



**HAL**  
open science

# Le bois, matériau : du cœur de l'arbre au cœur des sociétés humaines

Delphine Jullien

► **To cite this version:**

Delphine Jullien. Le bois, matériau : du cœur de l'arbre au cœur des sociétés humaines. Matériaux. Université de Montpellier, 2020. tel-04729639

**HAL Id: tel-04729639**

**<https://hal.science/tel-04729639v1>**

Submitted on 10 Oct 2024

**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 de Montpellier



Centre National de  
Recherche Scientifique



Laboratoire de Mécanique  
et Génie Civil de Montpellier

# Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité Mécanique, Génie Mécanique et Génie Civil

## Le bois, matériau : du cœur de l'arbre au cœur des sociétés humaines

---

Présentée par

**Delphine JULLIEN**

Soutenue le 26 Novembre 2020 devant le jury composé de :

Isabelle THÉRY-PARISOT	Directeur de Recherches CNRS, CEPAM, Université de Nice – Présidente
Mériem FOURNIER	Professeur des Universités, UMR Silva, Agroparistech Nancy - Rapporteuse
Romain RÉMOND	Maître de Conférences HDR, ENSTIB, Université de Lorraine - Rapporteur
Marina BOUSVAROU	Chargée des campagnes de restauration et du cabinet des arts graphiques, Musée Fabre, Montpellier - Examinatrice
Frédéric DUBOIS	Professeur des Universités, LGC2D, Université de Limoges - Examineur
Joseph GRIL	Directeur de Recherches CNRS, Institut Pascal, Université Clermont Auvergne - Examineur
Bernard THIBAUT	Directeur de Recherches émérite, LMGC, Université de Montpellier - Examineur
Luca UZIELLI	Professeur émérite, DAGRI, Université de Florence, Italie – Examineur



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Notice Individuelle</b>	<b>9</b>
1.1	Titres et diplômes	9
1.2	Expériences professionnelles	9
1.3	Thèmes de Recherche	9
<b>2</b>	<b>Activités pédagogiques</b>	<b>10</b>
2.1	En bref	10
2.2	Enseignements effectués	10
2.2.1	À l'École Supérieure de l'Énergie et des Matériaux à Orléans en 1997-1998	10
2.2.2	À l'Université de Montpellier de 1998 à 2020	11
2.2.2.1	Niveau Licence 1	11
2.2.2.2	Niveau Licence 2	11
2.2.2.3	Niveau Licence 3	11
2.2.2.4	Niveau Master 1	11
2.2.2.5	Niveau Master 2	11
2.2.2.6	Enseignements des 6 dernières années	12
2.3	Direction et animations de formation	12
2.4	Rayonnement et activités internationales	13
2.5	Responsabilités collectives	13
<b>3</b>	<b>Activités exercées en lien avec la recherche</b>	<b>14</b>
3.1	Publications et production scientifique	14
3.1.1	Thèse de doctorat	14
3.1.2	Articles dans des revues à comité de lecture (13)	14
3.1.3	Coordination de chapitre d'ouvrage (1)	15
3.1.4	Contribution à ouvrage édité (4)	15
3.1.5	Congrès internationaux (46)	15
3.1.6	Congrès nationaux (18)	19
3.1.7	Diffusion scientifique (12)	20
3.2	Encadrement doctoral et scientifique	21
3.2.1	Participation à l'encadrement de thèses (6)	21
3.2.2	Encadrement de post-doctorats	22
3.2.2.1	Travaux en cours ou prévus (2)	22
3.2.2.2	Travaux terminés (2)	22
3.2.3	Encadrement ou co-encadrement de stages	22
3.2.3.1	Travaux en cours ou prévus (2)	22
3.2.3.2	Travaux terminés ou soutenus (20)	22
3.2.3.3	Encadrement de projets (8)	24
3.3	Récapitulatif	25
3.4	Diffusion des travaux (rayonnement et vulgarisation)	25
3.4.1	Diffusion de la connaissance dans le milieu socio-économique (11)	25
3.4.2	Actions de promotion de la science	26
3.5	Responsabilités scientifiques	27
3.5.1	Porteur de projet / Partenariat	27
3.5.2	Participation à l'organisation de colloques	28
3.5.3	Réseau international	29
3.5.4	Réseau national	29
3.5.5	Expertises / évaluations	29
3.5.5.1	Évaluation de projet	29
3.5.5.2	Évaluation d'organisme français	29
3.5.5.3	Membre de jury de recrutement	30
3.5.5.4	Membre de jury de diplôme	30
3.5.5.5	Relecture d'articles scientifiques	30

3.5.6	<i>Vie du laboratoire</i> .....	30
<b>Travaux de Recherche</b> .....		<b>31</b>
<b>Introduction</b> .....		<b>31</b>
<b>Partie A : Le bois vert</b> .....		<b>32</b>
<b>1</b>	<b>Le bois vert, bois dans l'arbre</b> .....	<b>32</b>
1.1	La mise en place des contraintes de croissance.....	32
1.2	Les conséquences des contraintes de croissance pour l'arbre .....	33
1.3	Mise en évidence des contraintes de croissance dans l'arbre sur pied .....	34
1.3.1	<i>La méthode du trou unique</i> .....	34
1.3.2	<i>La méthode des deux rainures</i> .....	36
1.3.3	<i>A une échelle beaucoup plus fine : par microdiffraction de rayons X</i> .....	37
1.4	Mise en évidence des contraintes de croissance après abattage de l'arbre .....	38
1.4.1	<i>Phénomène de fissuration à cœur</i> .....	38
1.4.2	<i>Profil de déformations résiduelles longitudinales, du cœur à la périphérie de l'arbre</i> .....	39
1.4.2.1	Mesures sur planche diamétrale et modélisation.....	39
1.4.2.2	Mesures sur tige progressivement réduite en diamètre.....	42
1.4.3	<i>Déformations résiduelles transverses instantanées : méthode de la fermeture</i> .....	43
1.4.4	<i>Déformations hygrothermiques</i> .....	45
1.4.5	<i>Déformation transverse globale et tendance à la fissuration</i> .....	46
1.5	Conclusion et perspectives.....	46
1.6	Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre.....	47
<b>Partie B : Le bois « sec à l'air »</b> .....		<b>51</b>
<b>2</b>	<b>Le bois hors de l'arbre, cas du séchage</b> .....	<b>51</b>
2.1	Mesures sur rondelles .....	51
2.2	Mesures sur rondins.....	54
2.3	A l'échelle moléculaire : comportement de la cellulose du bois pendant le séchage .....	56
2.4	Conclusion et perspectives.....	58
2.5	Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre.....	58
<b>Partie C : Le bois, matériau hygroscopique</b> .....		<b>60</b>
<b>3</b>	<b>Les objets en bois du patrimoine</b> .....	<b>61</b>
3.1	Contexte scientifique et mise en place d'un réseau .....	61
3.2	Problématique des panneaux de bois peints du patrimoine.....	64
3.3	Suivi d'une œuvre sous haute surveillance .....	65
3.4	Réponse instantanée d'une œuvre à un acte de restauration .....	67
3.5	Suivi des déformations d'un panneau dans une ambiance de conservation.....	69
3.6	Suivi des déformations d'un panneau soumis à une hygrométrie contrôlée .....	73
3.6.1	<i>Dispositif expérimental mis en œuvre</i> .....	74
3.6.1.1	Description du panneau.....	74
3.6.1.2	Vitrine contrôlée en humidité .....	75
3.6.1.3	Pesée continue du panneau .....	75
3.6.1.4	Mesures de relief et déformations .....	76
3.6.1.5	Les différentes configurations et chargement .....	77
3.6.2	<i>Résultats et analyses</i> .....	78
3.6.2.1	Quelques résultats expérimentaux relatifs à la 1 <sup>ière</sup> période de mesure.....	78
3.6.2.2	Évaluation de la rigidité du panneau .....	82
3.6.2.3	Modèle numérique du panneau et son parquetage.....	83
3.6.2.4	Suivi du déparquetage du panneau .....	84
3.6.2.5	Modèle numérique pour simuler l'opération de déparquetage.....	86
3.6.2.6	Caractérisation du badigeon.....	87

3.6.3	<i>Conclusions</i> .....	88
3.7	Suivi de forme et masse en continu après restauration du support.....	89
3.7.1	<i>Description du panneau et de son support</i> .....	89
3.7.2	<i>Protocole expérimental et mesures</i> .....	90
3.7.3	<i>Conclusion</i> .....	92
3.8	Conclusion.....	92
3.9	Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre.....	94
<b>4</b>	<b>Étude sur échantillons et répliques</b> .....	<b>97</b>
4.1	Etude comparative de doublages pour le choix d'une restauration de support et suivi de restauration.....	97
4.1.1	<i>État structural de l'œuvre – Démarche adoptée</i> .....	99
4.1.2	<i>Analyse du rôle des renforts présents (renforts châtaignier)</i> .....	101
4.1.3	<i>Comportement des doublages balsa</i> .....	103
4.1.3.1	<i>Cinétique d'adsorption d'eau des doublages et/ou peintures</i> .....	103
4.1.3.2	<i>Perte en eau des échantillons au cours des cycles</i> .....	103
4.1.3.3	<i>Déformations des échantillons doublés de balsa</i> .....	104
4.1.4	<i>Comparaison de l'ensemble des doublages</i> .....	105
4.1.4.1	<i>Déformations des faces peintes</i> .....	105
4.1.4.2	<i>Déformations mesurées dans l'épaisseur des échantillons à la suite des cycles par corrélation d'images</i> .....	106
4.1.4.3	<i>État mécanique des échantillons à la suite des cycles</i> .....	108
4.1.5	<i>Restauration du panneau</i> .....	109
4.1.6	<i>Conclusions</i> .....	111
4.2	Contribution de la structure multicouche d'un panneau.....	112
4.3	Une réplique de panneau peint.....	114
4.3.1	<i>Protocole expérimental</i> .....	114
4.3.2	<i>Mesures de masse</i> .....	115
4.3.3	<i>Mesures de déformations</i> .....	118
4.3.4	<i>Conclusion</i> .....	120
4.4	Publications et production scientifique liées à ce chapitre.....	121
<b>5</b>	<b>Bois de clarinettes</b> .....	<b>123</b>
5.1	Caractérisation physique de <i>Dalbergia Melanoxylon</i> .....	123
5.1.1	<i>Anatomie</i> .....	123
5.1.2	<i>Hystérésis de sorption</i> .....	124
5.1.3	<i>Variations dimensionnelles</i> .....	125
5.1.4	<i>Coefficients de diffusion</i> .....	126
5.2	Protocoles de séchage.....	127
5.3	Déformations hygroélastiques des clarinettes.....	127
5.4	Conclusion.....	128
5.5	Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre.....	128
<b>6</b>	<b>Bois des ruches</b> .....	<b>130</b>
6.1	Enquêtes auprès des apiculteurs et fabricants sur les bois utilisés pour les ruches.....	130
6.2	Climat hygrothermique à l'intérieur des ruches.....	131
6.3	Interaction entre odeurs des bois et occupants.....	133
6.3.1	<i>Infestation du varroa sur ruches en châtaignier et épicéa</i> .....	134
6.3.2	<i>Comportement du varroa faces aux odeurs</i> .....	135
6.4	Une plate-forme d'observation : la ruche plate.....	137
6.5	Conclusion et perspectives.....	139
6.6	Publications et production scientifique liées à ce chapitre.....	140
<b>7</b>	<b>Projet de Recherche et d'enseignement</b> .....	<b>142</b>
7.1	A travers la formation.....	142
7.2	A travers un projet d'équipe.....	143

7.3	À travers les projets dans lesquels je souhaite m'impliquer .....	146
<b>Conclusion</b>	.....	<b>150</b>

## Résumé

Ce document présente les activités d'enseignement et de recherche effectuées depuis l'obtention de mon doctorat de Mécanique. La notice individuelle rappelle rapidement mon parcours et les thèmes de recherche auxquels je participe. Une première partie est consacrée aux activités pédagogiques, décrivant les enseignements auxquels j'ai participé, et mentionnant mon implication dans la direction et l'animation de formation, ainsi que ma contribution au rayonnement de nos formations. Une seconde partie détaille mes activités en lien avec la recherche, listant l'ensemble des communications écrites et orales auxquelles j'ai participé, ainsi que les encadrements de doctorants et stagiaires auxquels j'ai contribué. J'ai également décrit les responsabilités scientifiques auxquelles j'ai pris part.

La partie suivante, plus conséquente, corps du document, décrit l'ensemble des travaux de recherche menés. Elle est organisée en 3 sous-parties, de tailles inégales : la première concerne le bois vert, la seconde le bois « sec à l'air » et la dernière le bois, matériau hygroscopique. Partant de l'état mécanique du bois dans l'arbre sur pied, gorgé d'eau, nous irons jusqu'à l'état du bois en utilisation, généralement soumis aux variations hygrothermiques de l'environnement. La dernière partie, plus conséquente, détaille les études menées sur trois types d'applications mettant notamment en jeu le comportement hygroscopique du bois, mais pas uniquement : les panneaux peints du patrimoine, les bois utilisés pour la facture de clarinettes, et les bois utilisés pour la fabrication des ruches. Je m'efforce de décrire ma contribution à ces différents thèmes d'étude, tout en mettant en avant les collaborations mises en œuvre lors du développement de ces thématiques. Ces collaborations sont le plus souvent interdisciplinaires, elles ont donc pour effet d'élargir le champ d'investigation, et peuvent parfois sembler éloignées du comportement mécanique du bois. Il n'en reste pas moins que ces champs d'étude restent toujours fortement liés aux *sciences du bois*, matériau biologique nécessitant une diversité de disciplines pour appréhender les multiples facettes de son comportement et de ses nombreuses utilisations.

Pour conclure, le projet d'enseignement et de recherche que je souhaite poursuivre est présenté.



## Remerciements

L'Habilitation à Diriger des Recherches est un exercice qui permet de faire le point sur l'avancement des recherches qui font suite à la thèse. Si on est vigilant, on réalise ce travail une dizaine d'années après le doctorat, les travaux sont encore relativement récents, la mémoire est encore bien présente. Ce n'était malheureusement pas mon cas. Il m'a été nécessaire de « fouiller » loin derrière pour me remémorer les différentes études que j'ai pu mener. Ce travail de mémoire n'est pas inintéressant, mais tout de même assez fastidieux.

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, que ce soit en termes de collaboration scientifique, de discussions scientifiques ou non, ou encore de soutien psychologique et d'aide à la motivation. En effet, les fonctions de maître de conférence nous amènent à être sollicités par de multiples tâches chronophages, il n'est pas simple de se dégager du temps pour finaliser un tel projet. Je suis très contente d'être allée jusqu'au bout !

Un grand merci également à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, et de participer à la soutenance et au jeu des questions-réponses.

Je ne remercierai pas les personnes (ou les programmes informatiques) malintentionnées qui ont tenté d'empêcher la soutenance de se tenir en visio en effectuant un zoombombing dès le début de la présentation. Merci aux collègues qui ont su être réactifs pour que la soutenance puisse se poursuivre correctement malgré tout.

# 1 Notice Individuelle

Delphine Jullien,  
51 ans,  
Maître de Conférences en Mécanique,  
LMGC, UMR 5508 Université de Montpellier-CNRS  
Responsable de l'équipe Bois.

## 1.1 Titres et diplômes :

- 1990 Licence de Mécanique – Université Bordeaux 1
- 1991 Maîtrise de Mécanique – Université Bordeaux 1 programme Erasmus à Hatfield Polytechnic (GB)
- 1992 DEA de Mécanique – Université Bordeaux 1 « Rupture de mèches SiC/SiC. Caractérisation de l'interface » dirigé par J. Lamon Laboratoire des Composites Thermo-Structuraux à Pessac (33).
- 1992-1995 Doctorat de Mécanique – Université Montpellier 2 « Analyse expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans un matériau élastique orthotrope élaboré par couches successives. Cas d'un disque de bois vert. » dirigé par B. Thibaut au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil à Montpellier.

## 1.2 Expériences professionnelles :

- 1996-1997 Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux (ESEM) à Orléans.
- depuis 1998 Maître de Conférences au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université de Montpellier, Equipe Bois.
- depuis Juillet 2017 Responsable de l'équipe Bois du LMGC.

## 1.3 Thèmes de Recherche :

- Analyse du comportement hygromécanique du bois pour la conservation/restauration des panneaux peints du patrimoine,
- Caractérisation des propriétés physiques de bois tropicaux utilisés en facture de clarinettes pour optimiser leur séchage,
- Biomécanique de l'arbre : contraintes de croissance et effet du vent,
- Matériau bois constitutif des ruches : interaction bois/santé des colonies d'abeilles

## 2 Activités pédagogiques

### 2.1 En bref

#### Modalités de service :

*Temps plein de septembre 1998 à août 2001*

*Temps partiel 80% de septembre 2001 à août 2015*

*Temps plein de septembre 2015 à aujourd'hui*

Mes activités d'enseignement ont démarré durant ma thèse sous forme de TD de Mécanique du Solide en Deug. Par la suite j'ai enseigné un an en tant qu'ATER à l'École Supérieure de l'Énergie et des Matériaux à Orléans (ESEM), où j'ai effectué des TD et TP de Mécanique des milieux continus en 1<sup>ière</sup> année, ainsi qu'une grande part de mon service sous forme d'encadrements de projets de 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> année, des projets souvent basés sur le calcul par éléments finis.

Suite à mon recrutement à l'université de Montpellier 2, je me suis efforcée d'enseigner en licence comme en master, sous forme de Cours, de TD et de TP, ainsi qu'en faisant du suivi de projet. Je me suis également impliquée dans le suivi de stages.

J'ai pris en charge pendant 5 ans la responsabilité de l'année de Master 1 de 2009 à 2014, mutualisée en partie avec les étudiants de 4<sup>ième</sup> année de Polytech Montpellier, parcours Mécanique et Interactions. Les effectifs variaient de 30 à 40 étudiants.

J'ai mis en place et participé en 2012 à un module « Sciences du bois » optionnel d'environ 50h, Parcours Mécanique et Interactions de Polytech' Montpellier, 5<sup>ième</sup> année, et faisant appel à 6 intervenants extérieurs, principalement des chercheurs. Ce module optionnel n'a pas été maintenu. J'ai alors construit en 2015 un module « Sciences du bois » d'environ 25h, obligatoire, s'adressant aux deux parcours du Master de Mécanique (environ 30 à 40 étudiants). Ce module va sans doute disparaître dans la prochaine habilitation pour laisser place à un projet de Master « Sciences du Bois » interdisciplinaire inédit, qui serait ouvert à des licences de plusieurs disciplines (biologie, chimie, mécanique, etc...) et qui vise à former des spécialistes dans l'ensemble des disciplines des sciences du bois. Ce projet est notamment porté par 2 collègues de l'équipe Bois.

Par ailleurs, depuis 2015, je participe à une unité d'enseignement d'ouverture aux étudiants de L1 en Sciences du vivant, qui concerne la « Biomécanique de l'arbre et du Bois », et s'adresse à environ 200 étudiants.

J'ai mis en place et pris en charge depuis 2013 les projets de « Modélisation et calcul scientifique » en laboratoire en Master 1, qui ont pour objectif de faire mener un projet aux étudiants, seul ou en groupe, en immersion pendant environ 5 semaines en laboratoire.

Je me suis aussi investie pour la réussite en L1, en proposant des cours de soutien. Je participe régulièrement à l'action « Lycéens à l'université » qui consiste à accueillir des lycéens de 1<sup>ière</sup> et Terminale dans nos enseignements de L1.

### 2.2 Enseignements effectués

#### 2.2.1 À l'École Supérieure de l'Énergie et des Matériaux à Orléans en 1997-1998 :

Service de 192h eq TD

- TD et TP de mécanique des milieux continus en 1<sup>ière</sup> année (Niveau L3)
- Encadrement de projets de 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> année (Niveau M1 et M2)

## 2.2.2 À l'Université de Montpellier de 1998 à 2020 :

### 2.2.2.1 Niveau Licence 1 :

- TP de Licence de Physique
- Cours, TD, TP de cinématique et statique en Deug STPI, en Deug MIAS, en IUP GMP 1<sup>ère</sup> année
- TD / TP Modélisation des systèmes mécaniques en L1
- Cours / TD / TP Cinématique et statique du solide en L1 (Responsable de module - environ 80 étudiants/an)
- Soutien en Cinématique et statique du solide en L1
- Cours/TD/TP Analyse de systèmes mécaniques en L1
- Cours magistral de Biomécanique de l'arbre et du bois en L1 - Unité d'enseignement d'ouverture aux étudiants en science du vivant - environ 200 étudiants.
- Référente d'un groupe de TD de L1 depuis 2006 (tuteur d'environ 40 étudiants par an), prise en charge du Projet Personnel de l'Etudiant (PPE) pour ces étudiants

### 2.2.2.2 Niveau Licence 2 :

- TP de conception mécanique (logiciel Pro Engineer) en IUP GMP 1<sup>ère</sup> année
- TP Outils informatiques en L2
- TD/TP Dynamique du solide en L2
- Projets bibliographiques PEIP niveau L2 (suivi, rapport, soutenance)

### 2.2.2.3 Niveau Licence 3 :

- Cours, TD et TP de matériaux (logiciel CES Selector basé sur la méthode de M. Ashby) en IUP GMP 2<sup>ème</sup> année
- TP de résistance des matériaux avec le logiciel Pro Mechanica en IUP GMP 2<sup>ème</sup> année

### 2.2.2.4 Niveau Master 1

- TP de mécanique du solide élastique (calculs par éléments finis) avec les logiciels Modulef et Castem en IUP GMP 3<sup>ème</sup> année
- Cours, TD et TP de matériaux avec notamment le logiciel CES Selector (méthode de M. Ashby) en IUP GMP 3<sup>ème</sup> année
- TD / TP / projet Calculs par éléments finis en M1 - Rapport et soutenance
- Cours / TD / TP Choix de matériaux en 5<sup>ème</sup> année de Polytech parcours Matériau
- Encadrement de projets industriels de fin d'étude à Polytech (PIFE)
- Tuteur de stages en entreprise (IUP 3<sup>ème</sup> année, Master 1, Master 2, Ingénieurs Polytech)
- Mise en place et responsabilité des projets de laboratoire en M1, parcours Modélisation et Simulation en Mécanique depuis 2013 : projet calcul ou modélisation en lien avec les thématiques du laboratoire. Immersion de 4 ou 5 semaines en laboratoire, par petit groupe. Rendu de rapport et soutenance à l'issue du projet.

### 2.2.2.5 Niveau Master 2

- TP Sciences du bois (15h) en 2012-2013, en 5<sup>ème</sup> année Polytech, parcours MI
- Encadrements de projets industriels de fin d'étude, en 5<sup>ème</sup> année Polytech, parcours MI
- Module Sciences du bois (12h CM), 2015-2020, en M2 parcours MSM et CDPI
- Encadrement de projets industriels de fin d'étude à Polytech (PIFE)
- Tuteur de stages en entreprise (IUP 3<sup>ème</sup> année, Master 1, Master 2, Ingénieurs Polytech)

### 2.2.2.6 Enseignements des 6 dernières années

	Unité d'enseignement	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
<b>L1</b>	Cinématique et statique	42h CM/TD	42h CM/TD	43h CM/TD	42h CM/TD	60h CM/TD	54h CM/TD
	Analyse de systèmes mécaniques	3hTD 15hTP	3hTD 18hTP	9hTD 12hTP	9hTD 12hTP	3hTD 15hTP	1,5hTD 18hTP
	Projets bibliographiques	8hTD	8hTD				4hTD
	Ouverture Biomécanique		4,5h CM	4,5h CM 9h TD	4,5h CM	4,5h CM	4,5h CM
	Calculus				42h TD	42h TD	39h TD
	Référent L1/ Projet personnel étudiant		21h TD	21h TD	18h TD	18h TD	15h TD
<b>L2</b>	Outils informatiques	27hTP					
	Dynamique du solide		28,5h TD 6h TP	28,5h TD 6h TP	28,5h TD 6h TP	25,5h TD 9h TP	24h TD
<b>M1</b>	Simulation par éléments finis	12,5h TD 27h TP	18h TD	18h TD 18h TP			
	Projet modélisation et calcul						6h TD
<b>M2</b>	Sciences du bois		6h CM 9h TD	6h CM 9h TD	6h CM 9h TD	6h CM 7,5h TD	6h CM 6h TD
	Encadrements de stages	24,5h TD	18,5h TD	17,5h TD	13h TD	13h TD	15h TD
	Projet PIFE		18h TD		18h TD		
TOTAL (équivalent TD) Quotité temps de travail		193h (80%)	206h (100%)	207h (100%)	227h (100%)	209h (100%)	192h (100%)

### 2.3 Direction et animations de formation

- Responsable du Master 1 de Mécanique, de 2009 à 2014. Promotions d'environ 30 à 40 étudiants. 2 parcours sont proposés : Création et Développement de Produits Industriels (CDPI) ; Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM). Certains cours sont mutualisés avec les 4<sup>ième</sup> année Polytech, Parcours Mécanique et Interactions. Gestion des inscriptions pédagogiques, emplois du temps, suivi et évaluation de la formation.
- Mise en place d'un module « Sciences du Bois » en 2012, Parcours Mécanique et Interactions de Polytech Montpellier, 5<sup>ième</sup> année : 18h de cours par 6 intervenants extérieurs, 15h de TP, 1 conférence d'industriel, 1 visite technique d'un atelier Bois.
- Mise en place d'un module de 25h en « Sciences de Bois », de 2015 à 2020, en Master 2 de Mécanique, s'adressant aux deux parcours (CDPI et MSM).
- Implication dans la mise en place du double diplôme de Mécanique Université de Chiang Mai (Thaïlande) / Université Montpellier : Mise en place du cours de 25 heures en « Sciences du Bois » en anglais. Démarrage prévu en 2016, puis en 2019. Engagement sur 5 ans. *Cet enseignement n'a finalement pas été dispensé.*
- Responsable des projets de Modélisation et Simulation pour les Master 1 de Mécanique, Parcours MSM, 5-6 étudiants par an, de 2016 à 2020.

- Référent pour un groupe de TD de L1 par an, responsable du Projet Personnel Étudiant (PPE) pour les étudiants de ce groupe, de 2005 à 2020.

#### **2.4 Rayonnement et activités internationales**

- Participation au salon de l'étudiant : tenue du stand, informations au public, ½ journée par an de 2008 à 2020.
- Participation aux journées portes ouvertes de l'université (JPO) : tenue du stand, informations au public, ½ journée par an de 2011 à 2020.
- Participation à l'organisation du double-master avec l'université de Chiang Mai de Thaïlande en 2016.

#### **2.5 Responsabilités collectives**

- Participation à la direction du Département Enseignement de Mécanique 1999-2001 : mise en place d'une banque de données pour gérer les enseignements du département mécanique, concernait environ une vingtaine d'intervenants.
- Responsable du suivi des étudiants de l'IUP Génie Mécanique et Productique 2000-2001 : mise en place d'une enquête et banque de données concernant le devenir des étudiants

### 3 Activités exercées en lien avec la recherche

#### 3.1 Publications et production scientifique

Les productions scientifiques sont ici classées par type, tous thèmes confondus. Elles seront reportées à la fin de chaque chapitre auquel elles se réfèrent, pour faciliter la lecture du document, et ne reprendront pas la numérotation par catégories utilisée ici.

##### 3.1.1 Thèse de doctorat

- [t1] **Jullien D.** (1995) Analyse expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans un matériau élastique orthotrope élaboré par couches successives. Cas d'un disque de bois vert. Thèse de doctorat en Mécanique, Université Montpellier 2, LMGC, Direction : B. Thibaut, 12.12.1995.

##### 3.1.2 Articles dans des revues à comité de lecture (13)

- [a1] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Rosenkrantz E., Langbour P., Hovasse L., Gril J. (2020) Hygromechanical properties of grenadilla wood (*Dalbergia melanoxylon*). *Wood Science and Technology*, 54:1269-1297, DOI 10.1007/s00226-020-01215-z
- [a2] Dupré J.C., **Jullien D.**, Uzielli L., Hesser F., Riparbelli L., Gauvin C., Mazzanti P., Gril J., Tournillon G., Amoroso D., Massieux P.H., Stépanoff P., Bousvarou M. (2020) Experimental study of the mechanical and hygro-mechanical behaviour of a wooden panel from cultural heritage: devices and experimental techniques. *Journal of Cultural Heritage*. DOI 10.1016/j.culher.2020.09.003
- [a3] Dupleix A., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Schatz B. (2020) Practices, knowledge and expectations of beekeepers and beehive suppliers regarding the wood material used for building beehives in the South of France, *Journal of rural studies* 77 : 11-20, DOI 10.1016/j.jrurstud.2020.04.005
- [a4] Gril J., **Jullien D.**, Bardet S., Yamamoto H. (2017) Tree Growth Stress and Related Problems. Review article. *Journal of Wood Science* DOI 10.1007/s10086-017-1639-y
- [a5] Gauvin C., **Jullien D.**, Doumalin P., Dupré J. C., Gril J. (2014), Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood, *Strain* 50(5):428-435 DOI : 10.1111/str.12090
- [a6] **Jullien D.**, Widmann R., Loup C., Thibaut B. (2013) Relationship between tree morphology and growth stress in mature European beech stands, *Annals of forest Science*, DOI 10.1007/s13595-012-0247-7
- [a7] Uzielli L., Cocchi L., Mazzanti P., Togni M., **Jullien D.**, Dionisi-Vici P. (2012) The deformometric kit : a method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels, *Journal of Cultural Heritage*, DOI 10.1016/j.culher.2012.03.001 [hal-00700825 - version 1]
- [a8] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekkel C. (2011) Maturation stress generation in poplar tension wood studied by synchrotron radiation microdiffraction. *Plant Physiology* 155 (2011) 562-570 DOI <https://doi.org/10.1104/pp.109.149542> [hal-00597183 - version 1]
- [a9] **Jullien D.**, Gril J. (2008) Growth strain assessment at the periphery of small-diameter trees using the two-grooves method: influence of operating parameters estimated by numerical simulations, *Wood Science and Technology*, vol. 42, 7, 551-565. DOI 10.1007/s00226-008-0202-9 [hal-00537121 - version 1]
- [a10] Alméras T., Gril J., **Jullien D.**, Fournier M. (2008) Les contraintes de croissance dans les tiges: mécanismes de mise en place et conséquences sur leur résistance à la

flexion, Revue Forestière Française, 749-760. DOI <https://doi.org/10.4267/2042/28374> [hal-00546298 - version 1]

- [a11] **Jullien D.**, Laghdir A., Gril J. (2003) Modelling log-end cracks due to growth stresses: calculation of the elastic energy release rate, *Holzforschung*, vol. 57, 4, 407–414. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.060>
- [a12] **Jullien D.**, Gril J. (2002) Modelling crack propagation due to growth stress release in round wood, *Journal de Physique IV*, 265-272, suite à EMMC6, 9-12.09.02. DOI: 10.1051/jp4:20030196
- [a13] **Jullien D.**, Gril J. (1996) Mesure des déformations bloquées dans un disque de bois vert. Méthode de la fermeture, *Annales des Sciences Forestières*, vol. 53, 5, p. 955-966. DOI: 10.1051/forest:19960504

### 3.1.3 Coordination de chapitre d'ouvrage (1)

- [cc1] **Jullien D.**, Biron D., Bretagnolle V., Dupleix A., Garnery L., Moity-Maizi P., Decourtye A., Kouchner C., Ferrus C., Tchamitchian M. (2019) Défis et enjeux de l'apiculture de demain. In : ABEILLES – Une histoire intime avec l'humanité. Editions CNRS / Cherche Midi, pp. 112-129.

### 3.1.4 Contribution à ouvrage édité (4)

- [co1] Dupleix A., Moity-Maïzi P., Millet-Tréboux P., **Jullien D.**, Schatz B. (2019) *Le bois de ruches : plus qu'un contenant, un habitat*. Chapitre d'ouvrage « Apicultures au XXI<sup>e</sup> siècle : écologie versus business ? ». Ed. La Discussion. Coordination : Dussy D.
- [co2] Dupleix A., Moity-Maïzi P., **Jullien D.** (2019) Fournir aux abeilles un habitat sain. In Abeilles. Une histoire intime avec l'humanité. Ed. Cherche Midi/CNRS
- [co3] Alméras T., **Jullien D.**, Gril J. (2018) Modelling, Evaluation and Biomechanical Consequences of Growth Stress Profiles Inside Tree Stems. Anja Geitmann, Joseph Gril. *Plant Biomechanics. From Structure to Function at Multiple Scales*, Springer International Publishing, pp.21-48, 2018, 978-3-319-79098-5. <10.1007/978-3-319-79099-2\_2> . <hal-01957280>
- [co4] **Jullien D.** (2017) Le bois un matériau hygroscopique. *Monumental, Semestriel 2017-2, Musées et monuments historiques, Les éditions du Patrimoine*, pp. 94-97, EAN 9782757705353

### 3.1.5 Congrès internationaux (46)

- [ci1] **Jullien D.**, Dupré J.C., Hesser F., Riparbelli L., Mazzanti P., Uzielli L., Gauvin C., Gril J., Tournillon G., Massieux P.H., Amoroso D., Stépanoff P., Bousvarou M. (2020) Mechanical behavior of a painted wooden panel from the heritage subject to hygrothermal variations: role of the reinforcement. SWST 63<sup>rd</sup> international convention, Renewable resources for a sustainable and healthy future, Portorož, Slovenia, 12-17.07.20
- [ci2] Riparbelli L., Brémand F., Dioniso-Vici P., Dupré J.C., Goli G., Hesser F., **Jullien D.**, Mazzantio P., Togni M., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2020) Learning from Objects: the use of advanced numerical methods to exploit a complete set of information from experimental data, for the Mona Lisa's Digital-Twin. International conference Florence Heri-Tech, Florence, Italy, 13-15.05.20
- [ci3] Bousvarou M., Gauvin C., **Jullien D.**, Dupré J.C. et al. (2020) Interdisciplinary collegial decision-making for a panel painting structural conservation. ICOM-CC Joint Interim meeting: Reflecting on Theory, History, and Ethics in the Conservation of Paintings: from Sources to the wider Social Context, 6-7.02.20, Lisbonne, Portugal



- [ci4] Alkadri A., Diakonova N., Coquillat D., Arnould A., **Jullien D.**, Gril J. (2019) Terahertz Observation of Moisture Convection-Diffusion in Wood. 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 24-27.09.19, Freiburg, Germany.
- [ci5] Dupleix A., Ruffio E., **Jullien D.** (2019) Transient hygrothermal evolution inside a hive. 46th Apimondia International Apicultural Congress, Montréal, Canada, 8-12/09/2019.
- [ci6] Alméras T., Clair B., Montero C., **Jullien D.**, Gril J. (2019) The mechanical design of wood as a material optimized for beams. Workshop « Upscaling for strategic materials», Montpellier, France, 02-04.09.2019.
- [ci7] Riparbelli L., Brémand F., Dioniso-Vici P., Dupré J.C., Goli G., Hesser F., **Jullien D.**, Mazzantio P., Togni M., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2019) Studies for the Mona Lisa conservation: the implementation of its panel's Digital-Twin, International Conference CompWood on Computational Methods in Wood Mechanics – from Material Properties to Timber Structures, Växjö, Sweden, 17-19.06.19
- [ci8] Alkadri A., Diakonova N., Coquillat D., Arnould A., **Jullien D.**, Gril J. (2018) Investigation of the water diffusion in wood by terahertz techniques. Physics of Drying Conference, 5-7.11.18, Marne-la-Vallée, France. <hal-01924126>
- [ci9] **Jullien D.** (2018) Conférence invitée : Growth stresses and their consequences on tree mechanics. 9th International Plant Biomechanics, Aug 2018, Montréal, Canada. <<https://www.plantbiomech2018.com/>> . <hal-01897889>
- [ci10] Gril J, **Jullien D.**, Hunt D. (2016) Compression set and cupping of painted wooden panels. Analysis and Characterisation of Wooden Cultural Heritage by means of Scientific Engineering Methods. 28-29/5/2016, Halle/Saale, Germany
- [ci11] Aurand A., Gauvin C., **Jullien D.**, Young C. (2016) Quantifying the effect of preparatory layers in the overall hygromechanical behaviour of panel paintings: the case of 14th century Italian panels. ICOM-CC Joint Interim Meeting: Physical Issues in the Conservation of Paintings: Monitoring, Documenting and Treatment, 29-30.09.16, INHA, Paris, France
- [ci12] Gril J., Brémand F., Cocchi L., Dionisi-Vici P., Dupré J.C., Gauvin C., Goli G., Marcon B., **Jullien D.**, Mazzanti P., Ravaud E., Togni M., Uzielli L. (2015) The Mona Lisa Project: an update on the progress of measurement, monitoring, modelisation and simulation, Colloque Euromech « Theoretical, Numerical and Experimental Analyses in Wood Mechanics », Dresden, Allemagne, 27-29.05.15
- [ci13] **Jullien D.**, Gauvin C., Gril J. (2014) Hygro-mechanical behaviour of wooden panels from cultural heritage : effect of a coated face, International Symposium WoodSciCraft, Montpellier, 8-12.09.14
- [ci14] Gauvin C., Endo K., **Jullien D.**, Obataya E., Gril J. (2014) Effect of hygrothermal treatments on the physical properties of wood, Final COST Action FP0904 conference “Recent Advances in the Field of TH and THM Wood Treatment”, Skellefteå, Sweden, 19-21.05.14
- [ci15] Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2014) Poster: Hygromechanical behaviour of a wooden panel, Conference Wood and Science Technology, SRAL Art conservation and research, Maastricht, Pays- Bas, 17-18.10.14
- [ci16] Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2013), Poster: Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood, PhotoMechanics 2013, 27-29.05.2013, Montpellier, France.
- [ci17] Alméras T., Dlouha J., **Jullien D.**, Gril J. (2012) Poster: The bending mechanics of tree stems: the key role of wood maturation stress for resisting both permanent and

- temporary loads, 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12. [hal-00797092 - version 1]
- [ci18] Gril J., **Jullien D.**, Alméras T. (2012) Longitudinal growth stresses in trees : analytical models and functional implications, 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12. [hal-00797106 - version 1]
- [ci19] Pourtahmasi K., Gril J., **Jullien D.**, Langbour P., Najafi Harsini F. (2012) Poster: Effect of growth stresses on anatomical and physical properties of *Fagus Orientalis* L., 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont- Ferrand, France, 20-24.08.12.
- [ci20] **Jullien D.**, Mazzanti P., Cocchi L., Colmars J., Gril J., Uzielli L. (2012) New uses and improvements of the deformometric kit to support study and conservation of panel paintings, IUFRO Conference, Division 5 Forest Products, Lisbon, Portugal, 8-13.07.12.
- [ci21] Uzielli L., Gril J., Cocchi L., Colmars J., Dionisi Vici P., Dureisseix D., Goli G., **Jullien D.**, Marcon B., Mazzanti P., Rémond R. (2011) Monitoring and modeling deformation of the “Mona Lisa”, 5th International Congress "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Istanbul, Turkey, 22-25.11.2011, A. Guarino (ed) [hal-00945943 - version 1]
- [ci22] Uzielli L., Gril J., Cocchi L., Colmars J., Dionisi Vici P., Dureisseix D., Goli G., **Jullien D.**, Marcon B., Mazzanti P., Rémond R. (2011) Experimental studies on the wooden support of the “Mona Lisa”, Strategic Workshop “The Safeguard of Cultural Heritage: a Challenge from the Past for the Europe of Tomorrow”, Florence, Italy, 11-13.07.2011, University of Florence and COST. [hal-00945958 - version 1]
- [ci23] Almeras T., Gronvold A., **Jullien D.**, Van Der Lee A. (2010) X-Ray diffraction study of wood cellulose behaviour during drying. COST FP0802 Workshop "Wood Structure/Function-Relationships", Hamburg, GE, 5-8.10.2010 [hal-00523221 - version 1]
- [ci24] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Stress of cellulose network in tension wood is induced shortly after cellulose deposition, 6th Plant Biomechanics Conference, Cayenne, GF, 16-21.11.09. [hal-00565954 - version 1]
- [ci25] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Mise en évidence de la mise en tension de la cellulose pendant la maturation cellulaire, 19e Congrès Français de Mécanique, Marseille, FR, 24-28.08.09, CDRom 1p. [hal-00565951 - version 1]
- [ci26] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Maturation stress generation starts before the formation of the G-layer in poplar tension wood, COST E50 final conference "Systems Biology for Plant Design", Wageningen, NL, 9-11.07.09.
- [ci27] **Jullien D.**, Alméras T., Kojima M., Yamamoto H., Cabrolier P. (2009) Evaluation of growth stress profiles in tree trunks: comparison of experimental results to a biomechanical model, 6th Plant Biomechanics Conference, Cayenne, GF, 16-21.11.09. [hal-00565995 - version 1]
- [ci28] **Jullien D.** (2008) Modelling crack propagation at log-end resulting from growth stresses, University of Nagoya, Nagoya, JP, 22.04.08.
- [ci29] **Jullien D.** (2008) Growth stresses in trees: origin, role and consequences, The First International Workshop on Biological Characteristic of Wood and its Related Properties, Faculty of Natural Ressources, Karaj, IR, 23-28.10.08.
- [ci30] Colmars J., Rémond R., Marcon B., Gril J., Perré P., Dionisi Vici P., **Jullien D.**, Maurin E. (2007) Poster: In-situ monitoring and hygrothermal modelling of a wood panel paintings: the case of the Saint Didier church in Avignon, Couronnement d'épines,

- Meeting COST Action IE0601 “Wood Science for Conservation of Cultural Heritage”, Florence, IT, 8-10.11.07.
- [ci31] **Jullien D.** (2007) Modelling crack propagation at log end resulting from growth stresses, Seminar of the Islamic Azad University, Teheran, IR, 13.06.07.
- [ci32] Marcon B., Dureisseix D., **Jullien D.**, Uzielli L., Gril J., Colmars J., Dionisi Vici P. (2007) Hygromechanical study of painted panels, Meeting COST Action IE0601 “Wood Science for Conservation of Cultural Heritage”, Tervuren, BE, 8-9.6.07.
- [ci33] **Jullien D.**, Cabrolier P., Gril J. (2006) Poster: A finite element model to predict the growth strain release at the periphery of small diameter trees, 5th Plant Biomechanics Conference, Stockholm, SE, 28.08-1.09.06, L. Salmén (ed), STFI-Packforsk AB (pub.), 2, 445-450. [hal-00546568 - version 1]
- [ci34] **Jullien D.**, Yoshida M., Cabrolier P., Gril J. (2006) Poster: Measurement of residual strains at stem periphery using the two-grooves method, International Conference on Integrated Approach to Wood Structure, Behaviour and Application, Joint Meeting of ESWM and COST Action E35, Florence, IT, 15-17.05.06, M. Fioravanti, N. Macchioni (eds), 66-71. [hal-00546577 - version 1]
- [ci35] **Jullien D.**, Loup C., Gril J. (2003) Why big trees from high density hardwoods are more prone to end splitting?, 4th Plant Biomechanics Conference, East Lansing, U.S.A., 20-25.7.03, F.W. Telewski (ed), p. 72.
- [ci36] **Jullien D.**, Gril J. (2002) Modelling crack propagation due to growth stress release in round wood, EMMC6 "Non linear mechanics of anisotropic materials", Liège, Belgique, 9-12.9.02, S. Cescatto, C. Teodosiu, A.M. Habraken, R. Billardon, I. Doghri (eds), EDP Sciences (pub.), 265-272, publié en 2002 dans J. de Physique IV.
- [ci37] **Jullien D.**, Gril J. (2001) Modelling crack propagation at log-end resulting from growth stresses, 1st International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Lausanne, CH, 19-21.4.01, P. Navi (ed), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (pub.), p. 337-343, publication: 2002.
- [ci38] **Jullien D.**, Famiri A., Gril J., Laghdir A. (2000) Observation of log-end cracks caused by growth stress in Eucalyptus, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, Thieme-Verlag (pub.), p. 483-486.
- [ci39] Laghdir A., **Jullien D.**, Gril J., Baillères H. (2000) Energetic analysis of fracture process at log end due to growth stresses, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, Thieme-Verlag (pub.), p. 490-496.
- [ci40] Laghdir A., **Jullien D.**, Gril J., Thibaut B. (1999) Modelling growth-stresses related radial cracks in logs, 3rd Workshop on Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares (IUFRO WP S5.01.04 "Biological Improvement of Wood Properties"), La Londe-Les-Maures, 5-12.9.99, G. Nepveu (ed), ERQB-INRA Nancy (pub.), p. 324-333.
- [ci41] Linard L., **Jullien D.** (1999) Poster: Designing multi-layers structural panels, COST Action E8 Workshop on Damage in wood, Bordeaux, 27-28.5.1999, P. Morlier (ed).
- [ci42] Gril J., Laghdir A., **Jullien D.** (1997) Modelling growth stress related problems in tree logs. Relationship between heart crack in disks and logs, 2nd International conference on plant biomechanics, Reading, U.K., 7-12.9.97.
- [ci43] **Jullien D.**, Gril J., Thibaut B. (1997) Longitudinal and transverse strains in green wood. Experimental results, 2nd International conference on plant biomechanics, Reading, U.K., 7-12.9.97.
- [ci44] **Jullien D.**, Gril J. (1996) Numerical analysis of residual stresses in a green wood crosscut after V-cutting and heating, 3rd biennial joint conference on Engineering Systems Design and Analysis, Montpellier, 1-4.7.96, ASME (ed), vol. 5, p. 205-212.

- [ci45] Gril J., **Jullien D.**, Fournier M., Thibaut B. (1996) Modelling non-axisymmetric growth stresses and related problems, 2nd Workshop on Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares (IUFRO WP S5.01.04 “Biological Improvement of Wood Properties”), Kruger national park, South Africa, 24.8-1.9.96, G. Nepveu (ed), ERQB-INRA Nancy (pub.), 1997, p. 80-91.
- [ci46] Marchal R., Jullien D., Mothe F., Thibaut B. (1993) Mechanical aspects of heating wood in rotary veneer cutting. In : Proceedings of the 11th international wood machining seminar. The Norwegian Institute of Wood Technology. Oslo : Norwegian Institute of Wood Technology, 257-278. International Wood Machining Seminar. 11, Honne, Norvège, 25-27.05.93

### 3.1.6 Congrès nationaux (18)

- [cn1] **Jullien D.**, Arnould O. (2020) Conférence invitée : Les objets en bois du patrimoine : études interdisciplinaires en étroite collaboration avec les acteurs de la conservation du patrimoine, 5ième Journées Jeunes Chercheurs Eco-composites et Composites Bio-sourcés, Ile de Groix, 13-15.05.20 (*reporté ultérieurement*)
- [cn2] Alméras T., Clair B., Montero C., **Jullien D.**, Gril J. (2020) Conférence invitée : Les contraintes résiduelles dans les matériaux du vivant : exemple des tiges végétales, Conférence du soir au colloque Mecamat : De nouveaux outils pour de nouveaux défis, Aussois, 21-24.1.20, D. Favier, L. Orgéas (eds).
- [cn3] **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Dupleix A. (2019) Conférence invitée : Quelle place pour le matériau bois dans la relation abeille/ruche/homme ? Aspects physiques, écologiques et anthropologiques de la relation. Colloque « Sociétés d’abeilles, sociétés humaines, une interdépendance de la préhistoire au futur » organisé par la Mission pour les Initiatives Transverses et l’Interdisciplinarité du CNRS, Paris. (24-25/01/2019)
- [cn4] Riparbelli L., Dionisi-Vici P., Dupre J., Goli G., **Jullien D.**, Bremand F., Mazzanti P., Hesser F., Marcon B., Togni M., Gauvin C., Arnould O., Valle V., Dureisseix D., Cocchi L., Mandron P., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2018) Poster: Mona Lisa’s digital twin: identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modelling, 7èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois, Cluny, 20-22.11.18
- [cn5] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Diakonova N., Coquillat D., et al. (2018) Poster : Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent. 7èmes journées du GDR Sciences du bois, 20-22.11.18, Cluny, France. <https://gdrbois-2018.sciencesconf.org/> . [hal-01960449](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01960449)
- [cn6] Dupleix A., Mui S. W., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Milliet-Treboux P., Schatz B., Pfister F., Reutenauer V., Carlier C., Ruffio E. (2018) Poster : Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l’influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites. 7èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Cluny, France, 20-22.11.2018
- [cn7] Dupré J.C., Hesser F., **Jullien D.**, Bousvarou M. (2017) Poster: Suivi du comportement mécanique d’une peinture sur bois, soumise à des variations d’hygrométrie. 6èmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Nantes 21-23.11.17 - Prix poster
- [cn8] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Langbour P., Gril J. (2017) Poster : Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d’instruments à vent. 6èmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Nantes 21-23.11.17

- [cn9] Duplex A., **Jullien D.**, Carlier C. (2017) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles domestiques. 6èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Nantes, France, 21-23.11.17, 133-134
- [cn10] **Jullien D.** (2016) Poster: Instrumentation et suivi des déformations d'un panneau de bois peint du patrimoine. 5èmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Bordeaux, 8-10.11.16
- [cn11] Duplex A., **Jullien D.** (2016) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 5èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Bordeaux, France, 8-10.11.16, 91-92
- [cn12] Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2016) La mécanique du bois au service de la restauration/conservation du patrimoine. 11ième édition de la manifestation Thèse des Bois, Bordeaux, 7.11.16
- [cn13] Gauvin C., **Jullien D.**, Dupré J.C., Doumalin P., Obataya E., Gril J. (2014) Poster: Étude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois. Application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine, 3èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, Nancy, 12-14.11.14
- [cn14] Graindorge Lamour J., **Jullien D.**, Rouard A., Gauvin C., Gril J. (2012) Poster: Aide à la décision à chaque étape de la restauration, comparaison du comportement hygromécanique de deux renforts : deux doublages en balsa, 1ères Journées du GDR Bois 3544, France [hal-00796819 - version 1]
- [cn15] Gronvold A., Alméras T., Jullien D. (2011) Poster : Analyse multi-échelle du comportement mécanosorptif du bois : cas du séchage libre. Colloque national MECAMAT "Les composites - De l'élaboration du matériau aux performances des structures", Aussois, 24-28.01.11.
- [cn16] Bérard P., **Jullien D.**, Laurent T. (2002) Poster : Réduction des fissurations externes d'un billon de châtaignier par traitement oléothermique, Colloque MECAMAT, Ecole de Mécanique des Matériaux, Aussois, 21-24.1.02, D. Favier, L. Orgéas (eds), p. 208-211.
- [cn17] Linard L., **Jullien D.**, Gril J. (2001) Poster: Modélisation d'un composite multicouche viscoélastique orthotrope, Colloque MECAMAT, Aussois, 29.1-1.2.01, Licht C., Mabru C., Peyroux R. (eds), p. 223-226.
- [cn18] Gril J., **Jullien D.** (1996) Recouvrance hygrothermique du bois vert et fissuration à coeur des grumes, 4ème Colloque Sciences et Industries du Bois, Nancy, 11-13.9.96, Haluk (ed), ARBOLOR (pub.), p. 141-148.

### 3.1.7 Diffusion scientifique (12)

- [ds1] Duplex A., **Jullien D.** (2019) Poster : Multidisciplinary study on wooden beehive building material: material properties impacts on domestic bees and associated beekeeping practices by humans. 8èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier 05-06.11.19
- [ds2] **Jullien D.** (2019) Etude d'un panneau de bois peint au musée Fabre de Montpellier, Séminaire Université Laval de Québec, Québec, 5.08.19
- [ds3] Duplex A., Mui S. W., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Milliet-Treboux P., Schatz B., Pfister F., Reutenauer V., Carlier C., Ruffio E. (2018) Poster : Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites. 7èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier 27-28.11.18

- [ds4] Carlier C., **Jullien D.**, Duplex A., Camp G., Rousset M. (2017) Poster : SuperBeeLive: une ruche instrumentée permettant le suivi en temps réel d'une colonie d'abeilles. 6èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier 13-14.11.17
- [ds5] Duplex A., **Jullien D.**, Carlier C. (2017) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 6èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier 13-14.11.17
- [ds6] **Jullien D.**, Bousvarou M. (2016) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie. SFIIC 7ième Journée d'étude du groupe Bois, Paris, 7.10.16
- [ds7] Duplex A., **Jullien D.** (2016) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 5èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier 5-6.10.16
- [ds8] **Jullien D.**, Jenn B. (2015) Description et problématiques d'assemblages : Point de vue croisés de mécanicien et de conservateur-restaurateurs, SFIIC 6ième journée d'étude du groupe Bois, Paris, 2.10.15
- [ds9] **Jullien D.** (2012) Growth stresses in trees: Origin, role, consequences, measurements. Cost FP0409, Training School Green wood properties modification induced by medium temperatures heat treatment, Cluny, FR, 29-31.03.12.
- [ds10] **Jullien D.** (2008) Modelling crack propagation at log end resulting from growth stresses, Seminar of Laboratory of Biomaterial Physics, Nagoya University, JP, 22.04.08.
- [ds11] Loup C., Thibaut B., Gril J., **Jullien D.** (2001) Stresses in beech, Contribution au Rapport final du contrat européen FAIR 98-3606.
- [ds12] Thibaut B., Gril J., **Jullien D.** (1994) participation à la rédaction : Innovation in the Chestnut timber processing, Rapport final du contrat CEE n° MA2B CT 92 0002 (Forest 2) - Task F.

## 3.2 Encadrement doctoral et scientifique

### 3.2.1 Participation à l'encadrement de thèses (6)

- [et1] Alkadri A. (mai 2017-juillet 2020) Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent. Financement CIFRE - Société Henri Selmer Paris. Université Montpellier. Encadrants : **Jullien D.** (40%) Arnould O. (30%) Gril J. (30%)
- [et2] Gauvin C. (septembre 2012-novembre 2015) Doctorat en Mécanique et Génie Civil, Université Montpellier 2 : « Etude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois. Application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine. » Encadrants : **Jullien D.** (70%) Gril J. (30%)
- [et3] Marcon B. (2009) Hygromécanique des panneaux en bois et conservation du patrimoine culturel. Des pathologies... aux outils pour la conservation. Thèse de doctorat. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. Encadrants : Dureisseix D. (50%) Uzielli L. **Jullien D.** (50%)
- [et4] Bérard P. (2003) Valorisation des taillis de châtaignier en bois ronds pour usage extérieur : étude et optimisation d'un traitement oléo-thermique pour améliorer l'aspect et la durée de vie du produit. Thèse de doctorat. Montpellier 2, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Encadrants : Thibaut B. (60%) Laurent T. (30%) **Jullien D.** (10%)
- [et5] Linard L. (2001) Modélisation numérique tridimensionnelle du comportement viscoélastique d'un composite multicouche à base de bois. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2. Encadrants : Thibaut B. (40%) Gril J. (50%) **Jullien D.** (10%)

- [et6] Laghdir A. (2000) Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes croissance - Application aux Eucalyptus. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2. Encadrants : Gril J. (70%) **Jullien D.** (30%)

### 3.2.2 Encadrement de post-doctorats

#### 3.2.2.1 Travaux en cours ou prévus (2)

- [epd1] Dupleix A. (Juillet 2019 - juin 2021) Post-doctorat Région Occitanie, Université Montpellier : Des savoirs apicoles cévenols aux connaissances pour la santé des abeilles (SAPIC) Encadrants : **Jullien D.** (40%) Schatz B. (30%) Moity-Maizi P. (30%)
- [epd2] Carlier C. (Nov 2018 - Oct 2020) Ingénieur de Recherche, Projet Muse, Université Montpellier : Projet Superbeelive : Etude multidimensionnelle des relations abeille-environnement. Encadrants : Rousset M. (40%) **Jullien D.** (30%) Druon S. (30%)

#### 3.2.2.2 Travaux terminés (2)

- [epd3] Carlier C. (Sept 2017 - Mai 2018) Ingénieur de Recherche, Labex Numev, Université Montpellier : Développement d'une ruche instrumentée permettant le suivi en temps réel du développement d'une colonie d'abeilles en tant que super-organisme. Encadrantes : Dupleix A. (50%) **Jullien D.** (30%) Rousset M. (20%)
- [epd4] Dupleix A. (Sept. 2016 - Fév. 2019) Post-doctorat Labex Numev, Université Montpellier : Contribution du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. Le cas du châtaignier. Encadrante : **Jullien D.** (100%)

### 3.2.3 Encadrement ou co-encadrement de stages

#### 3.2.3.1 Travaux en cours ou prévus (2)

- [es1] Raison Clara (2020) Expérience sur panneau de bois peint du patrimoine au sein du musée Fabre : suivi, analyse et interprétation des données. Master 1 Génie Mécanique, Université de Poitiers. Encadrants : **Jullien D.** (50%), Dupré J.C. (50%)
- [es2] Mochet P.A. (2020) Master 2 Biodiversité, Écologie, Évolution - parcours Écophysiologie, Écotoxicologie, Université de La Sorbonne. Tests de choix olfactifs sur *Varroa destructor*, parasite de l'abeille domestique (2.03.20-28.08.20) Encadrants : Dupleix A. (60%), Schatz B. (20%), **Jullien D.** (20%)

#### 3.2.3.2 Travaux terminés ou soutenus (20)

- [es3] Mui Shu-Wah (2018) Module de comptage automatisé du varroa, acarien parasite de l'abeille domestique. Stage de 3<sup>ème</sup> année en formation continue diplômante, Département CIGMA option Mécatronique, IMT Mines Alès. Encadrantes : Dupleix A. (70%) **Jullien D.** (30%)
- [es4] Valette Agathe (2018) Tests comportementaux sur varroas confrontés à différents composés olfactifs de bois de ruches. Stage de 3<sup>ème</sup> année, Maîtrise de la faune et de ses habitats, Université de Québec, Rimouski. Encadrants : Dupleix A. (40%) Schatz B. (30%) **Jullien D.** (30%)
- [es5] Chrysochoos Cécile (2017) Stage Ingénieur 4<sup>ème</sup> année, Département Sciences et Génie des Matériaux, INSA Lyon : Etude scientifique d'un panneau peint au musée Fabre, La Sainte Trinité. Encadrantes : **Jullien D.** (80%) Bousvarou M. (20%)
- [es6] Kurtz Samuel (2017) Stage Ingénieur 4<sup>ème</sup> année, Département Mécanique et Interactions, Polytech Montpellier : Etude numérique d'un panneau de bois peint, La Sainte Trinité. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [es7] Dougabka D. (2017) Stage Master 2 Mécanique, Parcours Modélisation et Simulation en Mécanique, Université Montpellier : Contribution du matériau bois au

- climat hygrothermique interne des ruches. Encadrants : Duplex A. (40%) **Jullien D.** (30%) Louche H. (30%)
- [es8] Milliet-Treboux P. (2017) Stage Ingénieur 4ième année, Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud, SupAgro : Connaissances et représentations des apiculteurs du matériau bois des ruches. Méthodologie d'enquête auprès des apiculteurs de l'Hérault, les Cévennes et la Drôme provençale. Encadrantes : Moity-Maizi P. (50%), Duplex A. (40%), **Jullien D.** (10%)
- [es9] Rodriguez Jessica (2016) Stage Ingénieur 5ième année, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interaction : Conception d'abaques de dimensionnement d'un système de restauration de panneaux peints du patrimoine. Encadrants : Togni M. Université de Florence, Italie (40%) Uzielli L. Université de Florence, Italie (30%) **Jullien D.** (30%)
- [es10] Le Bastard François (2016) Stage Master 2 Sciences du Bois Université Lorraine / Ingénieur ENSTIB : Optimisation du protocole de séchage des bois destinés à la facture de clarinettes. Encadrants : **Jullien D.** (60%), Hovasse L., entreprise H. Selmer, Paris (30%), Arnould O. (10%)
- [es11] Charles Nicolas (2016) Stage DAEU B - Diplôme d'Accès aux études universitaires Option scientifique : Découverte des thèmes de recherche de l'équipe Bois, Mise en place d'un protocole d'échantillonnage en vue de caractériser les propriétés physiques du Dalbergia, débit des échantillons. Encadrante : **Jullien D.**
- [es12] Larricq G. (2015) Stage Master 2 Université Lorraine / Ingénieur ENSTIB : Première approche des déformations d'instrument à vent : la déformation d'anneaux de buis. Encadrants : Cabrolier P. (50%), Brémaud I. (25%), **Jullien D.** (25%)
- [es13] Aurand A. (2015) Postgraduate Diploma in the Conservation of Easel paintings, Courtauld Institute of Art, London : A re-evaluation of the mechanisms underlying relative humidity induced fatigue damage in panel paintings: the case of 14th century Italian preparatory layers. Encadrantes : Young C. (70%), Gauvin C. (20%), **Jullien D.** (10%)
- [es14] Gauvin C. (2012) Stage Master 2 « Matériaux innovants » Université Lyon I, Polytech Lyon : Expérimentations hygrothermiques sur maquettes de bois en vue de la compréhension de la dégradation des panneaux peints du patrimoine. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [es15] Graindorge Lamour J. (2012) Stage de fin d'étude, Diplôme de restaurateur du patrimoine, Spécialité Mobilier, Institut National du Patrimoine : Conservation-restauration du support de La mort de Cléopâtre, peinture à l'huile sur bois de Girolamo Marchesi da Cotignola, XVIe siècle. Etude du comportement hygromécanique du renfort actuel et de solutions de remplacement : deux techniques de doublage en balsa. Responsable scientifique : **Jullien D.** (100%)
- [es16] Rouard A. (2011) Stage de Master 2, Spécialité Mécanique et Ingénierie, Université Montpellier 2 : Mise au point d'un dispositif de suivi des déformations d'un panneau de bois soumis à des variations hygrothermiques. Encadrants : **Jullien D.** (90%), Louche H. (10%)
- [es17] Gronvold A. (2010) Stage Master 2 Mécanique et Ingénierie, parcours Structures, Ouvrages et Matériaux du Génie Civil, en co-habilitation avec l'ENS Cachan, Université Pierre et Marie Curie : Analyse multi-échelle des contraintes de maturation et de leur impact sur le séchage sur le matériau bois. Encadrants : Alméras T. (60%) et **Jullien D.** (40%)
- [es18] Baldit A. (2009) Stage Master 2 Mécanique et Ingénierie, Université Montpellier 2 : Analyse des états de contrainte d'un panneau peint avant et après un acte de restauration. Encadrants : Dureisseix D. (50%), **Jullien D.** (50%)



- [es19] Cabrolier P. (2006) Stage Master 1 Mécanique et Ingénierie, Université Montpellier 2 : Evaluation du profil de contrainte résiduelle dans l'arbre : Méthode expérimentale avec des jauges. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [es20] Colin J. (2006) Stage Ingénieur Forestier 1<sup>ère</sup> année, ENGREF : Mise au point d'une méthode de mesure des déformations de rondelles de bois soumises au séchage. Encadrante : **Jullien D.** (100%)

### 3.2.3.3 Encadrement de projets (8)

- [epr1] Bottela-Barillot D. (2018) Projet Industriel de Fin d'Etude 5<sup>ème</sup> année, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions : Expérimentation sur panneaux peints en environnement contrôlé : analyse des données. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [epr2] Rodriguez J. (2016) Projet Industriel de Fin d'Etude, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 5<sup>ème</sup> année : Mise en place d'une base de données Restauration de panneaux peints du patrimoine. Encadrantes : **Jullien D.,** Bousvarou M. (Responsable des restaurations au musée Fabre)
- [epr3] Villelégier J. S. (2014) Projet Industriel de Fin d'Etude, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 5<sup>ème</sup> année : Etude numérique de l'effet des cisaillements et des précontraintes sur la résistance des arbres au vent. Encadrants : **Jullien D.** (50%), Alméras T. (50%)
- [epr4] Gentil-Carayon A., Rouquier J. P., Badreddine H. (2014) Projet éléments finis, Master Mécanique 1<sup>ère</sup> année : Etude des déformations d'un panneau de bois peint soumis à son propre poids. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [epr5] Maccioni J., Villelégier J. S. (2013) Projet « Simulation Numérique Avancée », Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 4<sup>ème</sup> année : Effet de l'environnement hygrométrique sur le comportement d'un panneau de bois de peint doublé de balsa. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [epr6] Jeddou N., Maccioni J., Villelégier J. S. (2013) Projet « Elément fini », Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 4<sup>ème</sup> année : Dimensionnement d'un renfort pour la restauration d'un panneau de bois peint du patrimoine. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [epr7] Pastre C., Tawfik S., Tricot-Censier A. (2012) Projet « Elément fini », Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 4<sup>ème</sup> année : Etude des déformations d'un panneau de bois soumis à des variations d'humidité. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [epr8] Gezahegn B., Gely B., El-Khoury S. (2012) Projet éléments finis, Master Mécanique 1<sup>ère</sup> année : Etude de la déformation d'un barrage. Encadrante : **Jullien D.** (100%)

### 3.3 Récapitulatif

Le tableau suivant indique le nombre de communications et/ou encadrements classés par type et par chapitre du document « Travaux de recherche ».

	Bois vert	Bois « sec à l'air »	Objets en bois du patrimoine	Étude sur échantillons et répliques	Bois de clarinettes	Bois des ruches	Total
Thèse	1						1
Articles dans revue à comité de lecture	8		2 (1)	1	1 (1)	1	13 (2)
Coordination de chapitre d'ouvrage						1	1
Contribution à ouvrage édité	1	1				2	4
Congrès internationaux	26	2	9	6	2	1	46
Congrès nationaux	2	3	5	2	2	4	18
Diffusion scientifique	4		3			5	12
Encadrement doctoral et scientifique	4 (2)	3 (1)	9 (1)	5 (1)	4 (1)	9	34 (6)

(x) nombre de document uniquement soumis inclus

(x) nombre de thèses incluses

### 3.4 Diffusion des travaux (rayonnement et vulgarisation)

#### 3.4.1 Diffusion de la connaissance dans le milieu socio-économique (11)

- [se1] **Jullien D.** (2019) Au cœur d'une œuvre d'art, LUM n°11, Le magazine science et société de l'université, novembre 2019-février 2020, p. 6-9, [https://www.umontpellier.fr/wp-content/uploads/2019/11/LUM\\_11\\_2019\\_web.pdf](https://www.umontpellier.fr/wp-content/uploads/2019/11/LUM_11_2019_web.pdf)
- [se2] **Jullien D.,** Tournillon G. (2018) Etude technique d'un panneau de bois peint au musée Fabre de Montpellier, Séminaire « Patrimoine en question », INP, Paris, 4.06.18
- [se3] Stepanoff P., **Jullien D.** (2017) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Conférence organisée par le Pôle Culture de l'Université Montpellier, 07.07.17
- [se4] **Jullien D.** (2017) Suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Séminaire du Musée Fabre, Montpellier, 1-2.06.17
- [se5] **Jullien D.,** Bousvarou M., (2016) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Table ronde Festisciences, Université de Montpellier, 24.11.16
- [se6] **Jullien D.** (2015) Atelier scientifique : Comprendre le retrait anisotrope du bois, Semaine des Mathématiques, Lycée professionnel Charles Alliès, Pézenas, FR, 13.03.15.
- [se7] **Jullien D.** (2014) Participation à l'atelier créatif AMACO : Mise en place d'expériences illustrant les propriétés physico-chimiques de la matière, janvier 2014, ESPGG-ESPCI ParisTech.

- [se8] **Jullien D.**, Gauvin C. (2013) Mechanics of painted wooden panels from cultural heritage : the case of Mona Lisa, présenté aux conservateurs et restaurateurs du musée du Prado, Madrid, 11-13.12.13
- [se9] **Jullien D.** (2013) Origine et caractérisation des déformations du bois, Journée d'étude Instruments à vent – Traitements du bois et acoustique des flûtes, ITEM, Le Mans, FR, 18.11.13.
- [se10] **Jullien D.** (2013) Atelier scientifique : Le bois et son retrait anisotrope, Semaine des Mathématiques, Lycée des Savoirs, Uzès, FR, 15.03.13.
- [se11] **Jullien D.**, Brémaud I. (2013) Atelier scientifique, "Bois, matériau moderne" Programme CNRS-UM2 20 ans du collège Marie Curie de Pignan [hal-00818159 - version 1]

### 3.4.2 Actions de promotion de la science

- Participation au Forum CNRS « Nouveaux Mondes », Stand Bois, « Ré-enchanter les Matériaux », Cité des Sciences et de l'Industrie, La Villette, 25-27.10.2019
- **Jullien D.** (2019) Enregistrement d'une émission sur Radio Canada, Les années lumière, « Étudier le bois pour préserver des œuvres d'art : Entrevue avec Delphine Jullien », 29.09.2019, Montréal, <https://ici.radio-canada.ca/premiere/emissions/les-annees-lumiere/episodes/443639/audio-fil-du-dimanche-29-septembre-2019/7>
- Participation à la création de l'exposition « Dans le secret des œuvres d'art », Musée Fabre, Montpellier, mars-décembre 2018.
- Participation au long métrage « Éloge du doute » de Marie Poitevin (2018), Production Les films d'ici Méditerranée, Les films d'ici 2, France 3 Occitanie.
- Participation à la tenue du stand Bois à la « Fête de la Science », Village des sciences, Faculté d'Éducation, Montpellier, 06.10.2018
- Participation aux enquêtes liées au mini-mémoire de Master 1 LOPHISS-SPH, Université Paris-Diderot de Delphine Romuald "Les femmes scientifiques dans la recherche universitaire française : enquête sur un vécu féminin", juillet 2017.
- Participation à la journée "Filles et Maths : une équation lumineuse" (2016) Speed-meeting avec des petits groupes d'élèves de 3<sup>ième</sup> et 2<sup>nd</sup> de l'académie de Montpellier, Faculté des Sciences, 15.04.2016 - Interview pour le film de promotion de cette journée.
- Accueil d'un élève de 3<sup>ième</sup> (2016), stage Découverte de l'entreprise, 11-15.04.16
- Accueil d'un élève de 2<sup>nd</sup> du lycée Peytavin de Mende (2015) dans le cadre de l'opération « Les cordées de la réussite », programme développé par la Science Académie, 15-19.06.15
- Toucher, casser, couler (2015) Exposition interactive d'expériences scientifiques - Participation à l'animation de séances ouvertes aux scolaires, collégiens, lycéens, étudiants et grand public, Montpellier, 9.01-6.02.15
- Accueil d'une élève de 3<sup>ième</sup> (2008), stage Découverte de l'entreprise, 11-15.02.08
- Bardet S., Amusant N., Arnould O., Baudassé C., Bytebier K., Jullien D., Laurent T., Marcon B., Montero C. (2007) Organisation et tenue de stand: Le bois matériau moderne, Village des Sciences, Montpellier, FR, 11-13.10.07. [hal-00546430 - version 1]
- Amusant N., Arnould O., Bardet S., Camp G., Clair B., Dlouhá J., Gril J., Jullien D. (2005) Préparation et tenue d'un stand: Biodiversité des bois, Manifestations pour la Science en fête, Cité de la Science, Paris, FR, 14-16.10.05.

## 3.5 Responsabilités scientifiques

### 3.5.1 Porteur de projet / Partenariat

Mes participations aux différents projets sont classées ici suivant les thèmes des chapitres du document « Travaux de recherche ».

#### Thème « Bois vert »

- Participation au projet Branches : « Pourquoi les branches des arbres cassent-elle parfois sans raison apparente ? Le cas des charpentières plagiotropes », 2019-2022, financement MITI CNRS, 9k€. Porteur : Gril J. Partenaire.
- Participation au projet de recherche coopératif CNRS-JSPS « Biodiversity and biomechanics of tropical forest tree » avec l'université de Nagoya. Séjour de 3 semaines au Laboratory of Biomaterial Physics, Université de Nagoya, Japon. 02-23.04.08
- Participation au projet Gundishapur « Bois de hêtre » avec l'université de Téhéran, à Karaj. Séjour de 10 jours pour visites, rencontres et expérimentations. 04-14.06.2007
- Participation au projet “Alliance” avec l'Université South Bank, Londres, et l'Université de Cambridge, sur la rhéologie du bois – séjour d'une semaine à Cambridge, GB, 2000-2001
- Participation au projet Européen FAIR CT98-3606 « Stresses in beech », Task 3, 226.000 ECU (LMGC)/ 1.221.612 ECU, Porteur de Task 3 Thibaut B., Coordinateur Becker G., Université Fribourg, Allemagne, 01.07.98-30.06.01
- Participation au PRAD avec le Centre de la recherche forestière (CNRF) de Rabat, sur la valorisation des Eucalyptus - séjour d'une semaine à Rabat, Maroc, 1997-1999
- Participation au projet « Comportement thermomécanique d'une portion de tronc d'arbre. Application à la gélivure et à l'étuvage », 1992-1996, contrat MRT n° 92.G.0562, montant : 350 kF TTC.

#### Thème « Objets en bois du patrimoine »

- Convention de partenariat avec le Musée Fabre de Montpellier pour l'étude du suivi d'un panneau peint du patrimoine, 2016-2018. Mise à disposition d'une vitrine régulée en température et humidité, et de 2 systèmes de stéréo-corrélation par le musée. Financement de 2 stages de Master. En collaboration étroite avec l'université de Florence (GESAAF) et l'université de Poitiers (Institut PPRIME). Collaboration initiée en 2014.
- Participation à la préparation et mise en place de l'exposition *Dans le secret des œuvres d'art* qui démarrera fin mars 2018 au Musée Fabre de Montpellier. Présentation et vulgarisation des résultats obtenus durant 2 ans de suivi.
- Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), collaboration depuis 2010 : Participation au suivi annuel pour les aspects mécaniques de la conservation du support bois de la Joconde de 2010 à 2019. Porteur de l'étude : Gril J.
- Visites et réunions de travail avec Opificio delle Pietre Dure (OPD) *Office de la Pierre Dure*, Florence, 10-13.06.14
- Collaboration avec Courtauld Institute of Art, Université de Londres, depuis 2014
- Participation à un contrat pluri-équipes (équipes Bois et Mathématiques et modélisation en Mécanique du LMG) « Conservation préventive des panneaux en bois peints », étude pour le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne, durée 18 mois, 2009-2010, 15k€

#### Thème « Bois de clarinettes »

- Projet collaboratif Collex-Persee Numbois : *Numérisation de la xylothèque et valorisation de la base de données bois du CIRAD*, 2020-2022, porté par Gérard J., CIRAD, montant 77.8 k€, *soumis*. Partenaire.
- Contrat de collaboration avec l'entreprise Henri Selmer Paris, en vue d'améliorer le processus de séchage de bois tropicaux utilisés en facture de clarinette, 2017-2020, 30k€ sur 3 ans
- Financement d'une thèse CIFRE avec l'entreprise Henri Selmer Paris sur ce thème, sur la période mai 2017- mai 2020.

#### Thème « Bois des ruches »

- Projet en Maturation Initiale financé par la SATT-AxLR « Comptage automatique du *varroa* » en partenariat avec 2 entreprises. 100 k€. Porteur de projet.
- Projet Région Recherche et société 2018 « SAPIC - Des savoirs apicoles cévenols aux connaissances pour la santé des abeilles » en partenariat avec 5 laboratoires. 120 k€. Porteur de projet.
- Projet Soutien à la recherche Montpellier Université d'excellence Muse (2018) « SuperBeeLive - Étude multidimensionnelle des relations abeilles-environnement » en collaboration avec 7 laboratoires. 360k€. Partenaire.
- Obtention d'un poste d'ingénieur de recherche à temps complet pour une durée de 6 mois, et indemnités de 6 mois de stage de Master sur le projet « Bois des ruches », financé par le Labex Numev, avril 2017.
- Obtention de 12 mois de cofinancement de post-doctorant sur le projet « Bois des ruches » en réponse à l'appel « UM Post-Doc » de l'Université Montpellier, juillet 2016.
- Obtention d'un financement de 10k€ euros, et indemnités de 2 stages de Master pour le projet « Bois des ruches » par le Labex Numev, avril 2016.
- Obtention d'un financement de 18 mois de post-doctorant sur le projet « Bois des ruches » par le Labex Numev, Université Montpellier, démarrage en 2016.

#### 3.5.2 Participation à l'organisation de colloques

- École thématique du CNRS Pluribois, *Les bois et leurs usages, approches pluridisciplinaires des actions de la température et des effets sur le bois*, 3-7.06.19, Fréjus, France : membre du comité d'organisation
- Colloque « Sociétés d'abeilles, sociétés humaines, une interdépendance de la préhistoire au futur » organisé par la Mission pour les Initiatives Transverses et l'Interdisciplinarité du CNRS. Paris. 24-25/01/2019 : membre du comité d'organisation
- Ecole thématique du CNRS Pluribois, *Les bois et leurs usages : approches pluridisciplinaires de la « bioraffinerie » du matériau bois*, 12-16.06.17, Mont-de-Marsan, France : membre du comité d'organisation.
- Ecole thématique du CNRS Pluribois, *Les bois et leurs usages: approches pluridisciplinaires de la diversité*, 18-22.05.15, Égletons, France : membre du comité d'organisation.
- International Symposium WoodSciCraft 2014 «Wood Science and Craftsmanship: Cross perspective between Europe and Japan», 8-12.09.14, Montpellier, France : participation à l'organisation locale
- Photomechanics 2013, 27-29 May 2013, Montpellier, France : participation à l'organisation locale.
- 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12 : participation à l'organisation d'une session : au choix de "keynote speaker" et

organisation de la sélection des résumés (tri et envoi des articles aux membres du comité scientifique pour review).

### 3.5.3 Réseau international

- COST FP0904 "Thermo-hydro-mechanical wood behavior and processing" (mai 2010 - mai 2014) Président : P. Navi, Suisse. 1 intervention intitulée *Growth stresses in trees : Origin, role, consequences, measurements*, lors de la 2nd training school Green wood properties modification induced by medium temperatures heat treatment, Cluny, FR, 29-31.03.12 ; 1 communication lors de la conférence finale en 2014.
- COST FP0802 "Micro-characterization techniques in wood mechanics" (novembre 2008 - novembre 2012) Président : K. De Borst, Autriche. 1 communication dans un workshop en 2010.
- COST IE0601 "Wood science for conservation of cultural heritage" (avril 2007 - octobre 2011) Président : L. Uzielli, Italie. 2 communications dans des conférences en 2007.
- COST E50 "Cell wall macromolecules and reaction wood (CEMARE)" (2005-2009) Président: J. Barnett, UK. 1 communication lors de la conférence finale en 2009.
- COST E35 "Fracture mechanics and micromechanics of wood and wood composites with regard to wood machining" (février 2004 - février 2008) Président : S. Tschegg, Autriche. 1 communication lors d'une conférence en 2006.
- Participation au groupe de recherche international « Plant Biomechanics », organisateur d'un colloque international tous les 3 ans, depuis 1994. 1 contribution à ouvrage édité en 2018, 1 conférence invitée en 2018, 11 communications lors des conférences.

### 3.5.4 Réseau national

- Collaborations Centre Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE), BiowooEB (CIRAD), SupAgro Montpellier depuis 2016
- Membre du groupe Bois de la Section Française de l'Institut International de Conservation (SFIIC) depuis 2013 : participation aux journées annuelles d'étude. 2 interventions invitées lors des journées annuelles.
- Membre du GDR Sciences du Bois 3544 depuis 2012, implication dans le groupe de travail Imagerie. 10 communications lors des journées annuelles. Participation à l'organisation et formatrice lors de 3 écoles thématiques.
- Membre de l'association Mecamat, association française de mécanique des matériaux, depuis 2001. 4 communications lors des colloques nationaux.

### 3.5.5 Expertises / évaluations

#### 3.5.5.1 Évaluation de projet

- Expert pour l'évaluation d'un projet de recherche de la Région Nouvelle Aquitaine, avril 2017
- Expert pour l'évaluation d'un projet de recherche du gouvernement Suédois, septembre 2007.

#### 3.5.5.2 Évaluation d'organisme français

- Expert pour l'évaluation des personnels du CIRAD (Montpellier), pour l'évaluation 2018. Évaluation de 11 dossiers, participation à la rédaction de 56 avis
- Expert pour l'évaluation des personnels du CIRAD (Montpellier) en 2013. Rapporteur principal ou secondaire de 12 dossiers.

### **3.5.5.3 Membre de jury de recrutement**

- 2 postes de Maître de Conférences à l'ENSAM, 1 à Châlons, 1 à Metz, pour la campagne d'emplois 2018. Rapporteur de 7 dossiers. Audition de 5 candidats.
- 3 postes de Maître de Conférences à l'ENSAM, 2 à Châlons, 1 à Cluny, pour la campagne d'emplois 2017. Rapporteur de 6 dossiers. Audition de 5 candidats.
- 1 poste de Maître de Conférences à l'université de Montpellier pour la campagne d'emploi 2013. Rapporteur de 4 dossiers, audition de 7 candidats.
- 1 poste d'ingénieur de recherche CNRS en Informatique, statistique et calcul scientifique, au LMGC, Montpellier, septembre 2012. Examen de 18 dossiers.

### **3.5.5.4 Membre de jury de diplôme**

- Membre du jury de soutenance de mémoire de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier en 2015. Rapporteur de 11 mémoires.
- Rapporteur scientifique et membre du jury de Jonathan Graindorge Lamour pour l'obtention du diplôme de Restaurateur du patrimoine, spécialité mobilier de l'Institut National du Patrimoine, Paris, 10.09.12.
- Membre du jury de thèse de Adelin Barbacci, AgroParisTech, spécialité Sciences forestières et du bois, Nancy, 25.01.08

### **3.5.5.5 Relecture d'articles scientifiques**

- Journal of Wood Science : 1 en 2019, 1 en 2011
- Studies in conservation : 1 en 2015
- Holzforschung : 1 en 2013
- Physical and chemical news : 1 en 2010
- Journal of Tropical Forest Science : 1 en 2010
- Wood science and technology : 1 en 2007

### **3.5.6 Vie du laboratoire**

- Responsable de l'équipe Bois du LMGC depuis juin 2017 : actuellement 4 enseignants-chercheurs, 4 chercheurs CNRS, 1 post-doctorante, 1 ingénieure de recherche sous contrat, 1 ingénieure pédagogique sous contrat, 3 doctorants.
- Élu(e) membre de la commission de section CNU du département scientifique MIPS de l'université de Montpellier depuis juin 2017
- Participation au *Parcours Management* organisé dans un cadre inter-universitaire par la formation permanente, 7 jours de janvier à décembre 2017. Module 1 - Manager et animer une équipe, Module 2 - Eléments de GRH pour le personnel d'encadrement, Module 3 - Piloter l'activité, Module 4 - Gérer les relations interpersonnelles, Bilan du parcours
- Participation à la formation : Accompagner et Encadrer un doctorant, 08-09.06.2017
- Élu(e) au Conseil de Laboratoire du LMGC pour le collège des chercheurs et enseignants-chercheurs de Février 2007 à Décembre 2010, puis d'Octobre 2012 à Février 2015
- Membre de la commission Communication du LMGC de Janvier 2013 à Mars 2014

# Travaux de Recherche

## Introduction

Ce document a pour objectif de faire un bilan des travaux de recherche abordés, finalisés ou non selon les cas. La recherche étant pour moi avant tout une aventure humaine, il me paraît indispensable de décrire dans quel contexte humain ces travaux ont été menés, quels étaient les acteurs à mes côtés durant toutes ces années. Je m'efforcerai donc de décrire comment les différentes thématiques traitées se sont initiées puis développées.

Les thèmes de recherche abordés se multiplient au fil du temps, sans pour autant l'abandon des plus anciens, sans doute par attachement à une thématique, une communauté, des personnes. Ces thématiques s'enrichissent de nouvelles rencontres, de nouvelles disciplines, de nouveaux groupes socio-économiques. Des questions sont posées, je souhaite mettre en œuvre les réseaux nécessaires pour y apporter quelques réponses. J'aborde mes travaux de recherche comme j'aborde la vie : je souhaite établir entre les personnes, les institutions, les thématiques, les liens permettant la mise en place d'un terrain propice à apporter des réponses aux questions posées. D'une manière générale, mes travaux présentent la particularité de concerner des essais de comportement mécanique, parfois « peu contrôlés » car les objets étudiés ne peuvent pas être déplacés en laboratoire, dans le but de caractériser l'état des contraintes internes de structures complexes.

Pour présenter ces travaux, j'ai choisi de suivre le parcours du matériau, de son élaboration dans l'arbre à son utilisation par les sociétés humaines.

Le premier thème de recherche concerne **le bois vert**, et plus particulièrement les contraintes de croissance mises en place lors de l'élaboration même du matériau : pour cela, on partira de l'arbre sur pied, puis on explorera comment mesurer son état de contrainte, par diverses méthodes expérimentales, en étant de plus en plus intrusif et destructif. On ira de la simple mesure de déformation locale faite à la périphérie de l'arbre sur pied, jusqu'aux mesures globales sur rondelles par la méthode de la fermeture, en passant par les mesures sur planches diamétrales impliquant de nombreuses jauges de déformation. Nous verrons comment les modèles numériques permettent d'analyser les mesures expérimentales effectuées.

Le second thème concerne le bois hors de l'arbre qui, sans intervention, de manière non contrôlée, devient **bois « sec à l'air »**, et notamment quelles sont les conséquences du passage de l'état de bois vert à l'état de bois sec. Ce deuxième chapitre est plus restreint, mais présente l'avantage de mettre en avant les variations dimensionnelles spectaculaires du bois vert lors du départ de l'eau le constituant, lorsque sa teneur en eau passe en dessous du point de saturation des fibres. Nous verrons comment quantifier ces déformations sur rondelles, rondins, et même à l'échelle moléculaire. Ces phénomènes de séchage libre ont notamment fait l'objet de démonstrations sur des forums scientifiques ou dans des écoles pour sensibiliser le grand public. Le troisième thème aborde le **bois, matériau hygroscopique**, en considérant à présent les variations hygrothermiques de l'environnement et leurs effets sur les objets en bois, toujours en recherche d'équilibre hygroscopique avec leur environnement. Cette troisième partie est déclinée en 4 sous-parties, correspondant à 4 types d'objets en bois auxquels je me suis intéressée : les panneaux peints du patrimoine, les répliques de panneaux, les clarinettes et les ruches. Nous verrons comment s'articulent ces 4 sous-thèmes, et comment la problématique des ruches a ouvert mes recherches vers de larges horizons multi-disciplinaires.



## Partie A : Le bois vert

### 1 Le bois vert, bois dans l'arbre

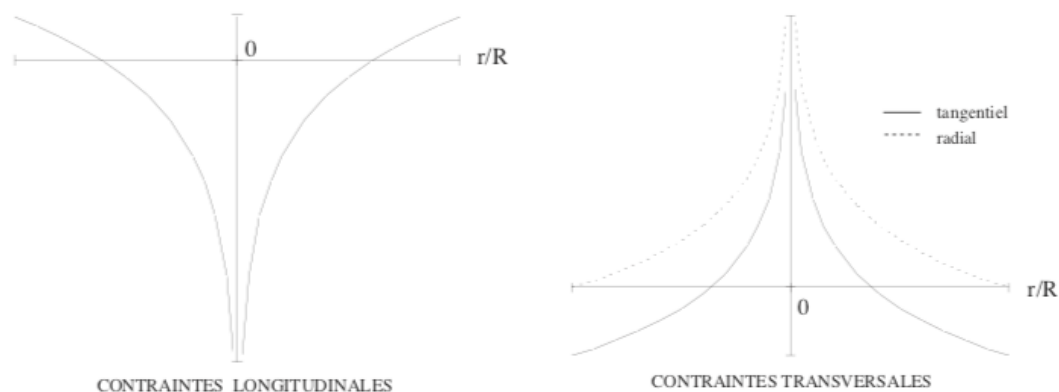
Ce premier chapitre concerne le bois dans l'arbre sur pied. La particularité de ce bois est qu'il est gorgé d'eau, il est à un taux d'humidité toujours supérieur au point de saturation des fibres, il ne subit donc pas de variations dimensionnelles. L'état mécanique du bois dans l'arbre sur pied dépend de l'histoire de son chargement.

Partant de l'arbre sur pied pour aller jusqu'aux rondelles de bois vert, je vous propose d'explorer les différentes procédures expérimentales et numériques que j'ai développées et/ou mises en œuvre durant toutes ces années pour mieux appréhender le phénomène des contraintes de croissance, thème phare de mes recherches, et encore d'actualité.

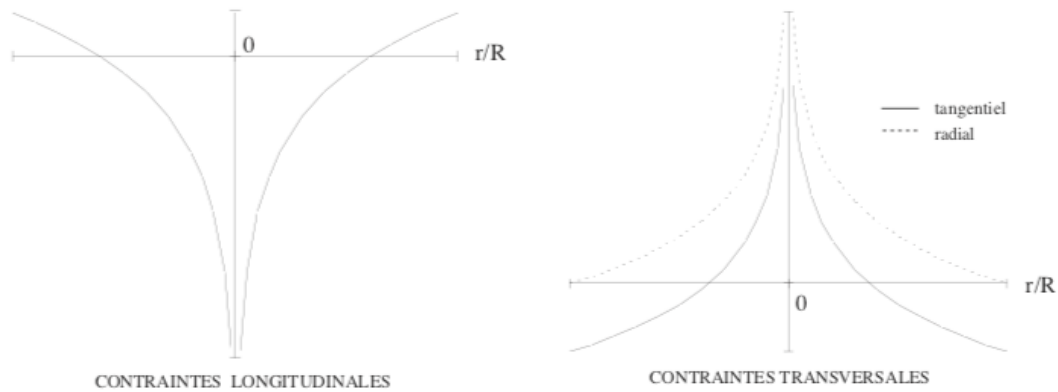
Sur cette thématique, j'ai récemment apporté ma contribution à un article de synthèse intitulé « Tree growth stress and related problems » pour la revue « Journal of wood science » [2]. J'ai également été invitée à effectuer un exposé de synthèse intitulé *Growth stresses and their consequences on tree mechanics* à la conférence « 9th international Plant Biomechanics Conference » à Montréal en août 2018 [12]. Je suis également co-auteur de la conférence invitée de T. Alméras au colloque Mécamat Aussois 2020, dont le thème principal était les contraintes résiduelles [36].

#### 1.1 La mise en place des contraintes de croissance

Lors de la croissance de l'arbre, le bois se met en place par couches successives à la périphérie de la grume. Suite à la formation d'une nouvelle couche de bois, ce matériau juste créé est généralement mis sous tension longitudinale. Ces tensions sont fortes, de l'ordre de 10 MPa, et peuvent atteindre des valeurs bien plus importantes, 50 MPa par exemple, dans le bois dit "de tension". Pour que l'équilibre de la section de la grume soit respecté, cette mise en tension longitudinale des couches périphériques s'accompagne d'une mise en compression longitudinale des couches centrales, plus anciennes. La répétition de ce phénomène, couche après couche, aboutit à un état de contrainte longitudinale bien illustré par le modèle de Kübler



( Figure 1). Ce modèle fait l'hypothèse d'une croissance axisymétrique, et d'une tension constante en périphérie au cours du temps. Un modèle plus réaliste prenant en compte le déséquilibre de la structure et son redressement a été établi par Fournier en 1991.



**Figure 1 : Profil de distribution des contraintes longitudinales (à gauche), radiales et tangentielles (à droite) dans l'arbre sur pied d'après Kübler (issu de [1]).**

En effet, l'arbre peut jouer sur l'intensité de ces tensions pour créer un moment de flexion lui permettant de s'orienter, pour atteindre par exemple une source de lumière.

Les mécanismes de mise en place de ces contraintes, ainsi que leurs fonctions biologiques pour l'arbre, ont notamment été explicités dans un article s'adressant au public forestier [6].

## 1.2 Les conséquences des contraintes de croissance pour l'arbre

Les contraintes de croissance jouent un rôle clé pour l'arbre. Elles lui permettent de mieux résister aux charges temporaires et permanentes auxquelles il est soumis durant sa vie.

En effet, le tronc et les branches de l'arbre sont généralement sollicités en flexion : par exemple lors de l'action d'un vent latéral sur le tronc, lors de l'action de la neige sur les branches, ou bien l'effet du poids des fruits sur les branches de l'arbre fruitier, etc. Cette sollicitation en flexion engendre des efforts maximaux de tension et compression longitudinale en périphérie du tronc ou de la branche. Or, la résistance à la compression longitudinale du bois étant faible, la précontrainte de tension en périphérie permet de diminuer fortement la sollicitation en compression, et permet ainsi à l'arbre de mieux résister à de tels chargements. La périphérie de l'arbre, zone où le bois est vivant, en formation, est ainsi protégée.

Les contraintes de croissance entraînent de fortes sollicitations en compression au cœur de la grume, notamment pour les arbres de gros diamètres. Mais cette partie centrale ne joue un rôle clé ni dans la tenue mécanique de la structure, une structure tubulaire restant très résistante aux chargements de flexion, ni dans le fonctionnement biologique de l'individu, cette partie centrale étant constituée essentiellement de cellules mortes.

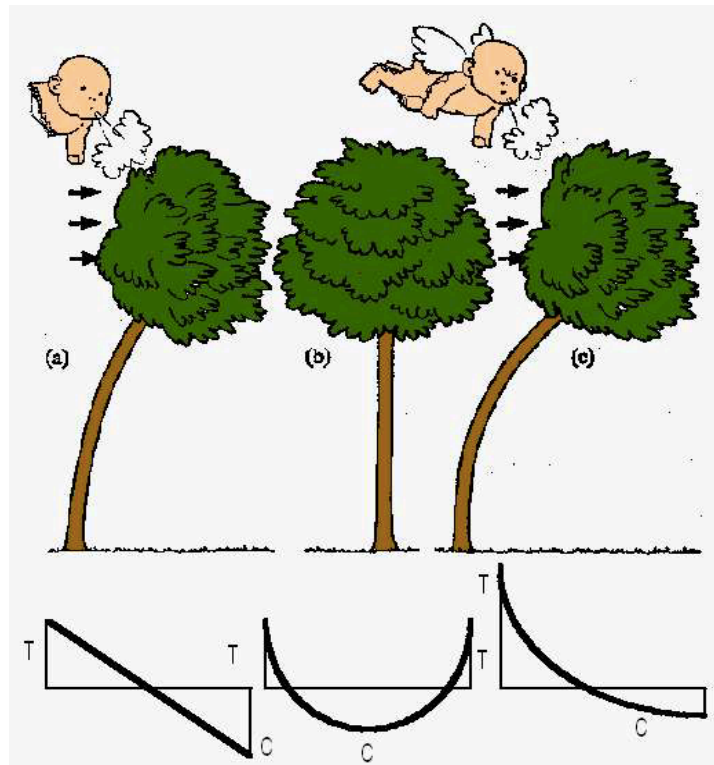


Figure 2 : Sollicitation de l'arbre a) flexion seule b) précontrainte seule c) précontrainte et flexion

Ce large thème de la flexion des tiges, et du rôle joué par les contraintes de croissance, a été poursuivi et relayé notamment lors du colloque international Plant Biomechanics, initié en 1994, et ayant lieu tous les 3 ans depuis cette première date [19][13][14][12].

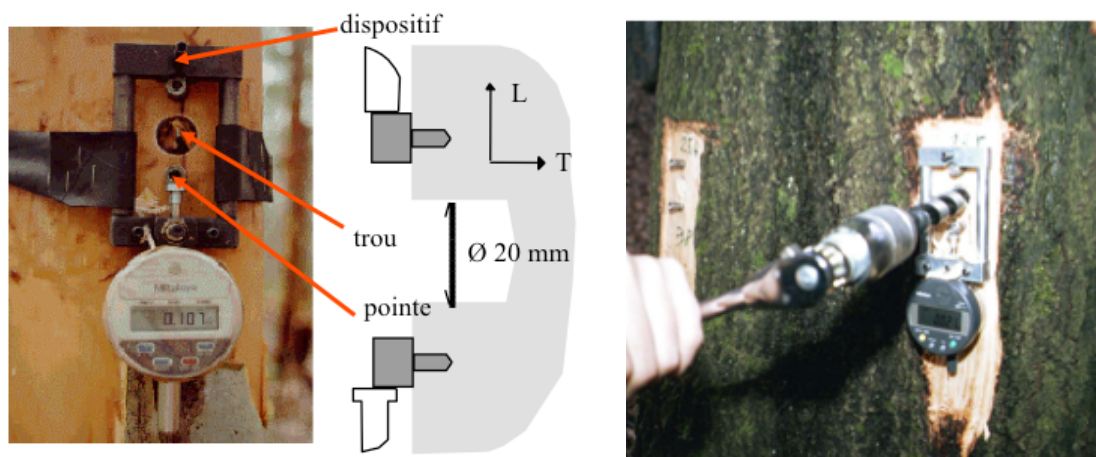
Dans ces travaux, ma contribution concernait soit la collecte de données expérimentales pouvant être confrontées aux modèles théoriques, soit le développement de modèles numériques généralement basés sur la méthode des éléments finis.

### 1.3 Mise en évidence des contraintes de croissance dans l'arbre sur pied

#### 1.3.1 La méthode du trou unique

La méthode du trou unique, développée notamment par le CIRAD, permet d'évaluer les profils des déformations de maturation, autour de la périphérie de l'arbre. Elle consiste à percer une série de trous, généralement 8, à une même hauteur, à la périphérie du tronc, et à mesurer suite au perçage le déplacement relatif de 2 pointes placées de part et d'autre de chaque trou et alignées avec l'axe de l'arbre (Figure 3).

Cette mesure, appelée « indice de contrainte de croissance » (ICC) est approximativement proportionnelle à la contrainte de croissance longitudinale à la périphérie du tronc. Elle nécessite cependant de connaître une estimation de la rigidité longitudinale du bois, pour évaluer la contrainte correspondante. Elle reste néanmoins un très bon indicateur des contraintes de croissance, et permet de comparer rapidement une série d'arbres de nature proche.



**Figure 3 : Méthode du trou unique**

Cette méthode expérimentale a été appliquée à un grand nombre d'arbres, environ 500, dans le cadre d'un projet européen visant à mettre en relation les modes de sylviculture, la morphologie de l'arbre et les contraintes de croissance de différents peuplements de hêtre de 5 pays d'Europe [40]. Les relations entre morphologie de l'arbre et contraintes de croissance, basées sur ces mesures, ont fait l'objet d'un article s'adressant à la communauté des sciences forestières [3].

Cette même méthode a fait l'objet d'une campagne de mesures sur une série de hêtres d'Iran (*Fagus Orientalis L.*) dans la forêt Hyrcanienne, proche de la mer Caspienne, lors d'une collaboration avec l'université de Téhéran (projet Gundishapur) en 2007 et 2008. L'objectif de cette collaboration était d'une part de former nos collègues iraniens à cette méthode de mesure [22][20], et d'autre part d'étudier l'effet de l'annélation sur les contraintes de croissance. L'annélation est une opération consistant à creuser un anneau sur le pourtour de l'arbre un an avant l'abattage, avec pour objectif de faire chuter les contraintes de croissance (Figure 4). Cependant, dans notre étude, le niveau de contrainte des 10 arbres annelés n'a pas montré de différence significative avec celui des 10 autres arbres non traités, entre 2008 et 2007 (Figure 5).



**Figure 4 : Forêt Hyrcanienne – Iran – Annélation d'un arbre**

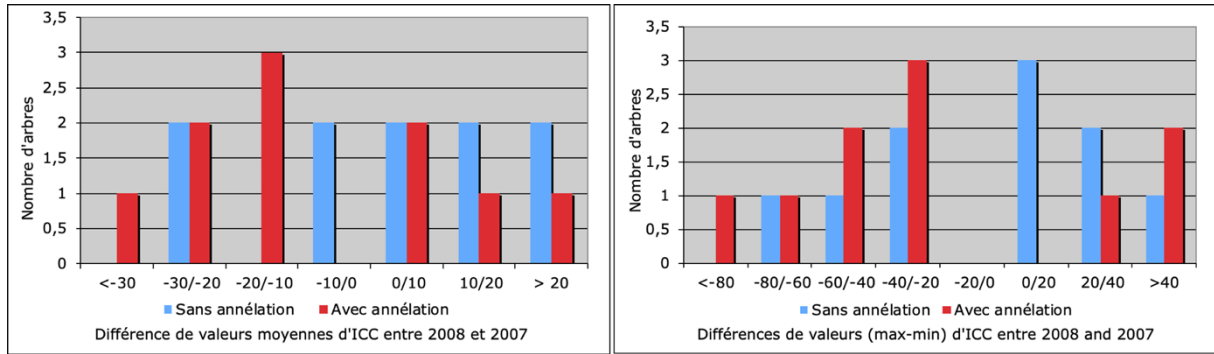


Figure 5 : Effet non significatif de l'annélation sur les valeurs moyennes d'ICC (à gauche) et sur les valeurs (max-min) d'ICC (à droite) entre 2008 et 2007.

Des mesures de propriétés physiques et anatomiques de ces individus ont été effectuées et mises en relation avec les indices de contrainte de croissance [15].

### 1.3.2 La méthode des deux rainures

Une seconde méthode plus directe consiste à mesurer, à l'aide d'une jauge collée à la périphérie du tronc et alignée avec l'axe de celui-ci, la déformation résultant de la réalisation de 2 rainures, au-dessus et en-dessous de la jauge (Figure 6). Comme pour la méthode du trou unique, cette mesure est répétée sur la circonférence de l'arbre. Elle est plus adaptée aux arbres de petits diamètres, qui font alors l'objet de 2 ou 4 points de mesure à une même hauteur, en fonction du diamètre de la tige.

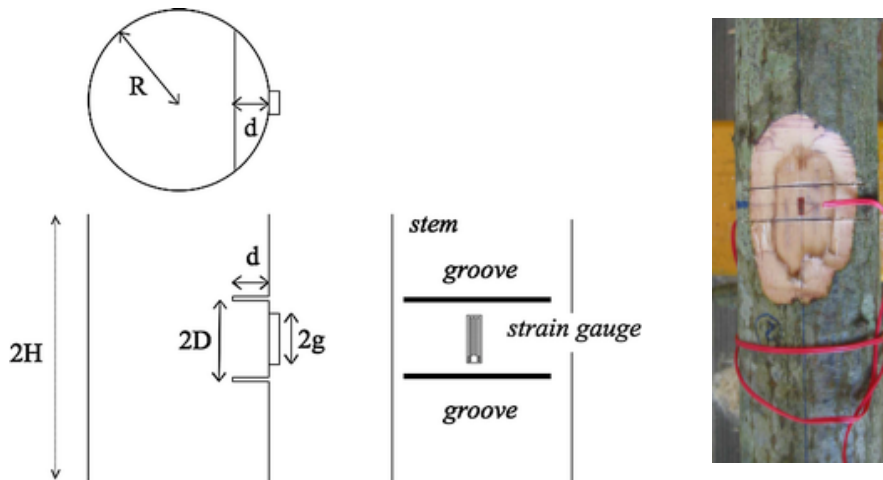


Figure 6 : Méthode des deux rainures

Une étude approfondie, basée sur un modèle numérique utilisant le calcul par éléments finis, a permis d'évaluer l'influence de différents paramètres sur la mesure : diamètre de la tige, longueur de la jauge, distance entre la jauge et l'entaille, profondeur de l'entaille, etc. [5][23][24]. Pour ces calculs, différents profils de champ de contrainte de croissance sont supposés bloqués dans une tige. La méthode des 2 rainures est modélisée : de nouvelles surfaces, correspondant aux 2 entailles, sont créées de part et d'autre de la zone de mesure (Figure 7). L'effet de l'annulation du champ de contrainte sur ces nouvelles surfaces permet d'obtenir la déformation correspondant à celle mesurée expérimentalement par la jauge de déformation. On peut alors comparer cette mesure de déformation aux déformations de maturation bloquées « numériquement » dans la tige. L'outil numérique développé permet de

simuler des situations spécifiques. Les calculs ont permis de montrer que dans le cas de tiges de très petits diamètres, cette méthode sous-estime les déformations de maturation.

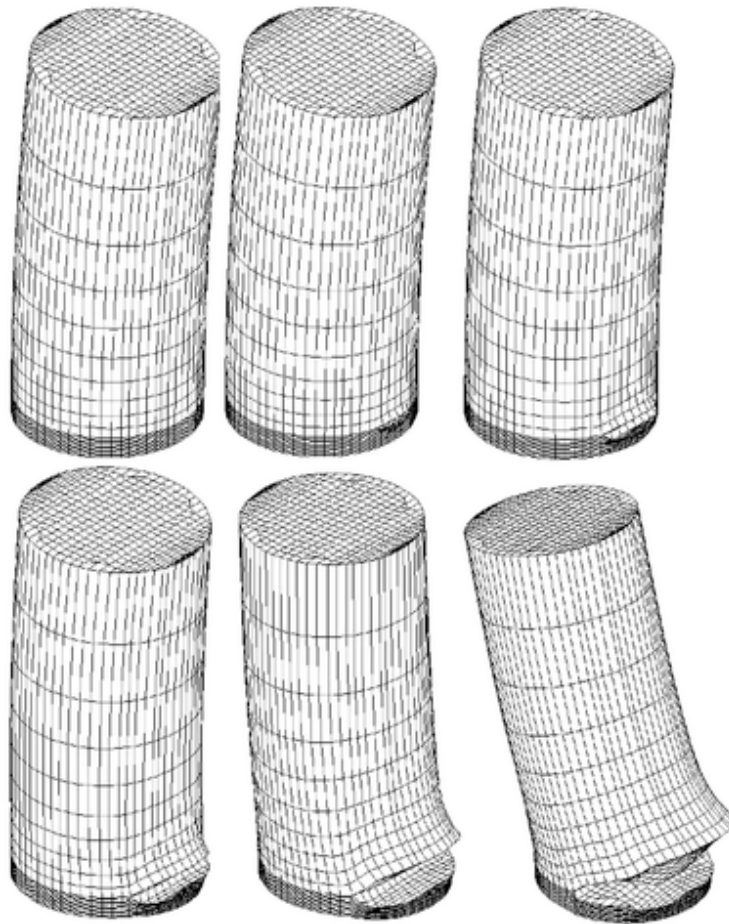
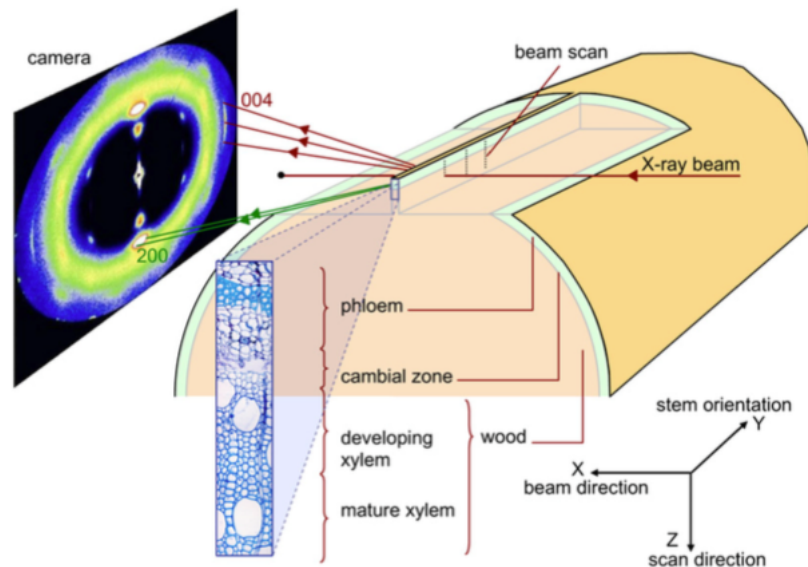


Figure 7 : Simulation par éléments finis de la méthode des deux rainures

### 1.3.3 A une échelle beaucoup plus fine : par microdiffraction de rayons X

Le mécanisme à l'origine de la mise en place des contraintes de maturation n'étant toujours pas bien compris, plusieurs hypothèses restent avancées. Dans le but de discriminer certaines de ces hypothèses, j'ai participé à la mise en œuvre d'une procédure expérimentale visant à mesurer les changements de structure des microfibrilles de cellulose, le long de séquence de différenciation de cellules de xylème, dans du bois de tension et du bois normal de peuplier (Figure 8). La méthode de microdiffraction de rayons X a été utilisée au sein du synchrotron de Grenoble pour mesurer l'évolution de l'angle et de la distance de maille de la cellulose cristalline. Ces mesures ont été mises en correspondance avec le dépôt des couches de parois cellulaires successives [4][16][17][18]. Les profils obtenus sur bois normal et bois de tension étaient très semblables pendant les premières phases de développement, correspondant à la formation de la couche  $S_1$  et de la partie extérieure de la couche  $S_2$ . Les couches suivantes présentaient un angle de microfibrille (MFA) plus faible, correspondant au dépôt de la partie interne de la couche  $S_2$  du bois normal (MFA d'environ  $10^\circ$ ) et à la couche G du bois de tension (MFA de  $0^\circ$ ). Dans le bois de tension seulement, cette chute de MFA se produisait en même temps qu'une augmentation de la distance de maille de la cellulose. L'augmentation relative de la distance de maille était proche de la valeur usuelle des déformations de maturation. L'analyse a montré que l'augmentation de cette distance est en partie due à la contrainte mécanique induite dans les microfibrilles de cellulose juste après leur dépôt, suggérant que la couche G générerait

et supportait directement la contrainte de maturation de tension dans le bois de tension du peuplier.



**Figure 8 : Montage expérimental schématisé montrant le faisceau de rayons X passant perpendiculaire au plan longitudinal-radial et la contribution des plans cristallins (004) et (200) sur le diffractogramme enregistré par la caméra [4].**

A la suite de ces travaux, un projet de recherche d'envergure visant à comprendre la génération des contraintes de maturation dans le bois de tension par une approche physiologique et micromécanique couplée, intitulé *StressInTrees*, s'est déroulé de 2012 à 2016, réunissant 3 laboratoires : ECOFOG (UMR Ecologie des forêts de Guyane), AGPF-INRA d'Orléans (Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières) et l'équipe Bois du LMGC.

## 1.4 Mise en évidence des contraintes de croissance après abattage de l'arbre

### 1.4.1 Phénomène de fissuration à cœur

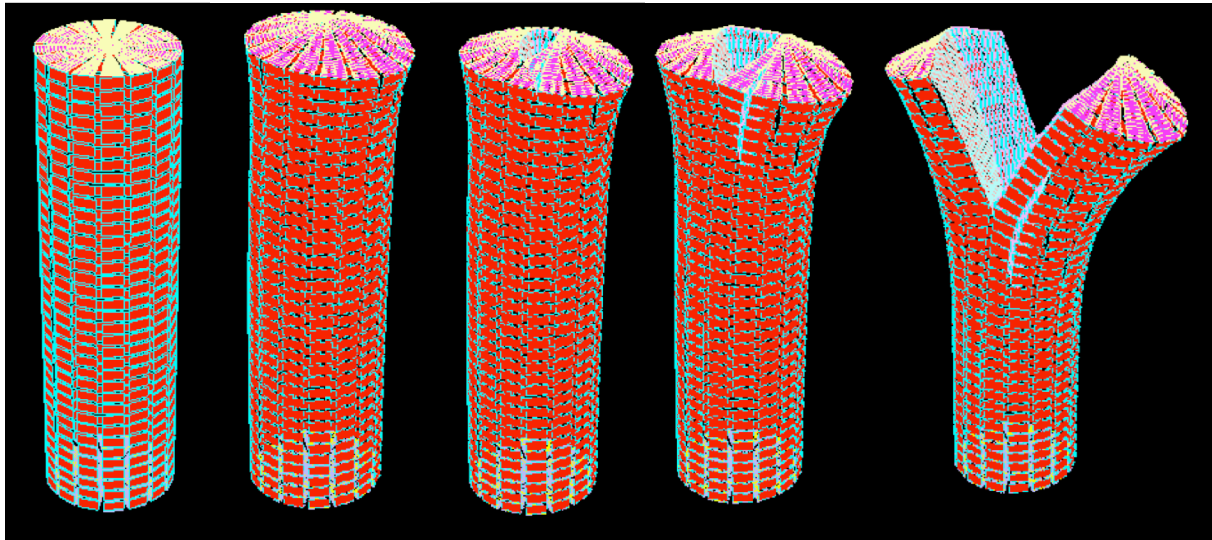
Une conséquence importante des contraintes de croissance apparaît lors de l'abattage de l'arbre. Lors de cette opération, une nouvelle surface est créée dans la grume. Les contraintes longitudinales sont annulées sur cette surface et sont redistribuées en bout de grume. Ce nouveau champ de contrainte a pour effet de raccourcir la structure dans les zones périphériques du tronc, et de l'allonger dans la zone centrale. Il en résulte très souvent l'apparition de fentes à cœur, appelées fentes à l'abattage. Le nombre et la longueur des fentes observées sont fortement liés au champ de contrainte bloqué dans la grume.

L'analyse de ce phénomène de fente à l'abattage a fait l'objet d'une grande partie de mon travail de recherche. J'ai pu mener durant plusieurs années des études à la fois sur le plan expérimental et numérique. La modélisation de ce problème a notamment été développée dans le travail de thèse de Aziz Laghdir [46], et appliquée plus particulièrement au cas de l'Eucalyptus.

Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis a été élaboré en utilisant le code de calcul Modulef. Un champ de contrainte est supposé bloqué dans une structure tridimensionnelle représentant la grume. L'effet de l'abattage est simulé en annulant numériquement les contraintes sur la nouvelle surface transverse créée. Puis la présence de fentes de diverses typologies (nombre, forme, longueur, profondeur, etc.) est considérée. On suppose dans notre démarche que la situation de fente la plus probable est celle qui libère le

plus d'énergie bloquée. De proche en proche, on peut ainsi modéliser une succession de situations, s'apparentant à une propagation de fentes (Figure 9).

Cette méthode a été utilisée pour étudier l'influence du champ de contrainte initial sur la typologie des fentes observées, mais également pour analyser l'effet d'un gradient de densité, et donc de rigidité du bois du cœur à la périphérie, ou encore l'effet de l'anisotropie du matériau [7] [8] [25] [26] [27] [29] [30] [31].



**Figure 9 : Modélisation par éléments finis de l'effet de l'abattage. Apparition et propagation de deux fentes à cœur**

Des mesures expérimentales visant à mettre en relation les indicateurs de contrainte de croissance et la typologie des fentes ont également été menées à grande échelle lors de différents projets (Projet Hêtre en Europe [40], Projet Eucalyptus au Maroc [28], Projet Hêtre en Iran [15]).

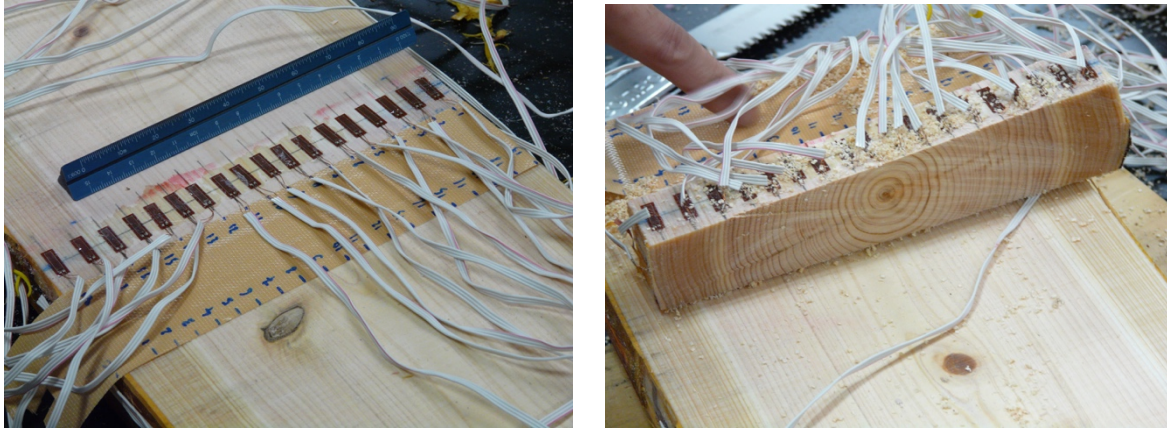
Cette approche énergétique de la fissuration a fait l'objet de présentations lors de séminaires dans des universités à l'étranger : à l'université de Téhéran (Iran) en 2007 [22], à l'université de Nagoya (Japon) en 2008 [39].

## **1.4.2 Profil de déformations résiduelles longitudinales, du cœur à la périphérie de l'arbre**

### **1.4.2.1 Mesures sur planche diamétrale et modélisation**

Une fois l'arbre abattu, il est possible d'accéder aux déformations résiduelles, du cœur à la périphérie de la grume. Une méthode intéressante et qui a le mérite d'être directe consiste à découper une planche diamétrale dans la grume. Des jauges de déformations sont alors positionnées le long du diamètre de la planche, orientées dans la direction longitudinale, et suffisamment loin des extrémités de la planche pour s'affranchir des effets de bords. Les déformations résiduelles longitudinales sont libérées et mesurées en opérant 2 traits de scie à proximité des extrémités des jauges (Figure 10).

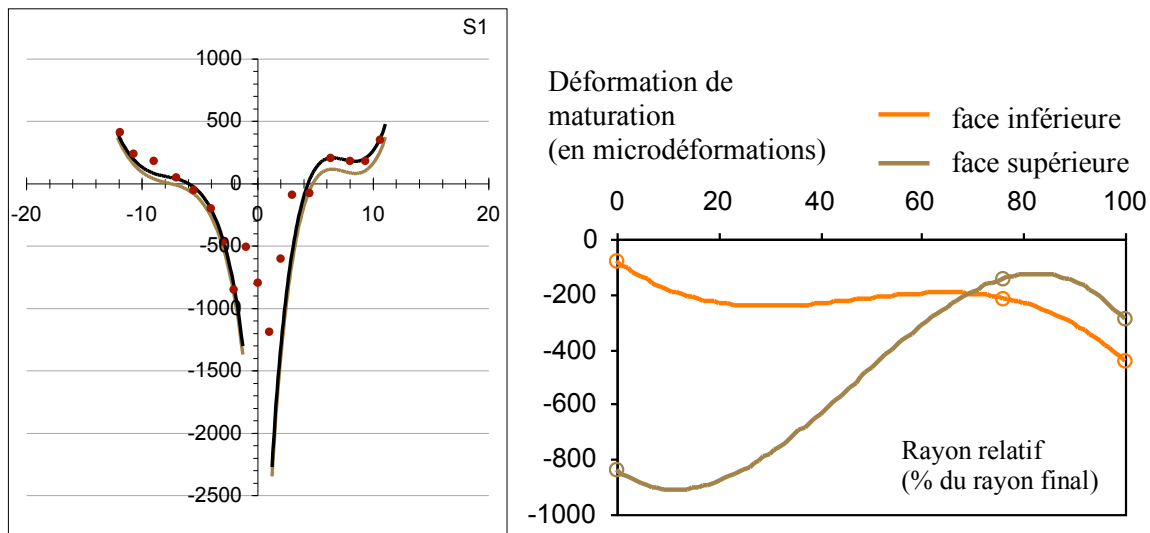




**Figure 10 : Mesure de profil de déformation sur planche diamétrale. Positionnement des jauges, découpe libérant les déformations résiduelles**

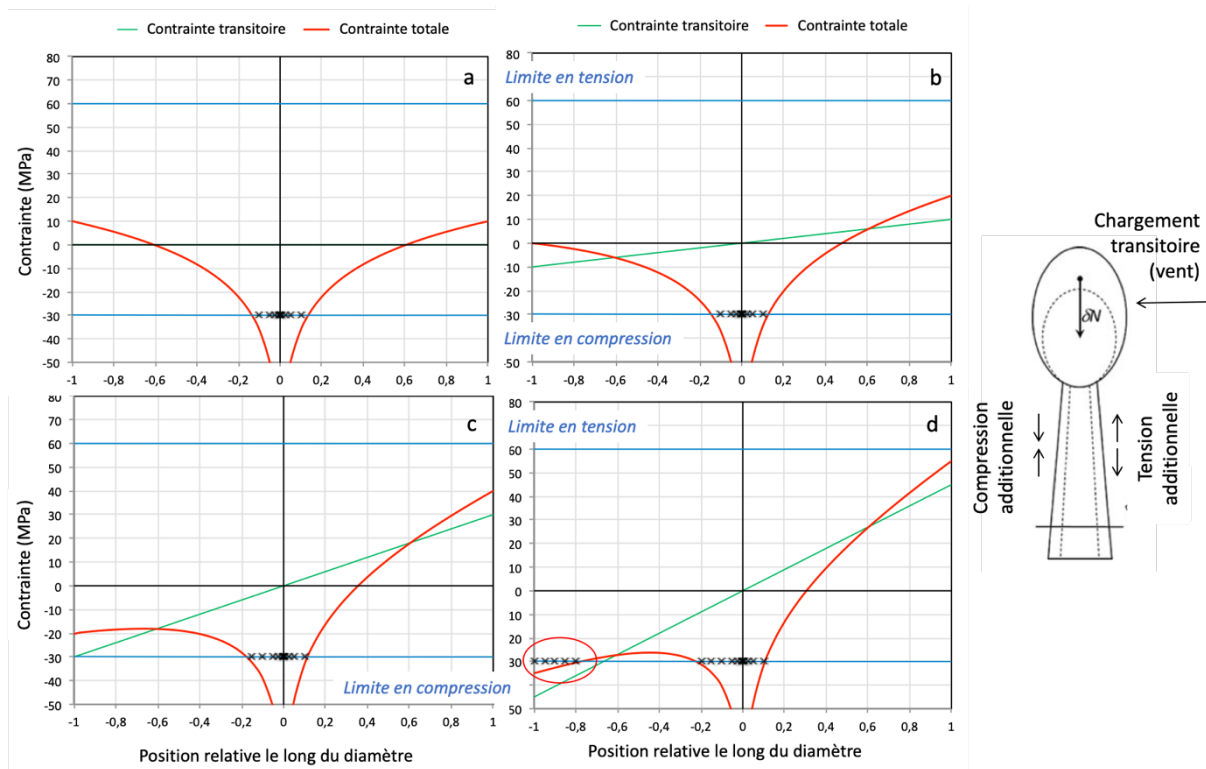
Cette méthode permet d'obtenir des profils de déformations résiduelles longitudinales le long du diamètre. De tels profils expérimentaux peuvent être utilisés pour imaginer des scénarios de croissance plausibles, à l'aide d'un modèle biomécanique, moyennant certaines hypothèses telles que : la croissance excentrée basée sur la mesure des rayons diamétralement opposés, l'inclinaison maximale de l'arbre, la déformation de maturation qui peut évoluer au cours de la croissance de l'arbre, l'évolution du poids de l'arbre qui est fonction de son diamètre à la base, le module élastique de l'arbre estimé arbitrairement à 12 GPa. Les paramètres du modèle biomécanique développé par Tancrede Alméras sont ajustés de manière à minimiser la différence entre les profils de déformations numériques simulés et les profils expérimentaux (Figure 11) [19]. Cette méthode a été appliquée au Japon à 3 arbres Sugi de diamètre 23 cm, 19 cm et 8 cm, et en France à 4 peupliers de diamètre 6 cm, 7 cm, 8 cm et 14 cm. Les scénarios de croissance obtenus semblent être réalistes. Le modèle confirme également que la méthode consistant à mesurer les déformations résiduelles sur des planches diamétrales donne une bonne estimation des déformations dans l'arbre sur pied, à condition que le profil ne soit pas fortement déséquilibré.

Diverses hypothèses de croissance ont fait l'objet de modèles spécifiques tels que : le cas de la grume axisymétrique droite et verticale chargée par son poids propre, ou bien chargée par les contraintes de maturation dans le bois récemment créé, le cas de la grume réagissant de façon active avec une orientation « stationnaire », ou bien fléchissant de façon passive à son poids propre, ou encore soumise à des efforts de flexion pendant sa croissance. Ces modèles ont été confrontés aux mesures expérimentales. Cette démarche a fait l'objet d'un chapitre de l'ouvrage intitulé « *Plant Biomechanics. From Structure to Function at Multiple Scales* » [10].



**Figure 11 :** À gauche – Déformation longitudinale résiduelle (en microdéformations) en fonction de la position radiale (en cm) pour un arbre Sugi. Courbe marron : profil simulé de déformation résiduelle dans l'arbre (avant l'extraction de la planche), courbe noire : profil simulé de déformation résiduelle dans la planche, points : déformations résiduelles expérimentales. À droite : évolution hypothétique de déformation de maturation (en microdéformations) pendant la croissance en fonction du rayon relatif (% du rayon final) sur chaque face de l'arbre. Les paramètres ont été ajustés pour minimiser la différence entre les profils de déformation résiduelle simulés et expérimentaux.

Ce travail a été poursuivi par l'étude des conséquences de l'état de précontrainte sur la résistance des grumes [11] [12]. Dans le cas du profil de Kübler, tout en sachant que le modèle prédit des contraintes excessives au cœur de la grume, il est néanmoins probable que cette partie centrale atteigne la limite en compression du matériau durant la croissance (Figure 12a). Lorsqu'on rajoute à ce profil un chargement transitoire en flexion, pour simuler l'effet du vent sur la structure par exemple, on montre que ces précontraintes sont toutefois bénéfiques pour la résistance de la grume : dans le cas simulé, la limite en compression est atteinte pour une compression additionnelle de 40 MPa au lieu de 30 MPa (Figure 12b, c, d). Considérant une prétension typique de 10 MPa et une limite en compression de 30 MPa, cela représente une augmentation de 33% de la résistance de la grume.



**Figure 12 : Profil de contraintes résiduelles longitudinales d'un arbre. Modèle de Kübler seul (a) prise en compte d'un chargement transitoire entrainant une tension et compression additionnelles en périphérie de (b) 10 MPa (c) 30 MPa (d) 45 MPa. Les précontraintes endommagent le matériau en compression à cœur mais retardent les dommages en périphérie. La résistance globale de la structure est augmentée.**

#### 1.4.2.2 Mesures sur tige progressivement réduite en diamètre

Une seconde méthode permettant d'obtenir le profil des déformations résiduelles consiste à utiliser la méthode des 2 rainures, présentée auparavant, à différentes positions radiales de la tige. Pour cela, une première mesure est faite à l'aide de jauges positionnées en périphérie de la tige. Puis le diamètre de la tige est réduit jusqu'à la profondeur des rainures, à l'aide d'un tour. De nouvelles jauges sont positionnées, la méthode des 2 rainures est à nouveau appliquée pour ces nouvelles positions radiales. Cette procédure peut être répétée plusieurs fois, si le diamètre initial de la tige n'est pas trop petit (Figure 13).

Lorsque les rainures sont réalisées, le profil des contraintes se rééquilibre : les valeurs de déformations mesurées ne sont donc pas celles de l'arbre à l'état initial. Il est nécessaire de faire une hypothèse sur le profil interne pour accéder aux valeurs de déformations recherchées.

Cette méthode a été testée et appliquée sur une tige de châtaignier de 4,2 cm de diamètre lors du stage de Master 1 de Pierre Cabrolier [44]. Six valeurs ont pu être mesurées le long du diamètre de la tige (Figure 14). Cette méthode est intéressante mais présente l'inconvénient d'obtenir des mesures moins directes que la méthode précédente. Elle mériterait néanmoins d'être testée sur des tiges de plus gros diamètre et comparée à la méthode précédente.

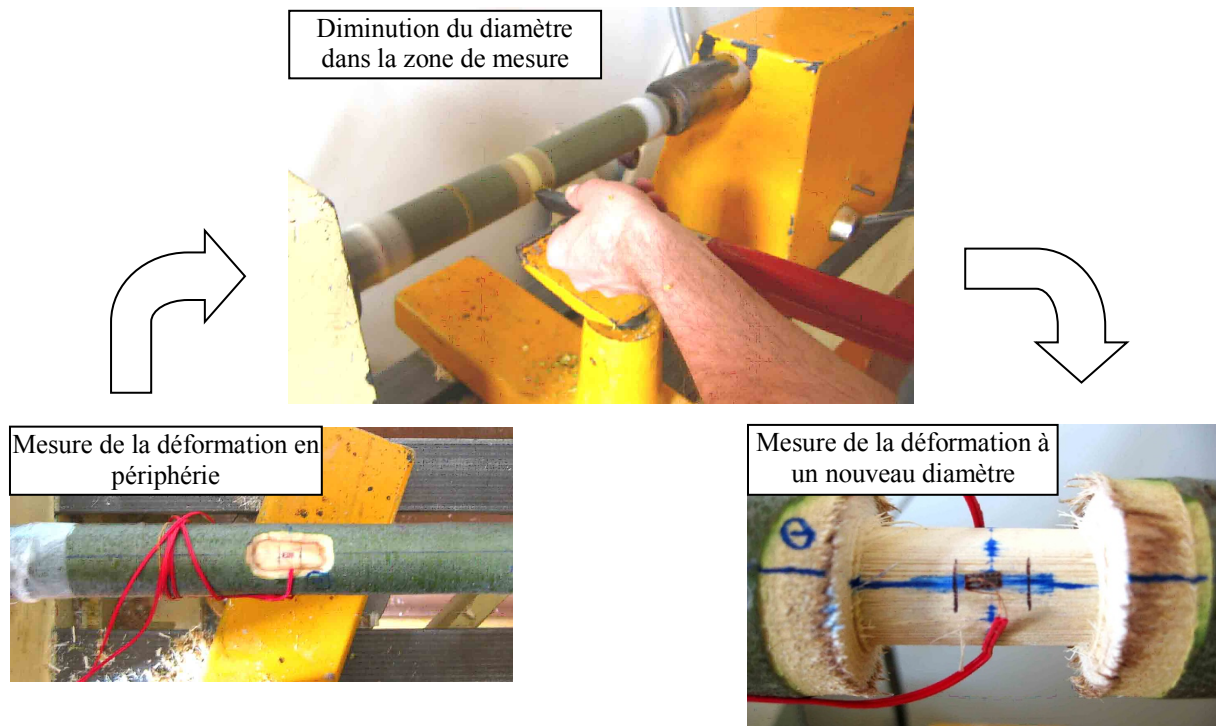


Figure 13 : Mesure de profil de déformation par la méthode des deux rainures et réduction de diamètre par usinage (Cabrolier 2006)

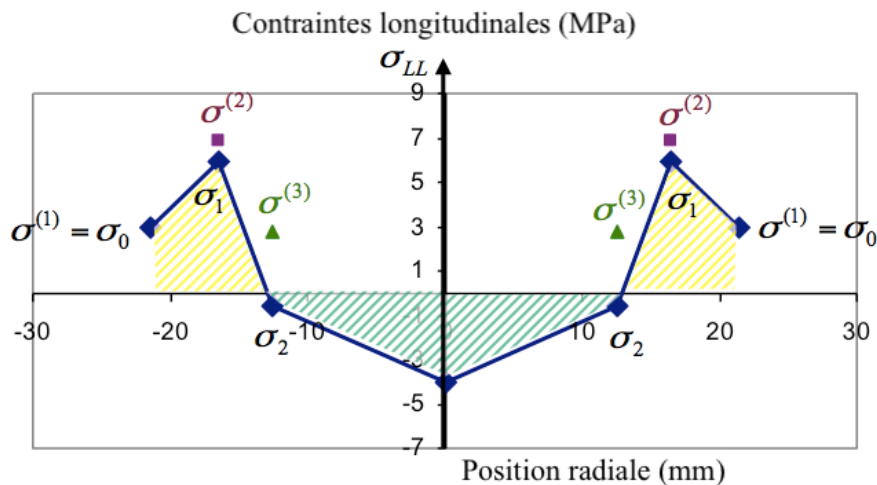


Figure 14 : Profil de contraintes longitudinales obtenu en faisant l'hypothèse d'une interpolation linéaire entre les mesures expérimentales (issu de [44]).

#### 1.4.3 Déformations résiduelles transverses instantanées : méthode de la fermeture

Une procédure expérimentale simple complétant les mesures longitudinales en périphérie des arbres sur pied consiste à découper une rondelle dans la section de la grume, et à mesurer la fermeture instantanée de cette rondelle suite à la découpe d'une saignée radiale. Le déplacement relatif de deux plots cloués près de la périphérie, divisé par la circonférence de la rondelle, mène à la *déformation transverse globale*. La mise au point de cette méthode de mesure, dite *méthode de la fermeture*, a été menée durant mon travail de thèse [1].

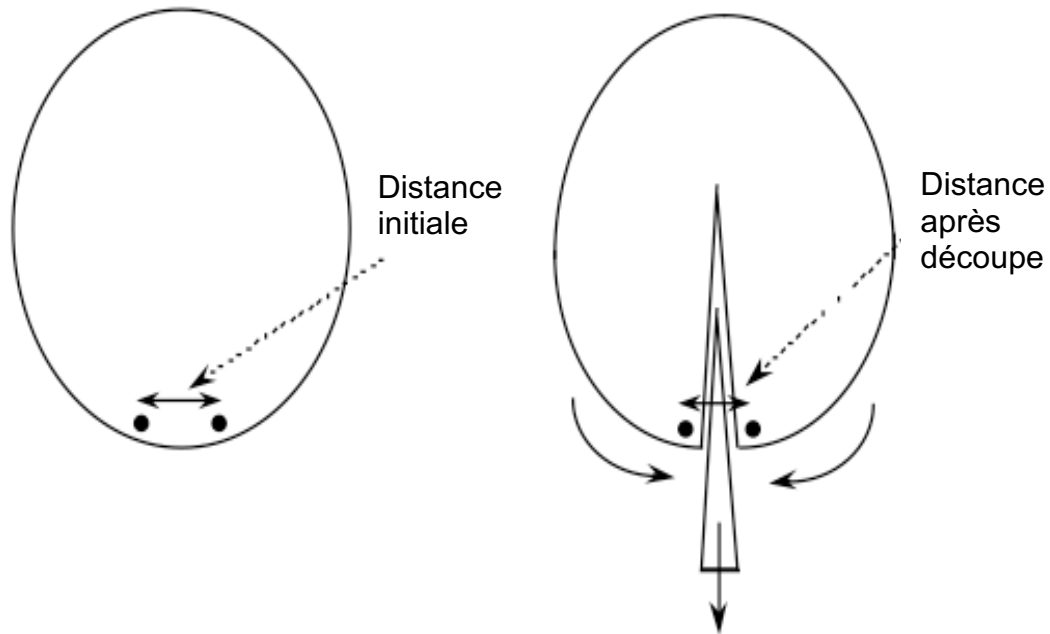


Figure 15 : Méthode de la fermeture

Cette méthode a été appliquée à 132 châtaigniers (*Castanea Sativa* Mill) récoltés dans sept sites français ou italiens : les valeurs instantanées obtenues, d'une moyenne de 0,2%, sont faiblement corrélées aux déformations longitudinales mesurées sur pied par la méthode du trou unique (Figure 16) [9]. Cette faible corrélation peut s'expliquer par le fait que la déformation transverse globale intègre des déformations radiale et tangentielle de toute la rondelle et témoigne donc de toute l'histoire de l'arbre, tandis que les déformations résiduelles longitudinales concernent uniquement les dernières années de vie de l'arbre.

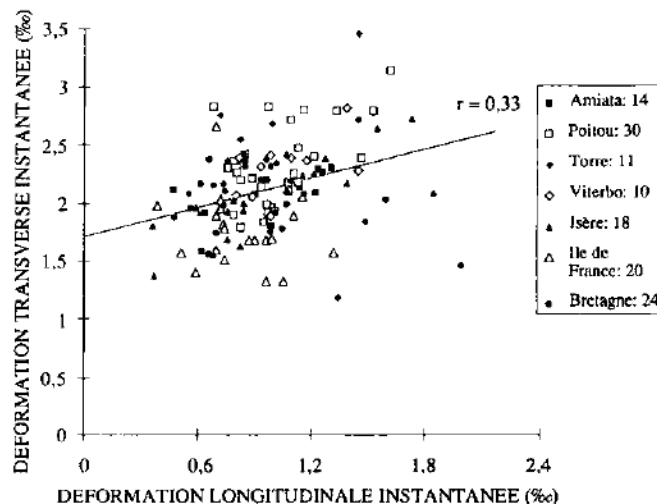


Figure 16 : Relation entre la déformation transverse instantanée et la déformation longitudinale [9]

Durant mon travail de thèse, une modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis a été élaborée en vue d'améliorer cette procédure expérimentale. Elle a nécessité de simuler la croissance couche par couche d'une rondelle au moyen d'un maillage évolutif. Les calculs ont montré que la découpe d'une saignée radiale du cœur à la périphérie permettait de diminuer fortement le niveau des contraintes résiduelles bloquées dans une rondelle. Seules de

faibles contraintes restent bloquées dans les secteurs des premières couches opposés à la direction de coupe, légèrement plus fortes dans le cas d'échantillons excentrés.

#### 1.4.4 Déformations hygrothermiques

Lorsque l'on chauffe du bois vert pour la première fois, il se dilate dans la direction tangentielle et se rétracte dans la direction radiale. Ce phénomène est appelé « recouvrance hygrothermique » (RHT). C'est un phénomène thermiquement activé. La température d'activation de ce phénomène se situe autour de 70°C, correspondant à la température de transition vitreuse de la lignine à l'état saturé.

Des mesures de déformations hygrothermiques ont été conduites sur les cinq planches diamétrales de peuplier mentionnées précédemment : les planches ont été étuvées dans un bain à 80°C pendant une demi-heure, puis les déformations ont été enregistrées à l'aide des jauges. Cependant, les résultats obtenus ne semblent pas probants. Il se peut que la température ait affecté le comportement des jauges de déformations.

La méthode de la fermeture a également été appliquée au comportement hygrothermique. Les rondelles sur lesquelles sont effectuées les mesures de déformation transverse instantanée sont ensuite plongées dans un bain d'eau chaude à 80°C pendant une demi-heure. Les deux plots positionnés en périphérie de la rondelle continuent à se rapprocher. La nouvelle mesure de la distance entre les deux plots permet de calculer la déformation transverse globale hygrothermique [34].

Dans le cas des 132 châtaigniers mentionnés précédemment, la déformation hygrothermique moyenne est de 0,5%. La relation entre les valeurs hygrothermiques et instantanées est significative au seuil de 1% (Figure 17) [9]. La faible valeur du coefficient de corrélation ( $r=0,44$ ) montre que la déformation instantanée n'explique qu'une partie de la déformation hygrothermique : la recouvrance hygrothermique semble correspondre surtout aux déformations bloquées pendant la maturation cellulaire, tandis que la recouvrance instantanée exprime plutôt les effets récents de la croissance de l'arbre.

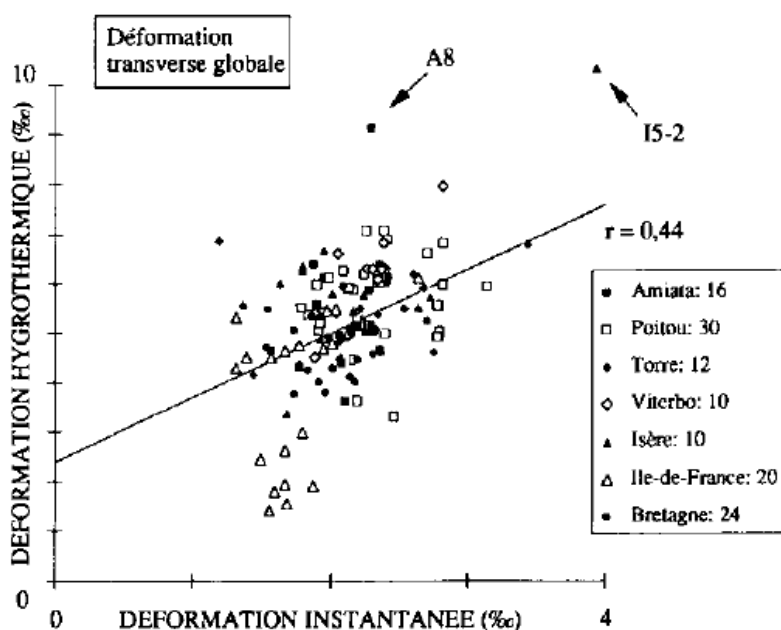


Figure 17 : Relation entre la déformation transverse globale hygrothermique et instantanée [9]

Les effets de la recouvrance hygrothermique ont également été analysés à l'aide du modèle par éléments finis évoqué précédemment. Un gonflement radial et tangentiel est pour cela induit en tout point de la rondelle. La déformation transverse globale hygrothermique est un bon descripteur de l'anisotropie des déformations dues à l'étuvage.

#### 1.4.5 Déformation transverse globale et tendance à la fissuration

Nous avons mentionné que suite à l'abattage de l'arbre, des fentes à cœur peuvent apparaître en bout de grume. Une rondelle est avant tout « un bout de grume ». Des fentes à cœur peuvent donc évidemment apparaître dans les rondelles.

L'étuvage humide de rondelles provoque la libération des déformations bloquées, et entraîne donc la propagation des fentes à cœur. Des mesures ont été menées sur une série de rondelles appariées. Elles concernent 24 rondelles de châtaignier et 9 rondelles de chêne. La mesure des longueurs de fente est effectuée sur une rondelle entière d'une part, la méthode de la fermeture est appliquée sur une rondelle présentant une saignée radiale d'autre part. Les rondelles subissent des étuvages successifs de 30 à 100°C par palier de 10°C.

L'apparition et la propagation des fentes radiales au cours de l'étuvage ne dépend pas seulement de la déformation transverse, mais aussi de l'apparition ou non de roulure (fente tangentielle). Lorsqu'on est en présence de roulure, la rondelle a moins tendance à se fendre (Figure 18).

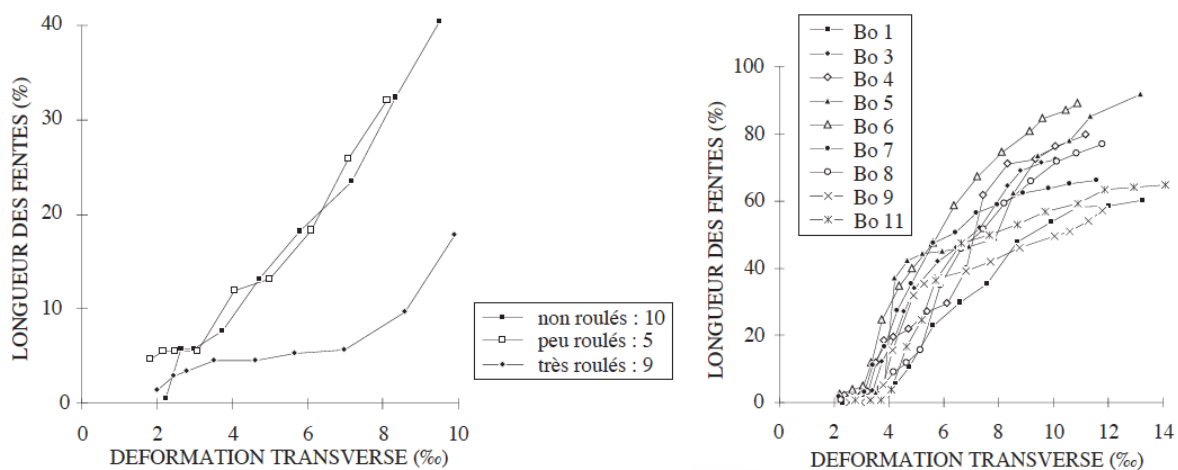


Figure 18 : Longueurs des fentes en fonction de la déformation transverse au cours de l'étuvage de 10 à 100°C de 24 échantillons de châtaignier (à gauche) et 9 échantillons de chêne (à droite) [9]

### 1.5 Conclusion et perspectives

Le thème du bois vert est un thème qui m'est cher, sans doute car c'est par lui que j'ai démarré mes travaux de recherche, mais pas seulement. Il concerne le bois au sein de l'arbre, gorgé d'eau, encore vivant. Ce matériau doit répondre aux sollicitations de la structure, l'arbre, qu'il compose. Mais cette structure, en croissance, est en constante évolution, le chargement du matériau varie donc lui aussi constamment. Si l'on rajoute à cela le fait que l'arbre lui-même subit des chargements extérieurs, dus au vent, à la neige, etc..., variables également, l'histoire du chargement du matériau se complique encore. Et on ne doit pas oublier que l'arbre modifie le type de matériau qu'il fabrique en fonction de ses besoins. Nous avons donc un matériau élaboré à un instant  $t$ , en fonction d'un état de l'arbre à l'instant  $t$ , qui va subir un chargement dépendant de tous les événements ultérieurs. Chaque portion de matériau contribue à la tenue

de la structure d'une manière différente de la portion voisine, et connaît donc une histoire mécanique différente de cette dernière.

Évaluer le champ de contrainte dans une telle structure nécessite de mettre en œuvre des méthodes expérimentales libérant les contraintes résiduelles, tout en mesurant les déformations qui en découlent, et d'alimenter avec ces mesures des modèles mécaniques pour obtenir des scénarios de croissance en adéquation avec les observations faites à l'instant  $t$ . Il est bien entendu possible de trouver plusieurs scénarios compatibles avec une même observation. L'objectif n'est pas de décrire de façon fiable la croissance d'un spécimen, mais bien de comprendre les stratégies de croissance qui peuvent mener à une situation observée.

Cette même démarche est actuellement appliquée au cas plus spécifique des branches, dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire visant à comprendre pourquoi les branches des arbres cassent parfois sans raison apparente. Ce projet implique plusieurs équipes françaises : l'Institut Pascal et l'UMR PIAF de Clermont-Ferrand, le LMGC, l'UMR AMAP et le GRED de Montpellier. Je vais notamment apporter ma contribution en termes de mesure de contraintes résiduelles dans ces structures.

Le thème de recherche « bois vert » présenté ici nécessite une interdisciplinarité qui a largement été mise en place et développée lors des séminaires annuels ASMA « Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre » de 1989 à 1995, conviant sciences du bois, sciences forestières, mécanique et architecture de l'arbre, à l'initiative de B. Thibaut et ses complices. Cette recherche interdisciplinaire s'est poursuivie par la mise en place d'un colloque triennuel « International Plant Biomechanics conference » dont la première édition s'est tenue à Montpellier en 1994, et dont la prochaine et dixième édition aura lieu à Lyon en 2021. Mon initiation à la recherche dans ce contexte pluridisciplinaire a sans doute fortement contribué à mon goût pour croiser les disciplines et les gens, au sein de mes différents thèmes de recherche.

## 1.6 Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre

### *Thèse de doctorat*

- [1] **Jullien D.** (1995) Analyse expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans un matériau élastique orthotrope élaboré par couches successives. Cas d'un disque de bois vert. Thèse de doctorat en Mécanique, Université Montpellier 2, LMGC, Direction : B. Thibaut, 12.12.1995.

### *Articles dans des revues internationales à comité de lecture*

- [2] Gril J., **Jullien D.**, Bardet S., Yamamoto H. (2017) Tree Growth Stress and Related Problems. Review article. *Journal of Wood Science* doi 10.1007/s10086-017-1639-y
- [3] **Jullien D.**, Widmann R., Loup C., Thibaut B. (2013) Relationship between tree morphology and growth stress in mature European beech stands, *Annals of forest Science*, doi :10.1007/s13595-012-0247-7
- [4] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2011) Maturation stress generation in poplar tension wood studied by synchrotron radiation microdiffraction. *Plant Physiology* 155 (2011) 562-570 [hal-00597183 - version 1]
- [5] **Jullien D.**, Gril J. (2008) Growth strain assessment at the periphery of small-diameter trees using the two-grooves method: influence of operating parameters estimated by numerical simulations, *Wood Science and Technology*, vol. 42, 7, 551-565. [hal-00537121 - version 1]
- [6] Alméras T., Gril J., **Jullien D.**, Fournier M. (2008) Les contraintes de croissance dans les tiges: mécanismes de mise en place et conséquences sur leur résistance à la flexion, *Revue Forestière Française*, 749-760. [hal-00546298 - version 1]
- [7] **Jullien D.**, Laghdir A., Gril J. (2003) Modelling log-end cracks due to growth stresses: calculation of the elastic energy release rate, *Holzforschung*, vol. 57, 4, 407-414.
- [8] **Jullien D.**, Gril J. (2002) Modelling crack propagation due to growth stress release in round wood, *Journal de Physique IV*, 265-272, suite à EMMC6, 9-12.09.02.



- [9] **Jullien D.**, Gril J. (1996) Mesure des déformations bloquées dans un disque de bois vert. Méthode de la fermeture, *Annales des Sciences Forestières*, vol. 53, 5, p. 955-966.

*Contribution à ouvrages édités*

- [10] Alméras T., **Jullien D.**, Gril J. (2018) Modelling, Evaluation and Biomechanical Consequences of Growth Stress Profiles Inside Tree Stems. Anja Geitmann, Joseph Gril. *Plant Biomechanics. From Structure to Function at Multiple Scales*, Springer International Publishing, pp.21-48, 2018, 978-3-319-79098-5. <10.1007/978-3-319-79099-2\_2> . <hal-01957280>

*Congrès internationaux*

- [11] Alméras T., Clair B., Montero C., **Jullien D.**, Gril J. (2019) The mechanical design of wood as a material optimized for beams. Workshop « Upscaling for strategic materials », Montpellier, France, 02-04.09.2019.
- [12] **Jullien D.** (2018) Conférence invitée : Growth stresses and their consequences on tree mechanics. 9th International Plant Biomechanics, Aug 2018, Montréal, Canada. <<https://www.plantbiomech2018.com/>> . <hal-01897889>
- [13] Alméras T., Dlouha J., **Jullien D.**, Gril J. (2012) Poster : The bending mechanics of tree stems : the key role of wood maturation stress for resisting both permanent and temporary loads, 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12. [hal-00797092 - version 1]
- [14] Gril J., **Jullien D.**, Alméras T. (2012) Longitudinal growth stresses in trees : analytical models and functional implications, 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12. [hal-00797106 - version 1]
- [15] Pourtahmasi K., Gril J., **Jullien D.**, Langbour P., Najafi Harsini F. (2012) Poster : Effect of growth stresses on anatomical and physical properties of *Fagus Orientalis L.*, 7th Plant Biomechanics Conference, Clermont-Ferrand, France, 20-24.08.12.
- [16] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Stress of cellulose network in tension wood is induced shortly after cellulose deposition, 6th Plant Biomechanics Conference, Cayenne, GF, 16-21.11.09. [hal-00565954 - version 1]
- [17] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Mise en évidence de la mise en tension de la cellulose pendant la maturation cellulaire, 19e Congrès Français de Mécanique, Marseille, FR, 24-28.08.09, CDRom 1p. [hal-00565951 - version 1]
- [18] Clair B., Alméras T., Pilate G., **Jullien D.**, Sugiyama J., Riekel C. (2009) Maturation stress generation starts before the formation of the G-layer in poplar tension wood, COST E50 final conference "Systems Biology for Plant Design", Wageningen, NL, 9-11.07.09.
- [19] **Jullien D.**, Alméras T., Kojima M., Yamamoto H., Cabrolier P. (2009) Evaluation of growth stress profiles in tree trunks: comparison of experimental results to a biomechanical model, 6th Plant Biomechanics Conference, Cayenne, GF, 16-21.11.09. [hal-00565995 - version 1]
- [20] **Jullien D.** (2008) Modelling crack propagation at log-end resulting from growth stresses, University of Nagoya, Nagoya, JP, 22.04.08.
- [21] **Jullien D.** (2008) Growth stresses in trees: origin, role and consequences, The First International Workshop on Biological Characteristic of Wood and its Related Properties, Faculty of Natural Resources, Karaj, IR, 23-28.10.08.
- [22] **Jullien D.** (2007) Modelling crack propagation at log end resulting from growth stresses, Seminar of the Islamic Azad University, Teheran, IR, 13.06.07.
- [23] **Jullien D.**, Cabrolier P., Gril J. (2006a) Poster: A finite element model to predict the growth strain release at the periphery of small diameter trees, 5th Plant Biomechanics Conference, Stockholm, SE, 28.08-1.09.06, L. Salmén (ed), STFI-Packforsk AB (pub.), 2, 445-450. [hal-00546568 - version 1]
- [24] **Jullien D.**, Yoshida M., Cabrolier P., Gril J. (2006) Poster: Measurement of residual strains at stem periphery using the two-grooves method, International Conference on Integrated Approach to Wood Structure, Behaviour and Application, Joint Meeting of ESWM and COST Action E35, Florence, IT, 15-17.05.06, M. Fioravanti, N. Macchioni (eds), 66-71. [hal-00546577 - version 1]
- [25] **Jullien D.**, Loup C., Gril J. (2003) Why big trees from high density hardwoods are more prone to end splitting?, 4th Plant Biomechanics Conference, East Lansing, U.S.A., 20-25.7.03, F.W. Telewski (ed), p. 72.
- [26] **Jullien D.**, Gril J. (2002) Modelling crack propagation due to growth stress release in round wood, EMMC6 "Non linear mechanics of anisotropic materials", Liège, Belgique, 9-12.9.02, S. Cescatto,

- C. Teodosiu, A.M. Habraken, R. Billardon, I. Doghri (eds), EDP Sciences (pub.), 265-272, publié en 2002 dans *J. de Physique IV*.
- [27] **Jullien D.**, Gril J. (2001) Modelling crack propagation at log-end resulting from growth stresses, 1st International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Lausanne, CH, 19-21.4.01, P. Navi (ed), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (pub.), p. 337-343, publication: 2002.
- [28] **Jullien D.**, Famiri A., Gril J., Laghdir A. (2000) Observation of log-end cracks caused by growth stress in Eucalyptus, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, Thieme-Verlag (pub.), p. 483-486.
- [29] Laghdir A., **Jullien D.**, Gril J., Baillères H. (2000) Energetic analysis of fracture process at log end due to growth stresses, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, Thieme-Verlag (pub.), p. 490-496.
- [30] Laghdir A., **Jullien D.**, Gril J., Thibaut B. (1999) Modelling growth-stresses related radial cracks in logs, 3rd Workshop on Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares (IUFRO WP S5.01.04 "Biological Improvement of Wood Properties"), La Londe-Les-Maures, 5-12.9.99, G. Nepveu (ed), ERQB-INRA Nancy (pub.), p. 324-333.
- [31] Gril J., Laghdir A., **Jullien D.** (1997) Modelling growth stress related problems in tree logs. Relationship between heart crack in disks and logs, 2nd International conference on plant biomechanics, Reading, U.K., 7-12.9.97.
- [32] **Jullien D.**, Gril J., Thibaut B. (1997) Longitudinal and transverse strains in green wood. Experimental results, 2nd International conference on plant biomechanics, Reading, U.K., 7-12.9.97.
- [33] **Jullien D.**, Gril J. (1996) Numerical analysis of residual stresses in a green wood crosscut after V-cutting and heating, 3rd biennial joint conference on Engineering Systems Design and Analysis, Montpellier, 1-4.7.96, ASME (ed), vol. 5, p. 205-212.
- [34] Gril J., **Jullien D.**, Fournier M., Thibaut B. (1996) Modelling non-axisymmetric growth stresses and related problems, 2nd Workshop on Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares (IUFRO WP S5.01.04 "Biological Improvement of Wood Properties"), Kruger national park, South Africa, 24.8-1.9.96, G. Nepveu (ed), ERQB-INRA Nancy (pub.), 1997, p. 80-91.
- [35] Marchal R., **Jullien D.**, Mothe F., Thibaut B. (1993) Mechanical aspects of heating wood in rotary veneer cutting. In : Proceedings of the 11th international wood machining seminar. The Norwegian Institute of Wood Technology. Oslo : Norwegian Institute of Wood Technology, 257-278. International Wood Machining Seminar. 11, Honne, Norvège, 25-27.05.93

#### *Congrès nationaux*

- [36] Alméras T., Clair B., Montero C., **Jullien D.**, Gril J. (2020) Conférence invitée : Les contraintes résiduelles dans les matériaux du vivant : exemple des tiges végétales, Conférence du soir au colloque Mecamat : De nouveaux outils pour de nouveaux défis, Aussois, 21-24.1.20, D. Favier, L. Orgéas (eds).
- [37] Gril J., **Jullien D.** (1996) Recouvrance hygrothermique du bois vert et fissuration à coeur des grumes, 4ème Colloque Sciences et Industries du Bois, Nancy, 11-13.9.96, Haluk (ed), ARBOLOR (pub.), p. 141-148.

#### *Diffusion scientifique*

- [38] **Jullien D.** (2012) Growth stresses in trees: Origin, role, consequences, measurements. Cost FP0409, Training School Green wood properties modification induced by medium temperatures heat treatment, Cluny, FR, 29-31.03.12.
- [39] **Jullien D.** (2008) Modelling crack propagation at log end resulting from growth stresses, Seminar of Laboratory of Biomaterial Physics, Nagoya University, JP, 22.04.08.
- [40] Loup C., Thibaut B., Gril J., **Jullien D.** (2001) Stresses in beech, Contribution au Rapport final du contrat européen FAIR 98-3606.
- [41] Thibaut B., Gril J., **Jullien D.** (1994) participation à la rédaction: Innovation in the Chestnut timber processing, Rapport final du contrat CEE n° MA2B CT 92 0002 (Forest 2) - Task F.

#### *Encadrement doctoral et scientifique*

- [42] Villelégier Jo-Simon (2014) Projet Industriel de Fin d'Etude, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions 5<sup>ème</sup> année : Etude numérique de l'effet des cisaillements et des précontraintes sur la résistance des arbres au vent. Encadrants : **Jullien D.** (40%), Alméras T. (60%)
- [43] Gronvold A. (2010) Stage Master 2 Mécanique et Ingénierie, parcours Structures, Ouvrages et Matériaux du Génie Civil, en co-habilitation avec l'ENS Cachan, Université Pierre et Marie Curie : Analyse multi-échelle des contraintes de maturation et de leur impact sur le séchage sur le matériau bois. Encadrants : Alméras T. (60%) et **Jullien D.** (40%)
- [44] Cabrolier P. (2006) Évaluation du profil des contraintes résiduelles dans l'arbre : Méthode de mesure expérimentale à l'aide de jauges. Master 1 Mécanique et Ingénieries, Université Montpellier 2. Encadrant : **Jullien D.**
- [45] Linard L. (2001) Modélisation numérique tridimensionnelle du comportement viscoélastique d'un composite multicouche à base de bois. Thèse de doctorat en Mécanique. Université Montpellier 2. Encadrants : Thibaut B. (40%) Gril J. (50%) **Jullien D.** (10%)
- [46] Laghdir A. (2000) Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes de croissance : application aux eucalyptus. Thèse de doctorat en Mécanique. Université de Montpellier. Encadrants : Gril J. (70%) **Jullien D.** (30%).

#### Références :

- Kubler H. (1987) Growth stresses in trees and related wood properties. For. Abstr. 48: 131-189
- Fournier M., Chanson B., Guitard D., Thibaut B. (1991) Mechanics of standing trees: modelling a growing structure subjected to continuous and fluctuating loads. 1. Analysis of support stresses. Ann. For. Sci. 48: 513-525

## Partie B : Le bois « sec à l'air »

### 2 Le bois hors de l'arbre, cas du séchage

Une fois l'arbre abattu, sans intervention extérieure, sans précaution particulière, le bois va naturellement chercher à s'équilibrer avec l'environnement dans lequel il baigne. On parle alors de bois « sec à l'air ». Ce terme n'est pas très rigoureux dans la mesure où cet équilibre dépend des conditions du milieu extérieur. On admet généralement que le bois sec à l'air s'équilibre à une teneur en eau de 12%, dans des conditions standard d'humidité relative de 65% et à une température de 20°C.

#### 2.1 Mesures sur rondelles

Mes premières expériences de bois non saturé concernaient des rondelles de bois « sec à l'air » : suite aux mesures de déformations instantanées et hygrothermiques, la méthode de la fermeture a été appliquée pour évaluer une déformation transverse globale de séchage. Lors du séchage d'une rondelle, le bois subit un retrait anisotrope, important dans les directions radiale et tangentielle, qui se traduit dans le cas d'une rondelle présentant une saignée radiale par une ouverture.

Dans le cas d'une rondelle entière, les retraits anisotropes dus au séchage ne sont généralement pas compatibles avec la géométrie de la rondelle, il en résulte donc soit l'apparition de fentes en périphérie de la rondelle pour des échantillons épais devant la taille du rayon, soit une déformation tridimensionnelle conduisant à une forme de chapeau chinois pour des échantillons fins devant la taille du rayon (Figure 19). En effet, le retrait tangentiel étant environ deux fois plus important que le retrait radial, la circonférence de la rondelle va diminuer en proportion davantage que le rayon correspondant.

Ce séchage anisotrope produisant des effets particulièrement « spectaculaires » dans les rondelles, j'ai utilisé à plusieurs reprises ces propriétés pour sensibiliser le grand public à la recherche sur le matériau bois lors de séances de vulgarisation scientifique telles que la *semaine des mathématiques*, au lycée des savoirs à Uzès en 2013 [56], ou au lycée professionnel Charles Alliès à Pézenas en 2015 [53], les 20 ans du collège Marie Curie de Pignan en 2013 [57] ou encore lors de la participation à l'atelier créatif et expérimental du projet AMACO en janvier 2014 à Paris [54]. J'ai également contribué à un ouvrage édité pour la revue *Monumental* en 2017, pour expliquer ces phénomènes aux professionnels des musées et monuments historiques [47].



Figure 19 : Séchage d'une rondelle fine de bois (Photos Amàco, Matière à construire)

Une méthode permettant de cartographier le retrait de séchage radial, tangentiel ainsi que le cisaillement radial-tangentiel d'une rondelle de bois a été mise au point lors du stage d'ingénieur-forestier 1<sup>ère</sup> année de J. Colin [59]. Basée sur l'analyse d'images, cette méthode permet de tracer les champs de déformation de retrait sur rondelles avec secteur prélevé, pour faciliter l'expression des déformations de séchage. Des punaises blanches positionnées dans la rondelle servent de marqueur pour l'analyse d'images (

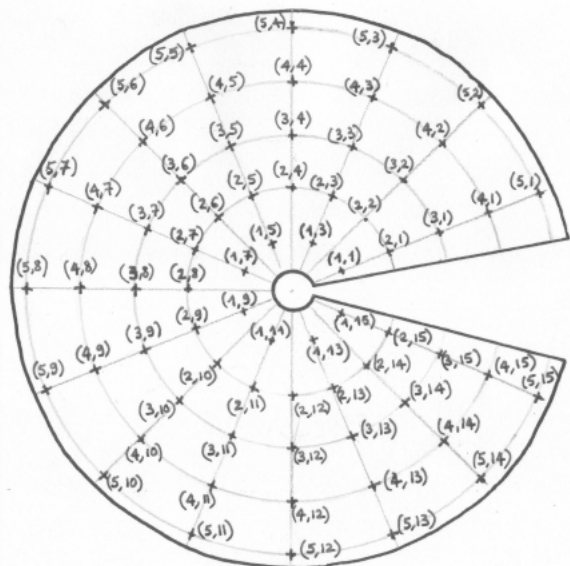
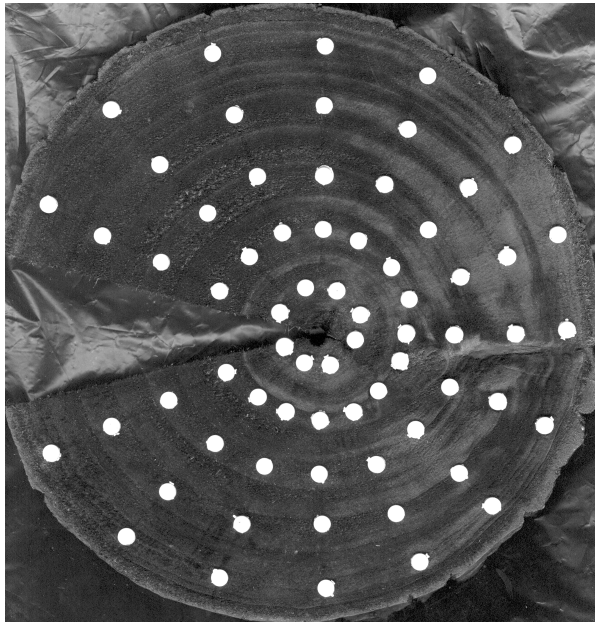


Figure 20). La position des marqueurs est enregistrée à chaque étape du séchage et analysée à l'aide d'un programme développé sous Optimas et Scilab. Ces données permettent de calculer une déformation moyenne pour chaque portion de rondelle délimitée par 4 punaises. Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la Figure 21. Cette méthode s'avère précise, facile

à mettre en œuvre, peu couteuse. Elle présente l'avantage d'obtenir un aperçu rapide de la répartition des déformations sous forme de cartographie, mais permet également d'avoir des résultats précis sous forme de tableaux, pouvant ensuite être analysés par une approche statistique par exemple.

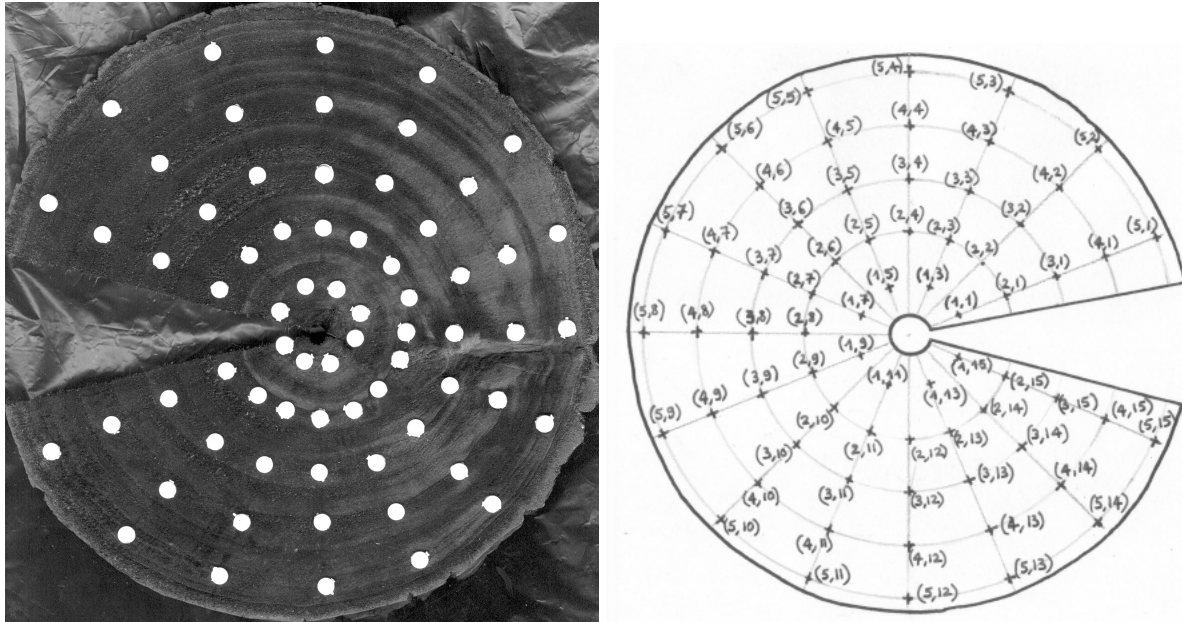
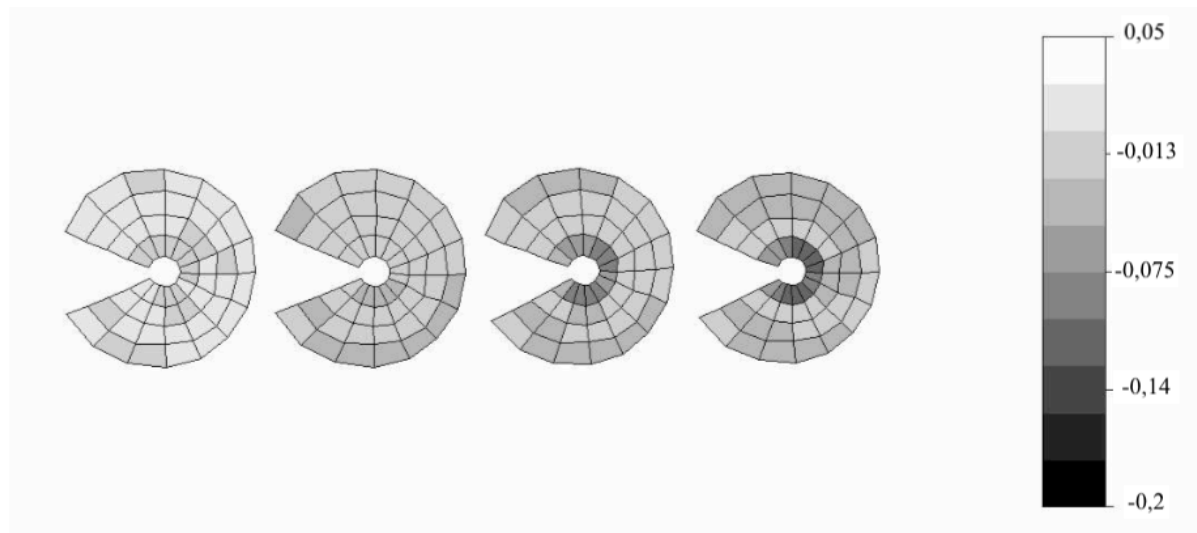


Figure 20 : Positionnement des marqueurs sur une rondelle de peuplier I 45-51 (n°6) avec secteur prélevé (à gauche). Repérage et dénomination des positions (à droite) [59]



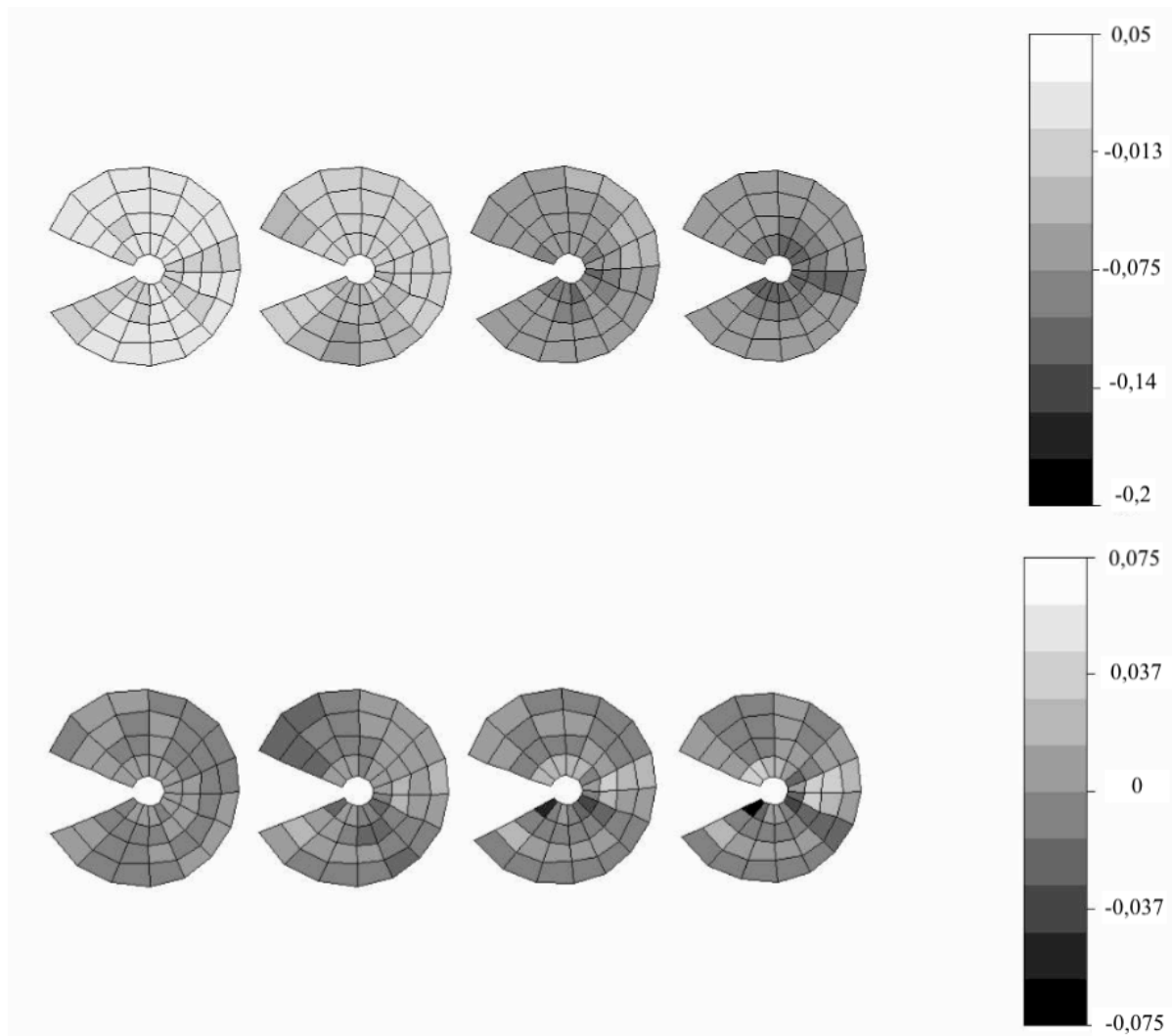


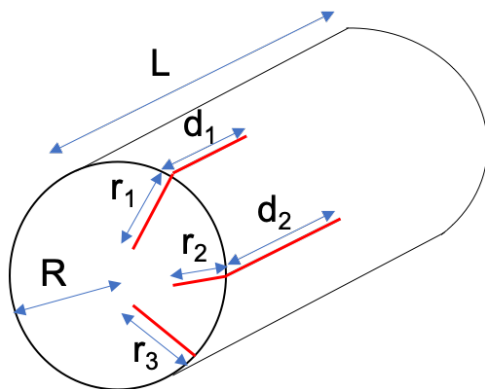
Figure 21 : Exemple de cartographies de retrait radial, tangential, cisaillement radial-tangential (de haut en bas, en %) à différentes étapes du séchage (de gauche à droite) obtenu sur la rondelle de peuplier n° 6 par la méthode développée [59]

## 2.2 Mesures sur rondins

Partant du constat que les déformations dues aux contraintes de croissance créaient des fentes à cœur, tandis que les déformations de séchage créaient des fentes en périphérie, l'idée est venue de combiner ces deux phénomènes pour « maîtriser » les fentes dans les billons. Nous avons ainsi étudié la possibilité de sécher des billons de bois dans l'huile chaude, combinant ainsi les 2 modes de fissuration : contrôler les températures et temps de séchage permet d'influencer le type de fissuration privilégiée (fentes à cœur ou en périphérie). Cette étude a fait l'objet de la thèse de Pierre Bérard [51][60]. Un traitement d'une heure dans un bain d'huile à 130°C suivi du séchage est comparé à un séchage naturel seul dans le cas de billons appariés de différents diamètres. Les fentes en bout et en périphérie, dont le calcul est illustré sur un exemple Figure 23, sont largement diminuées dans le cas du traitement oléothermique (Figure 22, Figure 24). Ces types de traitement ont été utilisés pour une utilisation de rondins en extérieur. Limiter les fentes en périphérie permet de limiter également les entrées d'eau lors de ces utilisations, et donc de diminuer les risques de dégradation du matériau, et par conséquent de la structure.



Figure 22 : Billons appariés après traitement oléothermique puis séchage (numéros impairs) ou séchage naturel (numéros pairs) [60]



Indicateur de fentes en périphérie :

$$(d_1+d_2)/L$$

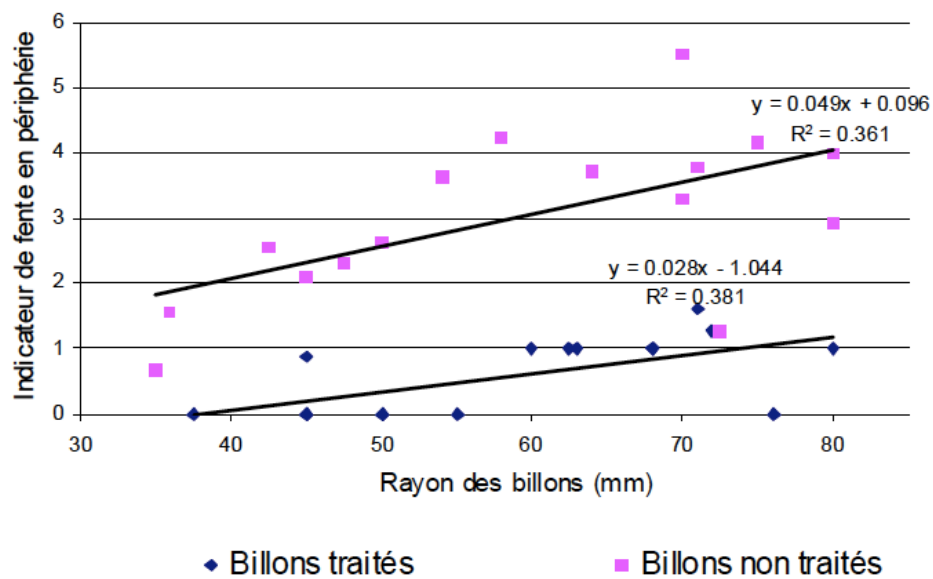
Indicateur de fentes en bout :

$$(r_1+r_2+r_3)/R$$

avec R rayon moyen du billon

L longueur du billon

Figure 23 : Calcul des indicateurs de fentes (en rouge) en périphérie et en bout illustré par un exemple.





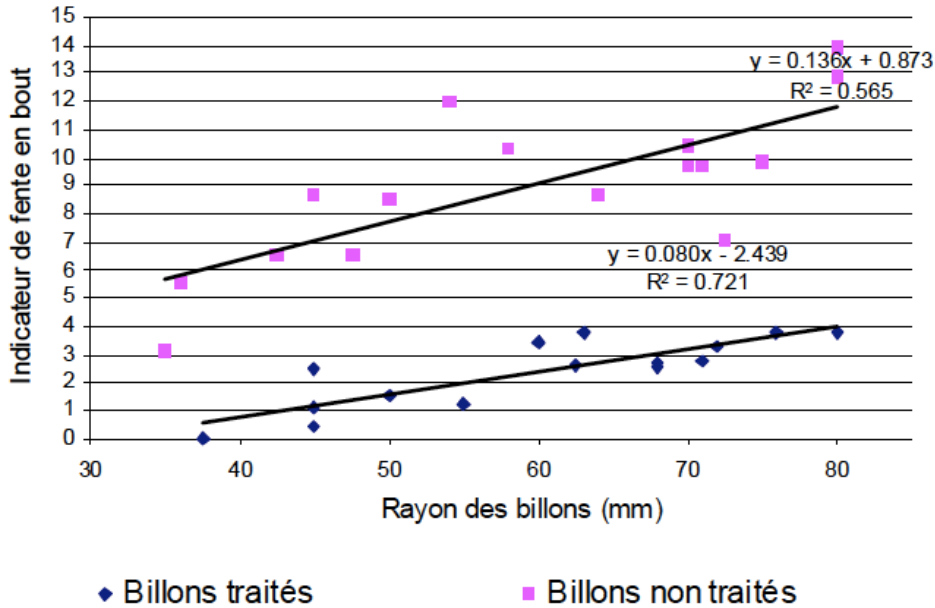


Figure 24 : Comparaison des fentes en périphérie (en haut) et fentes en bout (en bas) dans le cas de billons appariés ayant subi un traitement oléothermique puis un séchage ou seulement un séchage naturel [60]

### 2.3 A l'échelle moléculaire : comportement de la cellulose du bois pendant le séchage

Nous avons cherché à comprendre les phénomènes mis en jeu lors du séchage, à l'échelle moléculaire (0,1 nm – 10 nm), en utilisant à nouveau la méthode de diffraction de rayons X pour caractériser l'état des microfibrilles de cellulose, notamment lors du stage de Master 2 de A. Gronvold [58].

Le retrait macroscopique dans les directions longitudinales et tangentiels, entre l'état vert et l'état sec à l'air, a été mesuré sur des échantillons de peuplier : 18 de bois de tension et 18 de bois opposé. De très fortes mesures de retrait au séchage ont été obtenues dans la direction longitudinale, de l'ordre de -1%, pour les échantillons de bois de tension alors que ce retrait était quasiment nul pour le bois opposé. Le retrait tangentiel était de l'ordre de -7% pour tous les échantillons.

La méthode de diffraction de rayons X a été utilisée pour évaluer le retrait des microfibrilles. Dans le bois opposé, le retrait mesuré varie de -0,05 à -0,15%, pour des angles de microfibrilles allant de 5° à 15°. Ces valeurs suggèrent un retrait tangentiel de la paroi de l'ordre de -4%, qui serait compatible avec le retrait tangentiel macroscopique observé de -7% (Figure 25).

Dans le cas du bois de tension, les mesures de retrait des microfibrilles varient de -0,2 à 0% pour des angles de 0 à 15°. Pour les très petits angles, la déformation du cristal est très faible (-0,2%) comparée à la déformation macroscopique mesurée (-1%) (Figure 26). Cette différence entre le fort retrait macroscopique longitudinal et le faible retrait du cristal pourrait s'expliquer par un phénomène de « flambement » des microfibrilles : les microfibrilles se déformeraient en flexion plutôt qu'en compression, déformation facilitée par la souplesse de la matrice (Figure 27) [48][50].

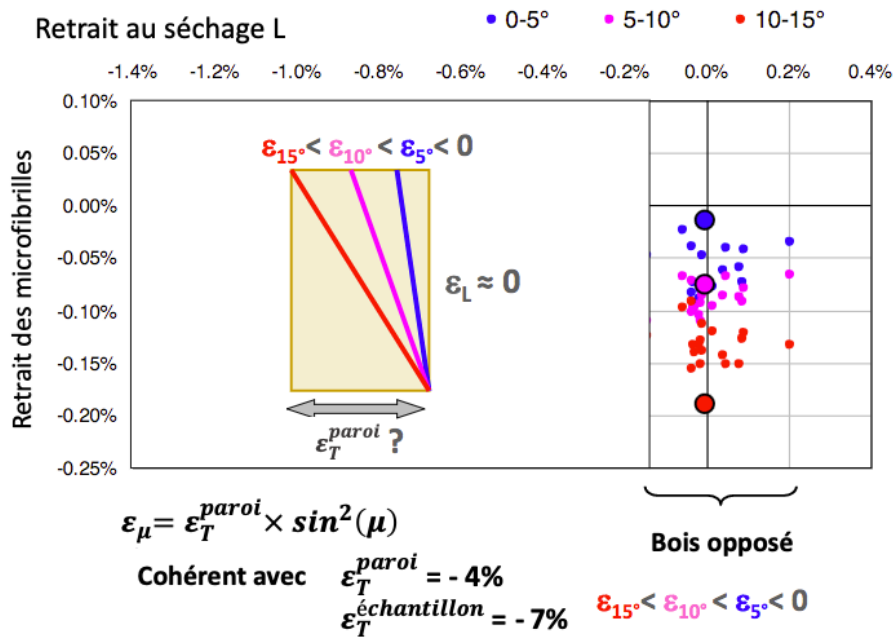


Figure 25 : Relation entre le retrait au séchage longitudinal macroscopique et celui des microfibrilles pour 18 échantillons de bois opposé de peuplier [48]

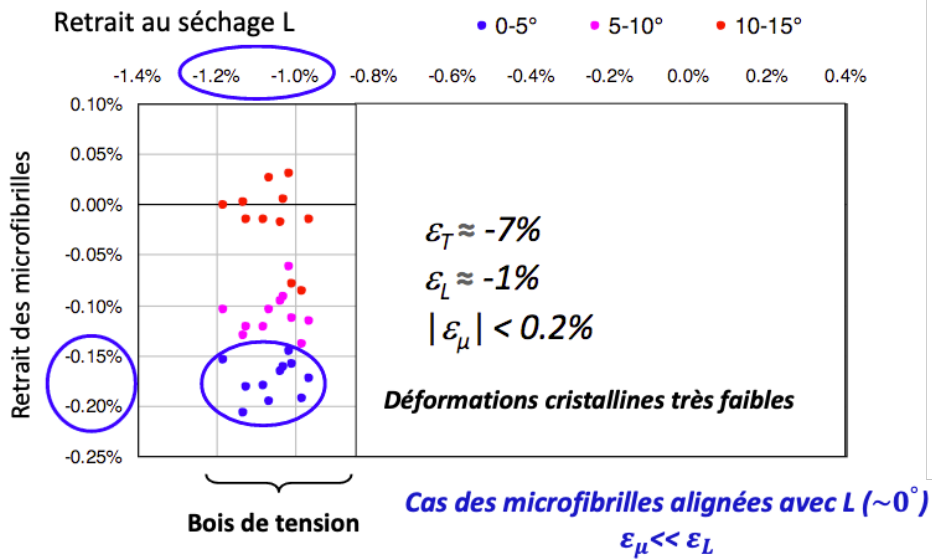


Figure 26 : Relation entre le retrait au séchage longitudinal macroscopique et celui des microfibrilles pour 18 échantillons de bois de tension de peuplier [48]

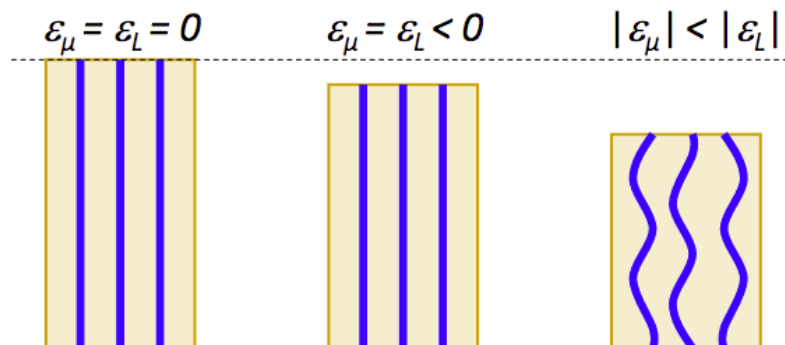
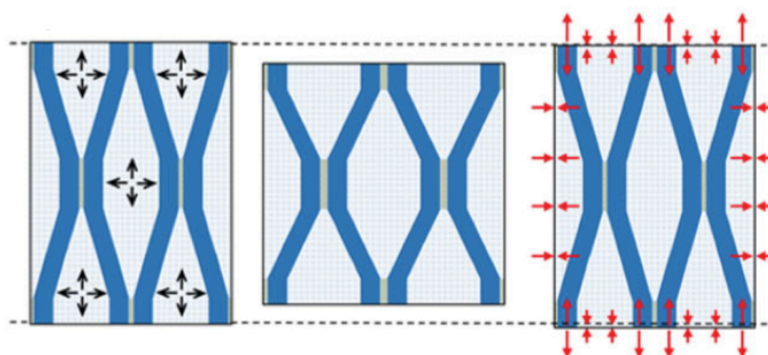


Figure 27 : Illustration de l'hypothèse de flambement des microfibrilles [48]

Des travaux ultérieurs ont permis de comparer à nouveau déformation cristalline et déformation macroscopique, par diffraction des rayons X, lors d'un chargement élastique. Il s'avère que la déformation cellulosique est inférieure à la déformation macroscopique, avec un rapport moyen de 0,85 pour des échantillons secs et de 0,64 pour des échantillons humides d'épicéa. Ces rapports de déformation ne peuvent pas être expliqués uniquement par l'effet de projection dû à la différence d'orientation entre les microfibrilles de cellulose et la paroi cellulaire, mais résultent de mécanismes de déformation en série avec la cellulose (Alméras, 2017).

Divers mécanismes visant à expliquer la génération des contraintes dans la paroi cellulaire lors de sa formation ont été proposés dans la littérature. T. Alméras et B. Clair (2016) ont publié une revue critique de ces modèles, qui les mène à définir comme mécanisme le plus probable le modèle supposant le gonflement de la matrice à l'intérieur d'un réseau de cellulose connecté. Ils n'écartent cependant pas la possibilité que la nature combine différents mécanismes pour mettre en œuvre à la fois une tension longitudinale et une compression latérale.



**Figure 28 : Illustration d'un modèle de génération des contraintes dans la paroi cellulaire : gonflement de la matrice dans un réseau connecté de cellulose. À gauche l'état avant maturation, au milieu l'état de déformation libre (virtuel), à droite, l'état de contrainte *in situ*. Les flèches noires indiquent la tendance au gonflement de la matrice, tandis que les flèches rouges indiquent l'état de contrainte au bord de l'élément de volume considéré (Alméras, 2016).**

## 2.4 Conclusion et perspectives

Ces quelques travaux concernant le séchage libre, se produisant naturellement à la suite de l'abattage de l'arbre, ont été une première étape pour moi vers l'étude du comportement hygroscopique du bois. Ils m'ont permis d'appréhender la problématique du passage de l'état de bois vert à l'état de bois sec, sur rondelles ou rondins, ou même à l'échelle moléculaire, sans me préoccuper du contrôle des conditions environnementales. Ils ont été une transition entre le passage de l'étude du bois dans l'arbre (bois vert), à l'étude du bois hors de l'arbre utilisé en conditions d'utilisation (matériau hygroscopique).

## 2.5 Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre

*Contribution à ouvrages édités*

[47] **Jullien D.** (2017) Le bois un matériau hygroscopique. Monumental, Semestriel 2017-2, Musées et monuments historiques, Les éditions du Patrimoine, pp. 94-97, EAN 9782757705353

### *Congrès internationaux*

- [48] Almeras T., Gronvold A., **Jullien D.**, Van Der Lee A. (2010) X-Ray diffraction study of wood cellulose behaviour during drying. COST FP0802 Workshop "Wood Structure/Function-Relationships", Hamburg, GE, 5-8.10.2010 [hal-00523221 - version 1]
- [49] Linard L., **Jullien D.** (1999) Poster: Designing multi-layers structural panels, COST Action E8 Workshop on Damage in wood, Bordeaux, 27-28.5.1999, P. Morlier (ed).

### *Congrès nationaux*

- [50] Gronvold A., Alméras T., Jullien D. (2011) Poster : Analyse multi-échelle du comportement mécanosorptif du bois : cas du séchage libre. Colloque national MECAMAT "Les composites - De l'élaboration du matériau aux performances des structures", Aussois, 24-28.01.11.
- [51] Bérard P., **Jullien D.**, Laurent T. (2002) Poster : Réduction des fissurations externes d'un billon de châtaignier par traitement oléothermique, Colloque MECAMAT, Ecole de Mécanique des Matériaux, Aussois, 21-24.1.02, D. Favier, L. Orgéas (eds), p. 208-211.
- [52] Linard L., **Jullien D.**, Gril J. (2001) Poster: Modélisation d'un composite multicouche viscoélastique orthotrope, Colloque MECAMAT, Aussois, 29.1-1.2.01, Licht C., Mabru C., Peyroux R. (eds), p. 223-226.

### *Diffusion scientifique*

- [53] **Jullien D.** (2015) Atelier scientifique : Comprendre le retrait anisotrope du bois, Semaine des Mathématiques, Lycée professionnel Charles Alliès, Pézenas, FR, 13.03.15.
- [54] **Jullien D.** (2014) Participation à l'atelier créatif AMACO : Mise en place d'expériences illustrant les propriétés physico-chimiques de la matière, janvier 2014, ESPGG-ESPCI ParisTech.
- [55] **Jullien D.** (2013) Origine et caractérisation des déformations du bois, Journée d'étude Instruments à vent – Traitements du bois et acoustique des flûtes, ITEM, Le Mans, FR, 18.11.13.
- [56] **Jullien D.** (2013) Atelier scientifique : Le bois et son retrait anisotrope, Semaine des Mathématiques, Lycée des Savoirs, Uzès, FR, 15.03.13.
- [57] **Jullien D.**, Brémaud I. (2013) Atelier scientifique, "Bois, matériau moderne" Programme CNRS-UM2 20 ans du collège Marie Curie de Pignan [hal-00818159 - version 1]

### *Encadrement doctoral et scientifique*

- [58] Gronvold A. (2010) Stage Master 2 Mécanique et Ingénierie, parcours Structures, Ouvrages et Matériaux du Génie Civil, en co-habilitation avec l'ENS Cachan, Université Pierre et Marie Curie : Analyse multi-échelle des contraintes de maturation et de leur impact sur le séchage sur le matériau bois. Encadrants : Alméras T. (60%) et **Jullien D.** (40%)
- [59] Colin J. (2006) 1<sup>ière</sup> année Ingénieur Forestier ENGREF : Mise au point d'une méthode de mesure des déformations de rondelles de bois soumises au séchage, LMGC. Encadrement : **Jullien D.**
- [60] Bérard P. (2003) Thèse de Doctorat de mécanique : Valorisation des taillis de châtaignier en bois ronds pour usage extérieur : étude et optimisation d'un traitement oléo-thermique pour améliorer l'aspect et la durée de vie du produit. Université de Montpellier. Dir. B. Thibaut (50%). Co-encadrement : Gril J. (40%), **Jullien D.** (10%).

### Références :

- Alméras T., Gronvold A., Van Der Lee A., Clair B., Montero C. Contribution of cellulose to the moisture dependent elastic behaviour of wood. *Composites Science and Technology*, Elsevier, 2017, 138, pp.151-160. <10.1016/j.compscitech.2016.11.025 > . <hal 01425031 >
- Alméras T. & Clair B. 2016. Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. *J. R. Soc. Interface*. 13: 20160550.

## Partie C : Le bois, matériau hygroscopique

Plus tard, en parallèle de mes études sur le bois vert, gorgé d'eau, et le bois « sec à l'air », le supposant équilibré à 12% de teneur en eau, je me suis intéressée à l'influence des variations d'humidité sur les objets en bois.

Mon intérêt s'est tout d'abord porté sur les objets à « haute valeur ajoutée » que sont les panneaux peints du patrimoine. Cette aventure a démarré en 2004, alors que le musée du Louvre avait fait la demande au responsable de l'équipe « Mécanique de l'Arbre et du Bois », Joseph Gril, de mettre en place une équipe de chercheurs pour démarrer une étude sur le célèbre panneau de Léonard de Vinci, La Joconde. Joseph Gril a mis en place un groupe de travail réunissant notamment des collègues de l'université de Poitiers et de l'université de Florence (Italie). Quelques années plus tard, il me sollicitait pour participer à l'étude du tableau. C'est ainsi que depuis 2008, j'ai pu participer au suivi de ce panneau, et de quelques autres moins renommés mais très intéressants d'un point de vue mécanique. Je me suis alors quelque peu éloignée de la thématique du bois dans l'arbre pour m'intéresser également à celle des panneaux peints du patrimoine.

En parallèle de ces études de cas, effectuées directement sur des panneaux du patrimoine, nous avons développé des expérimentations sur répliques, en laboratoire, visant à analyser de façon mieux contrôlée le comportement de panneaux, peints ou non. Cette démarche fera l'objet de la deuxième sous-partie de ce chapitre.

Par la suite, une demande de la société Henri Selmer Paris, fabricant de clarinettes rencontrant des problèmes de fentes de bois lors de l'usinage, ou bien lors de l'utilisation de l'instrument, m'a conduit à m'intéresser à cette seconde problématique, liée également au caractère hygroscopique du matériau. Ces travaux portent plus particulièrement sur la caractérisation et l'utilisation du bois de Grenadille, *Dalbergia melanoxylon*, bois tropical très dense, riche en extractibles, inscrit à l'annexe II de la CITES (listes des espèces dont le commerce des spécimens est contrôlé car elles sont menacées d'extinction) depuis 2017, et font l'objet de la troisième sous-partie.

Enfin une dernière thématique concernant le bois en utilisation, hors de l'arbre, vise à explorer les contributions du matériau bois des ruches à la santé des colonies d'abeilles. Cette thématique, fortement tournée vers le vivant car elle s'intéresse aux abeilles et à l'un de ses parasites les plus destructeurs, le *varroa*, mais également vers le monde des apiculteurs et fabricants de ruches, fait appel à de nombreuses disciplines, issues des sciences « dures » mais aussi des sciences humaines et sociales. Ce champ de recherche ne cesse de s'élargir, prenant diverses directions toutes plus passionnantes les unes que les autres. Le matériau bois, au cœur de cette thématique, permet de créer une synergie entre les nombreux acteurs impliqués. Nous avons là l'illustration que les recherches d'aujourd'hui nécessitent de convoquer de multiples disciplines pour apporter des réponses, parfois maigres, à des questions d'envergure. Le travail pluridisciplinaire est long et fastidieux, car il nécessite que chacun fasse l'effort de se mettre à la portée de l'autre pour pouvoir échanger et avancer ensemble. L'aventure est riche de sens.

### 3 Les objets en bois du patrimoine

L'objectif de cette thématique de recherche est de proposer des outils d'aide à la décision en soutien aux acteurs de la conservation du patrimoine orientés vers les objets en bois, et plus particulièrement les panneaux peints sur bois.

Certains restaurateurs mobilier et conservateurs ont une grande expérience du vieillissement des objets en bois. Les outils auxquels ils font appel pour porter un jugement, prendre une décision quant à la restauration ou conservation d'un objet en bois peuvent être issus de leur formation initiale (cas de l'ébéniste devenu restaurateur), de leur expérience (mise en correspondance de différents cas d'étude rencontrés), d'informations rapportées par d'autres collègues (par l'intermédiaire de la lecture de constats d'états, ou d'échanges verbaux avec des pairs).

Chercheurs en mécanique du bois au LMGC, notre expérience du matériau et des objets en bois est toute autre. Les outils et méthodes du mécanicien sont basés sur les caractéristiques du matériau, les lois de comportement, théoriques ou empiriques, la géométrie de la structure, les conditions de chargement de cette structure au cours du temps, les interactions entre la structure et l'environnement.

Deux mondes se rencontrent autour d'un même objet d'intérêt. Les deux parties ont à apprendre l'une de l'autre. Il faut trouver le langage approprié pour pouvoir échanger et se nourrir mutuellement. L'interdisciplinarité est au cœur de cette thématique.

Partant de ce constat, les outils que nous pouvons proposer peuvent prendre diverses formes, allant d'une simple *check-list* à la mise en place d'un modèle de simulation numérique, ou bien la conception d'un dispositif d'essais pour caractériser l'état mécanique d'un panneau, ou l'impact d'une intervention de restauration. Je me propose de décrire dans ce paragraphe les diverses expériences auxquelles j'ai pris part dans ce domaine.

Le Tableau 4 récapitule les différentes études conduites dans ce domaine de recherche sur des panneaux du patrimoine et synthétise le type d'opérations menées sur chacun d'entre eux.

#### 3.1 Contexte scientifique et mise en place d'un réseau

L'interdisciplinarité nécessite de parler un langage commun et donc d'aller à la rencontre de l'autre. Au fil des années et des interventions, le groupe de travail réunissant conservateurs, restaurateurs « Bois » et scientifiques mis en place lors de l'étude de la Joconde s'est consolidé et développé en véritable réseau relationnel. Emmanuel Maurin, ingénieur de recherche au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) et secrétaire du groupe « Bois » de la SFIIC (Section Française de l'Institut International de Conservation) a joué un rôle primordial dans la mise en place de ce réseau. Je souhaite ici témoigner du cheminement qui nous permet aujourd'hui de jouer l'interdisciplinarité. Je rentrerai par la suite plus en détails dans la description des travaux effectués.

De 2007 à 2010, sur la demande du LRMH, une étude sur la conservation préventive des panneaux de bois peints a été menée par le LMGC, en étroite collaboration avec deux restaurateurs de panneaux peints (D. Jaunard et P. Mandron). Cette étude dirigée par David Dureisseix concernait d'une part le suivi d'un acte de restauration et visait à estimer la réponse instantanée du panneau de bois support de l'œuvre (*Baptême du Christ*, Palais du Roure, Avignon), d'autre part le suivi à plus long terme de la réponse d'une œuvre soumise à des fluctuations hygrothermiques au sein d'une église (*Couronnement d'épines*, 1563, église St Didier, Avignon). Dans le cadre de cette étude, j'ai pu participer à l'encadrement des stages de Julien Colmars [93] et Adrien Baldit [92] et de la thèse de Bertrand Marcon [91].

A l'échelle européenne, l'action COST IE0601 intitulée « WoodCultHer – Wood Science for Conservation of Cultural Heritage » et dirigée par le professeur L. Uzielli et J. Gril a constitué un formidable support scientifique et terrain d'échanges pour cette thématique de 2007 à 2011.

Dans ce contexte stimulant, B. Marcon a mené une thèse au LMGC en co-tutelle avec l'université de Florence de 2006 à 2009, sur la thématique des panneaux peints du patrimoine, dirigé par D. Dureisseix et L. Uzielli. Son travail aborde différents thèmes tels que l'instrumentation de panneaux in-situ et en laboratoire, ou la modélisation numérique du comportement hygromécanique du matériau bois. Cette thèse a renforcé les liens qui existaient déjà avec nos collègues italiens de Florence (équipe du professeur L. Uzielli), très actifs dans cette thématique depuis de nombreuses années. Bertrand a joué un rôle clé dans notre collaboration avec cette équipe, dans laquelle il a effectué plusieurs années de recherche après sa thèse.

La thèse de J. Colmars, de 2008 à 20011, financée par le projet MechWood, programme scientifique en collaboration avec l'Université Technologique de Vienne (Autriche) et coordonné par Karin Hofstetter, a permis d'avancer sur le comportement rhéologique du bois, et notamment sur une meilleure compréhension des phénomènes de couplage hygromécanique. Cette démarche plus fondamentale a profité à la thématique de la conservation du patrimoine culturel, et notamment à l'étude de la courbure permanente des panneaux peints, qui trouve son origine dans ces couplages.

L'action COST FP0904 intitulée « *Thermo-hydro-mechanical wood behaviour and processing* » qui avait pour objectif d'améliorer la connaissance du comportement mécanique et physique du bois et de sa dégradation chimique lors de traitements thermiques, pilotée par le professeur P. Navi (Suisse) et D. Jones (Suède) a là encore été d'un grand soutien pour les échanges scientifiques.

Parallèlement à la démarche fondamentale de J. Colmars lors de son doctorat, encadré essentiellement par J. Gril, je me suis attachée pour ma part à appliquer les techniques de mesure de déformation par stéréocorrélation d'images à la problématique du bois soumis à des variations hygrothermiques. Cette approche a démarré par la mise en place d'outils de mesure et de premiers tests lors du stage de Master 2 de A. Rouard [107], puis s'est poursuivie par la mise en application de ces techniques sur des maquettes de bois lors du stage de C. Gauvin [105].

Pendant cette même période, j'ai eu la chance d'accueillir au LMGC Jonathan Graindorge Lamour, étudiant en dernière année de l'Institut National du Patrimoine, et de l'encadrer pour la partie technique de son mémoire de fin d'étude [106]. Une étroite collaboration entre restaurateurs et scientifiques a guidé notre démarche. Amenant ses compétences en ébénisterie et ses connaissances en panneau peint et techniques de restauration, Jonathan a pu élaborer des simulacres de panneaux peints renforcés, et profiter des méthodes de mesure développées au laboratoire pour comparer leur comportement lors de cycles hygrothermiques, et ainsi choisir le type de renfort qui lui semblait le plus propice pour remplacer l'ancien, lors de la restauration du panneau qu'il devait effectuer pour son diplôme.

Pour sa part, Cécilia mettait en place des expérimentations sur éprouvettes de peuplier revêtues de latex, faisant office de barrière hydrique, sur certaines faces, permettant d'évaluer les déformations et l'hygroscopicité du bois lors de cycles d'humidité successifs. Les premiers résultats obtenus lors de son stage de Master 2 l'ont amenée à poursuivre ces travaux lors d'un doctorat orienté sur le comportement hygromécanique de panneaux de bois, appliqué à la conservation des panneaux peints du patrimoine, qu'elle a soutenu en 2015 [103]. Ces travaux concernent avant tout des études sur répliques, et feront l'objet du paragraphe 4. Pendant cette période, Alice Aurand, étudiante en dernière année de restauration de peinture sur chevalet à l'institut Courtauld de Londres, a mené une partie de son étude au sein du LMGC : elle a pu comparer le comportement de différentes recettes de couches de préparation issues de la littérature, appliquées sur le bois au préalable de la peinture, lors de cycles hygrothermiques successifs [104].

Des contacts avec Marina Bousvarou, chargée des campagnes de restauration des collections et du cabinet des arts graphiques du musée Fabre de Montpellier, ont débuté pendant le doctorat de Cécilia. Nous avons par la suite co-encadré le projet industriel de fin d'année de Jessica Rodriguez, étudiante en 5<sup>ème</sup> à Polytech Montpellier, qui a élaboré le cahier des charges d'une base de données « Restauration de panneaux du patrimoine » permettant de communiquer entre les différents corps de métier les informations pertinentes concernant un panneau peint sur bois (Figure 29) [90]. Cette étape est cruciale pour le travail pluridisciplinaire envisagé. Jessica a par la suite effectué son stage de Master 2 à l'université de Florence, où elle a contribué à développer un outil numérique permettant de dimensionner des renforts de panneaux peints [89].

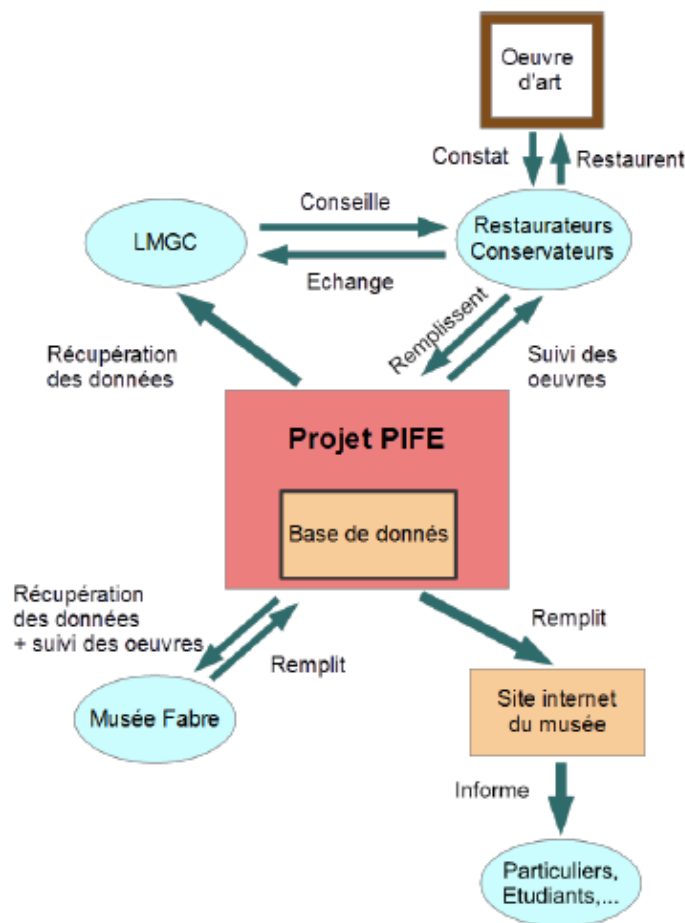


Figure 29 : Cahier des charges d'une base de données « Restauration de panneaux du patrimoine », issu du projet PIFE de J. Rodriguez [90]

Courant 2016, un projet inédit basé sur une collaboration entre le musée Fabre, l'université de Poitiers, l'université de Florence et le LMGC a vu le jour : il a pour objectif de suivre les déformations couplées à la variation de masse d'un panneau de bois peint du patrimoine dans différentes conditions hygrothermiques contrôlées, et de comparer les réponses du panneau à cette sollicitation hygrothermique avant et après restauration. Ce projet s'inscrit dans une démarche menée par le musée qui souhaite sensibiliser le public à la conservation des œuvres du patrimoine. Les expérimentations sont donc réalisées *in situ*, dans la partie publique du musée. Un séminaire de restitution des premiers résultats a eu lieu début juin 2017 au musée Fabre, des collègues du Rijksmuseum (Amsterdam) et du Louvre (Paris) ont montré leur fort intérêt en y participant et en se joignant aux discussions pour la suite à donner à l'étude.



La démarche scientifique couplée à la restauration a fait partie d'une exposition temporaire de février à décembre 2018 (catalogue de l'exposition : Bousvarou 2018). Durant l'été 2017, Cécile Chrysochoos a fortement contribué à l'aspect vulgarisation des démarches scientifiques lors de son stage de 4<sup>ième</sup> année d'INSA Lyon option Matériaux en vue de l'exposition [85], tandis que Samuel Kurtz développait un modèle numérique du panneau pour aider à la compréhension de son comportement lors de son stage de 4<sup>ième</sup> année de Polytech Montpellier [87]. Dorian Botella-Barillot a poursuivi l'analyse des données lors de son projet de fin d'étude de 5<sup>ième</sup> année de Polytech Montpellier [88].

Dans ce contexte humainement très riche et stimulant, nous œuvrons pour une meilleure compréhension du comportement d'objets en bois de notre patrimoine. Les prochains paragraphes décriront les différentes démarches entreprises.

### 3.2 Problématique des panneaux de bois peints du patrimoine

Un panneau peint du patrimoine est constitué d'une ou plusieurs planches, radiales ou sur dosse. Ces planches peuvent être de larges dimensions, et soumises à des fluctuations hygrothermiques importantes, situées dans des bâtiments historiques, des églises, des musées, etc. Il en résulte que de forts retraits-gonflements, et mouvements de flexion dus à la dissymétrie des échanges d'humidité entre les deux faces, peuvent vouloir s'exprimer. Cependant ces planches sont souvent assemblées au dos par des traverses longitudinales. Les coefficients de retrait-gonflement longitudinaux sont très faibles comparés à ceux transverses, et la rigidité longitudinale est bien plus forte que les rigidités radiale et tangentielle, il en résulte que les traverses empêchent partiellement le mouvement de ces planches, et exercent donc des contraintes de tension ou compression sur ces dernières. Les couches de préparation et de peinture posées sur une face peuvent également jouer un rôle mécanique sur les planches constitutives du panneau. Cet ensemble structurel est soumis à des variations hygrothermiques pendant de nombreuses années. La face peinte et le revers ont généralement des propriétés de perméabilité différentes, qui peuvent évoluer au cours du temps. Les deux faces ne sont pas exposées aux mêmes conditions hygrothermiques, l'une étant le plus souvent contre un mur. De plus, dans le cas du matériau bois, il existe un fort couplage entre état mécanique et variations d'humidité, c'est à dire qu'une structure sous contrainte soumise à des variations d'humidité va se déformer bien plus que la même structure libre de contrainte. Ce phénomène est appelé couplage mécano-sorptif. Tous ces paramètres vont influencer sur l'état hygroscopique et mécanique de la structure au cours du temps.

Les limites élastiques du bois dans les directions transverses étant faibles, les retraits-gonflements empêchés pouvant être très élevés, ces chargements complexes et de très longues durées (plusieurs siècles) mènent bien souvent à l'apparition de fentes dans les panneaux, et posent le problème de la conservation de l'œuvre. Les restaurateurs des supports bois ont pour lourde tâche de préserver l'intégralité des panneaux, pour que les œuvres picturales soient conservées.

Une technique largement répandue dans les années 70, et encore d'actualité, pour restaurer un panneau de bois peint fissuré consiste à poser un parquetage au dos du panneau, après l'avoir éventuellement aminci. Ce parquetage est constitué de lattes fixes collées à l'arrière du panneau dans le sens des fibres, entrecroisées de lattes mobiles permettant de rigidifier l'ensemble de la structure, tout en autorisant les mouvements dus aux gonflements et retraits transverses des planches constitutives du panneau.

Cependant, il se peut que lors de la pose du parquetage, les lattes *mobiles* soient malencontreusement collées au revers et donc solidaires du panneau, et ne laissent plus la liberté de mouvement escomptée. Dans d'autres cas, ces lattes *mobiles* sont tout simplement clouées

au revers, perdant alors tout l'intérêt d'un tel système de renfort. Lorsque les lattes *mobiles* ne le sont plus, le risque d'observer des fentes dans le panneau est élevé.

Nous avons été amenés à étudier différentes configurations de panneaux endommagés pour lesquels les restaurateurs devaient intervenir sur le support bois. Les cas rencontrés sont présentés par type d'intervention de notre part. Les configurations sont multiples, les interventions le sont également.

### 3.3 Suivi d'une œuvre sous haute surveillance

*La Joconde*, Léonard de Vinci, 1503 (?), Musée du Louvre, Paris, haute de 74,9 cm et large de 53,4 cm est constitué d'une unique planche de peuplier épaisse d'environ 13 mm, support de l'œuvre picturale. Un châssis-cadre illustré par le restaurateur Patrick Mandron (Figure 30) le soutient et l'empêche de se déformer librement. Le panneau subit des variations dimensionnelles faibles car il est maintenu dans une vitrine contrôlée en température et humidité.

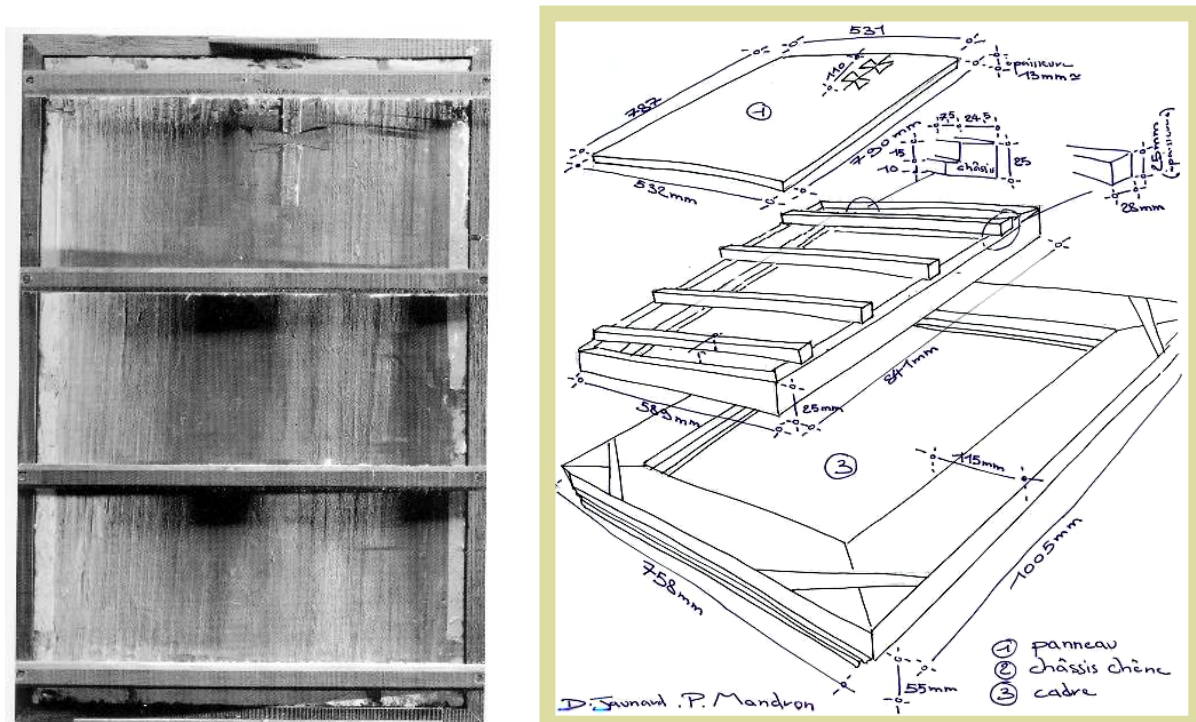


Figure 30 : La Joconde dans son châssis-cadre (à gauche) Assemblage du panneau, du châssis-cadre et du cadre illustré par P. Mandron (à droite)

Plusieurs équipes de recherche participent aux études portant sur La Joconde en menant des approches complémentaires. La masse du panneau est relevée lors de chaque examen annuel. Elle témoigne de la teneur en eau du panneau, qui s'avère extrêmement stable.

D'un point de vue mécanique, l'intérêt se porte sur le rôle du châssis-cadre, et sur l'évaluation de l'éventuel risque de propagation d'une fissure non datée située dans la partie supérieure de l'œuvre. P. Dionisi Vici et L. Uzielli, chercheurs de l'université de Florence, ont mis au point une traverse instrumentée fixée sur le châssis-cadre qui mesure en continu et en 3 points la courbure du panneau. Les efforts entre le châssis-cadre et le panneau sont également enregistrés en 4 points de mesure à l'aide de cellules de force (Figure 31).

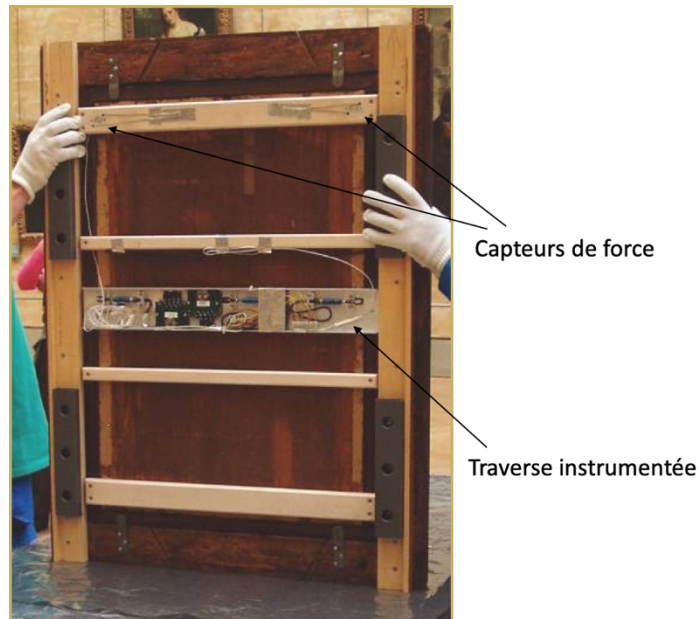


Figure 31 : Traverse instrumentée fixée sur le châssis-cadre

Une modélisation par éléments finis développée par D. Dureisseix et O. Arnould (Dureisseix, 2006), puis reprise par B. Marcon dans sa thèse [91] a permis d'une part d'interpréter les efforts mesurés exercés par le châssis-cadre et d'autre part de montrer que le risque de propagation de la fissure est très limité (Figure 32).

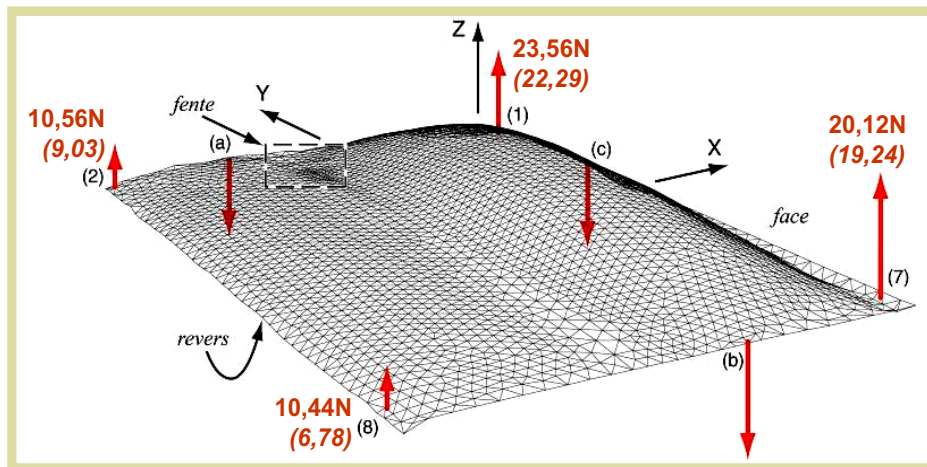
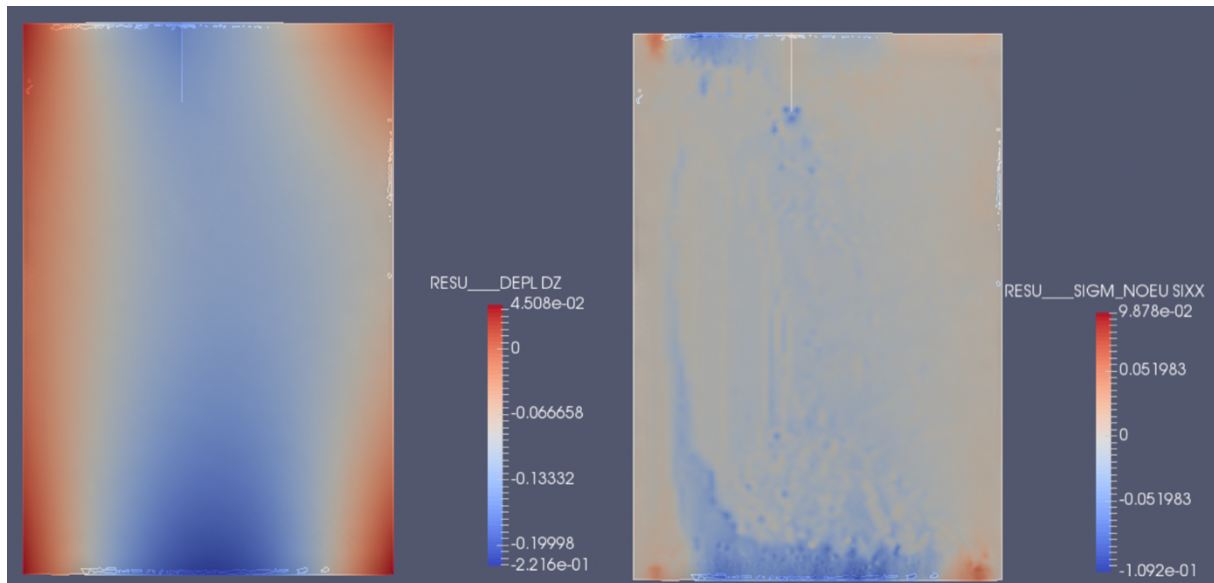


Figure 32 : Maillage de la surface de la Joconde et représentation des efforts exercés par le châssis-cadre

Les zones de contact entre le panneau et le châssis-cadre ont été localisées plus précisément et les pressions de contact réévaluées à l'aide de bandes de papier « Prescale » positionnées sur la feuillure du châssis-cadre (Goli, 2013).

Le remplacement du châssis cadre actuel en chêne par un nouveau châssis en érable sycomore est actuellement à l'étude. Dans le nouveau modèle, la feuillure est amincie de 2 mm pour laisser la place à une bande de mousse de Plastazote dans le but d'améliorer la répartition des efforts de contact entre le châssis-cadre et le panneau. Une récente modélisation a été développée par Lorenzo Riparbelli de l'université de Florence pour comparer la répartition de ces efforts, avec présence ou non du plastazote [66][73]. La Figure 33 présente les déplacements hors plan et contraintes horizontales du panneau positionné dans le châssis-cadre, avec plastazote, obtenues à l'aide d'un modèle numérique basé sur les mesures expérimentales de

novembre 2016 [64]. Les contraintes obtenues sont largement plus faibles que la limite élastique du matériau.



**Figure 33 : Déplacements hors plan en mm (à gauche) et contraintes dans la direction horizontale en MPa (à droite) du panneau de La Joconde positionné dans le châssis-cadre, avec présence de mousse plastazote, obtenu par modèle numérique basé sur les mesures expérimentales de 2016 [64]**

Cette étude est très stimulante car elle concerne une œuvre de renommée mondiale. Néanmoins, conservée très à l'abri des fluctuations hygrothermiques au sein de sa vitrine, les chercheurs en mécanique et sciences du bois que nous sommes sont un peu frustrés du peu de mouvements observés car seuls ces mouvements permettent de mieux appréhender le comportement de la structure.

### 3.4 Réponse instantanée d'une œuvre à un acte de restauration

Le *Baptême du Christ*, artiste anonyme, Palais du Roure, Avignon, de hauteur 485 mm, largeur 405 mm, épaisseur 12 mm, est une œuvre peinte sur une unique planche de résineux, doublée d'un parquetage en hêtre, probablement installé au cours des années 70. Deux fissures sont présentes dans le panneau de bois, ainsi que de multiples craquelures sur la face peinte. Le nouvel acte de restauration envisagé par D. Jaunard et P. Mandron consiste à remplacer les traverses horizontales par des traverses plus souples en épicéa, pour diminuer les contraintes exercées par le parquetage sur le panneau (Figure 34).

Sur demande du LRMH, le LMGC est associé à cette opération. Cette intervention modifie de façon importante la structure du panneau et permet ainsi d'accéder à des paramètres internes à la structure : les contraintes résiduelles. Pour cela, nous avons décidé de faire un suivi de l'acte de restauration. Ainsi, la forme d'une partie de la face avant a été mesurée par analyse d'images dans 3 états : (i) état initial avec les traverses de hêtre (ii) état intermédiaire sans traverse (iii) état final avec les traverses d'épicéa.



**Figure 34 : Baptême du Christ, Palais du Roure, Avignon (en haut à gauche), son parquetage initial (en haut à droite) et les anciennes traverses (en bas) coupées pour pouvoir être extraites (Dureisseix 2009)**



**Figure 35 : Modèle éléments finis de la géométrie initiale du Baptême du Christ (Dureisseix 2009)**

Les données expérimentales recueillies ont alimenté un calcul de structure développé par J. Colmars lors de son stage d'élève-ingénieur ENSAM [93] puis repris par D. Dureisseix et A.

Baldit lors de son stage de Master 1 [92], permettant d'estimer les contraintes résiduelles dans le panneau avant et après restauration (Dureisseix 2009 ; Dureisseix 2011). Cette étude a été réalisée en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) pour la partie expérimentale. La méthode de stéréocorrélation utilisée a permis de mesurer la forme 3D de la face peinte dans 3 états, en ayant recours à la projection d'un mouchetis virtuel pour pallier aux trop grands contrastes de la couche picturale.

Il s'avère que les traverses d'origine étaient partiellement collées, et bloquées à cause de la déformation à long terme installée de façon permanente après l'ancienne restauration, principalement due à un effet mécanosorptif. Les traverses ont dû être coupées pour être prélevées, car leur forme courbe ne permettait pas de les faire coulisser (Figure 34).

L'observation des cernes dans une section radiale-tangentielle a permis de déterminer la position du panneau dans l'arbre où il a été débité et de prendre en compte le repère d'orthotropie du bois. Les caractéristiques élastiques du panneau et du renfort utilisées pour le modèle sont issues de la littérature (Guitard, 1987) et reportées Tableau 1.

essence	$H / \%$	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$E_R$ MPa	$E_T$ MPa	$E_L$ MPa	$G_{RT}$ MPa	$G_{TL}$ MPa	$G_{RL}$ MPa	$\nu_{RT}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$
épicéa	13.1	0.31	816	304	8020	48	461	558	0.67	0.33	0.34
hêtre	9.4	0.63	2040	867	14100	500	980	1850	0.73	0.46	0.36

**Tableau 1 : Caractéristiques élastiques des éléments constitutifs du panneau et du renfort (Dureisseix 2009)**

On peut noter que les nouvelles traverses étaient moins rigides que les anciennes, elles ont cependant eu pour effet de mettre le panneau plus à plat. Cela s'explique par la courbure permanente observée sur les anciennes traverses, qui avait pour effet de maintenir la courbure du panneau. Bien que la raideur de la structure avec les nouvelles traverses soit moins grande, l'acte de restauration peut parfois ne pas réduire les contraintes résiduelles instantanées.

Pour permettre le montage des nouvelles traverses, les restaurateurs ont dû réduire leur épaisseur par rapport à l'ancienne géométrie. Le jeu est estimé à 1,25 mm pour les calculs. Les simulations estiment que l'acte de restauration a réduit les contraintes résiduelles dans le panneau : la contrainte maximale de Von Mises était de 18,6 MPa avant restauration, elle n'est plus que de 1,7 MPa dans la nouvelle configuration (Dureisseix 2011).

Au prix d'une étude fine basée sur des calculs mécaniques complexes, les contraintes subies par le panneau ont pu être estimées dans les deux situations. Un tel modèle numérique peut servir d'outil prédictif pour évaluer les risques sur l'œuvre de plusieurs conditions de conservation, et éventuellement de plusieurs actes de restauration. Ce type d'expérience apporte des résultats très intéressants, mais ne peut pas être conduit de manière systématique.

### 3.5 Suivi des déformations d'un panneau dans une ambiance de conservation

*Le couronnement d'épines*, artiste anonyme, 1563, église St Didier, Avignon, hauteur 143 cm, largeur 178 cm, est constitué de 3 planches de peuplier horizontales, assemblées par deux traverses verticales avec un système de queue d'aronde. L'ensemble est monté flottant dans un cadre, qui repose sur deux équerres scellées dans le mur, alors qu'une troisième équerre le maintient par le haut (



Figure 36).



**Figure 36 : *Le Couronnement d'épines* est constitué de trois planches horizontales (délimitées par les lignes pointillées blanches) assemblées par deux traverses verticales par un système de queues d'aronde**

Les trois planches présentent chacune une courbure prononcée, atteignant 10 mm pour la planche inférieure. Une mesure de forme 3D a été réalisée par stéréo-corrélation en collaboration avec le laboratoire LAMCOS de Lyon en décembre 2006. Les données brutes sont interpolées sur une grille régulière resituée par rapport à la couche picturale (Figure 37). Une nouvelle mesure de forme a été réalisée en mai 2017 et comparée à la première mesure. La Figure 38 met en évidence la différence de forme de la planche supérieure en son centre entre les deux états, correspondant à deux climats dans l'église.

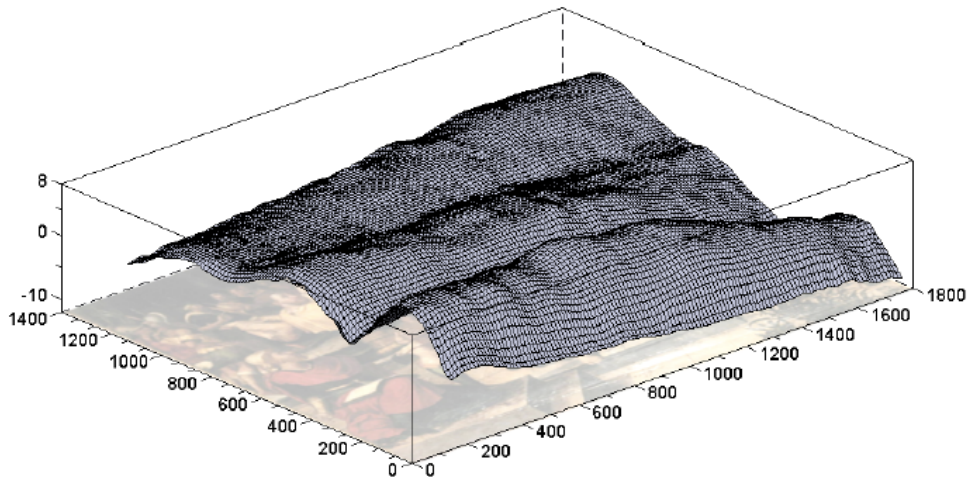


Figure 37 : Forme 3D du *Couronnement d'épines* obtenu par stéréo-corrélation en collaboration avec le LAMCOS (Colmars, 2011)

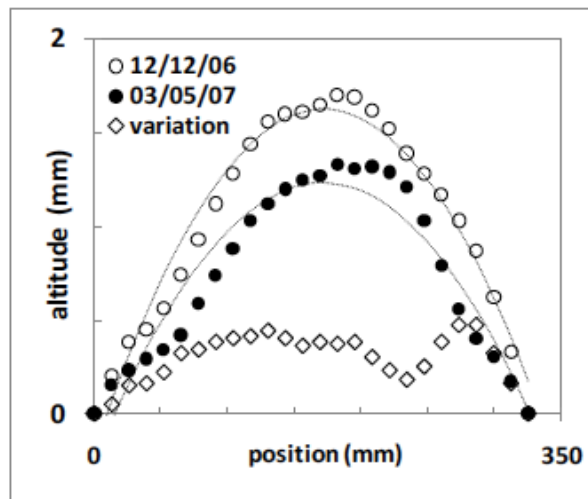
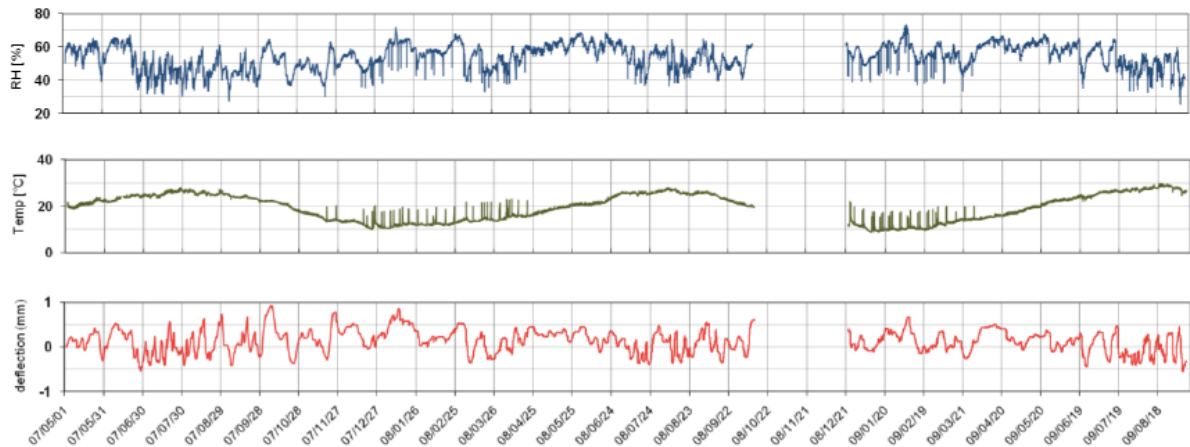


Figure 38 : Différence de forme de la planche supérieure du *Couronnement d'épines* en son centre entre le 12/12/2006 et le 03/05/2007 (Colmars, 2011)

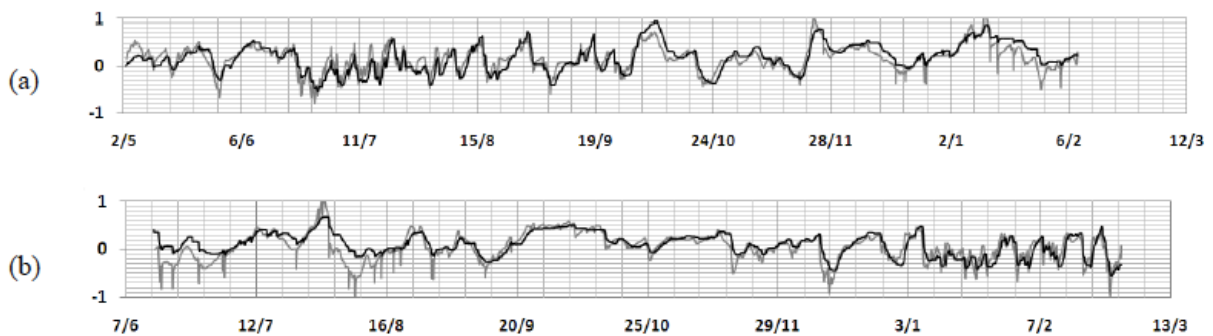
Un système de mesure de flèche en continu a été mis au point par Julien Colmars lors de son stage de fin d'étude [93]. Ce système de faible encombrement est positionné sur les deux traverses verticales et permet d'enregistrer en continu la flèche de la planche supérieure en son centre, ainsi que la température et l'humidité relative de l'air au revers du panneau : la Figure 39 présente les mesures obtenues du 3 mai 2007 au 15 septembre 2009.





**Figure 39 : Mesures de l'humidité relative de l'air, de la température et de la flèche centrale de la planche supérieure du *Couronnement d'épines* du 03/05/2007 au 15/09/2009 (Colmars, 2011)**

Par la suite, Julien a réalisé un calcul théorique de déformation de la planche due uniquement aux gradients d'humidité, en utilisant des paramètres géométriques observés sur le panneau. Les paramètres de diffusion pour la modélisation sont essentiellement estimés à partir de travaux antérieurs de modélisation basée sur Transpore (Perré, 2004). N'ayant pas d'information sur la perméabilité de la couche picturale, les paramètres du modèle ont été ajustés sur une première période de mesure, puis le modèle a été utilisé pour estimer la flèche de la période suivante. La Figure 40 présente les mesures expérimentales et les résultats de la simulation pour les deux périodes considérées : (a) période de recalage (b) période de prévision-validation du code.



**Figure 40 : Mesures expérimentales (noir) et simulation (gris) des variations de flèche (en mm) de la planche supérieure du *Couronnement d'épines* de mai 2007 à septembre 2009 ; (a) période de recalage du modèle (b) période de prévision- validation du code (Colmars, 2011)**

Il est difficile d'obtenir les informations nécessaires pour prédire au mieux le comportement du panneau. Cependant ce modèle permet d'avoir une première approximation des déformations attendues, et pourrait mettre en valeur une éventuelle variation des propriétés de perméabilité de la couche picturale avec le temps. En effet, en appliquant ce même modèle et en le comparant à des enregistrements ultérieurs, quelques années plus tard par exemple, nous pourrions observer une éventuelle évolution de la perméabilité de la couche picturale.

Julien a également développé un code de calcul permettant de modéliser la loi de comportement d'une plaque issue d'un matériau orthotrope cylindrique. Il a pu simuler les niveaux de contrainte du côté non peint du panneau sur la période (a) précédente. Les contraintes simulées ne dépassent pas 0,5 MPa en valeur absolue, ce qui correspond à des niveaux non critiques au regard des caractérisations matériau effectuées. Si l'on considère un comportement uniquement

hygro-élastique, les simulations prévoient des contraintes de compression de l'ordre de 1,3 MPa.

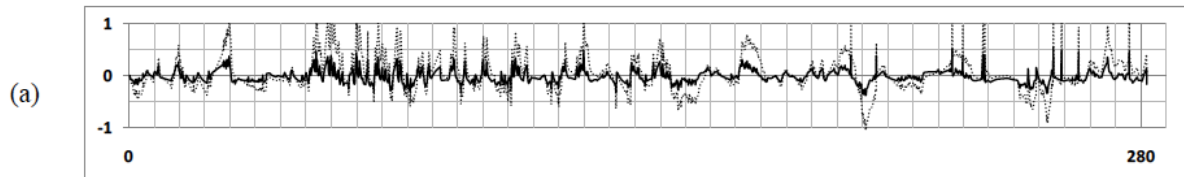


Figure 41 : Niveaux de contrainte (en MPa) au revers du panneau, simulés sur la période (a) de la Figure 40 avec un comportement hygro-élastique (trait pointillé) ou avec le comportement total basé sur des mesures matériau (trait continu) (Colmars, 2011)

Les codes développés mériteraient d'être réécrits dans des langages plus performants que les langages interprétés utilisés actuellement, pour permettre des calculs plus importants et moins coûteux en temps.

### 3.6 Suivi des déformations d'un panneau soumis à une hygrométrie contrôlée

*La Sainte Trinité couronnant la vierge* est une œuvre présentée au musée Fabre de Montpellier, de type huile sur bois, réalisée au XVI<sup>e</sup> siècle par un peintre flamand en Espagne (Figure 42). Malgré plusieurs traitements, ce tableau peint sur bois présente depuis plusieurs années des variations mécaniques qui ont rendu obligatoire la pose de *facings* pour protéger sa couche picturale. Au-delà d'une simple restauration de la surface de l'œuvre, le Musée Fabre s'est engagé dans un partenariat avec les universités de Montpellier (LMGC), Poitiers (Institut PPrime) et Florence (DAGRI, Italie) pour mener une étude pionnière sur ce panneau : installé dans un milieu isolé contrôlé en température et humidité, des expériences de légères variations hygrométriques (de l'ordre de 10% RH) permettent de mieux comprendre les réactions de l'œuvre à son milieu.

Cette étude a également pour objectif de faire découvrir au grand public les enjeux de la conservation-restauration des œuvres d'art. Ces expérimentations se déroulent donc au sein même du musée, et sont accessibles au public lors des visites. De plus, une exposition temporaire regroupant 5 œuvres à restaurer, de types de support différents, a été mise en place de mars à septembre 2018. Une salle entière était consacrée au panneau, expliquant et illustrant d'une part le comportement des bois, d'autre part les détails de l'étude menée (Figure 43). De nombreuses images de cet événement sont disponibles au sein de la photothèque du CNRS. Un diaporama a également été réalisé sur le site du [journal du CNRS](#).



Figure 42 : *La Sainte Trinité couronnant la vierge*, huile sur bois, XVIe siècle



Figure 43 : Exposition *Dans le secret des œuvres d'art*, Musée Fabre de Montpellier, 24/03-02/09/2018

### 3.6.1 Dispositif expérimental mis en œuvre

#### 3.6.1.1 Description du panneau

Ses dimensions hors cadre sont : hauteur 137 cm, largeur 98 cm et épaisseur 3 cm. Il est constitué de 4 planches de chêne, d'épaisseur 10-13 mm, dont 3 sont orientées radialement et une sur dosse, assemblées par 7 traverses horizontales en sapin (*Abies spp*) collées dessus (Figure 44). Des montants verticaux de sapin sont cloués dessus à demi-joints. Les montants à l'extrême gauche et droite sont faits d'une seule pièce tandis que les 4 autres montants sont constitués de 6 morceaux. L'ensemble du revers est recouvert d'un enduit très résistant de couleur marron.



**Figure 44 : Revers du panneau *La Sainte Trinité couronnant la vierge***

### **3.6.1.2 *Vitrine contrôlée en humidité***

La vitrine conçue par le restaurateur Gilles Tournillon est constituée de 4 planches de contre-plaqué et 2 plaques de verre anti-reflets, permettant la prise de photos (Figure 45). Elle est montée sur une console qui accueille le générateur d'humidité, l'afficheur de la balance et un ordinateur pour l'acquisition des données. Un générateur d'humidité permet de réguler l'humidité relative dans la vitrine entre 17 et 60%. Deux capteurs de température et humidité sont placés dans la vitrine : l'un est connecté au système de régulation, l'autre permet d'enregistrer de façon continue et indépendante température et humidité relative dans la vitrine.

### **3.6.1.3 *Pesée continue du panneau***

La variation de masse du panneau est mesurée toutes les 15 minutes par une balance industrielle, de précision 2 g. Le panneau est maintenu vertical par un système de positionnement qui n'affecte pas la mesure de la masse (Figure 45).



Figure 45 : Vitrine climatisée et système de positionnement vertical

### 3.6.1.4 Mesures de relief et déformations

Le panneau est équipé de 3 kits déformométriques collés au dos (Figure 46), permettant de suivre localement et de façon continue la déformation et la courbure des planches. Deux paires de caméras, installées de part et d'autre du panneau, fixées sur le mur, permettent d'enregistrer régulièrement des images des 2 faces (Figure 47). Le relief du panneau et les déformations sont calculés par corrélation d'images, à partir du suivi des marqueurs positionnés sur les 2 faces du panneau, à l'aide du logiciel Deftac 3D, programme d'acquisition et d'analyse d'images développé par l'institut PPrime (université de Poitiers).

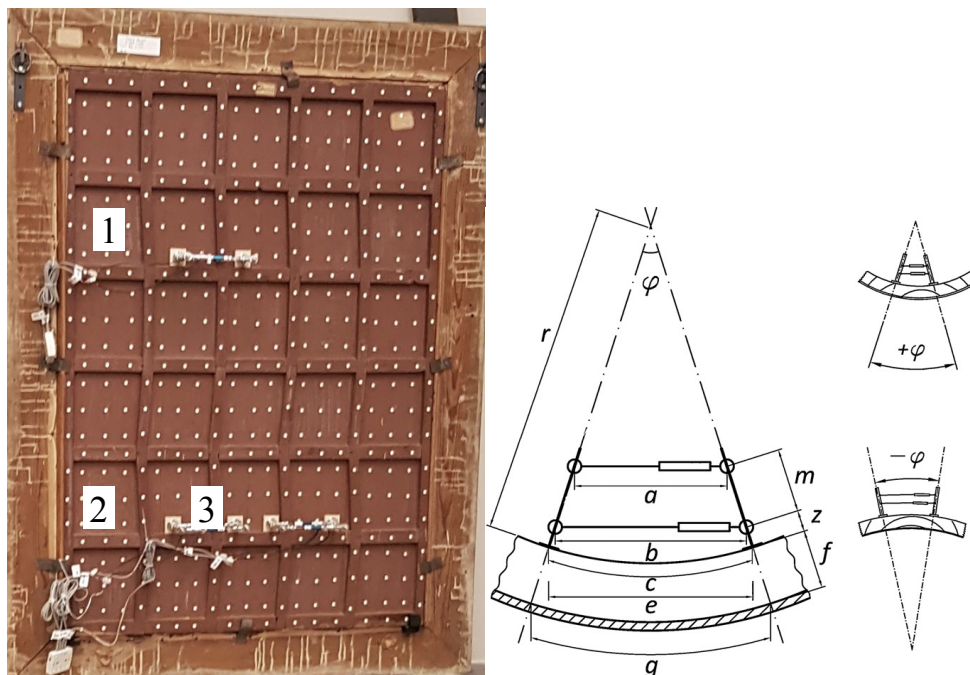


Figure 46 : Position des 3 kits déformométriques (à gauche) ; Représentation schématique d'un kit (à droite) [61]



Figure 47 : Système de mesures au sein du musée : caméras et vitrine réglée

### 3.6.1.5 Les différentes configurations et chargement

Le panneau dans son cadre a subi une première phase de stabilisation à 52%RH de 2 mois, l'humidité a alors été augmentée à 63%RH pour 3 mois (Figure 48). Puis le cadre a été retiré. Un essai de flexion 3 points a été réalisé dans le but de déterminer la rigidité de la structure. Le panneau sans son cadre est retourné dans la vitrine à 63%RH pour une période de 2 mois, puis à 52%RH pour 2 mois, et enfin à 63%RH pour 1,5 mois, avant de partir pour l'atelier de restauration pour une durée de 4 mois.

Le panneau a été déparqueté : les traverses et montants de sapin ont été enlevés. Le panneau sans parquetage est retourné dans la vitrine à une humidité de 60%RH en février 2018 pour 5 mois. La face peinte a été recouverte d'un papier Mélinex pour empêcher les échanges d'humidité par cette face, et se rapprocher ainsi des conditions d'échange hydrique d'une couche picturale restaurée. Un nouveau châssis a été dimensionné et maintenu à l'aide de ressorts au dos du panneau. De nouvelles mesures sont effectuées sur ce panneau renforcé avec couche picturale restaurée.

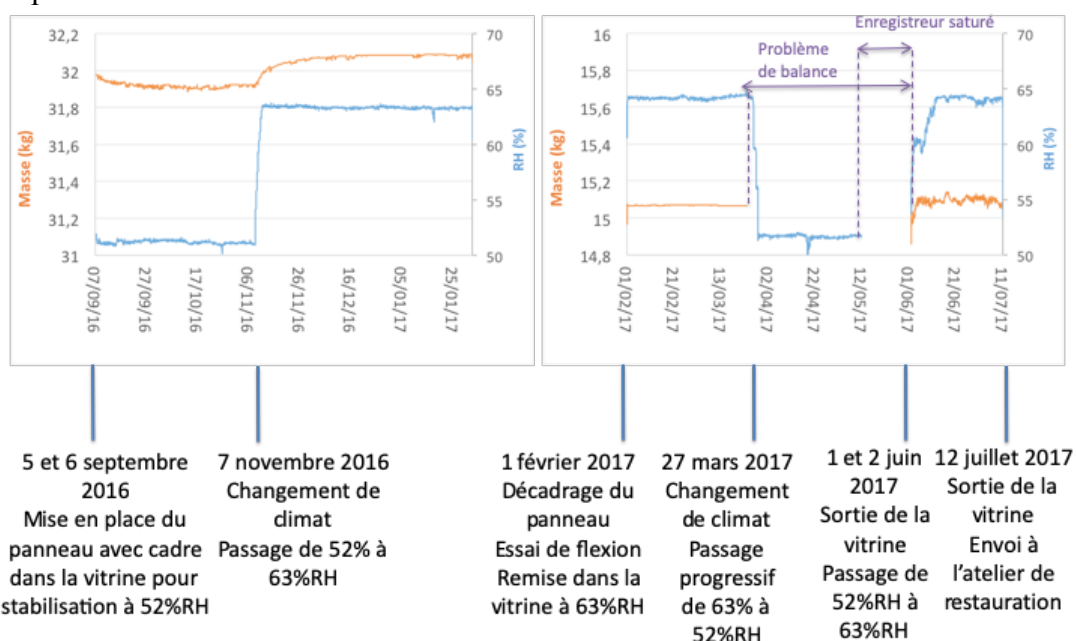


Figure 48 : Interventions du début de l'étude à l'envoi à l'atelier de restauration, masse et humidité relative enregistrées.

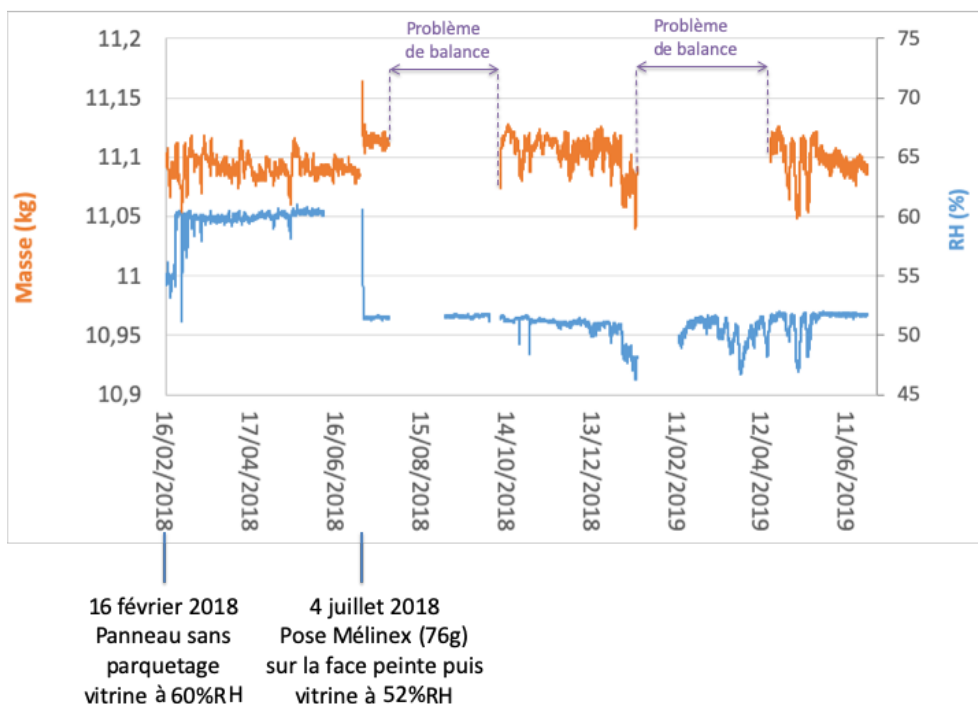


Figure 49 : Panneau sans parquetage, puis avec face peinte recouverte de Mélinex

### 3.6.2 Résultats et analyses

#### 3.6.2.1 Quelques résultats expérimentaux relatifs à la 1<sup>ière</sup> période de mesure

Nous avons mesuré une variation de masse du panneau et de son cadre entre 52 et 63%RH de l'ordre de 0,6% alors que les isothermes d'adsorption de la littérature prévoient une augmentation de l'ordre de 2,6%. Les courbes données par la littérature sont des courbes "enveloppes" qui donnent des tendances d'évolution de l'humidité du bois en fonction de l'humidité relative. La Figure 50 illustre la variation de masse du panneau et son cadre à l'état initial, puis à 52% et 63%RH comparée aux valeurs obtenues à partir des courbes d'adsorption et désorption.

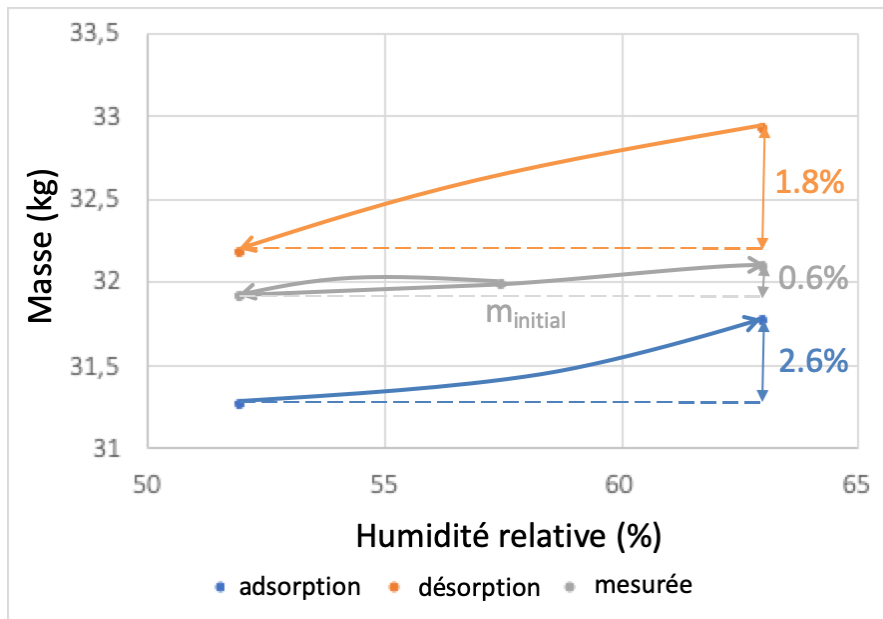


Figure 50 : Masses du panneau et son cadre mesurées en fonction de l'humidité relative, comparées aux masses évaluées à partir des isothermes d'adsorption et désorption de la littérature

Le relief de la face peinte est concave (Figure 51) avec une amplitude de 16 mm. Celui du revers donne des résultats similaires.

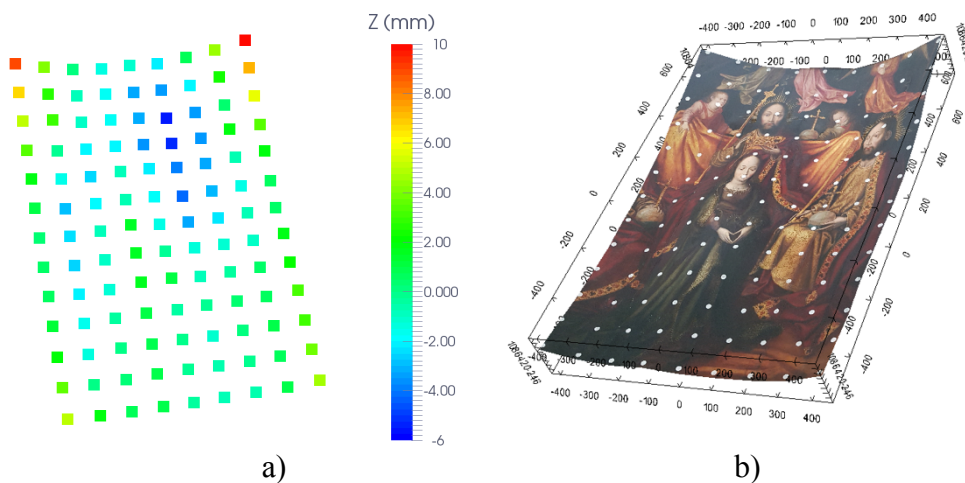


Figure 51 : Relief de la face peinte du panneau (position z x10) : a) coordonnées 3D des marqueurs b) vue cartographique à l'aide du logiciel ParaView

La Figure 52 représente les déplacements hors plan mesurés par la méthode de corrélation. Partant de l'état initial (à gauche), on a observé dans les premiers jours une flexion concave du panneau, liée à la baisse de teneur en eau, puis le panneau s'est stabilisé (au milieu). L'augmentation de l'humidité relative a entraîné une courbure convexe (à droite). En comparant les états à 52 et 63%RH, on mesure une variation de courbure d'amplitude maximale 1,5mm. De faibles variations de masse entraînent néanmoins des variations de forme notables.



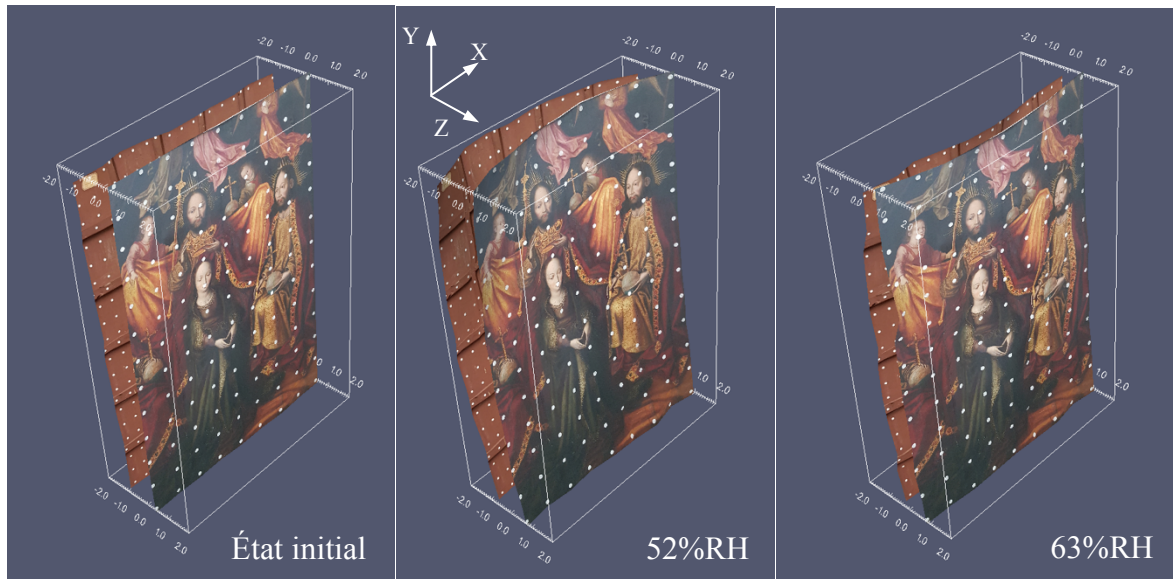
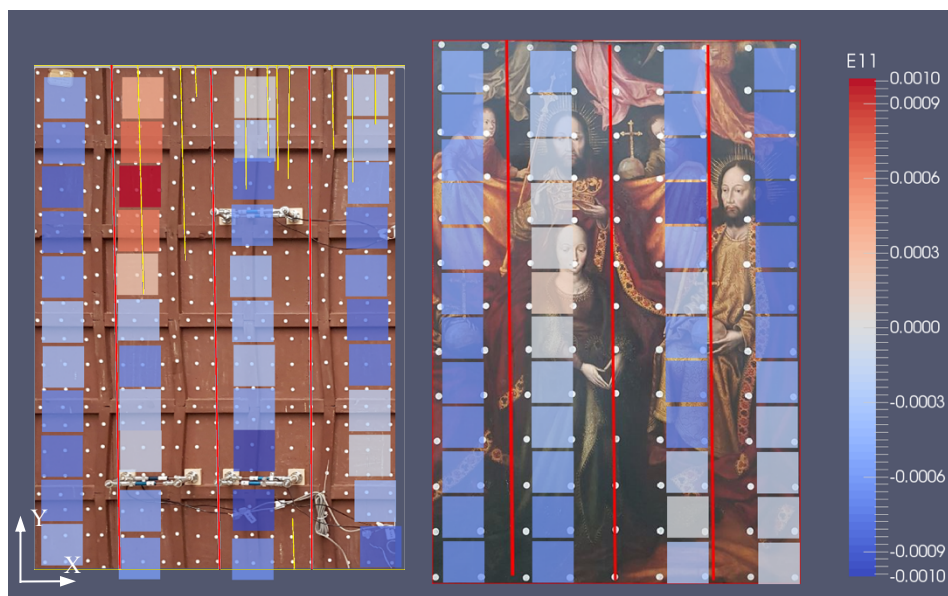


Figure 52 : Déplacements hors plan de la face et du revers, à 52% et 63%RH, par rapport à l'état initial, vis de la face peinte

La Figure 53 représente les déformations horizontales dans les 2 états stabilisés, par rapport à l'état initial, en faisant l'hypothèse d'un matériau continu. On observe un retrait global lors de la première phase, puis un gonflement global lors de l'augmentation de l'humidité relative.



(a) 52%RH



(b) 63%RH

**Figure 53 : Déformations horizontales de la face et du revers, à 52% et 63%RH, par rapport à l'état initial, vue de la face peinte (fentes en jaune, délimitation des planches en rouge)**

Le champ de déformation est plutôt hétérogène, notamment sur le revers, comme dans la zone en haut à gauche, où ces hétérogénéités sont à mettre en relation avec les fentes observées sur le revers (tracées en jaune). Dans ces zones, une déformation positive peut être interprétée comme une ouverture de fente, et une déformation négative comme une fermeture de fente. On observe un gonflement global entre l'état à 63%RH relativement à l'état à 52%RH, avec une déformation moyenne de l'ordre de 0,08%

Nous avons évalué une augmentation de masse de 0,6% entre les 2 états. D'après la littérature, les coefficients de retrait/gonflement moyen du chêne sont de l'ordre de 4,5% et 9,7% dans les directions radiale et tangentielle, entre l'état anhydre et l'état saturé, pour un point de saturation des fibres de 31% (Gérard, 2011). En supposant une relation linéaire entre les coefficients de retrait-gonflement et le taux d'humidité, on peut estimer qu'une augmentation de 0,6% du taux d'humidité entraîne des déformations radiale et tangentielle de l'ordre 0,09% et 0,19%, dans le cas de bois libre de se déformer.

Considérant l'orientation des planches, nous aurions pu nous attendre à une déformation plus forte dans la planche sur dosse (à l'extrême droite, Figure 53), comparée aux trois autres planches qui sont radiales : nous n'observons pas de différence significative. Cependant, les déformations sont évidemment limitées par l'effet des traverses longitudinales.

Une analyse locale des déformations est faite par le biais des kits déformométriques, qui donnent précisément déformation et courbure locales (Figure 54 et Figure 55).

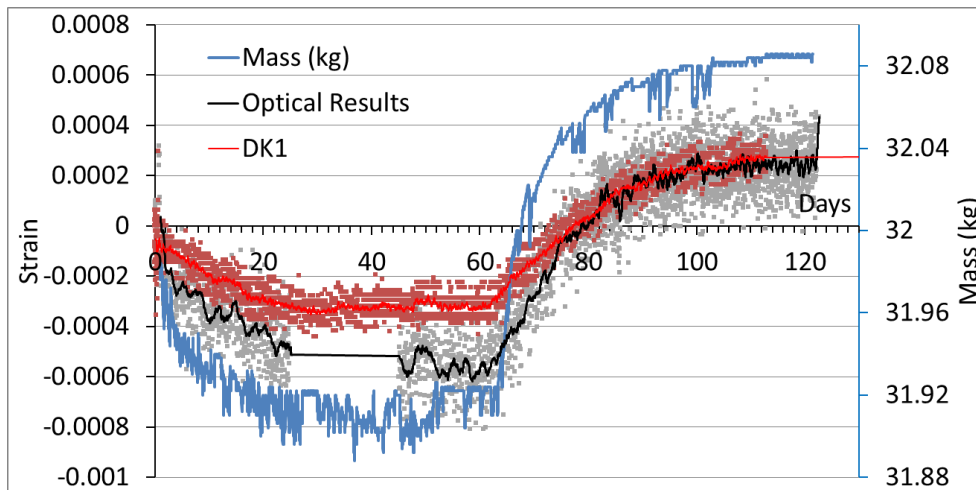


Figure 54 : Déformation horizontale mesurée par le kit 1 et par la technique optique et masse.

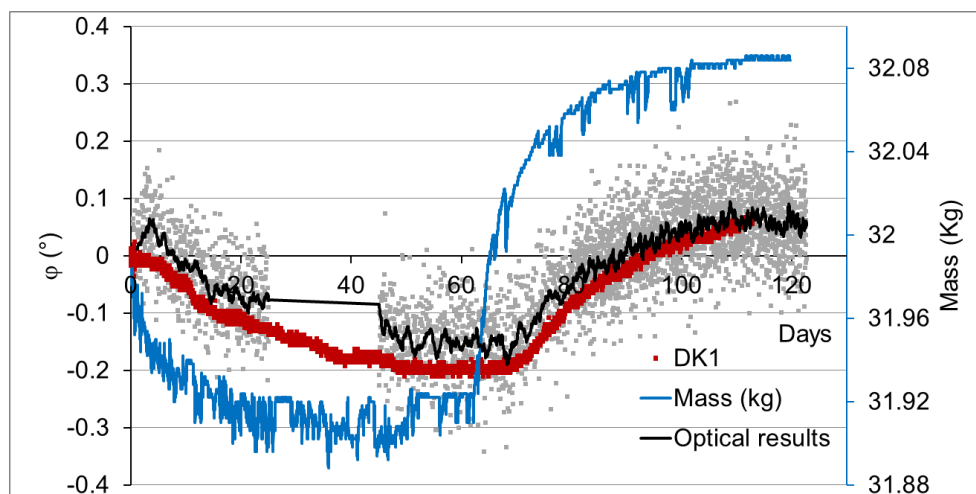
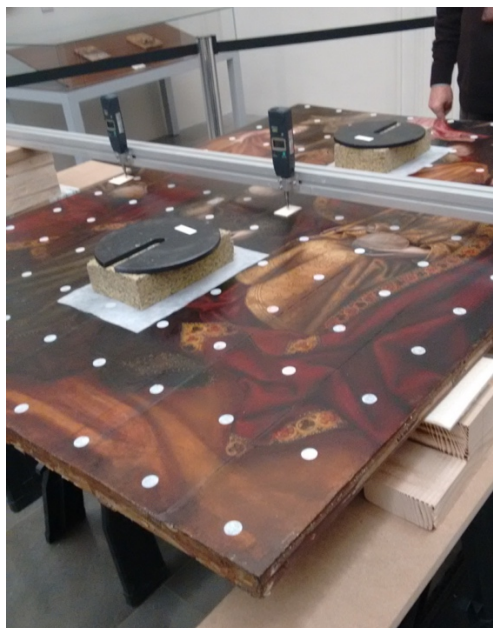


Figure 55 : Angle de courbure mesuré par le kit 1 et par la technique optique et masse.

### 3.6.2.2 Évaluation de la rigidité du panneau

Nous avons effectué deux essais de flexion 3 points sur le panneau avec son parquetage : un avec la face peinte dessus, le panneau est sollicité en compression transverse (Figure 56), nous obtenons une flèche de 0,83 mm pour un chargement de 12 kg ; l'autre avec la face peinte dessous, le panneau est sollicité en traction transverse, nous obtenons une flèche de 1,84 mm pour la même charge. Tandis que le premier mode de sollicitation a tendance à refermer les fentes, le second a pour effet de les ouvrir : cela peut expliquer la grande différence de flèche. Cette méthode donne donc des informations sur le niveau d'endommagement du panneau. L'essai de flexion longitudinale quant à lui a conduit à une flèche de 1 mm, quelle que soit la face sollicitée.



**Figure 56 : Essai de flexion 3 points sur le panneau et son renfort, face peinte dessus. Le panneau est sollicité en compression transverse.**

Ces mesures mettent en avant le rôle primordial joué par le parquetage : le parquetage vient pallier la baisse de rigidité du panneau, elle-même due en partie à la présence de ce parquetage qui, empêchant les retraits/gonflements du panneau, provoque des fissurations dans ce dernier. Ces structures sont complexes et difficiles à étudier, elles évoluent au cours du temps, et nous ne pouvons pas caractériser à ce stade uniquement le panneau, mais seulement l'ensemble de la structure.

### **3.6.2.3 Modèle numérique du panneau et son parquetage**

Pour nous aider à comprendre le comportement de cette structure, nous avons développé un modèle numérique à l'aide du logiciel *Ansys Workbench 16.0*, qui vient en complément de l'étude expérimentale [87]. La géométrie a été simplifiée (Figure 57) : les 6 montants verticaux sont les mêmes, chacun constitué d'une seule pièce. Les 7 traverses horizontales sont également identiques entre elles. Les propriétés orthotropes des bois sont estimées à partir du modèle statistique de Guitard : pour le panneau, feuillu de densité 0,81, pour le parquetage résineux de densité 0,46 ; les bois sont supposés à un taux d'humidité constant de 9,5% (Table 58). On suppose les planches parfaitement collées les unes aux autres et le parquetage totalement lié au panneau.

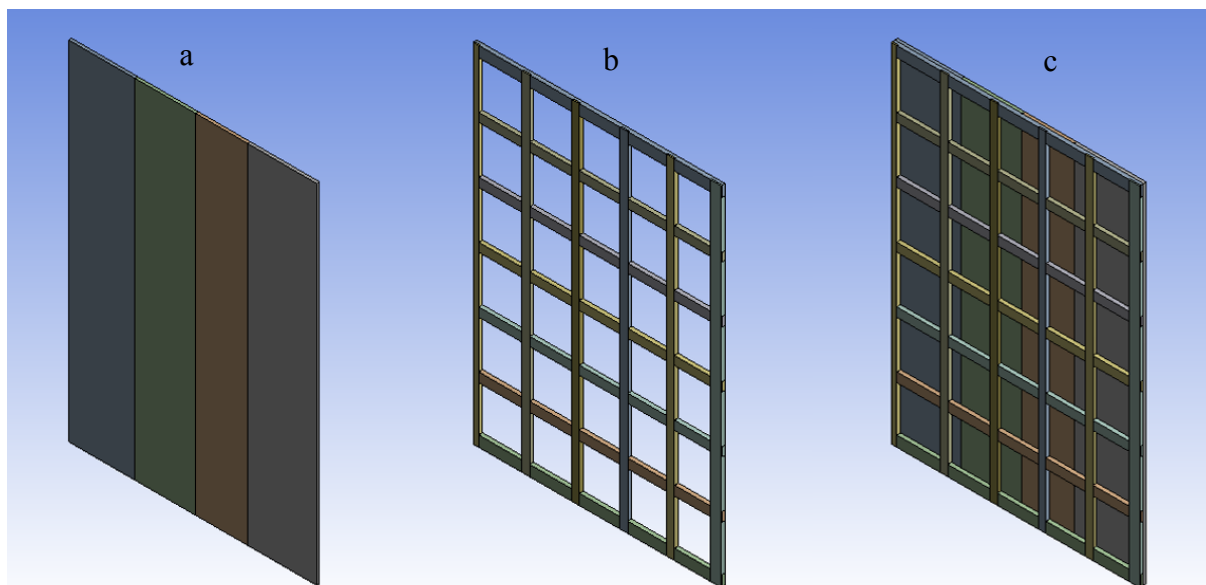


Figure 57 : Géométrie de la structure : a) panneau b) parquetage c) ensemble (Ansys workbench 16.0) [87]

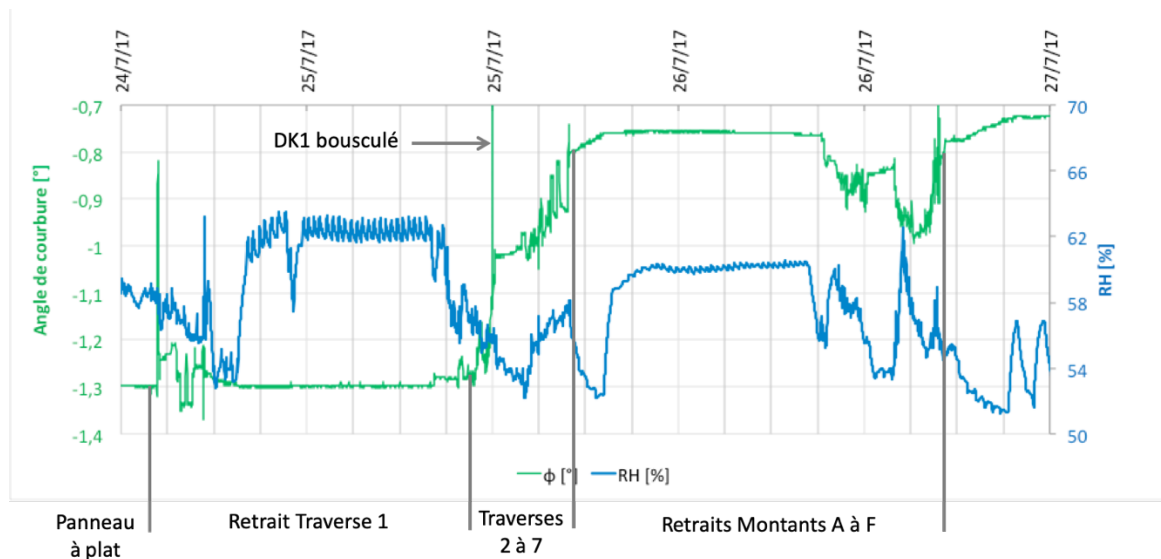
Partie	$d$	$E_R$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$E_L$ (MPa)	$\nu_{RT}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{RL}$	$G_{RT}$ (MPa)	$G_{TL}$ (MPa)	$G_{RL}$ (MPa)
<b>Renfort</b>	0.46	1097	702	13831	0.488	0.021	0.03	91	791	924
<b>Panneau</b>	0.81	2581	1618	18483	0.66	0.04	0.053	571	1342	1696

Table 58 : Paramètres de rigidité pour un taux d'humidité de 9,5% (issus du modèle de Guitard)

Nous avons simulé les essais de flexion transverse et longitudinale effectués expérimentalement : les flèches obtenues sont respectivement 0,62 mm et 1,35 mm. Ces calculs sous-estiment la flèche transverse, et surestiment la flèche longitudinale obtenues expérimentalement : il n'est pas surprenant que le panneau réel soit plus souple que le modèle numérique, car ce dernier considère des liaisons parfaites entre planches, et entre parquetage et panneau. Concernant l'essai longitudinal, nous avons considéré dans le modèle numérique tous les montants verticaux d'un seul tenant plutôt que composés de 6 morceaux, comme c'est le cas pour 4 des montants ; ce choix de modélisation a tendance à augmenter la rigidité de la structure. La plus grande souplesse du modèle pour cet essai peut cependant provenir d'une mauvaise estimation du module longitudinal, basée sur le modèle de Guitard, qui tient compte seulement de la densité du bois, et non pas du module spécifique, qui peut lui varier du simple au double à l'intérieur d'un arbre ou entre arbres de la même espèce.

#### 3.6.2.4 Suivi du déparquetage du panneau

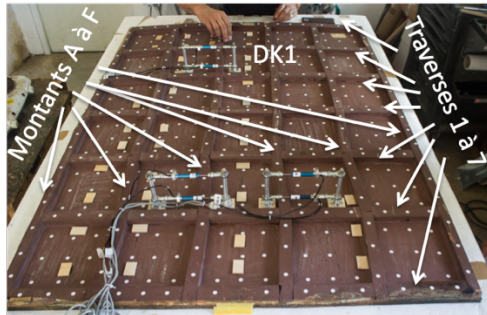
Du 24 au 28 juillet 2017, le parquetage a été enlevé du panneau par G. Tournillon dans son atelier de restauration situé à Ste-Cécile-les-vignes (84). Nous avons eu la possibilité de laisser en place certains kits déformométriques durant cette opération, et de suivre les mouvements locaux du panneau en fonction du prélèvement progressif du renfort. La Figure 59 présente l'angle de courbure estimé par le kit 1 durant ces opérations. On note une nette diminution de la courbure, qui passe de  $-1,3^\circ$  à  $-0,8^\circ$  en fin d'opération, et qui diminue encore par la suite : cette diminution de courbure met en avant les efforts que le parquetage exerçait sur le panneau.



**Figure 59 : Angle de courbure estimé par le kit 1 et humidité relative lors du retrait progressif des traverses et des montants.**

Les étapes simplifiées de l'évolution de la courbure et des déformations estimées par le kit 1 sont présentées Figure 60. En termes de déformation, le kit 1 réagit surtout lorsque la traverse 3, à proximité, est prélevée. Mais en termes de courbure, bien que plus réactif lors du prélèvement de cette traverse, il réagit néanmoins tout au long de l'opération : la mesure est plus globale, elle concerne toute la structure. Le lendemain et le surlendemain, le bois continue à réagir, les déformations bloquées depuis longtemps se relaxent. Lors du prélèvement du parquetage, on note un retrait du bois de l'ordre de 0,04% : le parquetage exerçait une tension transverse de l'ordre de 1 MPa (dans le cas d'un module radial estimé à 2580 MPa) sur la planche de chêne.

Ce niveau de déformation est très comparable aux déformations mesurées sur *La mort de Cléopâtre* (paragraphe 4.1.5) qui étaient de l'ordre de -420 et -250  $\mu\epsilon$  (soit -0,042 et -0,025%) lors du retrait la traverse. Ce suivi des déformations et courbure lors d'actes de restauration met en avant le niveau des contraintes que les traverses longitudinales exercent sur le bois des panneaux peints.



Kit 1 positionné à proximité de la traverse 3, de part et d'autre du montant C

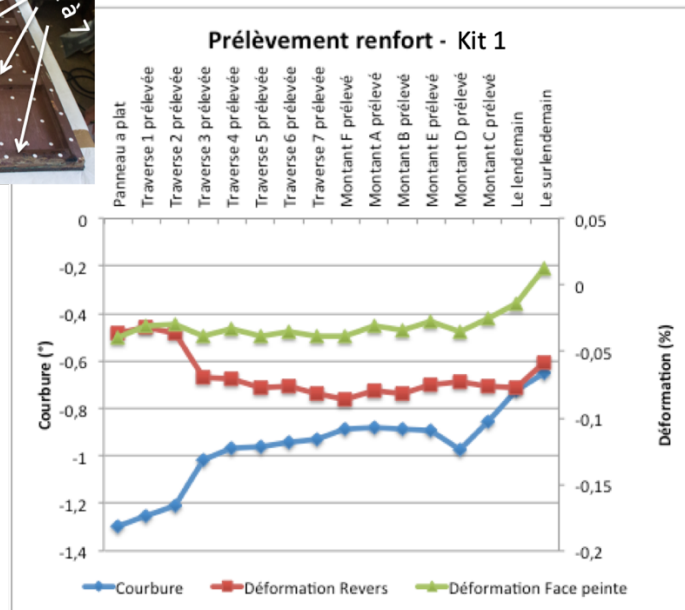


Figure 60 : Déformations et courbure estimées par le kit 1 lors du retrait progressif du parquetage. A gauche, position du kit 1 et nomenclature des traverses (de haut en bas) et montants (de gauche à droite) [88]

### 3.6.2.5 Modèle numérique pour simuler l'opération de déparquetage

Ce même modèle numérique a été utilisé pour simuler l'opération de déparquetage. Nous avons pour cela considéré les déformations du panneau, au niveau de l'emplacement du kit 1, lors d'un chargement hygroscopique, dans le cas où : le parquetage est complet, il manque 1 traverse, il manque 2 traverses, etc... Le calcul est mené sur chaque structure pour un même chargement hygrothermique. Nous obtenons l'effet du prélèvement de chaque traverse par différence entre 2 états.

La Figure 61 permet de comparer les mesures expérimentales au modèle numérique. Dans le cas du revers, la tendance est plutôt bien estimée par le modèle numérique, tandis que pour la déformation de la face peinte, les 2 profils sont plutôt différents. Le modèle étant très simplifié, il n'est pas surprenant de trouver des différences significatives : le panneau présente des fentes non prises en compte par le modèle, les traverses ne sont pas toujours totalement adhérentes au panneau tandis que le modèle numérique les considère parfaitement liées, etc...

Néanmoins, ce type de modèle numérique permet d'appréhender l'effet d'un parquetage sur un panneau, et permet par exemple de simuler l'effet de parquetages différents sur une même structure, pouvant alors être une aide à la décision pour le restaurateur.

Dans le cas de ce panneau, nos collègues italiens ont également proposé un modèle numérique permettant de choisir la forme et l'épaisseur du nouveau châssis. Il a été réalisé et posé fin 2019 au revers du panneau.

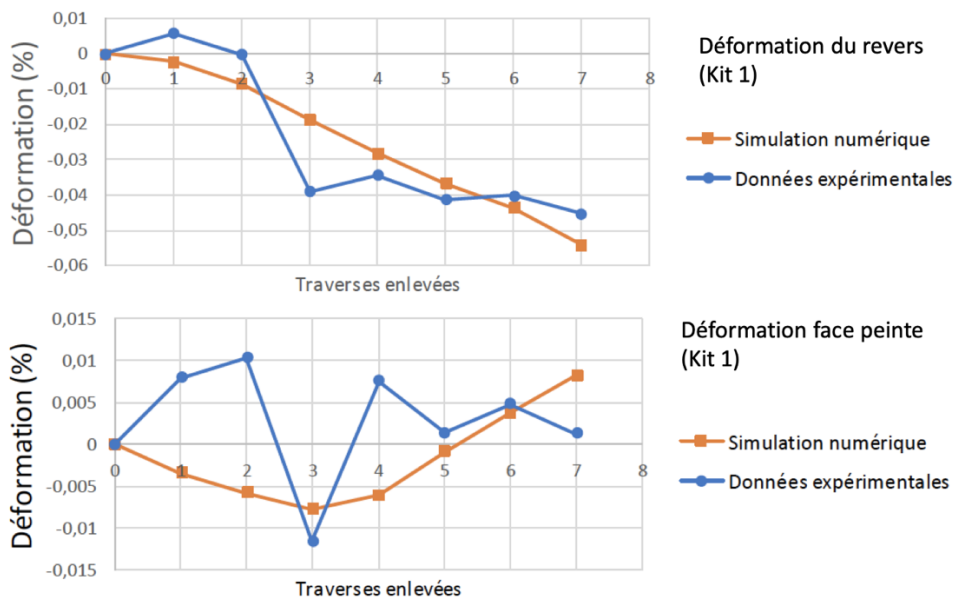


Figure 61 : Déformation de la face et du revers estimées par le kit 1 lors du prélèvement des 7 traverses : comparaison modèle numérique/mesures expérimentales [88]

### 3.6.2.6 Caractérisation du badigeon

Après le prélèvement du parquetage, nous avons eu accès aux éléments du renfort recouvert de badigeon et avons pu comparer les propriétés de diffusion de ce revêtement à celles du bois brut. Nous avons pour cela préparé des échantillons de dimensions 20\*20 mm et d'épaisseur 6 et 12mm, équilibrés à 65%RH, et recouverts de scotch étanche sur 5 faces. Nous avons mesuré le gain de masse lors du passage de 65 à 85%RH à 20°C au cours du temps (Figure 62).

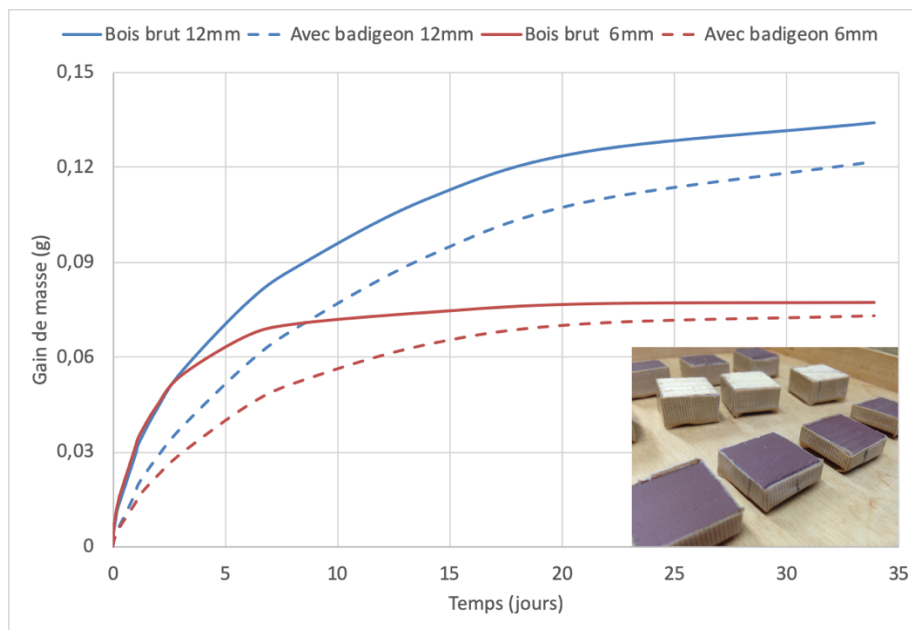


Figure 62 : Gain de masse d'échantillons de sapin issus du parquetage, d'épaisseurs 6 et 12 mm, avec 5 faces isolées, lors du passage de 65 à 85% d'humidité relative, à une température de 20°C.

Nous avons estimé à partir de ces courbes les coefficients de diffusion de ces 4 échantillons (Tableau 2). Le badigeon réduit le coefficient de diffusion de l'ordre de 78% pour l'échantillon de 6mm, 55% pour celui de 12mm.



	6mm	12mm
Bois brut	$1,41.10^{-7}$	$1,56.10^{-7}$
Avec badigeon	$3,12.10^{-8}$	$7,01.10^{-8}$

Tableau 2 : Coefficients de diffusion des échantillons de sapin de 6 et 12 mm d'épaisseur, avec et sans badigeon, en  $\text{cm}^2/\text{s}$

En terme de taux d'humidité d'équilibre, les abaques de la littérature prévoient les valeurs d'adsorption, de désorption et moyenne, reportées Tableau 3 pour du sapin.

Environnement HR (%) T(°C)	HR	65	85
	T		20
Taux d'humidité d'équilibre (%)	$w_a$	11,6	18,1
	$w_d$	15,2	21,3
	$w_m$	13,4	19,7
Masse de l'échantillon (g)	$m_a$	1,77	1,87
	$m_d$	1,82	1,92
	$m_m$	1,79	1,89
	$m_{mes}$	1,79	1,87

Tableau 3 : Taux d'humidité d'équilibre du sapin dans les conditions considérées :  $w_a$  en adsorption,  $w_d$  en désorption,  $w_m$  moyen ; masses évaluées correspondantes  $m_a$ ,  $m_d$  et  $m_m$ , et mesurées  $m_{mes}$ .

Si l'on suppose qu'au début des mesures l'échantillon est à un taux d'humidité moyen de 13,4% (à vérifier par une mesure de masse anhydre), la valeur de masse mesurée à 85%HR correspond à un taux d'humidité d'environ 18%. Cette valeur est proche de celle donnée par les abaques pour la courbe d'adsorption (Figure 63), et ne reflète pas un comportement particulier d'un bois sollicité en variation d'humidité et contraint depuis peut-être 70 ans. Cela témoigne des difficultés à prendre en compte l'influence du vieillissement du bois sur ses caractéristiques hygroscopiques.

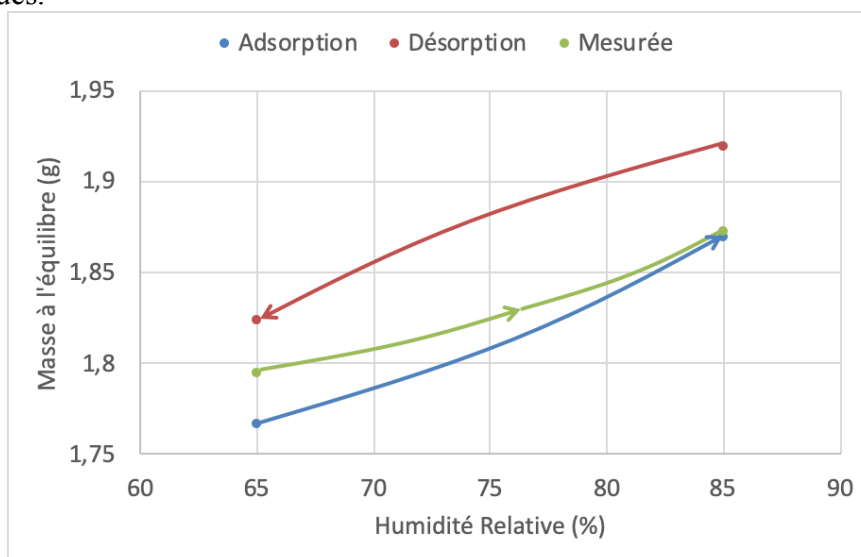


Figure 63 : Masses mesurées à l'équilibre d'un échantillon de sapin brut épaisseur 6 mm comparées aux courbes d'adsorption et désorption théoriques, lors d'un passage de 65 à 85%RH.

### 3.6.3 Conclusions

Cette étude est toujours en cours et d'actualité. Un premier article présentant les méthodes de mesure mises en jeu est actuellement soumis à une revue spécialisée. Un deuxième article est prévu pour une analyse plus détaillée des résultats obtenus. L'expérimentation continue. Le panneau avec couche picturale restaurée et nouveau renfort prendra place dans la vitrine du musée Fabre courant 2020 pour une nouvelle campagne de mesures. Nous rencontrons

régulièrement des difficultés techniques dues à la très longue durée des expérimentations, et à l'inaccessibilité des appareillages à l'intérieur de la vitrine en temps normal. Concernant la balance par exemple, une coupure de courant trop longue peut parfois réinitialiser l'appareil, et il n'est pas possible de relancer l'acquisition sans soulever le panneau, c'est-à-dire sans ouvrir la vitrine.

Malgré tout, nous avons réussi à collecter près de 3 ans de mesures, avec forcément quelques interruptions volontaires ou non. Cette collaboration avec le musée Fabre est très intéressante et riche en échanges, rendue possible notamment grâce à l'acharnement de Marina Bousvarou, l'intérêt majeur porté par Pierre Stepanoff, la formidable ouverture de Gilles Tournillon et Danièle Amoroso, la grande complicité de nos collègues italiens et poitevins, et surtout la bonne volonté de l'ensemble de l'équipe. Cette démarche a fait l'objet d'une communication particulièrement bien perçue à un colloque réunissant deux groupes de travail de l'ICOM-CC en février 2020 à Lisbonne [65].

### 3.7 Suivi de forme et masse en continu après restauration du support

#### 3.7.1 Description du panneau et de son support

*Le Couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie* est une œuvre du XV<sup>e</sup> siècle présentée au musée Fabre de Montpellier, de type huile sur bois, d'un auteur anonyme d'Allemagne, de dimensions : hauteur 0,97 m, largeur 0,78 m, épaisseur 8 mm. Il s'agit d'un panneau de feuillu (tilleul ?) constitué de 3 planches à fil vertical assemblées à plat joints collés. Une récente intervention a consisté à ôter un très important châssis en résineux collé à son revers suite à un fort amincissement du panneau. Ce châssis d'une épaisseur de 18 mm était composé de 3 montants et 5 traverses collées à contre-fil (Figure 64). Extrêmement contraignant, il a généré le décollement partiel des 2 assemblages et de très nombreuses cassures sur chaque planche (constat d'état, Jaunard 2012). Un léger châssis en résineux a été conçu afin de structurer l'ensemble du revers du panneau. Le châssis est constitué de 4 traverses et de 2 montants. La réalisation de 26 trous de vis ovalisés avec l'incrustation de plaques de laiton sur le dessus permet la liaison de celui-ci avec le panneau à l'aide de vis, tout en permettant les déplacements latéraux du panneau dus aux retraits/gonflements du bois (Figure 65).

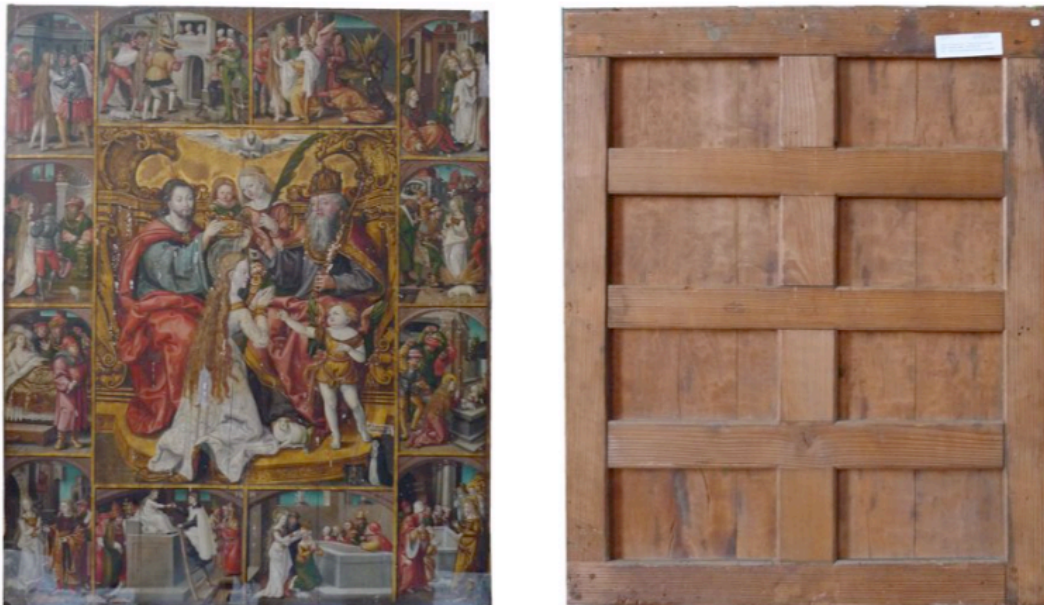
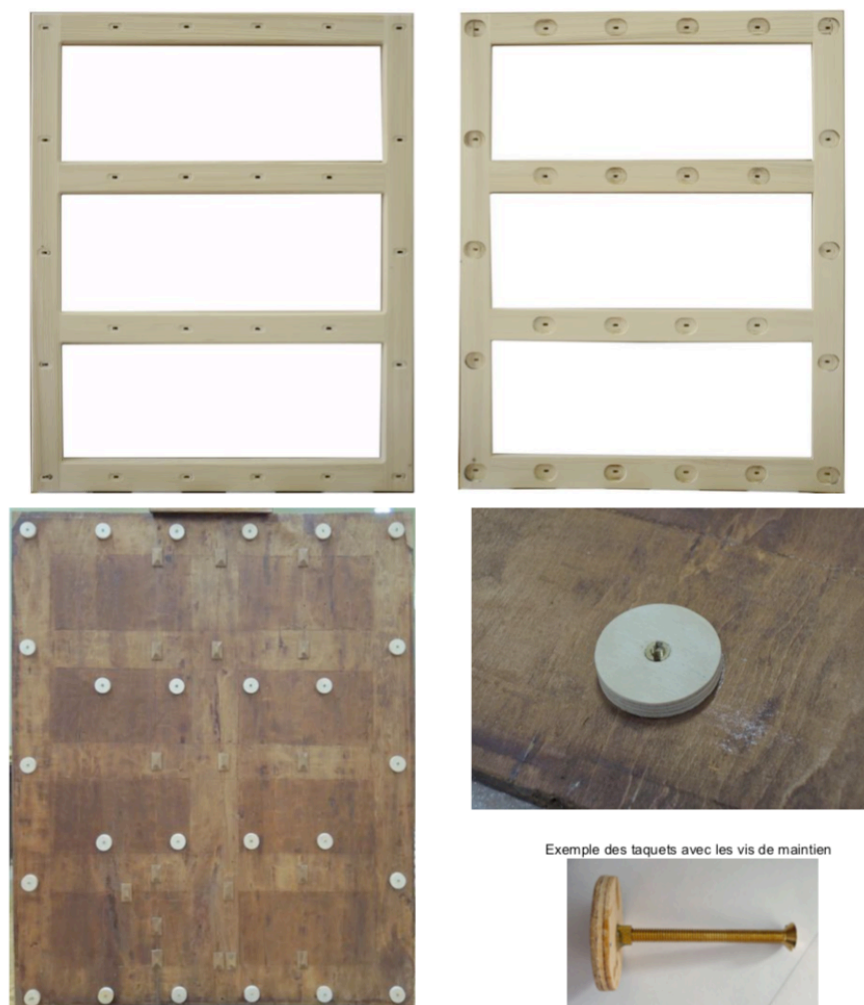


Figure 64 : *Le Couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie* et son châssis très contraignant avant l'intervention.



**Figure 65 : Nouveau châssis et son système de fixation permettant les retraits/gonflements transversaux du panneau (Jaunard 2012).**

### 3.7.2 Protocole expérimental et mesures

Profitant de la vitrine régulée en température et humidité disponible au musée, nous avons souhaité vérifier que le panneau ainsi restauré se déformait peu lors des variations d'environnement. Nous avons appliqué des marqueurs sur le revers du panneau et du châssis, afin de suivre ses déformations par stéréo-corrélation (Figure 66). La masse de panneau et l'environnement dans lequel il baigne sont enregistrés en continu pour une période de 7 mois de juillet 2017 à février 2018.

La masse initiale de l'ensemble est de 7,2 kg. Jusqu'au 28 octobre 2017 la variation de masse ne dépasse pas -108g (soit 1,5% de sa masse initiale), dans un environnement en température et humidité relativement stables (Figure 67). À partir du 28 octobre, l'humidité dans la vitrine montre de fortes baisses cycliques (jusqu'à 48%RH) pendant que la température descend de 24 à 19°C, puis remonte vers 23°C. La variation de masse atteint +126g et redescend jusqu'à -100g.

Il semble qu'à partir de cette date, le système de régulation ne fonctionnait plus convenablement. Nous avons dû installer un humidificateur dans la console accueillant les appareils électroniques sous la vitrine afin de permettre au système Preservatech de conditionner correctement l'intérieur de la vitrine.

Nous avons mesuré une amplitude de variation de masse de 234g pour une variation de RH de 8% sur un panneau de 7,2kg ; dans le cas de *La Sainte Trinité* dans son cadre, nous avons mesuré une variation maximale de 180g pour une amplitude de 13%RH sur une masse totale

de bois de 30 kg. *Sainte Agnès* semble bien plus réactif aux variations d'hygrométrie de l'environnement que *La Sainte Trinité*.

Pendant tout l'enregistrement, nous avons pu vérifier que les déformations du panneau sont restées très faibles, et que le nouveau châssis jouait correctement son rôle de maintien.



Figure 66 : « *Sainte Agnès* » et son châssis avec marqueurs au dos (à gauche). Relief suivi au cours du temps par stéréo-corrélation (à droite).

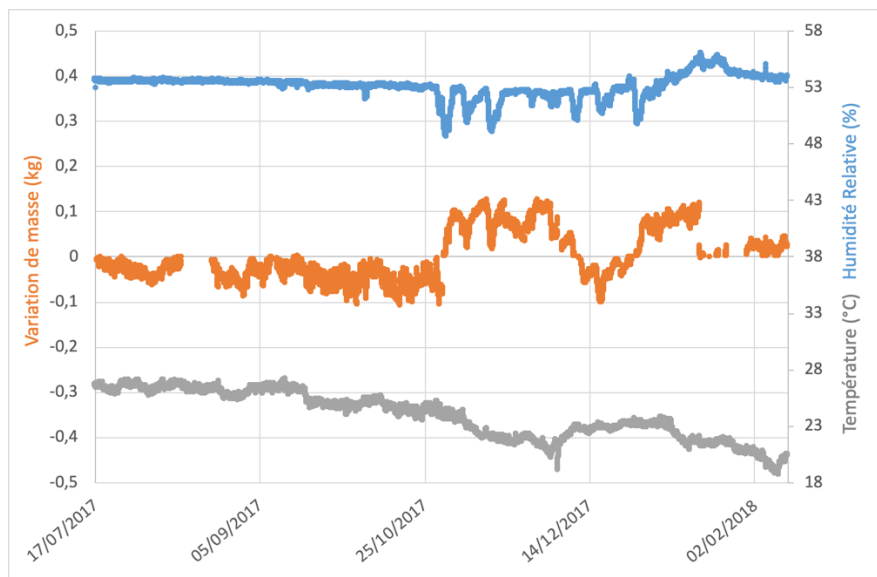


Figure 67 : Variation de la masse et de l'environnement hygrothermique de « *Sainte Agnès* » de juillet 2017 à février 2018. Masse initiale : 7,2 kg.

Une seconde période de variation de masse a été enregistrée durant les mois d'octobre et novembre 2019 (Figure 68). Nous avons mesuré une variation de masse maximale de 80g pour une variation de RH de 4%. Cet enregistrement confirme la réactivité du panneau aux variations

hygrométriques. Durant cette période, le climat dans la vitrine est nettement plus stable que durant l'enregistrement précédent. Nous devons encore analyser les déformations du panneau durant cette période pour les relier aux variations de masse observées, et en tirer des conclusions sur les coefficients de retrait/gonflement du bois de ce panneau.

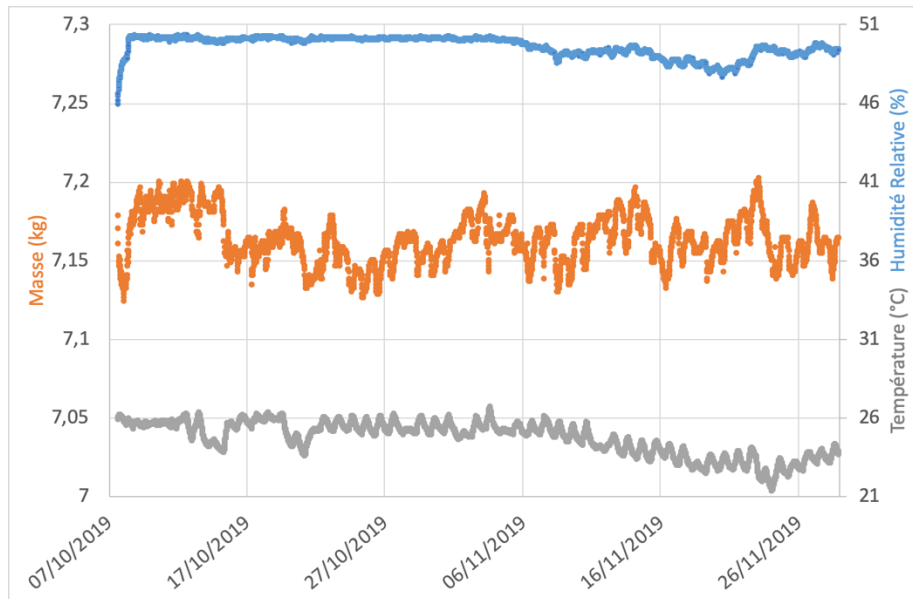


Figure 68 : Suivi de la masse et de l'environnement hygrothermique de « *Sainte Agnès* » d'octobre à novembre 2019.

### 3.7.3 Conclusion

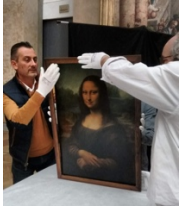




Cette étude va nous permettre d'analyser le comportement du panneau et de son châssis. Cependant les problèmes de régulation de la vitrine rencontrés durant la période octobre 2017-février 2018 peuvent rendre difficile l'interprétation des résultats. Il semble que les résultats de la dernière campagne de mesures soient plus faciles à exploiter que les précédents.


Il sera intéressant de comparer par la suite le comportement de ce panneau avec celui de *La sainte Trinité* munie de son nouveau châssis-cadre ; le comportement de ce dernier sera sans doute très différent de celui avec son parquetage initial.

### 3.8 Conclusion

Les études que nous avons menées sur les panneaux peints du patrimoine présentent chacune leur particularité, en fonction de la question posée par les conservateurs ou restaurateurs. Nous nous efforçons d'apporter des réponses concrètes à leurs questions, en rassemblant les connaissances et les outils des différents corps de métier. Nous voyons cependant apparaître au fil des études la possibilité de faire des comparaisons entre les comportements des différents panneaux observés. Ces comparaisons ne sont pas toujours simples, car les conditions d'observation ne sont pas toujours comparables. Nous devons développer des stratégies d'analyse qui nous permettront de tirer des conclusions, malgré ces conditions variables.

Le Tableau 4 synthétise l'ensemble des actions menées.

Panneau peint	Illustration	Lieu d'exposition	Mesures expérimentales	Modèle numérique	Restauration du support
<i>La Joconde</i> , Leonardo de Vinci		Musée du Louvre, Paris	- flèche en continu - efforts en continu - examen annuel : masse, forme 3D - efforts de contact entre châssis-cadre et panneau	- évaluer l'effet du châssis cadre - évaluer le risque de propagation de fissure - comparer les efforts de contact entre châssis-cadre et peinture, avec/sans plastazote	Remplacement éventuel du châssis cadre envisagé
<i>Baptême du Christ</i> , anonyme		Palais du Roure, Avignon	- forme de la face avant dans 3 états : anciennes traverses, sans traverse, nouvelles traverses	- évaluer les contraintes résiduelles avant et après restauration	Remplacement des traverses <i>mobiles</i> du parquetage
<i>Le couronnement d'épines</i> , anonyme		Église St Didier, Avignon	- forme de la face avant dans 2 états : hiver, printemps - flèche en continu	- modèle de plaque orthotrope - modèle hygro- élastique - prédiction de flèche - évaluation des contraintes	aucun
<i>La Sainte Trinité</i> , anonyme		Musée Fabre, Montpellier	Avant et après restauration : - suivi de la forme et de la masse en continu lors de variations hygrothermiques, avec et sans cadre - 3 mesures locales de déformations en continu - essai de flexion - mesures de déformations locales pendant la restauration	- modèle par éléments finis	Remplacement du renfort trop contraignant par un châssis à ressorts
<i>Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie</i> , anonyme		Musée Fabre, Montpellier	Après restauration : suivi de la forme et de la masse en continu lors de variations hygrothermiques		Restauration récente : remplacement du renfort trop contraignant par un châssis à ressorts

<p><i>La mort de Cléopâtre</i><sup>(*)</sup>, Girolamo Marchesi Da Cotignola</p>		<p>Musée Baron Gérard, Bayeux</p>	<p>- fabrication d'échantillons tests de panneau de peuplier peint doublé de différents renforts - déformations des échantillons lors de cycles hygrothermiques</p>	<p>Remplacement du renfort trop contraignant par un doublage balsa</p>
--	---	---------------------------------------	---	--

**Tableau 4 : Tableau résumant les études menées sur différents panneaux du patrimoine. <sup>(\*)</sup> étude présentée dans le paragraphe 4.1**

Le très fort intérêt porté par la communauté internationale de la conservation du patrimoine sur ces travaux nous encourage vivement à les poursuivre et les étendre, en mettant en place notamment un réseau d'acteurs, sans doute avec le soutien de la communauté ICOM-CC.

### 3.9 Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre

#### *Articles dans des revues internationales à comité de lecture*

- [61] Dupré J.C., **Jullien D.**, Uzielli L., Hesser F., Riparbelli L., Gauvin C., Mazzanti P., Gril J., Tournillon G., Amoroso D., Massieux P.H., Stépanoff P., Bousvarou M. (2020) Experimental study of the mechanical and hygro-mechanical behaviour of a wooden panel from cultural heritage: devices and experimental techniques. *Journal of Cultural Heritage. Soumis*
- [62] Uzielli L., Cocchi L., Mazzanti P., Togni M., **Jullien D.**, Dionisi-Vici P. (2012) The deformometric kit : a method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels, *Journal of Cultural Heritage*, doi: 10.1016/j.culher.2012.03.001 [hal-00700825 - version 1]

#### *Congrès internationaux*

- [63] **Jullien D.**, Dupré J.C., Hesser F., Riparbelli L., Mazzanti P., Uzielli L., Gauvin C., Gril J., Tournillon G., Massieux P.H., Amoroso D., Stépanoff P., Bousvarou M. (2020) Mechanical behavior of a painted wooden panel from the heritage subject to hygrothermal variations: role of the reinforcement. SWST 63<sup>rd</sup> international convention, Renewable resources for a sustainable and healthy future, Portorož, Slovenia, 12-17.07.20
- [64] Riparbelli L., Brémand F., Dioniso-Vici P., Dupré J.C., Goli G., Hesser F., **Jullien D.**, Mazzantio P., Togni M., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2020) Learning from Objects: the use of advanced numerical methods to exploit a complete set of information from experimental data, for the Mona Lisa's Digital-Twin. International conference Florence Heri-Tech, Florence, Italy, 13-15.05.20
- [65] Bousvarou M., Gauvin C., **Jullien D.**, Dupré J.C. et al. (2020) Interdisciplinary collegial decision-making for a panel painting structural conservation. ICOM-CC Joint Interim meeting: Reflecting on Theory, History, and Ethics in the Conservation of Paintings: from Sources to the wider Social Context, 6-7.02.20, Lisbonne, Portugal
- [66] Riparbelli L., Brémand F., Dioniso-Vici P., Dupré J.C., Goli G., Hesser F., **Jullien D.**, Mazzantio P., Togni M., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2019) Studies for the Mona Lisa conservation: the implementation of its panel's Digital-Twin, International Conference CompWood on Computational Methods in Wood Mechanics – from Material Properties to Timber Structures, Växjö, Sweden, 17-19.06.19
- [67] Gril J., Brémand F., Cocchi L., Dionisi-Vici P., Dupré J.C., Gauvin C., Goli G., Marcon B., **Jullien D.**, Mazzanti P., Ravaud E., Togni M., Uzielli L. (2015) The Mona Lisa Project: an update on the progress of measurement, monitoring, modelisation and simulation, Colloque Euromech « Theoretical, Numerical and Experimental Analyses in Wood Mechanics », Dresden, Allemagne, 27-29.05.15
- [68] **Jullien D.**, Mazzanti P., Cocchi L., Colmars J., Gril J., Uzielli L. (2012) New uses and improvements of the deformometric kit to support study and conservation of panel paintings, IUFRO Conference, Division 5 Forest Products, Lisbon, Portugal, 8-13.07.12.

- [69] Uzielli L., Gril J., Cocchi L., Colmars J., Dionisi Vici P., Dureisseix D., Goli G., **Jullien D.**, Marcon B., Mazzanti P., Rémond R. (2011) Monitoring and modeling deformation of the “Mona Lisa”, 5th International Congress "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Istanbul, Turkey, 22-25.11.2011, A. Guarino (ed) [hal-00945943 - version 1]
- [70] Uzielli L., Gril J., Cocchi L., Colmars J., Dionisi Vici P., Dureisseix D., Goli G., **Jullien D.**, Marcon B., Mazzanti P., Rémond R. (2011) Experimental studies on the wooden support of the “Mona Lisa”, Strategic Workshop “The Safeguard of Cultural Heritage: a Challenge from the Past for the Europe of Tomorrow”, Florence, Italy, 11-13.07.2011, University of Florence and COST. [hal-00945958 - version 1]
- [71] Colmars J., Rémond R., Marcon B., Gril J., Perré P., Dionisi Vici P., **Jullien D.**, Maurin E. (2007) Poster: In-situ monitoring and hygrothermal modelling of a wood panel paintings: the case of the Saint Didier church in Avignon, Couronnement d'épines, Meeting COST Action IE0601 "Wood Science for Conservation of Cultural Heritage", Florence, IT, 8-10.11.07.
- [72] Marcon B., Dureisseix D., **Jullien D.**, Uzielli L., Gril J., Colmars J., Dionisi Vici P. (2007) Hygromechanical study of painted panels, Meeting COST Action IE0601 “Wood Science for Conservation of Cultural Heritage”, Tervuren, BE, 8-9.6.07.

#### *Congrès nationaux*

- [73] **Jullien D.**, Arnould O. (2020) Conférence invitée : Les objets en bois du patrimoine : études interdisciplinaires en étroite collaboration avec les acteurs de la conservation du patrimoine, 5ième Journées Jeunes Chercheurs Eco-composites et Composites Bio-sourcés, Ile de Groix, 13-15.05.20
- [74] Riparbelli L., Dionisi-Vici P., Dupre J., Goli G., **Jullien D.**, Bremand F., Mazzanti P., Hesser F., Marcon B., Togni M., Gauvin C., Arnould O., Valle V., Dureisseix D., Cocchi L., Mandron P., Ravaud E., Uzielli L., Gril J. (2018) Poster: Mona Lisa's digital twin: identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modelling, 7èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois, Cluny, 20-22.11.18
- [75] Dupré J.C., Hesser F., **Jullien D.**, Bousvarou M. (2017) Poster: Suivi du comportement mécanique d'une peinture sur bois, soumise à des variations d'hygrométrie. 6èmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Nantes 21-23.11.17 - Prix poster
- [76] **Jullien D.** (2016) Poster: Instrumentation et suivi des déformations d'un panneau de bois peint du patrimoine. 5ièmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Bordeaux, 8-10.11.16
- [77] Gauvin C., Jullien D., Dupré J.C., Doumalin P., Obataya E., Gril J. (2014) Poster : Étude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois. Application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine, 3ièmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, Nancy, 12-14.11.14

#### *Diffusion scientifique*

- [78] **Jullien D.** (2019) Etude d'un panneau de bois peint au musée Fabre de Montpellier, Séminaire Université Laval de Québec, Québec, 5.08.19
- [79] **Jullien D.**, Tournillon G. (2018) Etude technique d'un panneau de bois peint au musée Fabre de Montpellier, Séminaire « Patrimoine en question », INP, Paris, 4.06.18
- [80] Stepanoff P., **Jullien D.** (2017) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Conférence organisée par le Pôle Culture de l'Université Montpellier, 07.07.17
- [81] **Jullien D.** (2017) Suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Séminaire du Musée Fabre, Montpellier, 1-2.06.17
- [82] **Jullien D.**, Bousvarou M., (2016) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie, Table ronde Festisciences, Université de Montpellier, 24.11.16
- [83] **Jullien D.**, Bousvarou M. (2016) Projet de suivi des déformations d'un panneau de bois peint lors d'une variation contrôlée d'hygrométrie. SFIIC 7ième Journée d'étude du groupe Bois, Paris, 7.10.16
- [84] **Jullien D.**, Jenn B. (2015) Description et problématiques d'assemblages : Point de vue croisés de mécanicien et de conservateur-restaurateurs, SFIIC 6ième journée d'étude du groupe Bois, Paris, 2.10.15

#### *Encadrement doctoral et scientifique*



- [85]Raison Clara (2020) Expérience sur panneau de bois peint du patrimoine au sein du musée Fabre : suivi, analyse et interprétation des données. Master 1 Génie Mécanique, Université de Poitiers. Encadrants : **Jullien D.** (50%), Dupré J.C. (50%)
- [86]Chrysochoos Cécile (2017) Etude scientifique d'un panneau peint au musée Fabre, *La Sainte Trinité*. Stage Ingénieur 4ième année, Département Sciences et Génie des Matériaux, INSA Lyon. Encadrantes : **Jullien D.** (80%) Bousvarou M. (20%)
- [87]Kurtz Samuel (2017) Etude numérique d'un panneau de bois peint, La Sainte Trinité. Stage Ingénieur 4ième année, Département Mécanique et Interactions, Polytech Montpellier. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [88]Bottela-Barillot D. (2018) Expérimentation sur panneaux peints en environnement contrôlé : analyse des données. Projet Industriel de Fin d'Etude 5ième année, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions. Encadrante : **Jullien D.** (100%)
- [89]Rodriguez Jessica (2016) Conception d'abaques de dimensionnement d'un système de restauration de panneaux peints du patrimoine. Stage Ingénieur 5ième année, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interaction. Encadrants : Togni M. Université de Florence, Italie (40%) Uzielli L. Université de Florence, Italie (30%) **Jullien D.** (30%)
- [90]Rodriguez J. (2016) Projet Industriel de Fin d'Etude 5ième année, Polytech Montpellier, Département Mécanique et Interactions : Mise en place d'une base de données Restauration de panneaux peints du patrimoine. Encadrantes : **Jullien D.** (70%), Bousvarou M. (30%)
- [91]Marcon B. (2009) Hygromécanique des panneaux en bois et conservation du patrimoine culturel. Des pathologies... aux outils pour la conservation. Thèse de doctorat. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. Encadrants : Dureisseix D. (50%) Uzielli L. **Jullien D.** (50%)
- [92]Baldit (2009) Analyse des états de contrainte d'un panneau peint avant et après un acte de restauration. Stage Master 1 Mécanique et Ingénierie, Université de Montpellier. Encadrants : Dureisseix D. (70%) **Jullien D.** (30%)
- [93]Colmars J. (2007) Conception et réalisation de systèmes de mesures pour le suivi des œuvres du patrimoine culturel. Stage 5<sup>ième</sup> année ingénieur ENSAM-Master 2. Encadrants : Gril J. (50%) **Jullien D.** (50%)

## Références :

- Bousvarou M., Stépanoff P. (2018) “Un panneau mouvant, la Sainte Trinité couronnant la Vierge”, Dans le Secret des œuvres d’art, campagnes de restauration au musée Fabre, exhibition catalogue, Montpellier, musée Fabre, 24 March - 2 September 2018, Gand, Snoeck, 2018, pp. 22-39.
- Jaunard D. (2012) Rapport d’intervention de Conservation-Restauration présentée à l’agglomération de Montpellier – Musée Fabre. Œuvres de l’évêché de Montpellier : *Le couronnement de Sainte Agnès entourée des scènes de sa vie*.
- Colmars J. (2011) Hygromécanique du matériau bois appliqué à la conservation du patrimoine culturel : étude sur la courbure des panneaux peints. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, Directeur : Gril J., 18.04.11
- Dureisseix D., Colmars J., Baldit A., Morestin F., H. Maigre (2011) Follow-up of a panel restoration procedure through image correlation and finite element modeling. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 1024–1033.
- Gérard J., Guibal D. Paradis S., Vernay M., Beauchêne J., Brancheriau L., Thibaut A., (2011) Tropix 7. CIRAD. <https://doi.org/10.18167/74726F706978>
- Dureisseix D., Marcon B., Colmars J., Gril J. (2009) Étude sur la conservation préventive des panneaux de bois peints. Étude menée pour le LRMH <hal-00796829>.
- Dureisseix D., Gril J., Arnould O. (2006) Mechanical modeling of the activity of the flexible frame. In: Mohen, J.P., Menu, M., Mottin, B. (Eds.), *Mona Lisa, inside the painting*. Abrams, New York (Chapter II.6).
- Perré, P., Rémond, R. et Gril, J. (2004), extrait de "Au coeur de la Joconde", Chapitre II.6 Un panneau de peuplier.

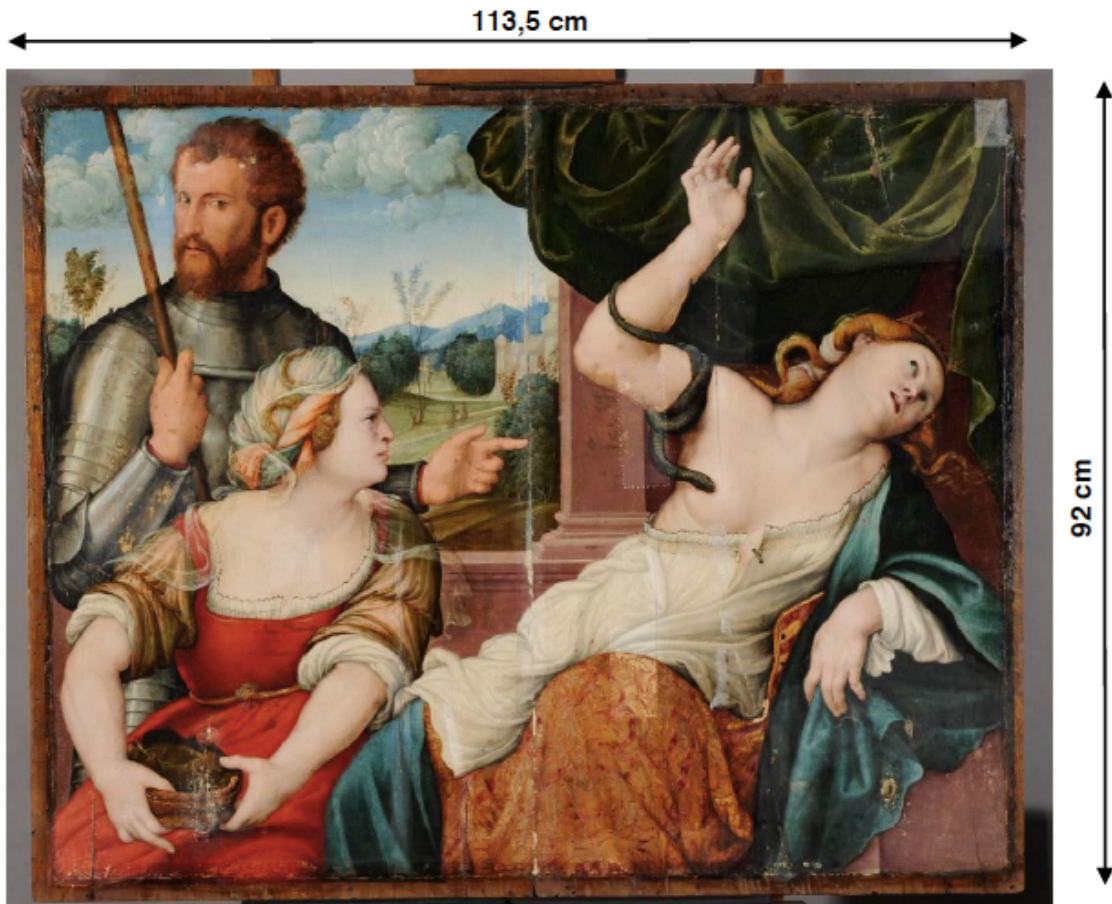
- Brandao A., Perré P. (1996) The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods. 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Québec.
- Hoadley, R. B. (1995) "Chemical and physical properties of wood, in Part 1 : wood science and technology", "The structural conservation of panel paintings", 24–28 April 1995 J. Paul Getty Museum, Los Angeles, U.S, p.2-20.
- Guitard D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues Editions.
- <https://lejournal.cnrs.fr/diaporamas/les-oeuvres-a-lepreuve-des-musees>

## 4 Étude sur échantillons et répliques

L'étude sur échantillons et répliques est fortement liée à celles du paragraphe précédent, concernant les panneaux peints, j'ai néanmoins choisi de la présenter à part, car la démarche scientifique me semble assez différente, dans la mesure où il s'agit d'élaborer des tests en laboratoire, contrôlés, et non pas de relever uniquement des informations sur une œuvre à l'accès limité. La première partie de ce chapitre concerne le travail de Jonathan Graindorge Lamour [106] qui a mis en place une série d'échantillons à étudier, visant à reproduire soit la situation observée dans *La mort de Cléopâtre*, soit de nouvelles situations envisageables pour la restauration de l'œuvre. Elle comprend néanmoins un paragraphe (4.1.5) concernant l'opération restauration de l'œuvre et son suivi. La deuxième partie concerne le travail de thèse de Cécilia Gauvin [103] qui ne cherche pas à reproduire un panneau particulier, mais plutôt un ensemble de situations qui pourraient être rencontrées.

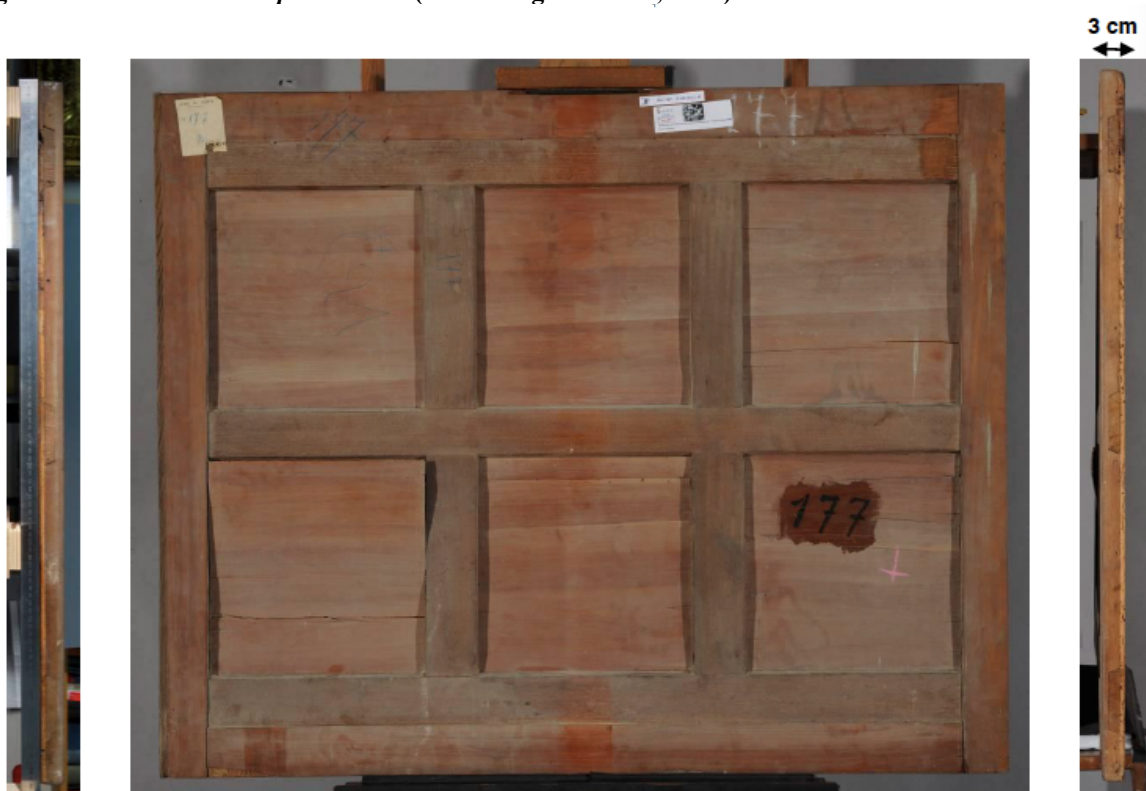
### 4.1 Etude comparative de doublages pour le choix d'une restauration de support et suivi de restauration

*La mort de Cléopâtre*, Girolamo Marchesi Da Cotignola, XVI<sup>e</sup> siècle, Musée Baron Gérard, Bayeux, hauteur 93 cm, largeur 113,5 cm est l'objet d'étude de Jonathan Graindorge Lamour en vue d'obtenir son diplôme de restaurateur du patrimoine de l'INP (Figure 69, Figure 70) [106]. Les travaux reportés ici nous ont permis d'aborder de nombreuses problématiques liées au panneau peint.



© G. Vanneste / Inp

Figure 69 : *La mort de Cléopâtre* – face (Graindorge Lamour, 2012)



© G. Vanneste / Inp

Figure 70 : *La mort de Cléopâtre* - chant senestre, revers, chant dextre (de gauche à droite) [106]

#### 4.1.1 État structural de l'œuvre – Démarche adoptée

Le support de l'œuvre est de construction complexe et inhabituelle (Figure 71). Le panneau est constitué de deux planches de peuplier (*populus sp.*) débitées sur dosse, collées à plat joint, orientées verticalement. A l'origine, leur épaisseur était probablement de 20 mm, deux traverses réparties sur la hauteur ont été plaquées au dos et clouées.

L'œuvre a subi un amincissement drastique, opération courante au XIXe siècle pour pallier à des problèmes structurels et généralement suivie de la pose d'un renfort dans le but de la maintenir plane. L'épaisseur du panneau n'est plus que de 6 mm. Le renfort recouvre entièrement le revers du panneau, il est constitué d'un assemblage de pièces de bois massif en châtaignier, d'épaisseur 20 mm dont la surface est recouverte en partie de placage de poirier d'épaisseur 9 mm. Les éléments sont collés au panneau aminci, à l'exception des traverses qui ont un profil en queue d'aronde, et sont maintenues entre les panneaux de doublage et bloquées aux extrémités par les montants latéraux qui les recouvrent. Jonathan désignera ce système original de « parquet à doublage » faisant référence aux 2 fonctions remplies par ce renfort.

Le panneau présente de nombreuses fentes traversantes, en majorité rectilignes et verticales, et correspondent aux lignes de construction du parquet à doublage. Le parquet à doublage réagit aux variations d'humidité et sollicite le panneau aminci jusqu'à rupture. Jonathan envisage donc de retirer le parquetage pour le remplacer par un autre renfort et/ou doublage moins contraignant.

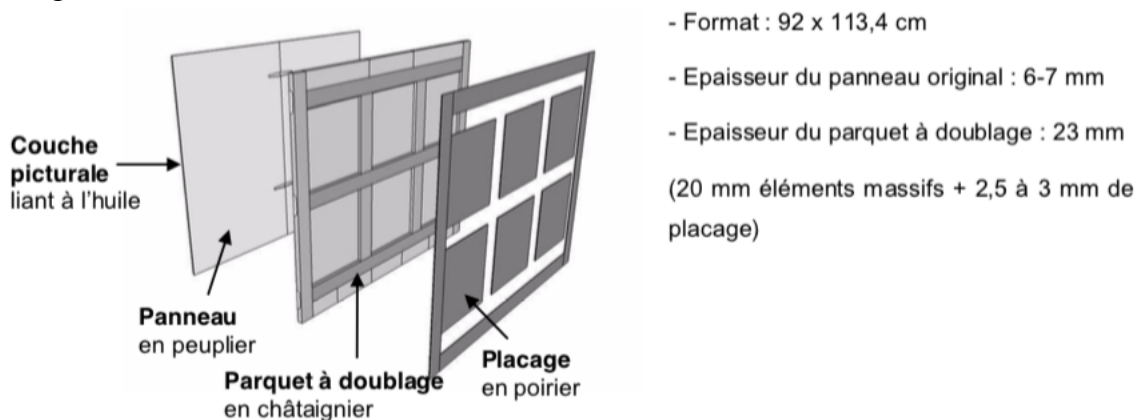


Figure 71 : Description du panneau *La mort de Cléopâtre*, une structure complexe [106]

Pour orienter sa démarche, Jonathan a mené une étude scientifique qui consiste à comparer l'effet de différents doublages sur un panneau, lors de variations hygrothermiques. Il a pour cela élaboré une série d'échantillons constitués de panneaux de peuplier de 6 mm d'épaisseur, peints sur une face, et doublés de différents éléments sur l'autre face (Figure 73, et Figure 74) :

- un élément de châtaignier débité sur quartier et collé perpendiculairement au fil du peuplier, représentatif des traverses, épaisseur 20 mm
- des éléments de châtaignier débités sur dosse et collés dans le sens du fil du panneau, représentatif des montants et panneaux du doublage, épaisseur 20 mm
- un élément en contreplaqué de balsa collé à la cire-résine, épaisseur 16 mm
- un élément en balsa de fil collé à la colle de poisson, épaisseur 10 mm
- un élément en balsa de fil collé à la colle de poisson, épaisseur 20 mm
- un panneau est gardé sans renfort pour comparaison

Les échantillons ont été exposés à 18 cycles de 48h à 25°C : 16h à 40% HR, 32h à 80% HR, pour étudier l'influence de variations hygrothermiques drastiques, avec 3 répétitions pour chaque type d'échantillons.

Des champs de déformations sont évalués sur la section latérale d'un échantillon de chaque type, à différentes étapes du traitement, par corrélation d'images, à l'aide du logiciel Vic-2D.

L'échantillon est également pesé en parallèle, pour corrélérer teneur en eau et déformations. Des jauges sont collées sur une autre série d'échantillons jumeaux pour suivre les déformations du panneau et des renforts en continu (Figure 75). A la suite des traitements, le renfort sera désolidarisé du panneau pour mesurer les déformations dues aux contraintes résiduelles bloquées dans le panneau.

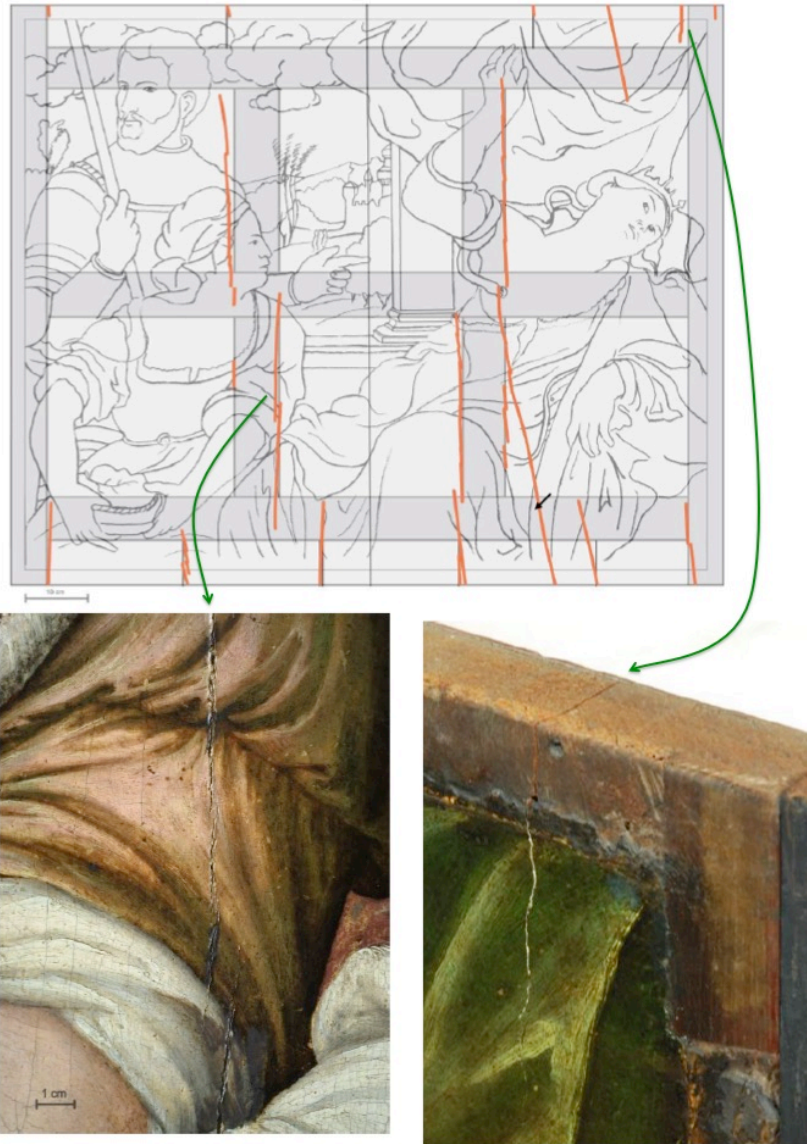


Figure 72 : Relevé des fentes (en haut, orange) et schéma du parquet à doublage (en haut, grisé) de *La mort de Cléopâtre* et détail de fentes anciennes (en bas à gauche) et plus récente (en bas à droite) [106]

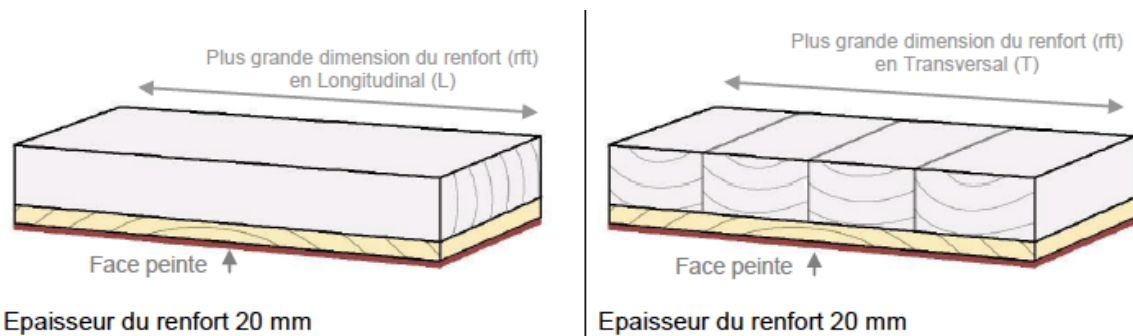


Figure 73 : Échantillons de peuplier peint et doublé de châtaignier représentatif des traverses (à gauche) ou des montants et panneaux de doublage (à droite) [106]

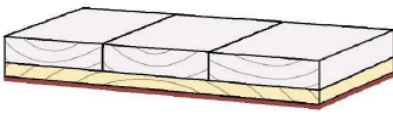
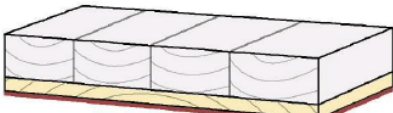
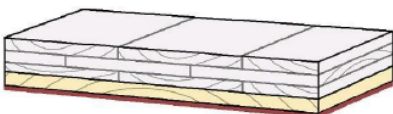

Nomenclature	Configuration : Panneau + renfort	Composition du doublage
Panneau + doublage en balsa (T) 10 mm		- Balsa - débit sur dosse - 10 mm d'épaisseur - 1 bloc formé de trois éléments - colle animale
Panneau + doublage en balsa (T) 20 mm		- Balsa - débit sur dosse - 20 mm d'épaisseur - 1 planche formée de quatre éléments - colle animale
Panneau + doublage en balsa (CP 3 plis) 16 mm		- Balsa - débit sur dosse - 16 mm d'épaisseur : 3 plis croisés de 5 mm d'épaisseur (CP 3 plis) - cire-résine
Panneau sans renfort		X

Figure 74 : Échantillons de peuplier peint et doublé de différents renforts de balsa [106]



© Graindorge Lamour - Inp

Figure 75 : Échantillons munis de jauges de déformation : 2 sur le renfort, 2 sur le panneau, 1 (non visible) sur chaque face peinte, 1 (non visible) sur la face non peinte du panneau sans renfort [106]

#### 4.1.2 Analyse du rôle des renforts présents (renforts châtaignier)

La Figure 76 permet de comparer les déformations de la couche peinte d'un panneau sans renfort avec celles de panneaux doublés de châtaignier orienté longitudinal ou transverse, au cours des variations hygrothermiques. Les retraits de la couche picturale du panneau sans renfort sont nettement plus importants que les gonflements, surtout lors des premiers cycles

hygrothermiques. Le renfort longitudinal limite très fortement les déformations de la couche peinte, alors que le renfort transverse, subissant lui aussi de larges déformations hygroscopiques, amplifie fortement les tensions.

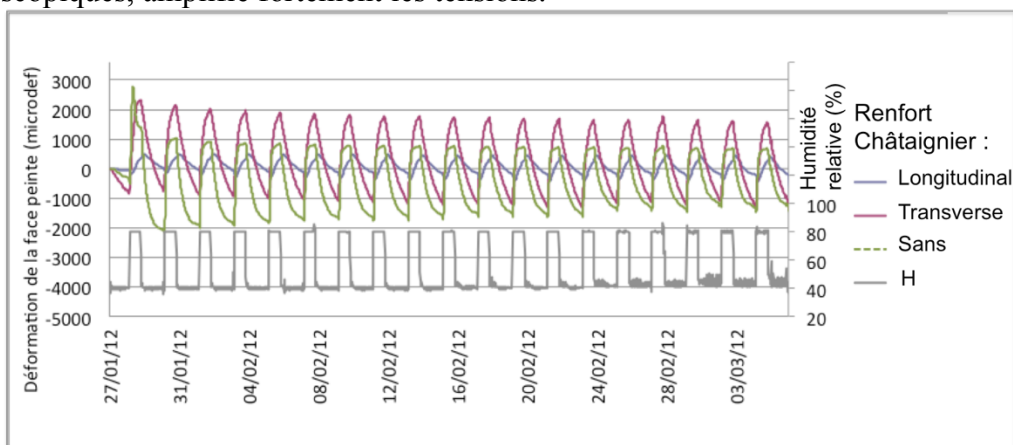


Figure 76 : Déformations (en microdéformations) de la face peinte au cours des cycles d'humidité (gris, échelle de droite) dans le cas des renforts de châtaignier longitudinal (bleu) et transverse (rouge), et le cas sans renfort (vert).

La courbure est un paramètre important pour la lisibilité d'une œuvre. On l'évalue par  $\frac{\varepsilon^+ - \varepsilon^-}{h}$ ,  $\varepsilon^+$  et  $\varepsilon^-$  étant les déformations de la face et du revers de l'échantillon, et h son épaisseur. La Figure 77 montre que la courbure du panneau sans renfort est de 3 à 5 fois plus forte qu'avec renfort. Seul le panneau sans renfort semble stabiliser sa courbure à chaque palier. Les renforts limitent les mouvements et jouent de surcroît un rôle de barrière hydrique. Le bois des couches *externes* des renforts est donc beaucoup plus sollicité *hydriquement* que celui des couches *internes*. Le chargement hydrique est complexe, et reflète la réalité des chargements hydriques des panneaux peints au cours des décennies.

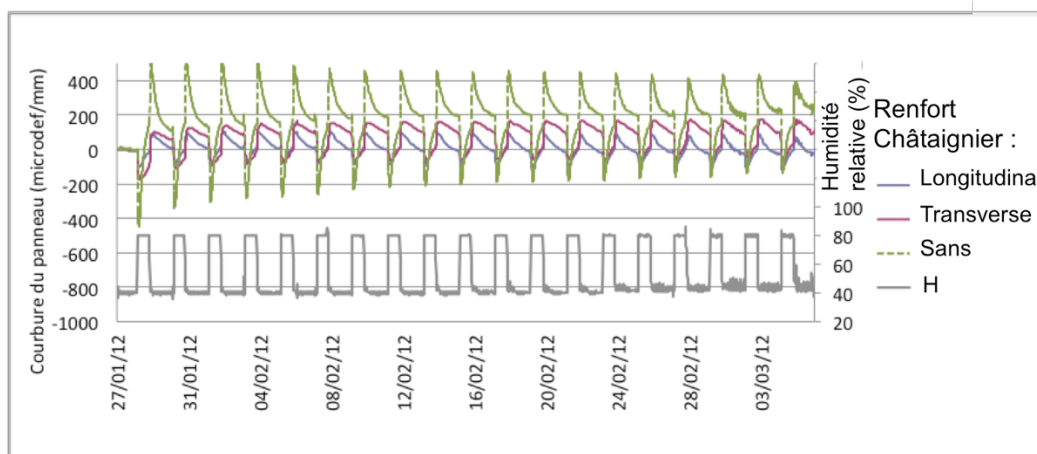


Figure 77 : Courbure (en microdéformations/mm) du panneau, calculé à partir des 2 jauges collées dans l'épaisseur du panneau, au cours des cycles d'humidité (gris, échelle de droite) dans le cas de renfort de châtaignier longitudinal (bleu), transverse (rouge), et sans renfort (vert).

La Figure 78 compare les déformations de la couche picturale à la fin des phases « sèches », et après prélèvement des renforts. L'échantillon sans renfort subit un retrait très fort lors du premier cycle, qui s'atténue au cours des cycles suivants, tandis qu'un retrait progressif apparaît pour les échantillons avec renfort. A la suite du prélèvement du renfort longitudinal, la couche peinte subit un retrait très important, mettant en avant la forte tension exercée par le renfort, un retrait différé supplémentaire s'est exprimé 2 jours plus tard.

Ces fortes tensions exercées par un renfort très rigide sont à l'origine des fissures des panneaux. Si l'on considère que le panneau de peuplier a une rigidité transverse de 500 MPa, cette déformation correspond à une tension de près de 2 MPa, de l'ordre de grandeur de la limite en traction du matériau dans cette direction.

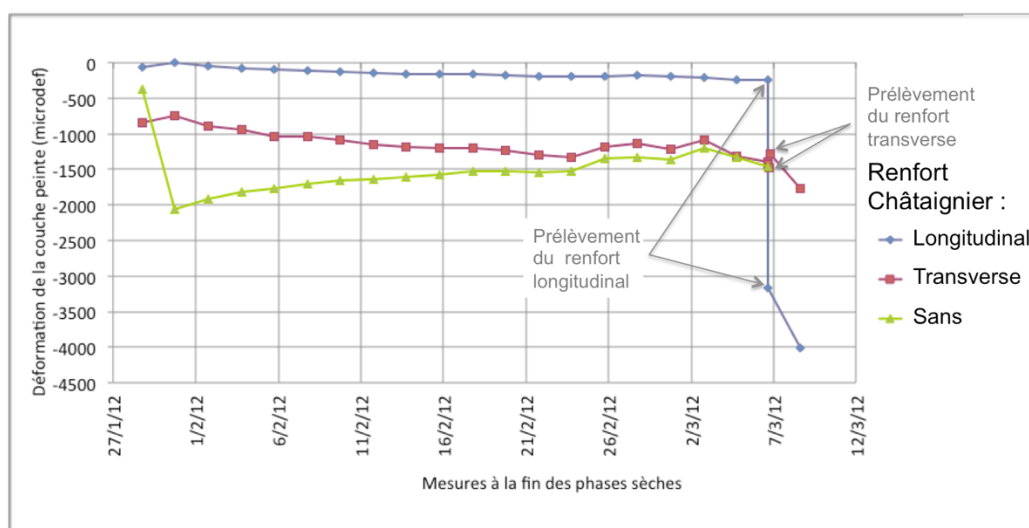


Figure 78 : Déformation de la couche peinte à la fin des phases sèches, après le prélèvement du renfort, et 2 jours plus tard

#### 4.1.3 Comportement des doublages balsa

##### 4.1.3.1 Cinétique d'adsorption d'eau des doublages et/ou peintures

Afin d'estimer la capacité des doublages balsa à ralentir les échanges hydriques, des échantillons de peuplier seul ou doublés sont isolés hydriquement par un ruban adhésif d'aluminium sur 5 faces, puis pesés lors de leur passage d'un environnement de 50% à 80% HR, pendant une semaine. La variation de masse des échantillons a mis en avant les différences de cinétique d'absorption entre le peuplier et le balsa, ainsi que l'effet de frein hydrique joué par la cire-résine contenue dans le contre-plaqué 3 plis balsa. Le contre-plaqué balsa limite davantage les échanges hydriques que la peinture à l'huile. Cependant, la peinture à la caséine utilisée dans les échantillons de notre étude limite les échanges de façon nettement moins prononcée que la peinture à l'huile. La couche picturale de *La mort de Cléopâtre* a sans doute des propriétés intermédiaires entre ces deux peintures.

##### 4.1.3.2 Perte en eau des échantillons au cours des cycles

La masse des échantillons de panneau seul ou doublé a été mesurée à l'issue des premiers cycles d'humidité, toujours en fin de période « sèche ». La Figure 79 montre que dans tous les cas, les échantillons perdent une certaine quantité d'eau au cours des cycles, bien que les mesures soient faites pour le même environnement (40%RH). Les échanges d'eau avec l'environnement sont plus importants dans le cas du renfort châtaignier transverse, car il présente une plus grande surface d'échange transverse, pour laquelle les vitesses de diffusion sont nettement plus élevées. La perte de masse de l'échantillon doublé de contre-plaqué balsa est très faible : les échanges hydriques de ce dernier avec l'environnement sont très lents.



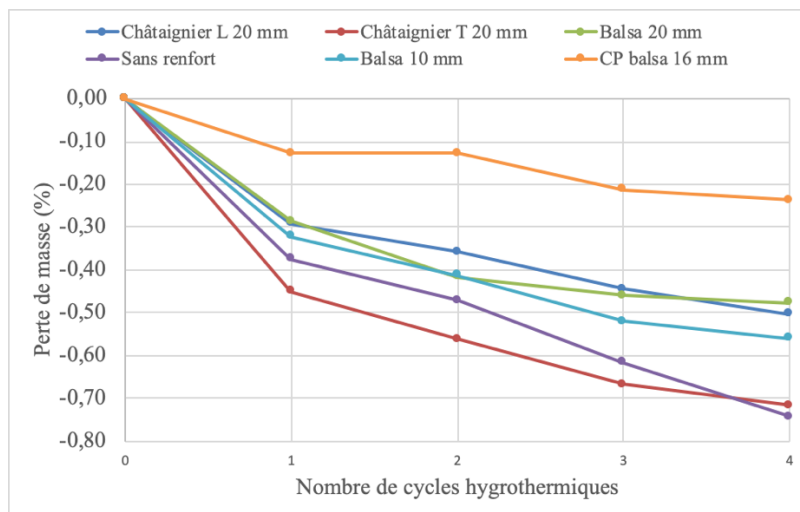


Figure 79 : Perte de masse des échantillons pesés après chacun des 4 premiers cycles, en fin de phase à 40%RH, en % de masse initiale.

#### 4.1.3.3 Déformations des échantillons doublés de balsa

La Figure 80 présente les déformations de la couche picturale des échantillons avec renforts balsa au cours des cycles, en comparaison avec l'échantillon sans renfort.

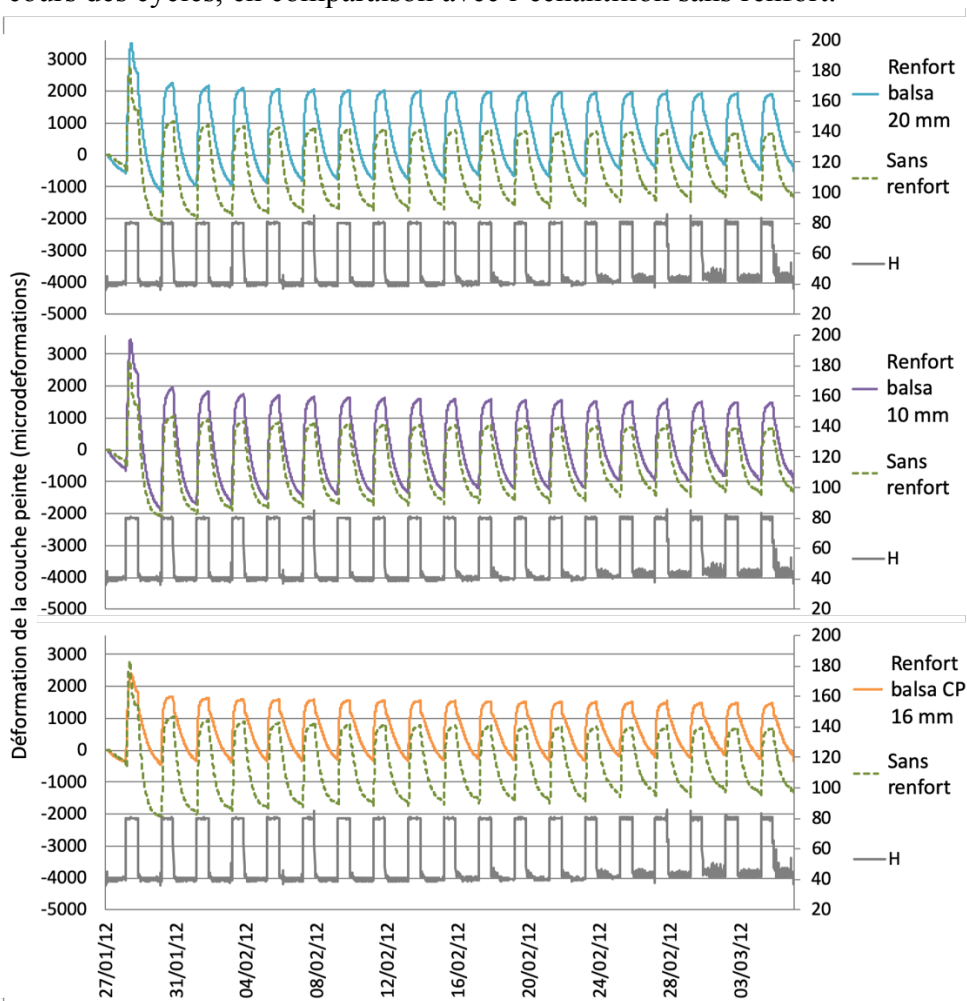


Figure 80 : Déformations de la couche peinte des échantillons avec renfort balsa au cours des cycles, comparées au panneau sans renfort.

Lors de la phase d'humidification, les échantillons avec renfort ont des déformations toujours plus fortes que le panneau seul, le panneau étant systématiquement mis en tension par le renfort, phénomène même amplifié par le fait que le panneau renforcé a sans doute un plus faible taux d'humidité que le panneau seul car le renfort joue aussi un rôle de barrière hydrique.

Lors des phases sèches, le renfort de 10 mm contraint peu le panneau, tandis que celui de 20 mm, plus rigide, impose ses mouvements au panneau, et limite fortement le retrait de celui-ci, qui se retrouve à nouveau en tension. Dans le cas du contreplaqué, le phénomène est similaire, avec des tensions encore plus fortes, car le contre-plaqué varie peu avec l'environnement ambiant.

Ces courbes mettent en exergue toute la complexité du comportement des panneaux avec renforts : un renfort peu rigide apporte une certaine rigidité au panneau, mais ne limite pas ses déformations lors des variations d'humidité ; un renfort plus épais, donc plus rigide, impose ses mouvements au panneau, mais réagit aussi aux variations d'humidité ; quant au renfort contreplaqué, très rigide et peu réactif aux variations d'humidité, il limite les déformations mais impose de fortes tensions au panneau, risquant alors de le fragiliser voire de l'endommager.

Ces comportements sont complexes car ils allient rigidité du matériau et de la structure (épaisseur et orientation du panneau et des renforts), effet de barrière hydrique, vitesse de diffusion de l'eau, coefficients de retrait/gonflement. De plus, les réponses dépendent également du type et des durées de sollicitations hydriques : le panneau, le renfort, ont-ils atteint leur équilibre hygroscopique ? Si non, comment l'eau est-elle répartie dans le panneau ? dans le renfort ?

#### 4.1.4 Comparaison de l'ensemble des doublages

##### 4.1.4.1 Déformations des faces peintes

Le Tableau 5 rassemble les déformations mesurées par les jauges positionnées sur la face peinte des différents échantillons, à différentes étapes du protocole. L'état initial de la face peinte est différent d'un échantillon à l'autre, présentant généralement un fort retrait, dû à une première phase de « stabilisation » de 24h à 40% RH avant de démarrer la première période à 80% RH.

	Sans renfort	Renfort châtaignier transverse	Renfort châtaignier longitudinal	Renfort Balsa 20mm	Renfort Balsa 10mm	Renfort contreplaqué Balsa
État initial 25°C, 40%RH	-367	-841	-67	-589	-632	-387
Après 18 cycles 25°C, 40%RH	-1332	-1470	-241	-731	-1406	-778
Après prélèvement du renfort 25°C, 40%RH		-1287	-3170	-308	-516	-1067
Deux jours plus tard 25°C, 40%RH	-1400	-1772	-4007	-135	-285	-544

**Tableau 5 : Déformations ( $\mu\epsilon$ ) relevées sur les faces peintes des échantillons à différentes étapes**

A la suite des 18 cycles d'humidité, un retrait supplémentaire est observé dans tous les cas, maximum pour l'échantillon sans renfort (incrément de  $-965\mu\epsilon$ ), plutôt élevé dans le cas des renforts balsa 10 mm (incrément de  $-774\mu\epsilon$ ) et châtaignier transverse (incrément de  $-629\mu\epsilon$ ). Il s'agit des renforts qui subissent les plus grandes variations dimensionnelles durant les cycles d'humidité.

Après prélèvement des renforts, 2 échantillons voient leur retrait fortement diminuer pour devenir plus faible que dans l'état initial (cas des renforts balsa 20mm et 10mm), faiblement diminuer (cas du renfort châtaignier transverse) ou augmenter fortement (cas du renfort châtaignier longitudinal, le plus spectaculaire, et contreplaqué balsa, dans une moindre mesure). Ces 2 derniers renforts, qui limitent grandement les déformations du panneau pendant les cycles d'humidité, exercent une forte tension sur celui-ci, mise en évidence par le fort retrait de l'échantillon constaté suite à leur prélèvement. On retrouve ici l'effet classique de traverses longitudinales collées au dos de planches transverses (Cas de *La Sainte Trinité* décrit 3.6) qui mettent en forte tension l'échantillon dont les déformations ont été empêchées pendant les variations d'humidité.

Ces mesures montrent clairement la mise en tension des panneaux par les renforts très rigides collés au dos lors de variations d'humidité. Elles justifient tout à fait les opérations de déparquetage qui deviennent fréquentes dans les pratiques de restaurations actuelles.

#### 4.1.4.2 Déformations mesurées dans l'épaisseur des échantillons à la suite des cycles par corrélation d'images

La méthode de corrélation d'image est utilisée pour évaluer les champs de déformations dans les éprouvettes à différentes étapes du traitement. Pour cela, les échantillons recouverts d'un mouchetis sont sortis de l'enceinte après chaque cycle hygrothermique, une image est prise à l'état hydrique sec (40%RH) et comparée à l'image de référence initiale dans le même état (Figure 81).

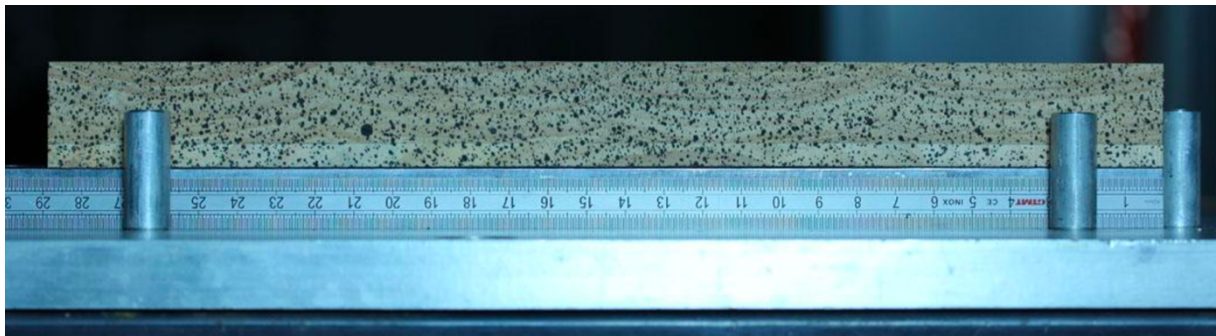


Figure 81 : Section d'un échantillon recouvert d'un mouchetis permettant d'évaluer les déformations à chaque étape du traitement par corrélation d'images [106]

La Figure 82 est une cartographie des déformations du panneau avec renfort transverse après 10 cycles hygrothermiques (renfort situé au-dessus du panneau), après traitement des images à l'aide du logiciel Vic-2D®. Le retrait tangentiel est de l'ordre de -0,2 à -0,5%, plus important sur la face libre du renfort, qui entraîne donc une légère courbure de l'ensemble. Des fentes apparaissent dans le renfort, qui d'une part risquent de se propager jusqu'au panneau, d'autre part facilitent les entrées d'eau et induisent des différences d'exposition aux échanges hydriques.

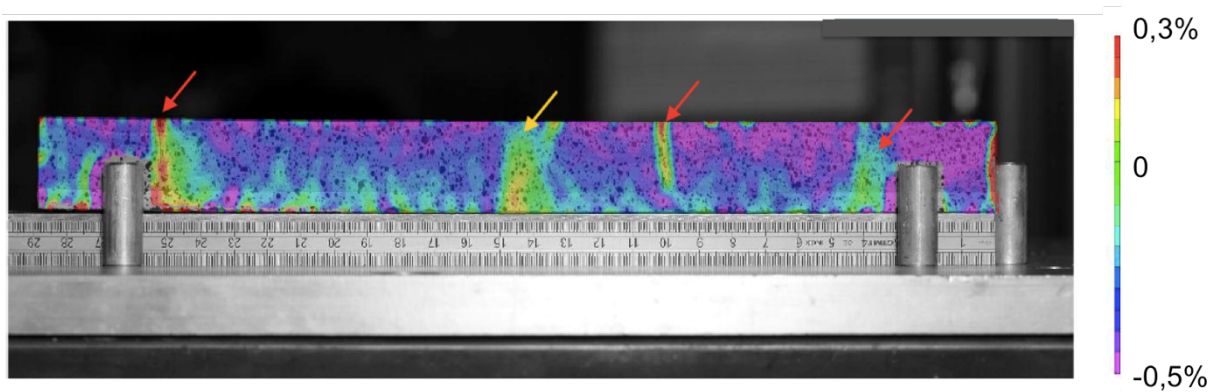


Figure 82 : Déformations *horizontales* de l'échantillon doublé de châtaignier transverse, après 10 cycles d'humidité. Retrait tangentiel de l'ordre de -0,2 à -0,5%. Fentes dans le renfort (flèches rouges) joint entre deux éléments de renfort (flèche jaune) [106]

La Figure 83 permet de comparer l'état de déformation du panneau sans renfort ou avec les différents renforts en balsa à l'issue des 10 cycles. Dans tous les cas, les déformations dans le panneau (zone sur fond jaune) sont négatives, le retrait de la face peinte ( $y=0$ ) est de l'ordre de -0,16% pour le panneau seul, et de -0,24% pour les panneaux avec renforts : les renforts ne limitent donc pas les déformations permanentes de la face peinte observées à l'issue des 10 cycles hygrothermiques, mais ils limitent parfois les déformations pendant les cycles. La rupture de pente observée pour le renfort 3 plis balsa (entouré en rouge Figure 82) montre que le dernier pli de balsa n'est plus solidaire du 2<sup>ième</sup> pli. La colle a cédé sous le chargement en cisaillement.

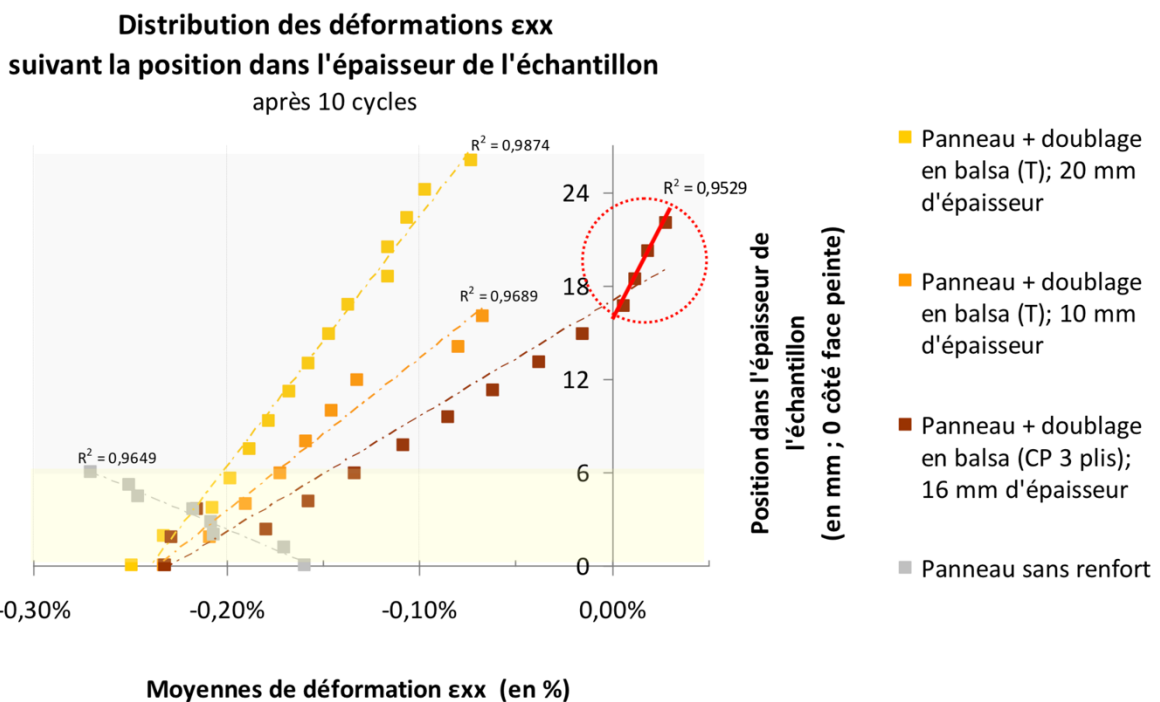


Figure 83 : Déformations moyennes en fonction de la position dans l'épaisseur de l'échantillon [106]

Le panneau de peuplier étant toujours situé en dessous du renfort pour la prise d'image, une pente positive de la droite obtenue Figure 83 correspond à une courbure positive, convexe par rapport à la face peinte, alors qu'une pente négative correspond à une courbure négative, concave (Figure 84).

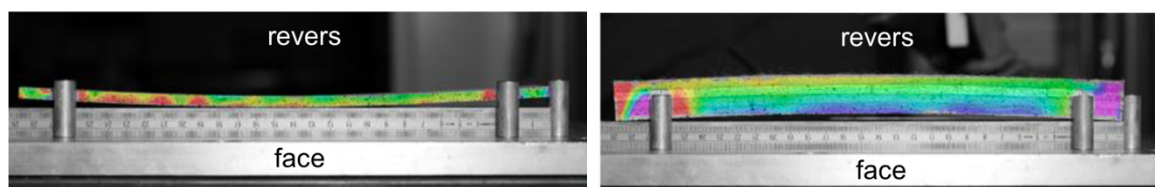


Figure 84 : Exemple de courbure convexe (à gauche, panneau seul) et concave (à droite, panneau avec renfort) par rapport à la face [106]

Le panneau sans renfort présente une courbure convexe correspondant à une flèche de 2,1 mm (Tableau 6), tandis que les panneaux avec renfort présentent des courbures concaves correspondant à des flèches variant de -0,7 mm (renfort balsa 20 mm) à -1,3\* mm (renfort balsa 3 plis). Dans le cas de ce dernier, le calcul de la flèche et de la courbure n'a plus vraiment de sens, car la rupture du renfort empêche de considérer la courbure globale de l'échantillon. Dans tous les cas, la rigidité des renforts limite la courbure finale, et maintient une courbure concave en « phase sèche ».

	$h$ (mm)	$\varepsilon^+$ (%) face	$\varepsilon^-$ (%) revers	$f$ (mm)	$C$ ( $m^{-1}$ )
Panneau seul	6	-0,16	-0,28	2,1	0,20
Renfort Balsa 10 mm	16	-0,24	-0,08	-1,0	-0,10
Renfort Balsa 20 mm	26	-0,25	-0,08	-0,7	-0,06
Renfort 3 plis	22	-0,24	0,03	-1,3*	-0,12*

Tableau 6 : Valeurs des flèches  $f$  et courbures  $C$  du panneau seul et avec différents renforts balsa estimées à partir des déformations de la Figure 83 (\* calcul faussé par la rupture du renfort)

#### 4.1.4.3 État mécanique des échantillons à la suite des cycles

Nous avons effectué des essais de flexion dans les deux configurations schématisées sur la Figure 85 : lorsque les 2 tests donnent le même module, on en conclut que les échantillons ne sont pas endommagés. Si l'on suppose que les fissures possibles sont perpendiculaires au panneau et renfort, le test P (à gauche) a tendance à ouvrir les éventuelles fissures du renfort, tandis que le test NP (à droite) a tendance à ouvrir les éventuelles fissures du panneau, ainsi :

- Si  $E_P > E_{NP}$  alors le panneau est fissuré
- Si  $E_P < E_{NP}$  alors le renfort est fissuré

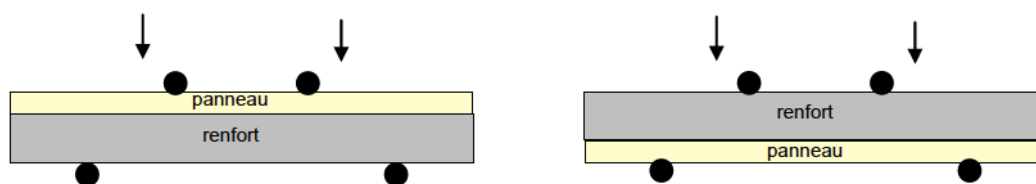


Figure 85 : Configurations d'essai pour évaluer le module E : face peinte (P) à gauche, face non-peinte (NP) à droite [106]

	Face sollicitée en compression	E (MPa)	Comparaison essais	Endommagement
Panneau sans renfort	Peinte Non peinte	497 497	Module du peuplier	Pas d'endommagement
Panneau + Renfort châtaignier (T) épaisseur 20 mm	Peinte Non peinte	148 97	$P \gg NP$	Panneau fissuré
Panneau + doublage balsa (T) épaisseur 20 mm	Peinte Non peinte	38 27	$P > NP$	Panneau fissuré
Panneau + doublage balsa (T) épaisseur 10 mm	Peinte Non peinte	56 58	$P = NP$	Pas d'endommagement

Panneau + doublage balsa (CP 3 plis) épaisseur 16 mm	Peinte Non peinte	73 145	P<<NP	Renfort fissuré
---	----------------------	-----------	-------	-----------------

**Tableau 7 : Modules de flexion [106]**

Les résultats du Tableau 7 montrent que seul le doublage en balsa de 10 mm d'épaisseur n'a pas provoqué de fissuration du panneau : ce dernier a pu se déformer relativement librement. Dans le cas de renfort en balsa ou en châtaignier de 20 mm, les renforts étaient suffisamment rigides pour provoquer la fissuration du panneau lors des cycles d'humidité. Quant au doublage en balsa 3 plis, il s'est fissuré, probablement à cause de sa construction en multiples blocs dont les joints, collés à la cire-résine, sont autant de points de rupture possibles.

Ce double essai de flexion de l'ensemble « panneau+renfort » est un moyen intéressant d'évaluer l'éventuelle perte de rigidité d'un panneau due à l'ouverture de ses fissures. Nous avons pu le mettre en œuvre dans le cas du panneau *La Sainte Trinité* (paragraphe 3.6).

Il faut noter que les cycles d'humidité subis par ces échantillons sont drastiques et ne reflètent pas la réalité des variations subies par un panneau du patrimoine. Ils permettent néanmoins de comparer l'effet des différents renforts.

#### 4.1.5 Restauration du panneau

Ces tests ont mis en évidence la déformation permanente qui apparaît dans tous les panneaux suite aux cycles hygrothermiques. Ils ont montré à quel point des renforts très rigides comme le châtaignier longitudinal contraignaient les panneaux en empêchant ses déformations hygrothermiques, et pouvaient mener ainsi à son endommagement. Des renforts moins rigides tels que ceux en châtaignier transverse ont l'inconvénient de se déformer largement lors de variations d'humidité, et d'entraîner ainsi la déformation du panneau. Le renfort contre-plaqué balsa joue un fort rôle d'isolant hydrique, pouvant mener à une courbure concave de la face peinte gênante. De plus, les joints du contreplaqué, sollicités en traction/compression de façon répétée, peuvent se rompre entraînant alors une baisse drastique de la rigidité du renfort, et un chemin d'accès de l'eau facilité au revers du panneau. Les renforts massiques de balsa ont l'avantage d'avoir des coefficients de retrait/gonflement plus faibles (comparés au châtaignier), il faut cependant veiller à dimensionner un renfort suffisamment épais pour qu'il soit assez rigide au regard de la rigidité du panneau à renforcer.

Suite à cette étude, le « parquet à doublage » châtaignier de *La mort de Cléopâtre* a été éliminé suivant le protocole détaillé en images Figure 86, puis remplacé par un renfort massif de balsa de 15 mm d'épaisseur par Jonathan, dans le but de créer « une seconde peau » pour soutenir le panneau original, tout en n'opposant qu'une faible résistance mécanique au panneau qui tend à se courber.



**Figure 86 : Restauration : a) Après élimination des placages, incision entre les traverses b) Incisions dans le renfort arrêtées à 2mm du panneau c-f) enlèvement de matière à l'aide d'une gouge g-h) Positionnement de jauges de déformations i) Mise en place du doublage balsa**

Des jauges de déformation ont été disposées sur la face et le revers du panneau et sur la traverse à déposer afin d'observer la réaction de l'un et de l'autre durant l'acte de restauration. La Figure 87 présente la déformation centrale moyenne et la courbure des 2 planches constitutives du panneau à chaque étape de la dépose : la dépose de la traverse induit une déformation relative de l'ordre de  $-420$  et  $-250 \mu\epsilon$  pour les planches dextre et senestre respectivement ; ces planches étaient donc mises en tension par la traverse, tension de l'ordre de  $0,21$  et  $0,13$  MPa respectivement, si l'on considère un module transverse du peuplier égal à  $500$  MPa et que l'on néglige la déformation de la traverse.

Ces déformations sont dix fois plus faibles que celles mesurées sur nos échantillons lors du retrait du renfort longitudinal en châtaignier (Figure 78). Cette différence d'ordre de grandeur est due au fait que, d'une part, les renforts de nos échantillons recouvraient la totalité de la surface du panneau de peuplier, alors que ces traverses ne recouvrent qu'une petite surface du panneau, d'autre part les 18 cycles hygrothermiques subis par nos échantillons sont nettement plus sévères que les variations réelles subies par le panneau du patrimoine.

Suite au retrait de la traverse, la planche senestre présente une légère courbure concave ( $-0,02 \text{ m}^{-1}$ ), tandis que la planche dextre présente une plus forte courbure convexe ( $0,08 \text{ m}^{-1}$ ) par rapport à la face. Ces déformations et courbures sont mesurées juste après le dépôt de la traverse, puis le lendemain. On constate une relaxation de ces déformations bloquées au cours du temps, qui se poursuit sans doute les jours suivants.

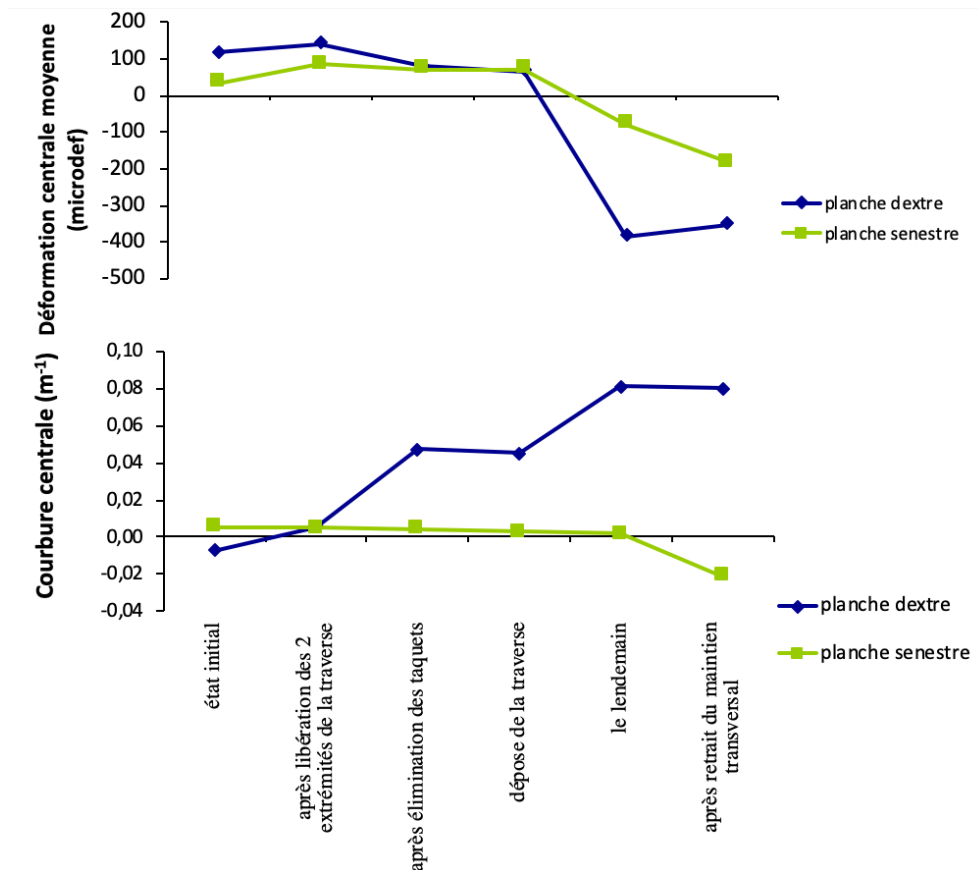


Figure 87 : Déformations moyennes et courbures estimées à l'aide de jauges collées sur les 2 planches du panneau lors de la dépose de la traverse.

#### 4.1.6 Conclusions

Cette étude a été menée en étroite collaboration avec les acteurs de la restauration du patrimoine. Nous avons pu à cette occasion confronter nos démarches et les combiner pour mettre en avant et chiffrer les phénomènes de déformations induites dans les panneaux du patrimoine par différents types de renfort, en lien avec les variations hygrothermiques auxquelles ils sont soumis. A partir de l'observation du panneau peint considéré, nous avons élaboré ensemble un protocole expérimental, adapté au cas du panneau, et mené cette étude comparative. Les résultats obtenus ne reflètent pas totalement le cas du panneau considéré, mais permettent de prendre une décision sur le choix de l'acte de restauration à effectuer.

Un constat d'état effectué en mai 2018 sur cette œuvre fait mention d'une bonne adhésion de la couche picturale au support et d'une bonne adhésion du doublage au panneau original. La tendance du panneau à se courber suite à la mise en place du doublage balsa s'est confirmée et même légèrement amplifiée avec les années. L'œuvre est maintenue dans son cadre (Figure 88) par une butée centrale doublée de mousse de polyéthylène (A) et des pattes en contreplaqué de bouleau souple sur les côtés (B) afin de laisser cette courbure s'exprimer sans dommage.



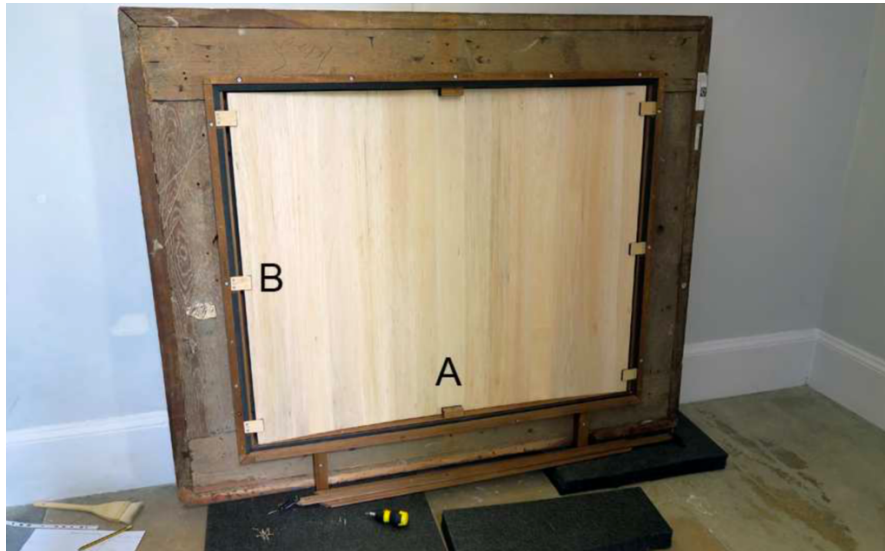


Figure 88 : Panneau *La mort de Cléopâtre* restauré maintenu dans son cadre : A butées centrales, B pattes latérales souples en contre-plaqué bouleau.

L'accueil de Jonathan Graindorge Lamour au LMGC lors de sa dernière année de formation nous a ouvert de nombreuses portes sur le monde de la restauration et nous a donné envie de poursuivre ce travail où se rencontrent artisans et scientifiques.

#### 4.2 Contribution de la structure multicouche d'un panneau

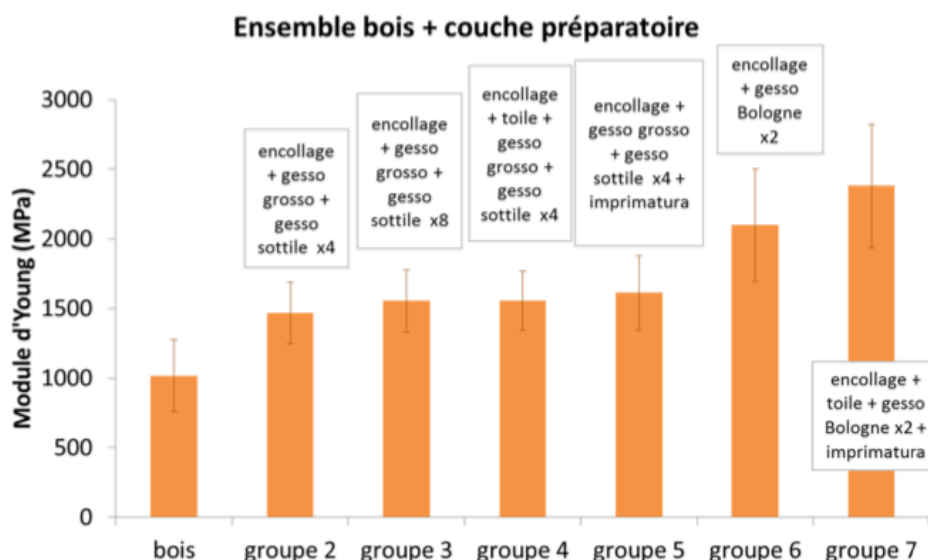
Dans le but de quantifier la contribution de la couche picturale et des couches de préparation sur le comportement global d'un panneau peint, nous avons mis en place des maquettes de panneau avec des revêtements issus de recettes obtenues dans la littérature. Ce travail a été effectué dans le cadre de la thèse de Cécilia Gauvin [103], lors d'une collaboration avec l'Institut Courtauld de Londres, par le biais du stage de fin d'étude de Alice Aurand [104].

Nous avons testé 6 compositions (Tableau 8) et comparé la rigidité des échantillons avec revêtement à celle du bois brut de peuplier (*Populus alba*) par la méthode du Bing® en flexion.

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, imprimatura au blanc de plomb	11.68
Groupe 6			Bologne★★	98%
Groupe 7	Encollage, toile, 2 couches de gesso et imprimatura au blanc de plomb	13.24		

Tableau 8 : Constitution des couches préparatoires testées [103](★ Cennini, 1899 ; \*\* Merrifield, 1967 ; PVC : Pigment Volume Concentration)

L'épaisseur des revêtements est de seulement quelques millimètres, pourtant la rigidité de l'échantillon passe de 1000 MPa à environ 1500 MPa pour les groupes 2 à 5, à 2000 MPa pour le groupe 6, et atteint même 2300 MPa pour le groupe 7 (Figure 89). Ces couches préparatoires jouent donc un rôle non négligeable dans le comportement de la structure « panneau peint ».



**Figure 89 : Rigidité des échantillons avec les différents revêtements obtenue par la méthode du Bing® en flexion**

Ces revêtements influencent fortement le comportement du panneau lors de variations d'humidité. Pour quantifier cet effet, nous avons observé le comportement de ces différents échantillons lors d'une variation d'humidité relative de 55% à 34%RH : pour tous les échantillons avec revêtement, une courbure positive apparaît, convexe par rapport à la face peinte, caractérisée par une flèche centrale allant de 0,15 mm pour le groupe 4, à 0,32 mm pour le groupe 6 (Figure 90). La face revêtue présente un retrait allant de -0,11% pour le groupe 4 à -0,025% pour le groupe 6, inversement proportionnel à la flèche observée, excepté pour le groupe 7, le plus rigide, qui ne présente pas de retrait. L'échantillon brut ne présente pas de courbure et son retrait est de l'ordre de -0,25%. Tous les revêtements empêchent partiellement le retrait de la face revêtue : leur coefficient de retrait est généralement bien plus faible que celui du bois dans la direction transverse ici mise en jeu, et par ailleurs ils retardent l'accès à l'eau du bois situé à leur proximité. Leur rigidité va leur permettre d'empêcher plus ou moins les retraites du bois.

Cette expérience montre clairement la complexité du rôle joué par ces couches préparatoires. Cette situation va de plus évoluer au cours du temps : les matériaux constitutifs vieillissent, leur état mécanique peut être altéré par les sollicitations (apparition de réseau de craquelures, fissures, ...), et donc leur contribution va également évoluer dans le temps.

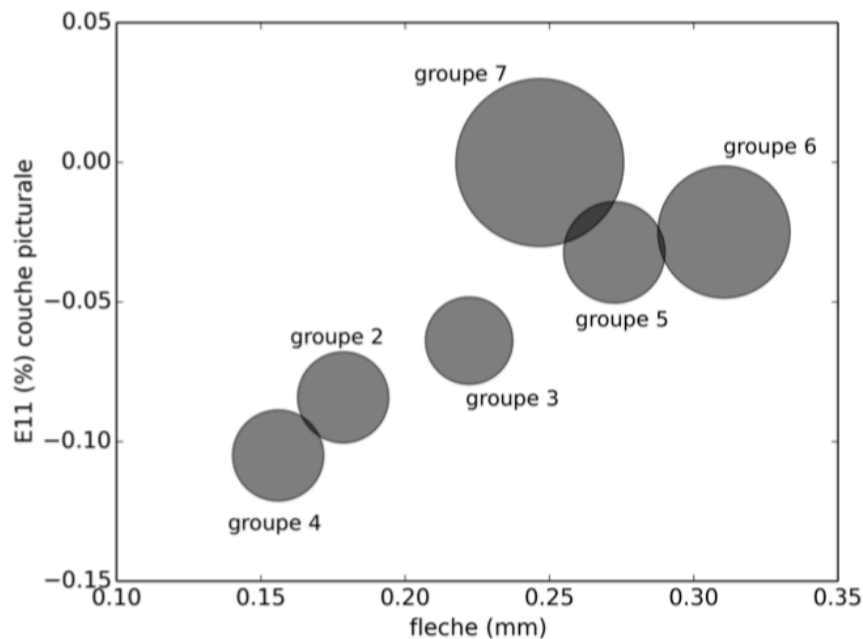


Figure 90 : Relation entre flèche centrale et déformation de la couche picturale lors d'une variation d'humidité relative de 55% à 34%. La taille des disques est proportionnelle à la rigidité des couches préparatoires [103]

Les échanges avec les restaurateurs peinture sont encore faibles et nécessitent d'être développés dans l'avenir. En effet, la peinture et les couches préparatoires jouent un rôle important dans le comportement d'un panneau peint : (i) un rôle de renfort mécanique - certaines préparations ont une rigidité non négligeable comparée au comportement transverse du bois, les propriétés mécaniques des différentes couches peuvent évoluer avec le temps (ii) modification du chargement, notamment hydrique, de la structure – le vieillissement des composants peut également entraîner une modification des conditions de chargement.

Comme nous avons commencé à le faire sur la question du matériau bois, il me semblerait important de réunir également dans l'avenir des spécialistes des peintures autour de ces questions pour mieux comprendre les interactions entre matériau et peinture dans le comportement des œuvres. Il faut pour cela à nouveau faire appel à l'interdisciplinarité.

### 4.3 Une réplique de panneau peint

#### 4.3.1 Protocole expérimental

Construire une maquette ou une réplique de panneau peint permet de mener des expérimentations que l'on espère mieux maîtrisées : dans le cadre de la thèse de Cécilia Gauvin [103], nous avons cherché à caractériser la réponse d'un panneau de peuplier à une variation d'humidité dans différentes conditions : (i) planche brute, (ii) avec faces latérales isolées (pour reproduire par exemple l'effet du confinement dans un cadre, qui limite les transferts hydriques des faces latérales), (iii) avec une face recouverte d'un revêtement selon la recette du groupe 7 (Tableau 8), (iv) avec un dispositif de renfort au dos empêchant la courbure mais permettant les retraits/gonflements (pour reproduire l'effet des traverses coulissantes). La réplique, planche de peuplier de densité anhydre  $363\text{kg/m}^3$ , de dimensions  $20 \times 337 \times 400\text{mm}^3$ , est positionné sur une balance, pour évaluer la variation de teneur en eau, au sein d'une enceinte climatique permettant de réguler température et humidité (Figure 91). Les déformations sont mesurées par stéréo-corrélation, en configuration « suivi de marqueurs » à l'aide du logiciel DEFTAC3D développé par l'Institut PPrime du CNRS.



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

**Figure 91 : Réplique de panneau peint (planche brute), avec marqueurs pour suivi par stéréovision, dans l'enceinte climatique, sur la balance interfacée [103].**

#### 4.3.2 Mesures de masse

Le protocole est le même pour les 4 configurations décrites précédemment : équilibrer la planche à haute humidité (80%RH, 20°C), puis la stabiliser à 60%RH, et enregistrer les variations de masse et les déformations lors du passage à 40%RH. L'isolation des faces latérales et la présence du revêtement (gesso) ralentissent les pertes de masse d'eau, qui s'élèvent à environ 24 grammes après 250 heures de stabilisation dans le cas du panneau libre (Figure 92). Le panneau avec renfort quant à lui perd environ 19 g d'eau pendant ce même temps de séchage.

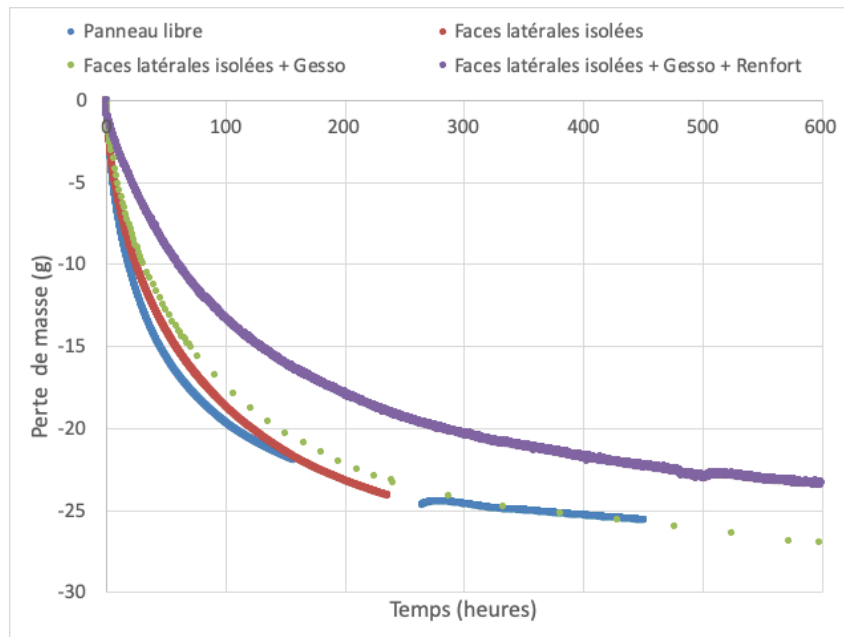


Figure 92 : Perte de masse au cours du temps d'un panneau de peuplier libre, avec faces latérales isolées, avec une face recouverte d'un revêtement (gesso), avec renfort au dos, lors d'un passage de 60 à 40% d'humidité relative.

Les planches ne sont pas totalement équilibrées en fin d'expérimentation. Nous avons estimé la masse stabilisée par extrapolation : dans le cas du panneau libre la masse passe de 1111,7g à 1083g, et pour le panneau aux faces latérales isolées de 1121,3g à 1090g (Figure 93). Les masses et pertes de masse extrapolées ainsi sont regroupées dans le Tableau 9. Plusieurs causes peuvent être à l'origine des différences de masse observées : les chargements hydriques successifs ne sont pas exactement les mêmes ; les matériaux ajoutés tels que le latex et les matériaux du gesso sèchent également ; le taux d'hygroscopicité de la planche diminue au fur et à mesure des chargements hydriques.

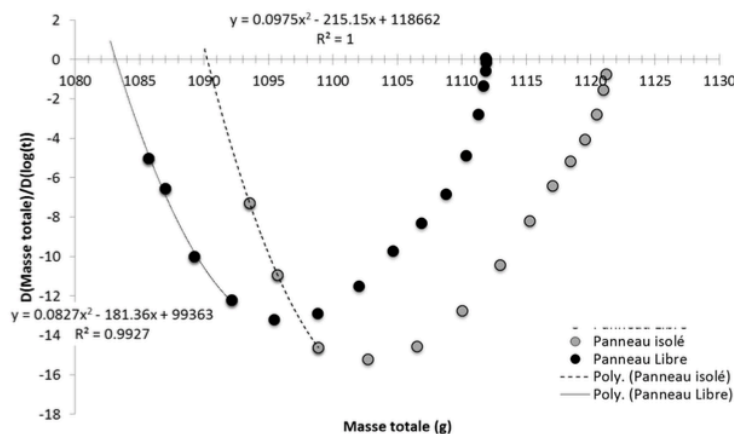


Figure 93 : Calcul de la masse à 40%RH par extrapolation [103]

	Panneau libre	Faces isolées	Faces isolées + Gesso	Faces isolées + Gesso + renfort
Masse initiale (g)	1111,7	1121,3	1594	2554
Masse extrapolée (g)	1083	1090	1564	2527
Perte de masse extrapolée (g)	28,7	31,3	30	27

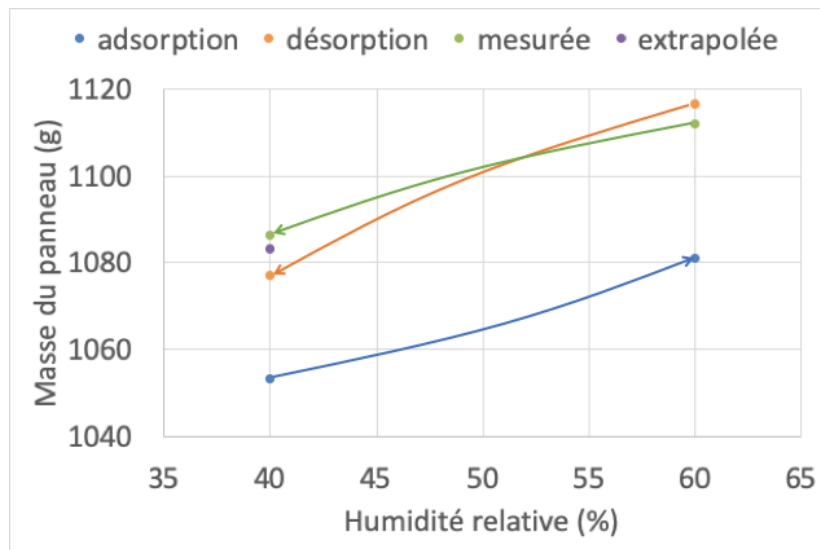
Tableau 9 : Pertes de masse extrapolées pour chaque configuration.

Le Tableau 10 permet de comparer la masse de la planche brute mesurée à celles évaluées à partir des taux d'humidité d'équilibre des abaques de la littérature en adsorption, désorption et moyen (Varnier 2019). La masse finale mesurée est plus forte que celle attendue (1077g à 40%RH pour la courbe de désorption). Ces valeurs sont reportées Figure 94. Cette courbe met en évidence l'écart que l'on peut noter entre les valeurs théoriques issues des abaques de la littérature et les mesures effectuées en laboratoire. Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine de ces écarts, mettant en cause

- (i) les expérimentations elles-mêmes : une erreur sur la masse anhydre calculée à partir d'un petit échantillon et rapportée au volume de la planche ; une planche de bois en début d'expérience pas encore stabilisée à 60%RH, la planche étant au préalable dans un environnement à 80%RH ;
- (ii) les limites des valeurs obtenues à l'aide d'abaques : les abaques donnent des valeurs moyennes pour un bois de peuplier, mais la variabilité au sein d'une espèce est grande ; elles ne tiennent pas compte de l'histoire du chargement hydrique.

<i>Environnement</i> <i>HR (%) T(°C)</i>	<i>HR</i>	40	60
	<i>T</i>	20	20
<i>Taux d'humidité d'équilibre (%)</i>	<i>w<sub>a</sub></i>	6,7	9,5
	<i>w<sub>d</sub></i>	9,1	13,1
	<i>w<sub>m</sub></i>	7,9	11,3
	<i>w<sub>mes</sub></i>	10,0	12,6
<i>Masse de l'échantillon (g)</i>	<i>m<sub>a</sub></i>	1053	1081
	<i>m<sub>d</sub></i>	1077	1116
	<i>m<sub>m</sub></i>	1065	1098
	<i>m<sub>mes</sub></i>	1086	1112

**Tableau 10 : Taux d'humidité d'équilibre du peuplier dans les conditions considérées :  $w_a$  en adsorption,  $w_d$  en désorption,  $w_m$  moyen ; masses évaluées correspondantes  $m_a$ ,  $m_d$  et  $m_m$ , et mesurées  $m_{mes}$ .**



**Figure 94 : Masse de la planche de peuplier brut mesurée lors d'un passage de 60 à 40%RH, et extrapolée, comparées aux courbes d'adsorption et désorption de la littérature.**

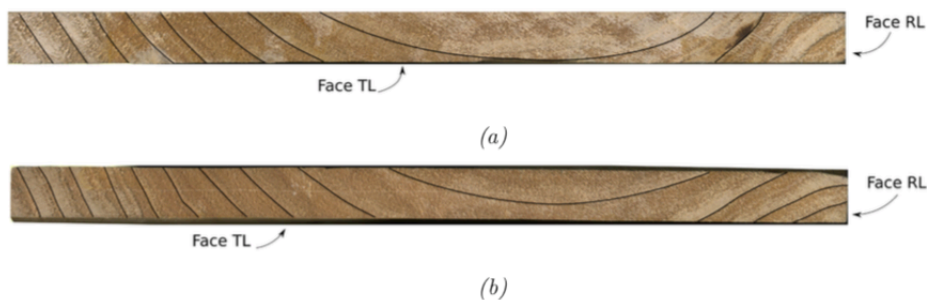
Confronter les mesures expérimentales à la littérature montre à quel point il est délicat de compléter des données manquantes avec des mesures calculées par exemple à partir d'une moyenne pour une essence. Pourtant c'est le seul recours que nous avons quand nous devons

par exemple estimer la masse anhydre d'un panneau peint du patrimoine, que l'on ne pourra bien sûr jamais obtenir expérimentalement.

Comparer systématiquement nos jeux de mesures expérimentales avec les valeurs données par les abaques nous permet de quantifier ces écarts dans différentes situations : différentes essences de bois, chargements hydriques, âges de bois, etc...

#### 4.3.3 Mesures de déformations

Les déformations sont évaluées en prenant comme état de référence l'état stabilisé à 60%HR, 20°C. Dans le cas de la planche avec faces latérales isolées, nous avons observé un retrait horizontal, correspondant aux directions transverses au fil du bois : radiale sur les bords extérieurs de la planche, mais tangentielle au centre de celle-ci (Figure 95).



**Figure 95 : Photo des sections transversales (RT) de la planche : (a) supérieure (b) inférieure. Les limites de cernes sont indiquées en noir [103].**

Le retrait apparaît progressivement au fil des jours de chargement, toujours plus fort au centre de la planche (Figure 96) et atteint en moyenne -0,35% sur les bords et -0,6% au centre. Ces valeurs sont à mettre en relation avec la perte de masse mesurée (Figure 92), qui correspond à un taux d'humidité qui passe de 12,6% à 10,0% (Tableau 10), si l'on considère une même perte de masse pour les panneaux « libre » et « isolé » stabilisés.

Le Tableau 11 permet de comparer les coefficients de retrait radial et tangentiel mesurés aux valeurs moyennes données par Tropix (Gérard, 2011) pour un peuplier de densité 0,45. Les ordres de grandeur des coefficients de retrait sont comparables.

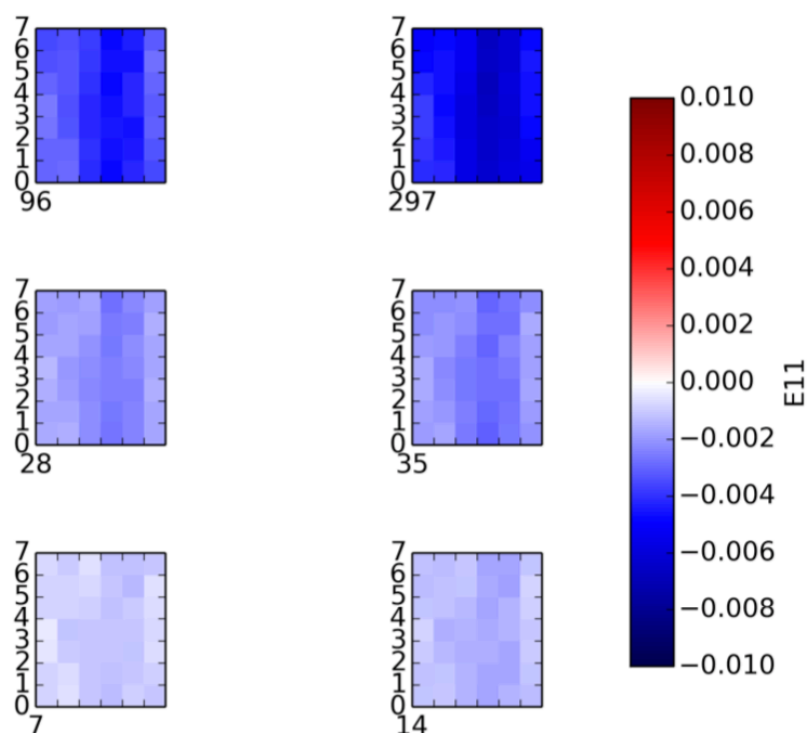


Figure 96 : Déformation horizontale de la planche isolée sur les 4 faces latérales lors d'un passage de 60 à 40%RH, 20°C, aux heures 7, 14, 28, 35, 96 et 297. (Gauvin, 2015).

	Données peuplier Tropix	Panneau isolé (à 297h)
Densité	0,45	0,36
Variation du taux d'humidité (%)	30	2,6
Retrait tangentiel (%)	8,3	0,65
Retrait radial (%)	4,8	0,45
Coefficient retrait tangentiel (%/%)	0,28	0,25
Coefficient retrait radial (%/%)	0,16	0,17

Tableau 11 : Comparaison des coefficients de retrait radial et tangentiel mesurés sur la planche isolée avec ceux de la littérature (Gérard 2011).

Dans le cas de la planche avec une face recouverte de gesso, nous avons reproduit la courbure apparaissant lors d'un séchage asymétrique. Les déformations horizontales sont mesurées sur la face recouverte de gesso. Elles apparaissent progressivement, avec des valeurs positives sur les extrémités, et légèrement négatives au centre, atteignant, à 136h, environ +1% à gauche, +0,6% à droite et -0,1% au centre (Figure 97). Il s'agit d'une succession d'états transitoires, la planche n'étant toujours pas à son état d'équilibre à 136h. La face arrière du panneau, non isolée, commence par sécher et subit donc un retrait, comme observé dans le cas précédent (Figure 96), qui induit un gradient d'humidité dans l'épaisseur de la planche tant que l'équilibre n'est pas atteint, il en résulte une courbure de la planche pendant les états transitoires, qui explique la mise en tension partielle de la face recouverte de gesso. De la même manière que le retrait de la face arrière n'est pas homogène, la tension de la face peinte n'est pas homogène non plus. Il s'agit ici d'une combinaison des retraits anisotropes du matériau et d'un séchage asymétrique d'une structure. Les états transitoires de cette situation complexe sont schématisés Figure 98. Une fois l'équilibre atteint, la courbure diminue.



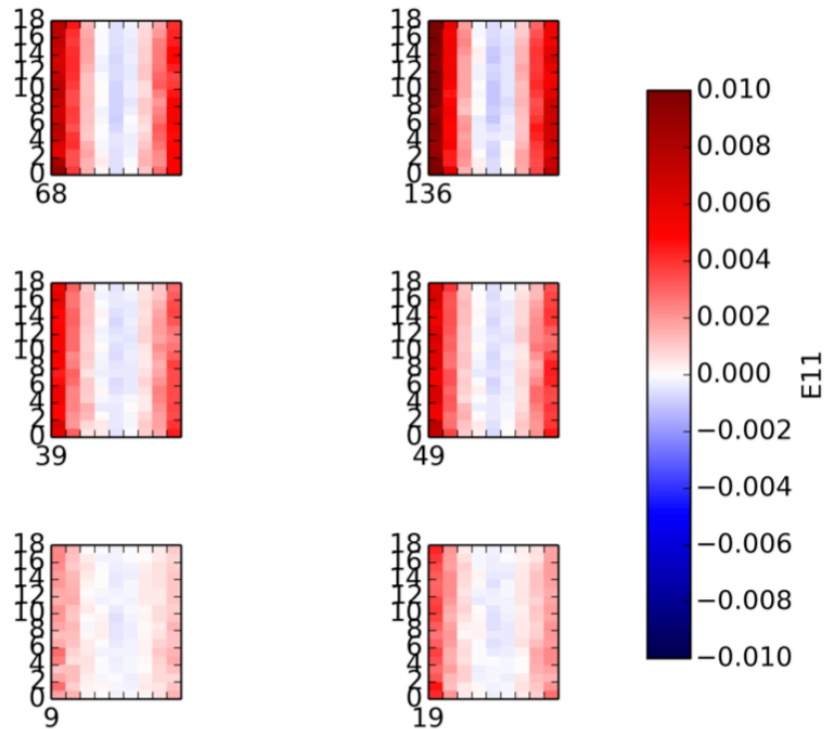


Figure 97 : Déformation horizontale de la planche isolée sur les 4 faces latérales, avec gesso, lors d'un passage de 60 à 40%RH, 20°C, aux heures 9, 19, 39, 49, 68 et 136. [103]

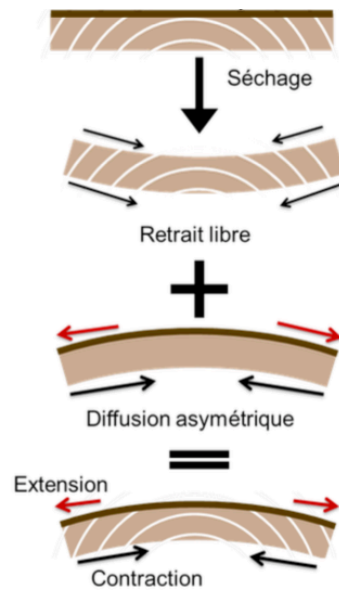


Figure 98 : Schéma expliquant la mise en tension de la face recouverte de gesso pendant les phases transitoires du séchage [103]

#### 4.3.4 Conclusion

Cette expérimentation montre que même en conditions de chargement hygrothermique contrôlé, la combinaison de l'anisotropie du matériau et de l'asymétrie du séchage rend très difficile l'interprétation des déformations mesurées.

Durant la thèse de Cécilia nous avons également mesuré les déformations de cette même planche avec un « parquetage » pendant une phase de séchage. Là encore, les mesures de déformations sont difficiles à interpréter simplement.

Coupler ces expérimentations à un modèle numérique prenant en compte les couplages mécano-sorptifs semble nécessaire pour avancer sur la compréhension de ces phénomènes. Cécilia avait entrepris le développement de tels modèles, mais nous n'avons jusqu'à présent pas pu les finaliser. Il serait intéressant de pouvoir avancer dans cette voie dans l'avenir.

#### 4.4 Publications et production scientifique liées à ce chapitre

##### *Articles dans des revues internationales à comité de lecture*

- [94]Gauvin C., **Jullien D.**, Doumalin P., Dupré J. C., Gril J. (2014) Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood, *Strain* 50(5):428-435 doi :10.1111/str.12090

##### *Congrès internationaux*

- [95]Gril J, **Jullien D.**, Hunt D. (2016) Compression set and cupping of painted wooden panels. Analysis and Characterisation of Wooden Cultural Heritage by means of Scientific Engineering Methods. 28-29/5/2016, Halle/Saale, Germany
- [96]Aurand A., Gauvin C., **Jullien D.**, Young C. (2016) Quantifying the effect of preparatory layers in the overall hygromechanical behaviour of panel paintings: the case of 14th century Italian panels. ICOM-CC Joint Interim Meeting: Physical Issues in the Conservation of Paintings: Monitoring, Documenting and Treatment, 29-30.09.16, INHA, Paris, France
- [97]**Jullien D.**, Gauvin C., Gril J. (2014) Hygro-mechanical behaviour of wooden panels from cultural heritage : effect of a coated face, International Symposium WoodSciCraft, Montpellier, 8-12.09.14
- [98]Gauvin C., Endo K., Jullien D., Obataya E., Gril J. (2014) Effect of hygrothermal treatments on the physical properties of wood, Final COST Action FP0904 conference "Recent Advances in the Field of TH and THM Wood Treatment", Skellefteå, Sweden, 19-21.05.14
- [99]Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2014) Poster: Hygromechanical behaviour of a wooden panel, Conference Wood and Science Technology, SRAL Art conservation and research, Maastricht, Pays-Bas, 17-18.10.14
- [100] Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2013), Poster: Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood, PhotoMechanics 2013, 27-29.05.2013, Montpellier, France.

##### *Congrès nationaux*

- [101] Gauvin C., **Jullien D.**, Gril J. (2016) La mécanique du bois au service de la restauration/conservation du patrimoine. 11ième édition de la manifestation Thèse des Bois, Bordeaux, 7.11.16
- [102] Graindorge Lamour J., **Jullien D.**, Rouard A., Gauvin C., Gril J. (2012) Poster: Aide à la décision à chaque étape de la restauration, comparaison du comportement hygromécanique de deux renforts : deux doublages en balsa, 1ères Journées du GDR Bois 3544, France [hal-00796819 - version 1]

##### *Encadrement doctoral et scientifique*

- [103] Gauvin C. (2015) Etude expérimentale et numérique du comportement hygromécanique d'un panneau de bois. Application à la conservation des tableaux peints sur bois du patrimoine. Thèse de doctorat. Université Montpellier. Encadrants : **Jullien D.** (70%) Gril J. (30%)
- [104] Aurand Alice (2015) Postgraduate Diploma in the Conservation of Easel paintings, Courtauld Institute of Art, London : A re-evaluation of the mechanisms underlying relative humidity induced fatigue damage in panel paintings: the case of 14th century Italian preparatory layers. Encadrantes : Young C. (70%), Gauvin C. (20%), **Jullien D.** (10%)
- [105] Gauvin C. (2012) Stage Master 2 « Matériaux innovants » Université Lyon I, Polytech Lyon : Expérimentations hygrothermiques sur maquettes de bois en vue de la compréhension de la dégradation des panneaux peints du patrimoine. Encadrante : Jullien D. (100%)
- [106] Graindorge Lamour Jonathan (2012) 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 : deux techniques de doublage en balsa. Mémoire de diplôme de restaurateur du patrimoine, spécialité mobilier. Encadrants : Grall E., **Jullien D.** (partie scientifique).
- [107] Rouard A. (2011) Stage de Master 2, Spécialité Mécanique et Ingénierie, Université Montpellier 2 : Mise au point d'un dispositif de suivi des déformations d'un panneau de bois soumis à des variations hygrothermiques. Encadrants : Jullien D. (90%), Louche H. (10%)

Références :

- Varnier M. (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus: des sciences du bois à l'ingénierie. Thèse de doctorat en génie civil, université de Limoges, France. NNT : 2019LIMO0035. tel- 02303304

## 5 Bois de clarinettes

Considérer le comportement hygroscopique du bois nécessite de prendre en compte les variations dimensionnelles du matériau, en lien avec la nature du bois, les conditions hygrothermiques, l'orientation locale du matériau.

Nous avons été contactés par l'entreprise Henri Selmer Paris pour mettre en place une collaboration visant à mieux connaître le comportement du bois dit « ébène du Mozambique » (*Dalbergia melanoxylon*) utilisé pour la confection de clarinettes (Figure 99). La durée de séchage de ces bois, environ 3 ans, leur impose un coût de stockage élevé qu'ils souhaitent réduire. La question se pose donc d'« optimiser leur protocole de séchage », tout en conservant les propriétés mécaniques du bois.



Figure 99 : *Dalbergia Melanoxylon* appelé aussi Bois de Grenadille utilisé pour la fabrication de clarinettes (Alkadri A.)

Par ailleurs, depuis 2017, *Dalbergia melanoxylon* est inscrit à l'annexe II de la CITES<sup>1</sup>, qui « comprend toutes les espèces qui ne sont pas nécessairement menacées d'extinction mais dont le commerce des spécimens doit être réglementé pour éviter une exploitation incompatible avec leur survie ; un système de permis d'exportation et parfois d'importation est requis pour faire du commerce avec ces espèces<sup>2</sup> ». Il est donc nécessaire de bien caractériser les propriétés de cette essence, pour éventuellement proposer des essences de substitution.

Cette collaboration s'est traduite par le financement d'un stage de Master 2 [114] puis par la mise en place d'une thèse Cifre démarrée en mai 2017 [113].

### 5.1 Caractérisation physique de *Dalbergia Melanoxylon*

Une première série de mesures est présentée dans ce document. Elles sont actuellement complétées et approfondies dans le cadre de la thèse de Ahmad Alkadri, dont la soutenance est prévue en juillet 2020.

#### 5.1.1 Anatomie

Les observations anatomiques faites à l'aide d'un microscope optique montrent une structure avec des rayons ligneux étagés sur la surface tangentielle, et un nombre élevé de rayons au mm sur la surface transversale (Figure 100). Ce bois est riche en extractibles.

<sup>1</sup> Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction

<sup>2</sup> <https://www.csfi-musique.fr/reglementations/cites#>

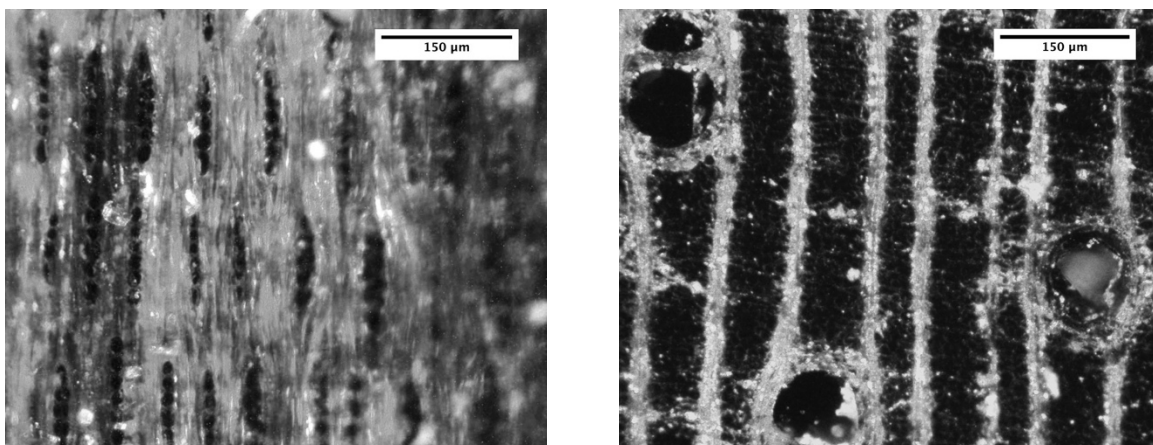


Figure 100 : Observations anatomiques de *Dalbergia sp.* : surfaces tangentielle (à gauche) et transversale (à droite) (Alkadri A.)

### 5.1.2 Hystérésis de sorption

De petits échantillons ont été usinés dans 5 carretels fournis par l'entreprise pour mesurer leur teneur en eau à l'équilibre à différentes humidités relatives (Figure 101). Les valeurs moyennes mesurées sont très faibles comparées à celles obtenues par les abaques pour un bois relativement dense comme le robinier (densité 0,74 ; PSF 30%) (Tableau 12, Figure 102).

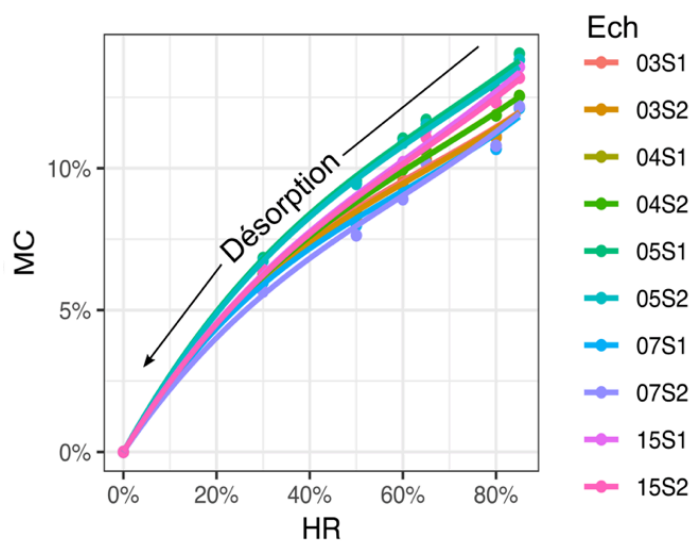
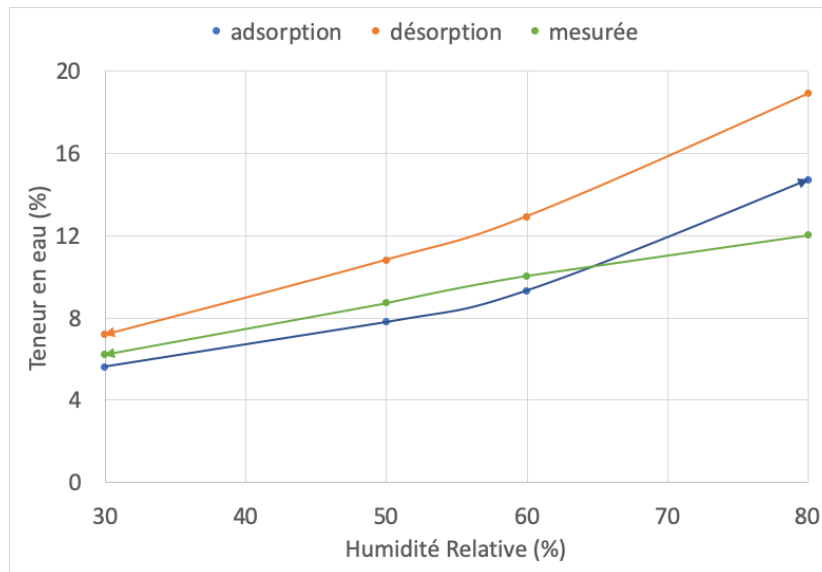


Figure 101 : Teneur en eau d'équilibre (MC) en fonction de l'humidité relative de 10 échantillons de *Dalbergia Melanoxylon* en désorption (Alkadri).

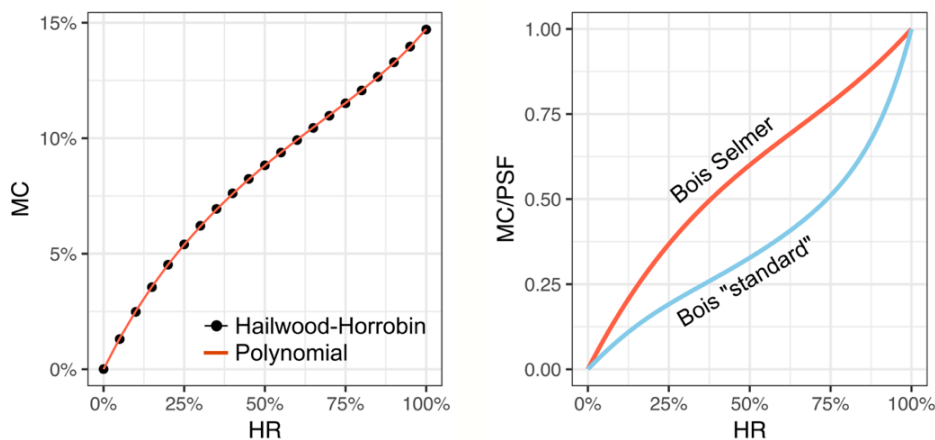
Environnement HR (%), T (°C)	Humidité Relative	30	50	60	80
	Température	25	25	25	25
Teneur en eau à l'équilibre (%)	$w_a$ (robinier)	5,6	7,8	9,3	14,7
	$w_d$ (robinier)	7,2	10,8	12,9	18,9
	$w_{mes}$ ( <i>Dalbergia</i> )	6,2	8,7	10	12

Tableau 12 : Taux d'humidité d'équilibre moyens mesurés sur *Dalbergia Melanoxylon* ( $w_{mes}$ ) comparés aux valeurs données par les abaques pour le robinier :  $w_a$  en adsorption,  $w_d$  en désorption.



**Figure 102 :** Comparaison de la courbe d'adsorption mesurée (en vert) pour *Dalbergia Melanoxylon* avec celles calculées pour le robinier (désorption en orange, adsorption en bleu) (de densité 0,74 et PSF 30%).

Les modèles polynomial (Cranck, 1975) ou de Hailwood-Horrobin (1946) permettent de décrire la relation entre teneur en eau d'équilibre et humidité relative obtenue expérimentalement, et de la comparer à la courbe d'un bois dit « standard ». On obtient une valeur faible du point de saturation des fibres, entre 14 et 17%. Rapporter la teneur en eau à ce PSF met en évidence le comportement atypique de ce bois très dense, riche en extractible, au PSF très bas (Figure 103).



**Figure 103 :** Modèles polynomial et de Hailwood-Horrobin ajustés aux mesures sur *Dalbergia Melanoxylon* (à gauche). Comparaison de la teneur en eau rapportée au PSF en fonction de l'humidité relative pour les bois dits « Selmer » et « standard » (à droite).

Cette très faible teneur en eau à l'équilibre caractérise ce bois très dense, qui présente ainsi des variations dimensionnelles également très faibles.

### 5.1.3 Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles ont été mesurées entre l'état anhydre et les états d'équilibre à 50% et 80%RH, 25°C [114]. L'anisotropie de ce bois est faible. Cela peut s'expliquer en partie par la forte proportion d'extractibles contenu dans ce bois. Les coefficients de gonflement sont légèrement plus faibles que ceux de l'ébène d'Afrique (Tableau 13) mais le PSF étant plus faible, les variations dimensionnelles maximales sont largement plus faibles.

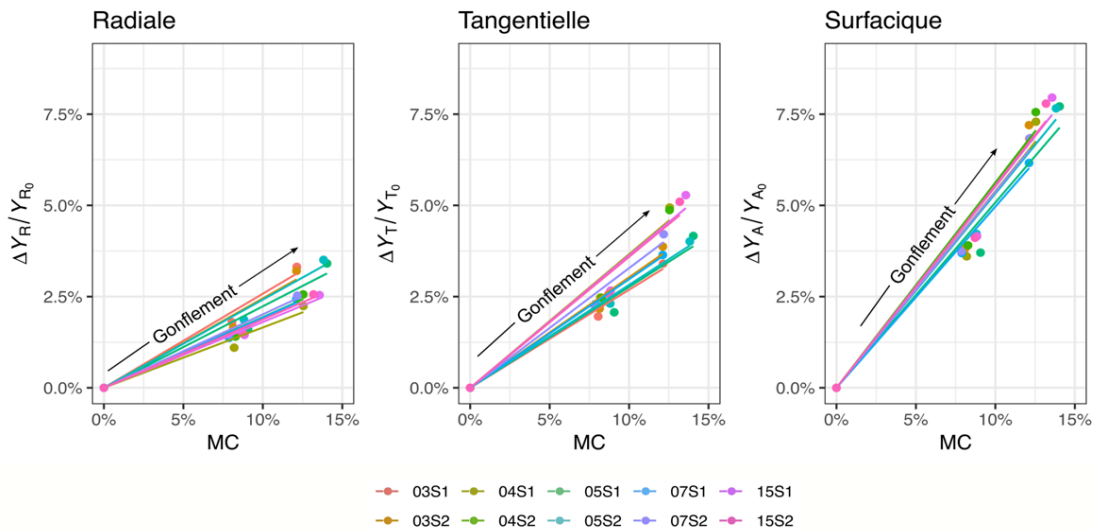


Figure 104 : Variations dimensionnelles relatives dans les directions radiale et tangentielle, et surfacique des 10 échantillons de *Dalbergia Melanoxylon* (Alkadri A.)

	Données Ébène d'Afrique Tropix	<i>Dalbergia Melanoxylon</i>
Densité	0,9	
Variation du taux d'humidité (%)	29	12,5
Gonflement tangentiel (%)	11	4,0
Gonflement radial (%)	7	2,6
Coefficient gonflement tangentiel (%/%)	0,38	0,32
Coefficient gonflement radial (%/%)	0,24	0,21

Tableau 13 : Comparaison des coefficients de gonflement radial et tangentiel mesurés sur *Dalbergia Melanoxylon* avec l'Ébène d'Afrique de la littérature (Gérard, 2011).

#### 5.1.4 Coefficients de diffusion

La masse de petits échantillons parallélépipédiques et cylindriques de différentes épaisseurs est suivie au cours du temps lors de la modification de l'humidité relative ambiante, la température étant contrôlée. Certaines faces sont isolées pour imposer une diffusion unidirectionnelle (Figure 105).

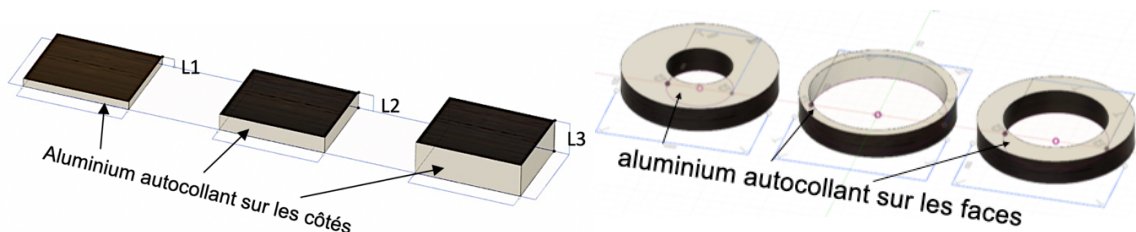


Figure 105 : Échantillons parallélépipédiques et cylindriques pour mesures de diffusion (Alkadri, 2018).

Les solutions analytiques de Cranck (1975) nous permettent d'estimer les coefficients de diffusion à partir de l'évolution des masses au cours du temps (Figure 106). Les coefficients sont égaux dans les directions radiales et tangentielles, de l'ordre de  $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  tandis que dans la direction longitudinale, il est 1,5 fois plus élevé.

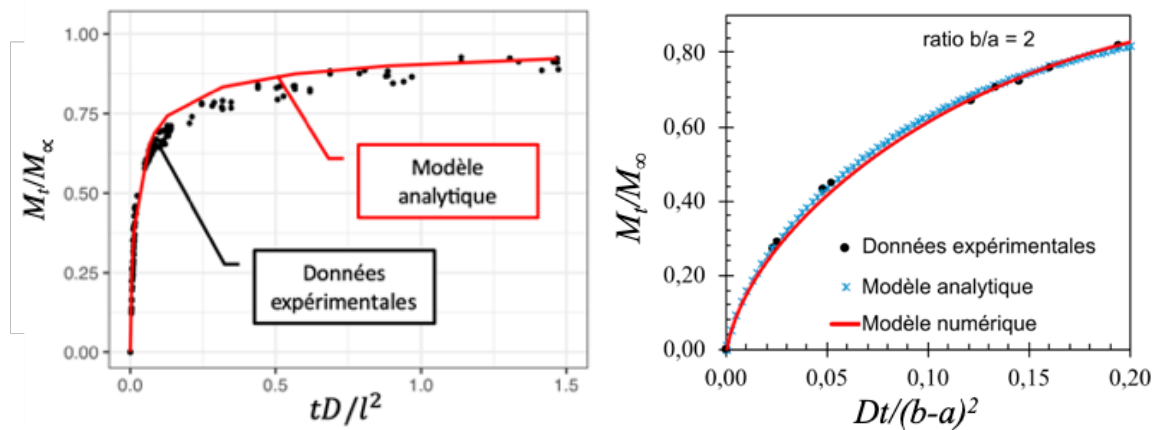


Figure 106 : Mesures expérimentales et modèles simples de diffusion pour des échantillons parallélépipédiques d'épaisseur  $l$  (à gauche) et cylindriques de rayons intérieur  $a$  et extérieur  $b$  (à droite) avec  $M_t$  masse au temps  $t$ ,  $M_\infty$  masse à l'équilibre,  $t$  temps,  $D$  coefficient de diffusion.

$D_R$ ( $10^6$ cm <sup>2</sup> /s)	$D_T$ ( $10^6$ cm <sup>2</sup> /s)	$D_L$ ( $10^6$ cm <sup>2</sup> /s)
5,2 +/- 1,4	5,2 +/- 0,7	8,0 +/- 1,8

Tableau 14 : Coefficients de diffusion radial  $D_R$ , tangentiel  $D_T$  et longitudinal  $D_L$  mesurés sur *Dalbergia Melanoxylon*.

## 5.2 Protocoles de séchage

La connaissance de ces paramètres permet d'estimer, de façon plus précise qu'avec les abaques usuelles, les teneurs en eau des bois stockés dans les différentes salles de l'usine, en fonction du climat de chaque salle. Avant d'être usinées, les pièces de bois sont stockées dans 3 salles successivement, pour lesquelles le climat a été enregistré pendant une année. Les teneurs en eau à l'équilibre des bois sont évaluées en fonction du climat de chaque salle, puis les teneurs en eau des différentes pièces de bois sont estimées en utilisant les coefficients de diffusion. Les courbes obtenues ne sont pas reportées dans ce document pour raisons de confidentialité.

Un des résultats de la thèse a consisté à proposer des protocoles de séchage plus adaptés, à partir des mesures de climat effectuées au sein de l'usine, et des mesures sur échantillons effectuées au laboratoire en conditions contrôlées.

## 5.3 Déformations hygroélastiques des clarinettes

Les caractérisations physiques et mécaniques de ces bois peuvent également permettre d'évaluer les déformations hygroélastiques des clarinettes pendant le jeu, lorsque l'humidité à l'intérieur du tube est saturée. Des mesures de rigidité sont faites par méthode ultrasonore. Un calcul par éléments finis alimenté par ces caractéristiques permet d'estimer les déformations et contraintes lors d'un tel chargement, et à terme d'estimer les risques de fissuration en comparant les valeurs obtenues aux limites élastiques du matériau (Figure 107).



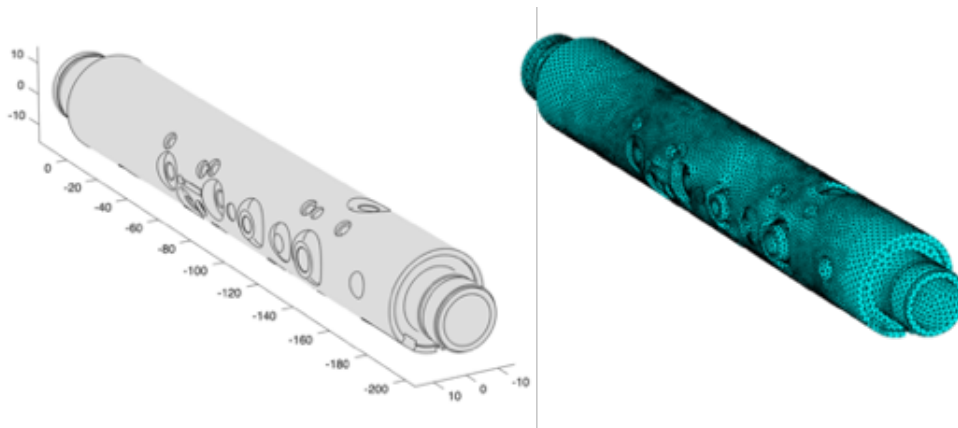


Figure 107 : Modèle CAO de corps de clarinette (à gauche) et maillage par éléments finis (à droite) (Alkadri).

#### 5.4 Conclusion

Cette collaboration avec une entreprise de facture de clarinettes a été riche en échanges, pour les deux parties : nous avons pu caractériser une ressource peu décrite dans la littérature, et apporter des éléments de réponse à des questions industrielles très concrètes.

La caractérisation de la ressource *Dalbergia* va se poursuivre au sein de l'équipe grâce à un projet de grande envergure porté par Iris Brémaud, en collaboration avec l'équipe BioWooEB du Cirad, l'université d'Antananarivo (Madagascar) et l'Université Autonome Métropolitaine (Iztapalapa, Mexique). Ce projet vise à comprendre les liens botanique-chimie-mécanique-usages du genre *Dalbergia* (environ 250 spp.) largement utilisé dans les artisanats et arts traditionnels de différentes cultures, menacé par l'explosion de la consommation industrielle et porté à un statut mondial de « bois précieux » menacé, et à contribuer à une conservation de la biodiversité et de la diversité socio-culturelle (Brémaud, 2018). Un réseau interdisciplinaire, international et inter-métiers va être mis en place, et tentera de répondre aux questions suivantes:

- quelles sont les propriétés matérielles à l'origine des choix artisanaux majeurs des bois de *Dalbergia* dans différentes aires bio-géo-culturelles ?
- quels sont les mécanismes à l'origine des spécificités de ce taxon par rapport à toute la biodiversité des bois ?

Un projet visant à valoriser la xylothèque du Cirad, une des plus importantes collections de bois tropicaux reconnue au niveau international, est actuellement à l'étude, porté par l'Unité de Recherche BioWooEB du Cirad. Il vise à valoriser des connaissances et des données uniques sur les bois en les diffusant en accès libre sur internet au plus grand nombre. Ce patrimoine scientifique et culturel remarquable sur le végétal sera alors valorisé en enrichissant la bibliothèque numérique en agronomie tropicale NumBa avec des données, des informations et des documents textuels et iconographiques sur ces bois. Je souhaite vivement prendre part à ce projet ambitieux, en améliorant notamment la composante physique et mécanique de la base de données Bois et en améliorant les documents textuels issus de Tropix.

#### 5.5 Publications et production scientifique en lien avec ce chapitre

*Articles dans des revues internationales à comité de lecture*

- [108] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Rosenkrantz E., Langbour P., Hovasse L., Gril J. (2020) Hygromechanical properties of grenadilla wood (*Dalbergia melanoxylon*). Wood Science and Technology, 54:1269-1297, DOI 10.1007/s00226-020-01215-z

### Congrès internationaux

- [109] Alkadri A., Diakonova N., Coquillat D., Arnould A., **Jullien D.**, Gril J. (2019) Terahertz Observation of Moisture Convection-Diffusion in Wood. 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 24-27.09.19, Freiburg, Germany.
- [110] Alkadri A., Diakonova N., Coquillat D., Arnould A., **Jullien D.**, Gril J. (2018) Investigation of the water diffusion in wood by terahertz techniques. Physics of Drying Conference, 5-7.11.18, Marne-la-Vallée, France. <hal-01924126>

### Congrès nationaux

- [111] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Diakonova N., Coquillat D., et al. (2018) Poster : Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent. 7èmes journées du GDR Sciences du bois, 20-22.11.18, Cluny, France. <<https://gdrbois-2018.sciencesconf.org/>> . <hal-01960449>
- [112] Alkadri A., **Jullien D.**, Arnould O., Langbour P., Gril J. (2017) Poster : Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent. 6èmes Journées du GDR 3544 Sciences du Bois, Nantes 21-23.11.17

### Encadrement doctoral et scientifique

- [113] Alkadri A. (mai 2017- septembre 2020) Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent. Financement CIFRE - Société Henri Selmer Paris. Université Montpellier. Encadrants : **Jullien D.** (40%) Arnould O. (30%) Gril J. (30%)
- [114] Le Bastard François (2016) Stage Master 2 Université Lorraine / Ingénieur ENSTIB : Optimisation du protocole de séchage des bois destinés à la facture de clarinettes. Encadrants : **Jullien D.** (60%), Hovasse L., entreprise H. Selmer, Paris (30%), Arnould O. (10%)
- [115] Charles Nicolas (2016) Stage DAEU B - Diplôme d'Accès aux études universitaires Option scientifique : Découverte des thèmes de recherche de l'équipe Bois, Mise en place d'un protocole d'échantillonnage en vue de caractériser les propriétés physiques du *Dalbergia*, débit des échantillons. Encadrante : **Jullien D.**
- [116] Larricq Guillaume (2015) Stage Master 2 Université Lorraine / Ingénieur ENSTIB : Première approche des déformations d'instrument à vent : la déformation d'anneaux de buis. Encadrants : Cabrolier P. (50%), Brémaud I. (25%), **Jullien D.** (25%)

### Références :

- Brémaud I., Langbour P. (2018) Poster : PALISSANDRES – Comprendre les liens botanique-chimie-mécanique-usages ayant déterminé le statut mondial de « bois précieux » du genre pantropical menacé *Dalbergia*. 7èmes journées du GDR Sciences du bois, 20-22.11.18, Cluny, France.
- Gérard J., Guibal D. Paradis S., Vernay M., Beauchêne J., Brancheriau L., Thibaut A., (2011) Tropix 7. CIRAD. <https://doi.org/10.18167/74726F706978>
- Crank J. (1975) The mathematics of diffusion, 2<sup>nd</sup> edn. Oxford science publications, Oxford Univ. Press, Oxford, oCLC: 554098354
- Hailwood A.J., Horrobin S. (1946) Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. Trans Faraday Soc 42:B084, DOI 10.1039/tf946420b084

## 6 Bois des ruches

L'aventure a démarré en 2015, avec la rencontre de Anna Duplex, chercheuse en sciences du bois et apicultrice, qui souhaitait se pencher sur la question de l'interaction entre le bois constitutif des ruches et les occupants de la ruche : les abeilles. Il paraît que les ruches-tronc en châtaignier de la région des Cévennes soient meilleures pour l'état sanitaire des colonies d'abeilles. Pour quelles raisons ? Le climat serait-il différent à l'intérieur ? Quel rôle joue la forme de la ruche, le type de bois, sur les conditions hygrothermiques intérieures ? Le *varroa destructor*, parasite numéro 1 de l'abeille à l'origine de l'effondrement de bon nombre de colonies, serait-il repoussé par l'odeur du châtaignier ? Que pensent les apiculteurs du rôle joué par le bois sur la santé de leur cheptel ? Quel est l'avis des fabricants de ruche ?

C'est à toutes ces questions que nous nous efforçons de répondre depuis 4 ans (Figure 108). Nous avons pour cela commencé par rechercher des financements pour mener ces études. La thématique a été très bien accueillie, et l'aventure est toujours en cours. Ces recherches sont lentes, mais passionnantes. Nous avons mis en place un réseau interdisciplinaire très fourni.

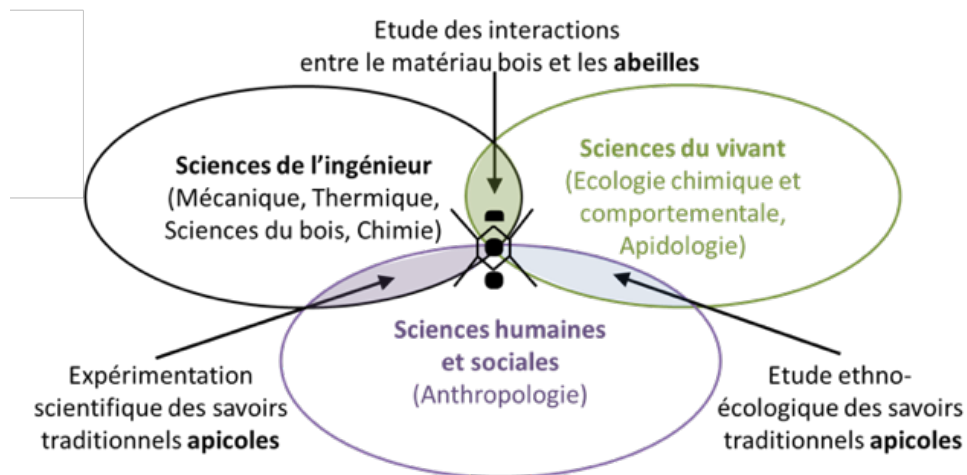


Figure 108 : Pratiques et savoirs locaux pour explorer la question de l'influence du bois des ruches sur les conditions de vie des abeilles (Duplex).

### 6.1 Enquêtes auprès des apiculteurs et fabricants sur les bois utilisés pour les ruches

Il nous a paru important dans un premier temps d'évaluer les connaissances et les représentations des apiculteurs et des vendeurs de ruche concernant le matériau bois des ruches et notamment, les interactions entre le bois et les colonies d'abeilles. En collaboration étroite avec Pascale Moity-Maïzi, anthropologue du GRED Montpellier, à l'issue d'enquêtes menées auprès de vendeurs de ruche et d'apiculteurs du Sud de la France, démarrées lors du stage de Master de Pauline Milliet-Tréboux [139], nous avons pu construire une typologie enrichie de professionnels apicoles illustrée Figure 109, distinguant les « usagers » des « bricoleurs », aussi bien pour les apiculteurs que pour les vendeurs de matériel apicole.

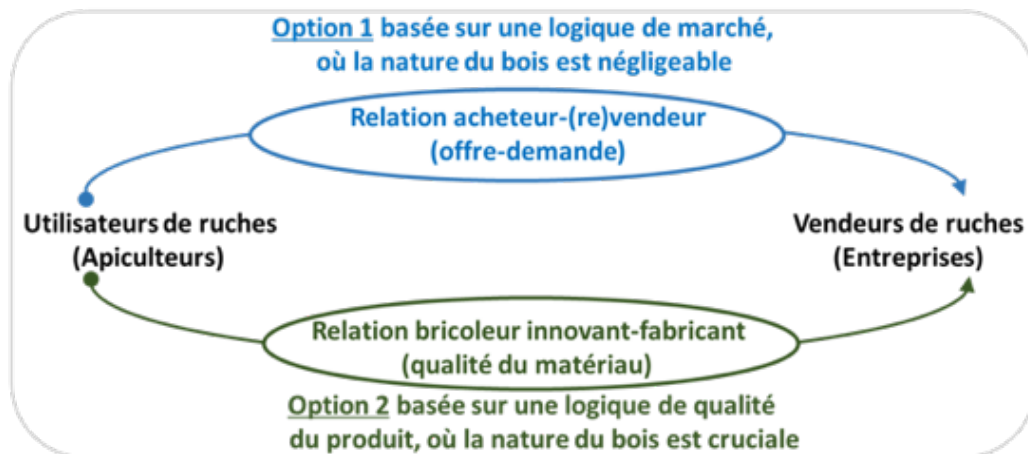


Figure 109 : Typologie enrichie de professionnels apicoles (issu de [119]).

Ce travail se poursuit par (i) des entretiens plus approfondis avec des apiculteurs acheteurs et fabricants, (ii) une analyse de discours de sites web ou blogs de fabricants de ruches, revendeurs et associations, (iii) une analyse d'ouvrages des années 1800 à nos jours. Cette étude a fait l'objet d'un article dans une revue internationale [117] et d'un chapitre d'ouvrage [119].

## 6.2 Climat hygrothermique à l'intérieur des ruches

Le climat hygrothermique à l'intérieur des ruches est un paramètre important qui influence directement la santé des abeilles. En effet, le couvain doit par exemple être maintenu à une température de 36°C. L'humidité de l'air est également un facteur que les abeilles doivent réguler pour la bonne santé de la colonie.

Divers paramètres influent sur ce climat intérieur tels que : le climat extérieur, l'environnement de la ruche, son orientation, les matériaux constitutifs de la ruche, la présence de revêtement sur ces matériaux, la forme de la ruche, l'épaisseur des parois, les entrées et sorties d'air, la taille de la colonie, le nombre de cadres peuplés, la quantité de miel présente, etc... Ces paramètres sont nombreux et ils varient au cours de la vie de la colonie, et au cours des saisons. Il nous a donc paru indispensable de développer un modèle permettant de prendre en compte l'influence de ces différents paramètres. Ce modèle s'appuie sur des mesures expérimentales. Des premières mesures expérimentales visaient à caractériser le climat hygrothermique de ruchettes (petites ruches) de divers matériaux (2 types de bois, épicéa et châtaignier, ou polystyrène) en climat contrôlé grâce à une enceinte climatique, lors du stage de master Dao Dougabka [140]. Il s'est avéré difficile de bien contrôler le « climat extérieur », étant donné la grande taille des ruchettes proportionnellement à la taille de l'enceinte climatique.

Par la suite, des mesures en extérieur au sein du rucher expérimental ont été menées sur ruches Dadant, faisant varier le type de matériau (2 types de bois, épicéa et châtaignier, ou polystyrène) et l'orientation de la ruche (sud-ouest, sud, sud-est, est).

Nous nous sommes limités dans un premier temps à une modélisation thermique, ne prenant pas en compte l'influence de l'humidité. Issu d'une étroite collaboration, ce modèle a été développé par Emmanuel Ruffio, chercheur rattaché au TREFLE, Université de Bordeaux. Un premier modèle dit « de ruche vide » permet de conduire l'étude paramétrique d'une ruche vide en fonction de sa géométrie (type de ruche, dimensions, épaisseur), des matériaux utilisés (propriétés thermiques, hygrométriques, radiatives), de paramètres météorologiques (température de l'air, ensoleillement, nuages, pluie, vent), de l'environnement (montagne, végétation, nature du sol, ruches voisines), et de modéliser ainsi la température à l'intérieur de la ruche comme fonction de la température extérieure. Le modèle, ajusté sur un jeu de mesures

expérimentales, permet alors d'évaluer l'influence de chacun des paramètres considérés sur la température intérieure : des parois de 30 mm d'épaisseur au lieu de 21 modifieront très légèrement la température intérieure (Figure 110, courbe verte comparée à la courbe noire) tandis que la présence de 10 kg de miel dans la ruche (Figure 110, courbe rose) atténue drastiquement les variations de température intérieure par inertie thermique. L'irradiance solaire est déduite du modèle (Figure 110, courbe jaune) et permet de calculer l'influence de l'orientation de la ruche sur la température intérieure, notamment lorsque le soleil est levé.

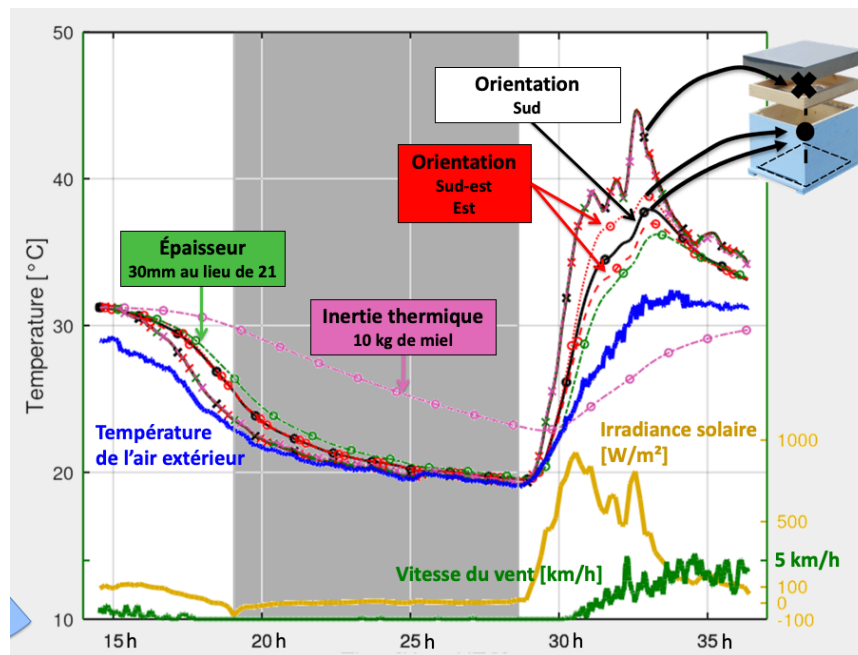


Figure 110 : Étude paramétrique du climat intérieur d'une ruche vide. En noir, température à l'intérieur d'une ruche Dadant en châtaignier avec parois épaisses de 21 mm (issu de [121]).

Ce modèle de ruche vide nous permet de proposer une première interprétation des mesures expérimentales enregistrées dans la même ruche, peuplée d'abeilles. Les courbes noire et grise de la Figure 111 représentent les températures mesurées en haut et en bas d'une ruche peuplée. Les courbes vertes sont obtenues par le modèle de ruche vide, en considérant la présence des cadres et du contenu de la ruche, mais sans considérer que les abeilles produisent de la chaleur. On peut ajuster les courbes du modèle aux courbes expérimentales en jouant sur la présence d'une source de chaleur, on obtient alors les courbes rouge et rose. L'ajustement nous conduit à considérer une source de chaleur de l'ordre de 5 Watts en moyenne, avec un pic très important au lever du soleil. L'ordre de grandeur moyen de cette puissance thermique est en adéquation avec la puissance thermique pouvant être attribuée à une colonie. Ces travaux ont fait l'objet d'une communication orale à la conférence internationale Apimondia qui s'est tenue à Montréal en 2019 [121].

Une modélisation thermique tridimensionnelle, sous Comsol Multiphysics, a également fait l'objet d'un projet de fin d'étude d'étudiants de l'ENSAM de Bordeaux, encadrés par Jean-Luc Battaglia et Emmanuel Ruffio [136], permettant de comparer le climat dans une ruche (i) vide, (ii) avec couvre-cadres et (iii) avec cadres et couvre-cadres. Le modèle a été ajusté à l'aide des mesures obtenues sur le rucher expérimental.

Nous ne pouvons cependant pas à ce stade discriminer la chaleur fournie par la colonie de l'inertie thermique apportée par les éléments constitutifs de la ruche (taille de la colonie, couvain, miel, etc...), qui évoluent au cours de la saison. Une mesure en continu de la masse de la ruche permettrait de mieux évaluer la part évolutive de l'inertie thermique, et d'estimer

plus justement la puissance dégagée par la colonie. Nous pensons que cette puissance peut être un indicateur de la santé de la colonie. Conscients que l'humidité joue un rôle très important dans la vie de la colonie, nous avons également mesuré les variations d'humidité au sein de ruches vides, et souhaitons enrichir le modèle thermique pour tenir compte également de l'humidité, afin d'étudier notamment le rôle joué par le bois, matériau hygroscopique, dans le climat hygrothermique de la ruche, et son impact sur la santé des colonies.

Des mesures expérimentales sur des ruches en enceintes de grand volume contrôlées, lors de cycles dynamiques sont également prévues courant 2020. Ces mesures se feront sur trois ruches : une en polystyrène, deux en bois, dont une avec les parois recouvertes d'une feuille d'aluminium pour empêcher les transferts d'eau, et évaluer ainsi par comparaison l'influence de ces transferts sur la température et l'humidité interne.

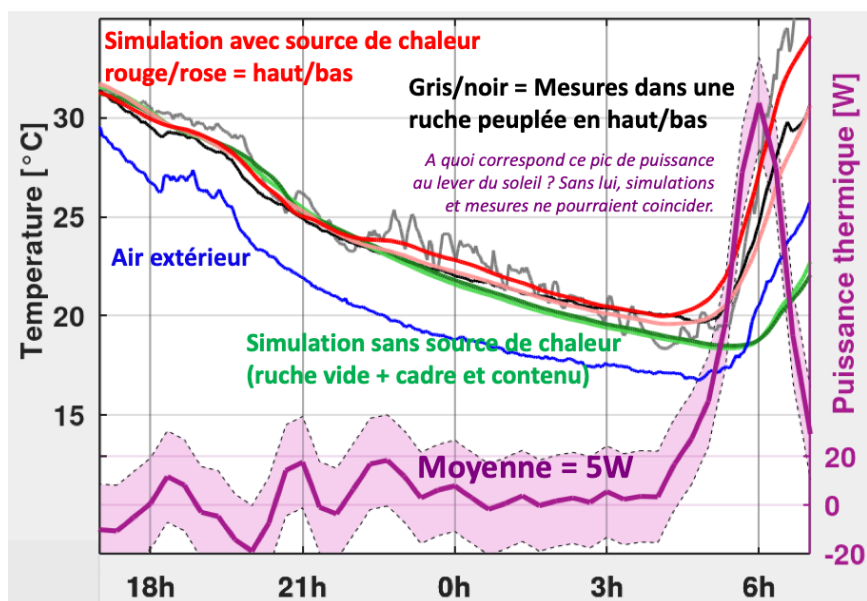


Figure 111 : Étude paramétrique du climat intérieur d'une ruche peuplée (issu de [121]).

L'étude du climat hygrothermique à l'intérieur des ruches et son influence sur la santé des colonies peuvent être mises en correspondance avec le confort de l'habitat humain. Les parois en bois intérieures des habitats jouent également un rôle de régulateur d'humidité et température qu'il peut être intéressant d'analyser, et de relier au confort ressenti par l'homme. Cette piste de recherche pourrait naturellement trouver sa place dans le cadre du projet OEHM (Optimisation Énergétique de l'Habitat Méditerranéen), piloté par l'équipe THM2 du LMGC et soutenu par la région Occitanie.

### 6.3 Interaction entre odeurs des bois et occupants

Un troisième volet de l'étude concerne l'interaction entre les composés chimiques des bois et les occupants de la ruche que sont les abeilles, mais également les *varroas*. Le *varroa* est un parasite de l'abeille, de la famille des arachnides, qui infeste de nombreuses colonies, les affaiblit en propageant des virus et qui peut souvent mener à leur destruction, si l'apiculteur n'intervient pas. Des traitements anti-*varroas* existent, ils ne sont pas toujours efficaces et, mal dosés, ils peuvent porter préjudice à la qualité du miel.

Notre hypothèse de travail est basée sur l'idée que certains bois, notamment le châtaignier, pourraient libérer des odeurs repoussantes pour le *varroa*. Pour tester cette hypothèse, nous menons deux types d'expérimentation : d'une part, des mesures comparatives d'infestation de *varroa* sur des ruches en châtaignier et en épicéa, d'autre part des mesures de comportement du *varroa* face aux odeurs de châtaignier ou d'épicéa en laboratoire.

Si cette hypothèse s'avère valide, nous pourrions alors imaginer de tirer profit de cette information en proposant des traitements anti-*varroas* à base d'extraits de bois, par exemple.

### 6.3.1 Infestation du *varroa* sur ruches en châtaignier et épicéa

Pour cette étude, nous avons mis en place un rucher expérimental constitué de 15 ruches en épicéa et châtaignier sur le terrain expérimental du Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CNRS) en collaboration avec Matthieu Rousset, chercheur INSERM à l'Institut des Biomolécules Max Mousseron. Une méthode de mesure consiste à déposer des langes graissés dans le bas de la ruche et à compter le nombre de *varroas* tombés sur ces langes une fois par semaine, afin d'évaluer l'évolution de l'infestation au cours de la saison. Les langes sont accessibles sans ouvrir la ruche pour éviter de perturber les colonies (Figure 112). Le nombre de *varroas* tombés est un indicateur du niveau d'infestation de la ruche. Cette mesure est délicate et très chronophage. Elle a été réalisée sur une quinzaine de ruches pendant 2 saisons.



Figure 112 : (a) Comptage de *varroas* sur langes graissés ; (b) Lange graissé avec gros plan sur *varroa*

Cette campagne expérimentale a été mise à mal par de lourdes pertes de colonies durant l'été 2017. La Figure 113 présente le nombre de *varroas* cumulés, comptés sur langes dans 4, puis 9, ruches en épicéa, et 3, puis 8, ruches en châtaignier, durant une première période allant de février à juin 2018, puis une seconde période de juin à septembre 2018. Le nombre de *varroas* comptabilisés semble plus important dans les ruches en épicéa pendant la première période, tandis que durant la deuxième période, la tendance s'inverse. Le nombre limité de ruches prises en compte, lié au temps nécessaire pour le comptage régulier durant toute la saison et aux problèmes de mortalité de colonies rencontrées, n'a pas permis de montrer des différences significatives sur l'infestation des *varroas* entre les ruches en épicéa et en châtaignier. Pour ces raisons, nous développons des expérimentations en laboratoire présentées dans le paragraphe suivant.

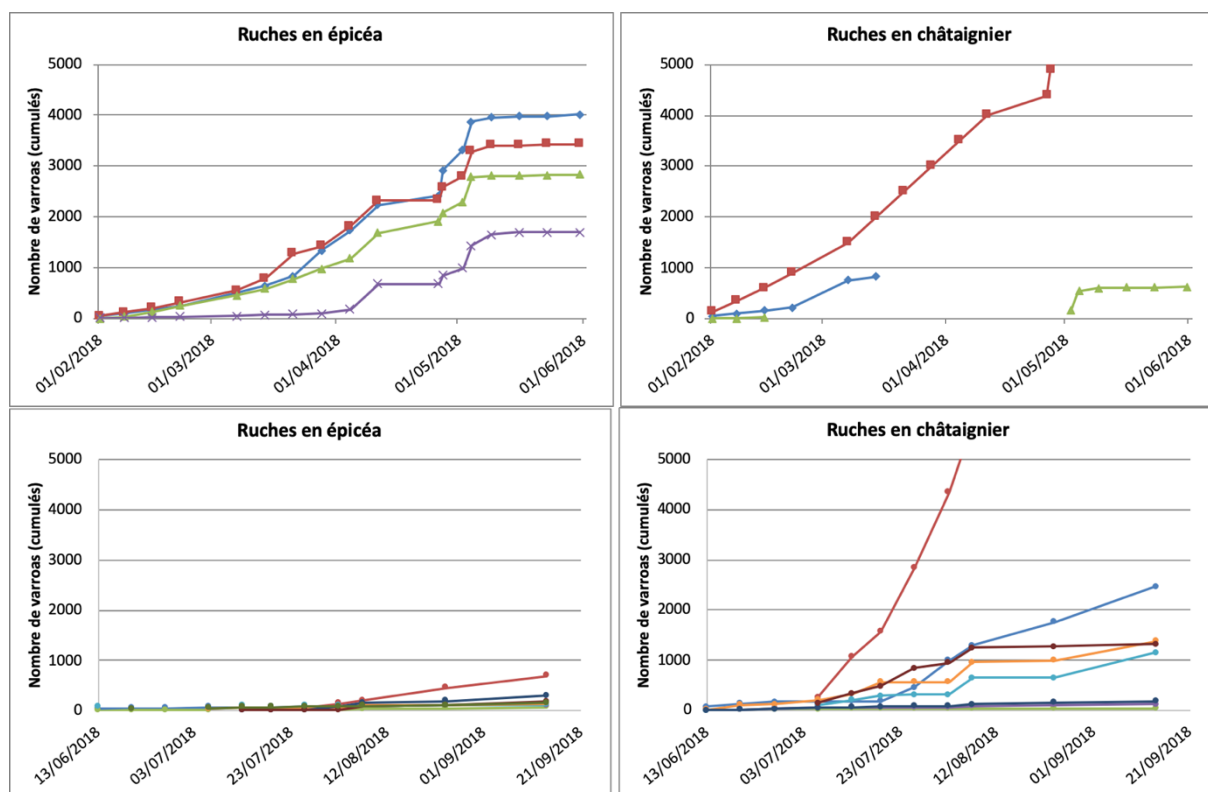


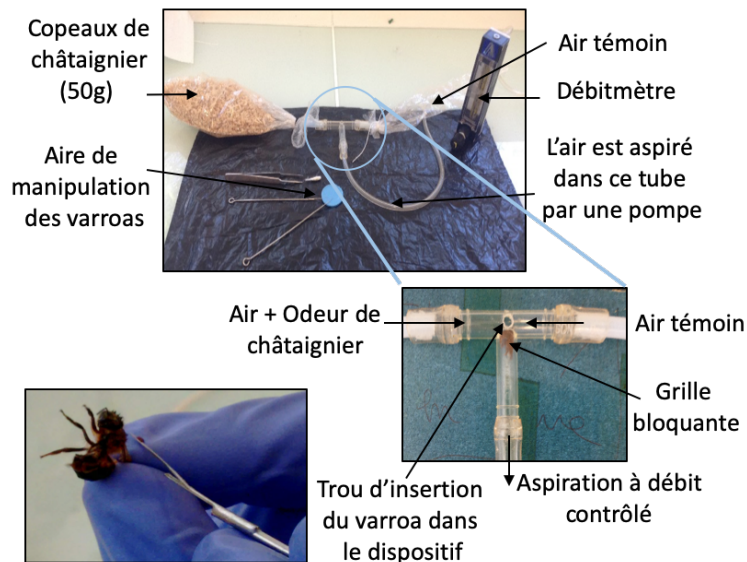
Figure 113 : Nombre de *varroas* comptabilisés sur langes graissés sur ruches en épicea et châtaignier, en février-juin (en haut), puis juin-septembre 2018 (en bas)

La difficulté de la mesure de comptage sur langes, rencontrée par tous les apiculteurs soucieux de surveiller le taux d’infestation de leurs ruches par cette méthode, nous a amené à développer un projet soutenu par la SATT visant à mettre au point une application de comptage automatique sur téléphone mobile (Projet de Maturation : Comptage automatique du *varroa*, référencé 0661). Ce projet s’est fait en collaboration avec deux entreprises : Fotonower, spécialisée dans la reconnaissance d’images à Paris, et Connecthive, développeur d’applications pour l’aide au suivi de ruchers à Alès. L’application est en cours de développement, et la SATT est actuellement à la recherche d’une entreprise d’envergure pour finaliser le produit et le déployer sur le marché. Une base de données d’images de langes graissés avec *varroas* identifiés, servant à l’apprentissage du logiciel, a été déposée par Anna Duplex en 2018.

### 6.3.2 Comportement du *varroa* faces aux odeurs

Pour évaluer le caractère attractif ou répulsif de l’odeur du bois de châtaignier vis à vis du *varroa*, des tests de choix de comportement ont été mis au point et appliqués lors du stage de Master 2 d’Agathe Valette au CEFE [138]. Placé au milieu du tube en T, le *varroa* dispose de 5 minutes maximum pour choisir de se déplacer vers l’air ou vers le châtaignier (Figure 114). Une première série de tests a montré que le *varroa* évite clairement l’odeur de châtaignier : sur 35 *varroas* ayant à choisir entre châtaignier et air, 12 n’ont pas fait de choix, 19 ont choisi l’air témoin, et seulement 4 l’odeur de châtaignier. De nouveaux tests vont être conduits lors du stage de Master 2 de Pierre-Alban Mochet en 2020 pour confirmer ce comportement, et tester d’autres essences de bois.

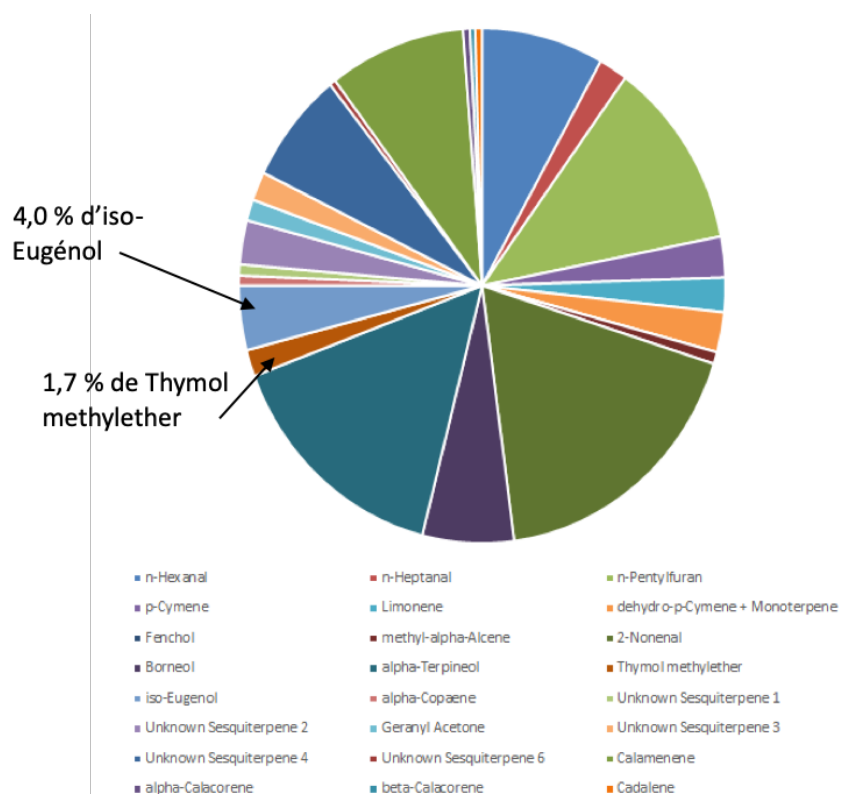




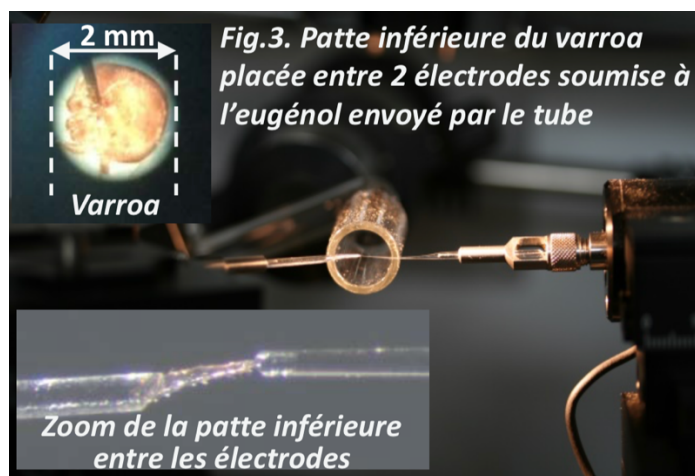
**Figure 114 : Dispositif de tests de choix olfactifs in vitro développé au CEFÉ : le *varroa* placé au milieu du tube en T choisi de se déplacer vers les copeaux de châtaignier ou vers l'air ambiant**

Pour compléter ces tests, nous avons identifié les composés volatiles émis par le châtaignier à l'aide de mesures GC-MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse) sur fibre SPME durant 24h d'extraction. Il s'avère que l'odeur de châtaignier contient deux composés répulsifs envers les acariens : l'iso-Eugénol et le Thymol méthylether (Figure 115). Ces composés chimiques vont également faire l'objet de test de comportement sur *varroas*.

Enfin, des premiers tests préliminaires d'électro-antennographie sur *varroa* ont été conduits au sein de la plate-forme d'expériences du CEFÉ. Cette expérience consiste à placer la patte inférieure du varroa, sur laquelle se situent les récepteurs olfactifs, entre 2 électrodes, et enregistrer la réponse électrique lorsqu'elle est en présence d'odeurs de bois ou composés chimiques (Figure 116). La faisabilité de ces tests ayant été montrée, ces tests seront poursuivis dans le cadre du projet SAPIC.



**Figure 115 : Identification des composés volatils émis par le bois de châtaignier par GC-MS. Deux composés sont répulsifs envers les acariens.**



**Figure 116 : Electro-antennographie sur patte de varroa pour tester la réponse à l'Eugénol**

Fort de cette expérience pluridisciplinaire, nous avons été sollicités par la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires du CNRS pour participer au colloque « Sociétés d'abeilles, sociétés humaines, une interdépendance de la préhistoire au futur » [122], dont le comité d'organisation réunissait 5 instituts du CNRS, et pour lequel je représentais l'INSIS. Suite à ce colloque, nous avons édité fin 2019 un ouvrage collectif « Abeilles, une histoire intime avec l'humanité » sous la direction de Martine Regert, pour lequel j'étais en charge de la coordination d'un chapitre [118].

#### 6.4 Une plate-forme d'observation : la ruche plate

Le réseau interdisciplinaire mis en place pour l'étude de l'interaction entre bois et habitants de la ruche nous a conduit à participer au projet SuperBeeLive, porté par Matthieu Rousset

chercheur INSERM de l'IBMM (Institut des Biomolécules Max Mousseron), démarré fin 2018 pour une durée de 4 ans, qui concerne l'« étude multidimensionnelle des relations abeilles-environnement », financé par l'I-site Muse (Montpellier Université d'Excellence) à hauteur de 350 k€.

L'objectif principal de ce projet est de développer une plate-forme expérimentale permettant de suivre et d'enregistrer le développement et le comportement d'une colonie d'abeilles, d'observer les interactions entre individus, en lien avec les paramètres biologiques, physiques, chimiques, de leur environnement et de leur habitat. Le développement de cette plate-forme, coordonné par Capucine Carlier sous contrat d'ingénieur pour 2 ans au sein du LMGC [132], se fait en étroite collaboration avec le LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier), l'IES (Institut d'Électronique du Sud) et le Département Réseaux et Télécom de l'IUT de Béziers. L'analyse du comportement des abeilles fera appel aux compétences de l'IBMM, du CEFÉ, du GRED et de l'IGMM. Cette plate-forme expérimentale a pour vocation de répondre à de nombreuses questions de recherche.

Nous concernant, nous souhaitons tester les effets physico-chimiques du bois sur le comportement de la colonie en tenant compte des dimensions spatiales et temporelles au sein de la ruche.

La ruche plate est constituée de modules unitaires (Figure 117) qui peuvent être connectés entre eux, permettant aux abeilles le passage d'un module à l'autre, et vers l'extérieur. Chaque module est constitué de 2 plaques de cire, entre lesquelles est insérée une carte électronique, support d'une matrice de micro-capteurs dédiés à l'enregistrement de mesures locales telles que la température, l'hygrométrie, les vibrations, la luminosité, l'analyse d'odeur, etc... Ces plaques sont enchâssées dans un cadre de bois, fermé par 2 plaques de verre. Des caméras infrarouges ainsi que des caméras à basse sensibilité, placées de part et d'autre de ces modules, permettent d'observer et d'enregistrer le comportement et le développement des colonies, l'évolution des alvéoles, la présence des parasites, le type et la quantité de pollens récoltés, etc... Relier les paramètres environnementaux mesurés aux flux vidéo enregistrés permet d'apporter des éléments complémentaires à la compréhension des comportements observés. De plus, ces enregistrements permettent d'explorer des phénomènes antérieurs, pour expliquer par exemple des évènements ou des comportements soudains ou inattendus.

Pour l'étude concernant le bois des ruches et son effet sur le *varroa*, nous souhaitons reproduire au sein de la ruche plate le climat hygrothermique caractérisé dans des ruches en bois classiques, diffuser des odeurs de bois (ou autres composés chimiques) au sein d'une colonie infestée de *varroas*, et observer le comportement des *varroas* confrontés à cette odeur, en caractérisant leurs déplacements au sein de la ruche.

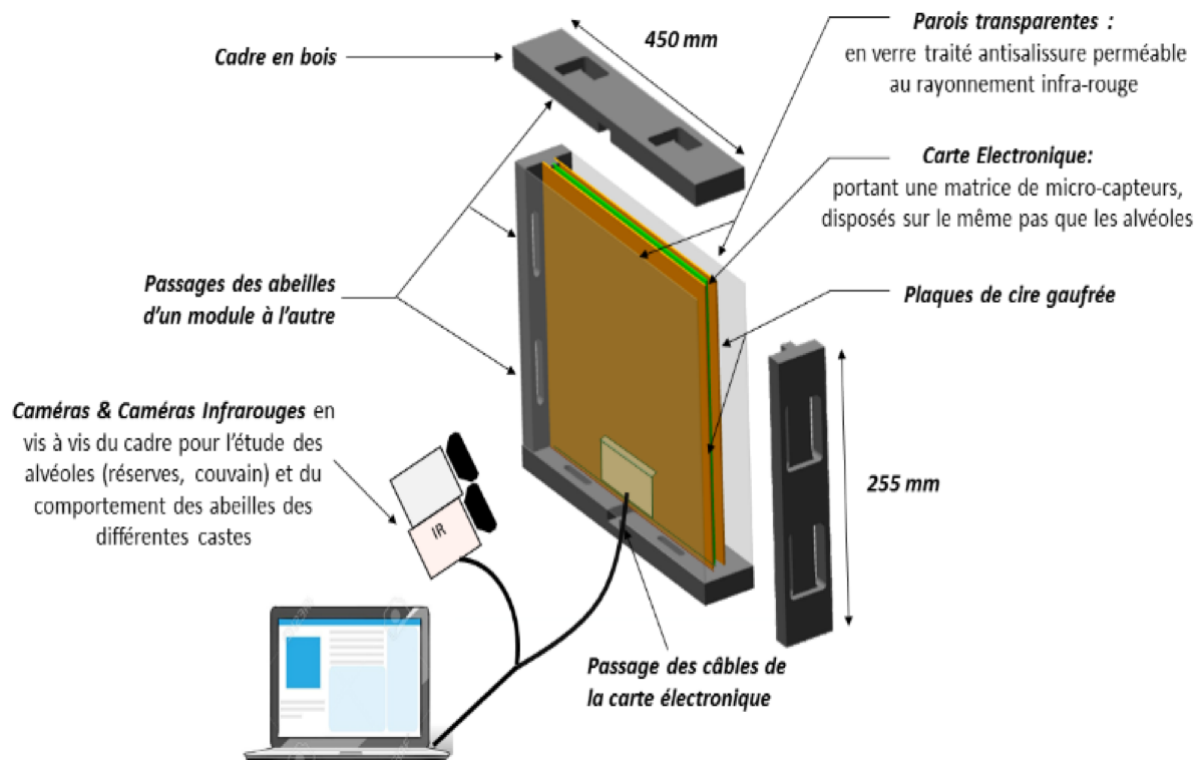


Figure 117 : Schéma de principe d'un module de la ruche plate, véritable plate-forme d'observation

Cette étude pluri-disciplinaire est enrichissante et passionnante car elle permet de confronter différents modes opératoires scientifiques pour aller vers une compréhension plus globale des comportements du vivant.

## 6.5 Conclusion et perspectives

La thématique du bois des ruches est un fort vecteur de collaborations scientifiques très diversifiées. Fortement soutenue par l'université de Montpellier, via le financement d'un post-doctorat, puis par l'intermédiaire du Labex Numev, et de Muse, mais également par la Région Occitanie (projet SAPIC), cette thématique a pu bénéficier de l'environnement local, notamment grâce au fort investissement d'Anna Duplex pour mettre en place ce réseau interdisciplinaire indispensable.

Pour le futur, nous appuyant sur ce réseau très développé, il nous semble intéressant d'étendre l'étude de l'impact du bois sur la santé des abeilles à son impact sur le confort humain, en considérant notamment la place du bois dans l'habitat. Les trois angles adoptés pour l'étude du bois des ruches, à savoir anthropologie, hygrothermie et écologie chimique, sont de bonnes portes d'entrée pour aborder cette thématique plus large. Mais il est important de collaborer également avec les architectes et les professionnels de la construction pour une telle étude. Notre position de chercheur en sciences du bois nous permet de jouer ce rôle fédérateur, qui consiste d'une part à convier les multiples disciplines concernées par une telle étude, d'autre part à se tourner vers les professionnels intéressés, tels que ceux de la construction bois, les architectes, le vecteur commun étant le matériau bois, centre de nos préoccupations.

Le recrutement d'un chercheur(-apiculteur) permanent serait parfaitement bienvenu pour continuer à porter cette vaste thématique d'actualité au sein de l'équipe Bois.

## 6.6 Publications et production scientifique liées à ce chapitre

### *Articles dans des revues internationales à comité de lecture*

- [117] Dupleix A., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Schatz B. (2020) Practices, knowledge and expectations of beekeepers and beehive suppliers regarding the wood material used for building beehives in the South of France, *Journal of rural studies* 77 (2020) : 11-20, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.04.005>

### *Coordination de chapitre d'ouvrage*

- [118] **Jullien D.**, Biron D., Bretagnolle V., Dupleix A., Garnery L., Moity-Maizi P., Decourtye A., Kouchner C., Ferrus C., Tchamitchian M. (2019) Défis et enjeux de l'apiculture de demain. In : ABEILLES – Une histoire intime avec l'humanité. Editions CNRS / Recherche Midi, pp. 112-129.

### *Contribution à ouvrages édités*

- [119] Dupleix A., Moity-Maizi P., Millet-Tréboux P., **Jullien D.**, Schatz B. (2019) *Le bois de ruches : plus qu'un contenant, un habitat*. Chapitre d'ouvrage « Savoirs et stratégies des acteurs apicoles ». Ed. La Discussion. Coordination : Dussy D.
- [120] Dupleix A., Moity-Maizi P., **Jullien D.** (2019) Fournir aux abeilles un habitat sain. In *Abeilles. Une histoire intime avec l'humanité*. Ed. Recherche Midi/CNRS.

### *Congrès internationaux*

- [121] Dupleix A., Ruffio E., **Jullien D.** (2019d) Transient hygrothermal evolution inside a hive. 46th Apimondia International Apicultural Congress, Montréal, Canada, 8-12/09/2019.

### *Congrès nationaux*

- [122] **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Dupleix A. (2019) Conférence invitée : Quelle place pour le matériau bois dans la relation abeille/ruche/homme ? Aspects physiques, écologiques et anthropologiques de la relation. Colloque « Sociétés d'abeilles, sociétés humaines, une interdépendance de la préhistoire au futur » organisé par la Mission pour les Initiatives Transverses et l'Interdisciplinarité du CNRS, Paris. (24-25/01/2019)
- [123] Dupleix A., Mui S. W., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Milliet-Treboux P., Schatz B., Pfister F., Reutenauer V., Carlier C., Ruffio E. (2018) Poster : Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites. 7èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Cluny, France (20-22/11/2018)
- [124] Dupleix A., **Jullien D.**, Carlier C. (2017) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles domestiques. 6èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Nantes, France (21-23/11/2017), 133-134
- [125] Dupleix A., **Jullien D.** (2016) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 5èmes Journées Scientifiques GDR Sciences du Bois, Bordeaux, France (8-10/11/2016), 91-92

### *Diffusion scientifique*

- [126] Dupleix A., **Jullien D.** (2019) Poster : Multidisciplinary study on wooden beehive building material: material properties impacts on domestic bees and associated beekeeping practices by humans. 8èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier (05-06/11/2019)
- [127] Dupleix A., Mui S. W., **Jullien D.**, Moity-Maizi P., Milliet-Treboux P., Schatz B., Pfister F., Reutenauer V., Carlier C., Ruffio E. (2018) Poster : Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites. 7èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier (27-28/11/2018)
- [128] Carlier C., **Jullien D.**, Dupleix A., Camp G., Rousset M. (2017) Poster : SuperBeeLive: une ruche instrumentée permettant le suivi en temps réel d'une colonie d'abeilles. 6èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier (13-14/11/2017)

- [129] Dupleix A., **Jullien D.**, Carlier C. (2017) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 6èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier (13-14/11/2017)
- [130] Dupleix A., **Jullien D.** (2016) Poster : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. 5èmes Journées Scientifiques du Labex NUMEV, Montpellier (5-6/10/2016)

*Encadrement ou co-encadrement post-doctoral et scientifique*

- [131] Dupleix A. (juil. 2019-fev.2021) Post-Doctorat Université de Montpellier : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. Financement projet Région SAPIC : Des savoirs apicoles cévenols aux connaissances pour la santé des abeilles.
- [132] Carlier C. (nov. 2018-oct. 2020) Ingénieure de recherche : Conception d'une plate-forme expérimentale, la ruche plate instrumentée. Financement projet SuperBeeLive, I-Site Muse.
- [133] Dupleix A. (août 2016-sept.2018 ; mars-nov. 2018) Post-Doctorat Université Montpellier : Contributions du matériau bois des ruches à l'activité et la santé des colonies d'abeilles. Financement UM et Labex Numev
- [134] Carlier C. (sept. 2017-mai 2018) Ingénieure de recherche Université de Montpellier : Conception du prototype d'un module de ruche instrumentée. Financement Labex Numev.

*Encadrement ou co-encadrement scientifique*

- [135] Mochet P.A. (2020) Master 2 Biodiversité, Écologie, Évolution - parcours Écophysiologie, Écotoxicologie. Tests de choix olfactifs sur *Varroa destructor*, parasite de l'abeille domestique (2.03.20-28.08.20) Encadrants : Dupleix A., Schatz B., **Jullien D.**
- [136] Kakou N'Doua Luc A., Sokore M., Kante M. (2020) Master 2 Mécanique et Ingénierie, Parcours Mécanique et Energétique, PFE : Simulation numérique des transferts thermiques et de fluides à l'intérieur d'une ruche à cadres. TREFLE, Université de Bordeaux, Encadrants : J.L. Battaglia, E. Ruffio. (Nov.19-Fév.20)
- [137] Mui S.W. (2018) Master 2 Conception Eco-Innovation et Génie des Matériaux Avancés, Option Mécatronique : Système de comptage automatique de varroas. LMGC, École des Mines d'Alès. (16.04.18-30.09.18) Encadrants : Dupleix A., **Jullien D.**
- [138] Valette A. (2018) Maîtrise de la Faune et de ses habitats, 3<sup>ème</sup> année : Mise en place de tests de comportement sur *varroas*, parasite de l'abeille, pour tester le caractère attractif ou répulsif de l'odeur du bois de châtaignier. LMGC, CEFÉ. Université de Rimouski, Québec. (8.10.18-21.12.18) Encadrants : Dupleix A., **Jullien D.**
- [139] Milliet-Treboux P. (2017). Master 1 Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud : Connaissances et représentations des apiculteurs du matériau bois des ruches. Méthodologie d'enquête auprès des apiculteurs de l'Hérault, les Cévennes et la Drôme provençale. LMGC, Montpellier SupAgro. (5.06.17-25.08.17) Encadrants : Dupleix A., Moity-Maizi P., **Jullien D.**
- [140] Dougabka D. (2017) Master 2 Modélisation et Simulation en Mécanique : Contribution du matériau bois au climat hygrothermique interne des ruches. LMGC, Université de Montpellier. (27.02.17-30.06.17) Encadrants : Dupleix A., **Jullien D.**

## 7 Projet de Recherche et d'enseignement

Pour les années à venir, je souhaite mener un projet de recherche et d'enseignement en fort lien avec les questions environnementales et sociétales du moment, qui contribuera notamment à diminuer l'impact des activités humaines sur le climat, en incitant à utiliser des matériaux à faible impact écologique tel que le bois et ses dérivés. Développer les usages du bois nécessite de toujours mieux connaître les propriétés de ce matériau et communiquer sur les avantages qu'il présente, notamment d'un point de vue environnemental.

### 7.1 A travers la formation

La promotion du bois passe avant tout par la formation : son utilisation nécessite une bonne connaissance de ses propriétés pour qu'il soit correctement mis en œuvre et qu'il puisse ainsi durer. Il est indispensable de multiplier les formations orientées vers le bois, en lien avec les besoins de la filière, pour mettre en place une offre de formation adaptée et cohérente. Le master « Sciences du bois » actuellement à l'étude pour une implantation au sein de l'université de Montpellier fait le choix de proposer une formation pluridisciplinaire, afin que les multiples disciplines concernées par les sciences du bois que sont la mécanique, la biologie, la chimie, l'écologie, le génie civil et le génie des procédés, etc.. (Figure 118) se réunissent et échangent pour comprendre et utiliser au mieux ce matériau, et lui ouvrir ainsi de nouvelles voies de développement.



Figure 118 : Illustration des multiples disciplines concernées par le Master Sciences du Bois (d'après A. Bürgers, B. Clair)

Introduire et développer des enseignements Bois dans des formations déjà existantes est également très important. Prenons l'exemple des architectes qui ne sont pas toujours correctement formés à utiliser ce matériau, et qui vont parfois chercher à le mettre en œuvre sans considérer sa spécificité : il faut enseigner aux architectes d'aujourd'hui comment mener une réflexion constructive adaptée à ce matériau. Il en est de même pour la conception de tout objet en bois.

Je souhaite m'engager davantage dans le développement et l'instruction d'enseignements Bois, à divers niveaux de formation. Il est urgent de sensibiliser le plus grand nombre à participer aux

principaux enjeux environnementaux actuels que sont la préservation des ressources naturelles, l'augmentation de la part des énergies renouvelables, la réduction de la consommation d'énergie et l'effet favorable du bilan carbone quant au dioxyde de carbone atmosphérique. La bonne gestion des ressources forestières et l'utilisation du bois peuvent contribuer à apporter des éléments de réponse à ces enjeux qui me semblent fondamentaux.

La région Occitanie est la 2<sup>ième</sup> région forestière française, mais se classe 5<sup>ième</sup> par rapport aux autres régions d'un point de vue de la récolte du bois, et 7<sup>ième</sup> sur la transformation du bois. Augmenter les compétences des professionnels, en étroite liaison avec Fibois Occitanie, qui regroupe l'ensemble des professionnels de la filière forêt bois régionale, contribuera à développer une économie plus locale.

## 7.2 A travers un projet d'équipe

Depuis juillet 2017, j'ai en charge l'animation de l'équipe Bois du LMGC. De mon point de vue, l'animation d'équipe est avant tout une mission de gestion humaine au service du collectif, qui nécessite d'être à l'écoute, de considérer les particularités et les fonctionnements de chaque individu, de veiller au respect des exigences de chacun, pour créer un environnement serein dans lequel chacun peut s'accomplir. De telles conditions de travail permettent alors de construire un projet d'équipe harmonieux et cohérent.

Cette équipe est composée à ce jour de 7 chercheurs ou maîtres de conférence « permanents », 1 chercheur CNRS de l'institut INS2I (Institut des sciences de l'information et de leurs interactions) rattaché à mi-temps à l'équipe dans le but d'opérer une conversion thématique, 1 chercheur émérite, 1 chercheuse sous contrat, 1 ingénieure de recherche sous contrat, 1 ingénieure pédagogique, 3 doctorants et 6 stagiaires de Master. Au sein du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, une force de l'équipe est de réunir des compétences multidisciplinaires complémentaires : elle associe ingénieur forestier, mécaniciens, physicien, biologiste, ingénieurs agronomes, scientifiques du bois et informaticien, et accueille ainsi des stagiaires de formations très diverses.

Nous venons d'établir le bilan de la période 2014-2019, qui a été marquée par la forte implication de J. Gril, responsable de l'équipe, dans la direction du GDR Sciences du Bois, et par son départ en juillet 2017 pour l'Institut Pascal de Clermont-Ferrand. L'organisation actuelle de l'équipe est basée sur une répartition des rôles qui permet à la fois un bon fonctionnement interne et une bonne représentation auprès des acteurs académiques et socio-économiques : des réunions hebdomadaires permettent la distribution et la gestion collective des tâches et du budget. Les nombreux enjeux sociétaux et environnementaux autour des usages du bois ont fait se multiplier les sollicitations et augmenter les thématiques scientifiques de l'équipe. L'enjeu du prochain quadriennal sera de réussir à resserrer ces thématiques, tout en augmentant les synergies au sein de l'équipe. En tant que responsable d'équipe, je souhaite me mobiliser et agir pour que les membres de l'équipe s'engagent dans cette démarche.

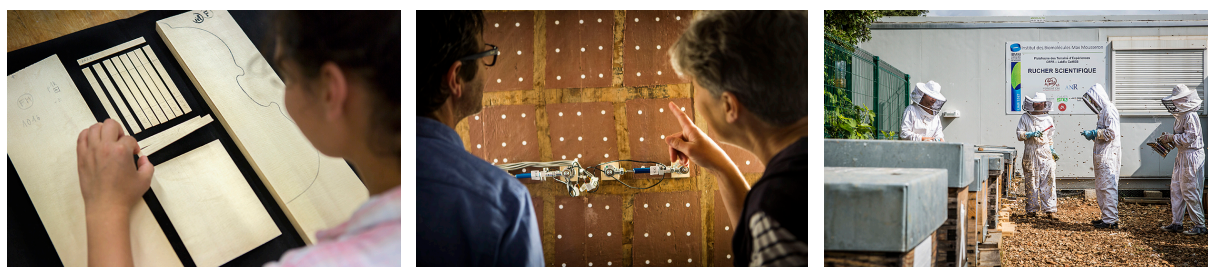
Les quatre axes thématiques historiques de l'équipe concernent la biomécanique, le temps, la diversité et la culture, complétés par un axe transversal visant à développer de nouvelles méthodes de mesure. Pour créer davantage de synergie au sein de l'équipe, je propose de faire émerger de ces thèmes trois démarches interdisciplinaires, telles qu'elles ont été présentées lors des journées d'évaluation du laboratoire par l'AERES le 5 mars 2020<sup>3</sup>.



<sup>3</sup> Journée de mobilisation nationale



Une première démarche concerne **l'étude des relations entre savoirs ancestraux et sciences** (Figure 119). Partant de recensements, d'enquêtes, d'interrogations sur les savoirs des anciens, en collaboration avec nos collègues des sciences humaines, nous identifions des problématiques de recherche. Puis nous établissons des protocoles basés sur nos compétences à l'aide d'outils scientifiques, afin de proposer puis tester des « solutions ». Finalement nous confrontons ces propositions aux artisans, aux utilisateurs. Cette démarche est appliquée aux bois de lutherie, et va s'étendre à d'autres métiers du bois tels que les charpentiers, les ébénistes (I. Brémaud) ; mais également aux bois utilisés pour la fabrication de ruches en questionnant les fabricants et/ou apiculteurs (A. Dupleix) ; aux bois des objets du patrimoine en sondant l'expérience des restaurateurs et conservateurs (D. Jullien) ; ou encore à la problématique de la casse des branches en collectant de l'information auprès des professionnels de l'arbre en ville (T. Alméras, J. Gril). Je souhaite établir des ponts entre ces différents projets afin que les intéressés puissent partager et profiter mutuellement des multiples expériences et approches des uns et des autres : l'expérience des enquêtes détaillées menées auprès d'artisans du domaine de la lutherie et de la facture instrumentale quant à leur rapport au bois a tout intérêt à être mise en relation avec les interviews des fabricants de ruches en bois, ou l'étude de discours des sites web de vendeurs de ruches quant à l'importance qu'ils accordent au matériau constitutif des ruches.

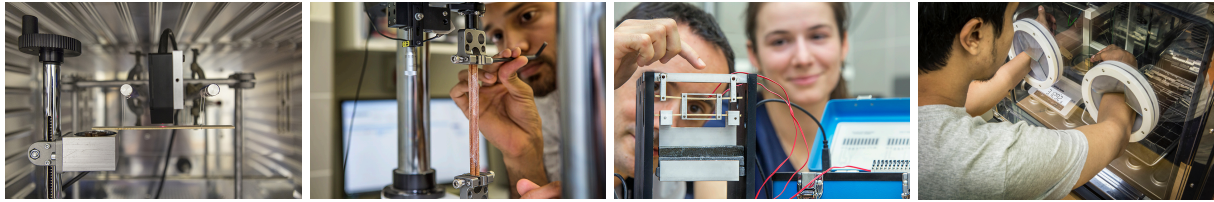


**Figure 119 : Relations savoirs ancestraux/sciences. Trois études illustrées (de gauche à droite) : perception des propriétés des bois par les luthiers, conservation-restauration d'un panneau peint du patrimoine, influence du bois des ruches sur la santé des abeilles. © Christophe Hargoues/LMGC/CNRS Photothèque**

Une deuxième démarche concerne **l'étude du comportement physico-mécanique du bois** (Figure 120). L'objectif est de caractériser l'effet du temps sur le comportement du matériau bois pour envisager son utilisation sur plusieurs échelles de temps : l'année, la décennie, le siècle ; et de décrire ce comportement différencié pour différents teneurs en eau du matériau, du bois vert au domaine hygroscopique, et pour différentes températures. Nous envisageons ce type d'étude pour une large gamme d'essences de bois, pour des chargements hygromécaniques couplés, avec l'objectif à long terme d'identifier les lois mécanosorptives sous-jacentes. Cette démarche s'applique aux structures sous charges en environnement réel, telles que celles étudiées dans l'ANR EFEUR5, qui vise à caractériser le comportement structurel des essences de bois feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 (C. Montero, S. Bardet, O. Arnould) ; mais aussi à l'étude du comportement des panneaux peints du patrimoine en environnement réel ou contrôlé (D. Jullien) ; ou encore aux conditions de séchage des bois de clarinettes, au suivi des instruments en utilisation, à l'évolution de l'effet des traitements et des vernis sur les instruments (O. Arnould, I. Brémaud, D. Jullien) ; ou bien à l'influence du bois des ruches sur le climat hygrothermique interne (A. Dupleix, D. Jullien).

Cette deuxième démarche permet d'établir des correspondances entre les résultats acquis dans le cadre de projets qui peuvent paraître à première vue éloignés, mais qui finalement contribuent à faire avancer une thématique commune, en multipliant les sources d'informations provenant d'expérimentations très diversifiées. Il est nécessaire de prendre le temps de mettre en commun

ces multiples résultats, recouper les informations, pour proposer des modèles valides pour différentes échelles de temps, différentes conditions, différentes essences, etc...

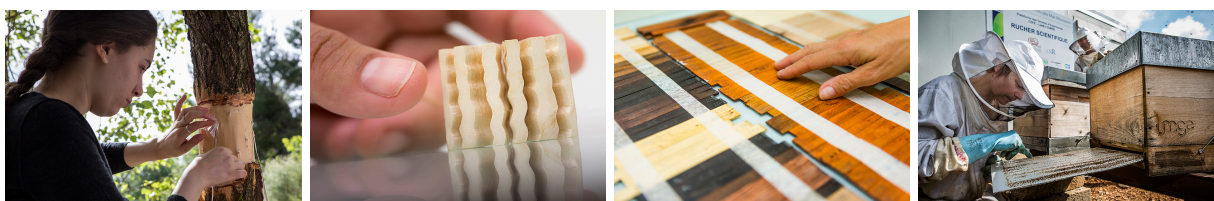


**Figure 120 : Comportement physico-mécanique du bois. Quatre expérimentations sur échantillons de bois, illustrées (de gauche à droite) : caractérisation en enceinte climatique des propriétés vibratoires, mesure des propriétés viscoélastiques par essais oscillatoires, essais mécaniques de fluage en flexion, mesures de teneur en eau d'équilibre et dimensions en enceinte climatique.**

© Christophe Hargoues/LMGC/CNRS Photothèque

La troisième démarche proposée concerne l'analyse des **couplages avec la biologie et/ou la chimie** (Figure 121). Elle vise à explorer les relations entre structure biologique et fonction mécanique, entre composés chimiques et propriétés physiques du bois, mais également les relations entre diversité biologique et diversité culturelle. Cette démarche a permis de mettre en évidence la contribution mécanique de l'écorce au contrôle postural des arbres, en identifiant le mécanisme responsable du développement de contraintes mécaniques asymétriques dans l'écorce des tiges comme étant l'interaction entre la pression radiale du bois et une structure de treillis organisée dans l'écorce interne, et permettra d'explorer la diversité des stratégies d'orientation des arbres en lien avec les espèces. Cette même démarche permet de s'intéresser à la biomécanique des branches, et notamment à la relation entre biologie du cambium et rôle mécanique joué (B. Clair, T. Alméras). L'étude de la diversité et de la variabilité biologique de bois singuliers, tels que les bois dits « figurés » dont l'orientation principale des cellules ne suit pas l'axe du tronc mais des réorientations relativement périodiques, utilisés comme bois de résonance pour l'artisanat et la lutherie, s'inscrit dans cette démarche de couplage entre mécanique et biologie (I. Brémaud). L'analyse de l'effet des extractibles sur le comportement hygro-viscoélastique des bois est un bon exemple de couplage entre propriétés physiques et composants chimiques (O. Arnould, I. Brémaud, D. Jullien). De manière moins directe, l'étude du rôle de protection biologique des extractibles sur les xylophages, en lien avec la dégradation des propriétés physiques du matériau, concerne également le couplage avec la chimie (I. Brémaud). À la marge de cette démarche, l'étude de l'impact des composants olfactifs de différentes essences de bois sur le *varroa*, parasite de l'abeille, et donc indirectement sur la santé des abeilles, concerne des expérimentations d'écologie chimique, mais sans lien direct avec les propriétés mécaniques du matériau bois (A. Duplex, D. Jullien).

Là encore, mon souhait est de susciter et faciliter des interactions entre les différents projets. Par exemple, l'étude de la croissance du cambium gagne à être mise en relation avec l'étude de la structure ondulée de bois singuliers, ou encore l'effet des extractibles sur xylophages mérite d'être confronté à l'éventuel effet répulsif des composés olfactifs de certains bois sur les *varroas*.



**Figure 121 : Couplage avec la biologie et/ou la chimie. Quatre thématiques illustrées (de gauche à droite) : mesures de déformations résiduelles de maturation ; échantillon d'érable ondulé, bois de résonance dit**

« figuré » très utilisé en ébénisterie et lutherie ; lot d'éprouvettes aux composés chimiques divers pour essais vibratoires ; impact de l'essence de bois sur la charge en *varroas* (parasite de l'abeille) de ruches.  
© Christophe Hargoues/LMGC/CNRS Photothèque

Les trois démarches décrites visent à faire émerger davantage d'interactions entre les chercheurs de l'équipe, tout en resserrant nos thématiques scientifiques.

### 7.3 À travers les projets dans lesquels je souhaite m'impliquer

Les travaux relatés dans ce manuscrit témoignent de mon activité sur les quatre thèmes de l'équipe durant toutes ces années, avec une répartition de mes implications sur ces thèmes fluctuante au fil du temps, dépendant souvent des opportunités de projet ou de financement.

Les questions qui continuent de m'animer pour la suite de mes recherches ont pour objectif : (i) d'élargir nos connaissances sur la genèse du matériau, d'un point de vue mécanique, (ii) de toujours mieux caractériser le comportement du bois, notamment avec le temps, (iii) de contribuer à préserver le patrimoine bois de notre société (iv) d'inciter à développer les usages du bois, pour un environnement plus sain, (v) de valoriser la multiplicité de la ressource, la diversité des bois.

Concernant l'étude de la **genèse du matériau**, je souhaiterais poursuivre des mesures expérimentales de déformations résiduelles, qui accompagnent la formation du matériau, en lien avec la morphologie évolutive de l'arbre, pour alimenter les modèles de champ de contrainte du bois dans l'arbre, tenant compte des scénarios de croissance, en lien avec T. Alméras et B. Clair. Nous pourrions notamment collaborer au sein du projet « Branches » porté par J. Gril qui a pour objectif de mieux comprendre les principes de la tenue mécanique des branches maîtresses, qui défient la gravité. Nous collecterons des données expérimentales sur des branches saines et des observations post-casse en vue d'améliorer les modèles de comportement, et d'expliquer les phénomènes sous-jacents, puis de proposer des pistes pour la détection et la prévention de la casse survenant dans des conditions environnementales extrêmes (température élevée, neige, vent violent).

Sur cette thématique, je souhaite continuer à participer au réseau international « Plant Biomechanics », qui se réunit tous les 3 ans, et qui traite de sujets passionnants.

Par ailleurs, je souhaite continuer à enseigner la problématique de la biomécanique des arbres à différents niveaux de formation de l'université de Montpellier : L1 Biologie, M2 Mécanique, et peut-être bientôt Master Sciences du Bois.

Prédire le **comportement du bois à différentes échelles de temps** est indispensable pour sa bonne utilisation. Je souhaite m'appuyer sur la caractérisation d'objets en bois du patrimoine, tels que les panneaux peints ou les bois de charpente, qui ont connu une utilisation en structure durant plusieurs siècles, pour établir des correspondances entre le comportement d'un bois nouvellement soumis à un environnement hygroscopique variable et celui d'un bois qui a subi des variations hygrothermiques répétées durant des années. Il s'agit de comparer le comportement d'échantillons de bois récemment issus de l'arbre avec des échantillons issus de poutres vieilles de 800 ans, comme celles de la charpente de Notre-Dame-de-Paris, ou bien avec le comportement de panneaux peints vieux de plusieurs siècles, afin de mieux prédire le comportement des bois d'aujourd'hui. Ce travail pourra se faire en collaboration avec C. Montero, qui cherche notamment à caractériser le comportement en fluage de poutres de grandes dimensions, en fonction de chargements hygrothermiques variables.

Tout en collectant des données expérimentales sur des **panneaux de bois de notre patrimoine** culturel, alimentant les études décrites dans le paragraphe précédent, je souhaite continuer à travailler en étroite collaboration avec les acteurs de la conservation et de la restauration pour trouver ensemble des manières de maintenir au mieux ce patrimoine en état, et orienter si possible les choix de restauration vers des solutions adéquates et pérennes. Il me semble nécessaire d'adopter deux démarches en parallèle pour progresser sur cette problématique : d'une part inciter les musées à caractériser la forme et l'état des œuvres, à intervalles réguliers, à l'aide d'outils numériques, en suivant un protocole établi, permettant de suivre de manière quantifiée l'évolution d'un grand nombre d'œuvres, et prévenir d'éventuelles situations à risque – ces descriptions « numériques » viendraient en complément des actuels constats d'état, effectués au préalable du prêt d'une œuvre par exemple, mais nécessiteraient d'être parfois effectuées à une plus grande fréquence; d'autre part, catégoriser les situations rencontrées, afin de classer les problématiques par type, et étudier ensuite de manière plus approfondie le comportement de quelques objets de chaque type, afin de rechercher des réponses plus globales à apporter à nos interlocuteurs du monde de la conservation-restauration.

L'étude actuellement menée sur *La Sainte Trinité couronnant la vierge* nous informe sur les variations dimensionnelles de ce panneau de chêne avec ou sans cadre, avec ou sans renfort, avec un nouveau type de châssis, en fonction des variations hygrothermiques de son environnement. La suite de ce travail consistera à extraire les informations collectées sur ce panneau pour les extrapoler au cas d'autres panneaux de « même type », à des situations « similaires ». Nous pouvons nous aider pour cela de modèles numériques, mais ils ne sont pas suffisants, la collecte de mesures expérimentales est indispensable pour alimenter et valider ces modèles, le problème étant notamment que les informations collectées ne sont que partielles et indirectes, de part la nature protégée des œuvres d'art, qui ne peuvent se prêter à toutes sortes d'expérimentations. Il faut donc être en mesure de rassembler les informations collectées sur divers objets, dans diverses situations, pour les confronter, les recouper. L'ensemble des six panneaux décrits dans les parties 3 et 4.1 servira de base à cette démarche de confrontation et comparaison de situations. Cette base de données de panneaux pourra être développée dans un premier temps en collaboration avec M. Bousvarou, chargée des campagnes de restaurations du musée Fabre, et P. Stepanoff, conservateur général du patrimoine au musée Fabre, pour ensuite être élargie au sein de la communauté internationale ICOM-CC (Comité international pour la Conservation) qui réunit restaurateurs, scientifiques et conservateurs du monde entier.

Concernant les développements numériques liés à cette problématique, je souhaiterais œuvrer pour qu'on dispose d'un outil permettant de simuler les comportements hygromécaniques, viscoélastiques et mécanosorptifs, reliant une histoire climatique donnée à une évolution des propriétés mécaniques. Une manière de mettre en place cet outil serait de réaliser un couplage entre le code Transpore3D, développé par l'institut AgroParisTech, qui résout les équations de transferts de masse et de chaleur couplés dans un milieu poreux, et qui est utilisé dans le domaine des sciences du bois, et le code LMGC90 qui permet de simuler le comportement mécanique des matériaux, et permet notamment d'implémenter des lois de comportement mécanique complexes et d'évaluer les champs de contraintes et de déformations.

La mise en correspondance des mesures expérimentales effectuées sur panneaux peints avec les modélisations fines issues de cet outil permettra d'enrichir notre compréhension du comportement complexe de ces objets pour lesquels nous ne pouvons recueillir que des informations partielles.

Ce travail sur les panneaux peints du patrimoine pourrait s'élargir dans l'avenir au patrimoine maritime en bois, en mettant notre expertise au service de la conservation. La région Occitanie fait état de 2 navires de pêche localisés à Port-Vendres et Palavas-les-Flots et 1 navire de charge localisé à Port-Vendres, en bois et protégés au titre des monuments historiques.

Je suis profondément convaincue que promouvoir et développer les usages du bois contribuent à améliorer notre environnement. L'étude sur le **bois des ruches** est fortement liée à l'environnement, en s'intéressant notamment à la relation entre le vivant et le matériau. Après quatre années de collaboration, cette large thématique en est encore à ses prémices et les questions posées sont toujours multiples et passionnantes. Les trois orientations données dès le départ à cette recherche, à savoir les axes anthropologie, hygrothermie et écologie chimique, sont loin d'avoir été totalement explorées, et ouvrent au contraire de nouvelles pistes de découverte. Les différentes disciplines ont été réunies et ont déjà permis de progresser dans chaque axe.

L'axe **anthropologie** a démarré l'analyse des connaissances et des représentations des fabricants et vendeurs de ruches du matériau utilisé pour ces habitats, et de son effet sur la santé des colonies d'abeilles. Les enquêtes menées vont être complétées par l'analyse de sites web, en collaboration avec un sociologue. Ce même questionnement pourrait être mené concernant l'habitat humain. Quelle est la place du bois dans les choix de matériaux utilisés pour l'habitat des hommes, quelles représentations les architectes et les constructeurs se font-ils de l'effet du matériau sur la santé de l'homme, qu'en est-il des usagers ? Les études anthropologiques que nous menons sur les ruches mériteraient d'être mises en relation avec des études menées sur l'habitat de l'homme.

L'axe **hygrothermie** s'intéresse au climat hygrothermique de la ruche, impactant la santé des abeilles, qui consacrent une partie de leur énergie à réguler leur habitat en termes de température et humidité. Cette recherche est d'autant plus importante dans le contexte actuel de réchauffement climatique, de pollution, de baisse de la biodiversité, de développement de parasites, maladies, virus, qui rendent les abeilles toujours plus vulnérables, et pourtant indispensables à la pollinisation, à la biodiversité, à l'agriculture. La communauté des apiculteurs est fortement intéressée par cette thématique, et cherche à y contribuer en instrumentant leurs ruches avec des capteurs de température, largement répandus sur le marché grâce à l'explosion de nouvelles technologies. Cependant l'exploitation de ces mesures n'est pas simple, car la mesure de température est très sensible à divers facteurs contextuels. De notre côté, le modèle thermique est bien avancé. Nous nous efforçons à présent de caractériser expérimentalement les propriétés des matériaux mis en jeu, afin d'ajuster au mieux le modèle de la ruche aux mesures expérimentales sur ruches vides puis peuplées, dans le but d'en tirer à l'avenir des informations sur la santé des colonies. La prise en compte de l'humidité, couplée à la température, est un défi complexe qui devra faire l'objet de prochaines avancées du modèle. Un gros travail de recherche bibliographique sur la thématique de l'hygrothermie des ruches est actuellement initié et a pour objectif d'écrire un article de review, permettant de faire un bilan des avancées dans le domaine, et relater notamment l'explosion de l'intérêt pour cette thématique au cours des dernières années.

Cet axe de l'étude peut également être mis en correspondance avec les études concernant le confort de l'habitat humain. Les fervents adeptes du matériau bois, dont je fais partie, sont souvent convaincus que la présence de parois intérieures bois dans l'habitat a un effet bénéfique sur leur bien-être : le matériau joue un rôle de régulateur d'humidité et de température, à relier au confort et bien-être ressentis par l'homme. Ces pistes de recherche pourraient être développées en rejoignant le consortium élaboré dans le cadre du projet OEHM (Optimisation Énergétique de l'Habitat Méditerranéen), piloté par l'équipe THM2 du LMGC et soutenu par la région Occitanie, qui pourrait alors voir ses problématiques s'étendre au matériau bois.

L'axe **écologie chimique** vise à caractériser l'interaction entre les composés chimiques des bois et les occupants de la ruche que sont les abeilles, mais également les *varroas*. Quatre types d'expérimentations ont été entrepris ou envisagés pour cette caractérisation : (i) à l'échelle de la ruche, le suivi au cours du temps de l'infestation de *varroas* sur ruches en châtaignier et ruches en épicéa, (ii) à l'échelle du *varroa*, des tests de comportement (attraction/répulsion) de

l'acarien vis-à-vis de composés olfactifs de différents bois (iii) à l'échelle de la patte du *varroa* ou de l'antenne de l'abeille, des tests d'électro-antennographie qui enregistrent la réponse électrique du récepteur de l'animal en présence de composés olfactifs de bois, (iv) à l'échelle de la colonie d'abeilles, en observant le comportement de la colonie au contact d'odeurs de bois, au sein d'une ruche d'observation instrumentée. Ces expérimentations sont souvent très chronophages et fortement dépendantes de facteurs extérieurs parfois difficiles à maîtriser, tels que le maintien des colonies au cours des expérimentations, l'accès au matériel animal au moment voulu, la disponibilité des plates-formes expérimentales sur la période propice, etc... Des premiers résultats encourageants ont néanmoins été obtenus. La crise sanitaire du printemps 2020 a totalement empêché les campagnes d'expérimentation prévues, et bloqué provisoirement le développement de la ruche d'observation instrumentée. Nous souhaitons vivement pouvoir suivre, dans les années à venir, les protocoles élaborés par nos soins.

Là encore, élargir par la suite cette thématique à l'homme, afin de déterminer les effets des odeurs de bois sur sa santé et son bien-être, est une démarche motivante, qui pourrait contribuer à multiplier l'utilisation de ce formidable matériau naturel, et qui est déjà initiée à l'échelle internationale.

Je remercie sincèrement Anna Duplex d'avoir initié et porté cette large thématique au sein de l'équipe bois, et de m'avoir embarquée dans cette aventure pluridisciplinaire, extrêmement riche et passionnante, et qui pour moi fait sens dans le monde d'aujourd'hui. J'espère vivement continuer à contribuer au développement de ces recherches dans l'avenir, en œuvrant à la mise en place d'un cadre de travail adapté aux besoins des multiples acteurs, si différents soient-ils.

Une des richesses de la **ressource bois** est qu'elle est multiple et diversifiée. Mettre en relation les propriétés des bois avec leurs usages permet de tirer le meilleur parti de chaque essence de bois, mais également de trouver des espèces de remplacement pour les espèces menacées, telle que le genre *Dalbergia*, inscrit à l'annexe II de la CITES par exemple, pour ne citer que lui. Je souhaite également contribuer à valoriser au mieux la **diversité des bois**, en participant notamment au projet NumBois, porté par Jean Gérard et en collaboration avec Iris Brémaud, qui vise à numériser la formidable xylothèque du Cirad, ainsi qu'à mettre en valeur et donner l'accès aux données des bois correspondants au plus grand nombre. Le partage de ce patrimoine scientifique inestimable contribuera aussi à la promotion de la plus grande diversité des bois.

Je suis consciente que ce projet de recherche est vaste et ambitieux. Il décrit les directions que je souhaite poursuivre dans l'avenir. Sa réussite et son avancement dépendront fortement des moyens matériels et humains que j'arriverai à réunir pour le mener. L'énergie à déployer aujourd'hui pour obtenir ces ressources est malheureusement décuplée par les politiques de recherche actuellement menées. En 2020, le monde de la recherche et de l'enseignement souffre de lourdeurs administratives, décourage les plus jeunes en leur imposant notamment une précarité toujours plus forte, épuise les plus âgés en leur imposant toujours plus de contraintes pour un travail peu valorisé, et anéantit ainsi l'avenir même de la recherche. C'est dans ce contexte que ce projet devra néanmoins être mené.

## Conclusion

Les travaux de recherche auxquels j'ai contribué abordent différentes problématiques liées au matériau bois, partant du bois vert dans l'arbre vivant et de son état mécanique, mis en place pendant la formation du matériau et la croissance de l'arbre, pour aller jusqu'au bois en utilisation, avec des applications aussi diverses que les instruments de musique, tels que les clarinettes, les panneaux en bois peints du patrimoine ou encore les ruches en bois. Le point central de ces travaux concerne les multiples facettes du matériau bois, qui représente pour moi un formidable champ d'exploration, conviant des disciplines aussi diverses que la physique, la mécanique, la biologie, la chimie, l'écologie, la foresterie, la génétique, l'écologie, l'anthropologie... pour sa compréhension, et que nous regroupons sous le terme Sciences du Bois. Établir le contact et le dialogue entre ces différentes disciplines nécessite de la volonté, de l'énergie, du temps. Les réseaux se mettent en place progressivement. Les méthodes se rejoignent, s'accordent, se complètent. Un langage commun est mis en place. Les relations humaines sont au cœur de la démarche. Il m'a semblé important de rapporter dans ce manuscrit l'intérêt que j'accorde à ce processus.

Les deux réseaux dans lesquels je me sens actuellement la plus investie, et qui concentrent la plus grande partie de mon activité, concernent les objets en bois du patrimoine et le bois des ruches, deux thématiques très différentes, mais toutes deux riches d'interactions et dont les applications sont tournées vers la société.

L'animation de l'équipe Bois du LMGC est également une mission qui me motive, et j'espère vivement contribuer à développer les interactions entre les membres de l'équipe, afin que chacun puisse s'appuyer sur ses qualités et ses compétences pour participer à la réussite d'un projet d'équipe cohérent, dans lequel chacun trouve sa place et s'épanouit.