est pas un problème trivial. En effet, au vu de la structure du cadre, de la disposition des ressorts et des fragilités du support bois, la mise en place des tensions ne devrait pas se faire approximativement. L'équipe du GESAAF (Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali) à Florence (Marcon 2012), (Marcon 2015) et (Cocchi 2014) s'est intéressé à ce dimensionnement de structure. Ils ont pu établir des abaques mettant en relation le nombre de ressorts, la raideur des ressorts, l'épaisseur du panneau et la flèche centrale de ce dernier.

1.3 Conclusion sur l'état de l'art

Nous avons vu au cours de ce chapitre des bases physiques, chimiques et mécaniques du bois. Ces phénomènes nous permettront de comprendre les principaux phénomènes se déroulant

dans le bois lors de changements climatiques, de l'échelle moléculaire à l'échelle de la structure (la planche).

De plus, nous avons abordé le principe des outils développés lors de cette thèse avec la collaboration de plusieurs collègues extérieurs à l'encadrement de ce travail.

Enfin, nous avons fait le point sur les pratiques de restauration des panneaux peints en France et ailleurs en Europe. Les enjeux de ces restaurations sont au cœur de nos questionnements scientifiques et ceux sont ces questionnements qui font avancer la problématique de l'hygro-mécanique du bois du patrimoine.

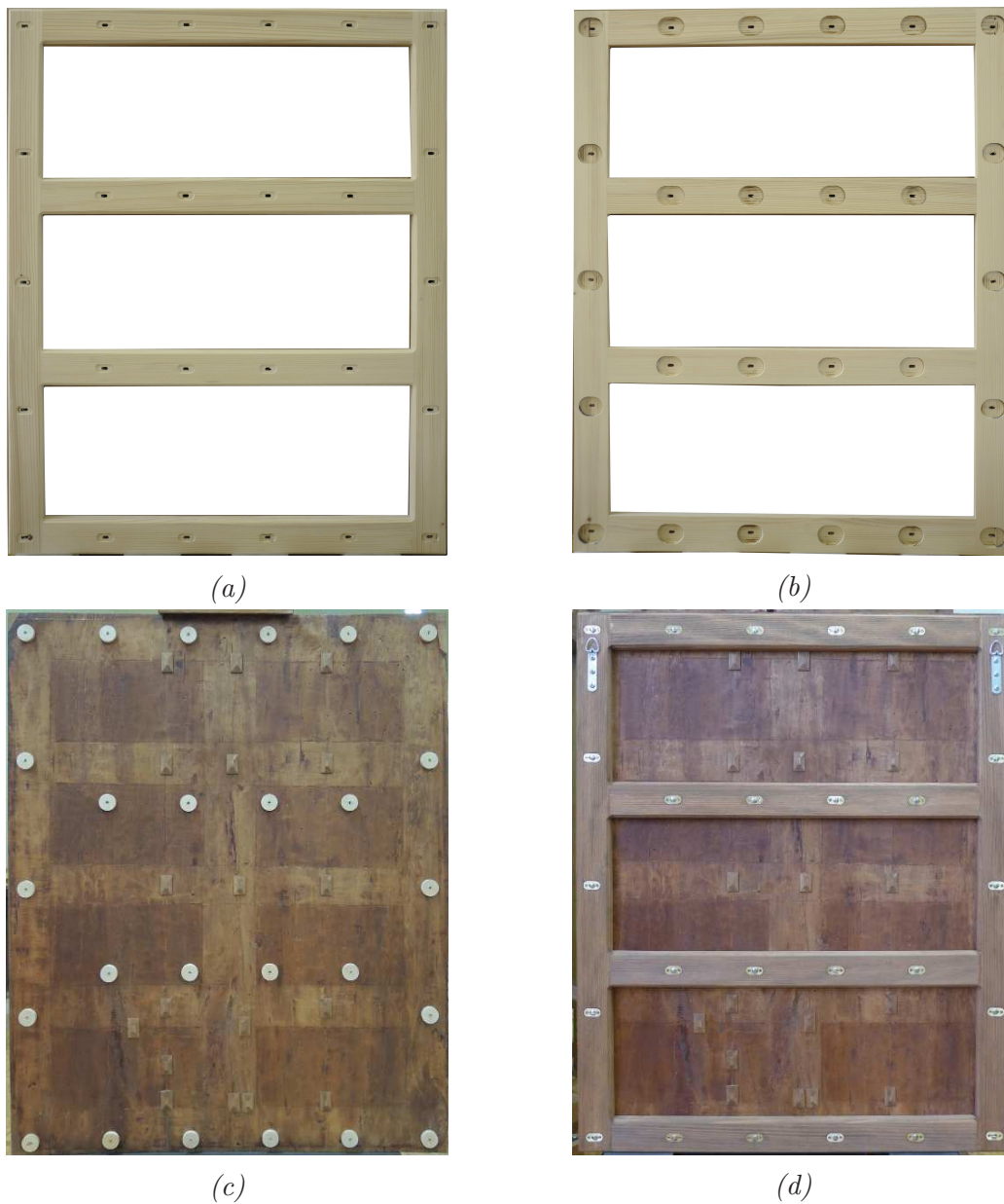


FIGURE 1.33 – Photo du travail de restauration effectué sur Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie, vu à la figure 1.28 par Daniel Jaunard et Gilles Tournillon au musée Fabre à Montpellier. **(a)** & **(b)** : Faces avant et arrière du cadre auxiliaire. **(c)** : Pose des ressorts permettant le mouvement du panneau. **(d)** : Structure complète posée au revers.

Les matériaux constituant le panneau peint

Cette partie vise essentiellement à présenter des travaux plus fondamentaux qui ont été faits afin de comprendre les phénomènes physiques et mécaniques mis en jeu dans cette problématique de thèse. Il s'agit donc, dans un premier temps, de s'intéresser au bois en tant que matériau, l'échelle considérée sera ici celle de quelques cernes de croissance. On s'appliquera principalement à comprendre les propriétés particulières qu'arbore le bois ancien, notamment en terme de stabilité dimensionnelle. Nous nous intéresserons également à la irréversibilité de celles-ci après re-conditionnement hygro-thermique. Puis dans un deuxième temps, on abordera le rôle de la couche préparatoire et son influence dans le comportement global du panneau peint soumis à des changements climatiques.

2.1 Le bois du patrimoine : vieillissement du bois, caractérisation du matériau et vieillissement accéléré

2.1.1 Introduction

Le vieillissement du bois est un phénomène complexe que nous ne parvenons pas encore à caractériser totalement. Il est important de s'y intéresser car de nombreuses structures ou objets sont faits en bois. Leur durabilité et leur fonctionnalité sont menacées s'ils sont mal conservés. Le vieillissement est un processus qui peut être physique, chimique ou mécanique, qui ne s'opère pas de la même façon suivant les conditions de conservation, s'il présente des attaques biologiques ou fongiques.

Dans le cadre de ce travail, les objets manipulés ont déjà plusieurs centaines de siècles, leurs propriétés et leur histoire sont donc différentes de celles des bois actuels. Contrairement aux autres matériaux, on considère depuis toujours qu'un bois vieilli possède de meilleures propriétés qu'un bois fraîchement coupé, en terme de stabilité dimensionnelle et de rigidité, c'est pour cela que les chercheurs ont essayé de quantifier cette « bonification » (Yokoyama 2009), (Obataya 2007)... Ces panneaux ont pratiquement toujours été conservés à l'intérieur, à l'abri de la plupart des rayons ultra-violets et de la chaleur excessive provenant des rayonnements infra-rouges du soleil. Cependant, bien qu'ils aient été également soumis aux attaques biologiques, ce type de dégradation — sujet très vaste et intéressant — ne sera pas abordé lors de cette étude.

En science des matériaux, une des approches pour la compréhension du vieillissement d'un matériau est d'essayer de reproduire ce vieillissement de façon accélérée, en mimant les propriétés physiques, chimiques et/ou mécaniques. Nous présenterons donc, dans un premier temps, ces essais de vieillissement accéléré. Puis nous nous pencherons sur un aspect essentiel du vieillissement du bois : la perte d'hygroscopicité du matériau. Pour ce faire nous étudierons ce phénomène à partir de la caractérisation de la variation de masse et de dimensions avant et après traitement à plusieurs états stabilisés. Puis, nous nous pencherons sur un phénomène d'irréversibilité du traitement hygro-thermique.

2.1.2 Le traitement hygrothermique : un vieillissement accéléré ?

Dans cette première partie, nous nous intéresserons à l'effet que peut avoir un traitement hygrothermique sur les propriétés physico-chimiques du bois. Ce type de traitement a été mis en place afin d'essayer de reproduire les propriétés du bois ancien. Ce travail a été effectué en collaboration avec Eiichi Obataya — chercheur à l'Université de Tsukuba, Préfecture d'Ibaraki, Japon — et ses étudiants dans le cadre du projet annuel « Summer Program » financé par Japan Society for Promotion of Science.

Nous présenterons deux campagnes d'essais. Lors de la première campagne sont survenus plusieurs sortes de problèmes auxquels nous ne nous attendions pas. Le premier problème a été l'échantillonnage des groupes de traitements. En effet, la mesure des propriétés de tous les échantillons avant les essais n'a été faite qu'à l'état anhydre et à 60% HR. Pour les autres

humidités d'équilibre, les mesures des propriétés avant et après traitement se sont basées sur les propriétés des groupes témoins, or ces groupes n'étant pas équivalents aux autres groupes, nous ne pouvions pas déterminer si la différence obtenue venait du traitement ou de la variabilité du bois. C'est pour cela que lors de la deuxième campagne nous avons mesuré toutes les propriétés à toutes les humidités d'équilibre que nous voulions tester, puis nous avons effectué un échantillonnage à partir de ces données afin d'avoir des groupes équivalents. Le deuxième problème est survenu lors de la phase de re-conditionnement à haute humidité. Malgré certaines précautions, des moisissures sont apparues sur les échantillons. Nous n'avons donc pas pu continuer l'expérimentation consistant à mesurer l'effet de la réversibilité du reconditionnement hygro-thermique. Des mesures plus drastiques ont été prises (comme le conditionnement des échantillons à basse température ou encore la désinfection du matériel à l'éthanol) lors de la campagne n°2 afin d'éviter ce problème.

2.1.2.1 Matériel et méthode

Les traitements ont été appliqués sur du peuplier (*Populus alba* L.) provenant de la région de Toscane, en Italie. Ces traitements se sont faits dans un système clos afin de pouvoir traiter le bois par vapeur d'eau avec un climat saturé en eau (pratiquement 100% HR peut être atteint dans la chambre).

On a pu effectuer deux campagnes d'essais, toutes deux à une température de 120° C.

Première campagne d'essais

La première campagne consistait en un traitement de 24h à quatre humidités différentes : 0, 50, 75 et 100% HR. Deux séries d'expériences ont été réalisées en jouant sur le pré-conditionnement, c'est-à-dire que les échantillons ont été soit séchés avant le traitement soit conditionnés dans une humidité relative identique à celle du traitement voulu. Au total, huit traitements ont été effectués (figure 2.1), et un groupe a été isolé comme témoin. Lors de cette campagne nous avons testé entre 7 et 13 éprouvettes par groupe.

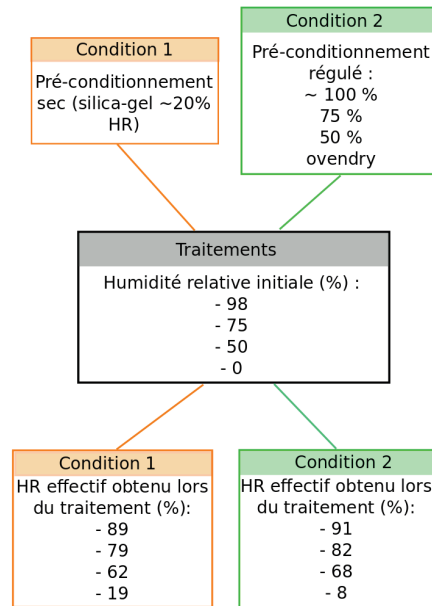


FIGURE 2.1 – Organisation des huit traitements hygro-thermiques pour la première campagne d’essais.

Des sections transverses ont été d’abord pré-débitées d’une même planche (figure 2.2), puis 130 échantillons ont été découpés parmi ces pré-débites (figure 2.3). Deux sortes d’orientation ont été coupées :

- radialement $L \times R \times T = 3 \times 40 \times 5 \text{ mm}$
- tangentiellement $L \times R \times T = 3 \times 5 \times 40 \text{ mm}$

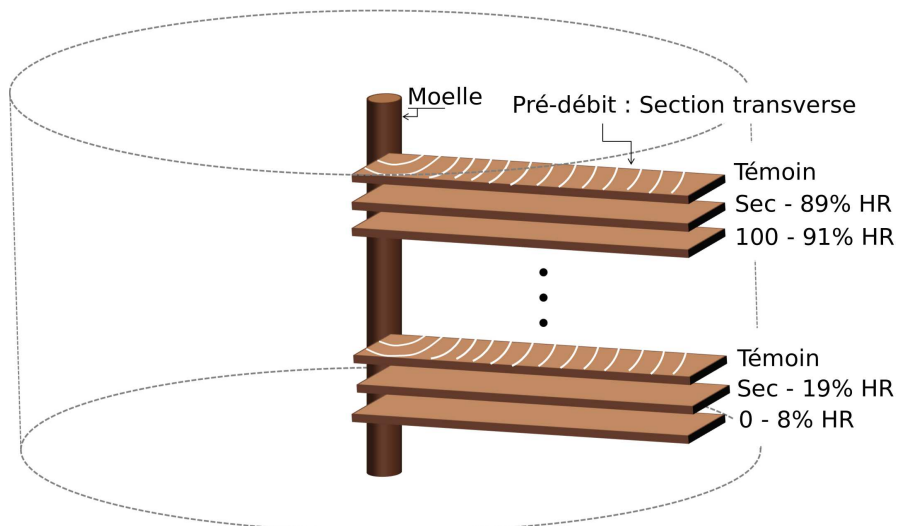


FIGURE 2.2 – Pré-débit des échantillons de la première campagne d’essai. Section transverse aux fibres de 3mm d’épaisseur (et 50mm de largeur ?). Répartition des conditions de traitement le long de la moelle.

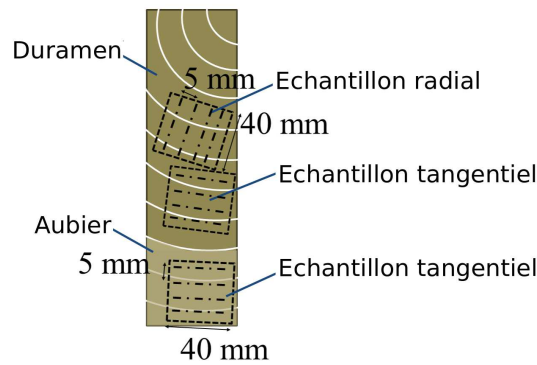


FIGURE 2.3 – Découpe des échantillons tangentiels et radiaux dans les sections pré-débitées. 2/3 des échantillons sont coupés dans le duramen, 1/3 proviennent de l'aubier.

Les mesures de masse et dimensions ont été faites 2 fois à l'état anhydre après séchage à 103°C pendant 24h : une fois avant traitement et une autre fois juste après traitement (figure 2.4). Les échantillons ont également été mesurés à 60% HR, 25°C (en absorption), avant et après traitement, afin d'évaluer leur taux d'humidité d'équilibre (Equilibrium Moisture Content, *EMC*), leur perte de masse (Weight Loss, *WL*, équation 2.1), et leurs coefficients de gonflement α_R et α_T (à l'aide d'un pied à coulisse).

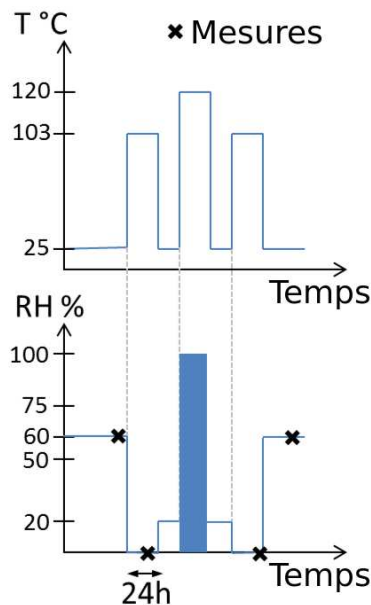


FIGURE 2.4 – Schéma présentant l'historique des mesures de masse et dimensions faites avant et après traitement hygro-thermique.

$$\begin{aligned}
 WL_0[\%] &= \frac{M_{AvT0} - M_{ApT0}}{M_{AvT0}} \times 100 \\
 WL_{60}[\%] &= \frac{M_{AvT60} - M_{ApT60}}{M_{AvT60}} \times 100
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Avec WL_0 la perte de masse en pourcentage (positif lors d'un traitement thermique), M_{AvT0} la masse avant traitement à l'état anhydre, M_{ApT0} la masse après traitement à l'état anhydre, M_{AvT60} la masse avant traitement stabilisé à 60% HR, et M_{ApT60} la masse après traitement stabilisé à 60% HR.

$$\begin{aligned}
 \alpha_{T60}[\%] &= \frac{T_{AvT60} - T_{ApT60}}{T_{AvT60}} \times 100 \\
 \alpha_{R60}[\%] &= \frac{R_{AvT60} - R_{ApT60}}{R_{AvT60}} \times 100
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Avec α_{T60} le gonflement tangentiel à 60% HR, T_{AvT60} la dimension tangentielle avant traitement stabilisé à 60% HR, T_{ApT60} la dimension tangentielle après traitement stabilisé à 60% HR, α_{R60} le gonflement radial à 60% HR, R_{AvT60} la dimension radiale avant traitement stabilisé à 60% HR, et R_{ApT60} la dimension radiale après traitement stabilisé à 60% HR.

Deuxième campagne d'essais

Lors de cette deuxième campagne d'essais, quatre humidités ont été imposées dans la cellule de traitement : 0, 60, 75, 100% HR. Tous les échantillons ont été séchés jusqu'à l'état anhydre avant traitement thermique. Deux durées de traitements ont été réalisées : l'une était de 24h et l'autre de 7 jours. Nous avons ainsi huit groupes de dix échantillons traités et deux groupes témoins — également de dix échantillons chacun — (un par durée de traitement). Puis, afin de tester une hypothèse de « réversibilité » du traitement hygrothermique suspectée et mise en valeur par l'équipe d'Obataya, nous appliquerons un re-conditionnement à haute humidité (saturée et sous vide simple) des échantillons, et nous mesurerons à nouveau les mêmes propriétés de masse et dimensions (voir la procédure figure 2.5) pour comparaison.

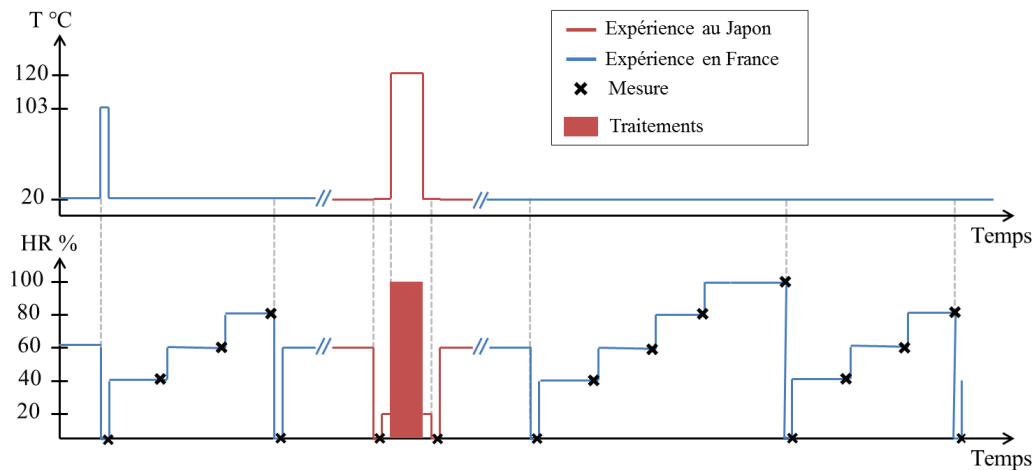


FIGURE 2.5 – Schéma présentant l'historique des mesures de masse et dimensions faites avant et après traitement hygro-thermique, puis après reconditionnement à haute humidité.

Pour cette campagne, les échantillons ont été débités selon une seule orientation : $L \times R \times T = 3 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ radialement (figure 2.6). Deux planches du même arbre (que précédemment) ont été utilisées, et nous avons pré-découpé des sections transverses de 3 mm. Les échantillons peuvent donc provenir du duramen et/ou de l'aubier.

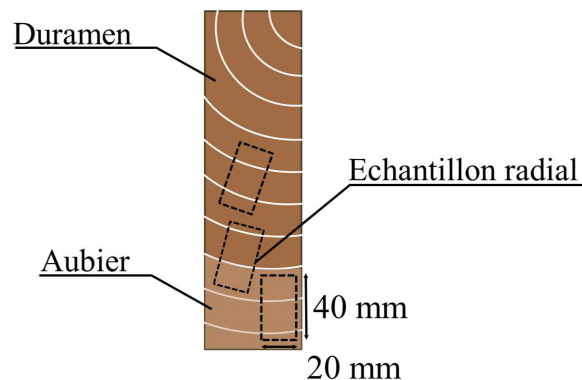


FIGURE 2.6 – Position des échantillons dans une section transversale

Avant de procéder aux traitements hygrothermiques, nous avons mesuré les masses et dimensions, à 5 humidités différentes, de tous les échantillons : 0¹, 40, 60, 80% HR. Cette étape a été importante afin de pouvoir échantillonner correctement les différents groupes (méthode décrite dans la partie 1.1.6). L'échantillonnage a été réalisé de sorte à avoir dix groupes les

1. Il ne s'agit pas ici d'un réel état anhydre par séchage au four à 103°C pendant 24h, mais d'un séchage avec des sels P_2O_5 sous vide à 20°C permettant d'atteindre une humidité interne inférieure à 1%. De cette manière nous évitons d'introduire un biais vis-à-vis de l'effet que peut apporter le séchage à 103°C sur notre traitement. Nous considérerons ce séchage « doux » comme une mesure à 0% HR. Cependant un premier séchage au four a été effectué afin d'obtenir une valeur de référence pour la densité.

plus équivalents possible, c'est-à-dire que leurs moyennes en terme de densité et coefficients de gonflement soient comparables et que la dispersion (écart-type) de ces grandeurs soit du même ordre (table 2.1).

		Groupe hygrothermique				
		40% HR	60% HR	75% HR	100% HR	Témoin
Moyenne	densité	0.395	0.395	0.395	0.395	0.395
	α_R	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122
	α_T	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229
Écart-type	densité	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015
	α_R	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007
	α_T	0.010	0.012	0.010	0.010	0.010

TABLE 2.1 – Moyennes et écart-types des densités et coefficients de gonflements α_R et α_T des différents groupes hygrothermiques après échantillonnage.

2.1.2.2 Une perte d'hygroscopicité

Lors de la première campagne d'essais, nous avons voulu tester — en plus de l'effet des traitements à proprement parler — l'effet du pré-conditionnement des éprouvettes avant traitement hygrothermique. La figure 2.7.(a) nous présente la perte de masse associée à ces traitements de 24h à 120°C. L'effet de ce pré-conditionnement est visible : il apporte plus ou moins d'eau dans la cellule de traitement. Lorsque les échantillons sont préalablement stabilisés à la même humidité relative que celle souhaitée pour un traitement, l'humidité de traitement se rapproche davantage de celle attendue – pour les traitements à 0% et 100%. Lorsque les échantillons sont stabilisés au silica-gel à 20%HR avant les traitements, et qu'ils sont traités à une humidité relative supérieure à 20%, ils absorbent une partie de l'humidité contenue dans la cellule avant d'être traités, ce qui fait baisser l'humidité de traitement hygrothermique. Dans le cas du traitement à 0%, ils font augmenter l'humidité relative de la cellule de traitement. Ces résultats sont confirmés par (Johansson 2006). Afin de contrôler l'humidité de traitement de la cellule, un dimensionnement d'apport d'eau avait été fait. Cependant ces tests ont été réalisés sans échantillon, ce qui fausse légèrement les prédictions de traitement hydrique effectif.

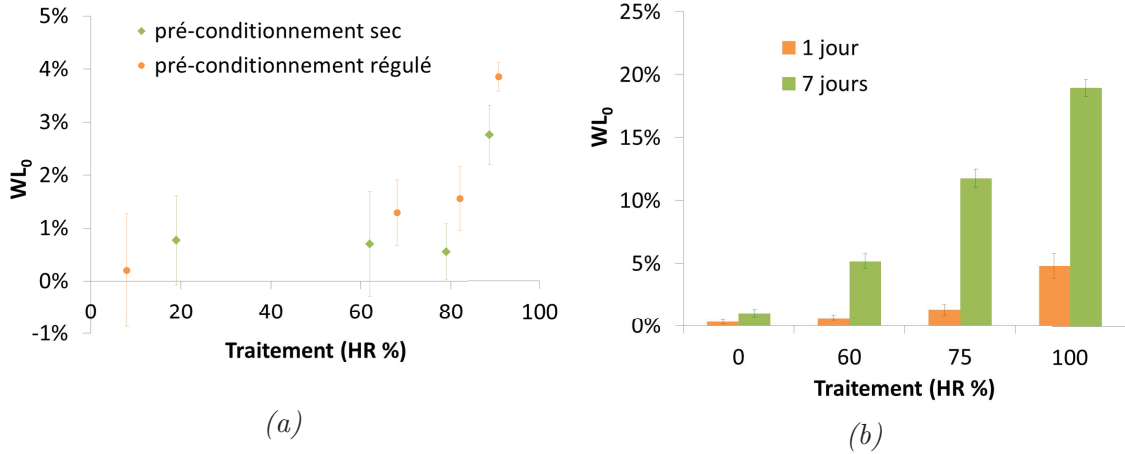


FIGURE 2.7 – Comparaison, à l'état anhydre, des pertes de masse (WL_0). (a) : Campagne 1 : entre pré-conditionnement sec et régulé. (b) : Campagne 2 : entre les différentes durées de traitement.

Les différences obtenues dans la figure 2.7.(a) entre les deux pré-conditionnements peuvent s'expliquer par rapport à la teneur en eau initiale et de traitement des échantillons. En effet, si on s'intéresse aux isothermes d'humidité à haute température (figure 2.8), on se rend compte que la teneur en eau à 120°C est bien différente de celle à 20°C pour une même humidité relative.

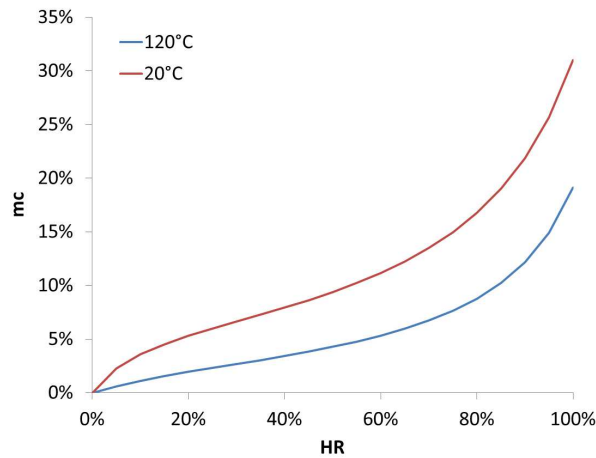


FIGURE 2.8 – Comparaison de deux isothermes à 20°C et 120°C. Ces isothermes ont été calculées avec la formule 2.3.

$$mc(HR, T) = \frac{c_1 c_3 HR \exp \frac{c_2 + c_4}{RT}}{\left[1 + HR \left(c_3 \exp \frac{c_4}{RT} - c_5 \exp \frac{c_6}{RT} \right) \right] \left(1 - HR c_5 \exp \frac{c_6}{RT} \right)} \quad (2.3)$$

Avec $c_1 = 4.023 \times 10^{-3}$, $c_2 = 6.0703 \times 10^3$, $c_3 = 4.057 \times 10^{-1}$, $c_4 = 7.819 \times 10^3$, $c_5 = 9.756 \times 10^{-1}$, $c_6 = 4.816 \times 10^2$, T la température en Kelvin et R le coefficient des gaz parfaits. Ces coefficients

ont été calculés d'après les résultats de (Kroll 1951) et présentés dans (Navi 2005).

Dans notre cas, on calcule les teneurs en eau avant traitement et pendant le traitement (table 2.2). Pour le cas où nous voulons traiter le bois à 0% HR, la teneur en eau liée au pré-conditionnement « sec » est de 5.3% mc, or la cellule de traitement est conditionnée pour avoir un climat anhydre. Il est donc normal que dans ce cas, le bois « apporte » de l'eau. Le traitement effectif se fait donc à 19% HR, 120°C. Alors que le traitement « régulé », lui, n'apporte que très peu d'eau car les échantillons ont subi un séchage au four avant traitement thermique. Le traitement se fait donc à 8% HR, 120°C. Pour les autres cas, le conditionnement « sec » stabilise le bois à très faible teneur en eau (5.3% mc, 120°C), ce qui est plus proche de la teneur en eau de traitement souhaitée à 120°C : 4.3, 7.6, 19.1% mc.

Conditionnement	HR de traitement effectif	mc à 120°C	HR de conditionnement	mc à 20°C	HR de traitement souhaité	mc à 120°C
Sec	0.19	0.019	0.2	0.053	0	0.0
	0.62	0.056	0.2	0.053	0.5	0.043
	0.79	0.085	0.2	0.053	0.75	0.076
	0.89	0.117	0.2	0.053	1	0.191
Régulé	0.08	0.009	0	0.0	0	0.0
	0.68	0.064	0.59	0.110	0.5	0.043
	0.82	0.0093	0.75	0.150	0.75	0.076
	0.91	0.126	0.97	0.276	1	0.191

TABLE 2.2 – Résumé des calculs de teneur en eau avant et pendant les différents traitements thermiques. Résultats obtenus à partir de l'équation 2.3.

Par la suite, nous considérerons que le pré-conditionnement des échantillons de la campagne 1 a eu pour principal effet que de changer l'humidité de la cellule de traitement. Nous considérerons donc huit conditions en humidité de traitement, que nous ne pouvons pas comparer entre elles (pour une condition égale, et un pré-conditionnement différent). Pour des raisons de simplicité, lors de la campagne 2, nous avons pris un même pré-conditionnement (anhydre) pour tous les groupes, et nous parlerons de l'humidité de consigne en tant qu'humidité de traitement. En effet l'état anhydre est le seul réel état hydrique pouvant être respecté et reproduit pour tous les échantillons.

Pour les résultats de perte de masse anhydre de la deuxième campagne (figure 2.7.(b)), que ce soit pour les traitements durant 1 jour ou ceux de 7 jours, il est très net que plus l'humidité de traitement est haute et plus la perte de masse est importante (ce résultat est également vrai pour la première campagne). Cette augmentation est d'autant plus grande que le traitement est long — l'écart entre 75 et 100% HR est plus grand à 7 jours de traitement qu'à 1 jour de traitement. Plus les pertes de masse anhydre sont importantes, plus le traitement est « sévère ».

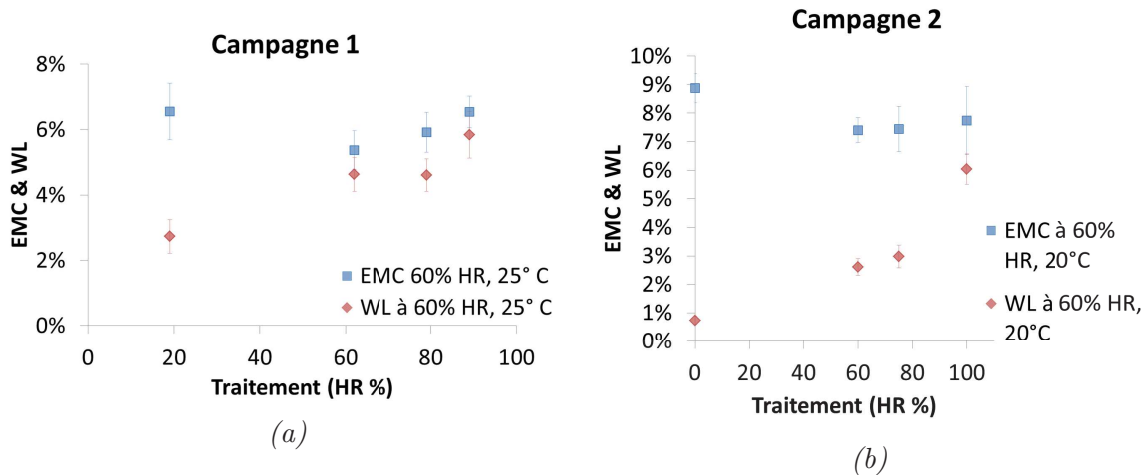


FIGURE 2.9 – Pertes de masse et humidité d'équilibre à 60% HR pour les différentes humidités relatives de traitement (24h, 120° C) (référence masse anhydre après traitement). (a) : Campagne 1, pré-conditionnement sec. (b) : Campagne 2.

La figure 2.9 montre que l'EMC ne décroît pas linéairement en fonction de l'humidité de traitement. La perte de matière (WL) est corrélée positivement à l'humidité du traitement hygro-thermique. L'humidité d'équilibre à 60% HR, 25°C, présente une valeur minimum pour le traitement à 60% HR. On pourrait s'attendre à ce qu'un traitement sévère (à haute humidité dans notre cas) fasse perdre plus de matière (WL) qu'un traitement « doux » et que donc, si la perte de masse est importante, l'humidité interne d'équilibre soit moins élevée (disparition de sites d'adsorption). La campagne 1 –particulièrement – (figure 2.9.(a)) ne donne pas du tout ce genre de conclusion. Cet optimum – car notre but est bien de diminuer la capacité de reprise en eau – pourrait s'expliquer par le fait que la matière disparue lors du traitement – hémicellulose et cellulose amorphe généralement (Ganne-Chédeville 2012), (Popescu 2009) – n'est pas la seule matière cellulosique capable d'adsorber les molécules d'eau et que de nouveaux sites se soient révélés. Une analyse chimique permettrait peut-être de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. On pourrait par exemple utiliser la spectroscopie proche infra-rouge (NIRS) afin de déterminer l'évolution des quantités de lignine, hémicellulose et cellulose avec les différents traitements hygro-thermiques.

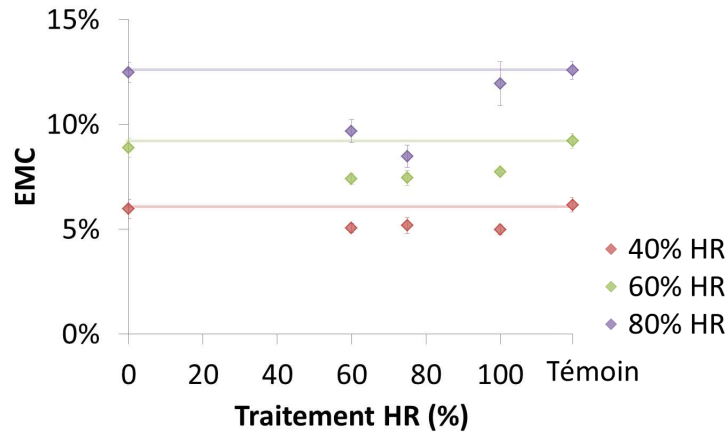


FIGURE 2.10 – Humidité d'équilibre à plusieurs humidités relatives pour les différentes humidités relatives de traitement (24h, 120°C).

Pour étudier l'effet des différents traitements, la teneur en eau d'équilibre des échantillons a été évaluée pour 3 environnements (40% HR, 60% HR et 80% HR) et comparée à celle des échantillons non traités (Témoin).

On peut remarquer sur la figure 2.10 que plus l'humidité relative d'équilibre est élevée, plus l'effet du traitement est manifeste. Par exemple, l'écart entre l'humidité interne d'équilibre entre les témoins (lignes horizontales) et ceux traités à 60% HR, 120°C est plus important lorsque les échantillons sont stabilisés à 80% HR qu'à 60% HR, 20°C. On peut voir l'intérêt du traitement à 75%HR, qui semble optimum parmi les traitements testés : l'humidité d'équilibre des échantillons traités à 75% HR, 120°C est quasiment toujours plus faible que celle des échantillons issus des autres traitements. Un traitement à plus haute humidité (100%HR) entraîne une humidité d'équilibre beaucoup plus importante à 80%HR : EMC=12% au lieu de 8% pour un traitement à 75%HR.

2.1.2.3 Une réduction du gonflement

Comme pour les résultats concernant l'hygroscopicité, pour les gonflements α_R ou α_T – quelque soit le pré-conditionnement – nous observons une diminution du gonflement pour tous les traitements effectués. De plus, plus le traitement est sévère (c'est-à-dire plus les pertes de masse anhydre sont importantes), et plus la réduction du gonflement est importante.

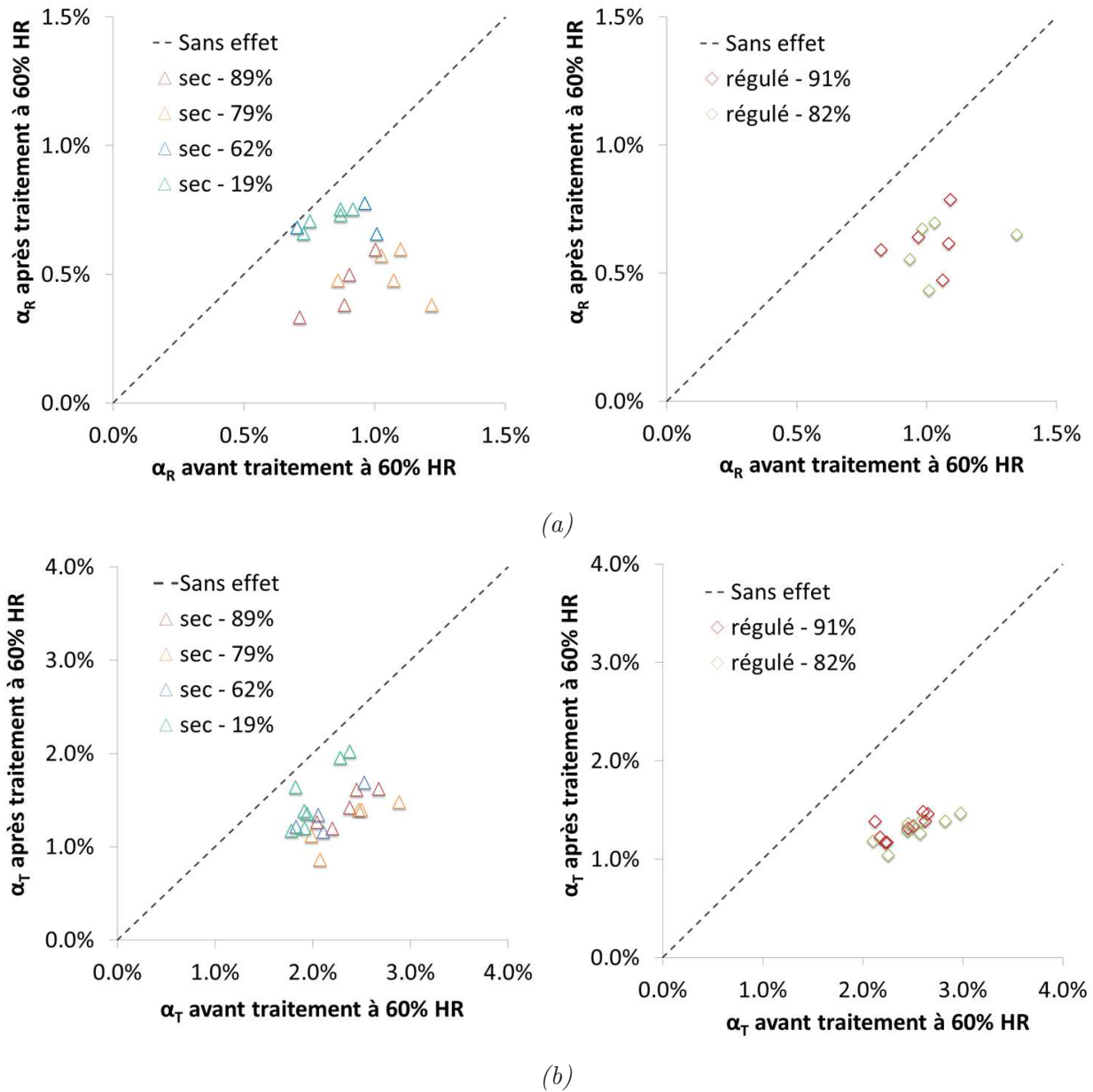


FIGURE 2.11 – Gonflement pour plusieurs pré-conditionnements et humidités relatives de traitement (24h, 120°C) pour la première campagne. (a) : Gonflement radial. (b) : Gonflement tangentiel.

Concernant la campagne n°2 (figure 2.12), l'effet du traitement est plus visible à haute humidité d'équilibre, c'est-à-dire que l'écart entre le gonflement de référence – celui du témoin – et le gonflement de l'échantillon traité est plus grand lorsqu'on stabilise les échantillons à 80% HR qu'à 0% HR. A haute humidité de stabilisation on remarque encore qu'il existe un optimum de traitement. Le traitement le plus efficace en terme de réduction du taux de gonflement est le traitement à 75% HR, 120°C. Il existe une variation de pratiquement 1% de gonflement tangentiel entre le groupe témoin et le groupe d'échantillons traités à 75% HR, 120°C, lorsqu'ils sont équilibrés à 80% HR, 20°C.

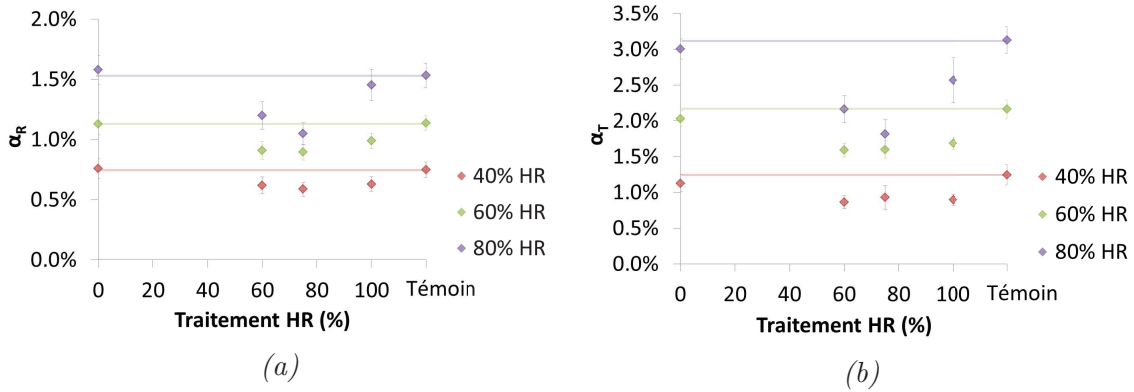


FIGURE 2.12 – Gonflement à plusieurs humidités relatives pour les différentes humidités relatives de traitement (24h, 120° C) pour la deuxième campagne. (a) : Gonflement radial. (b) : Gonflement tangentiel.

2.1.2.4 Un phénomène de réversibilité des traitements hygro-thermiques

Il se pourrait, qu’après un re-conditionnement à haute humidité, les propriétés observées de diminution de l’hygroscopicité et de la capacité de gonflement d’un échantillon traité thermiquement ne soient pas irréversibles. On observerait une augmentation des nouvelles propriétés physiques du bois traité thermiquement (hygroscopicité et gonflement). Certains auteurs attribuent ce processus à de l’hornification². Bien que de nombreux auteurs décrivent le phénomène de hornification comme irréversible, nous avons décidé de suivre l’idée d’Obataya qui propose que cet effet soit en fait réversible (Obataya 2002). En forçant les molécules d’eau à entrer dans les parois cellulaires, ces molécules viendraient rompre ces liaisons hydrogènes. Alors de nouveaux sites d’adsorption seraient disponibles et permettraient alors une augmentation de la capacité à adsorber de l’eau. Ce processus sera appelé re-conditionnement. Dans notre cas, nous avons re-conditionné les échantillons trois semaines dans un milieu saturé en eau et sous vide léger. Puis nous venons refaire les mêmes mesures d’équilibre hydrique en absorption à différentes humidités relatives.

2. Le terme d’hornification est utilisé dans la littérature traitant du papier ou de la pâte à papier. Ce phénomène décrit l’éclatement des sites d’adsorption lors d’un gonflement forcé suite à la rigidification de la structure du polymère qui occure dans les matériaux ligno-cellulosique après un séchage ou la désorption de l’eau.

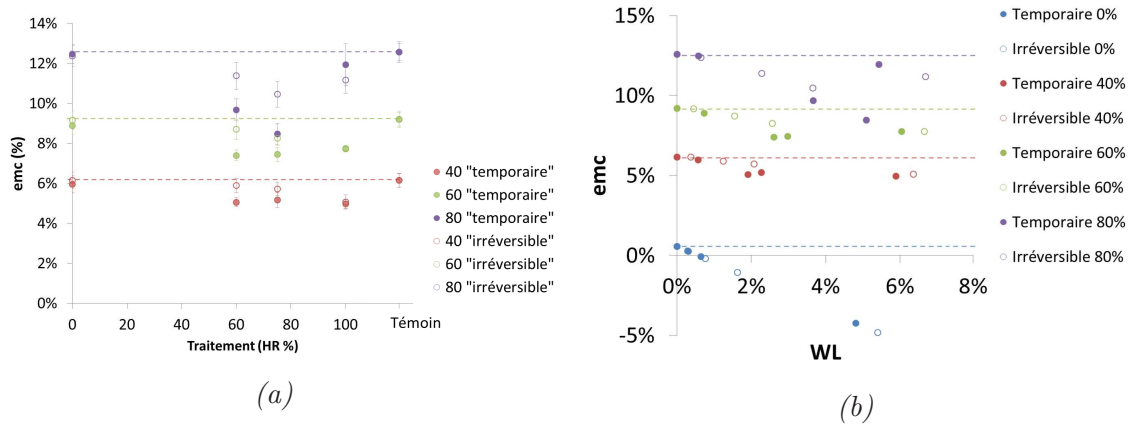


FIGURE 2.13 – Évolution des humidités d'équilibre après re-conditionnement. Le terme « temporaire » désigne la propriété avant re-conditionnement, et « irréversible » désigne la propriété après re-conditionnement. (a) : Humidité d'équilibre à plusieurs humidités relatives pour les différentes humidités relatives de traitement (24h, 120°C). (b) : Relation entre l'humidité d'équilibre et la perte de masse à différentes humidités relatives et pour toutes les humidités de traitement.

Sur la figure 2.13.(a), nous pouvons clairement voir qu'après re-conditionnement des échantillons, le bois retrouve une certaine capacité à absorber de l'eau, sauf pour la stabilisation à 80% HR pour les échantillons traités à 100% HR, où le re-conditionnement n'aurait pas pour effet d'augmenter hygroscopicité. Or, au vu de la dispersion des résultats pour ces échantillons, nous ne pouvons pas affirmer ou infirmer cette conclusion. Pour le reste des mesures, on constate donc qu'il existe une réversibilité du traitement hygro-thermique pour les humidités de traitement inférieures ou égales à 75% HR. Pour les traitements à 100% HR, le phénomène de recouvrance hydrique n'est pas visible. Cela serait dû au fait que le phénomène de hornification n'interviendrait que pour des traitements hygro-thermiques à humidité intermédiaire (Borrega 2010).

En terme de perte de masse (WL sur la figure 2.13.(b)), pour des pertes de masse inférieures à 4% , nous assistons au phénomène de recouvrance hydrique, alors qu'au delà de 5% de perte de masse, les humidités d'équilibre sont sensiblement les mêmes avant et après reconditionnement.

Discussion sur l'hornification

Nous venons de mettre en évidence l'efficacité de certains traitements hygro-thermiques d'un point de vue de l'amélioration de la stabilité dimensionnelle et hydrique. Ces résultats sont corroborés par les recherches de Borrega (Borrega 2010), qui affirme que lors d'un traitement hygro-thermique des liaisons hydrogènes irréversibles se forment. Ce phénomène, aussi appelé hornification, serait responsable de l'effet d'optimum de traitement pour des traitements à humidité intermédiaire. Ce serait lors de la désorption de l'eau que se produirait l'adhésion des microfibrilles adjacentes, qui serait suivie par l'effondrement du pore dans la paroi cellulaire (Crawshaw 2000), (Weise 1998) lus dans (Borrega 2010).

Nous venons de caractériser les propriétés hygroscopiques et de gonflement d'échantillons de

bois traités hygro-thermiquement. Ce traitement avait pour but d'essayer de reproduire les propriétés du bois ancien afin de comprendre le mécanisme de vieillissement. Or il existe d'autres méthodes de vieillissement accéléré, l'une d'entre elles vise en un alternance d'absorption / désorption de l'eau dans le bois.

2.1.3 Une tentative de vieillissement hygroscopique

Il existe de nombreuses hypothèses sur l'origine du vieillissement du bois. L'une d'entre-elles est celle d'un vieillissement hygroscopique. Ce vieillissement serait lié aux fluctuations hydriques qui se passent quotidiennement et aussi annuellement (alternance des saisons sèches et humides). Ce phénomène serait expliqué par le vieillissement des sites d'adsorption de l'eau dans les cellules de bois. L'affinité chimique des polymères cellulosiques diminuerait avec le temps, à force de devoir désorber / adsorber (Esteban 2005).

2.1.3.1 Matériel et méthode

Pour vérifier cette hypothèse de vieillissement hygroscopique, nous avons effectué des expériences sur du peuplier (*Populus alba*) venant d'Italie.

Le principe général de l'expérience se résume en l'alternance d'adsorption/désorption des molécules d'eau dans la paroi du bois afin d'altérer les sites de sorption. Pour ce faire, deux sortes de planches ont été débitées : sur dosse et sur quartier (figure 2.14). Les dimensions de ces "grands" échantillons étaient :

- échantillon sur dosse : $T \times L \times R = 290 \times 10 \times 40 \text{ mm}$
- échantillon sur quartier : $T \times L \times R = 210 \times 10 \times 27 \text{ mm}$

Un revêtement à base de caoutchouc naturel (3.2.1.3) a été appliqué sur les quatre faces latérales. Ce revêtement est imperméabilisant et laisse ainsi uniquement la diffusion dans la direction longitudinale possible.

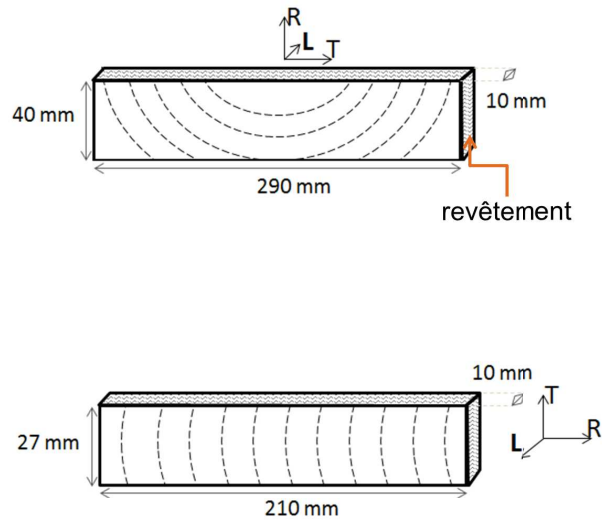


FIGURE 2.14 – Schéma des échantillons utilisés pour tester la perte d'hygroscopicité sous cycles hygroscopiques.

Nous avons appliqué un chargement hygrothermique en travaillant sous cycles hydriques dans une enceinte climatique de précision $\pm 3^{\circ}C$ et $\pm 3\%HR$. Nous avons travaillé à $50^{\circ}C$ afin d'accélérer significativement les phénomènes de transfert sans pour autant dégrader les polymères cellulosiques. Trente six cycles hydriques ont été imposés entre 40 et 90% HR. La durée de ces cycles de stabilisation climatique a été évaluée à l'aide de simulations avec le code TransPore³ de sorte que l'équilibre hydrique soit atteint dans toute l'épaisseur de l'échantillon. Ce plateau a été évalué à 15h (figure 2.15).

3. Le logiciel TransPore (Perré 1990) est un logiciel de simulation de phénomènes de transfert de masse et chaleur couplé dans un milieu poreux. Ce logiciel est développé dans la partie 3.2.1.

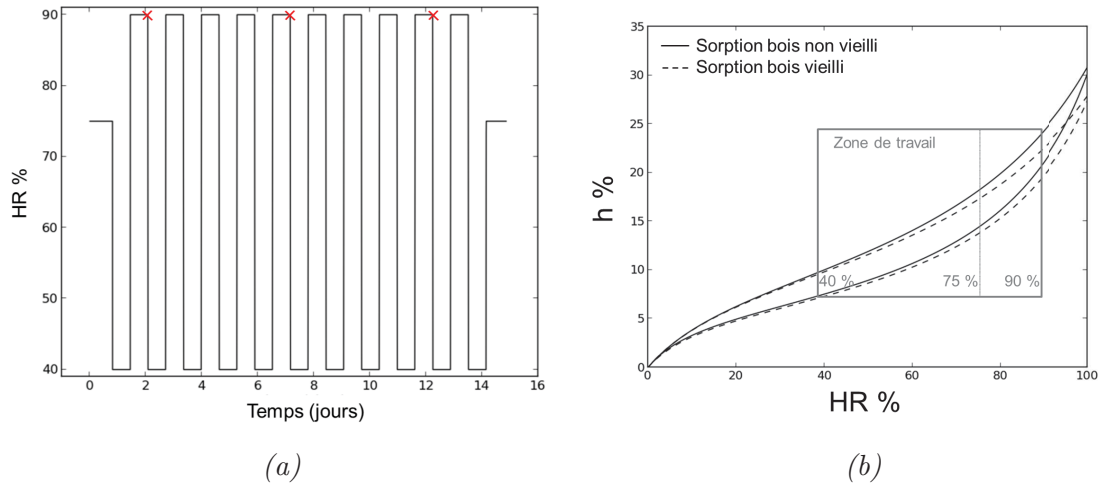


FIGURE 2.15 – (a) : 36 cycles entre 40 et 90% HR, 50°C ont été imposés aux échantillons afin de reproduire un vieillissement naturel hygroscopique. Les croix correspondent au moment des prises de vue. (b) : Gamme d’humidités de travail relative à l’hystérésis de sorption.

La technique de corrélation d’image en 2D ((Barranger 2012), (Chu 1985)) a été utilisée pour mesurer les champs de déformation des éprouvettes tout au long des cycles, en collaboration avec l’équipe PEM de l’Institut Pprime de Poitiers. Les détails techniques de cette méthode ont été décrits dans (Gauvin 2014).

Notons toutefois que le revêtement de caoutchouc naturel utilisé dans ce cas (3.2.1.3), n’a pas eu le comportement souhaité à 50°C. En effet, bien que la température de transition vitreuse de ce polymère soit autour de 73°C en moyenne (Beauhaire 1983), à haute humidité cette température est plus basse. Nous avons donc assisté également à un vieillissement (et une dégradation) de ce matériau, qui s’est accompagné d’un dégagement d’ammoniac.

2.1.3.2 Une perte d’hygroscopicité ?

La figure 2.16 présente les champs de déformation dans la direction horizontale ε_{xx} (à gauche) et verticale ε_{yy} (à droite) de l’éprouvette sur dosse suite à une variation d’humidité entre un état d’équilibre à 75% HR et l’état d’humidité à la fin du plateau à 90%HR après respectivement, de haut en bas, 1 cycle, 5 cycles et 9 cycles. On voit nettement la diminution des champs de déformation, que ce soit pour ε_{xx} (variation de -0.3%) ou ε_{yy} (variation de -0.15%). Au fur et à mesure des cycles, l’échantillon se déforme de moins en moins pour une même humidité relative de l’environnement : son hygroscopicité diminue. Nous interprétons ce phénomène comme un vieillissement des sites d’absorption de l’eau dans le bois.

Cet effet de diminution du gonflement est également visible pour l’échantillon sur quartier (figure 2.17) (passage de $\varepsilon_{XX} = 0.35\%$ en moyenne à $\varepsilon_{XX} = 0.2\%$). Les cycles hygroscopiques semblent donc bien induire un vieillissement « chimique » de la paroi cellulaire par perte d’affinité chimique (Esteban 2005), (Skaar 1988). Pour la même humidité relative, les parois cellulaires adsorbent de moins en moins d’eau après un certain nombre de cycles d’humidité,

ce qui entraîne une humidité interne moins élevée après ces cycles. Le vieillissement chimique devrait influencer la courbe de sorption (figure 2.15.(b)). Nous nous attendons à ce qu'un bois ancien, qui a subi au cours du temps de nombreux cycles d'humidité, soit plus stable dimensionnellement qu'un bois actuel, et moins sensible aux variations d'humidité.

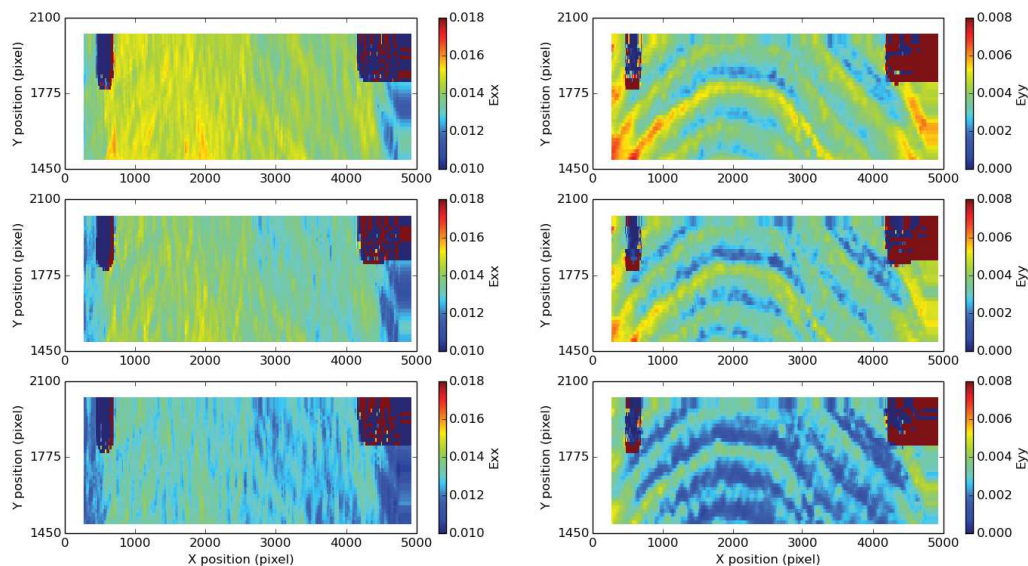


FIGURE 2.16 – Chargement hygrothermique de l'éprouvette sur dosse. Evolution du champ de déformation à 90% HR (avec comme point de référence l'état d'équilibre à 75% HR), 50° C. À gauche, le champ de déformation horizontale ε_{xx} , à droite, le champ de déformation verticale ε_{yy} . La cartographie du haut est observée après 1 cycle, celle du centre après 5 cycles et celle du bas après 9 cycles.

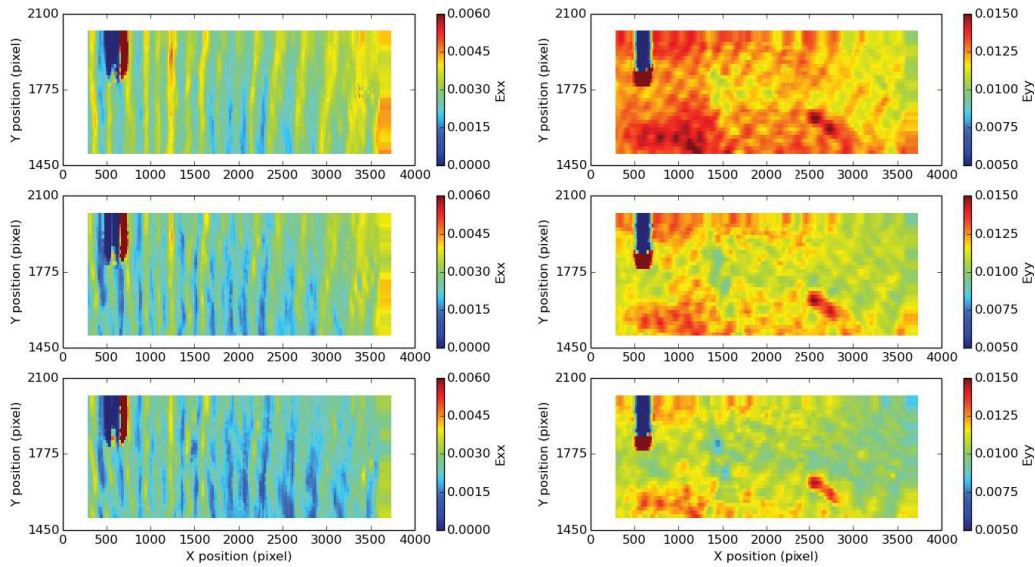


FIGURE 2.17 – Chargement hygrothermique de l'éprouvette sur quartier. Evolution du champ de déformation à 90% HR (avec comme point de référence l'état d'équilibre à 75% HR), 50° C. Á gauche, le champ de déformation horizontale ε_{xx} , à droite, le champ de déformation verticale ε_{yy} . La cartographie du haut est observée après 1 cycle, celle du centre après 5 cycles et celle du bas après 9 cycles.

2.1.4 Discussion sur les origines du vieillissement

Nous venons de voir deux approches qui visent à diminuer l'hygroscopicité du bois. La première, basée sur des traitements hygrothermiques, fait intervenir la température et l'humidité de la cellule de traitement dans le but d'abaisser la température de transition vitreuse des polymères et ainsi les dégrader. L'autre approche, basée sur des cycles hydriques, à température ambiante, vise à altérer les sites d'absorption en les faisant adsorber et désorber un grand nombre de fois.

Notre objectif premier étant d'étudier les phénomènes de vieillissement du bois, la deuxième méthode nous paraît plus adaptée car plus proche de la réalité. En effet, le bois au cours de sa longue conservation, ne subit généralement pas de montée en température (jusqu'à atteindre la température de transition vitreuse de ses constituants), mais est bien soumis à des cycles hydriques d'humidité, liés aux changements quotidiens et annuels de l'environnement dans lequel il est conservé, que ce soit un musée, une église... On se rapproche donc bien de ce processus en imposant un certain nombre de cycles. Cependant la première approche, utilisant une température plus élevée, a pour objectif de pouvoir "accélérer" les processus de vieillissement. Les propriétés du vieux bois ont été longtemps recherchées pour leurs fonctionnalités, il est donc intéressant de pouvoir les reproduire. Les traitements hygrothermiques représentent alors une bonne approche peu coûteuse en temps et efficace, mais ne représente pas un processus réel de vieillissement. Il est difficile de quantifier à quel point nous nous rapprochons de la réalité du vieillissement naturel avec de tels traitements.

2.2 Contribution de de la structure multicouche du panneau peint

Cette section retrace un travail collaboratif avec l'Institut Courtauld de Londres, par le biais de l'encadrement d'une étudiante de restauration/conservation, Alice Aurand. Cette étude a été menée afin de comprendre la contribution des couches préparatoires au comportement mécanique d'un panneau peint italien. Cet aspect est présenté dans ce mémoire de thèse afin de mettre en évidence le comportement mécanique multicouche de notre objet principal d'étude.

2.2.1 Contexte de l'étude

Comme nous l'avons vu précédemment, un panneau peint est composé de plusieurs couches, de comportement différent les unes des autres. Les principales couches – en terme d'épaisseur –, le bois et le gesso, sont hygroscopiques et jouent la fonction mécanique majeure de la structure globale. Quelques chercheurs se sont intéressés à caractériser ces couches de façon individuelle (Mecklenburg 1998) afin de comprendre leur action dans la structure. Il s'avère que les fluctuations hydriques endommagent la structure en créant des craquelures, puis des fissures (Rachwał 2012). Notre objectif est de comprendre de façon globale le rôle de la couche préparatoire dans le comportement hygromécanique d'échantillons de faible largeur, mimant les panneaux peints.

L'étude proposée lors ce projet était de ré-évaluer les mécanismes sous-jacents au phénomène de fatigue induit par les changements d'humidité dans les panneaux peints. En d'autres termes, d'évaluer la capacité de ces objets à conserver leur intégrité et résister à la dégradation lorsqu'ils sont soumis à des fluctuations microclimatiques (Aurand 2015). Nous présenterons surtout la partie menée au / avec le LMGC, c'est-à-dire la caractérisation hygromécanique des échantillons soumis à des fluctuations hydriques.

2.2.2 Expérimentation

2.2.2.1 Matériel et méthode

Découpe et échantillonnage

Nous avons travaillé avec des échantillons de peuplier (*Populus alba* L.) provenant du même arbre que pour les échantillons de traitement thermique (partie 2.1.2.1). On connaît ainsi les propriétés mécaniques et de sorption du matériel utilisé. Nous avons coupé 43 éprouvettes radiales de dimensions $R \times T \times L = 100 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$, de densité moyenne 0.46 (figure 2.18).

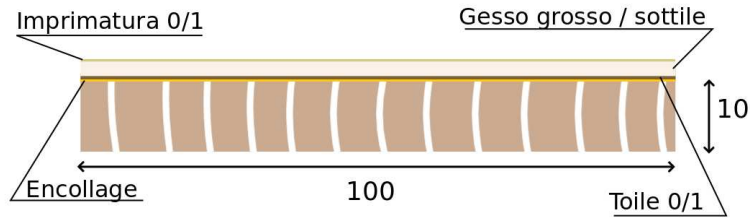


FIGURE 2.18 – Disposition et orientation des éprouvettes sur quartier. Dimensions en mm

Ici aussi, nous avons procédé à un échantillonnage tel que chaque groupe soit équivalent au regard des propriétés suivantes : densité, coefficient de gonflement radial et tangentiel (que nous avons mesuré au préalable avant l'application des revêtements). Nous avons constitué sept groupes de six échantillons (mis à part le groupe n°7 qui possède sept échantillons) dont les caractéristiques sont présentées dans la table 2.3 en utilisant la méthode décrite dans la partie 1.1.6. Les moyennes des groupes présentent des différences car nous ne pouvons pas éliminer trop de matériel.

		Groupes						
		Témoin	2	3	4	5	6	7
Moyenne	densité	0.427	0.421	0.429	0.421	0.430	0.434	0.411
	α_R	0.123	0.121	0.120	0.117	0.117	0.123	0.121
	α_T	0.169	0.199	0.229	0.259	0.312	0.368	0.313
Écart-type	densité	0.020	0.028	0.026	0.008	0.015	0.027	0.007
	α_R	0.009	0.009	0.007	0.007	0.003	0.009	0.007
	α_T	0.020	0.006	0.009	0.010	0.020	0.018	0.089

TABLE 2.3 – Moyennes et écart-types des densités et taux de gonflement α_R et α_T (%/%) des différents groupes après échantillonnage.

L'objectif était de déterminer la contribution des différentes couches dans le comportement mécanique globale de l'éprouvette. Pour cela nous avons suivi deux sortes de recette qui existaient au XIV^e siècle : selon Cennino Cennini (Cennini 1899) ou selon le manuscrit du Bologne, retranscrit par Merrifield en 1967 (Merrifield 1967). Afin d'évaluer le rôle de l'épaisseur des couches de gesso, nous avons fait varier le nombre de ces couches. Nous avons également testé la contribution de la toile et de l'imprimatura. Enfin, dans le but de comparer nos essais à ceux de nos collègues du GESAAF⁴, nous avons suivi la même recette (groupe n°7) (table 2.4) qu'eux.

4. Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali, Université de Florence, Italie

n°groupe	Référence de la recette de gesso	PVC	Structure des couches	Epaisseur moyenne de la structure (mm)
Groupe 1	N/A	N/A	Bois brut	10.42
Groupe 2	Cennino Cennini*	96%	Encollage, gesso grosso, 4 couches de gesso sottile	11.49
Groupe 3			Encollage, gesso grosso, 8 couches de gesso sottile	12.62
Groupe 4			Encollage, toile, gesso grosso, 4 couches de gesso sottile	12.15
Groupe 5			Encollage, gesso grosso, 4 couches de gesso sottile, imprimitura au blanc de plomb	11.68
Groupe 6	Bologne**	98%	Encollage, 2 couches de gesso	13.19
Groupe 7			Encollage, toile, 2 couches de gesso et imprimitura au blanc de plomb	13.24

TABLE 2.4 - Condition d'assemblage des couches préparatoires. * (Cennini 1899), ** (Merrifield 1967). PVC = Pigment Volume Concentration

Le PVC est le ratio entre le solide inerte, appelé pigment, et la colle. Il se calcule comme suit :

$$PVC = \frac{P}{P + B} \times 100\% \quad (2.4)$$

Avec P et B les volumes de pigment et de colle sèche respectivement.

Caractérisation mécanique

Afin de caractériser la rigidité des échantillons, nous avons utilisé la méthode BING® (Beam Identification by Non-destructive Grading device)⁵ développée par le CIRAD de Montpellier. Cette méthode, utilisée ici en flexion, consiste à étudier les vibrations d'une éprouvette de bois aux dimensions élancées, soumise à l'impact d'une bille à son extrémité. L'analyse spectrale des vibrations de flexion nous donne les fréquences propres de l'éprouvette (figure 2.19).

5. <http://ur-biowoeb.cirad.fr/produits/bing/usage>

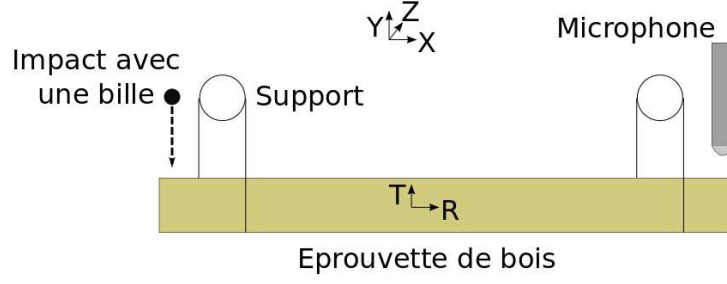


FIGURE 2.19 – Disposition du montage expérimental BING® en flexion, d'après (Brancheriau 2010)

De façon théorique, on considère une pièce de bois de densité ρ libre de tout mouvement, si l'on vient initier une onde de vibration en flexion dans une partie de l'échantillon, la direction de propagation principale de cette onde se fera dans la direction horizontale, que l'on nomme X . On considère que le module d'Young E_X , le moment d'inertie I_{GZ} , le module de cisaillement G_{XY} et la section transverse A sont constants le long de l'échantillon. On applique les équations classiques de mécanique dynamique :

$$E_X \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

Avec u le déplacement longitudinal.

Alors on peut écrire l'équation de vibration en flexion :

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K G_{XY}}\right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\rho k I_{GZ}}{K A G_{XY}} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{E_X k I_{GZ}}{K A G_{XY}} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (2.6)$$

Avec K un coefficient dépendant de la géométrie de la section, pour une section rectangulaire, on a $K = 5/6$ (Brancheriau 2002), k la rigidité du support élastique et v le déplacement transversal.

On utilisera le modèle de Timoshenko (Timoshenko 1939) et Bordonné (Bordonné 1989) pour résoudre l'équation 2.6. Des hypothèses sont nécessaires dans ce modèle :

- Le ratio hauteur/longueur est assez faible ($h/L \ll 1$)
- L'effet du support est négligé

L'équation 2.6 devient :

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K G_{XY}}\right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

Finalement la solution P_{Bn} , donnée par le développement de Bordonné (Bordonné 1989), s'écrit :

$$P_{Bn} = \frac{a}{P_n} [1 + Q[\theta^2(m) + 6\theta(m)] + R[\theta^2(m) - 2\theta(m)]] \quad (2.8)$$

Avec P_n la solution du modèle de Bernoulli (Bernoulli 1748) :

$$\sqrt[4]{P_n} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, n \in N^* \quad (2.9)$$

Et :

$$\theta(m) = m \frac{\tan(m) \tanh(m)}{\tan(m) - \tanh(m)} \text{ avec } m = \sqrt[4]{P_n}$$

$$R = \frac{E_X I_{GZ}}{K A G_{XY} L^2}$$

$$Q = \frac{I_{GZ}}{A L^2 \left(1 - \frac{k}{\rho A w^2}\right)}$$

Le facteur R prend en compte l'effet du cisaillement.

Pour le modèle de Bernoulli, on trouve normalement une fréquence propre à l'ordre n :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_X I_{GZ} P_n}{\rho A L^4}} \quad (2.10)$$

Il suffit alors de remplacer P_n (équation 2.9) par P_{Bn} :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_X I_{GZ} P_n}{\rho A L^4 [1 + Q F_1(m) + Q \frac{E_X}{K G_{XY}} F_2(m)]}} \quad (2.11)$$

Avec $F_1(m) = \theta^2(m) + 6\theta(m)$ et $F_2(m) = \theta^2(m) - 2\theta(m)$. De l'équation 2.11, on obtient la partie module d'élasticité et de cisaillement par régression linéaire avec les paramètres (x_n, y_n) (Hearmon 1958), lu dans (Brancheriau 2002), tels que :

$$x_n = Q F_2(m) 4\pi^2 \frac{A L^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} \text{ et } y_n = 4\pi^2 \frac{A L^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} [1 + Q F_1(m)] \quad (2.12)$$

Concrètement, la détermination des modules se fait par l'obtention des premières fréquences propres $(f_1, f_2, f_3 \dots)$ en écrivant la solution comme $E/\rho = y_n + \frac{E}{kG} x_n$ (figure 2.20)

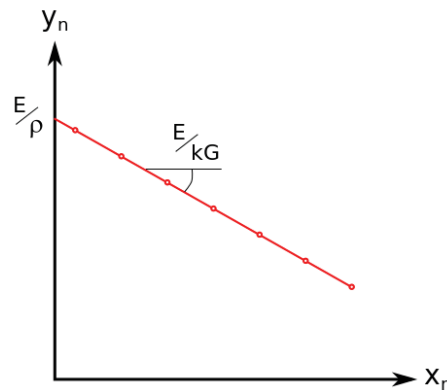


FIGURE 2.20 – Détermination graphique des modules avec le modèle de Timoshenko.

Calcul multicouche

Afin de déterminer la rigidité des différentes parties de notre objet à partir de la rigidité globale, il nous suffit d'appliquer un calcul de structure multicouche en une dimension.

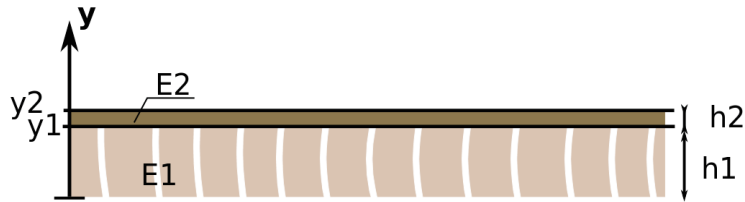


FIGURE 2.21 – Schéma pour le calcul multicouche.

On considère un cas simple de structure bi-couche d'épaisseurs h_1 et h_2 et de rigidité E_1 et E_2 respectivement (figure 2.21). On appelle y_1 et y_2 les altitudes de la couche de bois et de la couche préparatoire respectivement.

On écrit les lois de comportement général de cet objet comme des fonctions linéaires :

$$\varepsilon = a + b y \quad (2.13)$$

$$\sigma = E a + E b y \quad (2.14)$$

Avec a et b deux inconnues du problème, y l'altitude considérée, ε la déformation, σ la contrainte et E la rigidité globale de l'échantillon.

Or

$$N = \int \sigma dy \quad (2.15)$$

$$M = \int \sigma y dy \quad (2.16)$$

Avec N et M les tenseurs des efforts et des moments respectivement.

On injecte alors l'équation 2.14 dans 2.15 et 2.16 :

$$N = a \int E dy + b \int E y dy \quad (2.17)$$

$$M = a \int E y dy + b \int E y^2 dy \quad (2.18)$$

Puis on pose :

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 & K_1 \\ K_1 & K_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Avec K_0 , K_1 et K_2 les raideurs associées aux efforts et moments.

Par identification, on trouve que :

$$K_0 = \sum_i E_i \cdot h_i \quad (2.20)$$

$$K_1 = \sum_i E_i \int_{y_{i-1}}^{y_i} y \, dy \quad (2.21)$$

$$K_2 = \sum_i E_i \int_{y_{i-1}}^{y_i} y^2 \, dy \quad (2.22)$$

Avec $i \in [1, 2]$.Après intégration, les équations 2.21 et 2.22 nous donnent :

$$K_1 = \sum_i E_i \cdot \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{2} \quad (2.23)$$

$$K_2 = \sum_i E_i \cdot \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{3} \quad (2.24)$$

Or sans frottement, l'équation 2.15 devient :

$$\begin{cases} N = 0 = a K_0 + b K_1 \\ M = a K_1 + b K_2 \end{cases} \quad (2.25)$$

Donc :

$$\begin{cases} a = -b \frac{K_1}{K_0} \\ M = b \left(K_2 - \frac{K_1^2}{K_0} \right) \end{cases} \quad (2.26)$$

On pose $K_f = K_2 - \frac{K_1^2}{K_0}$

Or on cherche un module en flexion, on a donc :

$$K_f = E \times \frac{h^3}{12} \quad (2.27)$$

Dans le cadre de cette étude, le module du bois E_1 et celui de l'ensemble de l'échantillon E sont connus mais pas celui de la couche préparatoire. On peut donc calculer le module E_2 de la couche préparatoire de telle sorte à ce qu'il satisfasse l'équation 2.27. Cette solution est unique et peut se résoudre analytiquement, mais pour des raisons d'efficacité de résolution, nous avons utilisé le *solver* de Microsoft Excel afin de déterminer le module E_2 .

Chargement hydrique

Afin de déterminer la réponse hygromécanique des échantillons, nous les avons soumis à des paliers climatiques en absorption et désorption correspondant à des fluctuations retrouvées dans un musée, par exemple.

Nous avons dimensionné le chargement hydrique à l'aide du logiciel de simulation TransPore 3D, afin que tous les échantillons arrivent à l'équilibre hydrique⁶ pour chaque palier d'humidité relative imposé en chambre climatique⁷ (figure 2.22).

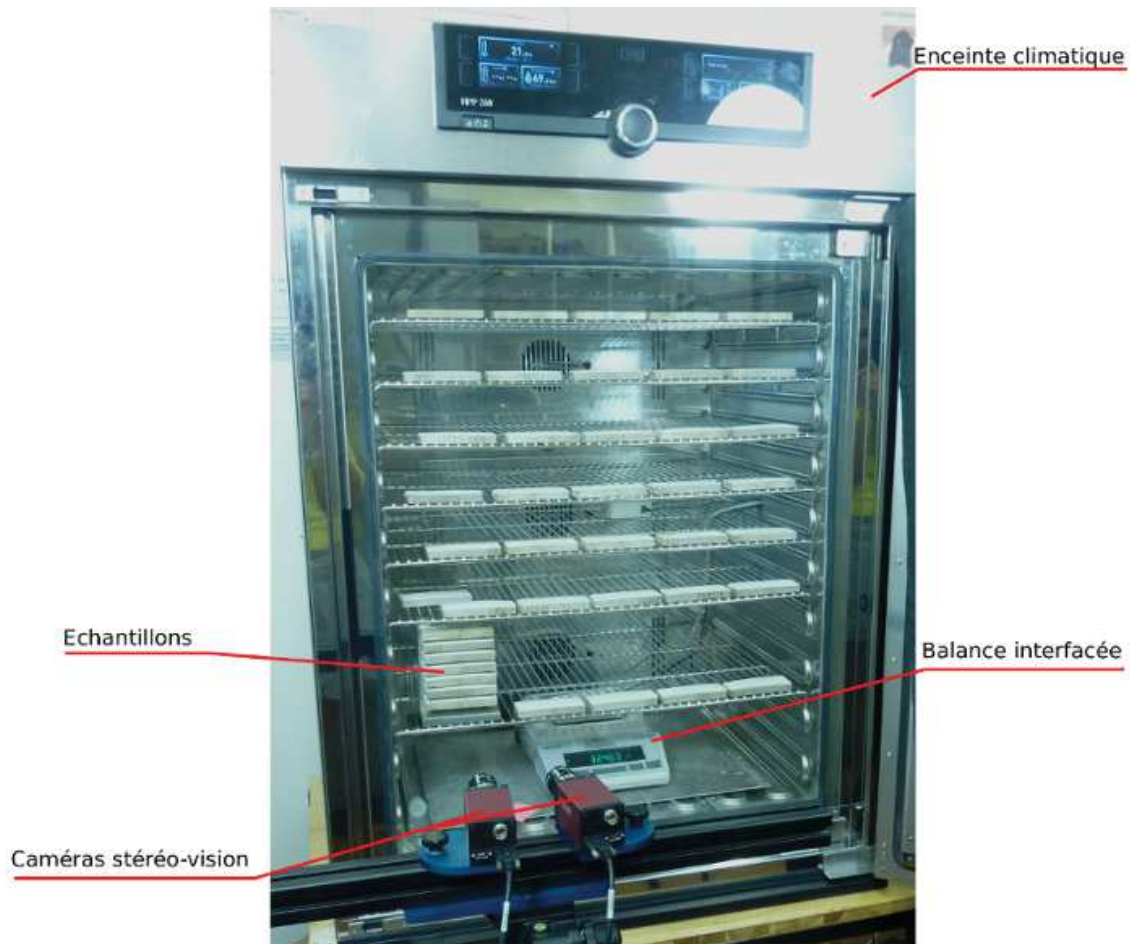


FIGURE 2.22 – Montage expérimental.

Pour le suivi de l'équilibre, nous avons pesé un échantillon à l'aide d'une balance interfacée, présente dans l'enceinte climatique, afin de suivre les reprises ou pertes en eau au cours de l'expérience. Comme nous ne pouvions peser qu'un seul échantillon, nous avons choisi celui qui nécessite à priori le plus long temps d'équilibre : échantillon du groupe 7, avec la couche préparatoire la plus épaisse et contenant des couches d'imprimatura (censées constituer une barrière imperméable). Cet échantillon devrait avoir une cinétique de sorption globalement plus lente que les autres. À son équilibre, le reste des groupes sera à l'équilibre hydrique. Ce raisonnement a été également suivi pour la simulation de transfert hydrique, dans laquelle la couche préparatoire a été prise en compte par une condition de flux nul (imperméable) (figure 2.23).

6. L'équilibre hydrique est déterminé en calculant la variation de masse telle qu'elle soit inférieure à 0.02% sur 24h.

7. Chambre climatique MEMMERT HPP260 avec $\pm 0.5\%HR$ et $\pm 0.1^{\circ}C$ de précision

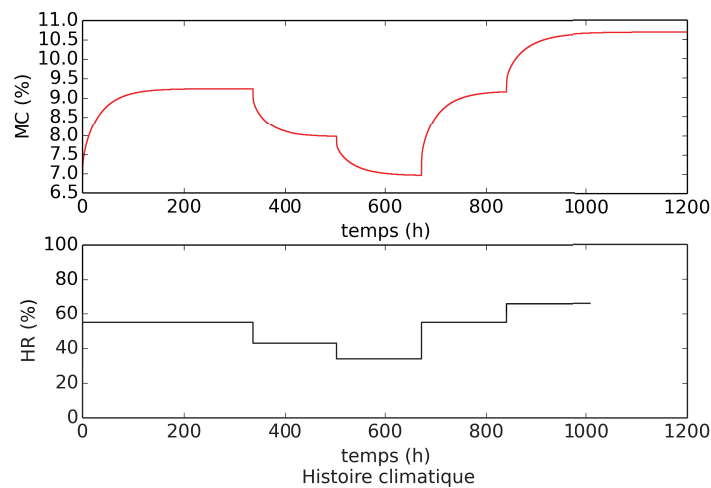


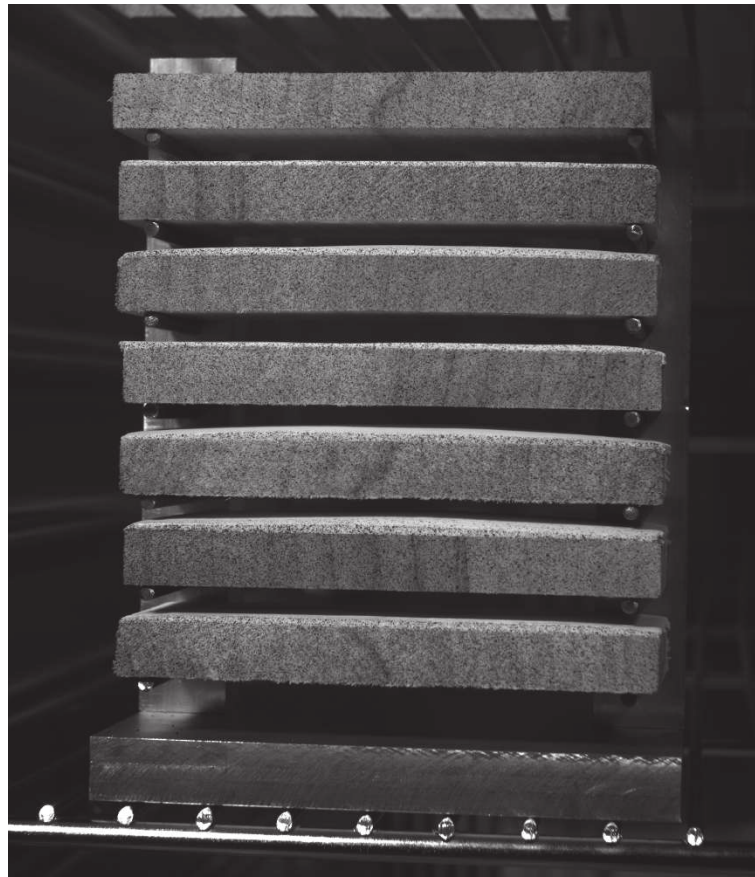
FIGURE 2.23 – Chargement hydrique imposé aux échantillons sur quartier (dont une face est imperméable) et leur réponse moyenne en teneur en eau, calculé numériquement à l'aide de *TransPore 3D*. Pour des raisons de cohérence ici $\gamma = 0.2$.

La simulation effectuée à l'aide de *TransPore 3D* (figure 2.23) a pu mettre en évidence un dysfonctionnement dans l'approche de modélisation de l'hystérésis implémentée dans cet outil de calcul. Ce dysfonctionnement est discuté dans la partie 3.2.1.2. Normalement, nous sommes dans un cas d'absorption, mais par souci de rendre compte au mieux de la réalité, le paramètre γ – rendant compte de la position dans le chemin de l'hystérésis de sorption – sera pris égal à 0.2 ($0 \leq \gamma \leq 1$, avec $\gamma = 0$ décrivant la désorption et $\gamma = 1$ décrivant l'absorption).

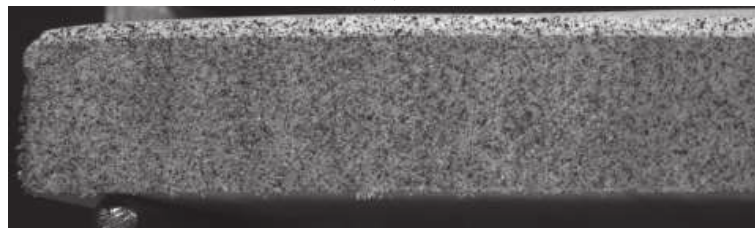
Suivi des déformations par stéréo-vision

Le comportement mécanique a été évalué grâce à deux caméras en stéréo-vision, utilisant la technique de corrélation d'images numériques (CIN) (Gauvin 2014), (Choi 1991) et (Chu 1985). Cette technique permet de calculer les champs de déformation d'une surface grâce à la reconnaissance d'un motif aléatoire (mouchetis) imprimé sur la surface déformable, comme expliqué dans la section 1.1.6.

Cette technique a été utilisée pour observer le comportement hygromécanique, d'une section transverse d'échantillon, lié au changement d'humidité et à la forte rigidité de la couche préparatoire.



(a)



(b)

FIGURE 2.24 – Photo des échantillons avec mouchetis suivis par CIN. (a) : les sept conditions de couche préparatoire sont suivies afin de calculer la flèche centrale induite par les changements d’humidité. (b) : Un zoom sur le mouchetis employé.

Les caméras utilisées étaient de marque AVT Pike F-421B dont le capteur est de marque Kodak HAD CCD avec un objectif de 50 mm, soit 4 millions de pixels en résolution ($2048 \times 2048px^2$). L’acquisition d’image s’est faite en continue avec une image toutes les deux minutes afin d’enregistrer les phases transitoires lors d’un changement d’humidité relative. Le logiciel d’analyse d’image utilisé est un logiciel développé par des collègues de l’équipe PEM (Photomécanique & analyse Expérimentale en Mécanique des solides) de l’institut Pprime, nommé DEFTAC3D⁸.

8. http://www.pprime.fr/sites/default/files/pictures/d3/PEM/fic_stereosuivimarqueurs.pdf

Calcul de la flèche centrale et de la courbure des échantillons

Nous avons pu déterminer la flèche centrale et la courbure des échantillons à partir des déplacements mesurés par CIN. Après analyse d'images, nous avons pour cela extrait le contour de la zone supérieure de l'échantillon. Le rayon de courbure ($2a$) et la flèche centrale (c) de l'échantillon ont été calculés à partir de l'équation paramétrique du contour parabolique, de la forme $y = ax^2 + bx + c$.

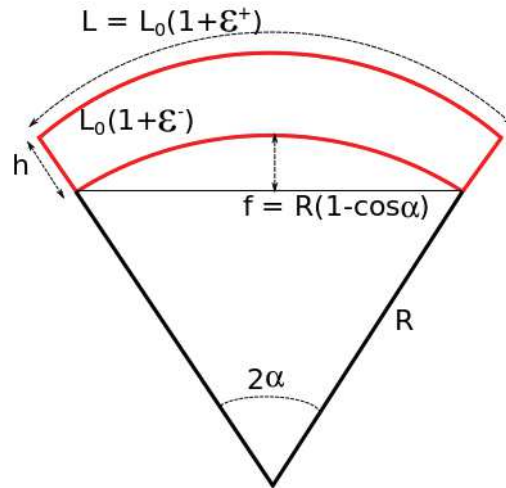


FIGURE 2.25 – Schéma explicatif du calcul de la flèche centrale des échantillons à partir des fichiers CIN.

Si on considère l'hypothèse de Bernoulli (qu'en flexion les sections planes restent planes), alors on peut écrire que :

$$f = R(1 - \cos \alpha) \sim R \frac{\alpha^2}{2} \text{ au premier ordre} \quad (2.28)$$

$$L = L_0(1 + \epsilon^-) = 2R\alpha \quad (2.29)$$

$$L_0(1 + \epsilon^+) = 2(R + h)\alpha \quad (2.30)$$

Avec f la flèche, L la longueur de la face supérieure de l'échantillon, L_0 la longueur initiale, R le rayon de courbure, α le demi angle de courbure, ϵ^+ la déformation horizontale de la face supérieure de l'échantillon, ϵ^- la déformation horizontale de la face inférieure de l'échantillon et h l'épaisseur de l'échantillon.

Si on divise l'équation (2.30) par l'équation (2.29), on a :

$$\frac{1 + \epsilon^+}{1 + \epsilon^-} = \frac{R + h}{R} \quad (2.31)$$

$$\text{Or } \frac{1 + \epsilon^+}{1 + \epsilon^-} \sim 1 + \epsilon^+ - \epsilon^- \quad (2.32)$$

$$\text{Donc } 1 + \epsilon^+ - \epsilon^- \sim 1 + \frac{h}{R} \quad (2.33)$$

$$\text{Soit } \Delta \epsilon \sim \frac{h}{R} \quad (2.34)$$

On exprime l'équation (2.29) comme $\alpha = \frac{L}{2R}$, puis on l'insère dans l'équation (2.28), combiné avec l'équation (2.34) :

$$f = \frac{RL^2}{8R^2} = \frac{L^2}{8R} \quad (2.35)$$

$$\text{Soit } \frac{1}{R} = \frac{8f}{l^2} \sim \frac{\Delta \epsilon}{h} \quad (2.36)$$

On peut donc relier courbure ($1/R$) et gradient de déformation ($\Delta \epsilon$).

2.2.2.2 Comportement hygromécanique et courbure

Rigidité des échantillons

Après stabilisation des échantillons à 55% HR, 20°C, nous avons procédé à une caractérisation du module élastique par la méthode BING. Les résultats sont présentés ci-dessous figure 2.26.

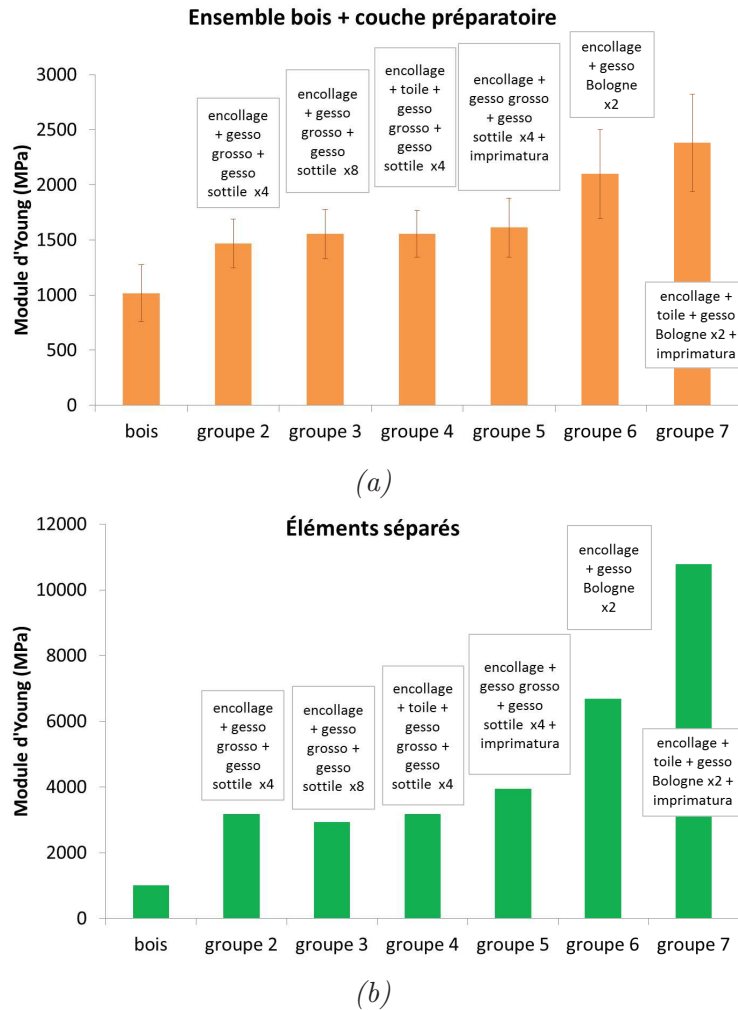


FIGURE 2.26 – Résultat du module d'Young déterminé par la méthode BING avec le modèle de Timoshenko pour toutes les conditions de revêtement des échantillons. (a) : Résultat brut de la rigidité de l'ensemble bois et couche préparatoire. (b) : Résultat de la rigidité de la couche préparatoire uniquement évaluée à partir du modèle multicouche présenté dans la section 2.2.2.1

On peut remarquer que la moyenne de 1017,6 MPa pour la rigidité dans le sens radial des échantillons témoins est de l'ordre de grandeur de celle déterminée par Guitard (Guitard 1987) pour un feuillu de même densité que le peuplier (table 1.2).

Les rigidités des revêtements (figure 2.26.(b)) ont été calculées grâce au modèle multicouche présenté dans la partie 2.2.2.1. Les échantillons avec couche préparatoire présentent toujours une plus grande rigidité que celle du bois brut seul. Certaines conditions de revêtement vont jusqu'à plus que doubler le module d'Young mesuré. Si on regarde plus attentivement les conditions d'assemblage des couches préparatoires (table 2.4), on peut conclure qu'en terme de rigidité radiale :

- La présence de gesso augmente la rigidité de façon significative (par rapport au bois

brut), mais la présence de 4 ou 8 couches de gesso sottile, la rigidité de l'ensemble ne change pas beaucoup. C'est comme si c'était le gesso grosso qui imposait sa rigidité et que le gesso sottile n'était que très peu rigide (car l'épaisseur de celui-ci n'influe pas sur la différence de rigidité entre le groupe 2 et 3).

- La présence de toile participe très peu à l'augmentation de la rigidité de la structure globale (comparaison entre le groupe 2 et 4). Et lorsqu'on découple les couches de bois et de la couche préparatoire, cette tendance reste la même alors que l'effet de l'épaisseur de la toile (non négligeable) est pris en compte dans notre calcul multicouche.
- L'imprimatura à base de blanc de plomb, lui, fait bien augmenter à la fois la rigidité de la structure multicouche et le module intrinsèque de la couche préparatoire (comparaison groupe 2 et 5). Ce résultat est assez surprenant car l'épaisseur de ce revêtement est très faible. Si nous devons appliquer le raisonnement de découplage des rigidités dans la partie couche préparatoire uniquement, nous aurions alors une contribution de cette couche d'imprimatura très supérieur à celle du gesso.
- La recette de gesso venant du manuscrit de Bologne (Merrifield 1967) est nettement plus rigide que celle énoncée par Cennini (Cennini 1899) (comparaison groupe 2 et 6, pour le cas ensemble bois et couche préparatoire et pour les éléments séparés), cela est lié à la plus grande concentration de PVC dans la formulation du gesso, comme a pu le montrer Mecklenburg (Mecklenburg 1998).
- L'association de tous les éléments rend la structure encore plus rigide. On estime le module du revêtement du groupe 7 à plus de 10 *GPa*, le module de l'élément bois + couche préparatoire étant dans ce cas de 2380 MPa (le double du bois seul).

Champs de déformation et courbure liés aux fluctuations climatiques

De façon générale, on peut remarquer que la couche préparatoire (appelé Gesso sur les figures ci-dessous) joue un rôle de barrière hydrique dans tous les cas, car la dilatation ou le retrait horizontal (sens radial pour ces échantillons) s'effectue principalement par les faces libres (face de dessous et faces latérales) (figure 2.28 à figure 2.33).

Si l'on compare les champs de déformation du bois libre et ceux des échantillons avec revêtement, lors du retrait à 34% HR par exemple, la couche préparatoire met en compression tangentielle le bois avoisinant (le retrait est bien plus fort sous le gesso pour les échantillons revêtus que pour le bois libre), créant ainsi des gradients de déformation E_{22} importants (passage de 0.2% au bord libre à 1% sous le gesso) (figure 2.31). Il serait intéressant de pouvoir faire la différence des champs de déformation entre l'état du retrait libre et l'état des échantillons revêtus afin de pouvoir quantifier les contraintes liées à la couche préparatoire – et donc accéder au moment de flexion.

Ces figures ont été obtenues par CIN (partie 2.2.2.1) en prenant garde de différencier le comportement de la couche préparatoire par rapport à celui du bois.

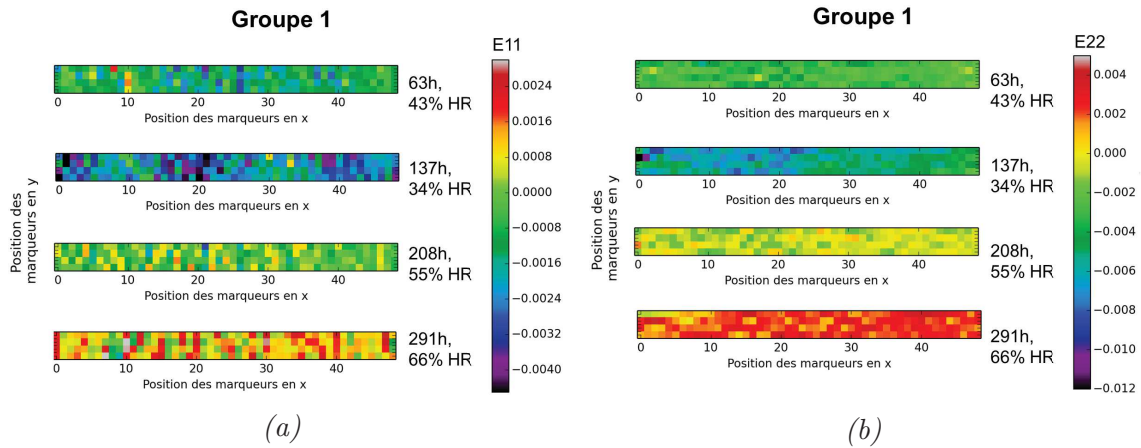


FIGURE 2.27 – Cartographie des déformations du bois brut à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 1. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

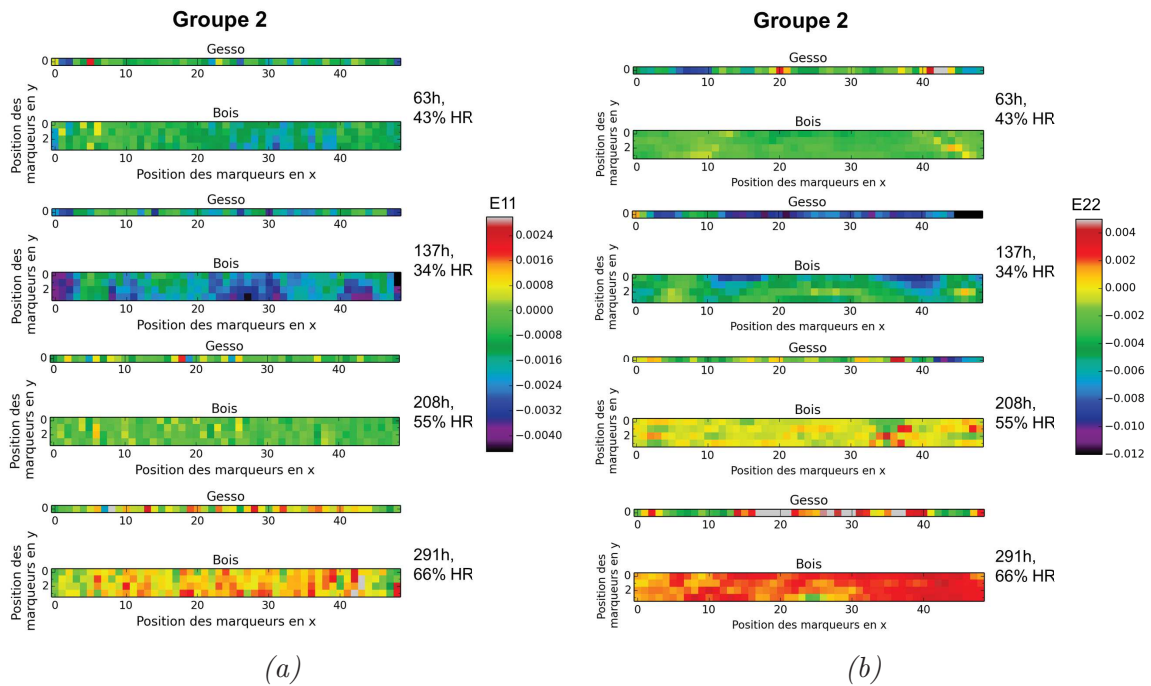


FIGURE 2.28 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 2. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

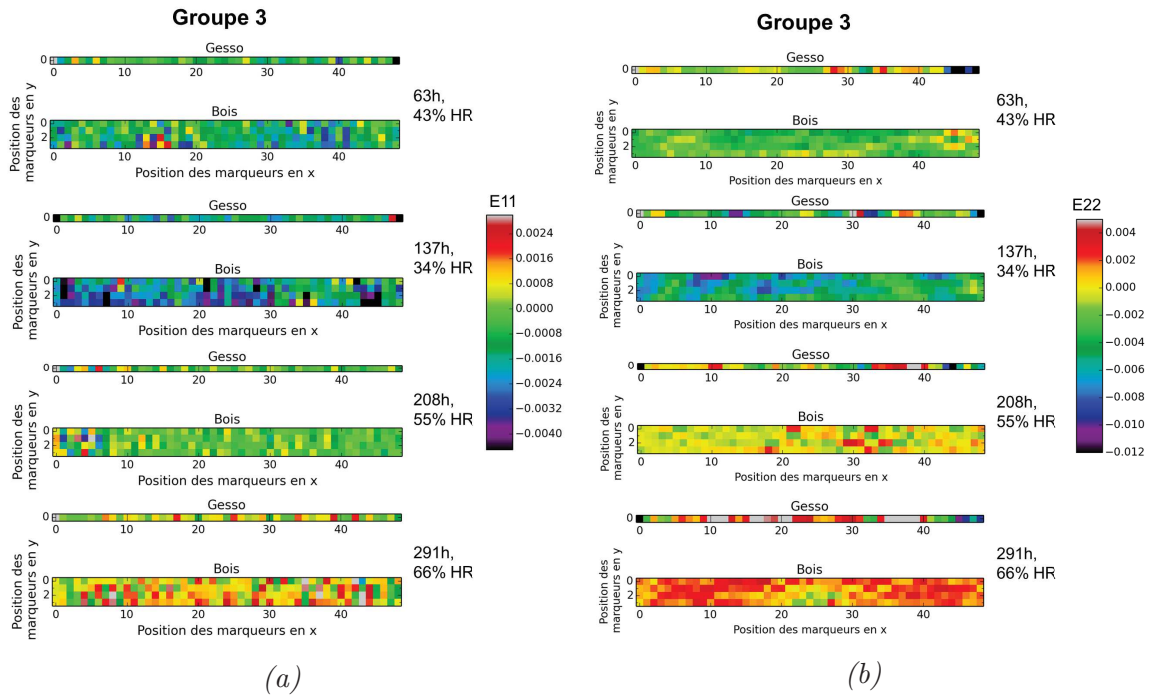


FIGURE 2.29 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 3. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

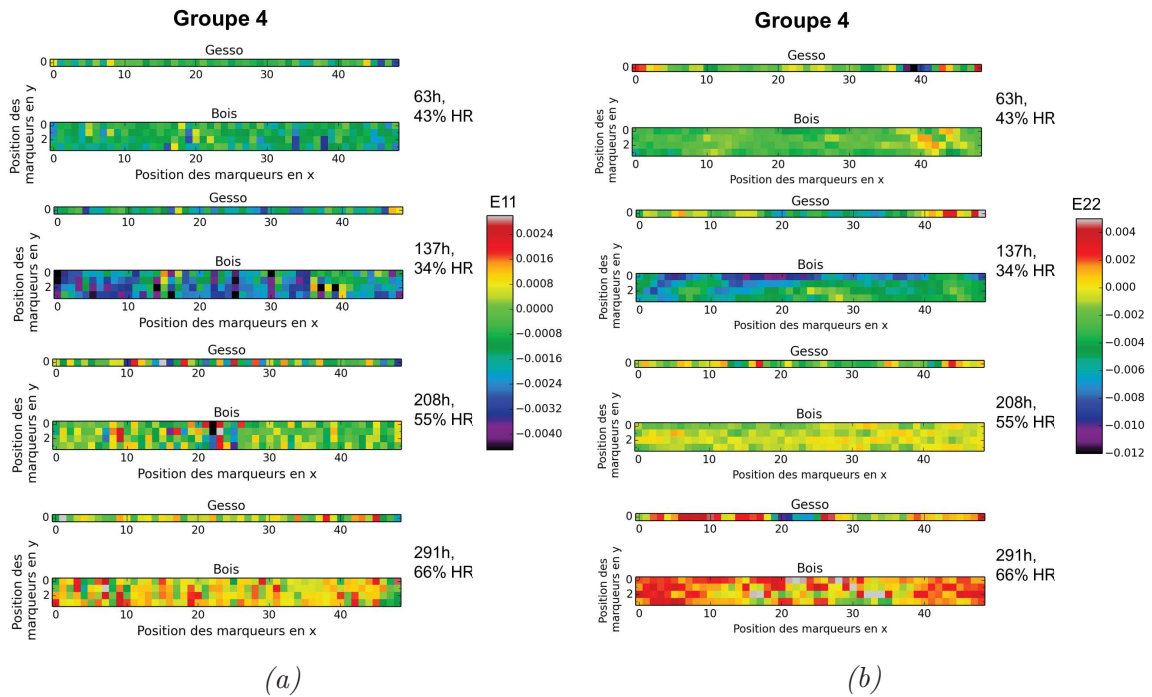


FIGURE 2.30 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 4. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

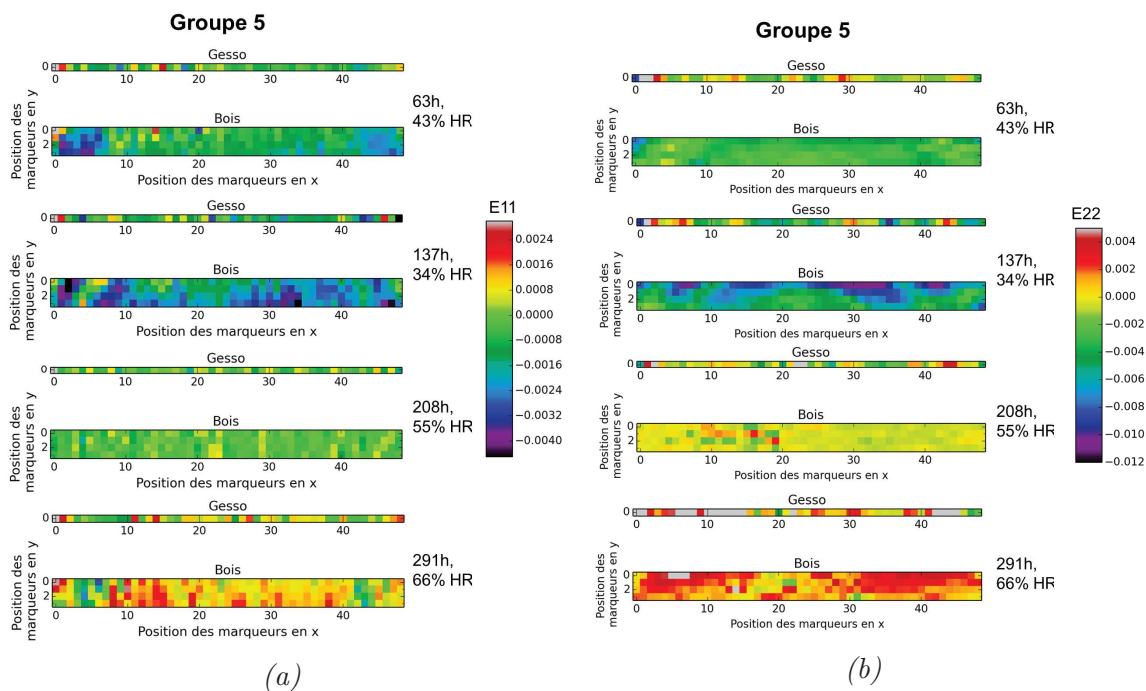


FIGURE 2.31 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 5. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

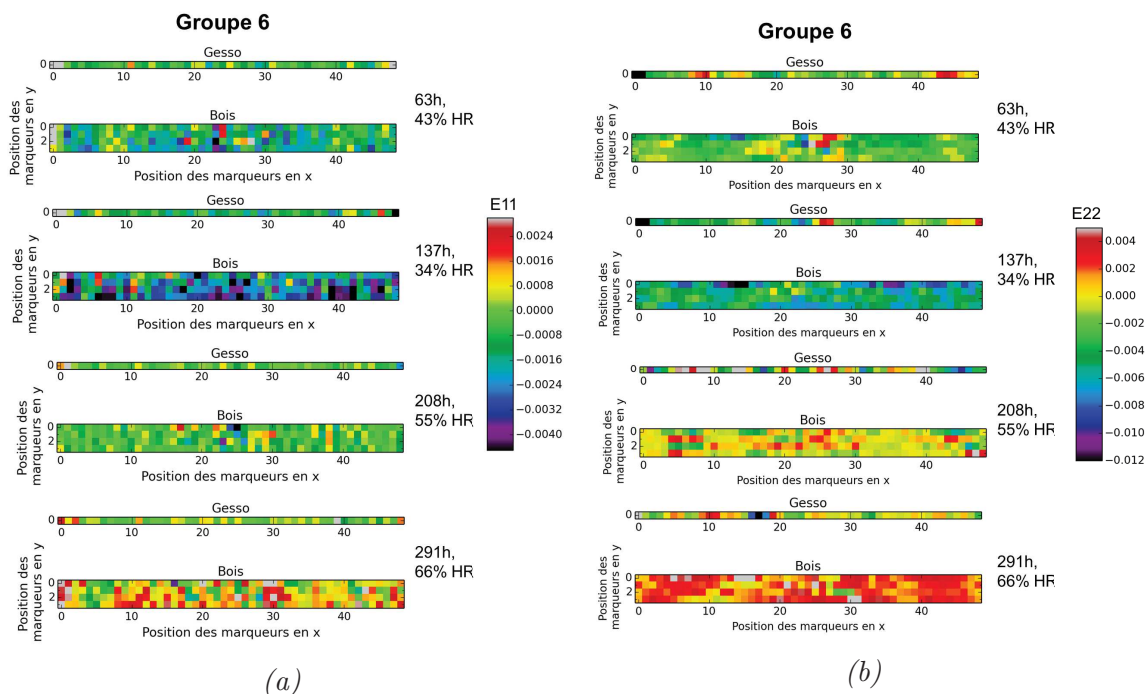


FIGURE 2.32 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 6. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

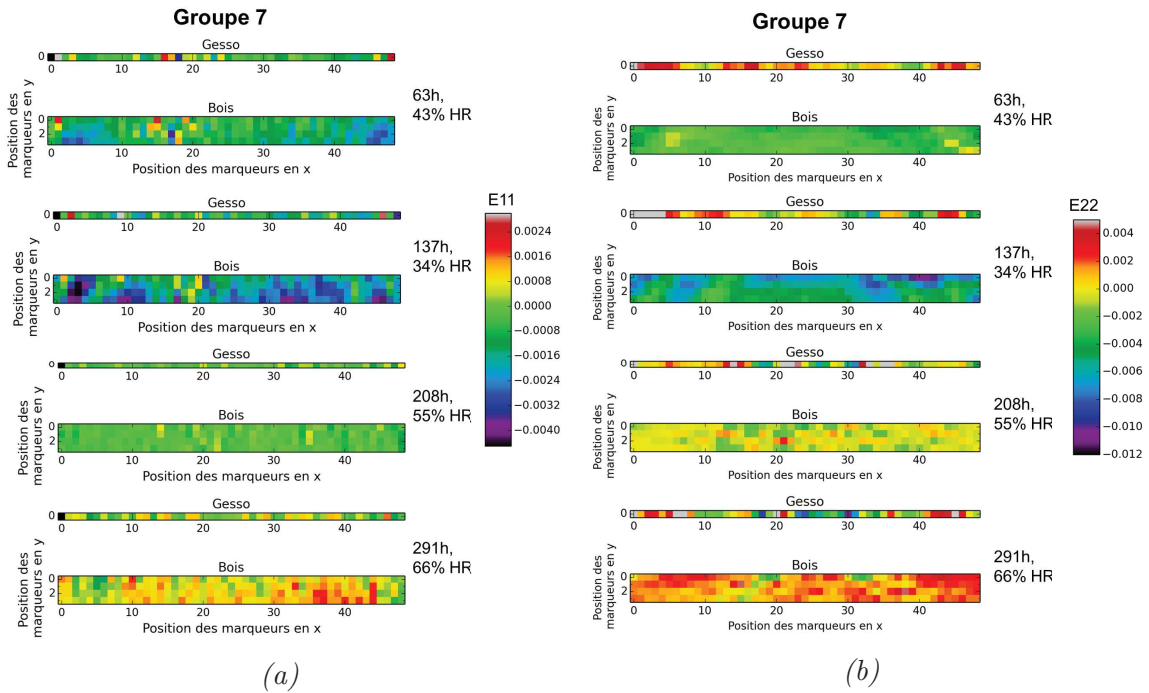


FIGURE 2.33 – Cartographie des déformations de la couche préparatoire et du bois à différents états équilibrés d’humidité relative, groupe 7. (a) Déformations horizontales (b) Déformations verticales

Dans le bois brut les déformations sont relativement homogènes dans l’échantillon. On peut évaluer les déformations à 34% HR à $E_{22} = 0.5\%$ et $E_{11} = 0.25\%$ en moyenne pour le groupe 1 (figure 2.27).

Au vu des cartographies ci-dessus, le palier stabilisé à 34% HR à 137h est l’état le plus critique (l’intensité des déformations est la plus élevée) en terme de déformation dans le bois. Pour une analyse plus fine des phénomènes, nous nous concentrerons donc sur cet état-ci.

Nous avons vu dans la partie matériel et méthode 2.2.2.1 que la courbure et le gradient de déformation horizontale (E_{11}) sont proportionnels avec $\frac{1}{R} = \frac{\Delta\epsilon}{h} = \frac{8f}{L^2}$.

Si l’on représente la forme de la variation de courbure observée par CIN (figure 2.34) entre l’état initial et l’état stabilisé à 34% HR, on peut alors approcher ces formes par l’équation paramétrique d’une parabole $Dy = ax^2 + bx + c$. Avec $1/R = 2a$ la courbure et c la flèche centrale. Dy est donc la différence entre l’état à 55% HR et l’état à 34% HR des positions suivant y .

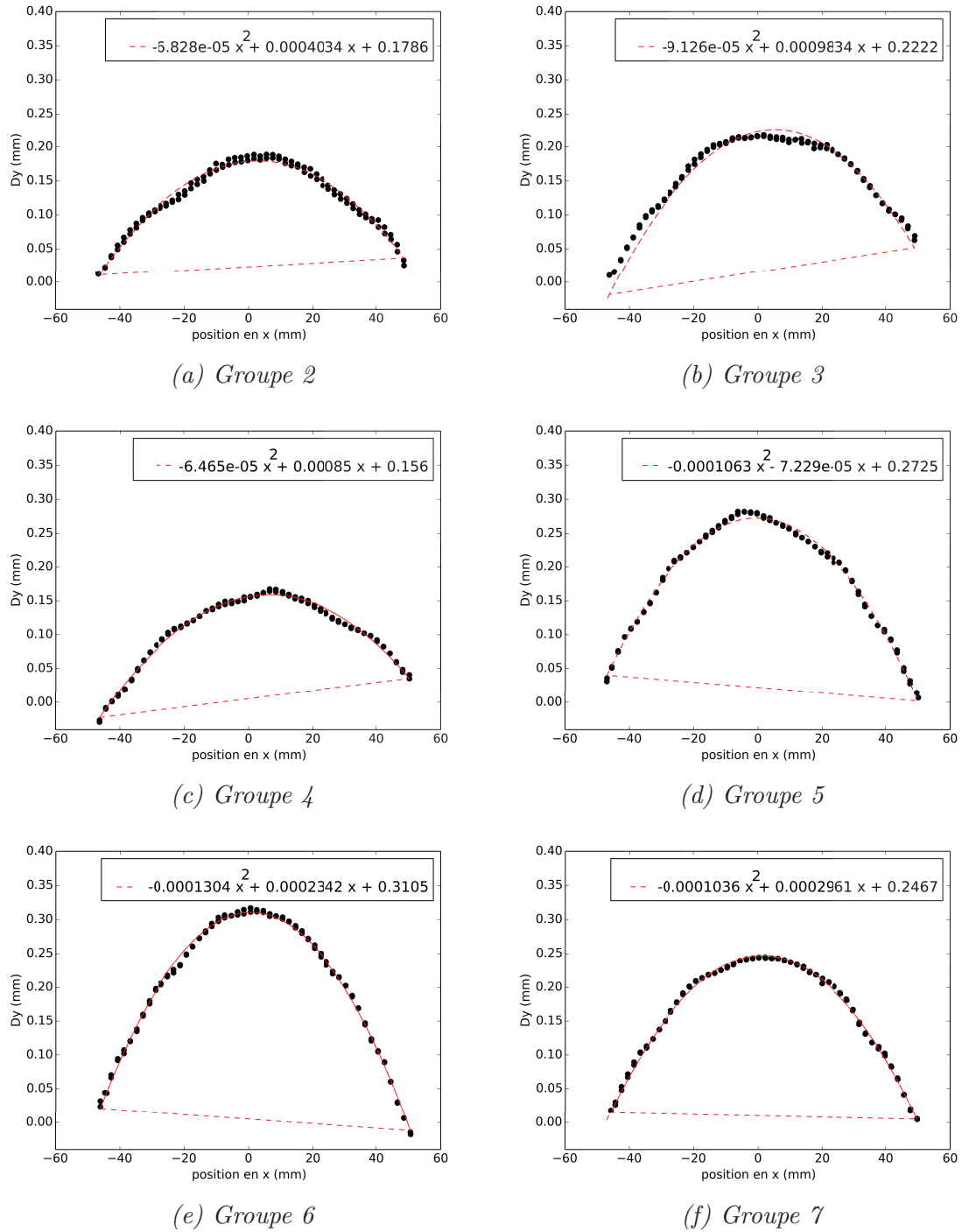


FIGURE 2.34 – Représentation de la forme de la couche préparatoire obtenue par CIN entre l'état initial et l'état à 34% HR (137h) pour tous les groupes. Chaque courbure est approchée par l'équation d'une parabole (ligne pointillée rouge).

Les flèches et les courbures obtenues sont reportées dans le tableau table 2.5.

Groupe	courbure $1/R$ (mm^{-1})	flèche (mm)
Groupe 2	$-13.7 \cdot 10^{-5}$	0.18
Groupe 3	$-18.2 \cdot 10^{-5}$	0.22
Groupe 4	$-12.9 \cdot 10^{-5}$	0.16
Groupe 5	$-21.3 \cdot 10^{-5}$	0.27
Groupe 6	$-26.1 \cdot 10^{-5}$	0.31
Groupe 7	$-20.7 \cdot 10^{-5}$	0.25

TABLE 2.5 – Courbures et flèches obtenues à 34% HR.

Nous pouvons également calculer le gradient de déformation horizontale obtenu à l'état 34% HR. Pour cela, nous "découpons" l'échantillon en 5 couches dans l'épaisseur (figure 2.35). Nous effectuons la moyenne des déformations obtenues sur une couche (figure 2.36), la pente des déformations dans l'épaisseur est approchée grâce à une régression linéaire.

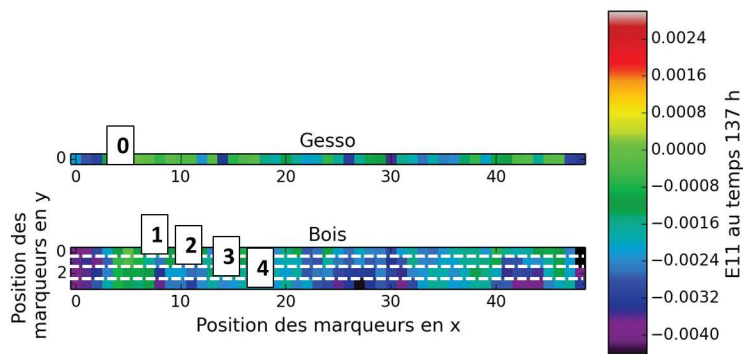
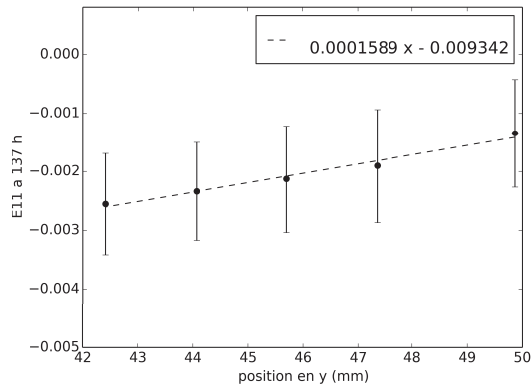
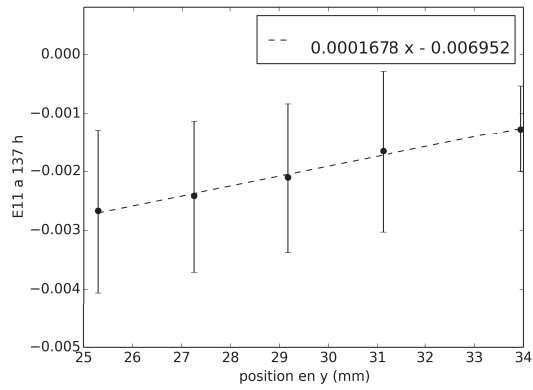


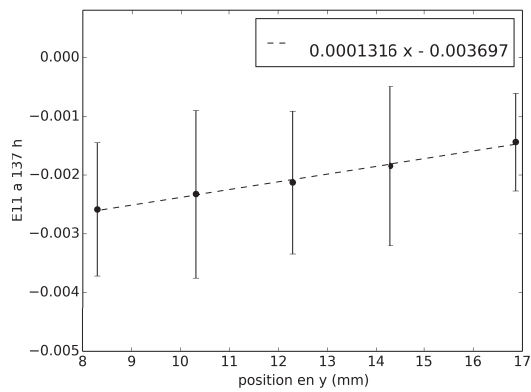
FIGURE 2.35 – Schématisation du découpage multicouche dans l'épaisseur de l'échantillon afin de calculer la moyenne par ligne des déformations.



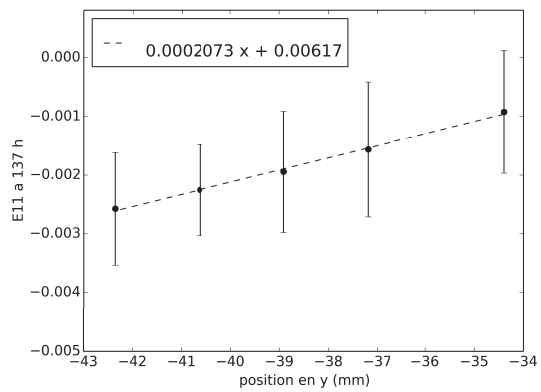
(a) Groupe 2



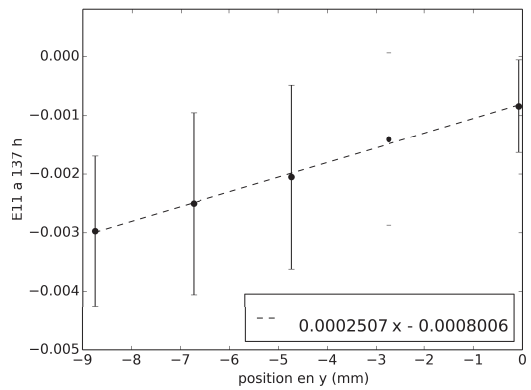
(b) Groupe 3



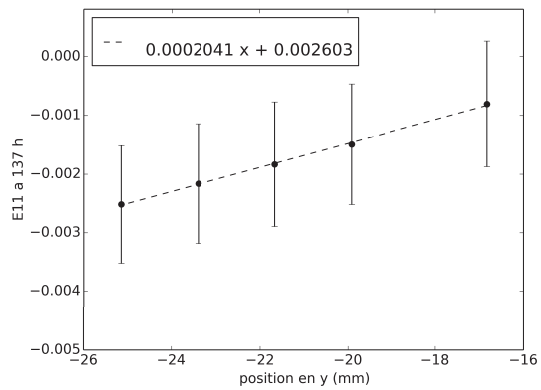
(c) Groupe 4



(d) Groupe 5



(e) Groupe 6



(f) Groupe 7

FIGURE 2.36 – Profil des déformations horizontales E_{11} dans l'épaisseur des échantillons, entre l'état initial et l'état à 34% HR (137h) pour tous les groupes. Le gradient est calculé avec une équation de droite (ligne pointillée) $Y = aX + b$.

On peut alors calculer la courbure à partir des gradients de déformations (équation 2.36) et la mettre en relation avec la courbure précédemment calculée (figure 2.37).

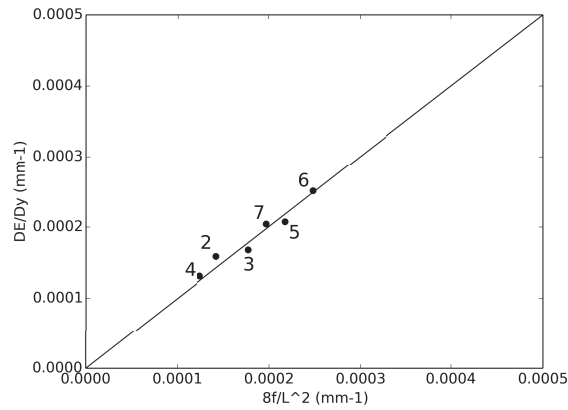


FIGURE 2.37 – Mise en relation de la courbure calculée grâce à la forme de l'échantillon et celle calculée par le biais du gradient de déformation.

Il y a une bonne corrélation entre les résultats de déformation et les calculs de flèche centrale. Ce résultat confirme l'hypothèse de Bernoulli (formulée dans l'équation 2.28) sur toute la largeur des échantillons.

Nous pouvons maintenant extrapoler la déformation sur la surface libre de l'échantillon et sur la surface de la couche préparatoire. Ce calcul permet de mettre en relation les déformations subies par la couche de peinture (si l'on se place dans le cas d'un panneau réel avec bois, couche préparatoire et couche picturale).

Groupe	Épaisseur globale (mm)	Paramètres de l'équation issue de la régression linéaire ($a \cdot 10^{-4}$; $b \cdot 10^{-3}$)	Extrapolation E_{11} surface libre (%)	Extrapolation E_{11} surface couche préparatoire (%)
Groupe 2	11.49	1.589; - 9.342	-0.267	-0.084
Groupe 3	12.62	1.678; - 6.952	-0.276	-0.064
Groupe 4	12.15	1.316; - 3.697	-0.264	-0.105
Groupe 5	11.68	2.073; 6.17	-0.274	-0.032
Groupe 6	13.19	2.507; - 0.8006	-0.306	-0.025
Groupe 7	13.24	2.041; 2.603	-0.270	-0.0001

TABLE 2.6 – Extrapolation des déformations horizontales obtenues à 34% HR sur la surface supérieure (couche préparatoire) et inférieure (bois) des échantillons.

La moyenne globale de déformation E_{11} dans le bois brut (groupe 1) à 34% HR est de -0.24%. Or dans le table 2.6, on remarque que la valeur extrapolée est du même ordre de grandeur que celle du bois libre. Seul le groupe 6 présente un plus fort retrait ($E_{11} surface libre = -3.06 \cdot 10^{-3}$).

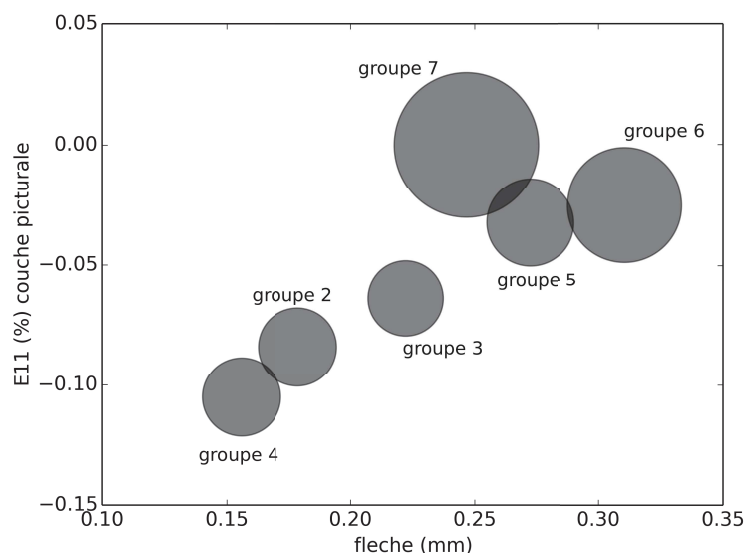


FIGURE 2.38 – Mise en relation de la flèche centrale avec la déformation extrapolée à la surface de la couche préparatoire et avec la rigidité des couches préparatoires (proportionnelle à la taille des disques).

Si l'on compare la flèche avec la déformation en surface de la couche préparatoire, on voit sur la figure 2.38 que plus la flèche centrale est importante et moins il y a de déformation de retrait en surface. Nous nous intéressons à cette déformation car c'est celle qui sera exprimée dans la couche picturale et qui peut donc provoquer sa ruine. Ce graphe confirme qu'une flèche élevée, correspondant à une courbure importante, sollicite moins la couche picturale en compression, et est donc moins « dangereux » pour cette dernière.

Si l'on compare les différents groupes en terme de flèche et de déformation surfacique, pour des rigidités de couche préparatoire équivalentes, on a :

- **Groupe 2 et groupe 3** : dans leur formulation, le groupe 3 possède plus de couches de gesso sottile. La différence observée entre ces deux échantillons est la flèche : le groupe 3 possède une courbure plus importante que le groupe 2 (de même pour la déformation de la couche picturale). Sachant que la courbure est provoquée par la dissymétrie des échanges hydriques, nous pouvons faire l'hypothèse que l'augmentation du nombre de couches de gesso sottile imperméabilise plus la couche préparatoire.
- **Groupe 2 et groupe 4** : le groupe 4 possède une toile en lin. La différence observée est double : le groupe 4 présente une plus forte déformation surfacique et une plus faible courbure que le groupe 2. Donc la toile aurait comme effet de réduire la courbure, et provoquerait alors une plus grande déformation de la couche picturale.
- **Groupe 2 et groupe 5** : le groupe 5 possède une couche d'imprimatura au blanc de plomb. Cette couche représente une forte barrière hydrique car la flèche est bien plus élevée que celle du groupe 2 (et du groupe 3)

Si maintenant on fait intervenir la rigidité de la couche préparatoire dans l'analyse des résul-

tats, on a :

- **Groupe 2 et groupe 6** : le groupe 6 a été élaboré à partir de la formulation de Bologne (Merrifield 1967) (c'est-à-dire 2 couches de gesso). Cette formulation permet au panneau de se courber assez fortement (0.31 mm de flèche) tout en ne provoquant que peu de déformation surfacique. La forte rigidité de cette couche n'empêche pas le bois de se courber.
- **Groupe 6 et groupe 7** : le groupe 7 a été élaboré avec la formulation de Bologne, de la toile et de l'imprimitura. Le groupe 7 présente une plus faible courbure et une déformation surfacique légèrement plus forte que le groupe 6. Nous avons vu que la combinaison d'éléments dans la couche préparatoire lui procurait une très grande rigidité (10 GPa). Normalement, avec ce que nous venons de voir la couche d'imprimitura devrait lui apporter une barrière hydrique et donc une plus grande courbure. Or ce phénomène rentre en compétition également avec la toile en lin, qui permettrait de réduire la courbure mais augmenter la déformation dans la couche picturale.

2.2.3 Conclusion sur le rôle de la couche préparatoire dans le comportement global d'un panneau peint

Pour conclure sur le rôle des différents éléments de la couche préparatoire appliquée au panneau peint, on a vu que :

- La toile peut jouer un rôle de diminution de la courbure mais amène un phénomène dangereux qui est une plus grande déformation dans la couche picturale.
- Le nombre de couches de gesso sottile provoque une barrière hydrique plus importante créant ainsi une courbure plus importante du panneau.
- L'imprimitura au blanc de plomb crée une barrière hydrique très importante, provoquant une plus grande courbure du panneau et une diminution des déformations dans la couche préparatoire.
- La formulation du gesso de Bologne présente un très bon compromis car il augmente la tenue mécanique du panneau (le panneau est plus rigide) et diminue la déformation en surface de la couche préparatoire. Cependant, cette formulation provoque une grande courbure du panneau, qui pourrait nuire à la lecture de l'œuvre.

L'association de tous ces éléments avec une formulation du gesso de Bologne présente le meilleur compromis mécanique/hydrique/visibilité de l'œuvre car il permet de rendre le panneau plus rigide, de diminuer les déformations en surface de la couche picturale (ce qui permet d'éviter une possible ruine de celle-ci) et d'avoir une courbure acceptable.

Lors de l'expertise des pathologies d'une œuvre, on peut observer des comportements très différents d'un panneau à l'autre. Les résultats précédents nous indiquent qu'il faut faire attention à la composition de la couche picturale avant de se lancer dans l'analyse du comportement de l'objet qui n'est pas que lié à celui du bois. De plus, nous devons garder à l'esprit que le comportement de ces couches vont sans doute évoluer au cours du temps.

Panneau structurel

CETTE dernière partie présente le travail principal de ces trois ans d'études. Le panneau, comme structure, était le fil conducteur tout au long de cette thèse : caractériser le comportement hygromécanique d'un panneau peint, à l'aide d'un réplikat et de simulations numériques. Le travail expérimental sur réplikat de panneau s'est déroulé en plusieurs étapes, où chaque élément ou propriété a été caractérisé afin de pouvoir mener une simulation numérique de chaque étape en parallèle. Une simulation numérique bien paramétrée permet alors de reproduire une expérience, comme par exemple calculer les déformations dues à un choc climatique. Elle est donc un outil puissant qui permet de prendre des décisions stratégiques et/ou d'élaborer de nouvelles méthodes d'action.

3.1 Expérimentation hygromécanique sur réplikat de panneau peint

Cette section présente le travail expérimental effectué sur un réplikat de panneau peint, partant de la planche de bois brut isolée pour aller jusqu'à l'élément structurel revêtu et équipé de renforts. L'objectif de ce travail est de reproduire la courbure permanente souvent observée dans les panneaux peints du patrimoine, afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu. Nous supposons que cette courbure permanente peut s'expliquer par un mécanisme de « compression set », c'est-à-dire par la mise en place de blocages permanents liés à la mécanosorption du panneau (Mazzanti 2010), (Mazzanti 2012). Pour comprendre les phénomènes en jeu, nous nous proposons de caractériser, étape par étape, les paramètres essentiels à la description du comportement hygromécanique, à savoir la diffusion hydrique et les états mécaniques associés au chargement hydrique.

3.1.1 Matériel et méthode

3.1.1.1 Chargement hygrothermique

Le matériel utilisé ici est une planche de peuplier (*Populus alba* L.). La démarche proposée, présentée figure 3.1, consiste à caractériser cette planche de peuplier en déterminant les paramètres de diffusion et les propriétés mécaniques du bois constitutif. La planche est de dimensions : épaisseur x largeur x longueur = $20 \times 337 \times 400 \text{ mm}^3$, de débit "faux-quartier" (figure 3.2). La densité du matériau a été calculée à partir de petits échantillons issus de la même planche (section 2.1.2.1). On considère par la suite que $\rho = 0.363$. La caractérisation hygromécanique du matériau est effectuée lors d'un séchage entre 60 et 40% HR à 25°C. On prendra soin, pour ces mesures, de se positionner sur la courbe de désorption de l'isotherme de sorption à chaque essai : il faut pour cela, dans un premier temps, équilibrer la planche à haute humidité relative (80% HR), puis l'équilibrer à l'humidité de départ pour l'expérience 60% HR avant de commencer à mesurer le séchage à 40% HR. Cette suite d'opérations sera effectuée de nouveau, pour chaque étape ultérieure.

La deuxième phase consiste à déterminer la contribution de la couche picturale dans le comportement hygromécanique du panneau. Pour cela nous effectuons une étape intermédiaire qui consiste à isoler uniquement les faces latérales du panneau (faces RL et RT) à l'aide d'un revêtement de caoutchouc naturel (latex) (Annexe 3.2.1.3). Cette opération vise à reproduire les conditions de diffusion d'un plus large panneau où nous nous concentrons sur les phénomènes mécaniques et hydriques en son centre, c'est-à-dire loin des bords. Cela permet également de pouvoir découpler les effets de diffusion du panneau (notamment bloquer la diffusion dans le sens L).

Le comportement du panneau isolé sur les faces latérales sera donc d'abord caractérisé, puis la couche picturale peut alors être déposée sur la face avant pour bloquer la diffusion de la face LT. Le panneau est caractérisé dans ce nouvel état. Par comparaison des différentes étapes, nous pourrions isoler l'effet de la couche picturale sur la face principale seule.

La troisième étape consiste à placer un système empêchant la planche de se courber, tout en permettant le retrait et gonflement, l'objectif étant de reproduire l'effet d'une traverse coulissante sur un panneau peint réel.

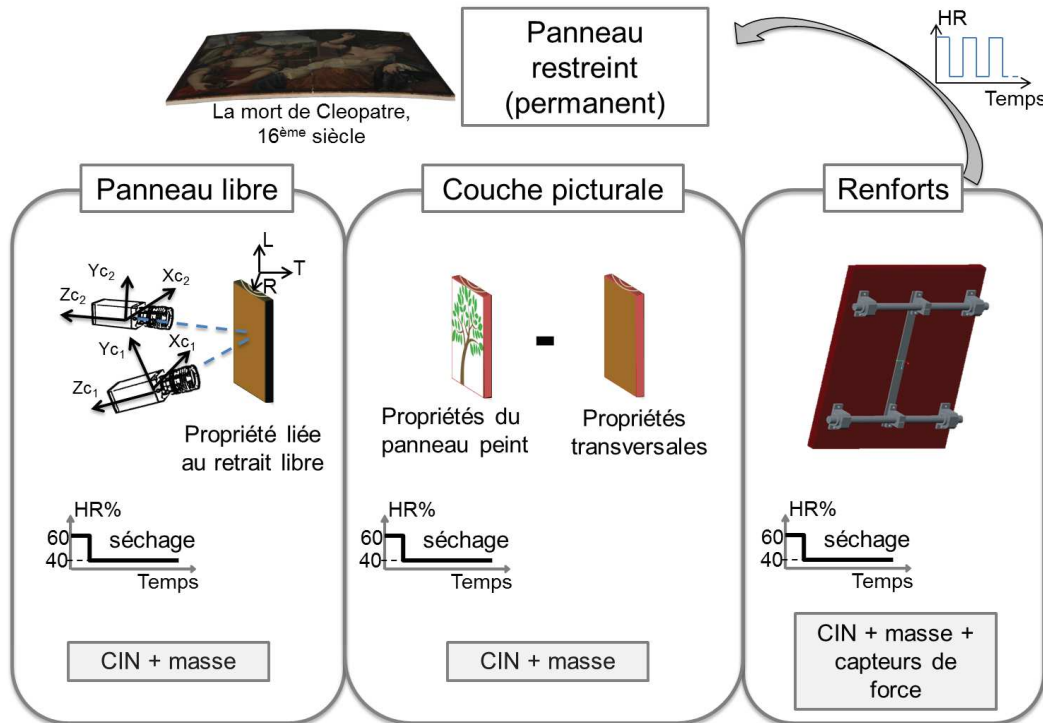


FIGURE 3.1 – Organisation des quatre expériences de caractérisation hygro-mécanique d'un panneau peint.

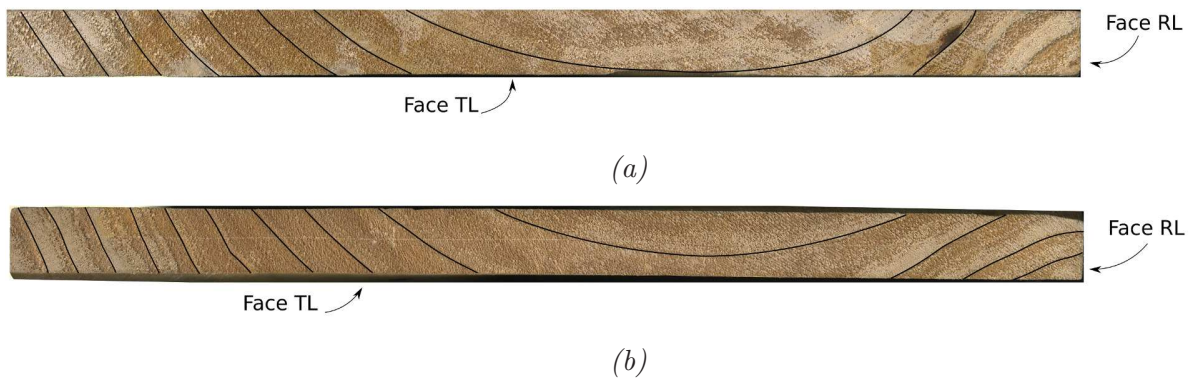


FIGURE 3.2 – Photo de la section transversale de la planche (face RT). Les limites de cernes sont dessinées en noir. (a) : Section supérieure de la planche. (b) : Section inférieure de la planche.

La mise en place de ces expériences permet de caractériser le comportement du panneau lors d'une variation d'humidité à chaque étape. Un des objectifs de ce protocole était d'appliquer un chargement cyclique d'humidité sur le panneau peint avec renforts, visant à produire une

courbure permanente. Nous n'avons pas pu mettre en place cette dernière étape dans le temps de la thèse. Si l'hypothèse du *compression set* est avérée, il faudra plusieurs mois (voire plusieurs années) de cycles hydriques pour voir apparaître une courbure permanente. Par la suite, le répliquat sera conservé dans le laboratoire LMGC, soumis aux variations hygrométriques de l'environnement, qui seront elles-mêmes enregistrées par un capteur humidité / température, comme pourrait l'être un tableau dans un musée. Des mesures de déformations pourront être effectuées ponctuellement afin de pouvoir suivre leur évolution.

3.1.1.2 Outil de corrélation d'images

Afin de déterminer les champs de déformation de la planche lors des expériences, nous avons mis en place un suivi de marqueurs par stéréo-vision. Les caméras AVT Pike F-421B utilisées sont dotées de capteurs Kodak HAD CCD monochrome avec un objectif de 50 mm (4 millions de pixels en résolution). Ce panneau est placé dans une enceinte climatique Memmert HPP260 (figure 3.3) qui régule la température ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) et l'humidité relative ($\pm 0.5\%$). Cette enceinte possède une contre-porte en verre qui permet de faire l'acquisition des images de l'extérieur de la chambre.

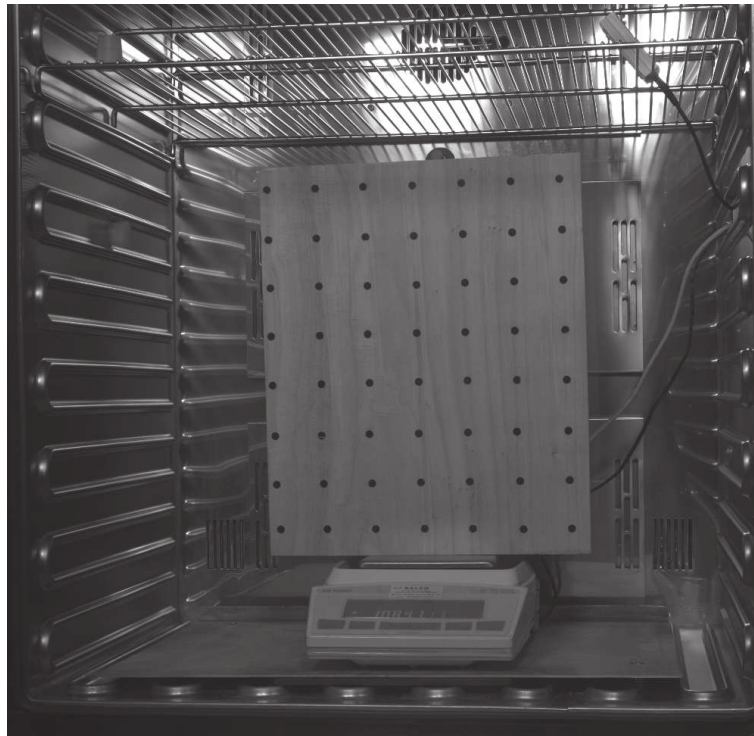


FIGURE 3.3 – Photo du panneau dans l'enceinte climatique sur la balance interfacée.

La présence de la vitre entraîne une distorsion du champ lumineux, apportant à la fois une erreur non négligeable et du bruit de mesure. L'expérience présentée dans la figure 3.4 est la mesure des déplacements dus à la fermeture. On a comparé les images d'une plaque métallique recouverte d'un mouchetis prises la vitre fermée avec celles prises la vitre ouverte. Les images de référence pour le calcul des déplacements sont celles prises vitre fermée. L'ouverture de la

vitre introduit beaucoup d'artefacts, jusqu'à 1 mm en profondeur dans la direction hors-plan z.

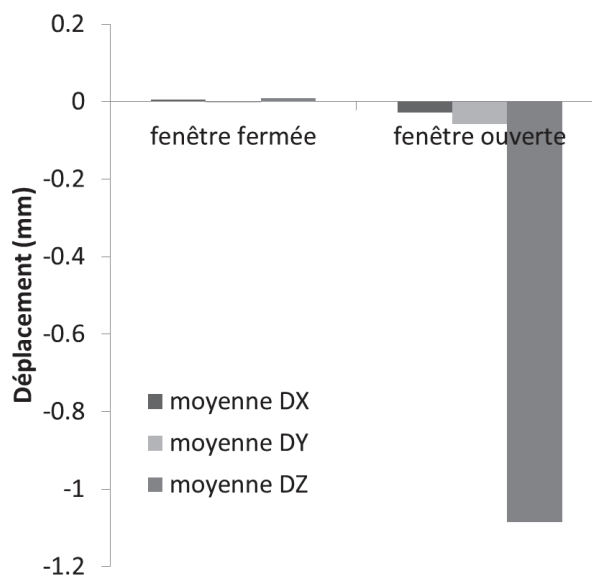


FIGURE 3.4 – Schéma présentant le bruit de mesures entre l'état vitre fermée et vitre ouverte.

Afin de contourner ce problème, nous faisons l'étalonnage des caméras avec la mire de calibration à l'intérieur de la chambre climatique, vitre fermée. Le principe de l'étalonnage est de corriger ces artefacts de mesures.

Le logiciel d'analyse d'images utilisé a été développé par l'équipe PEM de l'*Institut P'* à Poitiers, avec notamment Jean-Christophe Dupré et Pascal Doumalin, et se nomme DEFTAC3D. Ce logiciel est utilisé en configuration "suivi de marqueurs" afin de reproduire des mesures qui pourraient être faites en milieu muséal sur un panneau peint.

3.1.1.3 Mise en œuvre du panneau

Dans un panneau peint, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.2, il existe entre le support bois et la couche picturale des couches de différents matériaux. Nous appelons cet ensemble de couches "couche préparatoire" (à la peinture). Elle permet surtout de préparer la surface du bois à recevoir la peinture. Son rôle mécanique et de diffusion ont été étudiés dans le chapitre 2.2. La mise en place des couches préparatoires (figure 3.5) s'est faite en collaboration avec Christina Young de *The Courtauld Institute of Art* à Londres, en respectant la même recette que Lucas Uzielli, Paola Mazzanti et Linda Cocchi du *Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF)* à *Università degli Studi di Firenze*. En effet, ces derniers s'intéressent à la problématique de l'étude hygromécanique des panneaux peints, en étroit lien notamment avec l'OPD de Florence. Nous avons pris le parti de travailler en collaboration avec des collègues européens afin de pouvoir croiser les résultats et avancer nos travaux respectifs dans un même sens.

La composition de ces couches sont décrites dans la section 1.2.3 et identique à la formulation utilisée dans le table 2.4 (groupe 7) de la partie 2.2.2.1.

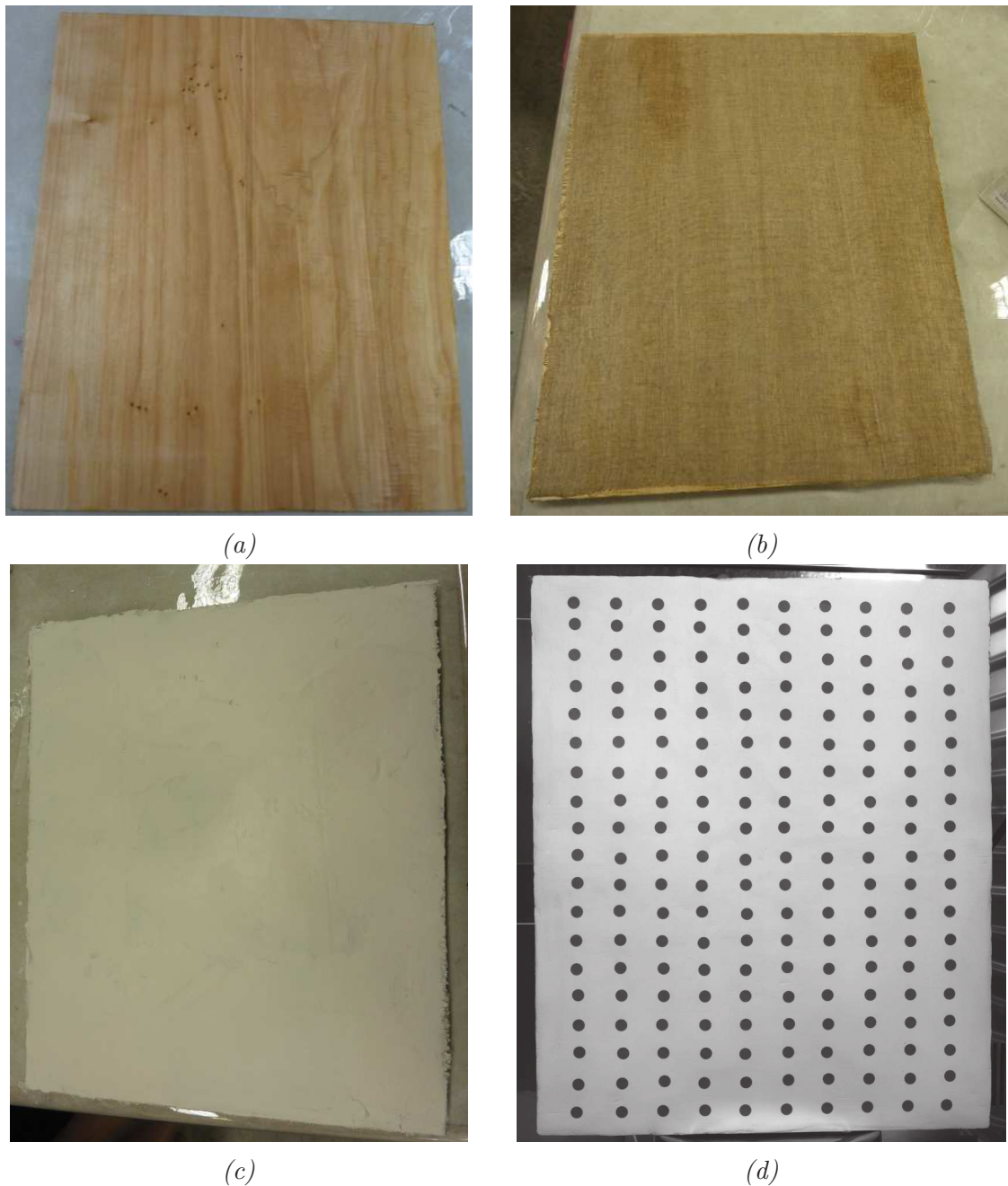


FIGURE 3.5 – *Etapes de mise en oeuvre du répliquat de panneau peint (a) : Encollage. (b) : Pose de la toile encollée. (c) : Application des couches de gesso grosso. (d) : Après séchage complet, et pose des marqueurs*

Pour le renfort, nous recherchions un système permettant de bloquer la mise en courbure du panneau tout en laissant le retrait ou gonflement s'effectuer. Une seconde contrainte est de pouvoir poser le système panneau et renfort sur une balance interfaçable, et que ce système soit de faible poids, pour pouvoir mesurer de façon fiable les variations de masse de l'ensemble.

Nous avons choisi un système constitué d'un matériau non hygroscopique et de forte rigidité comparée au bois. Notre choix s'est porté sur un système de guidage linéaire avec douille à billes (figure 3.6).

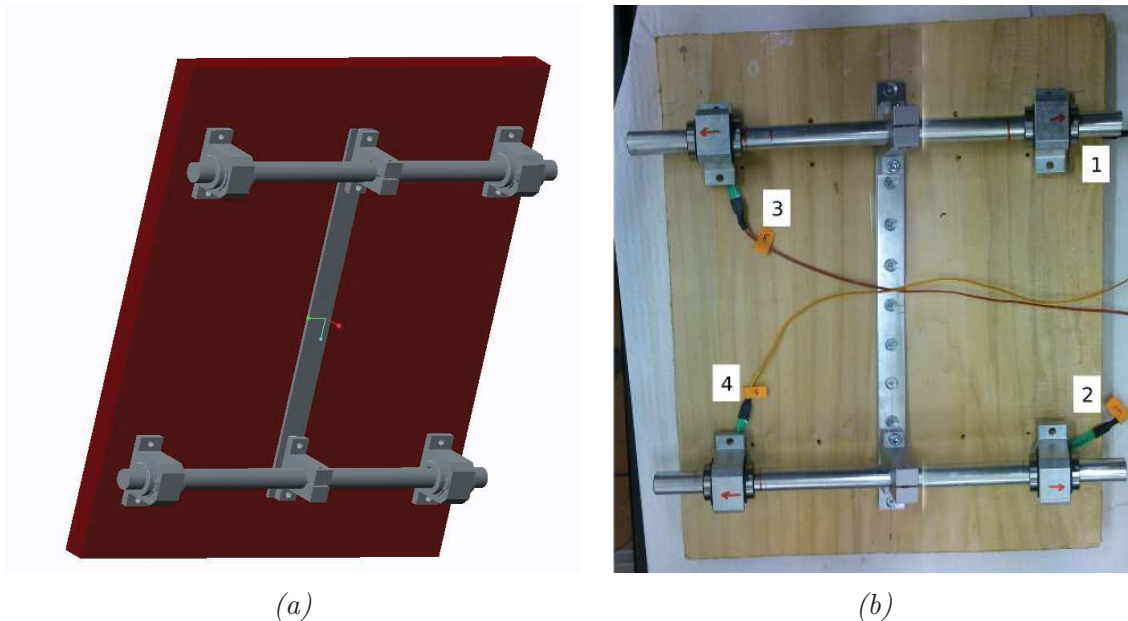


FIGURE 3.6 – Schéma 3D du montage du renfort sur la planche de peuplier. (a) : Le dessin réalisé en CAO. (b) : Le montage réel avec capteurs de force (numérotation de 1 à 4 pour désigner les capteurs).

Afin de caractériser la force appliquée lors de la mise en courbure de la planche, nous avons placé des capteurs de force sous chaque point d'appui. La courbure étant convexe (vue de la face avant), le guidage linéaire, fixé au centre, permet d'appuyer sur les bords de la planche, et exerce une sollicitation de type flexion trois points. Les capteurs de force sont numérotés de 1 à 4 et leur signal est enregistré en Volt.

3.1.2 Résultats étape par étape

La présentation des résultats va se faire dans l'ordre chronologique, qui est également l'ordre d'ajout des conditions aux limites :

- Désorption libre
- Désorption avec les côtés de la planche isolés (diffusion principale L bloquée)
- Désorption avec la couche préparatoire
- Désorption avec les renforts

L'évolution de la masse moyenne de la planche de peuplier pour tous les essais est présentée dans la figure 3.7. Si nous considérons que la couche préparatoire ne réagit pas avec l'eau de part son imprimatura qui est censé jouer le rôle d'imperméabilisant. En faisant ces hypothèses nous avons calculé la masse de chaque élément constituant le panneau final (table 3.1).

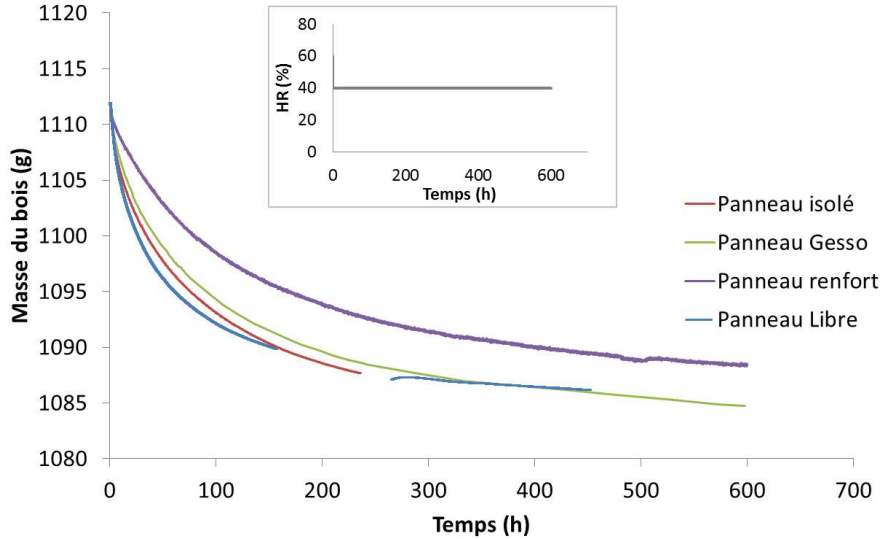


FIGURE 3.7 – Évolution de la masse totale d’une planche de peuplier en fausse dosse lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C, pour toutes les étapes expérimentales.

	Masse (g)
M_0	987.184
$M_{i\ libre}^{tot}$	1111.757
$M_{i\ isolé}^{tot}$	1121.305
$M_{i\ gesso}^{tot}$	1594
$M_{i\ renfort}^{tot}$	2554.8
M_{latex}	9.548
M_{gesso}	472.695
$M_{renfort}$	960.8

TABLE 3.1 – Récapitulatif des masses du panneau pour chaque étape expérimentale et des masses des éléments composants le panneau, en considérant que la masse initiale M_i de bois est la même en chaque début d’expérience.

Avec M_0 , la masse anhydre, $M_{i\ libre}^{tot}$ la masse totale du panneau à l’état initial lors de l’expérience de « panneau libre », $M_{i\ isolé}^{tot}$ la masse totale du panneau à l’état initial lors de l’expérience « panneau isolé », $M_{i\ gesso}^{tot}$ la masse totale du panneau à l’état initial lors de l’expérience « panneau gesso », $M_{i\ renfort}^{tot}$ la masse totale du panneau à l’état initial lors de l’expérience « panneau renfort », M_{latex} la masse de latex calculée comme la différence entre $M_{i\ libre}^{tot}$ et $M_{i\ isolé}^{tot}$, M_{gesso} la masse de la couche préparatoire calculée comme la différence entre $M_{i\ isolé}^{tot}$ et $M_{i\ gesso}^{tot}$, $M_{renfort}$ la masse du renfort calculée comme la différence entre $M_{i\ gesso}^{tot}$ et $M_{i\ renfort}^{tot}$.

La masse anhydre M_0 de la planche a été évaluée à partir de son volume parallélépipédique ($20 \times 337 \times 400\ mm^3$) et la densité anhydre du matériau ($\rho_0 = 0.363$).

3.1.2.1 Détermination des paramètres de transferts hydriques

Désorption libre

Le premier essai est un séchage à 20°C entre 60 et 40% HR. Une attention particulière a été portée à l'hystérésis. Afin d'être réellement en désorption, un équilibre à 80% HR est imposé avant l'équilibre à 60% HR pendant 6 semaines. Puis la planche est séchée jusqu'à 40% HR avec enregistrement des données de masse, de climat et de stéréo-vision (mécanique).

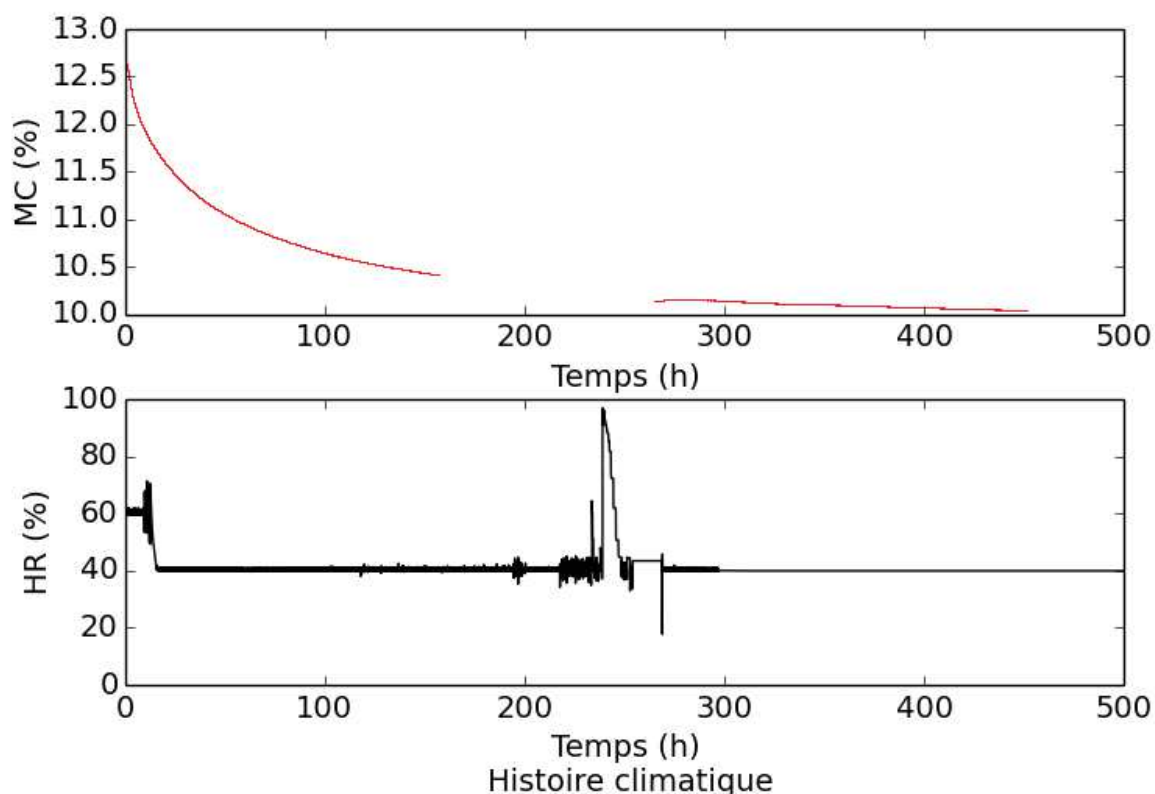


FIGURE 3.8 – Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier en faux quartier lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C.

Comme présenté sur la figure 3.8, qui présente l'évolution de la teneur en eau de la planche et de l'humidité du climat en fonction du temps, un accident climatique est intervenu lors de l'essai. Lors de la phase de l'accident, aucune donnée n'a pu être enregistrée à cause de la haute humidité relative présente dans l'enceinte. On peut remarquer que lors du retour à la normale, le panneau reprend son séchage sans perturbation notable.

En 150h le taux d'humidité moyen de la planche passe de 12.6% à 10.4% soit une baisse de $\Delta mc = 2.20\%$.

Désorption de la planche isolée sur les faces latérales

Afin de déterminer la contribution hydrique de la couche préparatoire, nous avons besoin de déterminer les paramètres hydriques dans l'épaisseur de la planche de bois. La diffusion étant beaucoup plus rapide dans la direction longitudinale que dans la direction transverse, il est nécessaire de bloquer cette diffusion afin d'avoir accès à celle dans l'épaisseur du panneau (figure 3.9).

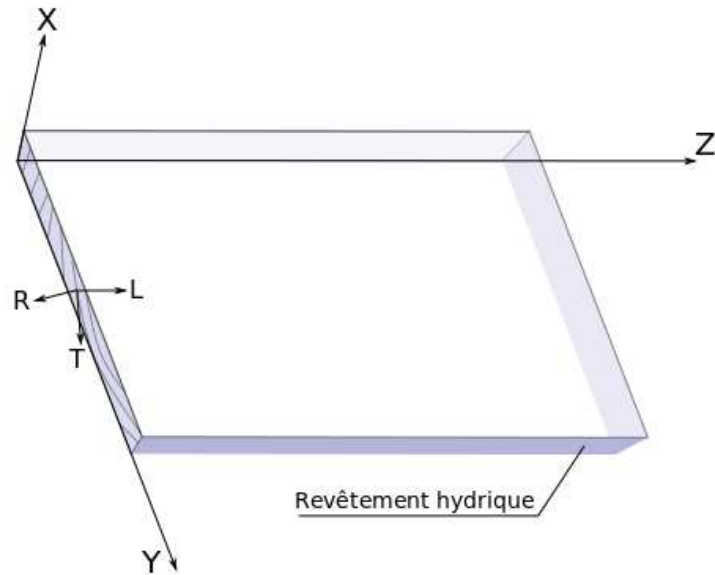


FIGURE 3.9 – Orientation de la planche dans l'espace.

Le revêtement appliqué est du latex, en caoutchouc naturel (voir Annexe 3.2.1.3). Ce revêtement a été choisi car en plus de sa capacité à isoler hydriquement, il est très déformable. Il peut donc suivre les mouvements du bois sans se rompre.

La figure 3.10 présente la cinétique de désorption de la planche dans le sens transversal. Cette diffusion est donc ramenée à un cas 1D de transfert.

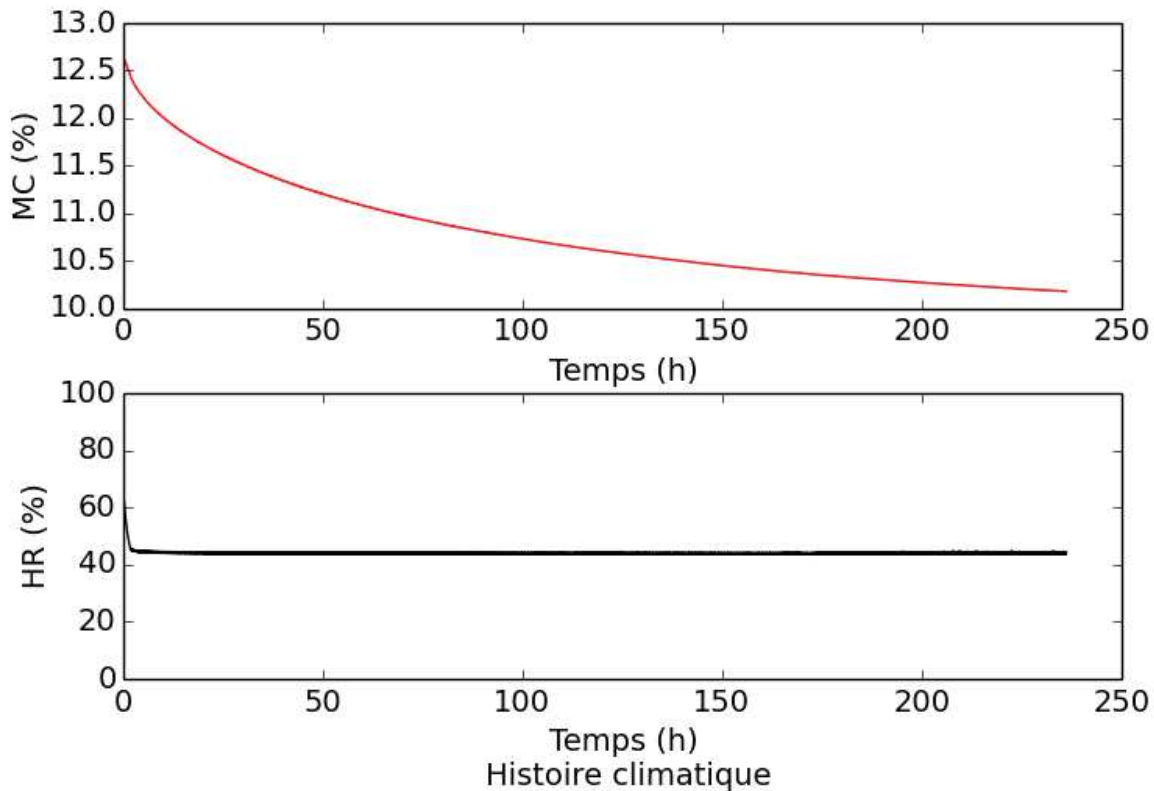


FIGURE 3.10 – Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier isolée hydriquement sur les bords en fausse dosse lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C.

La planche effectue une diminution moyenne d'humidité de $\Delta mc = 2.17\%$ à $t = 150h$.

Afin de déterminer le coefficient de diffusion dans la direction transverse, nous utiliserons le modèle de Siau (Siau 1984) de calcul de diffusion unidirectionnelle.

$$D = \frac{\bar{E}^2 L^2}{5.10t} \quad (3.1)$$

$$\bar{E} = \frac{M - M_i}{M_0 - M_i} \quad (3.2)$$

Avec D le coefficient de diffusion, \bar{E} le potentiel, L la longueur de diffusion, t le temps, M la masse à l'instant t , M_i la masse à l'état initial (stabilisé), M_0 la masse à l'état final (stabilisé).

Si l'on compare la situation de diffusion 1D et celle en 3D, il paraît *a priori* étonnant que la diffusion transverse aux fibres du bois soit aussi « rapide ». Nous pouvons procéder analytiquement pour vérifier si nos résultats sont cohérents. Prenons des coefficients de diffusion donnés dans la littérature (Siau 1984) pour un bois de densité 0.5 à 20°C. Dans le sens longitudinal

nous avons $D_L = 2 \cdot 10^{-4} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et dans le sens tangentiel : $D_T = 5 \cdot 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Dans notre cas, la dimension à parcourir dans le sens des fibres est de 40cm et celle dans le sens tangentiel aux fibres est de 2cm .

Selon le modèle de Siau, le potentiel \bar{E} est linéaire avec la \sqrt{t} (figure 3.11).

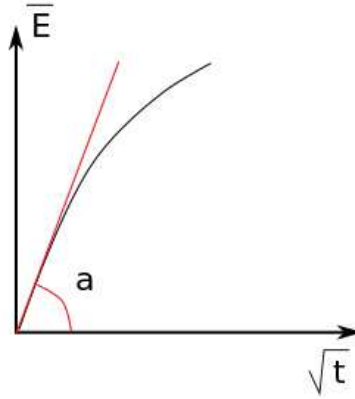


FIGURE 3.11 – Schématisation de la cinétique de diffusion selon (Siau 1984).

On peut donc écrire que :

$$\bar{E} \sim a\sqrt{t} \quad (3.3)$$

$$\text{Or } \sqrt{t} = \sqrt{\tau} \frac{L}{2} \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (3.4)$$

$$\text{Donc } \bar{E} \sim a \cdot \sqrt{\tau} \frac{L}{2} \frac{1}{\sqrt{D}} \sim 1.13\sqrt{\tau} \text{ pour } \tau < 0.3 \quad (3.5)$$

$$\text{D'où } a \sim 1.13 \frac{\sqrt{D}}{L/2} \quad (3.6)$$

Où τ est le temps caractéristique de l'essai.

Si nous voulons comparer, dans notre cas, l'essai de désorption du cas de la planche libre avec le cas des bords isolés de la planche, nous considérerons que le cas de désorption libre est gouverné par la diffusion longitudinale et le cas de désorption 1D est gouverné par la diffusion tangentielle.

$$\frac{a_L}{a_T} = \frac{\sqrt{\frac{D_L}{D_T}}}{\frac{L_L}{L_T}} \quad (3.7)$$

$$\frac{a_L}{a_T} \simeq 0.3 \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

Dans le cas de notre planche, la longueur longitudinale parcourue par l'eau est grande comparée à la longueur tangentielle. Donc même si la diffusion longitudinale est quarante fois plus rapide que la diffusion tangentielle, le parcours de l'eau dans ce sens est non négligeable. C'est pour cela que nous n'observons que peu de différence entre la cinétique du cas de désorption libre et le cas de désorption où la planche est isolée sur les bords.

Afin d'avoir une analyse plus fine de la cinétique de diffusion des différents essais, nous pouvons estimer la masse finale de la planche à l'état stabilisé à 40% HR, 25°C (figure 3.12).

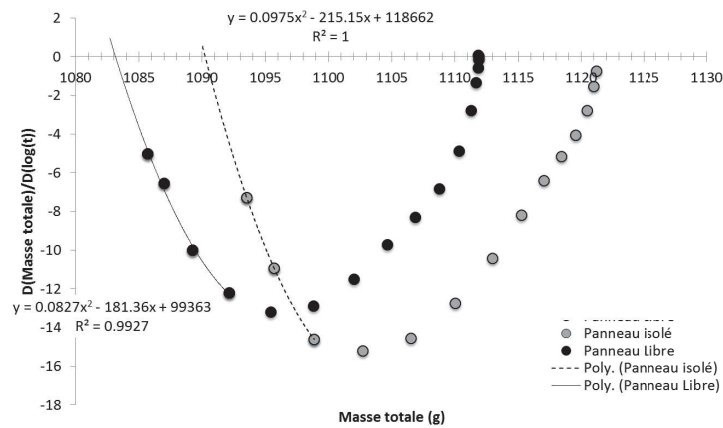


FIGURE 3.12 – *Éxtrapolation de la masse totale de la planche lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C, pour l'étape de diffusion libre et celle où la planche est isolée sur les bords.*

On considère le processus de diffusion en tant que parabole si l'on trace la dérivée de la masse par rapport au logarithme du temps en fonction de la masse totale de la planche. Nous commençons à 1111.7g dans l'essai libre et 1121.3g dans l'essai isolé. En faisant l'hypothèse que la planche est au même état d'équilibre au début des 2 expérimentations (panneau libre et panneau isolé), l'écart calculé de 9.6g correspond à la masse de latex ajoutée pour isoler la planche. Au final, avec l'extrapolation, nous avons $M_f^{tot\ libre} \simeq 1083g$ et $M_f^{tot\ isolé} \simeq 1090g$. Donc la différence entre les deux est de $-7g$. Nous pouvons conclure que le revêtement appliqué sur la planche a également séché lors de l'essai. Nous avons fait l'hypothèse de la non hygroscopicité du latex lors du traitement de la figure 3.10. Afin de mieux prendre en compte le phénomène de sorption du latex, il faudrait faire des expérimentations supplémentaires.

Désorption de la planche avec la couche préparatoire

Une fois la couche préparatoire appliquée et stabilisée, l'essai de désorption entre 60 et 40% HR, 20°C est effectué (figure 3.13).

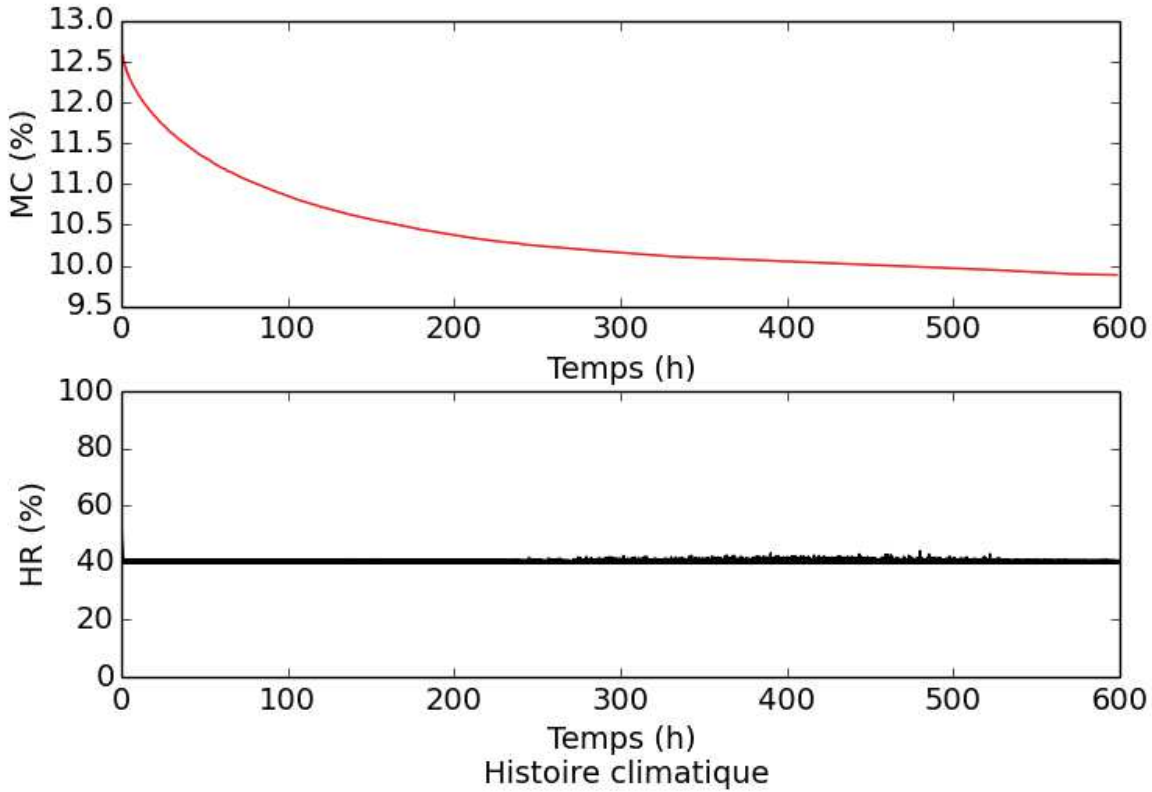


FIGURE 3.13 – Évolution de l’humidité interne d’une planche de peuplier isolée hydriquement sur les bords et recouverte d’une couche préparatoire sur une face, en fausse dosse lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

La planche effectue une diminution moyenne d’humidité de $\Delta mc = 2.06\%$ à $t = 150h$.

Si nous reprenons le raisonnement fait précédemment (équation 3.9), nous considérons alors que la couche préparatoire appliquée sur la planche est imperméable. La longueur parcourue par l’eau dans ce cas 1D est alors comme si elle était deux fois plus grande ($L_T = 4cm$). On a alors la comparaison entre le cas libre et le cas avec couche préparatoire :

$$\frac{a_L}{a_T} = \frac{\sqrt{\frac{D_L}{D_T}}}{\frac{L_L}{L_T}} \quad (3.10)$$

$$\frac{a_L}{a_T} = \sqrt{\frac{40}{10^2}} \simeq 0.6 \text{ pour le cas 1D imperméable} \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

Nous présentons également ici la courbe de la dérivée de la masse par rapport au logarithme du temps en fonction de la masse totale de la planche (figure 3.14).

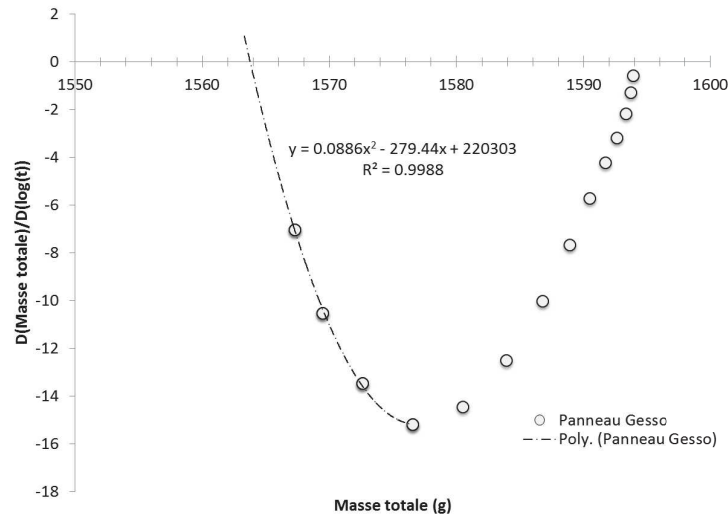


FIGURE 3.14 – Éxtrapolation de la masse totale de la planche lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C, pour l'étape de diffusion avec la couche préparatoire et les bords isolés.

On considère encore que ce processus peut être modélisé à l'aide d'une équation paramétrique du second degré. Dans ce cas, l'extrapolation de la masse totale de l'état final est de $M_f^{tot\ gesso} \simeq 1564g$. La masse initiale avec la couche préparatoire était de $M_i^{tot\ gesso} \simeq 1594g$, donc la masse de la couche préparatoire a été estimée à 472.7g au début de l'essai. En fin d'essai, la couche préparatoire estimée est de $M_f^{gesso} = M_f^{tot\ gesso} - M_f^{tot\ isolé} \simeq 474g$. La différence de +1.3g lors d'un séchage pourrait être attribuée à une erreur d'estimation de notre extrapolation ou du fait que le panneau ne subit pas exactement le même traitement dans les deux cas – les conditions de départ n'étant pas exactement les mêmes. Par la suite, nous ne considérerons pas que la couche préparatoire est hygroscopique dans notre cas.

Désorption du panneau avec couche préparatoire et renforts

Dans cette expérience, des renforts empêchant la courbure ont été ajoutés au dos du panneau. Lors de cet essai, après la période de 4 semaines de désorption, nous avons simulé un accident climatique. Cet accident vient reproduire un cas réel qui pourrait se produire dans un musée. Lors d'intempéries, la régulation climatique tombe parfois en panne et l'humidité peut s'emballer dans les pièces en exposition. Après un événement comme celui-ci, nous avons tendance à vouloir rétablir le climat d'origine le plus vite possible. Nous simulons donc après cet accident, une chute brutale du climat (figure 3.15). Par la suite, la première phase de stabilisation à 40% HR sera appelée *partie 1*, puis la phase de l'accident, *partie 2* et enfin le retour brutal à la normale, *partie 3*.

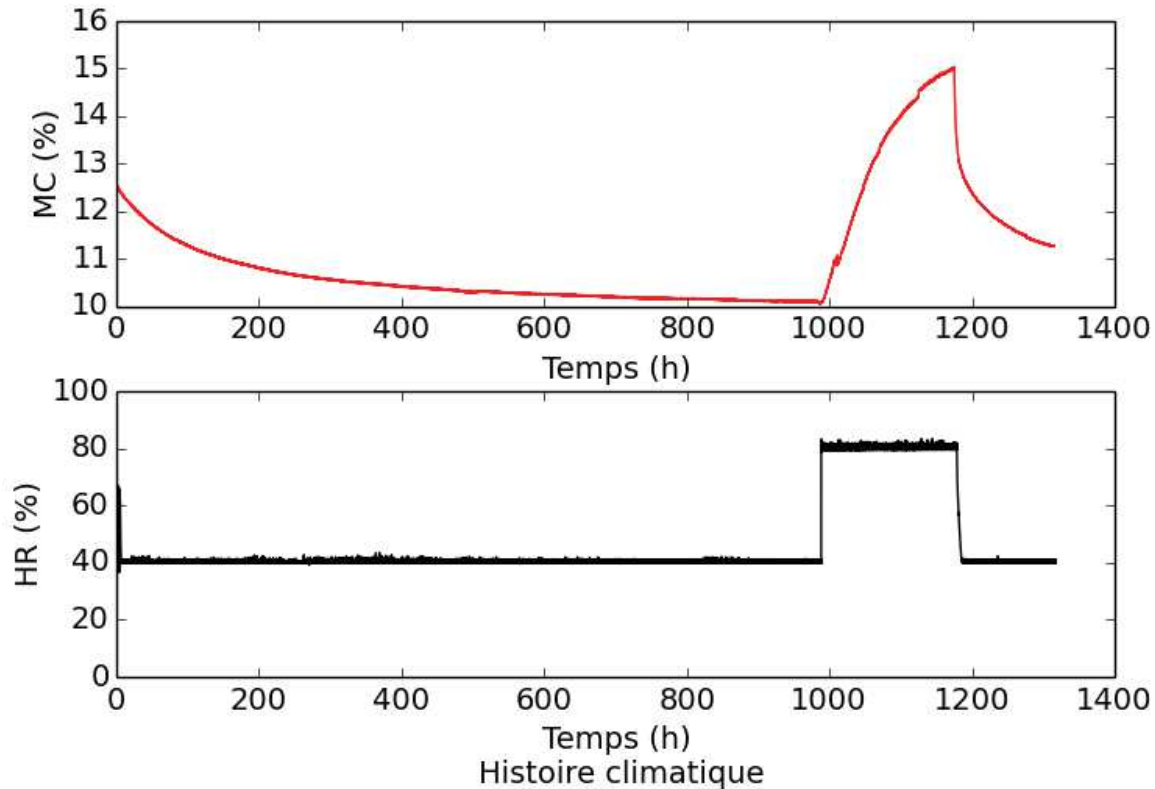


FIGURE 3.15 – Évolution de l’humidité interne d’une planche de peuplier isolée hydriquement sur les bords, recouverte d’une couche préparatoire et possédant des renforts au revers l’empêchant de se courber, en fausse dosse lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C, puis lors d’un accident climatique suivi d’un brusque retour à la normale.

La planche effectue une diminution moyenne d’humidité avant l’accident de $\Delta mc = 1.62\%$ à $t = 150h$. Donc la différence de perte d’humidité pour les mêmes conditions limites, d’un point de vue hydrique, atteint 0.44% entre l’essai avec la couche préparatoire et celle avec le renfort à l’arrière. Cela semble mettre en évidence l’implication de la mécanosorption qui n’est plus un phénomène négligeable devant l’hygro-élasticité.

La courbe de la dérivée de la masse par rapport au logarithme du temps en fonction de la masse totale de la planche est présentée dans la figure 3.16.

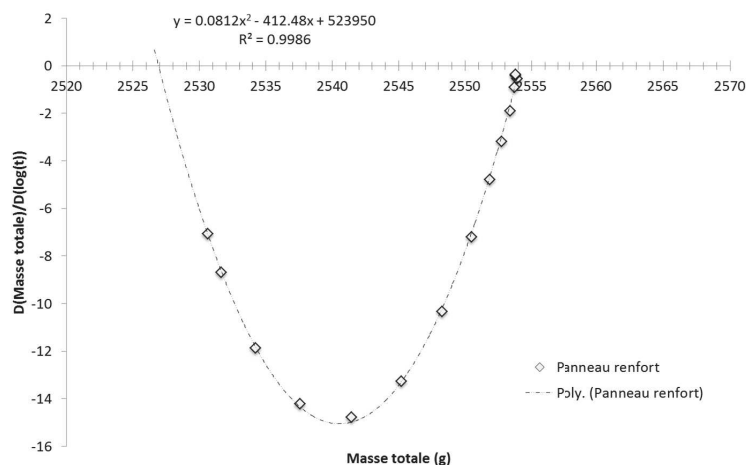


FIGURE 3.16 – *Éxtrapolation de la masse totale de la planche lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C, pour l'étape de diffusion avec le renfort, la couche préparatoire et les bords isolés.*

La masse initiale de l'ensemble au départ est de 2554g. La masse du renfort est évaluée à 960g. La masse finale de l'ensemble extrapolée est de 2527g.

Résumé des paramètres de diffusion

Selon le modèle de Siau (Siau 1984), la diffusion 1D serait une fonction linéaire de la racine du temps (\sqrt{temps}) lors des tous premiers instants du processus. Lorsqu'on trace l'évolution du potentiel \bar{E} en fonction de la racine du temps (\sqrt{temps}) (figure 3.17), nous pouvons apprécier la cinétique des différents essais.

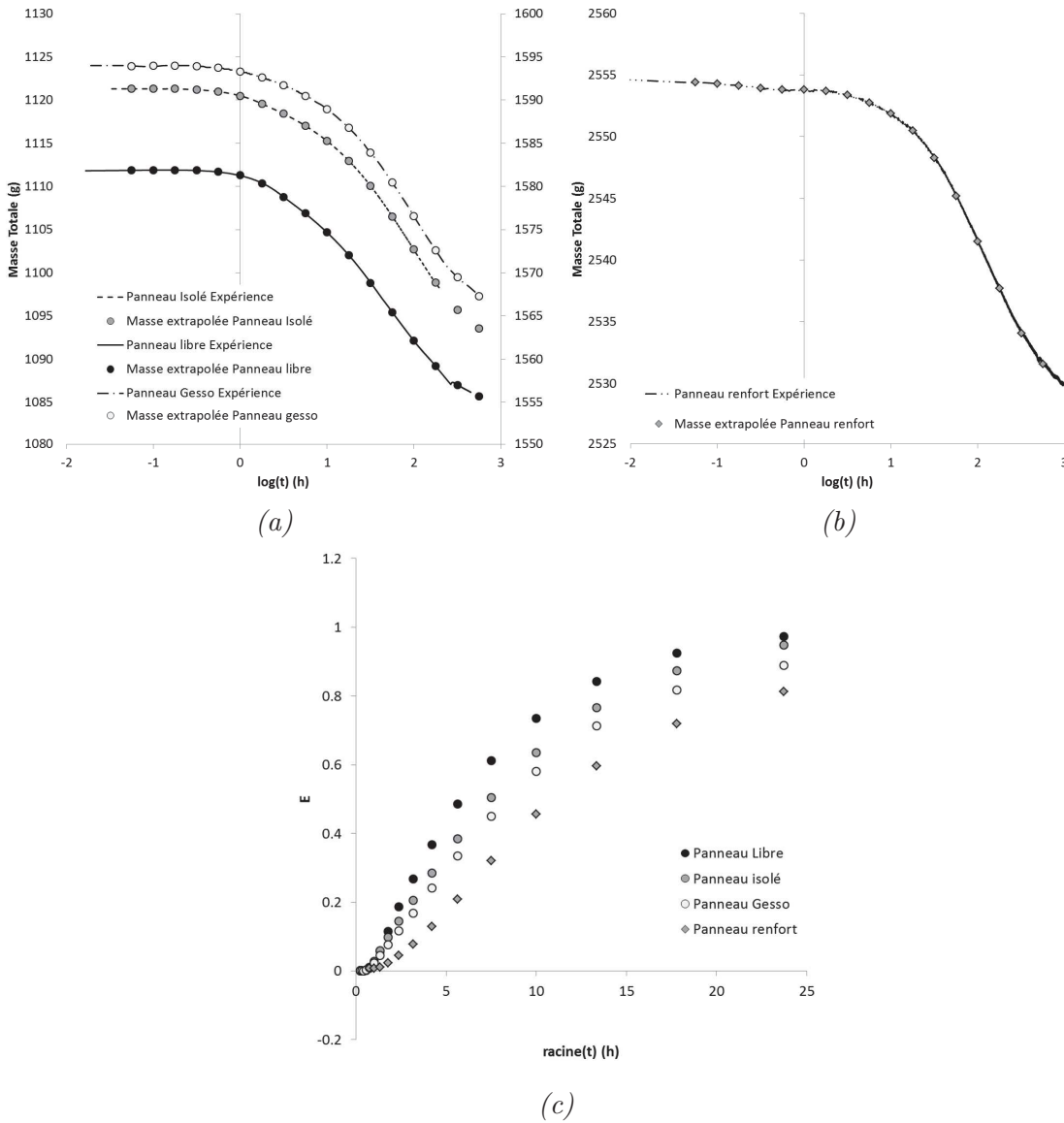


FIGURE 3.17 – Cinétiques de diffusion des différents essais.

À partir de la figure 3.17.(c), nous pouvons calculer expérimentalement la pente a défini précédemment telle que la pente entre le potentiel \bar{E} et \sqrt{t} lorsque $\bar{E} < 0.3$. Nous avons résumé dans la table 3.2 les résultats de cette analyse.

	pente a	L_{Siau} (cm)	D_{Siau} ($cm \cdot s^{-1}$)
Panneau libre	0.076		
Panneau isolé	0.062	2	$8 \cdot 10^{-7}$
Panneau gesso	0.051	4	$6 \cdot 10^{-7}$
Panneau renfort	0.025	4	$1.3 \cdot 10^{-7}$

TABLE 3.2 – Récapitulatif paramètres de diffusion pour tous les cas expérimentaux

Normalement la diffusion est un paramètre matériau. Or dans notre cas, ce paramètre varie. Si

l'on compare nos résultats à la littérature (Siau 1984), on obtient pour un bois de densité 0.36 et une température de 25°C, un coefficient de diffusion tangentielle de l'ordre de $10.7 \cdot 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$. Donc nos résultats estimant le coefficient de diffusion à $8 \cdot 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ sont plutôt cohérents. Si maintenant nous venons comparer un rapport entre la pente a de la diffusion 1D traversante (la diffusion se fait des deux cotés de la planche) et la pente de la diffusion unilatérale (la diffusion se fait que dans un seul sens, et donc nous pouvons assimiler cela à une diffusion à travers une épaisseur deux fois plus grande). Ce rapport est de 0.5, or dans notre cas le rapport entre la désorption du cas avec la couche préparatoire et celle du cas isolé est de 0.8 ($\gg 0.5$), et ce même rapport mais avec la situation avec le renfort est de 0.4 – valeur plus proche de ce à quoi on s'attend théoriquement.

Il est assez difficile d'analyser l'essai avec la couche préparatoire. Le panneau recouvert d'une couche préparatoire présente une cinétique de séchage plus lente que le panneau isolé, mais pas dans les proportions attendues. La surface d'échange avec le milieu extérieur étant 2 fois plus faible, nous nous attendions à un coefficient de diffusion 2 fois plus faible. Pourtant, sur la figure 3.17.(c), la pente "Panneau Gesso" n'est pas 2 fois plus faible que "Panneau isolé".

Quant au panneau avec renfort, la cinétique de séchage de ce dernier est nettement plus lente que celle du panneau avec la couche préparatoire. Nous ne nous expliquons pas une telle différence. La présence du renfort au dos du panneau modifie certes la surface d'échange et les conditions d'échange, mais cela ne nous semble pas justifier une telle différence. Un couplage entre la contrainte mécanique du matériau et les paramètres de diffusion peut également être envisagé.

Il faut noter que le raisonnement suivi et les évaluations des coefficients de diffusion sont effectuées malgré certaines inconnues, notamment sans connaître le comportement hygroscopique du latex et de la couche préparatoire (notamment le gesso).

3.1.2.2 Détermination des paramètres mécaniques

Nous présentons ici les états de déformation transitoires, entre 60% HR et 40% HR, 25°C. L'état de référence lors de ces essais est celui de la planche après stabilisation à 60% HR, 25°C.

Désorption libre

Le premier essai de désorption de la planche libre (figure 3.18, figure 3.22, figure 3.23) a été suivi en continu par suivi de marqueurs par stéréo-vision. Les résultats présentés sont donc les zones du calcul de la déformation entre quatre marqueurs (calcul en forme de « croix »).

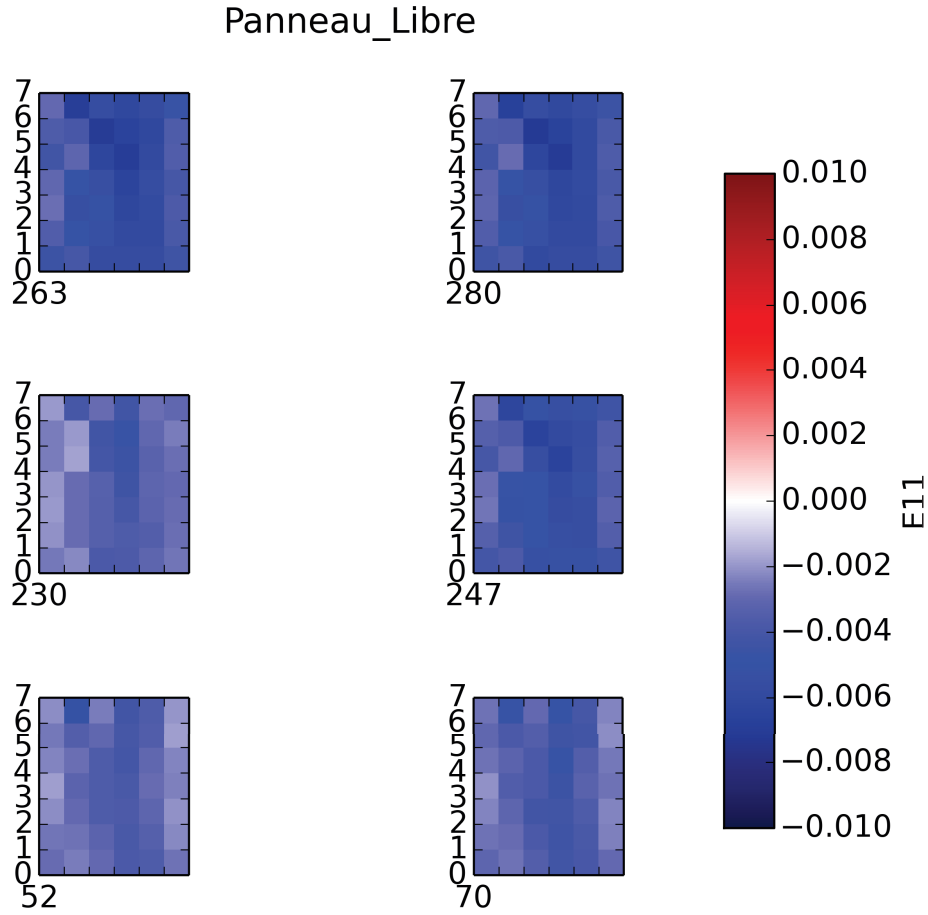


FIGURE 3.18 – Déformation horizontale d'une planche de peuplier sur dosse lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Les cartographies présentées sont données pour chaque zones de déformations calculées qui vont de 0 jusqu'à 7 en hauteur de la planche pour les temps 17, 35, 52, 70, 230, 247h.

Nous pouvons remarquer que les déformations présentent une variation suivant la direction horizontale. Pour une meilleure lecture des phénomènes transitoires, nous découpons fictivement la planche en colonnes, et moyennons pour chaque colonne la déformation horizontale E_{11} . La figure 3.19 présente ce découpage en colonne.

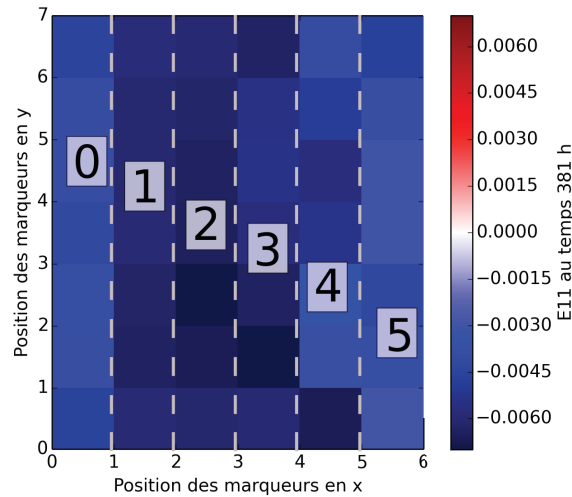


FIGURE 3.19 – Découpage en colonnes du champ de déformation afin de moyenner ces déformations et présenter leur profil dans la largeur du panneau.

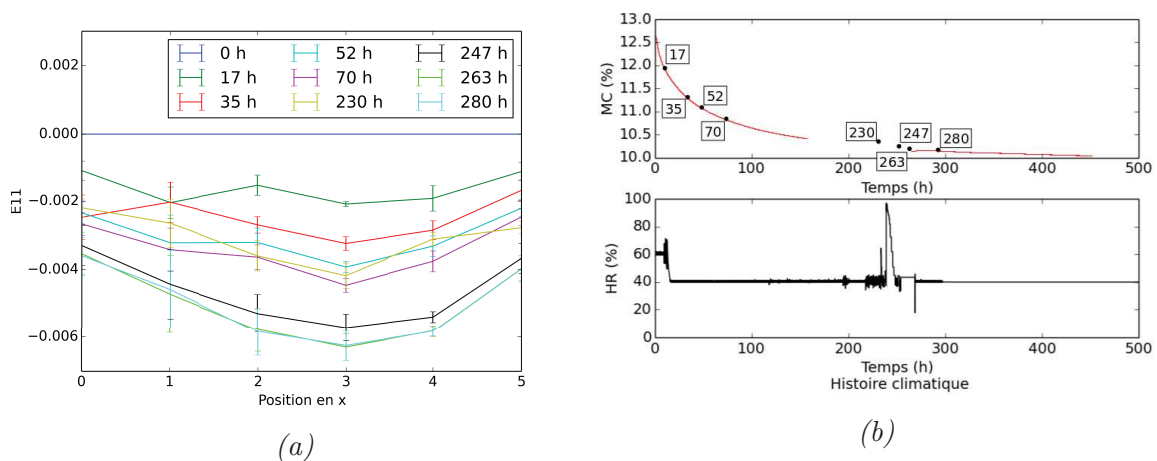


FIGURE 3.20 – (a) : Profil des déformations horizontales moyennes d'une planche de peuplier sur dosse lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C. (b) : Correspondance des temps choisis pour les profils sur la courbe de désorption.

La déformation horizontale (E_{11}) – négative ici car nous avons affaire à un retrait – est beaucoup plus importante que la déformation verticale E_{22} (figure 3.22). Cela est dû au fait que le coefficient de retrait longitudinal est plus faible que le retrait tangentiel. De plus, la déformation horizontale présente un profil symétrique, où la déformation est plus intense au milieu de la largeur. Ce phénomène est lié au débit sur faux-quartier et à l'anisotropie du bois (la déformation tangentielle est deux fois plus grande que la déformation radiale). Nous observons donc l'expression du retrait tangentiel au 2^{ème} marqueur (colonne 2) et du retrait radial sur les bords (colonnes 0 et 5).

Notons que des images ont pu être traitées juste après l'accident microclimatique. Lors de cet accident, le bois a gonflé, c'est pour cela que le profil de déformation E_{11} à 230h présente

moins de retrait que le profil à 70h, avant l'accident.

Nous pouvons également calculer analytiquement les déformations horizontales que nous pourrions obtenir dans notre planche lors d'un séchage de $mc = 2.8\%$ de teneur en eau. Sachant que nos coefficients de retrait tangentiel et radial sont de $0.24\ \%/ \%$ et $0.12\ \%/ \%$ respectivement, on a :

$$\epsilon = \alpha_R \Delta mc \cos^2 \theta + \alpha_T \Delta mc \cos^2 \theta \quad (3.13)$$

Avec θ l'angle moyen des cernes.

On peut alors afficher les déformations calculées et celles mesurées à 280h (figure 3.21).

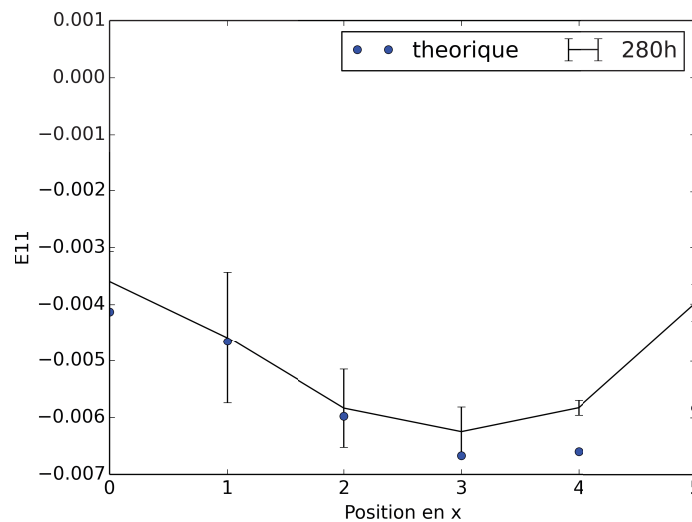


FIGURE 3.21 – Comparaison des déformations attendues avec celles mesurées après un séchage de 2.8% de teneur en eau dans la planche. Les déformations analytiques sont obtenues à partir des angles des cernes de la planche et des coefficients radiaux et tangentiels de cette planche.

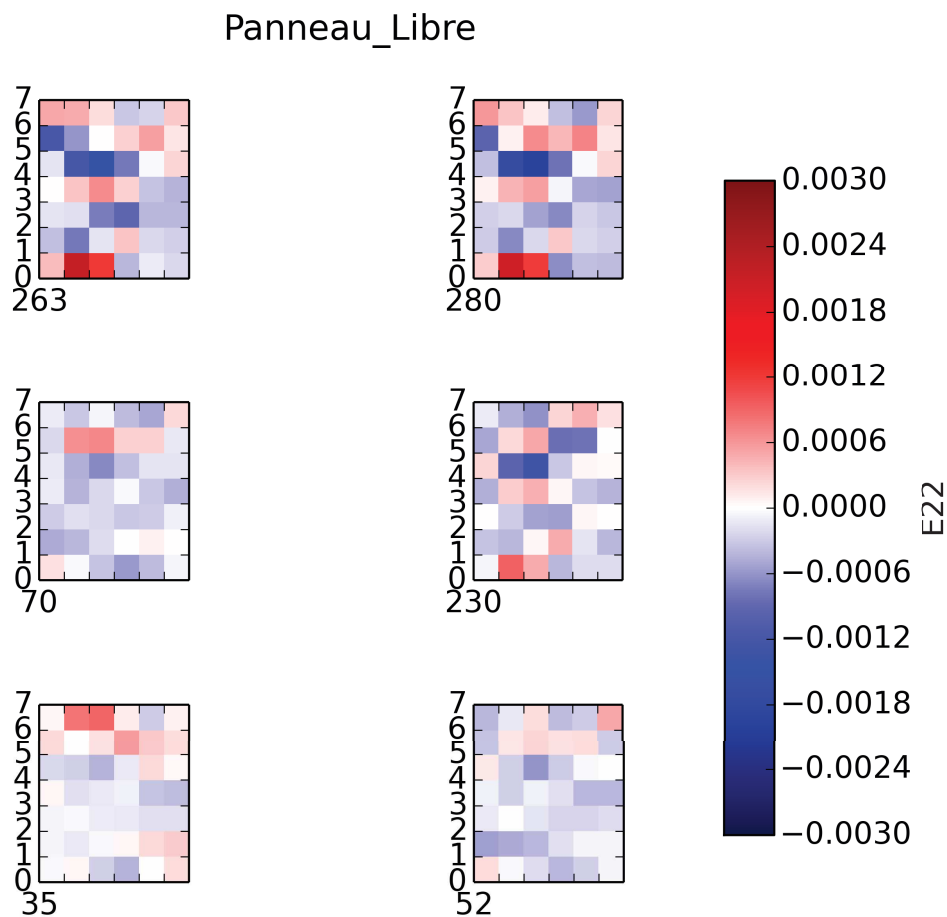


FIGURE 3.22 – Déformation verticale d'une planche de peuplier sur dosse lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

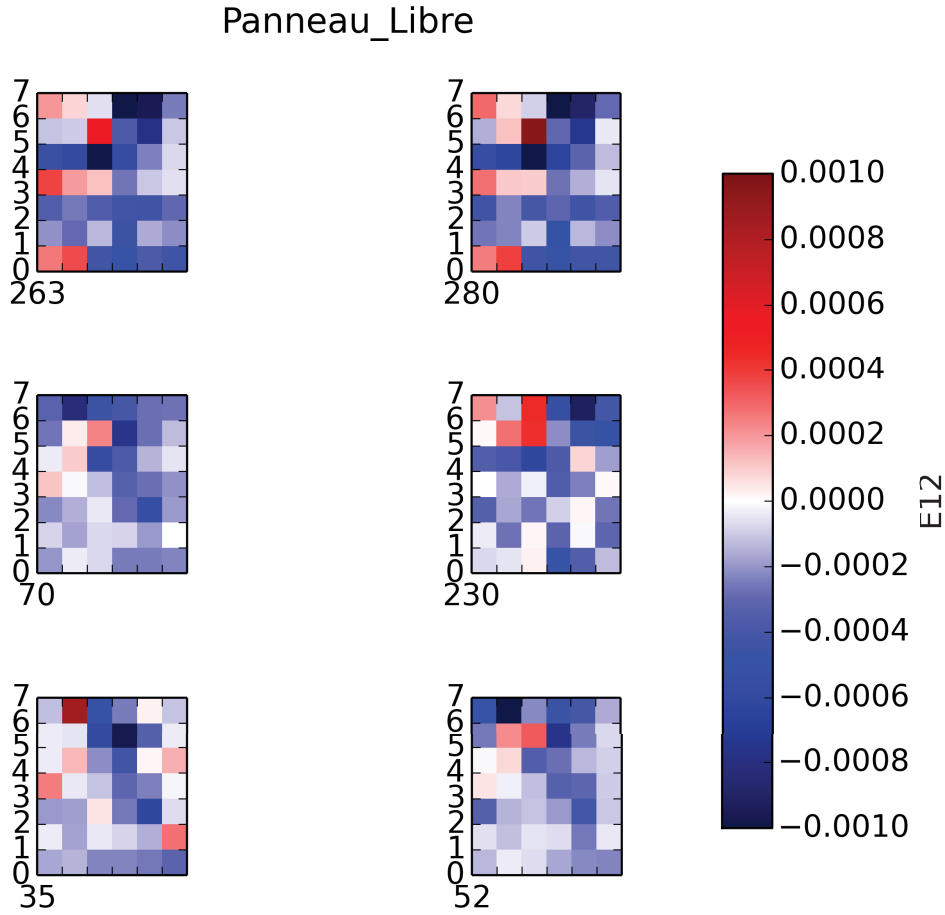


FIGURE 3.23 – Cisaillement d’une planche de peuplier en faux-quartier lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Pour cet essai de retrait libre d’une planche, la déformation verticale (E_{22}) et le cisaillement (E_{12}) sont très faibles et présentent beaucoup de bruit de mesures. Nous les considérerons négligeables.

Désorption de la planche isolée sur les faces latérales

Pour cet essai, on rappelle que le panneau a été isolé avec du latex sur les bords latéraux (créant une barrière imperméable). La diffusion de l’humidité se fait donc uniquement dans la direction de l’épaisseur de la planche.

Là encore, les déformations sont plus importantes dans la direction horizontale E_{11} (figure 3.24) que dans la direction verticale E_{22} (figure 3.26). On considèrera également que le cisaillement E_{12} est négligeable dans ce cas (figure 3.27).

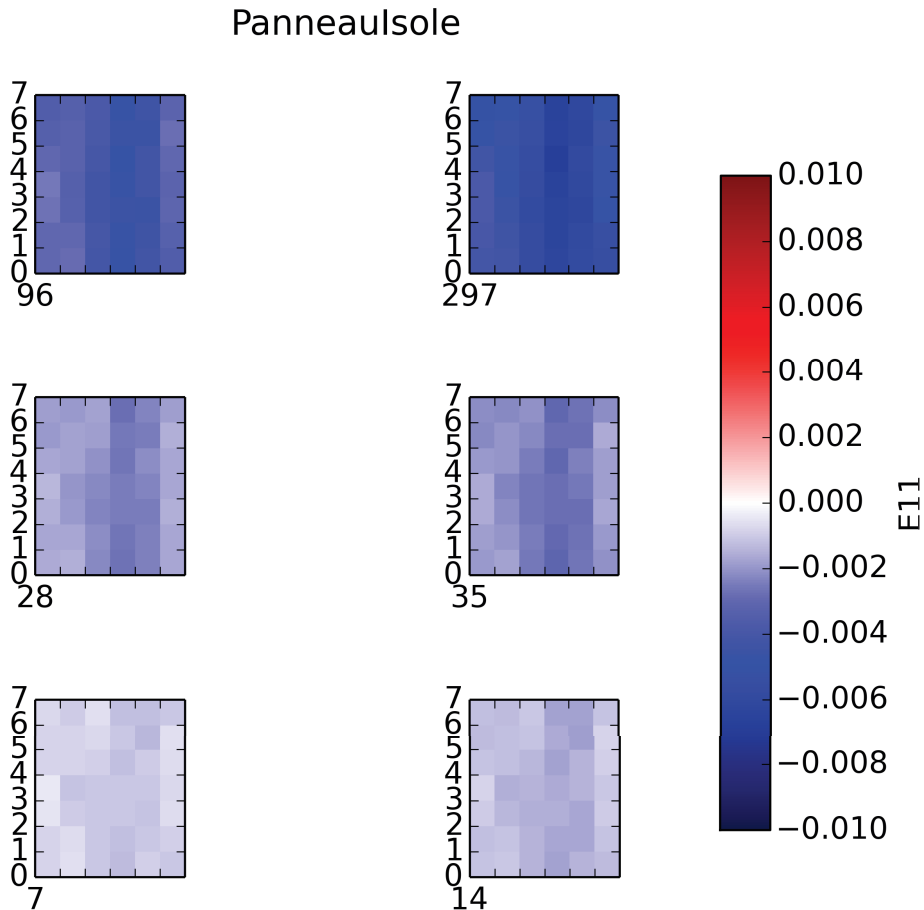


FIGURE 3.24 – Déformation horizontale d’une planche de peuplier isolée sur les faces latérales lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

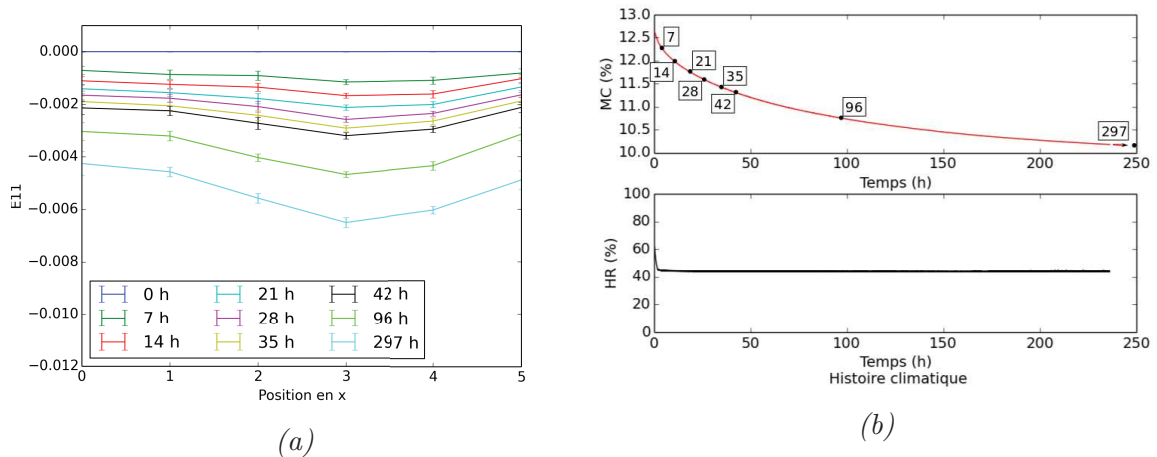


FIGURE 3.25 – (a) : Profil des déformations horizontales d’une planche de peuplier isolée sur les faces latérales lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C. (b) : Correspondance des temps choisis pour les profils sur la courbe de désorption.

Les profils de déformation du cas isolé (figure 3.25) sont du même ordre de grandeur que dans le cas libre, mais cinétiquement plus lente.

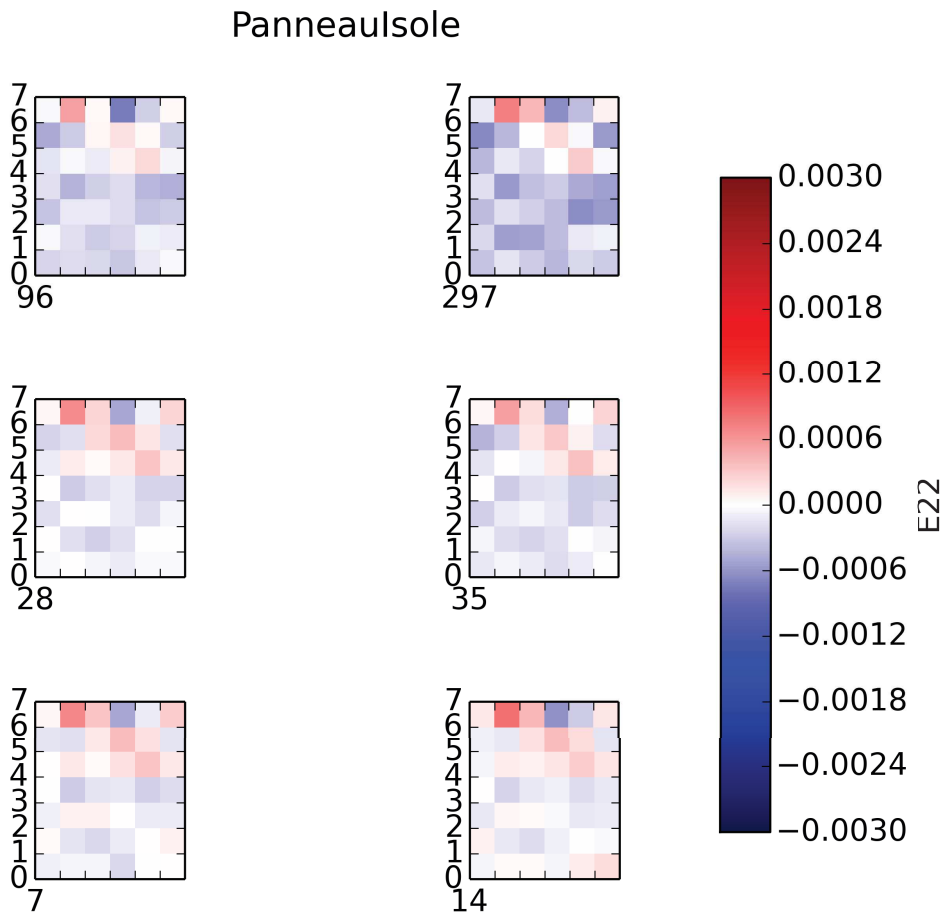


FIGURE 3.26 – Déformation verticale d'une planche de peuplier isolée sur les faces latérales lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Dans le cas du panneau isolé sur les faces latérales, la déformation verticale est très faible, elle présente beaucoup de bruit de mesure. Ces déformations ne seront pas analysées.

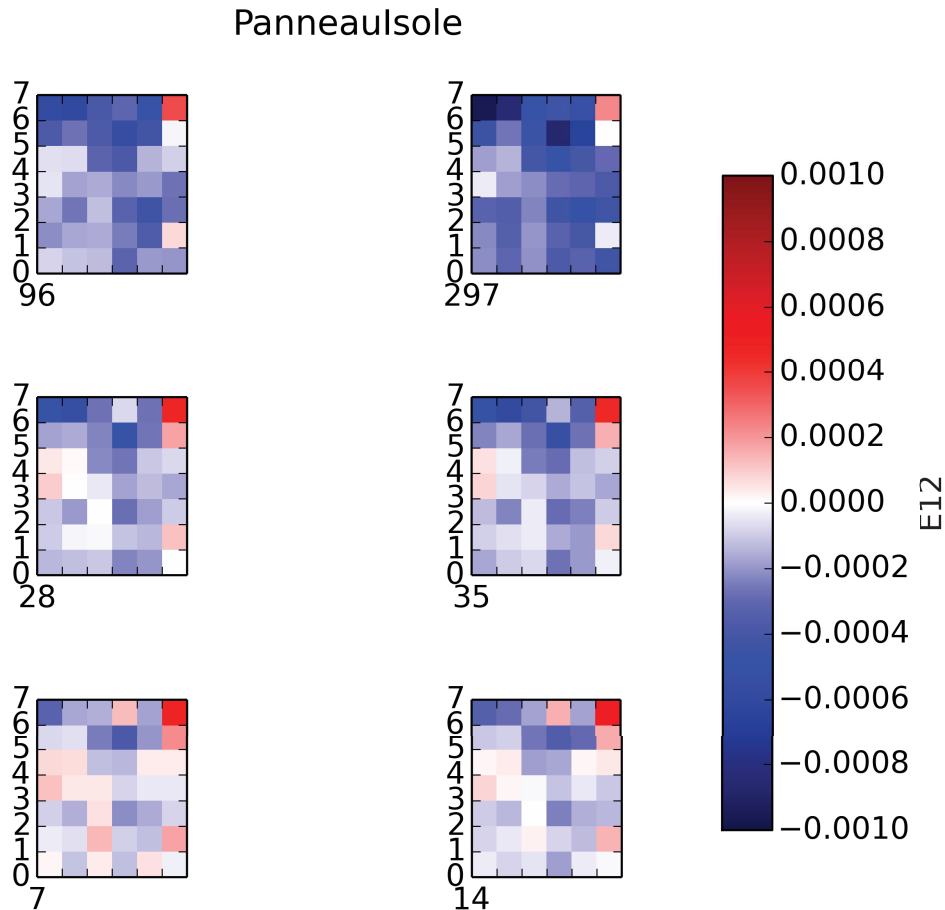


FIGURE 3.27 – Cisaillement d’une planche de peuplier isolée sur les faces latérales lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Désorption de la planche avec la couche préparatoire

Après avoir appliqué les différentes couches préparatoires à la peinture sur la planche isolée sur les faces latérales, nous avons procédé au séchage de ce panneau. De nouveaux marqueurs, plus nombreux, ont été posés (figure 3.5.(d)).

Dans la partie 2.2, nous avons pu caractériser la rigidité de cet ensemble de couches. Nous avons déterminé que cette couche rigidifiait fortement la structure (pouvant atteindre 10 GPa en rigidité).

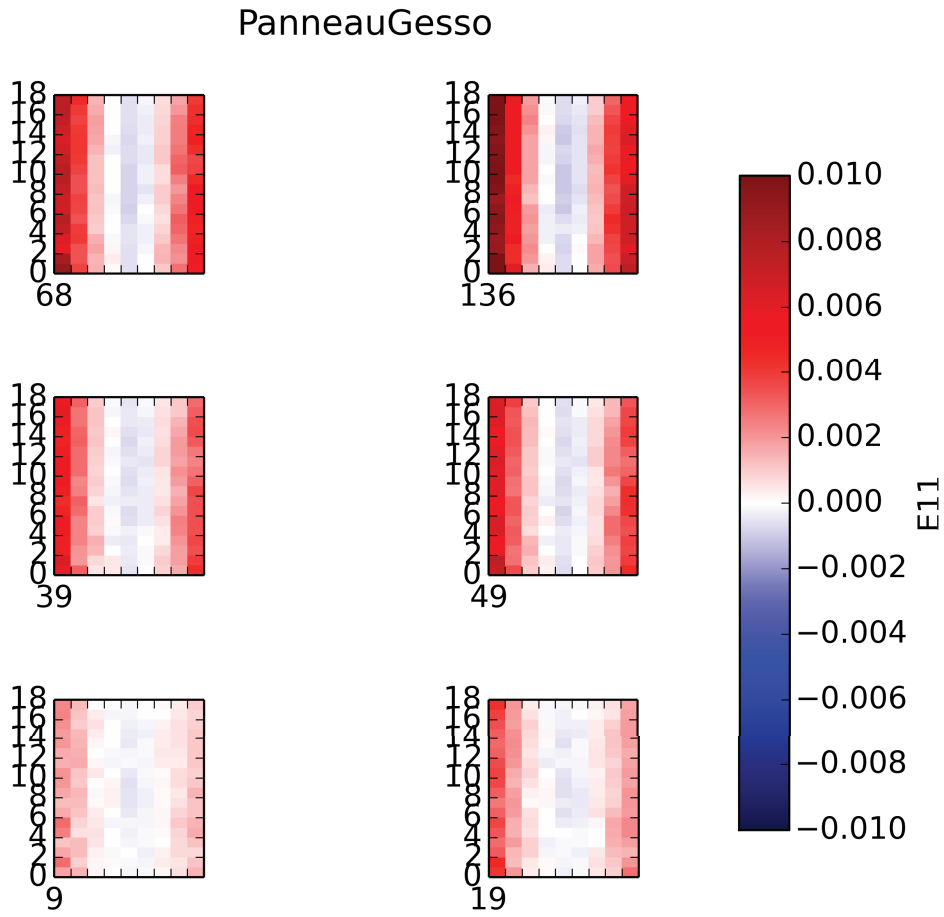


FIGURE 3.28 – Déformation horizontale d'une planche de peuplier isolée sur les faces latérales et recouverte d'une couche préparatoire, lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

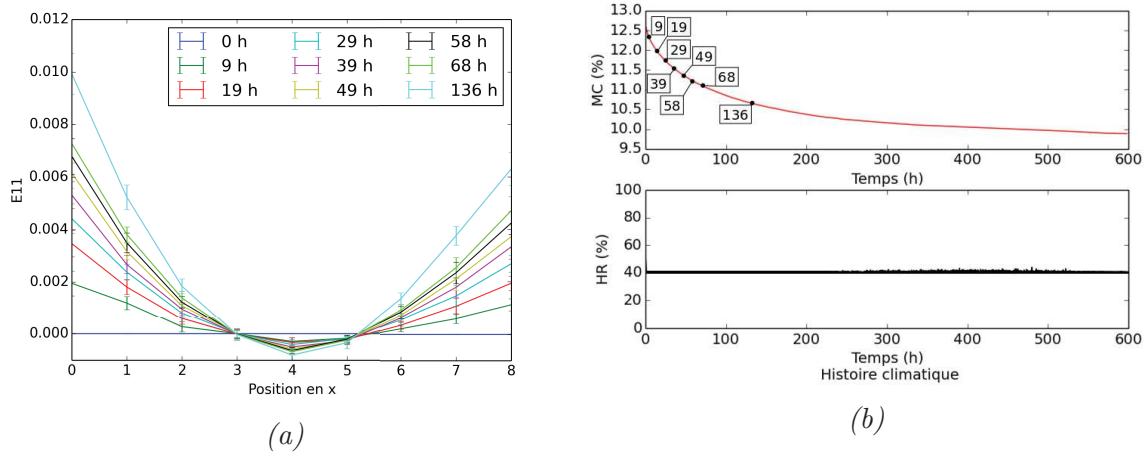


FIGURE 3.29 – (a) : Profil des déformations horizontales d'une planche de peuplier isolée sur les faces latérales et recouverte d'une couche préparatoire lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C. (b) : Correspondance des temps choisis pour les profils sur la courbe de desorption.

La figure 3.29 présente le profil des déformations horizontales du panneau observé côté couche préparatoire. Nous pouvons constater que la surface est en extension, cela peut être expliqué par une mise en tension de la couche préparatoire. La face non recouverte (arrière) sèche, elle subit en premier le séchage qui se traduit par un retrait global horizontal. C'est le gradient d'humidité dans l'épaisseur qui entraîne une flexion de la planche (visible pour les déformations E_{22} , figure 3.31).

Ce phénomène de flexion s'explique pour deux raisons, la première est l'anisotropie de séchage : la composante tangentielle du retrait est plus important que la composante radiale. La seconde est le phénomène de séchage asymétrique de la planche, comme résumé dans la figure 3.30. Lors du séchage d'une planche dont l'une des faces est imperméable, l'eau va donc être désorber par la face libre mais pas par la face imperméable. La teneur en eau dans l'épaisseur de la planche va présenter un gradient durant la phase transitoire de retrait. Le retrait de la face libre va provoquer une contraction de celle-ci, tandis que la face imperméable, par effet de structure, va s'étendre et provoquer ainsi une flexion de la planche. Cette courbure devrait disparaître lorsque l'humidité est à nouveau homogène dans la planche. Or le coefficient de diffusion étant très faible dans la direction tangentielle, même après 136h, le séchage et donc l'humidité, n'est toujours pas homogène dans l'épaisseur.

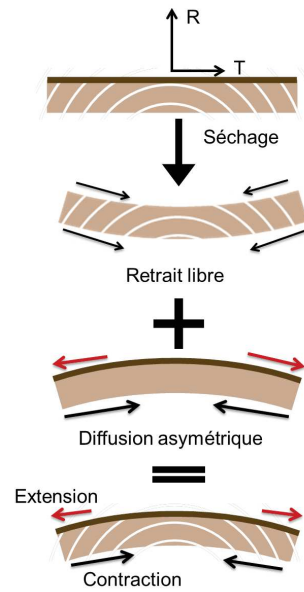


FIGURE 3.30 – Schéma explicatif du phénomène de tension en surface lors d'un séchage.

Le fait que la déformation soit plus forte sur le coté gauche que sur le coté droit vient du fait que le débit de la planche soit sur faux-quartier.

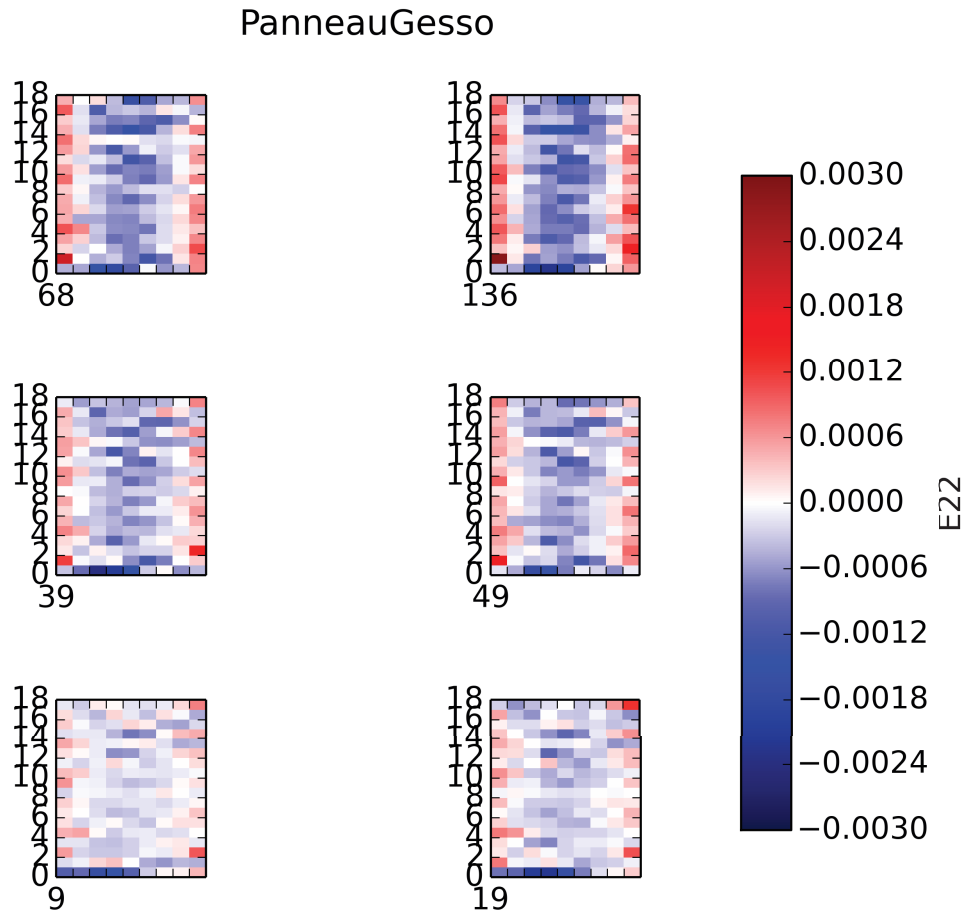


FIGURE 3.31 – Déformation verticale d’une planche de peuplier isolée sur les faces latérales et recouverte d’une couche préparatoire, lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Pour la déformation verticale (figure 3.31), on assiste à un relativement fort gradient entre le bord gauche (ou droit) et le centre de la planche, avec une extension ($E_{22} = 0.15\%$) sur les bords et un retrait au centre ($E_{22} = -0.15\%$). Ces déformations sont calculées sur la surface de la couche préparatoire. Cette couche est considérée comme un matériau isotrope, c’est-à-dire que la déformation que nous observons horizontalement devrait être visible également verticalement, par effet Poisson. Or lors de l’expression de l’effet Poisson, les déformations seraient opposées : une tension dans une direction implique une compression dans l’autre direction. Dans notre cas, toutes les déformations sont positives sur les bords, ou négatives au milieu. Il s’agit donc pas d’un effet Poisson.

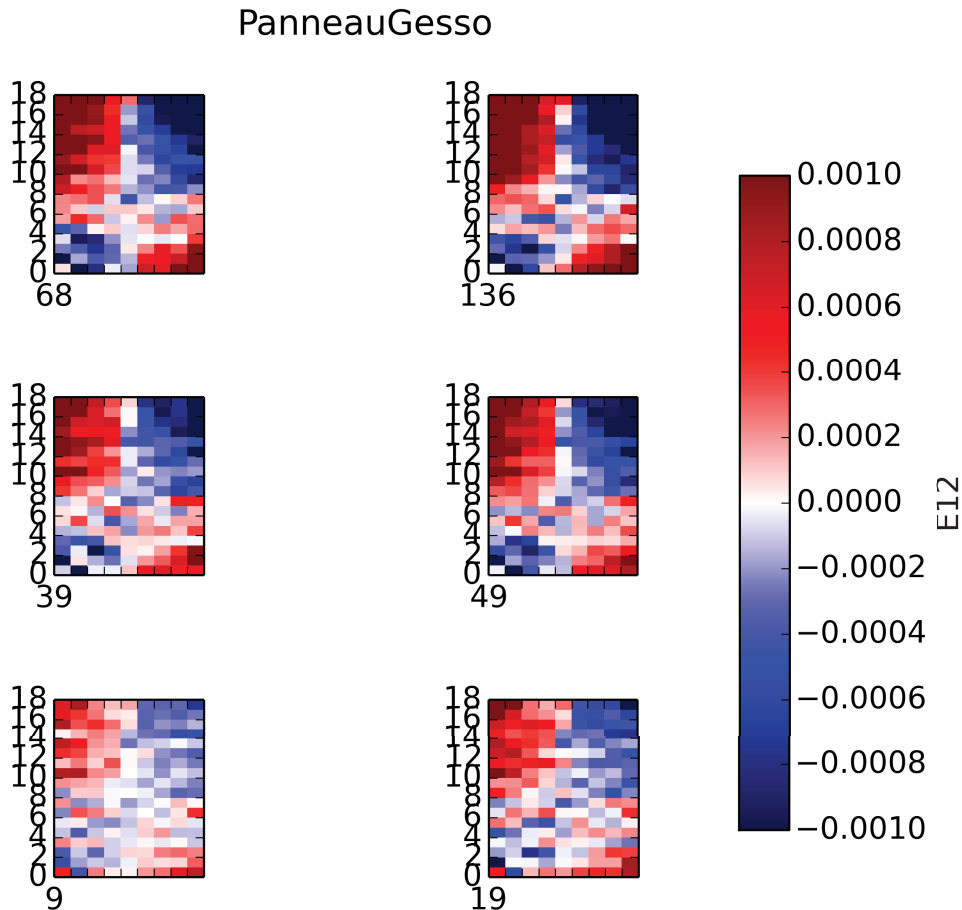


FIGURE 3.32 – Cisaillement d’une planche de peuplier isolée sur les faces latérales et recouverte d’une couche préparatoire, lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Dans ce cas, le cisaillement (figure 3.32) n’est plus négligeable et se manifeste surtout dans les coins de la planche ($E_{12} = \pm 0.1\%$ à 136h).

On remarque que lors de cet essai la planche se courbe fortement – la flèche, au centre de la planche, a été évaluée mesuré à plus de 2 mm à l’aide d’un pied à coulisse. Les transferts d’eau ne se font plus que par la face arrière ce qui crée un gradient d’humidité dans l’épaisseur de la planche, qui provoque une mise en flexion de la planche (comme décrit dans la partie 2.2). De plus, l’asymétrie se passe aussi d’un point de vue rigidité car le bois possède en moyenne une rigidité de 1 GPa en flexion radiale, alors que la couche picturale possède une rigidité de 10 GPa en flexion. Donc la couche picturale exercerait une influence hygromécanique sur le comportement général de la structure, et cette contribution n’est pas négligeable dans l’interprétation du comportement.

Notons tout de fois que ce cas de figure est assez surprenant en terme de cinétique hydrique et de déformation observée. Une planche possédant une couche préparatoire de rigidité à 10 GPa ne devrait pas se déformée autant. Une des explication possible est que le processus de séchage de l’ensemble de la couche préparatoire pourrait ne pas être fini, malgré le fait les 4

mois attendu entre la pose des revêtements composants la couche préparatoire et l'essai de désorption.

Désorption de la planche peinte avec renfort

L'objectif de la pose des renforts est d'empêcher la courbure du panneau. Nous avons donc mis en place un système très rigide au revers du panneau pour contrer la tendance à la courbure. À l'état initial, le panneau présente déjà une courbure. Lors du séchage cette courbure s'amplifie et la flèche atteint 2 mm. Cette courbure augmente tant que les gradients d'humidité dans l'épaisseur sont importants. Le système de renfort a été conçu de sorte de laisser les retraits/gonflements s'exprimer, le panneau peut glisser latéralement relativement au système de renfort.

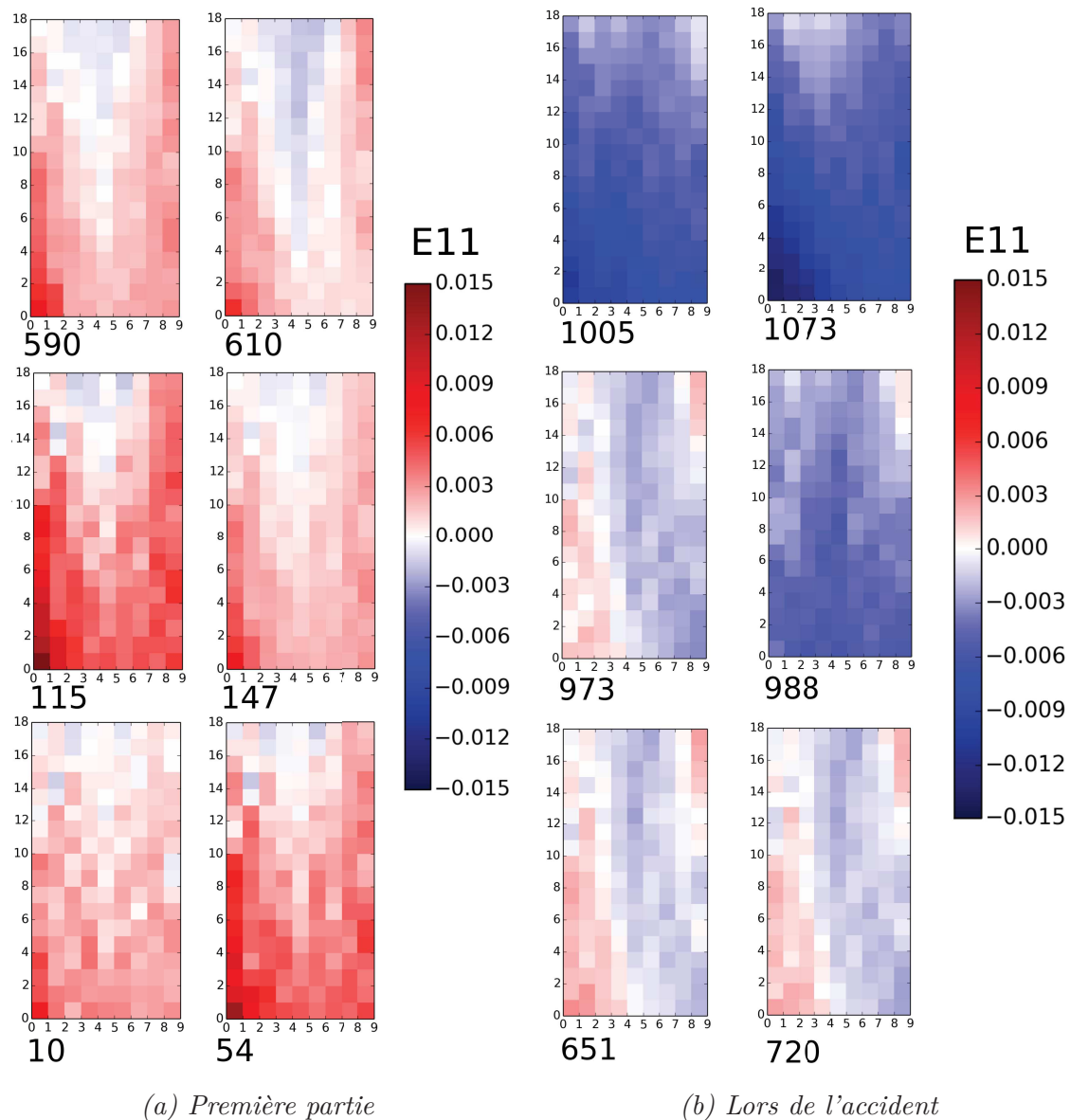


FIGURE 3.33 – Déformation horizontale d'une planche de peuplier, isolée sur les faces latérales, recouverte d'une couche préparatoire et possédant un renfort au revers, lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

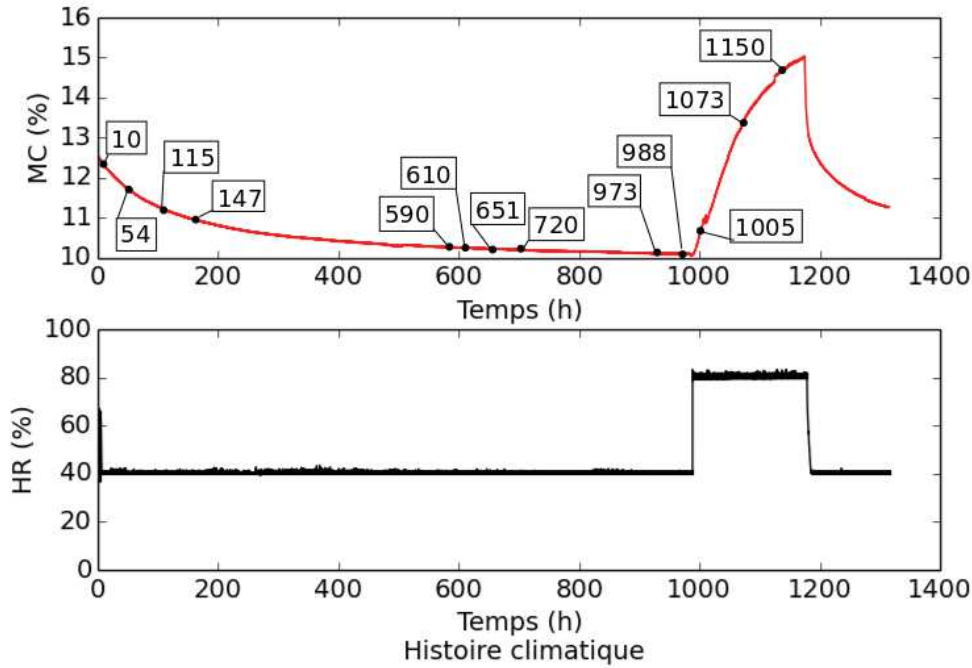


FIGURE 3.34 – Correspondance des temps choisis pour les cartographies sur la courbe climatique.

Le comportement du panneau (figure 3.33(a)) est assez inattendu car les déformations ne sont pas symétriques par rapport à l'axe horizontal. On observe une extension de la face recouverte de gesso, avec un gradient du bas de la planche vers le haut. Ces gonflements atteignent 1.5%, de manière assez localisée sur la partie inférieure gauche. Il semble donc que le système de renfort autorise les gonflements latéraux, mais dans une certaine mesure seulement.

La figure 3.33.(b), au temps 973 et 988h, montre l'état de la planche avant la simulation d'un accident climatique qui pourrait survenir lors d'intempéries dans un musée. Avec une augmentation brutale de l'humidité relative (80% HR) (temps 1005h), le panneau subit une dilatation de la face arrière, ce qui entraîne un gradient d'humidité dans l'épaisseur et donc une volonté de contraction de la face avant due à la mise en flexion de la planche (situation inverse de la situation précédente du retrait de la planche avec la couche préparatoire), mais cette flexion est empêchée par la présence du renfort. Il semblerait que le renfort installé sur le haut de la planche bloque les déformations de retrait / gonflement.

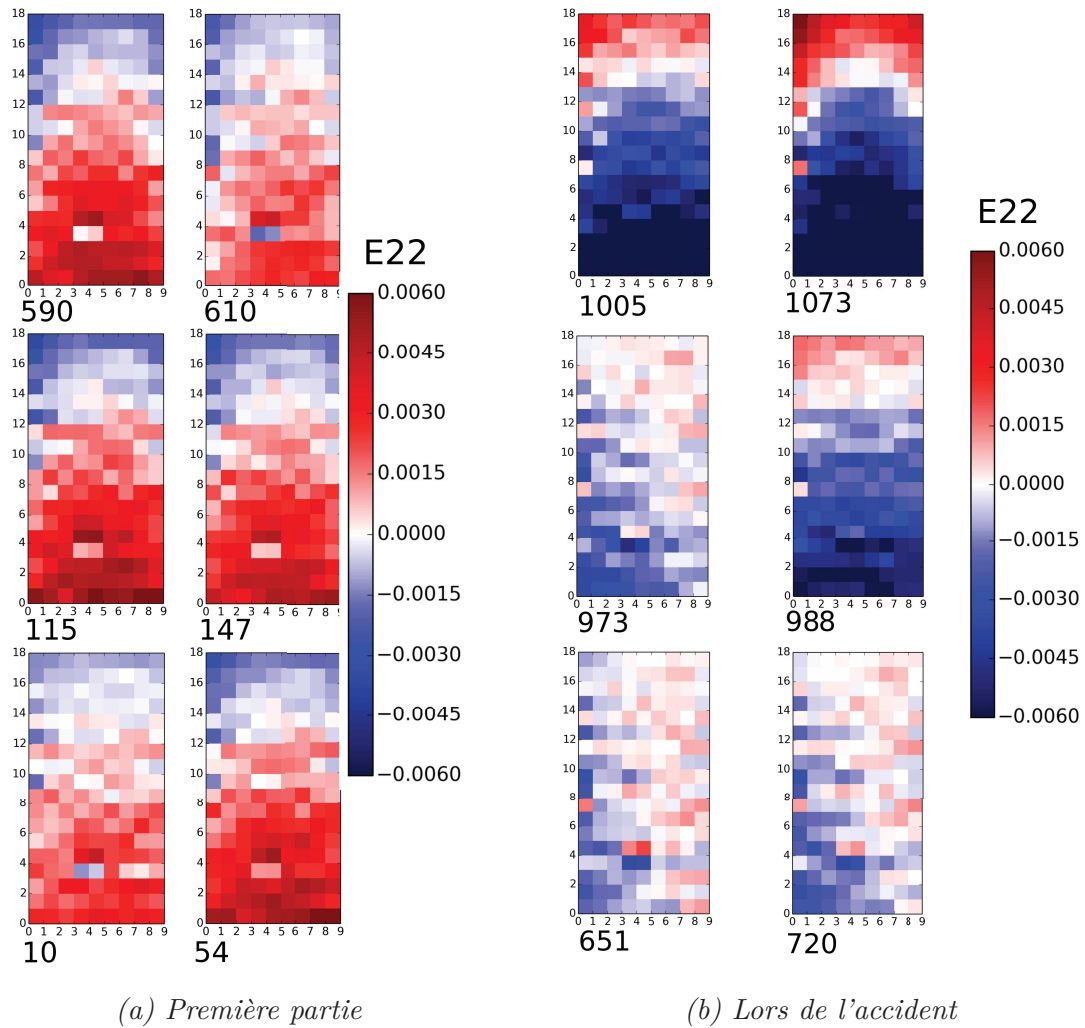
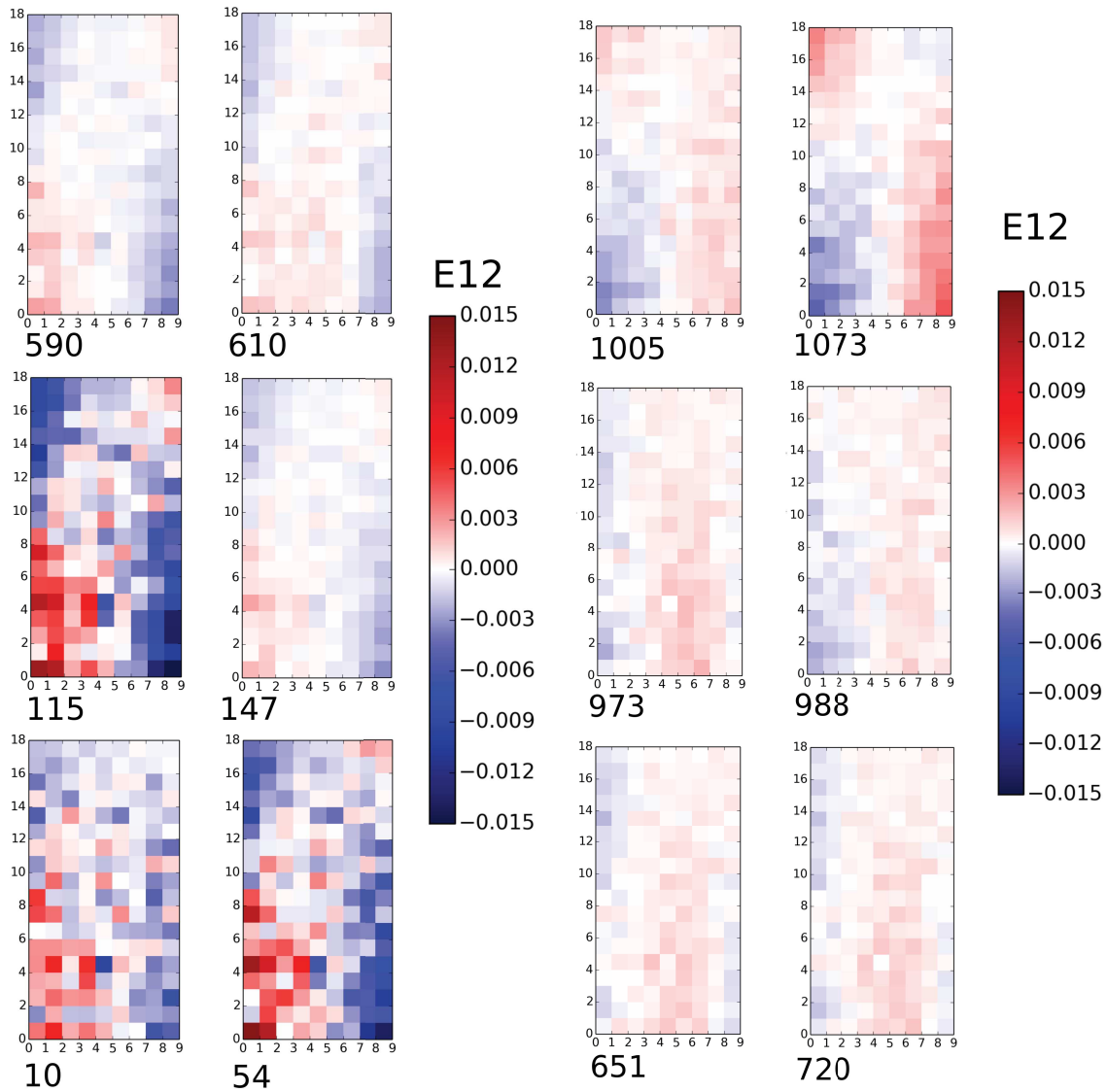


FIGURE 3.35 – Déformation verticale d’une planche de peuplier, isolée sur les faces latérales, recouverte d’une couche préparatoire et possédant un renfort au revers, lors d’un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

La figure 3.35.(a) présente les déformations verticales. On observe une nette différence de comportement entre la partie basse qui semble subir un gonflement, et la partie haute qui aurait elle tendance à se rétracter. Ce champ de déformation semble montrer un blocage intervenant verticalement. Cependant, ce blocage ne serait pas dû au renfort car ce dernier a été élaboré pour bloquer uniquement la flexion horizontale. Or lors de la mise en place du renfort à l’arrière de la planche, nous avons vissés une bar métallique au milieu de la planche. Cette bar pourrait alors être responsable des blocages verticaux observés.

Il aurait fallu pouvoir également suivre les mouvements à l’arrière de la planche afin de pouvoir analyser correctement ces déformations.

Lors de l’accident climatique (figure 3.35.(b)), les déformations s’inversent pour avoir un retrait verticale en bas de la planche et un gonflement en haut de planche. La flexion verticale s’inverse brusquement.



(a) Première partie

(b) Lors de l'accident

FIGURE 3.36 – Cisaillement d'une planche de peuplier, isolée sur les faces latérales, recouverte d'une couche préparatoire et possédant des renforts au revers l'empêchant de se courber, lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Pour le cisaillement (figure 3.36), il est deux fois moins important que sans renfort. Cela s'explique par le rôle du renfort qui bloque la courbure du panneau.

Les déformations et les cisaillements sont assez élevés lors de cette simulation d'accident, ce qui nous indique un réel danger pour l'œuvre lors d'un changement climatique. Cependant, aucune fissure apparente n'a été observée après cet essai.

Pour finir, les dernières images lors de l'accident sont présentées dans la figure 3.37 afin d'évaluer les intensités maximales de déformations que peut présenter le panneau.

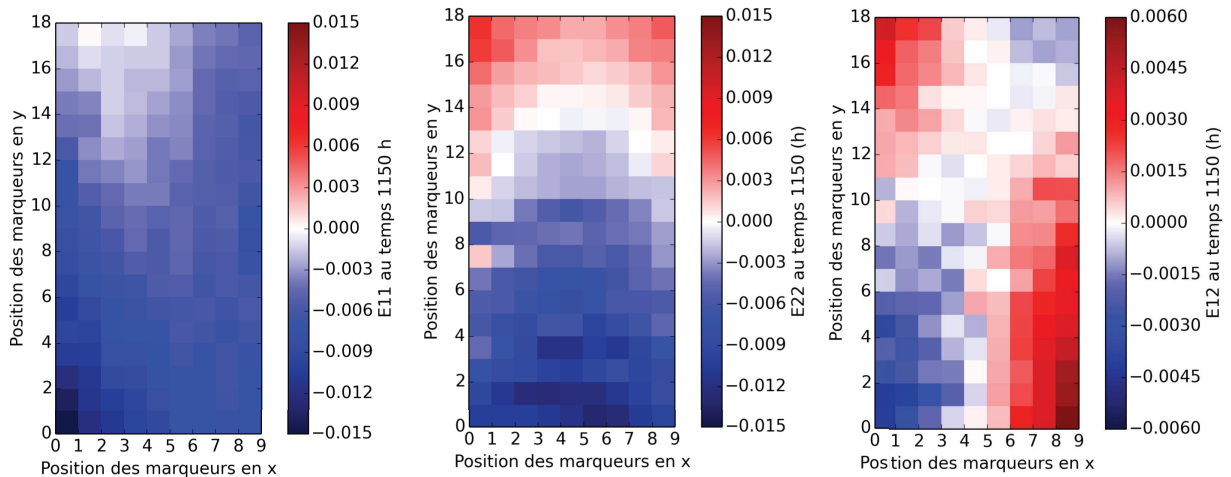


FIGURE 3.37 – Déformations d'une planche de peuplier, isolée sur les faces latérales, recouverte d'une couche préparatoire et possédant des renforts au revers l'empêchant de se courber, lors d'un accident climatique (80% HR, 20° C).

Au vu des motifs de champ de déformation, le panneau présente une flexion importante et une inversion de courbure. Ce phénomène peut gravement endommager la couche picturale dans le cas d'un panneau réel.

Notons toutefois que le dispositif de renfort mis en place lors de cet essai était en simple appui sur la planche avec des cales rotulées afin de permettre une bonne interface entre le capteur de force et le système de guidage linéaire. Ce système a été mis en place à l'état équilibré de 60% HR, et donc avec une flèche centrale de 2 mm de la planche (figure 3.38). Lors de l'humidification à 80% HR, la planche s'est dilatée au revers et a donc annihilé la courbure du panneau. Trois cales sont tombées à ce moment là, laissant celle du bord inférieur droit. Donc lors de la contraction de la face arrière, due au rétablissement de la consigne climatique à 40% HR, la courbure est réapparue, appuyant ainsi de nouveau sur cette unique cale.

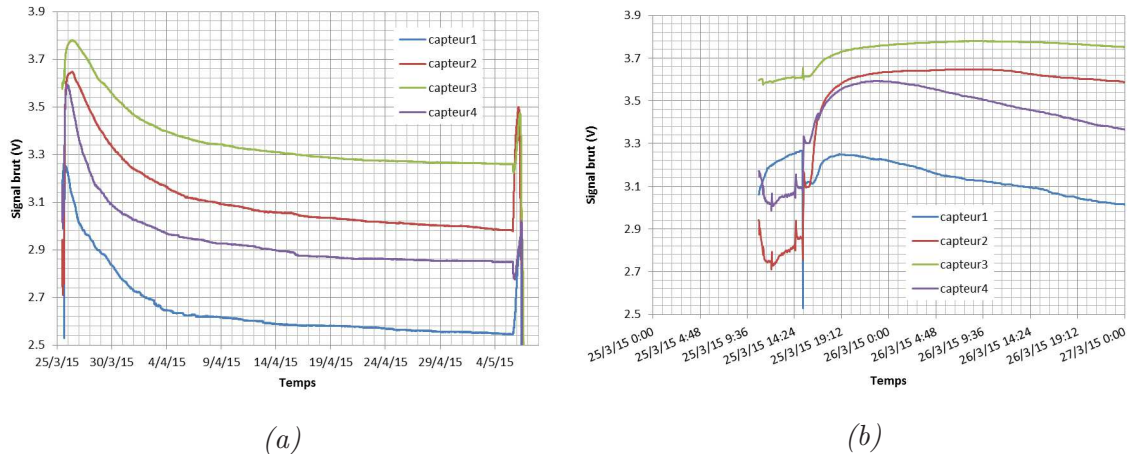


FIGURE 3.38 – Signaux bruts des capteurs de forces placés à l’arrière de la planche. La numérotation correspond à la figure 3.6. **(a)** : Signal des capteurs sur l’ensemble de l’essai. **(b)** : Détail du signal des capteurs au début de l’essai.

Il aurait été intéressant de pouvoir avoir une information sur l’envers de la planche (par une synchronisation de autre paire de caméras filmant l’arrière de la planche). Ce dispositif avait été évoqué au début de ce travail de thèse, mais au vu des difficultés régissant le contrôle climatique, nous avons opté pour une solution plus simple de mise en œuvre.

Pour conclure sur cet accident, cela nous montre bien, qu’un système de renfort ou de maintien de la courbure de l’œuvre est primordial lors de changement climatique important. S’il est mal dimensionné ou que son utilisation ne prévoit pas les accidents climatiques, les déformations du panneau pourraient devenir très dangereuses pour son intégrité.

3.2 Simulation numérique du comportement hygromécanique du panneau peint

Un des outils clé que nous avons essayé de mettre en place durant ce travail de thèse est un environnement logiciel pour de la simulation numérique adapté à la problématique du panneau peint du patrimoine. Cet outil a pour but de pouvoir prédire le comportement de planches de bois ancien soumis à des fluctuations climatiques (comme un accident de système de régulation climatique, ou pour déterminer s’il est judicieux de limiter le contrôle du climat par exemple). Ces simulations viendraient en soutien au conservateur pour l’aider à prendre des décisions lors de la gestion ses collections (gestion des risques, autorisation de prêt d’œuvres ...), et également au restaurateur-conservateur lors de ses choix de type de restauration et de dimensionnement de solution par exemple (Graindorge Lamour 2012).

Cet environnement s’articule du code de simulations : TransPore 3D. Nous présenterons les

équations constitutives utilisées, l'architecture du code et les résultats obtenus.

3.2.1 Échange de masse et de chaleur

Le premier code de simulation numérique utilisé concerne la modélisation des phénomènes de transferts thermo-hydriques dans un milieu poreux. Ce code, TransPore, basé sur une approche en volumes finis, a été développé par Perré (Perré 1990), (Perré 1999) dans le cadre de la modélisation du séchage du bois. Le travail présenté ici consiste au remaniement de ce code dans le but de proposer un logiciel open source, dans sa version 3D, pour proposer une utilisation plus souple et plus adaptée à la simulation "panneaux peints".

Après avoir présenté les équations constitutives utilisées pour modéliser les transferts couplés de masse et de chaleur dans un milieu poreux, nous expliquerons comment le code a été remanié puis les résultats des simulations appliquées aux cas expérimentaux présentés dans la partie 3.

3.2.1.1 Les équations d'échange de masse et chaleur dans le bois

Les phénomènes décrits ici sont appliqués à un milieu poreux, dont l'on peut désigner un volume élémentaire représentatif (VER) (figure 3.39). Les lois macroscopiques de conservation ne sont pas aisées à poser pour un milieu poreux. C'est pour cela que pour une propriété macroscopique donnée, on considérera la moyenne de cette propriété sur le VER, centré sur son point géométrique. On considère la propriété Ψ , on définit alors deux types de moyenne : la moyenne générale $\bar{\Psi}$ et la moyenne intrinsèque sur une phase i $\bar{\Psi}^i$. Afin d'obtenir une équation macroscopique, les équations moyennées sont sommées sur le VER considéré. À cette échelle de description, le milieu poreux est considéré comme un milieu fictif, continu et homogène (Perré 1990).

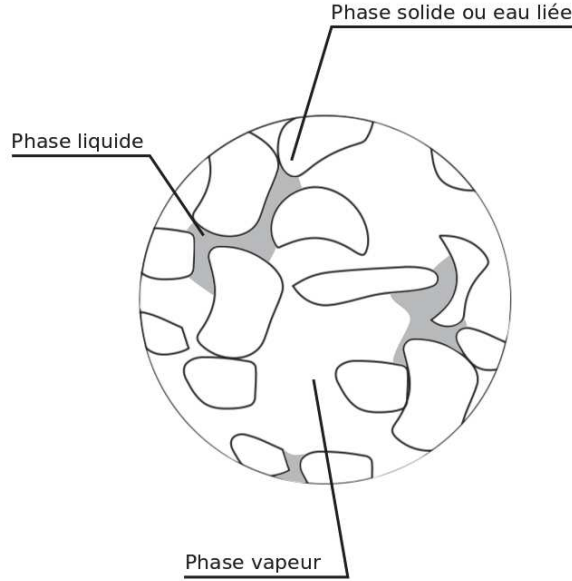


FIGURE 3.39 – Volume élémentaire représentatif (VER) dans un milieu poreux.

L'état du milieu est décrit par trois variables : la température, la teneur en eau totale et la pression de la phase gazeuse. On a dans le VER les trois phases : l'eau liquide (eau libre), la phase gazeuse et la phase solide dans laquelle est contenue l'eau liée.

Équations de transfert

On peut alors déduire de la théorie de Whitaker (Whitaker 1977), (Whitaker 1980) des bilans de masse, d'enthalpie et de quantité de mouvement pour chacune des phases, que l'on vient donc moyenner et sommer sur un VER.

On peut écrire alors l'équation de **conservation de la phase liquide** :

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_l \rho_l + \epsilon_g \rho_v + \bar{\rho}_b) + \nabla \cdot (\rho_l \bar{v}_l + \rho_v \bar{v}_g + \bar{\rho}_b \bar{v}_b) = \nabla \cdot (\rho_g \bar{\bar{D}}_{eff} \nabla w_v) \quad (3.14)$$

Avec les indices l , v , g , b correspondant à la phase liquide, vapeur, gazeuse (air + vapeur), et de l'eau liée respectivement. ϵ la fraction volumique, ρ la densité ($kg.m^{-3}$), v la vitesse barycentrique de la phase considérée ($m.s^{-1}$), w la vitesse à l'interface de deux phases et D_{eff} le coefficient de diffusion effectif.

On écrit également l'équation de **conservation de l'énergie** :

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_l \rho_l h_l + \epsilon_g(\rho_v h_v + \rho_a h_a) + \bar{\rho}_b \bar{h}_b + \rho_0 h_s - \epsilon_g P_g) + \nabla \cdot (\rho_l h_l \bar{v}_l + (\rho_v h_v + \rho_a h_a) \bar{v}_g + h_b \bar{\rho}_b \bar{v}_b) = \\ \nabla \cdot (\rho_g \bar{\bar{D}}_{eff} (h_v \nabla w_v + h_a \nabla w_a) + \bar{\bar{K}}_{eff} \nabla T) + \Phi \end{aligned} \quad (3.15)$$

Avec les indices a et s correspondant à la phase d'air sec et de sorption respectivement. h est l'enthalpie ($J.kg^{-1}$), h_s la chaleur différentielle de sorption ($J.kg^{-1}$), P la pression (Pa), K_{eff} la conductivité thermique effective ($J.s^{-1}.m^{-1}.K^{-1}$), T la température et Φ un terme de source volumique.

Enfin, l'équation de **conservation de l'air** :

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_g \rho_a) + \nabla \cdot (\rho_a \bar{v}_g) = \nabla \cdot (\rho_g \bar{D}_{eff} \nabla w_a) \quad (3.16)$$

La vitesse barycentrique de l'air et du liquide sont données par la loi généralisée de Darcy :

$$\bar{v}_i = \frac{\bar{K}_i \bar{k}_i}{\mu_i} \nabla \phi_i \quad (3.17)$$

$$\nabla \phi_i = \nabla P_i - \rho_i g \nabla \chi \quad (3.18)$$

Avec $i = l, g$, χ est la profondeur (m), μ la viscosité dynamique, k est la perméabilité relative (m) et K la perméabilité absolue (m) et ϕ le potentiel de phase.

Conditions initiales et limites

On peut maintenant écrire les conditions initiales. On considère que la température et l'humidité dans la planche sont homogènes. La pression initiale à l'intérieur de la planche est considérée comme égale à la pression atmosphérique et constante.

En ce qui concerne les conditions limites, il existe deux sortes de condition, la première étant les conditions externes et la deuxième les conditions aux plans de symétrie.

Généralement, on considère que le milieu échange de la chaleur et de l'eau avec l'air extérieur par convection. Sur une surface convective, la pression totale de gaz est égale à la pression extérieure (condition de Dirichlet). On peut donc écrire les flux d'humidité et de chaleur comme suit :

$$P_g = P_\infty \quad (3.19)$$

$$J_w \cdot \hat{n} = k_m c M_v \ln\left(\frac{1 - x_\infty}{1 - x_v}\right) \quad (3.20)$$

$$J_e \cdot \hat{n} = q(T - T_\infty) + h_v k_m c M_v \ln\left(\frac{1 - x_\infty}{1 - x_v}\right) \quad (3.21)$$

Avec J_w le flux d'humidité totale, J_e le flux d'enthalpie totale, k_m le coefficient de transfert hydrique, c la concentration molaire, M la masse molaire, x la fraction molaire, h le coefficient de transfert de chaleur.

La condition de Dirichlet 3.19 doit être remaniée sous une forme non-linéaire :

$$\epsilon_g (P_v - P_\infty) + \frac{\bar{\rho}_a RT}{M_a} = 0 \quad (3.22)$$

Cette équation doit être résolue en même temps que les équations de conservation.

3.2.1.2 Modification de l'architecture du logiciel TransPore 3D

Afin d'adapter le code à des cas plus généraux que le séchage, nous avons entrepris la modification de l'architecture de ce code. Le but était alors de pouvoir modifier les lois gérant la sorption ou les conditions limites en facilitant leur accès dans le code. Nous avons également intégré des fonctionnalités déjà existantes dans la version 1D, développées par Rémond, tels que la gestion de la sorption avec hystérésis et l'application de conditions limites différentes. Le tout étant maintenant piloté par un script en langage *Python* afin de faciliter l'utilisation du logiciel.

Le but de ce travail de modulation (décomposition en modules ou sous-modules) de TransPore 3D est de pouvoir le distribuer à une communauté scientifique voulant modéliser des phénomènes couplés d'échange de masse et de chaleur dans un milieu poreux (bois, béton ...). Nous avons donc remanié TransPore 3D en séparant en modules les différentes parties du code (figure 3.40).

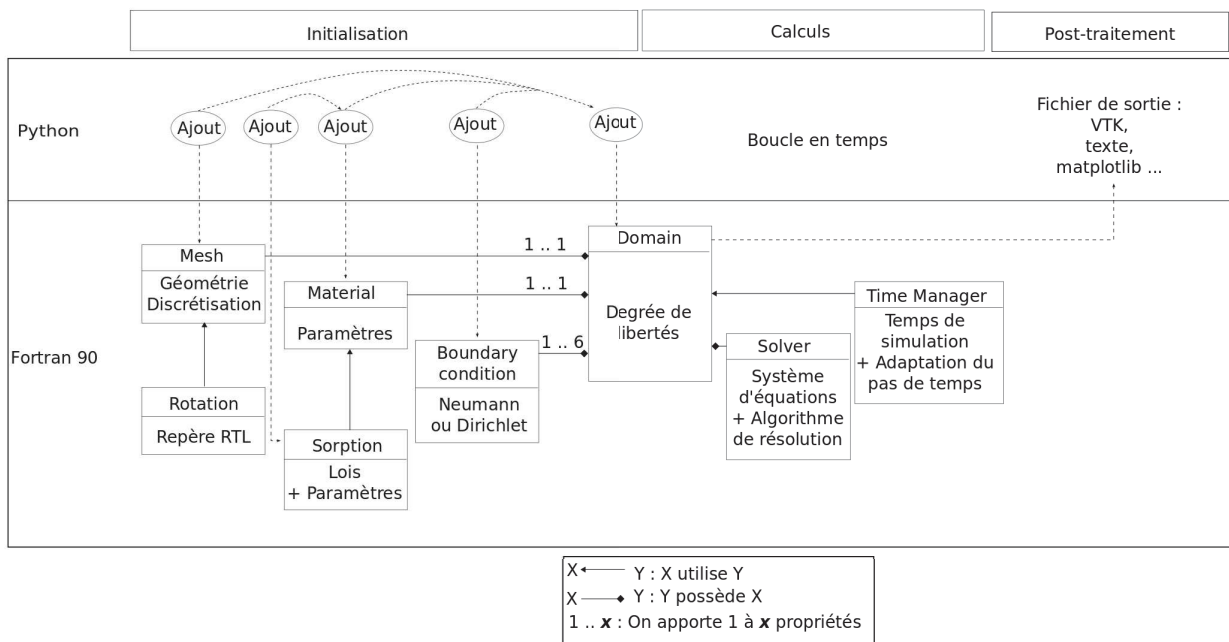


FIGURE 3.40 – Schéma résumant l'architecture de TransPore 3D.

Le code, écrit en Fortran90, est donc maintenant piloté grâce à un script Python. Ce remaniement permet une simplicité d'écriture tout en gardant la force de calcul du langage de programmation Fortran90.

Nous avons également intégré la prise en compte d'une histoire à climat variable avec (ou sans) l'hystérésis de sorption du bois, initialement développé par Rémond (Rémond 2004). Cette implémentation avait déjà été faite pour la version TransPore 1D, d'écrite dans la thèse de Colmars (Colmars 2011). Pour ce faire, on définit un paramètre γ décrivant si l'on se trouve

plutôt en absorption ou en désorption. Ce paramètre varie entre 0 et 1, où $\gamma = 0$ décrit la désorption pure et $\gamma = 1$ décrit l'absorption pure. On pose :

$$dmc = \frac{\delta mc}{\delta HR} dHR + \frac{\delta mc}{\delta d\gamma} d\gamma \quad (3.23)$$

$$\gamma \in [0, 1] \quad (3.24)$$

Où sous une forme plus simplifiée :

$$mc = \gamma mc^+ + (1 - \gamma) mc^- \quad (3.25)$$

Dans l'équation 1.3, nous avons défini la fonction de Dent permettant de relier l'humidité interne mc à l'humidité relative HR , où l'absorption et la désorption sont définies par des coefficients A^+ , B^+ , C^+ et A^- , B^- , C^- respectivement.

Si on a :

$$\text{Si } dmc > 0, \quad d\gamma = (1 - \gamma)^n \frac{dHR}{\Delta HR} \quad (3.26)$$

$$\text{Si } dmc < 0, \quad d\gamma = \gamma^n \frac{dHR}{\Delta HR} \quad (3.27)$$

Avec $n \geq 1$, ΔHR est l'écart entre HR et la courbe d'absorption ou désorption suivant le cas considéré.

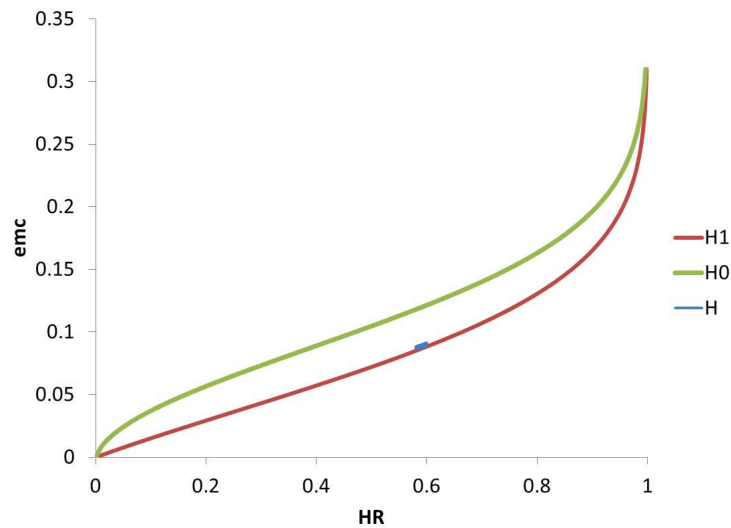


FIGURE 3.41 – Isotherme de sorption à 20°C implémenté dans TransPore 3D (Perré 1999). L'enveloppe H1 décrit l'absorption du bois ($\gamma = 1$) et H0 la désorption ($\gamma = 0$). H étant l'histoire climatique que l'on veut modéliser.

Alors dans le cas hors équilibre, le chemin parcouru entre les deux courbes est une asymptote et s'écrit :

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0/1} \frac{d\gamma}{dHR} = 0 \quad (3.28)$$

Le paramètre d'hystérésis n a été identifié à $n = 1.86$ pour du tulipier de Virginie (*Liriodendron tulipifera L.*) et à $n = 1.48$ pour du Douglas dans (Peralta 1995) et (Merakeb 2006), à $n = 1.5$ pour du peuplier dans (Colmars 2011).

Note sur le dysfonctionnement de la modélisation de l'hystérésis dans le cas de petites fluctuations

L'approche décrite ci-dessus décrit correctement les histoires climatiques dans le cas de grandes fluctuations d'humidité. Par exemple, l'hystérésis de la figure 3.42 part d'un état équilibré à 10% HR en désorption ($\gamma = 0$), on fait absorber le bois jusqu'à 79% HR ($\gamma = 1$), puis on le fait désorber jusqu'à l'état initiale (10% HR). Dans ce cas, l'hystérésis décrit bien la réversibilité du phénomène de sorption.

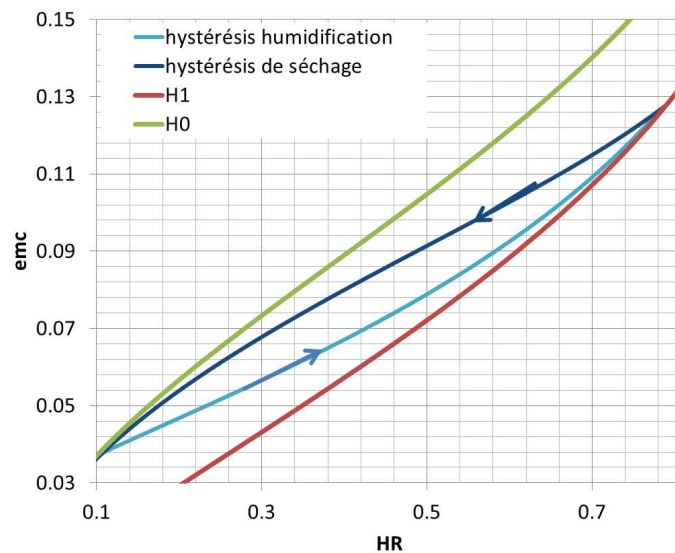


FIGURE 3.42 – Détail de l'isotherme de sorption à 20°C implémenté dans *TransPore 3D* (Perré 1999). On décrit ici un cas d'humidification et de séchage pour de grande amplitude d'humidité.

Dans le cas des petites fluctuations, cas décelé dans la partie 2.2, l'histoire climatique présente de petits paliers d'humidité. Afin de reproduire la même situation d'hystérésis, on commence par stabiliser les échantillons à 30% HR, puis à 55% HR avant l'essai. Comme cela, le bois dans une configuration d'absorption ($\gamma = 1$). L'essai consiste alors à sécher le bois jusqu'à 34% HR puis le ré-humidifier jusqu'à 55% HR. Normalement, la teneur en eau du bois à la fin de l'essai devrait être le même que celle du début, or ce n'est pas le cas, comme le montre la figure 3.43.

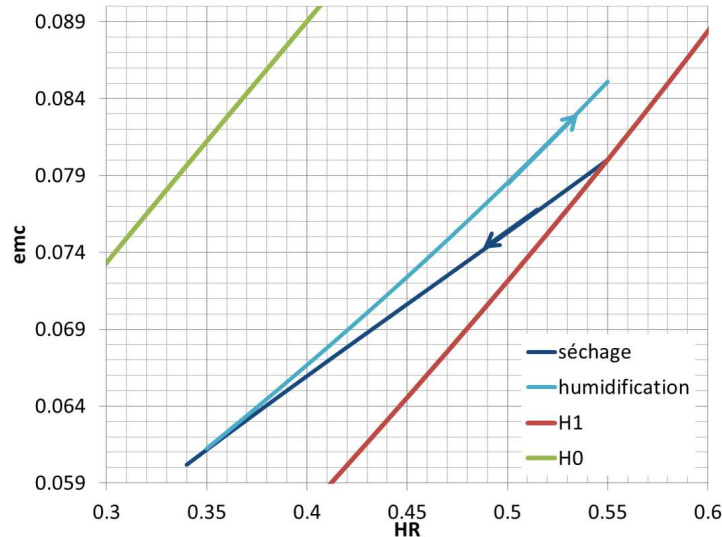


FIGURE 3.43 – Détail de l'isotherme de sorption à 20°C implémenté dans *TransPore 3D* (Perré 1999). On décrit ici le cas présenté dans la partie 2.2, où l'humidification et le séchage pour une petite amplitude d'humidité ne revient pas à l'équilibre.

En effet, si on applique de plus petites fluctuations (figure 3.44), on se rend compte que la réponse en humidité diverge. Cela est liée à la formulation et la mise en place du paramètre γ , qui ne rend pas compte de ce cas de figure.

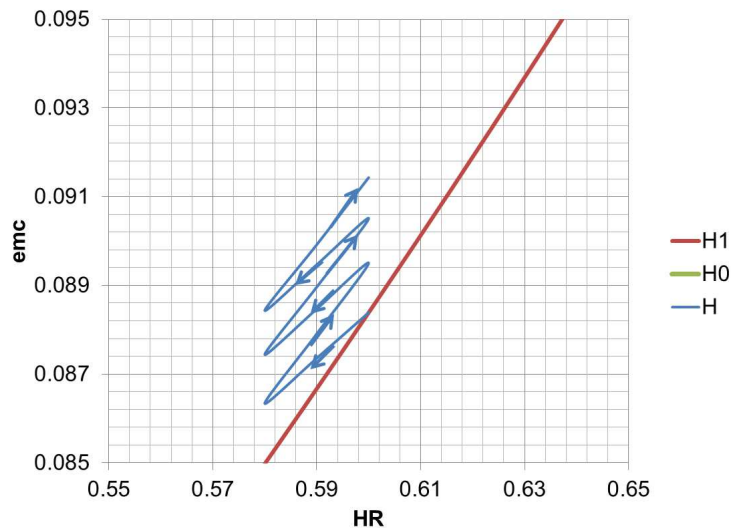


FIGURE 3.44 – Détail de l'isotherme de sorption à 20°C implémenté dans *TransPore 3D* (Perré 1999). On décrit ici une succession de séchage et d'humidification pour de petites amplitudes d'humidité. Le calcul de l'humidité interne diverge.

Nous n'avons pas eu le temps de résoudre le problème dès à présent, mais il est important de pouvoir comprendre ce dysfonctionnement et d'essayer de trouver une alternative pour rendre

compte de la réalité. Nous avons donc décidé de chercher le paramètre γ correspondant au mieux à la description de notre essai de la partie 2.2 (figure 3.45). Le paramètre γ permettant une réversibilité de la teneur en eau du bois a été choisi égal à 0.2.

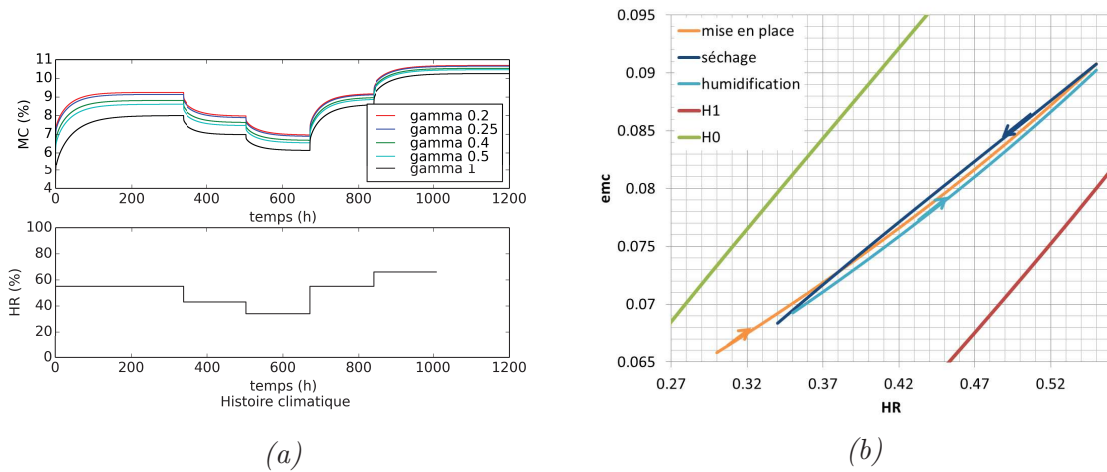


FIGURE 3.45 – Solution proposée pour modéliser les fluctuations microclimatiques vu dans 2.2 afin de rendre compte la réversibilité du phénomène de sorption. (a) : Différents tests faisant varier le paramètre γ initial. Par la suite $\gamma = 0.2$. (b) : Détail de l'isotherme de sorption à 20°C implémenté dans TransPore 3D (Perré 1999) avec $\gamma_{ini} = 0.2$.

3.2.1.3 Simulation TransPore

Les résultats obtenus sont donc des champs d'humidité, température et pression dans le volume de la planche. Ces résultats sont en 3D, mais par soucis de visibilité, nous présenterons l'évolution moyenne dans le panneau.

Les paramètres utilisés en première approche dans le code TransPore 3D sont résumés dans le table 3.3.

Paramètre	
HR initiale (%)	60
Température initiale (°C)	25
$\gamma_{initial}$	0
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	362.9
Coefficient de transfert de chaleur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	10
Coefficient de transfert hydrique ($kg.s^{-1}$)	0.01

TABLE 3.3 – Résumé des paramètres hydriques utilisés dans TransPore 3D

Par la suite, nous essayons de comparer les calculs du code TransPore 3D, par rapport à nos résultats expérimentaux, en terme de cinétique hydrique. Nous modélisons donc notre planche dont le débit est en faux-quartier (paramètres calculés à partir des images figure 3.2 de la distance à la moelle). Le chargement hydrique appliqué est celui de l'histoire donné

par l'enclume climatique. Puis pour les conditions limites, nous l'adaptions suivant les cas expérimentaux.

Désorption libre

Pour ce premier essai de séchage, nous considérons que toutes les faces de la planche diffusent librement, nous obtenons la courbe suivante :

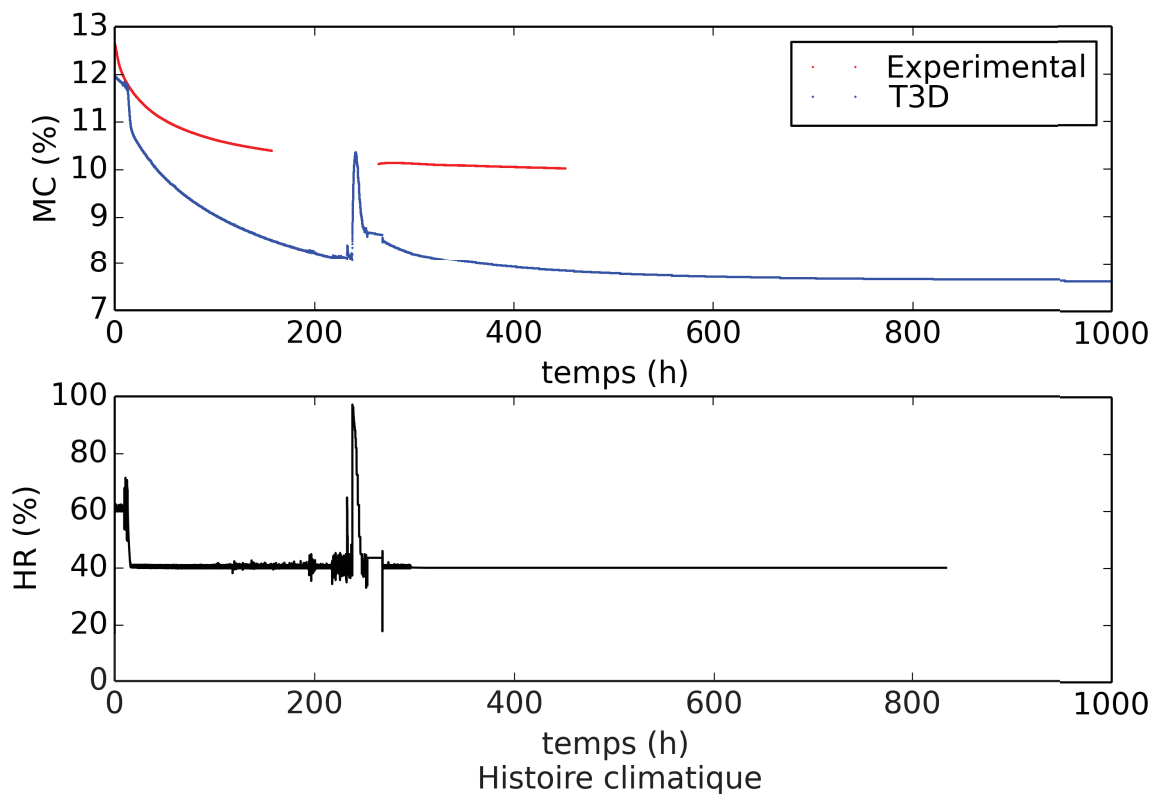


FIGURE 3.46 – Simulation TransPore3D et courbe expérimentale. Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier en fausse dosse lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20° C.

Malheureusement, nous n'avons pas pu avoir accès aux mesures lors de la défaillance de la chambre climatique, nous ne pouvons donc pas comparer ces résultats aux résultats expérimentaux pendant cette période de non-régulation hydrique.

Notons que la teneur en eau initiale (ici $mc_{T3D_{ini}} = 12\%$) est plus faible que celle des mesures expérimentales ($mc_{exp_{ini}} = 12.5\%$). En effet l'initialisation de la teneur en eau dépend du γ_{ini} et de l'équation de sorption. Compte tenu du dysfonctionnement de la modélisation de l'hystérésis pour de petites fluctuations – le passage de 60% à 40% HR est une petite fluctuation – nous prendrons garde à manipuler ce facteur initial important avec précaution.

Désorption d'une planche avec faces latérales isolées

Pour la désorption de la planche dont les faces latérales sont isolées hydriquement, les conditions limites imposées dans TransPore 3D sont un flux nul sur ces faces (condition de Neumann).

Lors de cet essai, le contrôle climatique s'est dérégulé avant le commencement de l'essai. Afin de pouvoir reproduire le même état initial que précédemment, nous avons cherché par simulation le chemin à parcourir afin de retrouver la même teneur en eau initiale globale dans la planche.

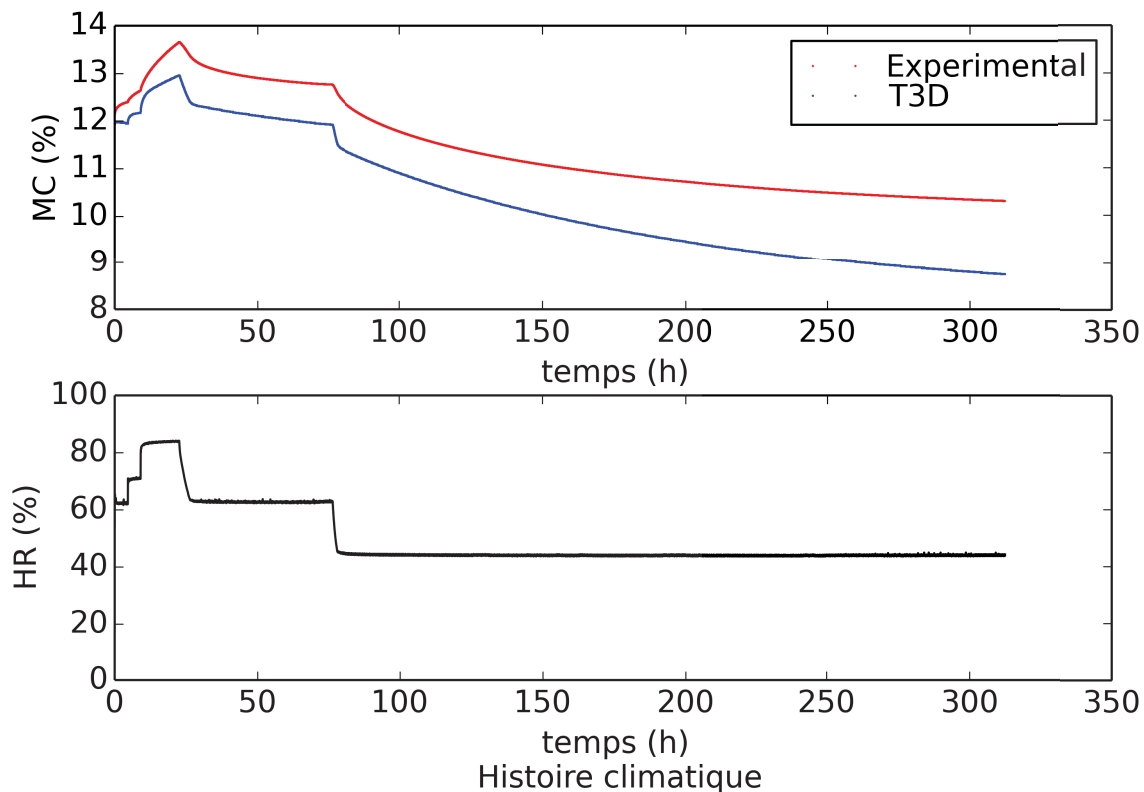


FIGURE 3.47 – Simulation TransPore3D et courbe expérimentale. Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier en fausse dosse isolée hydriquement sur les faces latérales lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C.

Le chemin hydrique retenu est présenté dans la figure 3.47. Si on regarde la courbe expérimentale, la tendance générale de la courbe semble correctement simulée par nos calculs, mais les teneurs en eau sont toujours sous évaluées.

Désorption de la planche avec couche préparatoire et faces latérales isolées

Dans le cas où l'on rajoute une couche préparatoire sur la face avant de la planche, en première approximation, nous ajoutons une condition de Neumann de flux nul sur cette surface. On

considère alors que la couche de gesso n'est pas perméable. Dans ce cas, il n'existe plus qu'une face (arrière) qui diffuse l'humidité (condition de Dirichlet).

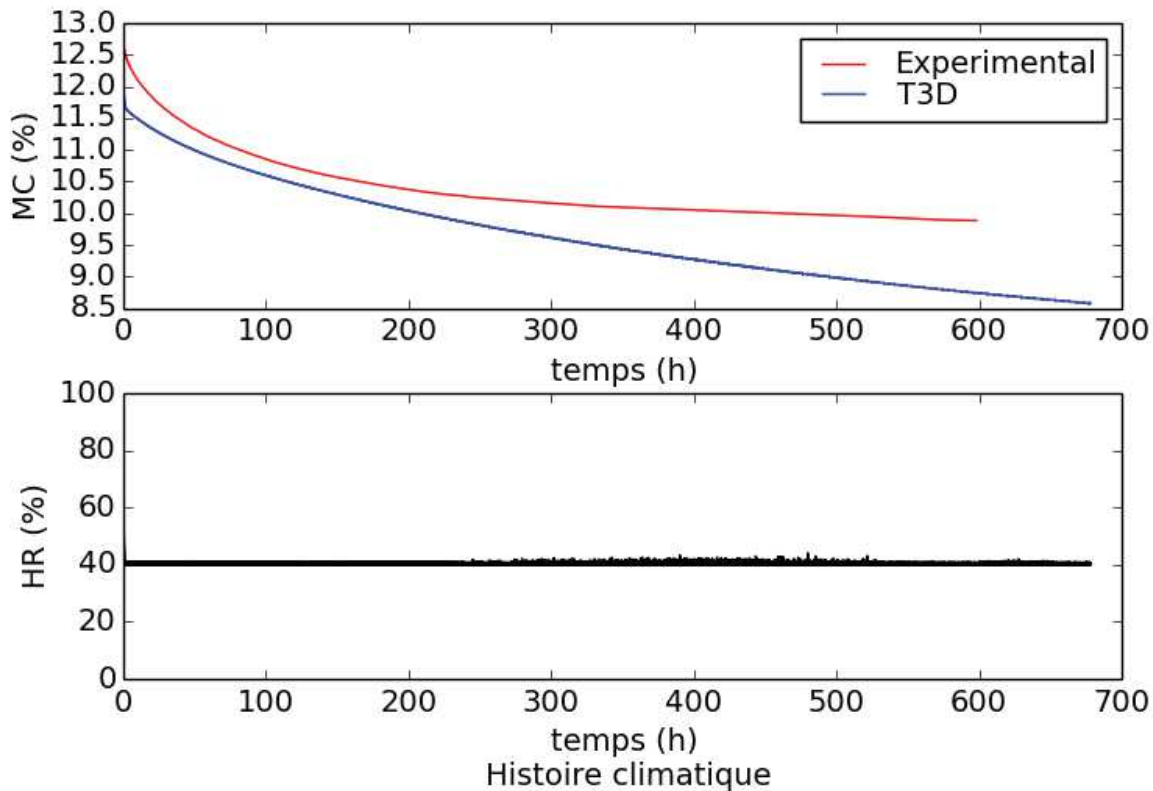


FIGURE 3.48 – Simulation TransPore3D et courbe expérimentale. Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier en fausse dosse, isolée hydriquement sur les faces latérales et avec une couche préparatoire sur une face, lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C.

Alors que jusqu'à présent, la simulation TransPore 3D décrivait une cinétique plus rapide de diffusion, dans ce cas, la cinétique est plus rapide dans le cas réel (la pente de la courbe expérimentale est plus élevée que celle de la courbe simulée). Outre le problème de description générale de la sorption du bois (équation de sorption non adaptée à notre cas), cette différence de comportement pourrait indiquer que la couche préparatoire appliquée à la planche – modélisée par un flux nul dans TransPore – n'est pas aussi imperméable que prévu.

Désorption de la planche avec renforts

Les conditions limites, dans ce cas-ci, sont les mêmes que celles de la planche avec une couche préparatoire, c'est-à-dire flux nul sur les faces latérales et la face avant.

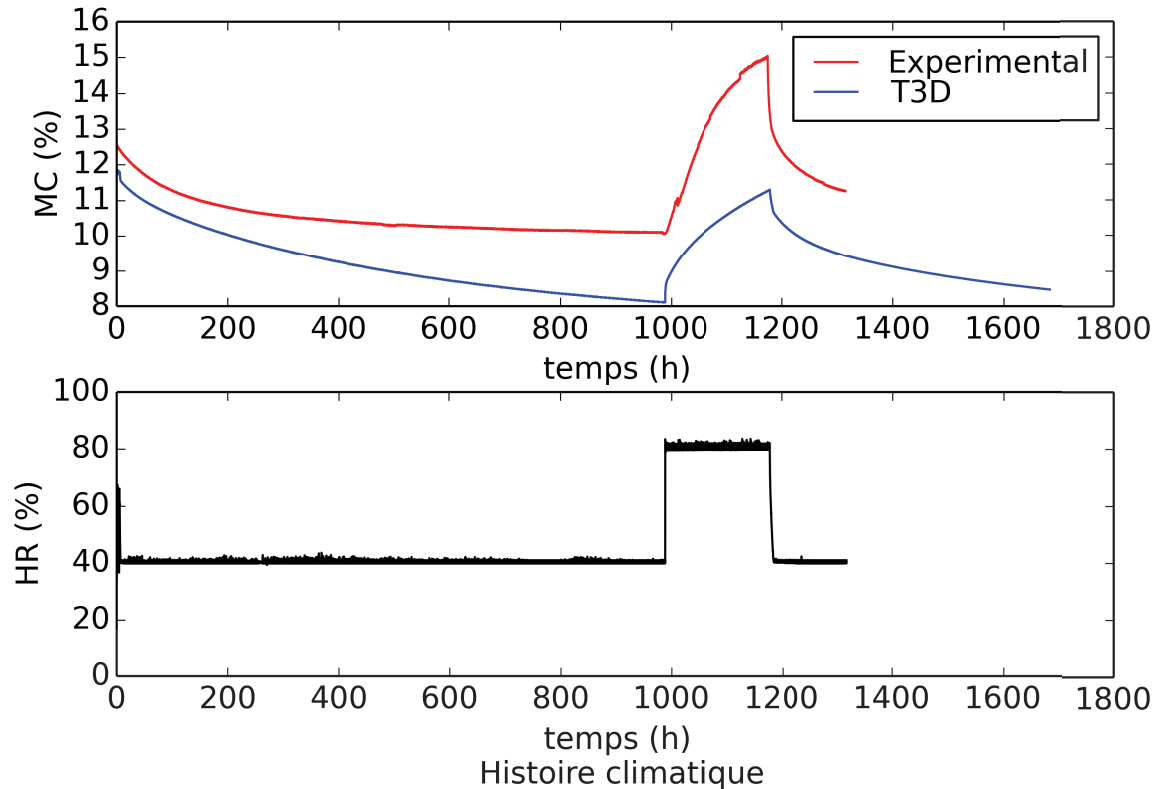


FIGURE 3.49 – Simulation TransPore3D. Évolution de l'humidité interne d'une planche de peuplier en faux-quartier, isolée hydriquement sur les latéraux, avec une couche préparatoire sur une face et possédant un renfort au revers, lors d'un séchage entre 60 et 40% HR, 20°C.

Comme avec les autres simulations, cet essai ne présente pas une loi de sorption adaptée à notre cas d'étude. Cependant, au delà de cette formulation de la sorption du bois, les simulations obtenues sont assez fidèles au comportement global du chemin de la teneur en eau. Avec la nouvelle architecture du logiciel TransPore, il est à présent plus simple de modifier cette loi de sorption et de développer de nouvelles approches pour l'hystérésis, par exemple.

Conclusion et perspectives

Ce travail de doctorat sur la mécanique du bois du patrimoine a permis d'aborder de nombreux domaines en physique et mécanique des matériaux. C'est la force des sciences du bois, la polyvalence de ce milieu permet de toujours apprendre et/ou approfondir un sujet. De plus l'étude de matériaux du patrimoine tels que les panneaux peints permet d'apporter une dimension culturelle et un savoir faire venant des restaurateurs important pour la pluridisciplinarité.

Dans l'étude de l'hygromécanique des panneaux de bois peints, un aspect encore assez mal connu est la connaissance des propriétés du bois ancien. Nous nous sommes donc intéressée à caractériser le phénomène de vieillissement du bois et à le comprendre d'un point de vue physico-chimique. L'approche abordée ici a été la compréhension du vieillissement par sa reproduction et donc sur son accélération. Deux approches ont été présentées. La première est le traitement hygro-thermique du bois. En effet, cette méthode est fréquemment utilisée pour améliorer la stabilité dimensionnelle du bois. Nous avons étudié les processus mis en jeu lors de traitements hygro-thermiques (à 120°C) et nous avons également étudié l'irréversibilité de ce phénomène après re-conditionnement. Nous avons pu vérifier que certains traitements présentaient une capacité de réduction de l'hygroscopicité du bois mais qui est partiellement temporaire. La seconde approche d'accélération du vieillissement a consisté à imposer des variations climatiques drastiques à 50°C. Ce chargement hydrique avait pour but de reproduire globalement des alternances été/hivers se produisant au cours de plusieurs années et ainsi altérer les sites de sorption du bois. Alors que la première méthode de vieillissement accéléré visait à détruire les sites de sorption par dégradation des hémicelluloses à haute température, la deuxième méthode visait plutôt l'altération des sites de sorption par alternance d'adsorption/désorption de l'eau. Ces deux méthodes ont provoqué effectivement la réduction de l'hygroscopicité du bois. Si notre but est de comprendre –et donc de reproduire – le vieillissement du bois, alors la deuxième méthode est plus proche du phénomène naturel, mais également moins efficace en terme d'accélération.

Avec nos travaux sur la compréhension de la mécanique du panneau peint sous fluctuation microclimatique nous avons été amenée à collaborer avec l'Institut Courtauld de Londres à travers l'étude des mécanismes de fissuration de la couche préparatoire. Cette étude nous a permis de mieux caractériser mécaniquement la couche préparatoire et comprendre le rôle des différents éléments intervenant dans cette couche. Nous avons donc pu quantifier le rôle de la toile dans la préparation de la couche préparatoire. Cette toile devait être utilisée comme

consolidant de la jointure de planches mais également comme élément permettant la réduction de la courbure globale du panneau lors d'une variation microclimatique. Or la réduction de la flèche centrale du panneau, que nous avons effectivement observée, s'accompagne d'une augmentation des déformations en surface, au niveau de la couche picturale. Un tel phénomène peut être très dangereux pour l'intégrité d'une œuvre. Par contre l'apport d'une couche d'imprimatura au blanc de plomb produit l'effet inverse : augmentation de la courbure mais diminution des déformations surfaciques. De plus, une des conclusions intéressantes de cette étude est le rôle de la rigidité de ces couches. On pourrait penser que le maintien mécanique d'un tableau est surtout donné par le support bois, or lors de la mesure des rigidités des différentes couches préparatoires, il s'avère que cette dernière peut être – à épaisseur égale – jusqu'à 10 fois plus grande que la rigidité du support en bois. Au vu des différences de rigidité des différentes formulations des couches préparatoires, il est difficile de prédire le comportement d'un panneau peint sans une caractérisation fine de la couche préparatoire. Cela rend l'interprétation et la prédiction du comportement d'un panneau peint difficile sans études préliminaires.

Après avoir étudié les propriétés du bois et de la couche préparatoire, nous avons mis en place une démarche de caractérisation hygromécanique à l'échelle de la structure au moyen d'une expérience sur un réplikat de panneau peint. Il est habituellement difficile d'avoir tous les paramètres hygromécaniques sur un panneau peint réel car certaines inconnues liées à des conditions limites particulières ne sont pas accessibles (telle que la perméabilité de la couche picturale par exemple). En plus de ce travail didactique de séparation du problème par condition limite, il semblait important après les travaux de Marcon (Marcon 2009) et Colmars (Colmars 2011) de vérifier expérimentalement leur modélisation du comportement mécanique des panneaux peints. Bien que la finalité de l'expérience n'a pas pu être mise en place (reproduction d'une courbure permanente, représentative des phénomènes complexes de mécanosorption du bois), la démarche de découplage du problème et la mise en place d'outils de mesure de champ adaptés à notre problématique reste intéressante et réutilisable dans le milieu de la conservation / restauration des panneaux peints. Il reste cependant quelque inconnue mécanique à résoudre dans l'approche que nous avons eu, comme par exemple, avoir une information sur l'arrière de la planche en même temps que l'avant.

Un autre outil puissant d'aide à la décision sur lequel nous avons travaillé est la simulation numérique. Bien au delà de notre problématique d'étude, la communauté des sciences du bois est en demande d'outils de simulation des phénomènes hydrique et mécanique. Nous avons pris le parti de travailler sur des outils déjà existants (et utilisés à l'époque par Marcon dans sa thèse), mais spécialisés pour des problèmes précis. Nous avons travaillé sur deux codes indépendants, le premier servant à simuler les phénomènes de transfert de masse et chaleur couplés dans un milieu poreux, TransPore, dans sa version 3D ; le deuxième permettant de simuler des chargements mécaniques dans des milieux poreux, LMGC90 (Renouf 2004), (Radjaï 2011) – utilisant la bibliothèque matériaux MatLib développée par Stainier (Ortiz 1999). Dans un premier temps, nous avons pris la décision de travailler de façon découpée entre les deux codes de calculs, utilisant le calcul TransPore comme chargement hydrique dans LMGC90. Le début de ce travail a donc été d'adapter TransPore à des cas plus généraux de simulation d'histoire climatique que ce pour quoi il avait été prévu au départ (le séchage industriel). Ce travail fini, nous aurions dû commencer à travailler sur LMGC90 pour l'adaptation de ce code à la problématique de la mécanique du bois. Or l'étape de vérification de nos calculs numériques avec

des cas expérimentaux (obtenus par essai sur le répliat de panneau peint) était loin d'être trivial pour des raisons d'états initiaux non comparables. De plus, la découverte trop tardive de problèmes dans la modélisation du phénomène d'hystérésis de sorption – implémenté dans TransPore à l'époque de la thèse de Colmars – ne nous a pas permis de pouvoir avancer correctement sur les autres difficultés numériques.

En somme, ce travail de thèse a été riche en collaborations et avancées scientifiques. Les outils d'aide à la décision pour guider les restaurateurs / conservateurs que nous avons choisi de développer tel que les mesures hygromécaniques et la simulation nécessitent encore du développement. Malheureusement, nous n'avons pas pu aller jusqu'au bout de notre démarche dans la simulation numérique. Notre volonté de livrer un outil de simulation numérique du comportement d'un panneau de bois sous fluctuation mécanique implémentable pour le plus grand nombre de cas n'a pas été un franc succès. Nous nous sommes heurtée à un trop grand nombre de difficultés numériques pour mener à bien cette entreprise. Cependant, la découverte, même tardive, de difficultés dans la modélisation de l'hystérésis de sorption peut être vue comme une avancée positive, car nous espérons que de nouveaux travaux pourront être prochainement lancés sur ce sujet. Donc pour la suite, nous préconisons effectivement une étude sur la modélisation de ce phénomène complexe, et la mise en place d'un projet (ou une thèse) dédié uniquement à la résolution et la mise en place d'un outil de simulation numérique de l'hygromécanique du bois. En ce qui concerne spécifiquement la problématique des panneaux peints, la récente collaboration avec le musée Fabre de Montpellier, nous permettrait de tester les outils de mesure de champ sur des tableaux *in-situ*. De plus, il serait bien que l'équipe puisse mettre en place un recensement systématique de traitement des cas d'étude (pouvant par la suite être utilisé pour la modélisation) sous forme de base de données. Ce projet avait été abordé lors de la thèse avec les restaurateurs rencontrés et proposé pour obtenir un financement, mais sans succès. Nous continuons à penser qu'il reste intéressant de recenser les pratiques de restauration afin de pouvoir faire avancer la problématique de façon plus globale.

Bibliographie

- Ahlgren 1972. L. Ahlgren. *Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial (Moisture fixation in porous building materials)*. Rapport technique Report 36, Division of Building Technology, The Lund Institute of Technology, Swenden, 1972.
- Ala 2000. Alaska State Museum. *Wise Guide*, division of libraries, archives and museums édition, 2000.
- Armstrong 1960. L. D. Armstrong et R.S.T. Kingston. *Effect of moisture changes on creep in wood*. Nature, vol. 185, no. 4716, pages 862–863, 1960.
- Aurand 2015. Alice Aurand. A re-evaluation of the mechanisms underlying relative humidity induced fatigue damage in panel paintings : the case of 14th century italian preparatory layers. Postgraduate diploma in the conservation of easel paintings, Courtauld Institute of Art, January 2015.
- Avramidis 2007. Stavros Avramidis. *Bound water migration in wood*. In Patrick Perré, editeur, Fundamentals of wood drying, chapitre 6. A.R.BO.LOR, Nancy, 2007.
- Barranger 2010. Yoann Barranger. *Apport des méthodes volumiques dans la confrontation théorie / expérience : application à la rupture fragile et aux contacts conformes*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2010.
- Barranger 2012. Yoann Barranger, Pascal Doumalin, Jean-Christophe Dupré et Arnaud Germaneau. *Strain measurement by digital image correlation : Influence of two types of speckle patterns made from rigid or deformable marks*. Strain, vol. 48, no. 1, pages 357–365, 2012.
- Beauhaire 1983. G. Beauhaire. *Analyse calorimétrique et thermogravimétrique appliquée aux polymères industriels*. In SNIAS Suresnes, page E9, Paris, 17 novembre 1983. conf. SFIP.
- Bergeon 1998. S. Bergeon, G. Emile Mâle, C. Huot et O. Baÿ. *The restoration of wooden painting Supports. Two hundred years of History in France*. In Kathleen Dardes et Andrea Rothe, editeurs, The structural Conservation of Panel Paintings - Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, April 1995, chapitre Part Three : History of the structural conservation of panel paintings, pages 264 – 288. The Getty Conservation Institute, 1998.

- Bernoulli 1748. D. Bernoulli. *Réflexion et éclaircissement sur les nouvelles vibrations des cordes exposées dans les mémoires de l'académie*. Royal Academy of Berlin, 1748.
- Bordonné 1989. Pierre Antoine Bordonné. *Module Dynamique et Frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
- Borrega 2010. Marc Borrega et Petri P. Karenlampi. *Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (Picea abies) wood*. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 68, pages 233 – 235, 2010.
- Brancheriau 2002. L. Brancheriau et H. Bailleres. *Natural vibration analysis of clear wooden beams : a theoretical review*. Wood Science and Technology, vol. 36, pages 347 – 365, 2002.
- Brancheriau 2010. Loïc Brancheriau, Clément Kouchade et Iris Brémaud. *Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods*. Journal of Wood Science, vol. 56, no. 5, pages 371–379, Avril 2010.
- Brémand 2011. Fabrice Brémand, Mario Cottron, Pascal Doumalin, Jean-Christophe Dupré, Arnaud Germaneau et Valéry Valle. *Mesures en mécanique par méthodes optiques*. Les Sélections Techniques de l'Ingénieur, Paris, techniques édition, 2011.
- Bret 1998. J. Bret, D. Jaunard et P. Mandron. *The conservation-restoration of wooden painting supports. Evolution of methods and current research in the Service de Restauration des Musée de France*. In Kathleen Dardes et Andrea Rothe, éditeurs, The structural Conservation of Panel Paintings - Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, April 1995, chapitre Part Three : History of the structural conservation of panel paintings, pages 252 – 263. The Getty Conservation Institute, 1998.
- Bruck 1989. H. A. Bruck, S. R. McNeill, Michael A. Sutton et W. H. Peters. *Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction*. Experimental Mechanics, vol. 29, pages 261–267, 1989.
- Cennini 1899. Cennino Cennini. *The book of art*. George Allen & Unwin, Ltd., London, 1899. editor : Brandstetter, Oscar.
- Choi 1991. D. Choi, J. L. Thorpe et R. B. Hanna. *Image analysis to measure strain in wood and paper*. Wood Science and Technology, vol. 25, pages 251–262, 1991.
- Choi 1997. S. Choi et S. P. Shah. *Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation*. Experimental Mechanics, vol. 37, no. 3, pages 307–313, Septembre 1997.
- Chu 1985. T. C. Chu, W. F. Ranson, Michael A. Sutton et W. H. Peters. *Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics*. Experimental mechanics, vol. 25, no. September, pages 232–244, 1985.

- Cocchi 2013. Linda Cocchi. *Tecniche avanzate per lo studio del comportamento strutturale dei dipinti su tavola*. PhD thesis, Università degli studi di Firenze, 2013.
- Cocchi 2014. Linda Cocchi, Bertrand Marcon, Paola Mazzanti, Luca Uzielli, Ciro Castelli et Andrea Santacesaria. *Verifica del funzionamento di una traversatura elastica applicata su un dipinto su tavola : la Deposizione dalla Croce di Anonimo abruzzese, XVI secolo*. OPD restauro, vol. 26, 2014.
- Colmars 2011. Julien Colmars. *Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patrimoine culturel : étude sur la courbure des panneaux peints*. PhD thesis, Université de Montpellier 2, 2011.
- Colville 1982. J. Colville, W. Kilpatrick et Marion F. Mecklenburg. *A finite element analysis of multi-layered orthotropic membrane with applications to oil paintings on fabric*. In N. S. Brommelle et G. Thomson, éditeurs, *Science and Technology in the Service of Conservation*. Preprints of the Washington Congress., pages 150–156, London, 1982. International Institute for the Conservation of Artistic and Historic Works (IIC).
- Crawshaw 2000. J. Crawshaw et R.E. Cameron. *A small angle X-ray scattering study of pore structure in Tencel® cellulose fibres and the effects of physical treatments*. *Polymer*, vol. 41, no. 12, pages 4691–4698, Juin 2000.
- Erhardt 1995. David Erhardt, Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa et Mark McCormick-Goodhart. *The Determination of Allowable RH Fluctuations*. WAAC Newsletter, vol. 17, no. 1, page 19, January 1995.
- Erhardt 2007. David Erhardt, Charles S. Tumosa et Marion F. Mecklenburg. *Applying science to the question of museum climate*. In T. Padfield et K. Borchersen, éditeurs, *Museum Microclimates*. National Museum of Denmark, 2007.
- Esteban 2005. L. G. Esteban, J. Gril, P. De Palacios De Palacios et A. Guindeo Casasús. *Reduction of wood hygroscopicity and associated dimensional response by repeated humidity cycles*. *Annal of Forest Science*, vol. 62, no. 3, pages 275 – 284, 2005.
- Froidevaux 2012. Julien Froidevaux. *Wood and paint layers aging and risk analysis of ancient panel painting*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 2012.
- Ganne-Chédeville 2012. Christelle Ganne-Chédeville, Anna-Stiina Jääskeläinen, Julien Froidevaux, Mark Hughes et Parviz Navi. *Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVR spectroscopy*. *Holzforschung*, vol. 66, pages 163–170, 2012.
- Gauvin 2014. Cécilia Gauvin, Delphine Jullien, Pascal Doumalin, Jean-Christophe Dupré et Joseph Gril. *Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood*. *Strain*, vol. 50, no. 5, pages 428 – 436, 2014.
- Graindorge Lamour 2012. Jonathan Graindorge Lamour. *Conservation-restauration du support de "La mort de Cléopâtre", peinture à l'huile sur bois de Girolamo Marchesi da Cotignola, XVIe siècle (musée Baron Gérard, Bayeux)*. Etude du comportement

- hygromécanique du renfort actuel et de solutions de remplacement. Master's thesis, Institut National du Patrimoine, 2012.
- Gril 1988. Joseph Gril. *Une modélisation du comportement Hygro-rheologique du bois à partir de sa microstructure*. PhD thesis, Université Paris 6, 1988.
- Guitard 1987. Daniel Guitard. *Mécanique du matériau bois et composites*. CEPADUES Édition, 1987.
- Hailwood 1946. A. J. Hailwood et S. Horrobin. *Absorption of water by polymers : analysis in terms of a simple model*. Transactions of the Faraday Society, vol. 42, no. B, pages 84–92, 1946.
- Harrington 2002. Jonathan J. Harrington. *Hierarchical modelling of softwood hygro-elastic properties*. PhD thesis, University of Canterbury, 2002.
- Hearmon 1958. R. F. S. Hearmon. *The influence of shear and rotatory inertia on the free flexural vibration of wooden beams*. British journal of applied physics, vol. 9, pages 381 –388, 1958.
- Hunt 1999. David G. Hunt. *A unified approach to creep of wood*. Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 455, no. May, pages 4077–4095, 1999.
- Johansson 2006. Dennis Johansson. *Influences of drying on internal checking of spruce (Picea abies L.) heat-treated at 212°C*. Holzforschung, vol. 60, no. I, pages 558–560, 2006.
- Kroll 1951. K. Kroll et B. Hersfeld. *Die bewegung der feuchtigkeit in nadelholz wahrend der trucknung bei temperature um 100° C. Zweiter teil : die besonderen bewegungsvorgange in nadelholz*. Holz Als Roh- Und Werkstoff, vol. 9, no. 6, pages 216 – 224, 1951.
- Lee 1994. R.-S. Lee et Q.-C. Hsu. *mage-processing system for circular-grid Analysis in sheet-metal forming*. Experimental Mechanics, vol. 34, no. 2, pages 108 – 115, 1994.
- Marcon 2009. Bertrand Marcon. *Hygromécanique des panneaux en bois et conservation du patrimoine culturel*. PhD thesis, Université de Montpellier 2, Università degli studi di Firenze, 2009.
- Marcon 2012. Bertrand Marcon, Paola Mazzanti, Luca Uzielli, Linda Cocchi, David Durisseix et Joseph Gril. *Mechanical study of a support system for cupping control of panel paintings combining crossbars and springs*. Journal of Cultural Heritage, vol. 13S, no. 3, page S109–S117, 2012.
- Marcon 2015. Bertrand Marcon, Linda Cocchi, Paola Mazzanti et Luca Uzielli. *Methodology for the design of crossbeams and springs system for cupping control of wooden panel paintings*. In EuroMech 556 : Theoretical, Numerical and Experimental Analyses in Wood Mechanics, Dresden, Germany, 27–29 May 2015.
- Marette 1961. Jacqueline Marette, Germain Bazin et Clément Jacquot. *Connaissance des primitifs par l'étude du bois du xiie au xvie siècle*. Picard, Paris, 1961.

- Martens 2012. Marco Hendrikus Jozef Martens. *Climate risk assessment in museums*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2012.
- Mazzanti 2007. Paola Mazzanti. *Studio del comportamento reologico del legno di Pioppo bianco (Populus alba L.) in direzione trasversale alla fibratura*. PhD thesis, Università degli studi di Firenze, 2007.
- Mazzanti 2010. Paola Mazzanti. *A review on Compression Set Shrinkage related to the mechanics of wooden painted panels*. In COST Action IE 0601, International Conference, Izmir, 20-22 October 2010 (?), 2010.
- Mazzanti 2012. Paola Mazzanti, Marco Togni et Luca Uzielli. *Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain*. Journal of Cultural Heritage, vol. 13S, no. 3, pages S85–S89, 2012.
- Mecklenburg 1998. M. F. Mecklenburg, Charles Tumosa et David Erhardt. *Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity*. In Valerie Dorge et F. Carey Howlett, éditeurs, Painted Wood : History and Conservation, chapitre Part VI : Scientific Research, pages 464 – 483. Getty Conservation Institute, 1998.
- Merakeb 2006. Seddik Merakeb. *Modélisation des structures en environnement variable*. PhD thesis, Université de Limoges, 2006.
- Merrifield 1967. Mary Merrifield. *Original treatises on the arts of painting : bolognese manuscript, volume 2*. Dover Publications, New York, 1967.
- Metwalli 1987. S.M. Metwalli, A.R. Ragab, A.H. Kamel et A. Abdul Saheb. *Determination of plastic stress-strain behavior by digital-image-processing techniques*. Experimental Mechanics, vol. 27, no. 4, pages 414 – 422, 1987.
- Michalski 2000. S. Michalski. *Guidelines for Humidity and Temperature in Canadian Archives*. Rapport technique, Canadian Conservation Institute, Department of Canadian Heritage, 2000.
- Mohen 2006. J.P. Mohen, M. Menu et B. Mottin, éditeurs. *Au cœur de la joconde*. Gallimard, Paris, 2006.
- Montero 2010. Cédric Montero. *Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 2010.
- Navi 2005. Parviz Navi et Frédéric Heger. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2005.
- Navi 2011. Parviz Navi et Dick Sandberg, éditeurs. *The thermo-hydro-mechanical processing of wood, chapitre Chapter 5 : Influence of the THM processing parameters on the mechanical and chemical degradation of wood*. Taylor & Francis Group, 2011.
- Obataya 2002. E. Obataya et B. Tomita. *Hygroscopicity of heat-treated wood II. Reversible and irreversible reduction in the hygroscopicity of wood due to heating*. Mokuzai Gakkaishi, vol. 48, pages 288 – 295, 2002. en Japonais.

- Obataya 2007. Eiichi Obataya. *Characteristics of aged wood and Japanese traditional coating technology for wood protection*. In Actes de la journée d'étude Conserver aujourd'hui : les « vieillissement » du bois, pages 26–43, Cité de la Musique, 2007.
- Ortiz 1999. Michael Ortiz et Laurent Stainier. *The variational formulation of viscoplastic constitutive updates*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 171, no. 3, pages 419 – 444, 1999.
- Peralta 1995. Perry N. Peralta. *Sorption of moisture by wood within a limited range of relative humidities*. Wood And Fiber Science, vol. 27, no. 1, pages 13–21, 1995.
- Perré 1987. Patrick Perré. *Le séchage convectif de bois résineux : Choix, validation et utilisation d'un modele*. PhD thesis, Université Paris VII, 1987.
- Perré 1990. Patrick Perré et A. Degiovanni. *Simulation par volume finis des transferts couplés en milieux poreux anisotrope : séchage du bois à basse et à haute température*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 33, no. 11, pages 2463–2478, 1990.
- Perré 1999. Patrick Perré et Ian W. Turner. *A 3-D version of TransPore : A comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 42, pages 4501–4521, 1999.
- Perré 2007. Patrick Perré et Ian Turner. *Coupled heat and mass transfer*. In Patrick Perré, éditeur, Fundamentals of wood drying, chapitre 10. A.R.BO.LOR, Nancy, 2007.
- Popescu 2009. Carmen-Mihaela Popescu, Carmen-Mihaela Tibirna et Cornelia Vasile. *XPS characterization of naturally aged wood*. Applied Surface Science, vol. 256, 2009.
- Rachwał 2012. Bartosz Rachwał. *Modelling of response of polychrome wood to climatic variations*. PhD thesis, Polish Academy of Sciences, 2012.
- Radjaï 2011. F. Radjaï et F. Dubois, éditeurs. Discrete numerical modeling of granular materials. Wiley-Iste, March 2011. 496 pp.
- Rémond 2004. Romain Rémond. *Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées*. PhD thesis, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 2004.
- Renouf 2004. M. Renouf. *Optimisation Numérique et Calcul Parallèle pour la simulation des milieux divisés bi- et tridimensionnels*. PhD thesis, Université de Montpellier 2, 2004.
- Richardson 2007. Clare Richardson et David Saunders. *Acceptable light damage. A preliminary investigation*. Studies in Conservation, vol. 52, pages 177–187, 2007.
- Rotinat 2011. R. Rotinat, R. Tie Bi, V. Valle et J.-c. Dupre. *Three optical procedures for local large-strain measurement*. Strain, vol. 37, no. 3, pages 89 – 98, 2011.

- Rowell 2009. Roger M. Rowell, Rebecca E. Ibach, James McSweeney et Thomas Nilsson. *Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood*. Wood Material Science & Engineering, vol. 4, no. 1 - 2, pages 14 – 22, 2009.
- Sabbioni 2010. C. Sabbioni, P. Brimblecombe et M. Cassar, éditeurs. The atlas of climate change impact on cultural heritage : Scientific analysis and management strategies. Anthem Press, London, 2010.
- Salmén 1982. L. Salmén. *Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based materials*. PhD thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, 1982.
- Salmén 1986. L. Salmén, P. Kolseth et M. Rigdahl. *Modelling of small-strain properties and environmental effects on paper and cellulose fiber*. In N.L. Salmén, A. de Ruvo, J.C. Seferis et E.B. Stark, éditeurs, Composite system from natural and synthetic polymers, pages 211 – 223. Elsevier Science Publisher B.V, Amsterdam, 1986.
- Siau 1984. John F. Siau. Transport processes in wood. Springer-Verlag, 1984.
- Sik 2010. Hueisheng Sik et Khenkten Choo. *The influence of drying temperature on the hygroscopicity of rubberwood (hevea brasiliensis)*. Journal of Agricultural Science, vol. 2, no. 1, pages 48 – 58, 2010.
- Simpson 1999. William Simpson et Anton TenWolde. *Physical properties and moisture relations of wood*. In Wood handbook : wood as an engineering material, chapitre 3, pages 3.1–3.24. Forest Products Laboratory, Madison, department édition, 1999.
- Skaar 1979. C. Skaar. *Moisture sorption hysteresis in wood*. In Symposium on Wood Moisture Content – Temperature and Humidity Relationships. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1979.
- Skaar 1988. Christen Skaar. Wood-water relations. Science, Springer Series in Wood, 1988.
- Sonderegger 2015. Walter Sonderegger, Katalin Kránitz, Claus-Thomas Bues et Peter Niemz. *Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood*. Journal of Cultural Heritage, vol. en cours de publication, 2015.
- Stamm 1961. A. J. Stamm et R. M. Jr. Nelson. *Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine*. Forest Products Journal, pages 536 – 543, November 1961.
- Thomson 1986. G. Thomson. The museum environment. Butterworths, London, 1986.
- Time 1998. Berit Time. *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- Timoshenko 1939. S. Timoshenko. Théorie des vibrations à l’usage des ingénieurs. Librairie Polytechnique CH. Béranger Eds, Paris et Liège, 1939.

- Uzielli 1998. Luca Uzielli. *History of Panel-Making Techniques in Central Italy*. In Kathleen Dardes et Andrea Rothe, éditeurs, *The structural Conservation of Panel Paintings - Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, April 1995*, chapitre Part Two : *History of Panel-Making Techniques*, pages 110 – 135. The Getty Conservation Institute, 1998.
- Véliz 1998. Zahira Véliz. *Wooden Panels and Their Preparation for Painting from the Middle Ages to the Seventeenth Century in Spain*. In Kathleen Dardes et Andrea Rothe, éditeurs, *The structural conservation of panel paintings : proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum, 24-28 April 1995*, chapitre Part Two : *History of Panel-Making Techniques*, pages 136 – 148. The Getty Conservation Institute, 1998.
- Wadum 1998. Jørgen Wadum. *Historical Overview of Panel-Making Techniques in the Northern Countries*. In Kathleen Dardes et Andrea Rothe, éditeurs, *The Structural Conservation of Panel Paintings - Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, April 1995*, chapitre Part Two : *History of Panel-Making Techniques*, pages 149 – 177. The Getty Conservation Institute, 1998.
- Weise 1998. U Weise. *Hornification : mechanisms and terminology*. *Paperi Ja Puu-Paper And Timber*, vol. 80, pages 110 – 115, 1998.
- Whitaker 1977. S. Whitaker. *Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : a theory of drying*. In *Advances in heat transfer*, volume 13, pages 119 – 203. Academic Press, New-York, 1977.
- Whitaker 1980. S. Whitaker. *Heat and mass transfer in granular Porous media*. In *Advances in drying*, volume 1, chapitre 2, pages 23 – 61. Hemisphere Publishing Company, 1980.
- Yokoyama 2009. Misao Yokoyama, Joseph Gril, Miyuki Matsuo, Hiroyuki Yano, Junji Sugiyama, Bruno Clair, Sigeru Kubodera, Takumi Mitsutani, Minoru Sakamoto, Hiro-masa Ozaki, Mineo Imamura et Shuichi Kawai. *Mechanical characteristics of aged hinoki wood from japanese historical buildings*. *Comptes Rendus Physique*, vol. 10, no. 7, pages 601–611, Septembre 2009.

Annexes

1. Fiche Technique du caoutchouc naturel

Descriptif du Latex

1- IDENTIFICATION DE LA PREPARATION ET DE LA SOCIETE RESPONSABLE DE SA MISE SUR LE MARCHÉ

SUBSTANCE	Latex Naturel 60% Centrifugé "ED&F MAN" ou - Haute teneur en ammoniac (HA or FA) - Basse teneur en ammoniac (TZ) Latex Naturel crémé HA "ED&F MAN"
UTILISATIONS	Produits trempés, adhésifs, mousses
SOCIÉTÉ	ED&F MAN France 11, quai de Dion Bouton 92800 Puteaux – France tel : 01 46 25 43 00 fax : 01 46 25 43 96

APPEL D'URGENCE : ORFILA : 01 45 42 59 59

2- COMPOSITION / INFORMATIONS SUR LES COMPOSANTS

Particules de caoutchouc naturel (*Cis 1-4 Polyisoprene*) en dispersion dans une solution aqueuse, stabilisée à l'ammoniac (en solution aqueuse) ou par un mélange d'ammoniac, de Disulfure de bis (*N,N*-diméthylthiocarbamyle) (TMTD) et d'oxyde de zinc (ZnO)

<u>Composition :</u>		CAS :	EINECS	Classification	
Cis 1-4 Polyisoprene		9006-04-6	232-689-0		
et des agents stabilisants :					
HA : Haute teneur en	Ammoniac : 0.6% min	1336-21-6	215-647-6	C; R34 - N; R50	<1%
TZ : Basse teneur en	Ammoniac : 0.29% max	1336-21-6	215-647-6	C; R34 - N; R50	<1%
	TMTD : 0.025%	137-26-3	205-286-2	Xn; R20/22-48/22 Xi; R36/38 - R43 N; R50-53	<1%
	ZnO : 0.025%	1314-13-2	215-222-5	N; R50-53	<1%

3- Propriétés physico-chimiques

ETAT PHYSIQUE :	Liquide
COULEUR :	Blanc
ODEUR :	Ammoniac
TEMPERATURE :	
.Point de distillation :	100°C
.Décomposition	Supérieure à 200°C
PH :	9.8 - 10.8
SOLUBILITE :	Miscible dans l'eau
DENSITE À 20°C :	0.95g/cm ³ environ

Résumé

De nombreux objets en bois ancien posent des difficultés de conservation et de restauration. En plus des problèmes liés au vieillissement naturel du bois, la conservation et la restauration des panneaux peints sont des exercices délicats de mise en œuvre, à cause des phénomènes complexes d'échanges hydriques asymétriques entre la couche picturale et le revers du tableau. Les restaurateurs du patrimoine ont cherché à éliminer la courbure du panneau par humidification et pression progressive afin de renforcer et aplanir le panneau ; ou simplement, en termes d'acte de restauration, par amincissement par l'arrière du support du tableau puis collage sur un support rigide. Entre manipulations malheureuses et stockage dans des conditions non contrôlées, cela a eu pour conséquence l'écaillage et la perte partielle de la couche picturale de certains d'entre eux, sans oublier l'initiation de fissures. Ainsi, les objets du patrimoine que nous manipulons sont des témoins précieux à la fois d'un art, d'une époque et d'un comportement à long terme du matériau considéré.

Nous nous sommes intéressée, dans un premier temps, à la compréhension plus fondamentale du vieillissement du bois. Pour cela nous avons traité hygro-thermiquement à 120°C à différentes humidités et à 50° par cycles d'humidité des échantillons de peuplier (*Populus alba*). Nous avons pu mettre en avant les processus physico-chimiques et également le phénomène de réversibilité des traitements hygro-thermiques. Puis nous avons étudié le comportement d'une partie d'un panneau peint, afin d'étudier relation bois - couche préparatoire. Nos résultats montrent que les couches préparatoires ont un comportement hygromécanique bien différent les unes des autres, et qu'il est important de connaître la composition fine de ces couches avant de pouvoir analyser le comportement global du panneau peint. Enfin, nos travaux ont concerné l'étude expérimentale, basée sur des mesures de masse en continu et des mesures de champ de déformation par stéréo-corrélation, et la simulation du comportement hygromécanique d'un panneau de bois soumis à des fluctuations hygrothermiques. Nous avons pu découpler d'un point de vue expérimental les différents composants intervenant dans l'hygromécanique du panneau peint, et nous avons œuvré pour la mise en place d'un outil de simulation numérique pouvant rendre compte des phénomènes observés. Ce travail de thèse présente donc d'un point de vue fondamental le comportement d'un panneau de bois soumis à des variations d'humidité, en lien avec les acteurs de la préservation du patrimoine (conservateurs, restaurateurs, scientifiques spécialisés dans ce domaine...) dans le but de développer des outils d'aide à la décision.

Mots clefs : hygromécanique, panneau peint, bois, conservation, patrimoine.

Abstract

Conservation or restoration of many ancient wooden artefacts such as panel paintings is made difficult. In addition by issues linked to wood ageing, but also by the delicate situations originating from asymmetrical moisture transfer phenomena through surface layer and wooden substrate. Conservators have tried to eradicate panels curvatures by moistening and flattening by pressure; or simply in term of restoration act, by panel thinning followed by gluing on a rigid support. Between fortunate handling and absence of environmental control, some paint layers flaked material was partially lost, cracks opened. Indeed, the artefacts from cultural heritage that we handle are the witness of ancient times and practices, and may provide keys to the understanding of long-term behaviour of wooden structures.

First, we have focused on the basic understanding of wood aging, we have made hygro-thermal treatment at 120°C for several humidities and at 50°C by hydric cycles on poplar samples (*Populus alba*). We underlined physical and chemical process and the reversible effect of heat-treated wood. Then we studied the behaviour of a painted panel part, and the relation between wood and preparatory layer. Our work shows clearly that the hygromechanical behaviour of the preparatory layer is very dependent on its composition, and that it is important to know precisely the layer composition before being able to analyse the global behavior of a panel painting. Finally, our work concerned experimental and numerical study of hygromechanical behaviour of a wooden panel, based on continuous mass weighting and measurement of strain by stereo-correlation during hygrothermal fluctuations of the environment. We decoupled experimentally the different components occurring in hygromechanics of panel painting, and we worked to set up a numerical tool allowing the simulation of observed phenomena. This thesis presents, on a fundamental point of view, the wooden panel behavior under climatic fluctuations, linking with cultural conservator actors (such as curators, conservators, scientists from cultural heritage ...) in order to develop tools to decision help.

Key words : hygromechanics, painted panel, wood, conservation, historical heritage.

