



HAL
open science

Comportement mécanique des éléments de structure en bois de sapin pectiné soumis à un environnement variable

Arthur Bontemps

► **To cite this version:**

Arthur Bontemps. Comportement mécanique des éléments de structure en bois de sapin pectiné soumis à un environnement variable. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Clermont Auvergne, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0016 . tel-04151652

HAL Id: tel-04151652

<https://theses.hal.science/tel-04151652v1>

Submitted on 5 Jul 2023

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

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

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

Arthur BONTEMPS

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Titre de la thèse :

**Comportement mécanique des éléments de
structure en bois de sapin pectiné soumis à un
environnement variable**

Soutenue publiquement le 16 mai 2023 devant le jury :

Mme. S. Bardet, MCF HDR, LMGC
M. W. Seim, Pr., Université de Kassel
M. P. Biwolé, Pr., IP
Mme. M. Chaplain, MCF, I2M
M. F. Dubois, Pr, GC2D
M. J. Gril, DR., CNRS
M. R. Moutou Pitti, MCF HDR, IP
M. G. Godi, Ing., IP
M. E. Fournely, MCF, IP

Rapportrice
Rapporteur
Président du jury
Examinatrice
Examineur
Co-Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Invité
Invité

Résumé

Le sapin pectiné (*Abies alba*) est une essence emblématique de la région Auvergne Rhône-Alpes (AuRA) mais dont l'exploitation fait face à des problèmes de séchage. Une enquête de terrain auprès de professionnels et d'experts de la filière bois de la région met en évidence les excellentes performances du sapin en construction mais associe les difficultés de séchage au phénomène des poches d'eau piégées dans le duramen. Ce mémoire de thèse présente une étude du comportement mécanique long-terme des éléments de structures construites en bois de sapin vert ou partiellement séché. La maîtrise de ce sujet peut appuyer des solutions constructives s'affranchissant d'un séchage complet.

Ce travail de recherche porte essentiellement sur le développement et l'analyse d'une campagne expérimentale de poutres de sapin pectiné en dimensions d'emploi, à l'état vert ou partiellement séché. Cette campagne consiste en des essais de flexion et de fluage sur des poutres entaillées et des essais de diffusion sur petites éprouvettes. Le fluage et la mécanique de la rupture associés aux variations thermo-hydriques sont ainsi étudiés. Les essais de fluage ont été réalisés en environnement extérieur semi-abrité et une méthode de suivi de marqueur à été développée pour enrichir les mesures. La précision et les capacités qu'offrent cette méthode sont détaillées. Les résultats des essais de flexion montrent l'incapacité des propriétés mécaniques initiales à prévoir la résistance d'une poutre entaillée à l'échelle 1, celle-ci étant conditionnée par la propagation de fissures qui dépend pour beaucoup de la position des noeuds et de la pente de fil. Les résultats des essais de fluage mettent en évidence l'augmentation de la flèche centrale pour des bois initialement vert, mais montrent aussi l'importance de l'exposition au soleil ou de la propagation de fissures, de nouveau dépendante de la position des noeuds. Un modèle analytique de calcul de longueur de fissures basé sur des considérations géométriques est détaillé et validé sur les propagations de fissure respectant les conditions qu'il impose. Contre-intuitivement, une observation des faciès de rupture montre que les fissures sont toujours montantes quelle que soit la pente de fil. Enfin, un modèle différences finies de calcul de diffusion est développé et appliqué sur des pesées automatiques, permettant d'estimer les propriétés de diffusion du sapin pectiné du Massif Central.

Mots clés : Sapin pectiné, fluage, diffusion, rupture, poutres entaillées.

Abstract

Silver fir (*Abies alba*) is an emblematic Auvergne Rhône-Alpes species but facing drying issues. An investigation with professionals and experts from the regional wood industry relates the drying issues with wetwood trapped in heartwood of silver fir logs. This thesis is a study of long-term mechanical behaviour of timber element from green or partially dried silver fir wood. Mastering this subject may support construction techniques that do not require drying.

This research work is mainly based on the development and analysis of an experimental campaign on silver fir structural-element scale beams, green or partially dried. This campaign consists on bending tests and creep tests on notched beams, and diffusion tests. Creep and fracture mechanics with the effect of thermo-hydric variations are studied. The creep tests are realised under outdoor semi-sheltered conditions and a marker tracking technique had been developed in order to improve the measurements. Precision and abilities of this technique are described. Results on bending tests show that initial mechanical characteristics are unable to predict the beams' strength, the later is rather related to crack propagation that depends on knots positions and grain angle. Results on creep tests show that central deflection is on average higher for initially green beams, but also highlight the impact of sun exposure and crack propagation, that still depends on knots position. An analytical model of crack length calculation based on geometrical consideration is described and validated on crack propagations that stay under the hypothesis of the model. Unexpectedly, fracture facies show that crack propagation are always rising regardless of the grain angle. Finally, a finite differences model of water diffusion is described and applied to automatic weighing of wood samples, allowing to estimate diffusion properties of Massif Central silver fir wood.

Key words : Silver fir, creep, diffusion, rupture, notched beams.

Remerciements

Bien que mon nom soit associé à ce manuscrit, les travaux présentés ici sont les échos de collaborations, d'entraide, de conseils et d'accompagnement. Je tiens ainsi à prononcer des remerciements. J'y vois aussi l'occasion de tenter de mettre des mots sur des relations, longues ou éphémères, qui ont été pour moi constructives et enrichissantes.

Je remercie la région Auvergne Rhône-Alpes et l'Université Clermont Auvergne, financeur de la thèse par la bourse Contrat Plan État-Région et des dispositifs expérimentaux par le Chèque Recherche-Innovation et le Pack Ambition Recherche, rien de ce travail n'aurait été possible sans eux.

Je remercie sincèrement Joseph Gril, co-directeur de thèse, ton aide était devenue tellement naturelle que je ne t'ai finalement que peu adressé ma gratitude. Je te remercie aussi pour toutes les opportunités que tu m'a offertes : une participation à la journée Joconde, à l'école thématique Pluribois d'Aspet ou encore à toutes les journées du GDR sciences du bois, autant d'événements inoubliables. Je remercie Rostand Moutou-Pitti, co-directeur de thèse également, tu m'as toujours rassuré par ton optimisme et encouragé à communiquer mon travail.

Je remercie mes co-encadrants : Gaël Godi, pour tout ce que tu m'as appris et pour ton implication dans mes campagnes expérimentales, tu m'as assurément évité bien des difficultés. Eric Fournely, tu as été le vivier de nombreuses idées par ta grande culture, et ta bonne humeur est particulièrement agréable. Je vous remercie aussi énormément pour toutes vos relectures, réunions et conseils qui ont alimentés ce travail.

Je remercie Michèle Adamczyk, tu as relu et corrigé ce mémoire avec une efficacité exceptionnelle et as assurément amélioré la qualité de la rédaction. Je remercie également le reste de la famille Adamczyk, pour votre bienveillance, votre soutien et votre aide à l'organisation de mon pot de thèse !

Je remercie Benoît Blaysat, l'appareil photo que tu m'as prêté a été bien utile pour la campagne expérimentale. Je remercie aussi Raphaël Langlois, vous deux m'avez beaucoup aidé à y voir plus clair sur les méthodes de mesure de champ et avez été de bons conseils lors de nos diverses discussions.

Je remercie Anaïs Laffon, Nicolas Da Silva et Jean Pierre Mathé de FiBois AuRA, pour tout le temps et l'intérêt que vous m'avez accordé au cours de ces quatre dernières années.

Je remercie tous les permanents·es du département Génie Civil de Polytech, Bastien, Omayma, Mathilde, Aurélie, Sebastien, Evelyne, Pierre, Hamid, et plus récemment Chaaima et Nathanaëlle. Je me suis senti accueilli et j'ai toujours eu de bonnes relations avec vous.

Je remercie également le personnel administratif et technique qui m'a permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions matérielles, financières et humaines : Philippe Fargeix et Eric Nivoix pour toutes vos idées et coups de mains pendant ma campagne expérimentale. Olivier Touret, je n'ai jamais eu de soucis informatique et c'est bien grâce à toi. Françoise Cialdella et Jacqueline Madebene, parce que sans vous l'administratif aurait été bien plus compliqué.

Bien entendu, je n'oublierai pas la salle des doctorants·es B202. N'importe quel·le étudiant·e ayant déjà travaillé dans cette pièce pourra dire à quel point l'ambiance y est conviviale, cosmopolite et enrichissante. Je remercie donc tous mes collègues doctorants·es ou Postdoc, certains·es devenus·es amis·es, pour qui j'ai ainsi une grande admiration et qui m'ont durablement impressionnés et influencés : Rime, Caroline, Phan, Arnoul, Khaled, Hichem, Mohamed Chetoui, Arnould, ou encore Sugimoto, Mohamed Tahiri, Martian, Fengdong, Lorenzo, Bilal, Jeanne, et bien d'autres encore. Le groupe soudé que nous avons formé ne s'étiolera pas.

Je remercie Florence Mathieu, Sarra Bouhleb, Théo Lefranc, Théo Sallat et Charles-Hubert Granet, stagiaires avec qui j'ai travaillé et qui ont significativement contribué à l'avancement de ce travail de thèse. De plus amples remerciements leurs sont adressés au début des parties sur lesquelles ils et elles ont contribué.

Je remercie mes amis de toujours : Fleur et Sylvain, cette rencontre en classe préparatoire est un bien heureux événement et notre relation est pour moi une expérience humaine exceptionnelle. Nicolas et Quentin, le lycée puis nos débuts à Reims, même si les occasions de se voir ne sont pas fréquentes, je suis toujours enthousiaste et ravi de vous voir. Toute l'équipe d'Ingénieur Sans Frontières Nord, les "Bilous" de Lille, Jean, Corentin, Hugo, Noah, Anissa, Chloé, Antoine, Baptiste et tous·tes les autres. Je vous admire pour votre courage, votre humanité et votre esprit critique. Vous m'avez profondément inspirés.

Je remercie ma famille : Maman, pour ton soutien inconditionnel et ton amour qui me réchauffe et me reconforte. Papa, tu es musicien mais c'est aussi et surtout le goût pour la physique et les sciences que tu m'as apporté, c'est finalement cette orientation de carrière que je choisis. Camille, quel bonheur d'avoir une soeur comme toi, j'ai gagné en confiance grâce à toi. Alan, équivalent à un frère, tant de bons moments avec toi. Bien sûr aussi Julie et Samu, Sylvie et Chouf, Isabelle et Anthony, Chloé, Émilie, Critou, Sabine, Françoise, Alexia et Mathieu, Mélanie et Anthony, Amélie, et tous·tes les autres.

Je remercie enfin Pénélope, tu m'as apporté tant de soutien, d'amour et de brillants conseils ! Je suis heureux que tu sois dans ma vie, je t'aime.

Table des matières

Page de garde	1
Résumé	1
Abstract	2
Remerciements	3
Nomenclature	12
Liste des figures	20
Liste des tableaux	22
Introduction générale	23
A État de l’art des données sur le sapin pectiné	27
1 Introduction à l’étude du matériau bois de sapin pectiné	29
1.1 Généralités sur le bois de résineux	29
1.1.1 Anatomie et structure du bois des résineux	29
1.1.2 Propriétés usuelles du bois	35
1.2 De la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes à la recherche scientifique sur le matériau	39
1.2.1 Place du sapin pectiné dans la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes .	39
1.2.2 Travaux de recherche à Clermont Auvergne INP	42

2	Les usages et problématiques du sapin pectiné dans la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes	46
2.1	Enquête auprès de la filière bois	46
2.1.1	Matériel et méthodes	46
2.1.2	Résultats et discussion	48
2.2	Étude bibliographique du phénomène des poches d’eau dans le duramen . . .	52
2.2.1	Définition et hypothèses sur leurs origines	52
2.2.2	Conséquences physiques	58
2.2.3	Bilan sur le phénomène des poches d’eau dans le duramen	61
	Conclusion de la partie A	62
B	Matériel et mises au point	64
3	Caractérisation du matériel d’étude	66
3.1	Approvisionnement	66
3.1.1	Informations sur le lot de poutres	66
3.1.2	Observations des cernes, des fentes initiales et des poches d’eau . . .	67
3.2	Essais non destructifs et regroupement	70
3.2.1	Essais vibratoires et mesures d’infradensité	70
3.2.2	Résultats et observations sur la caractérisation du lot de poutres . . .	72
3.2.3	Stratégie expérimentale	76
3.3	Conclusion sur la caractérisation du matériel d’étude	80
4	Outils expérimentaux	82
4.1	Les capteurs de déplacement	82
4.1.1	Étalonnage	82
4.1.2	Estimation de l’influence de la température sur les mesures de déplacement	84
4.2	Développement d’une méthode de suivi de marqueur	85
4.2.1	Principe de fonctionnement	86
4.2.2	Quantification des erreurs	89
4.3	Conclusion sur les performances des outils expérimentaux utilisés	97
	Conclusion de la partie B	99
C	Comportement du bois en flexion	100
5	La flexion 4-points	102
5.1	Étude analytique de la flexion 4-points	102
5.1.1	Hypothèses de travail	102
5.1.2	Contraintes, déformations et calcul de flèches	104

5.1.3	Comportement différé	107
5.1.4	Dimensionnement selon l’Eurocode 5	109
5.2	Matériel et méthodes	112
5.2.1	Essais en déplacement imposé jusqu’à rupture	112
5.2.2	Essais de fluage multi-paliers	114
6	Réponse mécanique	121
6.1	Comportement instantané	121
6.1.1	Comparaison avec les résultats des essais non destructifs	121
6.1.2	Rôles des paramètres mécaniques dans la résistance instantanée	127
6.2	Réponse différée	128
6.2.1	Évolution de flèche relative et teneur en eau	130
6.2.2	Calcul de complaisance et trajectoires mécano-sorptives	133
7	Fissuration des poutres entaillées	139
7.1	Comportement théorique du bois à la rupture	139
7.1.1	Mécanique de la rupture du bois	139
7.1.2	Calcul analytique de la longueur de fissure	142
7.2	Résultats des mesures de fissuration	144
7.2.1	Ouverture de fissure en fonction de la flèche centrale	144
7.2.2	Application du modèle analytique et estimation de la flèche engendrée par la fissuration	147
7.3	Observations des faciès de rupture	150
	Conclusion de la partie C	157
D	Diffusion de l’eau dans le bois	159
8	Détermination des coefficients de diffusion	161
8.1	Physique et modélisation de la diffusion unidimensionnelle	161
8.1.1	Principes physiques	161
8.1.2	Approximation numérique de la solution	166
8.2	Descriptif des essais	169
8.3	Résultats et discussion	172
8.3.1	Filtrage et validation de l’approximation par différences finies	172
8.3.2	Application des différences finies sur les pesées automatiques	174
	Conclusion de la partie D	180

Conclusion et perspectives	182
Bibliographie	199
Annexes	199
A Trame des entretiens	200
B Compte rendus des entretiens	204
C Album photos des cernes des poutres	241
D Principe de l'homographie	244
E Quantification de l'impact de la flexion déviée	247
F Trajectoires mécano-sorptives et évolution du fluage en double pente	249
G Script Python du Theta-schéma	255

Nomenclature

Abréviations

AMF	Angle des micro-fibrilles
DF	Différences finies
EMC	" <i>Equilibrium Moisture Content</i> " : Teneur en eau d'équilibre
HF, LF, OF	Hauteur, longueur et ouverture de fissure
HR	Humidité relative
IQR	Inter-Quartile
MAD	" <i>Median absolute deviation</i> " : écart absolu médian
MOE	" <i>Modulus of elasticity</i> " : module d'élasticité
MOR	" <i>Modulus of rupture</i> " : module de rupture
PE, PNE	Poutre entaillée, poutre non entaillée
PSF	Point de saturation des fibres
Q1, Q3	1er et 3ème Quartile
RMS	" <i>Root Mean Square</i> " : moyenne quadratique
Sij	Numéro de poutre
TE	Teneur en eau

Variables Grecques

α_H	Coefficient de retrait moyen en hauteur
α_{al}	Coefficient de dilatation thermique de l'aluminium
α_{gp}, β_{gp}	Paramètre du modèle " <i>gripped-box</i> "
$\alpha_{L,R,T}$	Coefficient de retrait longitudinal, radial et tangentiel
β_0, β_f	Facteur d'entaille, facteur de fissure
γ_{yz}	Déformation de cisaillement

ϵ_x	Déformation normale
θ	Paramètre du θ -schéma différences finies
$\lambda_{rel,m}, \sigma_{crit}$	Coefficients de vérification du déversement
ρ	Masse volumique
ρ_{ID}	Infradensité
σ_x	Contrainte normale
σ_{max}	Contrainte à la rupture
τ_{xy}	Contraintes de cisaillement
Φ	Flux hydrique de l'équation de Newton
ϕ_{ad}, ϕ_{de}	Paramètre des isothermes enveloppe de Varnier (2019)
ξ	Capacité hydrique
Ψ_i	Potentiel hydrique du phénomène physique i

Variables Latines

$\underline{\underline{A}}, \underline{\underline{b}}$	Matrice et vecteur du système de résolution différences finies de l'équation de diffusion
$A, f(\beta_0)$	Paramètres de calcul de la complaisance
a_{ad}, a_{de}	Paramètres des isothermes enveloppe de Varnier (2019)
c_1, c_2, c_3, C_a, C_d	Paramètres des isothermes partielles de Varnier (2019)
$crit$	Critère d'homogénéité mécanique
\bar{D}	Coefficient de diffusion moyenné avec les points adjacents
$D_{0L,0R,0T}$	Coefficients de diffusion longitudinal, radial et tangentiel à l'état anhydre
$D_{L,R,T}$	Coefficients de diffusion moyen longitudinal, radial et tangentiel
$dxij_fen, dyij_fen$	Respectivement distance en x et en y entre les marqueurs i et j mesurée avec la mire fenêtre
$dxij_fer, dyij_fer$	Respectivement distance en x et en y entre les marqueurs i et j mesurée avec la mire fer à cheval
e, H, L, V	Respectivement épaisseur, hauteur, longueur, et volume d'une poutre
$E(x, t)$	Taux d'avancement de la diffusion
E, E^d	Module élastique longitudinal statique, dynamique

E_S, E_S^d	Infra-module spécifique statique, dynamique
$E_{0,05}, E_{0,mean}$	Module élastique longitudinal au cinquième pourcentile et moyen des classes de résistance
$E_{L,R,T}$	Module élastique longitudinal, radial et tangentiel
ET	Écart-type
F	Forces
F_1, F_2	Paramètres du système différences finies de l'équation de diffusion
$f_{m,d}, f_{m,k}$	Résistance en flexion de calcul (d) et caractéristique (k) selon les classes de résistance
$f_{v,d}, f_{v,k}$	Résistance en cisaillement de calcul (d) et caractéristique (k) selon les classes de résistance
g	Constante gravitationnelle
G_c	Taux de restitution d'énergie critique
G_e, G_S, G_{visco}, G_w	Taux de variation de $W_{elas}, W_S, W_{visco}, W_{ext}$
G_{LT}^d, G^d	Module de cisaillement dynamique dans le plan LT
G_{mean}	Module de cisaillement moyen des classes de résistance
<u>Hg</u>	Matrice d'homographie
H_F, L_F, O_F	Hauteur, longueur et ouverture de fissure
H_{ent}, L_{ent}	Hauteur et longueur d'entaille
i, a_1, a_2	Paramètres d'entaille
I_z	Moment quadratique d'une poutre autour de l'axe z
J_{rel}	Complaisance relative
K_h, K_{mod}, K_{sys}	Coefficients correcteur de la résistance en flexion
k_L, k_R, k_T	Paramètre d'évolution linéaire du coefficient de diffusion longitudinal, radial et tangentiel
K_n, K_v	Coefficients de rupture correctif de la résistance au cisaillement
K_{crit}	Coefficient de vérification du déversement
K_{def}	Coefficient correcteur de la flèche différée
k_{ws}	Paramètre d'évolution linéaire du PSF w_s
l_{ap}	Distance entre un appui et le point de chargement le plus proche

$l_{\text{chargement}}$	Distance entre les points de chargement
m, m_{anh}	Respectivement masse et masse anhydre d'une poutre
$m_{\text{increment}}, m_{\text{initiale}}$	Masse de d'incrément de charge, chargement initial
pente	Moyenne pondérée des corrélations entre O_F et RG
q	Facteur correctif du chargement
R	Constante des gaz parfaits
RG	Retrait-gonflement en hauteur
S_L, S_R, S_T	Coefficient d'échange surfacique longitudinal, radial et tangen- tiel
$\tan(\delta)$	Frottement interne
T	Température
$U_{c,d,g}$	Flèche centrale, flèche droite et flèche gauche
U_{rel}	Flèche relative
w, w_{env}, w_s	Teneur en eau, EMC, PSF
$W_{\text{elas}}, W_S, W_{\text{visco}}, W_{\text{ext}}$	Travail des efforts extérieurs, énergie élastique, de surface, vis- queuse

Table des figures

1.1	Illustration de l'aubier, du duramen et de l'écorce sur une grume de pin sylvestre à aubier différencié.	31
1.2	Représentation issue de Trouy (2015) : (a) une trachéide en coupe radiale, (b) une trachéide de coupe tangentielle, (c) une ponctuation ouverte, (d) une ponctuation fermée avec le torus aspiré.	32
1.3	Représentation du bois de résineux issue de Phan et al. (2022) : (a) à l'échelle macroscopique, (b) et (c) à l'échelle cellulaire pour représenter les trachéides, (d) à l'échelle microscopique pour représenter la paroi cellulaire.	33
1.4	Photo de : (a) un sapin pectiné sur pied, (b) du bois de sapin scié non traité, (c) du bois de sapin scié et traité.	34
1.5	Illustration d'un parenchyme longitudinal et d'une trabécule sur des coupes anatomiques, et illustration de la forme d'une ponctuation de champ de croisement de type taxodioïde.	34
1.6	Photo de : (a) un nœud adhérent, (b) un nœud non adhérent.	37
1.7	Répartition de : (a) formations boisées en France par type d'essence issues de FCBA (2019) et (b) diamètre des sapins en AuRA issus de FiBois (2019a), où D représente le diamètre de l'arbre à 1,3 m du sol.	39
1.8	Répartition régionale des classements de pièces de bois de sapin : (a) Massif Central, (b) Vosges, (c) Ardèche et Drôme.	41
1.9	Dimensionnement des poutres entaillées pour assurer la rupture par fissuration en flexion 4-points, par Adjovi Loko (2015).	43
1.10	Photos des essais de fluage de poutres entaillées en extérieur, issues de Pambou Nziengui (2019).	43
2.1	Exemple de (a) gros sapin pectiné sur pied à La Chapelle Agnon (Puy de Dome) ©J.Facy, (b) chantier de construction utilisant la technique des fustes ©F.Mathieu.	48
2.2	Equarrissage à la hache : (a) ©F. Calame de Charpentiers Sans Frontières et (b) J. Gril pendant l'école thématique Pluribois 2022.	51

2.3	Illustration des techniques de charpente traditionnelle : (a) exploitation intelligente de la courbure naturelle d'un arbre pour une structure ; (b) les différents types de débit lors d'un sciage d'une grume, (c) la technique d'assemblage tenon-mortaise ; (d) la technique d'assemblage à queue d'aronde où la pièce femelle est en retrait tangentiel afin de piéger la pièce mâle qui est en retrait radial.	51
2.4	Photos de poches d'eau : (a) chez le sapin pectiné, (b) chez le sapin du colorado (<i>Abies concolor</i>) et (c) chez le peuplier à feuilles étroites (<i>Populus angustifolia</i>).	53
2.5	Infiltration de l'eau par les branches mortes : (a) poche d'eau visible quelques jours après abattage d'un sapin, (b) trois images représentant l'infiltration d'eau par un nœud.	54
2.6	Illustration d'un "bacterial wetwood", on remarque un suintement (anneau noirci au niveau de la plaie) et une décoloration de l'écorce	55
2.7	SW : aubier, DZ : bois intermédiaire, WLW : poche d'eau en cours de formation, WHW : poche d'eau.	56
2.8	Comparaison des temps de séchage entre aubier, duramen et poche d'eau chez le sapin baumier (<i>Abies balsamea</i>) (Jeremic et al., 2011)	59
2.9	Coloration d'une poche d'eau chez un hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>) (Goncz et al., 2018)	61
3.1	Dimensions des poutres demandées. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.	66
3.2	Les types de débit du lot de poutre : (a) débit sur dosse (<i>S19</i>), (b) débit sur faux quartier (<i>S29</i>), (c) débit à coeur (<i>S10</i>).	68
3.3	Les types de fentes observés : (a) fente radiale partant du coeur (<i>S20</i>), (b) fente radiale traversante (<i>S19</i>), (c) fente radiale non traversante (<i>S07</i>), (d) agglomérat de petites fentes radiales et fente tangentielle (roulure) (<i>S16</i>).	68
3.4	Les poches d'eau observées sur le lot de poutre : (a) <i>S03</i> , (b) <i>S04</i> , (c) <i>S18</i>	69
3.5	Angle de fil constaté sur la poutre <i>S21</i> : (a) extrémité gauche, (b) extrémité droite en miroir.	69
3.6	Illustration d'un essai avec la méthode BING : (a) installation de la poutre <i>S16</i> sur les chambres à air de vélo, (b) microphone et picoscope utilisés, (c) signal vibratoire obtenu lors d'une vibration en flexion.	71
3.7	Illustration de la méthode de poussée d'Archimède pour mesurer un volume.	72
3.8	Répartition des poutres du lot selon les classes de résistance à partir des mesures de E^d	73
3.9	Résultats des mesures des propriétés mécaniques du lot de poutres par la méthode BING : (a) E^d mesuré en flexion en fonction de E^d mesuré en compression, (b) E^d en fonction de G^d , corrélation forcée à 0, (c) E^d/G^d en fonction de E_S^d et (d) E^d en fonction de ρ_{ID} . Sur chaque graphique sont indiqués l'équation et soit le coefficient de détermination R^2 soit la moyenne quadratique RMS de l'erreur entre la régression linéaire appliquée et les résultats obtenus.	74

3.10	Résultats des mesures de teneur en eau le jour de la réception : (a) TE en fonction de la densité ρ , (b) TE en fonction de l'infradensité ρ	75
3.11	Entailles réalisées sur les poutres : (a) dimensions des entailles, (b) photos d'une poutre entaillée (PE), (c) découpe à la scie circulaire. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.	76
3.12	Répartition des six triplets choisis sur le graphique E_S^d en fonction de ρ_{ID}	78
3.13	Répartition des poutres choisies pour les essais de flexion en déplacement imposé sur le graphique E_S^d en fonction de ρ_{ID}	80
3.14	Conditions de stockage du lot : (a) abri sous bâche, (b) colmatage des extrémités, (c) emballage d'une poutre sous cellophane.	81
3.15	Bassin d'immersion des poutres pour réhumidification.	81
4.1	Étalonnage des capteurs LDT à l'aide d'un bras articulé et de cales étalons : (a) dispositif d'étalonnage, (b) zoom sur le capteur et les cales.	83
4.2	Étalonnage de trois capteurs LDT à 20° : (a) détermination des facteurs correctifs, (b) dérive de sensibilité initiale et corrigée.	83
4.3	Mesure de déplacement par le LVDT n°50-09 en fonction de la température : (a) fixée à une course de 22 mm, (b) fixée à une course de 38,5 mm et (c) fixée à une course de 45,5 mm.	84
4.4	Coefficient de corrélation entre la mesure de déplacement et la température pour le milieu et la fin de course des trois capteurs.	85
4.5	Schématisation d'un marqueur ArUco.	86
4.6	Dimensions des mires utilisées : (a) mire fer à cheval, (b) mire fenêtre. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.	88
4.7	Mesures de la largeur de la mire fenêtre à différentes températures. dx1617 et dx1819 correspondent respectivement à la distance horizontale entre les deux marqueurs du haut et celle entre les deux marqueurs du bas.	89
4.8	Photo d'une feuille de papier contenant des marqueurs ArUco prise avec l'appareil photo Canon. Les marqueurs 1 et 2 sont espacés de 40 mm et les marqueurs 3 et 4 de 175 mm. Les marqueurs 10, 11, 12, 13 forment un carré de 74 × 74 mm et les marqueurs 14, 15, 16, 17 un rectangle de 210 × 180 mm.	90
4.9	Illustration des mesures de distances relatives dx et dy sur une poutre entaillée (PE).	91
4.10	Mesure d'ouverture de fissure (OF) sur l'essai de flexion : (a) photo prise avec le téléphone Asus, (b) photo prise avec l'appareil photo Canon, (c) résultats de l'ouverture de fissure (OF) du côté gauche de la poutre en fonction de la flèche centrale imposée. Chaque point représente la mesure sur une photo. Niveau de gris : diffgris = 171, mingris = 37, maxgris = 248.	92

4.11	Impact de la distance entre l'appareil et les marqueurs : (a) erreur : différence entre distance réelle et distance mesurée, erreur relative : erreur divisée par la distance vraie, écart-type des distances mesurées sur dix photos pour la distance en y, (b) erreur et écart-type pour la distance en x. dy_{12} et dy_{34} sont les distances en y entre les marqueurs 1-2 (40 mm) et 3-4 (175 mm), respectivement ; dx_{12} et dx_{34} sont les distances en x entre les marqueurs 1-2 (0 mm) et 3-4 (0 mm), respectivement. Mires utilisées pour l'homographie : fer, mire fer à cheval ; fen, mire fenêtre. Niveau de gris : $diffgris = 156$, $mingris = 29$, $maxgris = 201$	93
4.12	Photos de mesure de l'impact de la distance entre l'appareil et les marqueurs, distance de : (a) 60 cm, (b) 130 cm, (c) 200 cm.	93
4.13	Photos de mesures de l'impact d'un angle de vue sur une mesure de distance relative : (a) appareil photo en face de la cible, (b) angle de 45° , (c) appareil photo en face de la cible pivotée de 90° , (d) angle de 45° et cible pivotée de 90°	94
4.14	Impact d'un angle horizontal : (a) erreur, erreur relative et écart-type sur la mesure de distance relative en y, (b) erreur et écart-type sur la mesure de distance relative en x. La légende est la même que pour la figure 4.11. Niveau de gris : $diffgris = 164$, $mingris = 35$, $maxgris = 216$	95
4.15	Effet du tuilage du bois sur une mesure de retrait-gonflement d'une poutre : (a) illustration du déplacement hors-plan, (b) application du théorème de Thalès.	97
5.1	Contrainte de traction perpendiculaire en fond d'entaille selon la théorie de l'élasticité linéaire (courbe continue) et estimée expérimentalement (courbe en pointillé), (SEDIBOIS, 2000).	103
5.2	Diagramme des moments d'un essai de flexion 4-points : (a) représentation d'une poutre isostatique chargée en flexion 4-points, (b) effort tranchant V_y le long de la poutre, (c) moment fléchissant M_z le long de la poutre.	105
5.3	Représentation de l'état de contrainte normale et tangentielle le long d'une poutre entaillée	106
5.4	Illustration théorique de : (a) un essai de fluage, (b) un essai de fluage multipaliers.	109
5.5	Paramètres d'entaille pour le dimensionnement de l'Eurocode 5	110
5.6	Conditions des essais de flexion à rupture : (a) photo d'un essai, (b) positionnement des dispositifs de mesure. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres. U_g , U_c et U_d correspondent respectivement à la mesure de flèche gauche, centrale et droite. O_{Fg} et O_{Fd} correspondent respectivement à la mesure d'ouverture de fissure gauche et droite.	113
5.7	Photo du dispositif de mesure automatique d'ouverture de fissure à l'aide d'un capteur LDT.	114
5.8	Photos des essais de fluage : (a) trois poutres chargées sous l'abri, (b) application du chargement par l'intermédiaire du bloc de béton.	115
5.9	Illustration de la configuration des deux bancs d'essai. Ces couleurs sont utilisées pour illustrer les résultats.	117

5.10	Illustration du problème des poutres vrillées en chargement : (a) photo d'installation d'une poutre vrillée sur le banc d'essais de fluage, (b) schéma de la flexion déviée, flexion torsion. Le point G représente le centre de cisaillement (ici équivalent au centre de gravité).	117
5.11	Positionnement des dispositifs de mesure des essais de fluage.	118
5.12	Photos de : (a) la station météorologique, (b) un capteur LVDT pour mesure de la flèche centrale U_c	118
5.13	Dispositifs de mesure de : (a) paramètres de fissuration et des variations de hauteur par la méthode de suivi de marqueurs, (b) variations de module par des masses de décharge-recharge.	119
6.1	Courbes de déplacement en fonction du temps : (a) pour la poutre S06 et (b) pour la poutre S20 avec des arrêts pour prendre des photos et protéger les capteurs LDT.	121
6.2	Résultats des essais de flexion en déplacement imposé : (a) courbes force-déplacement, (b) courbes contrainte-déformation.	122
6.3	Détermination de la flèche à dix minutes : (a) flèche centrale en fonction de la durée au début de l'essai et illustration de Δt et t_0 , (b) flèche centrale en fonction de $\log(t - t_0)$; (c) régression polynomiale d'ordre 2 sur la zone d'intérêt.	123
6.4	Module calculé à partir des réponses instantanées sur PE (E^s) en fonction du module mesuré par les essais de flexion dynamique sur PNE (E^d).	124
6.5	Force maximale atteinte F_{max} en fonction de (a) l'infradensité ρ_{ID} , (b) la teneur en eau TE mesurée au moment de l'essai. La couleur des points indique également le groupe de TE.	128
6.6	Évolution de la flèche relative en fonction du temps : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3. Si la flèche redescend à 0 la poutre a rompu, sinon c'est que la poutre a été déchargée et l'essai arrêté (poutre 6 vague 1 et vague 2).	131
6.7	Évolution des TE estimées et de la TEE calculée par l'abaque de l'annexe française de l'Eurocode 5 en fonction du temps : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3.	132
6.8	Evolution des complaisances relatives en fonction du $\log(t)$: (a) vague 1, (b) vague 2 et (c) vague 3.	134
6.9	Évolution du fluage relatif en double pente en fonction du logarithme de la durée : (a) S25 vague 2 changement de pente à $\log(t) = 2,65$, (b) S03 vague 1 changement de pente à $\log(t) = 1,45$	135
6.10	Trajectoire mécano-sorptive de : (a) S05 vague 2, (b) S24 vague 3. Les incréments de charge sont indiqués en rouge, certaines désorptions (-) en vert, les adsorptions (+) en orange et adsorptions au dessus du seuil précédent (++) en noir.	136
6.11	Complaisance relative maximale atteinte en fonction de la TE initiale des poutres. Points encadrés en rouge : poutre exposée au rayonnement solaire.	137
7.1	Représentation des trois modes de rupture.	139
7.2	Six plans principaux de propagation de fissure dans le bois (Phan, 2016).	140

7.3	Représentation du comportement d'un matériau quasi-fragile et équivalence avec un matériau fragile. G : taux de restitution d'énergie (indice c pour critique) ; L_F longueur de fissure.	141
7.4	Schéma d'une propagation de fissure idéale dans une poutre entaillée en flexion 4-points.	143
7.5	Schéma explicatif d'une augmentation d'OF lorsque la poutre se courbe, même sans propagation de fissure.	144
7.6	Ouverture de fissure moyenne (OF) en fonction de la flèche centrale U_c sur les essais en déplacement imposé : (a) intégralité des mesures et observation des augmentations brusques de longueur de fissure (L_F), (b) focalisation sur les mesures de 0 à 1 mm de O_F et observation des évolutions linéaires ou exponentielles, illustrant le développement de la zone d'élaboration (FPZ).	145
7.7	Évolution des ouvertures de fissure OF en fonction de la flèche centrale U_c : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3.	146
7.8	Corrélation entre l'ouverture de fissure OF dans les zones non fissurées et le retrait-gonflement RG , tous deux rapportés à leur valeur initiale.	147
7.9	Comparaison des résultats expérimentaux avec la solution de l'équation (7.7) : (a) photo de la poutre S05 (vague 2) face 1 à droite, (b) photo de la poutre S29 (vague 3) face 1 à gauche, (c) résultats sur S05 et (d) sur S29.	148
7.10	Évolutions des flèches de fissure $U_{fissure}$ en fonction de la durée des essais : (a) S03 vague 1 et (b) S05 vague 2.	149
7.11	Observation macroscopique des faciès de rupture : (a) fissure descendante et amorçe sous l'entaille pour la poutre S06 (vague 2), (b) fissure en V pour la poutre S11 (essai en déplacement imposé), (c) zoom de la fissure de S06 pour une observation du profil.	151
7.12	Observation macroscopique des faciès de rupture : (a) fissure montant sur S14 (vague 1), (b) fissure déviée par un noeud sur S05 (vague 2), (c) fissure oblique sur S12 (vague 1).	152
7.13	Fusion de deux fissures entourée en rouge sur la poutre S09.	153
7.14	Fréquence d'observation des pentes de fissures.	154
7.15	Schéma d'une fissure montante en suivant le chevauchement des trachéides dans les résineux.	154
8.1	Coefficient de diffusion transverse D_T et longitudinal D_L en fonction de la teneur en eau \bar{M} , issue de Siau (1984) page 164.	162
8.2	Corrélations expérimentales d'Asseko (2022) et de Siau (1984) entre les coefficients de diffusion du sapin pectiné la teneur en eau : (a) pour la diffusion transverse, (b) pour la diffusion longitudinale à partir de 10% de teneur en eau. Les corrélations sont polynomiales d'ordre 2.	163
8.3	Hystérésis de sorption avec les paramètres de Merakeb et al. (2009).	165
8.4	Illustration d'une modélisation de diffusion unidimensionnelle.	167
8.5	Photos des balances et des éprouvettes de diffusion : (a) diffusion 1D tangentielle, (b) diffusion 2D transverse avec colmatage thermique.	171

8.6	Photos des cernes des éprouvettes utilisées pour les essais de diffusion : (a) éprouvette issue de la poutre S21, (b) éprouvette issue de la poutre S03. . . .	171
8.7	Pesées automatiques de la balance wms-ke-2 : (a) valeurs brutes, (b) correction des valeurs globalement aberrantes, (c) correction des valeurs localement et globalement aberrantes.	173
8.8	Comparaison entre la solution analytique de Crank (1975) et l'approximation DF pour $\theta = 1/2$: (a) évolution de TE moyenne, (b) tracé du profil hydrique après quarante jours	174
8.9	Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de l'approximation DF, à partir de la teneur en eau (TE) en fonction de la durée des essais : (a) pour l'éprouvette en diffusion purement radiale, (b) pour l'éprouvette en diffusion purement tangentielle.	177
8.10	Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de l'approximation DF de diffusion longitudinale, à partir de la teneur en eau (TE) en fonction de la durée des essais : (a) pour la balance wms-ke-5, (b) pour la balance wms-ke-8, (c) pour la balance wms-ke-9.	177
C.1	Cernes des poutres : (a) S02; (b) S03; (c) S04; (d) S05; (e) S06; (f) S07; (g) S09; (h) S11.	241
C.2	Cernes des poutres : (a) S12; (b) S13; (c) S14; (d) S16; (e) S17; (f) S18; (g) S19; (h) S20.	242
C.3	Cernes des poutres : (a) S21; (b) S22; (c) S23; (d) S24; (e) S25; (f) S26; (g) S27; (h) S28.	242
C.4	Cernes de la poutre S29.	243
C.5	Photos des poches identifiées sur le lot de poutres : (a) poutre S03; (b) poutres S18 (haut) et S04 (bas).	243
D.1	Image de gauche : prise de photo d'un mur avec un angle de vue; image de droite : transformation de la photo comme si l'appareil photo était en face du mur.	244
E.1	Schéma d'un chargement en flexion déviée.	247
F.1	Trajectoire mécanosorptive de la vague 1, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S03; (b) S14; (c) S12; (d) S21.	249
F.2	Trajectoire mécanosorptive de la vague 2, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S05; (b) S06; (c) S28; (d) S25; (e) S26.	250
F.3	Trajectoire mécanosorptive de la vague 3, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S29; (b) S24; (c) S18; (d) S22; (e) S23.	251
F.4	Évolution en double pente de la complaisance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S03; (b) S14; (c) S12; (d) S21.	252
F.5	Évolution en double pente de la complaisance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S05; (b) S06; (c) S28; (d) S25; (e) S26.	253

F.6 Évolution en double pente de la complaisance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S29; (b) S24; (c) S18; (d) S22; (e) S23. 254

Liste des tableaux

1.1	Synthèse des caractéristiques principales du bois.	38
1.2	Comparaison des propriétés mécaniques moyennes entre le sapin et l'épicéa selon l'étude de FiBois BFC sur le Jura et du FCBA sur le massif des Vosges	41
1.3	Propriétés mesurées sur le sapin pectiné à 12% de TE.	44
2.1	Liste des acteurs rencontrés pour l'enquête de terrain.	47
3.1	Résultats des dimensions des poutres le jour de la réception. Les incertitudes ont été déterminées à partir de l'appareil de mesure utilisé.	67
3.2	Résultats des essais non destructifs.	73
3.3	Résultats des teneurs en eau du lot de poutres.	75
3.4	Récapitulatif du plan expérimental.	79
4.1	Résultats pour vingt photos prises avec deux appareils photo : celui du Fairphone 3 et le Canon. Niveau de gris : diffgris = 155, mingris = 18, maxgris = 190.	92
5.1	Récapitulatif des conditions des essais de fluage.	119
6.1	Résultats des modules élastiques issus des réponses instantanées, des modules élastiques à l'état vert corrigés par l'équation (6.1) et écart relatif avec les mesures des essais dynamiques.	125
6.2	Résultats des rapports $(E/G)^s$ issus de l'équation (5.8) et comparaison avec les mesures des essais dynamiques.	126
6.3	Résultats des forces et contraintes maximales atteintes	127
6.4	Résultats finaux des essais de fluage.	129
8.1	Récapitulatif des conditions des essais de diffusion. La colonne "Capacité" fait référence à la capacité de la balance utilisée et la colonne "Dimensions" aux dimensions de la direction de diffusion considérée.	172
8.2	Résultats de l'optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S21. R : diffusion radiale ; T : diffusion tangentielle ; L : diffusion longitudinale.	176

8.3	Résultats de l'optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S05, balance WMS-KE-8. L : diffusion longitudinale.	176
8.4	Résultats de l'optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S03, balance WMS-KE-9. L : diffusion longitudinale.	176

Introduction générale

L'étude et l'application du matériau bois se justifient en général par ses avantages environnementaux et sa capacité à décarboner de nombreux produits. C'est évidemment un excellent argument, dans la mesure où les moyens de production actuels des sociétés occidentales ne sont pas tenables et que le bois est renouvelable, qu'il stocke du carbone et implique une gestion forestière durable. Toutefois, c'est un autre plaidoyer qui est choisi ici.

L'omniprésence du bois dans le monde matériel et imaginaire de l'être humain en fait un acteur principal de l'histoire, ce qui est en soit une justification des études pour une meilleure compréhension de son développement et de son comportement.

"L'arbre est, pour les Hommes, le compagnon de toujours. Son bois a engendré au fil des siècles des centaines de métiers, d'innombrables savoir-faire" lit-on dans *Maisons paysannes de France* (2014). La construction bois est une application majeure et ancestrale, bien que les sociétés occidentales préfèrent le béton, la brique et la pierre. L'histoire des trois petits cochons est assez révélatrice à ce sujet : les cochons ayant construit leur maison en bois ou en paille sont dévorés par le loup qui épargne celui ayant construit sa maison en briques. Il serait bien long d'énumérer la liste exhaustive des usages du bois, mais donner quelques exemples semble pertinent pour la démonstration.

- La construction et l'ameublement : les techniques de construction bois sont parmi les plus anciennes et se développent encore maintenant. En 2009, le Stadthaus, un immeuble en bois de 30 mètres de haut est construit à Londres. Pour 2041, la société Japonaise Sumimoto Forestry projette de construire un immeuble en bois de 350 mètres de haut ! Le bois est donc utilisé en structure constructive, mais il peut aussi l'être en isolant sous forme de laine de bois. Bien sûr, les meubles sont aussi abondamment fabriqués en bois : tables, chaises, escaliers. ;
- L'énergie : le bois est utilisé pour faire du feu depuis au moins 400 000 ans. Aujourd'hui encore, c'est plus de 10% des français qui se chauffent au bois : cheminée, poêle à granulés, poêle à bois, etc. Le bois peut aussi être utilisé pour produire de l'électricité et du gaz combustible, comme c'était le cas pendant la Seconde Guerre mondiale ;
- L'aviation : les premiers avions étaient en bois, fournissant légèreté et résistance en plus d'être un matériau abondant au début du XXe siècle. Sa sensibilité aux variations hygrothermiques l'a peu à peu fait disparaître de cette industrie, au profit des métaux et matériaux composites ;

- Emballage et conditionnement : le carton ou les cagettes sont abondamment utilisés pour le transport des marchandises. On peut également noter le vieillissement des spiritueux dans les barriques de chêne, apportant des tanins aux alcools et fournissant ce goût tant recherché ;
- Le sport et les textiles : les premiers skis, de même que les premières perches, étaient en bois. Il est toujours utilisé pour les barres parallèles et asymétriques de gymnastique en raison de sa souplesse qui permet aux athlètes de voltiger. Aujourd'hui, le marché des fibres de cellulose se développe et propose des vêtements produits à partir de bois ;
- Les cosmétiques et le médical : les extractibles du bois sont source de molécules aux avantages thérapeutiques ou cosmétiques. Ainsi, l'huile de bois de rose (*Aniba Duckei*) est utilisée en parfumerie. L'entreprise Chanel a d'ailleurs été dénoncée en 1995 par l'association Robin des Bois pour avoir utilisé de l'huile de bois de rose dans son "Chanel n°5", essence alors en voie d'extinction ;
- L'écriture et la musique : la culture et la connaissance reposent en partie sur le bois. Le papier des livres est issu du bois, de même que les guitares, violons et clarinettes.

Son usage est par ailleurs indissociable d'une gestion forestière durable. À cette liste pourrait ainsi s'ajouter celle des usages des forêts : randonnées, protection contre l'érosion en montagne ou filtrage de l'eau de pluie. Le bois est ainsi un acteur majeur du monde matériel des sociétés humaines.

Mais l'arbre est aussi le vivier de nombreuses émotions et est au cœur du monde imaginaire des sociétés humaines, "*Aristote écrit que, jadis, à Athènes, quiconque déracinait ou abattait un olivier sacré était puni de mort pour cause de sacrilège*" lit-on dans Corbin (2013)¹. Cette sacralité se retrouve dans l'arbre de la connaissance du bien et du mal du livre de la Genèse, celui-là même qui offre son "fruit défendu". Également, l'arbre-monde *Yggdrasil* de la mythologie scandinave forme le support même de l'univers et relie les neuf royaumes. L'arbre est associé à de nombreux autres symboles, tels que celui du temps, de l'éternité ou plus récemment celui de "poumon de la planète". Cette métaphore anthropomorphe est évidemment trompeuse et réductrice, puisque les forêts ont précisément le rôle inverse de celui des poumons humains : elles absorbent du CO₂ et rejettent du O₂. Cependant, les forêts ont effectivement un rôle capital dans l'oxygénation de l'atmosphère, la régulation du dioxyde de carbone et l'hébergement de la biodiversité. Les arbres eux-mêmes sont en revanche impuissants contre le méthane et le protoxyde d'azote, deux autres gaz à effets de serre importants dans le changement climatique.

Le sujet de cette thèse porte donc sur l'étude du bois, en se focalisant sur ses propriétés physico-mécaniques pour des usages en construction. La bourse doctorale provient d'un Contrat Plan État-Région (CPER) d'Auvergne Rhône-Alpes, finançant des projets de recherche dans "l'Écoconception de matériaux durables pour l'amélioration des performances des structures". Le sujet s'est alors orienté vers des problématiques de la filière bois régionale,

1. Alain Corbin, *La douceur de l'ombre*, Flammarion, 2020

en l'occurrence vers les usages potentiels du sapin pectiné (*Abies alba*) à l'état vert ou ressué, car c'est une essence actuellement difficile à sécher. C'est un sujet qui se veut impliqué dans les projets de réflexion de la filière, avec une enquête de terrain en début de thèse et une mission doctorale innovation en deuxième année. Le doctorat s'est fait dans un département de recherche de mécanique et génie civil, intégrant une approche mécanique des matériaux. Ces aspects se retrouvent dans le titre du sujet : "*Comportement mécanique des éléments de structure en bois de sapin pectiné en environnement variable*". Les termes de *mécanique* et *éléments de structure* renvoient à la mécanique des matériaux du génie civil : comportement élastique, fluage, mécanique de la rupture et *environnement variable* au côté encore humide du bois étudié ainsi qu'à l'environnement extérieur auquel il est soumis pour certains usages structuraux : diffusion de l'eau dans le bois, effet mécano-sorptif.

Sur ce sujet, les verrous scientifiques sont nombreux : (i) les propriétés viscoélastiques du bois vert sont encore peu étudiées dans la littérature, puisque la majorité des ouvrages est construite en bois sec étant donné que c'est majoritairement du bois sec qui est utilisé depuis le développement massif de la recherche scientifique (Perré et Aguiar, 1999; Dlouhá et al., 2009; Pot et al., 2013) ; (ii) l'effet mécano-sorptif que présente le bois lorsqu'il est soumis à un chargement et des variations thermo-hydriques simultanément n'est pas encore bien compris et modélisé (Gril, 2015; S. Stevanic et Salmén, 2020) ; (iii) la mécanique de la rupture du bois est loin d'être complètement décrite, notamment du fait de l'orthotropie et des hétérogénéités qui la complexifient (Morel et al., 2005; Riahi et al., 2016) ; (iv) les méthodes de mesure pour des essais en environnement extérieur sur des éléments de structure en bois sont encore peu développées (Germanese et al., 2018; Pambou Nziengui, 2019; Varnier, 2019) puisque une grande partie des essais se font sur du bois sans défaut et en environnement contrôlé.

En cela, ce travail de recherche porte à la fois un intérêt pour les problématiques de la filière bois régionale et des intérêts scientifiques pour apporter des développements sur les sujets évoqués ci-dessus.

La première partie approfondit le contexte et la problématique. Elle se découpe en deux chapitres : (i) le premier portant sur la description des caractéristiques principales du bois et de la place du sapin pectiné dans l'économie de la filière régionale ; (ii) le second portant sur les problématiques rencontrées par cette filière à travers une enquête de terrain et une étude bibliographique. Cette partie associe étude bibliographique, littérature grise et interview de professionnels pour décrire les motivations et le fil rouge de l'ensemble du travail réalisé.

La seconde partie présente le matériel d'étude et les dispositifs de mesure utilisés. Elle est importante dans la mesure où ce travail de recherche est essentiellement expérimental. Elle est également composée de deux chapitres : (i) le premier décrit le matériel végétal étudié, à savoir un lot de trente poutres entaillées de sapin pectiné en dimensions d'emploi ; (ii) le second décrit les outils utilisés pour la campagne expérimentale. Notamment, une partie des recherches a été consacrée au développement d'une nouvelle méthode de mesure par suivi de marqueur.

La troisième partie présente le cœur de la campagne expérimentale. Elle est constituée de trois chapitres : (i) le premier décrit le formalisme physico-mécanique dans lequel les analyses

ont été réalisées, puis décrit les essais principaux de la campagne, à savoir des essais de flexion impliquant fluage et fissuration ; (ii) le deuxième chapitre analyse les résultats obtenus en développant particulièrement les mesures hygro-viscoélastiques ; (iii) le troisième analyse également les résultats mais en se concentrant cette fois-ci sur la mécanique de la rupture des poutres entaillées. Cette partie inclut localement des micro-études bibliographiques sur les deux thèmes principaux, le comportement différé et la mécanique de la rupture du bois.

La quatrième et dernière partie présente un travail préliminaire sur l'étude de la diffusion de l'eau dans le bois de sapin pectiné. Elle ne se compose que d'un chapitre qui développe une étude bibliographique focalisée sur la physique de la diffusion, puis les essais réalisés et enfin les analyses effectuées pour en extraire des propriétés de diffusion. Il prolonge de nombreuses autres études sur le sujet mais utilise des formulations d'hystérésis partielles de sorption récentes et approxime l'état hydrique par une approche différences finies sous Python.

Première partie

État de l'art des données sur le sapin pectiné

L'objet de ce chapitre est de décrire le matériau étudié et le contexte socio-économique de ce travail de recherche. L'enjeu de cette étude est de se familiariser avec le bois et de comprendre les enjeux de ce travail. En effet, de nombreuses recherches ont déjà été menées sur ces thématiques et comprendre leur contexte permet de mieux cerner le rôle de chacune.

Le premier chapitre présente tout d'abord le matériau bois, de ses principales propriétés physico-mécaniques à la place du sapin pectiné dans la filière bois et la recherche scientifique à Clermont Auvergne INP. Ce chapitre constitue ainsi une synthèse bibliographique sur le matériau bois et sur des éléments de littérature grise obtenus par FiBois AuRA et ses partenaires, concernant le sapin pectiné dans la filière régionale.

La première section du deuxième chapitre présente l'enquête qui a été réalisée auprès des experts et professionnels de la filière bois. Ce travail a été mené tout au long des trois premières années de thèse et est aussi le fruit du travail de Florence Mathieu, qui a conduit une partie de l'enquête pendant son stage de master. La deuxième section concerne un état de l'art sur le phénomène des poches d'eau dans le duramen. Il correspond donc à une synthèse bibliographique ainsi qu'à une série d'échanges avec Ludovic Martin du PIAF² qui a grandement travaillé sur cette thématique.

2. Laboratoire de Physique et Physiologie Intégrative de l'Arbre en environnement Fluctuant.

Chapitre 1

Introduction à l'étude du matériau bois de sapin pectiné

1.1 Généralités sur le bois de résineux

1.1.1 Anatomie et structure du bois des résineux

Le bois est le constituant principal des plantes ligneuses, c'est-à-dire des arbres et arbustes. Le xylème secondaire, ou bois, n'est pas le seul constituant d'un d'arbre, qui contient par exemple aussi le rhytidome, le périderme et le phloème secondaire, mais les décrire n'est pas intéressant pour ce travail. Le bois assure un triple rôle dans l'arbre : la conduction de la sève brute, le soutien mécanique de sa structure et le stockage d'eau et de nutriment. Un des principes de l'ingénierie biomécanique est "*c'est la fonction qui fait la propriété*". Dans le cas des arbres, la composition et la structure du bois découlent de ces trois rôles. Trouy (2015); Lenne (2021) sont des excellents ouvrages pour une introduction complète au matériau, dont de nombreuses informations présentées ici en sont issues. Dans ce mémoire l'attention est portée sur le bois des résineux, c'est-à-dire des conifères, dont fait partie le sapin pectiné.

Le bois est constitué de fibres poreuses installées dans une matrice de lignine et d'hémicelluloses qui les maintient ensemble. Cette structure fait du bois un matériau composite naturel. Les fibres sont orientées dans l'axe de l'arbre pour lui assurer une bonne résistance mécanique face au vent (sollicitation en flexion) et à la gravité (sollicitation en compression ou en flexion). Le bois assure en cela une fonction de squelette pour supporter le poids propre de l'arbre et une fonction musculaire pour contrôler sa posture (phototropisme, gravitropisme ...). Par ailleurs, le bois doit être capable de transporter la sève brute depuis les racines jusqu'à la cime, qui atteint dans les cas les plus extrêmes 100 mètres de haut. La sève brute est essentiellement de l'eau et des sels minéraux, elle est pompée par les racines depuis le sol. Il est extraordinairement difficile de monter l'eau à 100 mètres de haut et l'arbre y parvient par un mécanisme d'évapo-transpiration au niveau des feuilles, qui provoque des dépressions importantes dans les colonnes d'eau. Les fibres doivent ainsi résister à l'implosion, qui peut

être encore plus forte en cas de sécheresse.

Le bois produit couche par couche par le cambium est directement issu de la photosynthèse. La photosynthèse est une transformation qui, à partir de dioxyde de carbone provenant de l'air et d'eau issue du sol, produit des sucres et du dioxygène. Une énergie lumineuse, c'est-à-dire des photons, est nécessaire pour activer la transformation. Il est intéressant de remarquer que la majorité de l'eau pompée par les racines sert à s'évaporer au niveau des feuilles pour créer la différence de pression qui permet de monter l'eau. Par conséquent, le bois est une matière essentiellement produite à partir du dioxyde de carbone.

Le bois prend d'abord le rôle de l'aubier, qui comporte des cellules vivantes et permet de conduire la sève brute, puis celui de duramen, qui ne comporte plus que des cellules mortes et n'assure plus qu'un rôle de soutien mécanique, figure 1.1. Cette différenciation de l'aubier au duramen se fait au cours de la croissance radiale de l'arbre. En effet, au fur et à mesure les dernières cellules vivantes meurent et vont potentiellement produire, à partir de leurs réserves d'amidon, des substances pouvant modifier les propriétés du bois. Ces substances sont appelées extractibles et se retrouvent donc majoritairement dans le duramen. Elles peuvent par exemple colorer le bois, augmenter la durabilité naturelle ou conférer des propriétés acoustiques singulières. Quand le duramen est coloré, on parle de bois à aubier différencié. Dans les régions tempérées, l'activité photosynthétique des arbres alterne entre une forte activité au printemps, faible en été puis les arbres entrent en dormance au cours de l'automne, stoppant complètement leur croissance en hiver. En effet, l'été la disponibilité en eau est plus faible et les nouvelles cellules des colonnes d'eau sont petites et leurs parois épaisses permet de résister davantage à l'implosion. Ainsi le bois produit au printemps est plus clair que celui produit en été, ce qui donne lieu aux cernes de croissance. Le bois produit au printemps est nommé *bois initial* et celui en été le *bois final*. Pour la plupart des bois de résineux, la largeur du bois final reste constante quelle que soit la vitesse de croissance. Une croissance rapide résulte donc en une plus grande proportion de bois initial devant celle du bois final. Autrement dit, le bois d'un résineux sera plus dense si sa croissance est lente, toutes choses égales par ailleurs. Dans l'arbre sur pied, l'aubier résiste mieux que le duramen aux agressions biologiques car il contient encore des cellules vivantes pouvant répondre à une attaque biologique. Cependant, dans le bois issu d'un arbre abattu, l'aubier a perdu sa capacité de résistance et contient encore des réserves d'amidon pouvant attirer des organismes xylophages. Il est dans ce cas moins durable que le duramen, et ce d'autant plus si le duramen contient des extractibles comme le tanin qui l'en protège.



FIGURE 1.1 – Illustration de l’aubier, du duramen et de l’écorce sur une grume de pin sylvestre à aubier différencié.

Le bois des résineux est plus simple dans sa composition et son organisation que le bois des feuillus. Chez les résineux ce bois est constitué à 90% de trachéides longitudinales, puis à 10% de rayons ligneux, canaux résinifères ou autres particularités anatomiques. Les rayons ligneux permettent le transport horizontal des fluides (eau, sucres ...) et sont constitués de parenchymes radiaux ou trachéides radiales. Les parenchymes sont les cellules vivantes de l’aubier, qui permettent aussi de stocker des éléments nutritifs tels que les sucres issus de la photosynthèse. Il peut aussi exister des parenchymes longitudinaux. Les canaux résinifères sécrètent et transportent des exsudats végétaux utilisés notamment pour cicatriser des blessures. Les trachéides longitudinales sont les cellules élémentaires des colonnes d’eau, qui réalisent les deux fonctions principales du bois : conduction de la sève et soutien mécanique. Elles sont hexagonales dans le bois initial, rectangulaires dans le bois final et mesurent en moyenne 3 mm de long pour une largeur de 10 à 30 μm . Le passage de l’eau d’une trachéide à l’autre se fait par l’intermédiaire des ponctuations dites aréolées. Ces ponctuations sont ouvertes et permettent le passage de l’eau dans l’aubier, mais elles sont fermées dans le duramen. Un torus permet de passer d’un état à l’autre, figure 1.2. Il existe également des ponctuations pour communiquer entre les rayons ligneux et les trachéides longitudinales. Elles sont appelées ponctuations de champ de croisement.

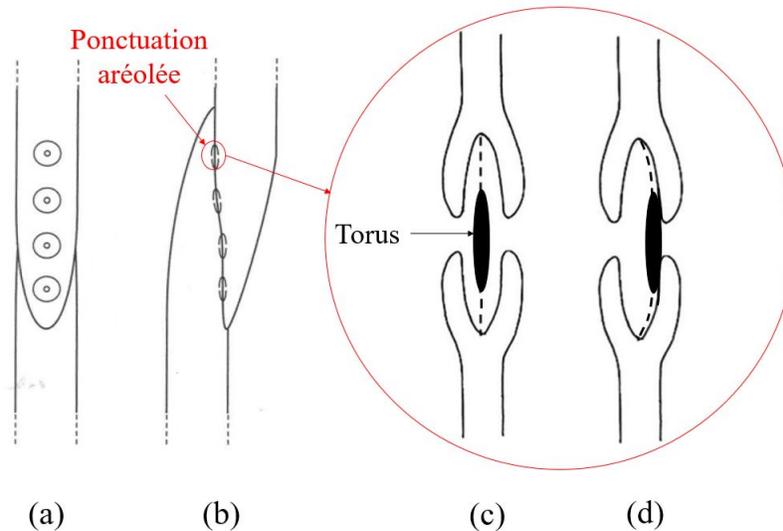


FIGURE 1.2 – Représentation issue de Trouy (2015) : (a) une trachéide en coupe radiale, (b) une trachéide de coupe tangentielle, (c) une ponctuation ouverte, (d) une ponctuation fermée avec le torus aspiré.

Le bois est constitué de trois polymères principaux, dont la proportion chez les résineux est en moyenne : 50% de cellulose, 25% d'hémicellulose et 25% de lignine. La cellulose est un polymère généralement à 50% cristallin alors que les deux autres sont amorphes. À l'échelle microscopique, la cellulose est sous forme de microfibrilles formant l'armature des trachéides, la lignine joue le rôle de ciment agglomérant les microfibrilles de cellulose et les hémicelluloses font l'interface entre la cellulose et la lignine. Une trachéide en elle-même est composée d'un lumen, d'une paroi cellulaire et d'une lamelle mitoyenne. Le lumen correspond à la cavité dans laquelle l'eau est transportée et la lamelle mitoyenne à l'interface entre deux trachéides. La paroi cellulaire est constituée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, elle-même découpée en trois couches : S1, S2 et S3. La couche S2 est la plus épaisse et celle qui a le plus d'impact sur les propriétés mécaniques. Dans cette couche, les microfibrilles de cellulose sont légèrement inclinées par rapport à un plan vertical, c'est ce qu'on appelle l'angle des microfibrilles (AMF). Étant donné que ces microfibrilles de la couche S2 confèrent l'essentiel de la rigidité axiale du bois, l'AMF est de toute importance. En figure 1.3 sont représentées les compositions et la structure du bois à plusieurs échelles, illustrant les éléments discutés précédemment. Sur cette figure sont d'ailleurs indiquées les trois directions qu'impliquent cette structure : la direction longitudinale dans l'axe des trachéides (L), radiale à travers les différentes couches de bois initial et bois final (R), tangentielle en suivant la courbure d'un cerne (T). Ainsi, on peut définir le plan transverse (directions RT), le plan longitudinal-radial (directions LR) et le plan longitudinal-tangentiel (directions LT).

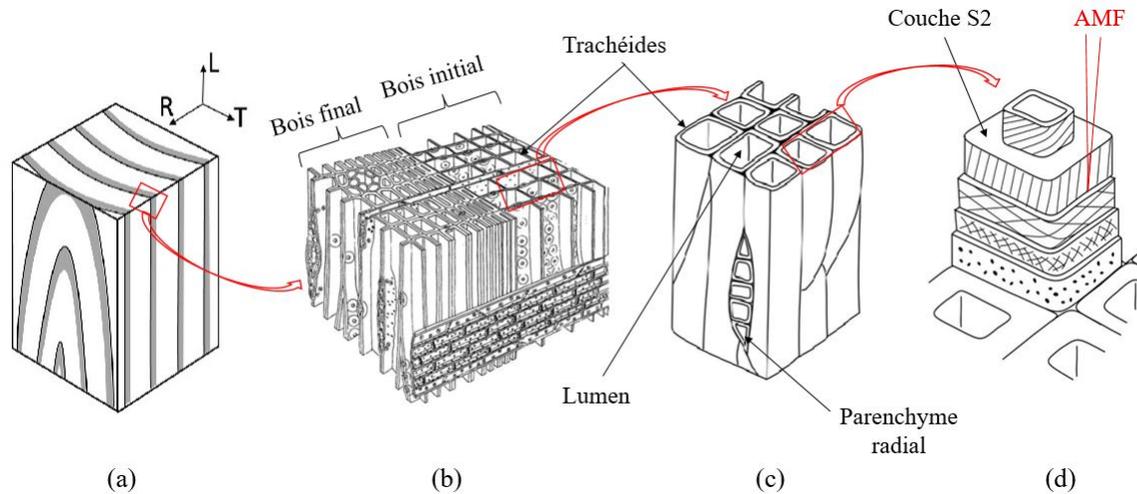


FIGURE 1.3 – Représentation du bois de résineux issue de Phan et al. (2022) : (a) à l'échelle macroscopique, (b) et (c) à l'échelle cellulaire pour représenter les trachéides, (d) à l'échelle microscopique pour représenter la paroi cellulaire.

Cette introduction permet désormais de présenter le sapin pectiné, figure 1.4(a). *Abies alba* est un gymnosperme de la classe des conifères, la famille des Pinacées et la sous-famille des Abiétinoïdes. Ses noms vernaculaires dépendent des régions et peuvent être sapin pectiné, sapin blanc, sapin des Vosges, des Pyrénées, sapin de pays, et même vargne. Il sera appelé sapin pectiné dans ce mémoire. Son nom anglais est *Silver fir*, à ne pas confondre avec le *White fir* qui correspond à *Abies concolor*. Cette essence est endémique des régions montagneuses de l'Europe occidentale, centrale et méridionale. Le sapin pectiné est sciaphile, c'est-à-dire tolérant à l'ombre. Il ne contient pas de résine, bien qu'il fasse partie des "résineux". Son bois ne renferme pas de canaux résinifères et c'est d'ailleurs la différence principale avec l'épicéa (*Picea abies*). C'est un bois à aubier non différencié, le duramen ne contient pas d'extractible augmentant sa durabilité mais les torus y sont aspirés. En conséquence, le sapin ne peut pas être purgé de l'aubier par les scieries, c'est une essence peu durable naturellement. Son bois est clair et il est donc souvent traité en surface ce qui lui donne une apparence jaunâtre lorsqu'il est vendu dans le commerce, figure 1.4(b)(c). Il présente des ponctuations de type abiétinéen, c'est-à-dire qu'elles sont rondes et opposées, d'où son attribution à la sous-famille des Abiétinoïdes. Il montre des ponctuations de champ de croisement de type taxodioïdes, figure 1.5, et comporte des parenchymes longitudinaux marginaux. Enfin, le sapin possède quelques bizarreries anatomiques comme les trabécules, qui sont des formations tubulaires reliant deux parois tangentielles opposées d'une trachéide, figure 1.5.

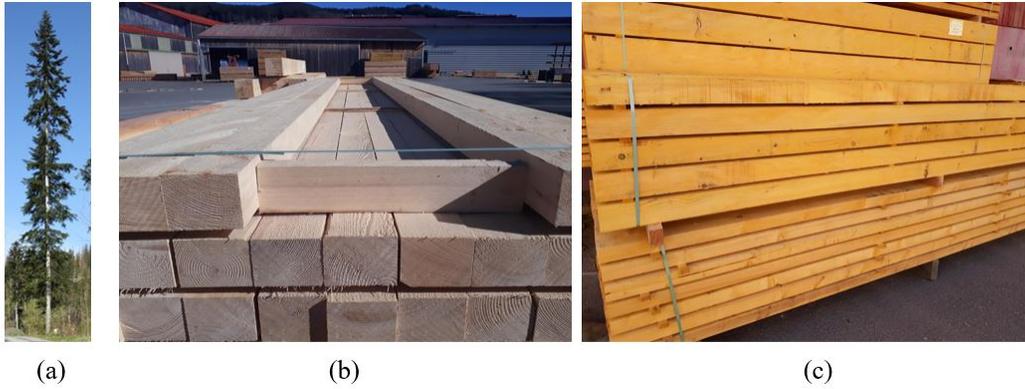


FIGURE 1.4 – Photo de : (a) un sapin pectiné sur pied, (b) du bois de sapin scié non traité, (c) du bois de sapin scié et traité.

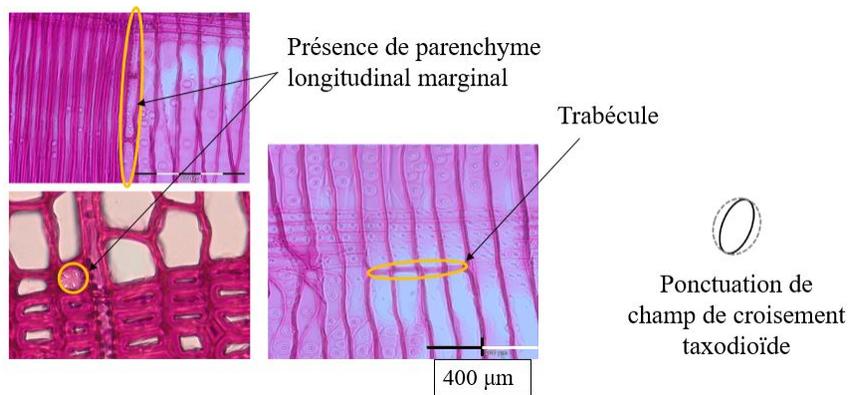


FIGURE 1.5 – Illustration d'un parenchyme longitudinal et d'une trabécule sur des coupes anatomiques, et illustration de la forme d'une ponctuation de champ de croisement de type taxodioïde.

1.1.2 Propriétés usuelles du bois

Les propriétés du bois sont complexes et dépendent de nombreux facteurs. Seule quelques unes seront présentées dans cette sous-section, qui sont particulièrement importantes quand il s'agit de bois d'œuvre et découlent directement de la structure et de l'anatomie du bois. Elles sont vraies pour toutes les essences, résineuses comme feuillues. Ainsi, l'hygroscopie, l'anisotropie, l'hétérogénéité, le vieillissement physique et la sensibilité à la température sont présentés.

- **Hygroscopie**

L'hygroscopie est la capacité à adsorber ou désorber des molécules d'eau depuis l'air. Cet effet provoque des variations dimensionnelles ainsi que des variations de propriétés physiques. Il est sensiblement similaire à l'humidification d'une éponge : quand elle est sèche, elle est rigide et petite et lorsqu'on l'humidifie, elle gonfle et s'assouplit. Cette capacité vient de l'hydrophilie des hémicelluloses, de la lignine et d'une partie de la cellulose qui permet de créer des liaisons hydrogènes avec la vapeur d'eau dans l'air. Les molécules d'eau se placent dans la paroi cellulaire, et notamment dans la couche S2 en "écartant" les microfibrilles de cellulose. Il en résulte une diminution du module élastique et une augmentation des dimensions du bois notamment dans le plan transverse. L'AMF joue un rôle important dans ce retrait-gonflement : plus il est élevé et plus le retrait transverse diminue au profit du retrait longitudinal et inversement. Une grande partie des variations dimensionnelles se joue dans l'orientation des microfibrilles lors de leur écartement. En règle générale, l'AMF est faible bien que non nul, impliquant des retraits-gonflements importants dans la direction radiale et tangentielle, et faibles dans la direction longitudinale. La capacité du bois à adsorber des molécules d'eau a une limite : le point de saturation des fibres (PSF). Une fois que toutes les liaisons chimiques possibles entre l'eau et le bois sont créées, le bois a atteint le PSF. Toutefois, l'eau peut encore entrer, mais uniquement en s'infiltrant dans les pores (lumens, parenchymes ...), sans liaisons chimiques et donc sans impacts sur les propriétés mécaniques et les dimensions. De nouveau, la capacité du bois à contenir de l'eau dans ses porosités est limitée par le volume de ces pores. Il existe donc deux types d'eau dans le bois : *l'eau liée* qui forme des liaisons hydrogènes avec le bois et impacte ses dimensions et ses propriétés physiques, puis *l'eau libre* qui s'infiltré dans les porosités, à l'état liquide ou vapeur. Il y a également *l'eau de constitution* qui pourrait être évoquée, mais elle représente simplement l'eau qu'a utilisé l'arbre pour produire le bois par la photosynthèse. La quantité d'eau présente dans le bois se nommera ici la *teneur en eau* (TE), elle se calcule par :

$$w(t) = \frac{m(t) - m_{anh}}{m_{anh}} \quad (1.1)$$

où $w(t)$ représente la TE ; $m(t)$ est la masse du bois à un instant t et m_{anh} est la masse du bois anhydre. La TE est donc exprimée en pourcentage de la masse sèche du bois. Le PSF est généralement autour de 30%, et la TE maximale possible dépend de la densité du bois et varie de 60 à 450% (Kollmann et Côté, 1968). Lorsque la TE est inférieure au PSF, c'est le *domaine hygroscopique*, puisque c'est essentiellement de l'eau liée qui est échangée avec l'air.

- **Anisotropie**

Comme représenté en figure 1.3(a), le bois présente trois directions principales : longitudinale, radiale et tangentielle. Le bois est alors un matériau *anisotrope*, en cela que ses propriétés physico-mécaniques dépendent de la direction considérée. Hétérogénéités mises à part, la structure du bois présente deux plans de symétrie matérielle orthogonaux, produisant une *orthotropie* des propriétés. De nombreuses propriétés sont affectées par cette orthotropie, on se cantonnera ici aux modules élastiques axiaux et à la diffusion de l'eau dans le bois.

La rigidité du bois est la plus grande dans la direction longitudinale, parallèle aux fibres. C'est assez cohérent puisque c'est justement la direction dans laquelle l'arbre est sollicité au cours de son existence. Ensuite, la direction radiale est plus rigide que la direction tangentielle, parce qu'il peut y avoir des rayons ligneux renforçant cette direction et que les cellules sont plus alignées que dans la direction tangentielle, figure 1.3(c). D'un point de vue mécanique, il y a donc :

$$E_L \gg E_R > E_T \quad (1.2)$$

où E_L , E_R et E_T représentent respectivement le module élastique longitudinal, radial et tangentiel. En réalité, l'évolution du module élastique des résineux en fonction d'un angle θ dans le plan RT n'est pas linéaire et passe par un minimum à 45° . La "pire" direction n'est donc pas tangentielle, mais à 45° entre radiale et tangentielle, notamment parce que le module de cisaillement G_{RT} est très faible chez les résineux (Guitard, 1987).

Les propriétés hygroscopiques sont également affectées. D'abord, le retrait longitudinal du bois est très faible car l'AMF est généralement faible. Ensuite, les retraits-gonflements tangentiels sont plus importants que ceux en direction radiale. Cette différence peut être attribuée à deux facteurs (Siau, 1984) : (i) les rayons ligneux limitent la mobilité radiale et (ii) la direction radiale est une succession en série de bois initial et bois final dans lesquels les retraits-gonflements s'ajoutent, alors que la direction tangentielle est guidée par le bois qui se rétracte ou se gonfle davantage. Or, la densité augmente le coefficient de retrait-gonflement (Mazet et Nepveu, 1991), les retraits-gonflements tangentiels sont donc dictés par ceux du bois final de plus grande densité. Finalement :

$$\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L \quad (1.3)$$

où α_T , α_R et α_L sont respectivement les coefficients de retrait tangentiel, radial et longitudinal. Un coefficient de retrait-gonflement, en %/%, représente la variation dimensionnelle (en %) que provoque 1% de variation de teneur en eau. La vitesse de diffusion est aussi affectée. La direction longitudinale est celle qui diffuse le plus rapidement l'eau, ce qui est cohérent puisque c'est la direction des lumens transportant la sève brute pendant la vie de l'arbre. Ensuite, la direction tangentielle diffuse plus rapidement que la direction radiale. En effet, l'eau traverse plus aisément des pores que de la matière, donc plus le bois est dense et plus la diffusion est lente. Or, de même que précédemment, la diffusion radiale traverse une série de bois initial puis bois final alors que la diffusion tangentielle est guidée par celle de plus faible densité, c'est-à-dire le bois initial. Bien sur, les rayons ligneux peuvent accélérer la diffusion radiale, mais en général on a :

$$D_L \gg D_T > D_R \quad (1.4)$$

où D_L , D_T et D_R représentent respectivement le coefficient de diffusion longitudinal, tangentiel et radial. Un coefficient de diffusion, en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, représente la facilité qu'a le phénomène à se diffuser dans le milieu. Dans le cas de la diffusion de l'eau, il est donc élevé pour les matériaux poreux que l'eau imprègne rapidement et faible pour les matériaux denses.

La direction longitudinale se démarque toujours fortement de la direction radiale et tangentielle. Dans le cas où la direction longitudinale est prédominante, comme c'est le cas d'une poutre débitée dans le sens de la grume, les directions transverses peuvent parfois être confondues et le bois est assimilé à un matériau *isotrope transverse*. Cela revient à ne considérer plus que deux directions de variation des propriétés : longitudinale et transverse.

- **Hétérogénéité**

Dans les régions tempérées, la nature même de sa croissance rend le bois hétérogène : alternance de bois initial et bois final. Selon l'ensoleillement, la compétition pour l'accès à la lumière ou encore la pluviométrie, un arbre verra sa vitesse croissance varier au cours de son existence. En conséquence, les largeurs de cernes ainsi que la proportion de bois initial devant celle du bois final, n'est pas constante. Ainsi, le sapin étant sciaphile, il peut rester des années à l'ombre d'un chêne, avec une croissance lente, puis après l'abattage du chêne être exposé au soleil et accélérer sa croissance. De même, l'anatomie du bois est truffée d'hétérogénéités : les rayons ligneux ou les trabécules. Cependant, les hétérogénéités les plus visibles pour le bois d'œuvre sont les nœuds. Ceux-ci sont issus des branches de l'arbre. Il existe des nœuds adhérents, issus d'une branche encore en activité et des nœuds non adhérents, issus d'une branche tombée depuis longtemps par un élagage naturel (chute d'une branche) ou humain (coupe d'une branche), figure 1.6. Les nœuds provoquent des déviations de fil et sont globalement considérés comme étant des zones de fragilité. Par exemple, si une pièce de bois est chargée en traction dans le sens des fibres, un nœud sera équivalent à une zone chargée dans le plan transverse, nettement moins rigide et résistante que la direction longitudinale. Mais comme il sera discuté dans la suite de ce mémoire, le rôle des nœuds dans la résistance d'une pièce de bois dépend beaucoup de leur position et du type de chargement appliqué.

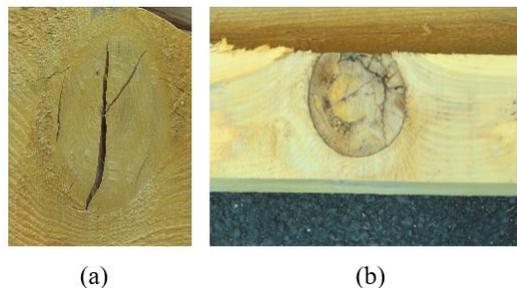


FIGURE 1.6 – Photo de : (a) un nœud adhérent, (b) un nœud non adhérent.

- **Vieillissement et sensibilité à la température**

Le bois est un matériau vieillissant, c'est-à-dire que ses propriétés physiques évoluent avec le temps. Le bois a ainsi tendance à se rigidifier avec le temps, même dans une ambiance parfaitement stable. Ce vieillissement est dû à sa composition faite en partie de polymères amorphes (hémicellulose et lignine) qui ne sont pas en équilibre thermodynamique à température ambiante (Struik, 1977).

Par ailleurs, ces polymères présentent une température de transition vitreuse, au delà de laquelle leurs propriétés mécaniques périclitent. Comme tout matériau, le bois s'assouplit avec une augmentation de température, mais, de plus, à certains seuils, les propriétés chutent drastiquement. Heureusement pour le génie civil, ces températures de transition sont supérieures aux températures de service auxquelles est soumis un bâtiment (Back et al., 1982).

TABLEAU 1.1 – Synthèse des caractéristiques principales du bois.

Propriété	Signification	Explication physique
Hygroscopie	Capacité à adsorber-désorber l'eau, provoquant des variations dimensionnelles et physiques.	Les polymères constitutifs du bois sont en partie hydrophiles.
Anisotropie	Variation des propriétés selon les directions d'observation. Direction remarquable : longitudinale, tangentielle et radiale.	Les trachéides du bois sont orientées longitudinalement et sont mieux alignées dans la direction radiale que tangentielle. Certains éléments anatomiques radiaux, tels que les rayons ligneux, distinguent aussi la direction radiale de tangentielle.
Hétérogénéité	Variation des propriétés au sein du matériau, y compris pour une même direction.	La vitesse de croissance de l'arbre n'est pas constante en région tempérée, ce qui crée naturellement une alternance de bois initial et bois final. Les noeuds et autres spécificités anatomiques sont également des hétérogénéités.
Vieillissement	Les propriétés du bois évoluent dans le temps.	Les polymères constitutifs du bois sont en partie amorphes, qui ne sont pas en équilibre thermodynamique à température ambiante.

1.2 De la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes à la recherche scientifique sur le matériau

1.2.1 Place du sapin pectiné dans la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes

En 2020, la France était le troisième pays le plus boisé d’Europe en volume de bois sur pied, après l’Allemagne et la Suède. En métropole, 75% des forêts sont privées (12 millions d’hectares) et 25% sont publiques (3,9 millions d’hectares) (FCBA, 2020). Ces forêts sont à 72% à dominance feuillue et 28% à dominance résineuse. Les sapins et épicéas sont les résineux les plus importants et représentent 8% des forêts françaises. Les principaux massifs de résineux sont en Auvergne Rhône-Alpes (AuRA), dans les Vosges, en Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA) et dans les Landes, figure 1.7(a). Le sapin pectiné est particulièrement présent en AuRA, puisqu’il constitue 17% de sa forêt, qui est par ailleurs la première région française en volume de bois sur pied. Le Massif Central est ainsi une grande réserve de sapin pectiné, où son bois est au cœur de l’économie de la filière. Les débouchés principaux sont le coffrage, la charpente traditionnelle et l’emballage. Toutefois, il est de moins en moins demandé au profit de l’épicéa et du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et une grande partie des forêts du Massif Central est privée. Les sapins sont donc devenus vieillissants, impliquant une grande partie de "gros bois", figure 1.7(b). Ces gros bois sont parfois vus comme une épine dans le pied, puisqu’ils ne sont plus exploitables par des scieries industrielles, mais peuvent aussi être vus comme une inestimable richesse écologique. En effet, les vieux et gros arbres abritent plus de dendromicrohabitats, constituant des indicateurs fiables de biodiversité, et contribuent davantage au stockage du carbone (Larrieu et Gonin, 2008).

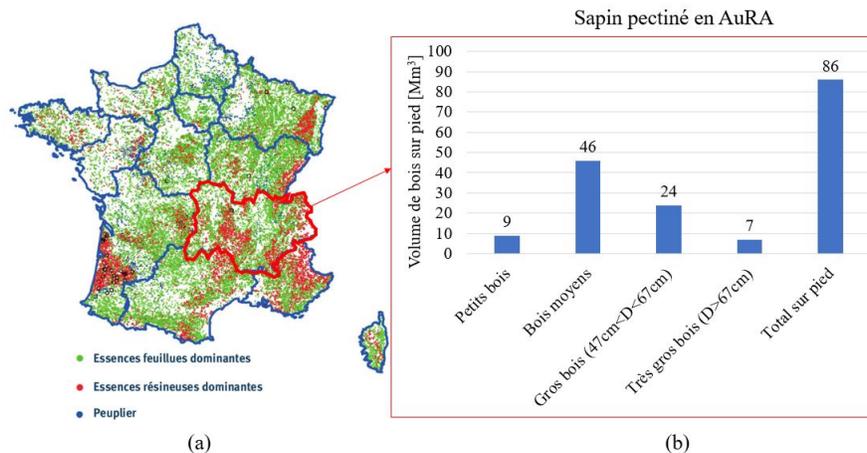


FIGURE 1.7 – Répartition de : (a) formations boisées en France par type d’essence issues de FCBA (2019) et (b) diamètre des sapins en AuRA issus de FiBois (2019a), où D représente le diamètre de l’arbre à 1,3 m du sol.

Depuis les années 1980, de plus en plus de signalements de dépérissement du sapin pectiné sont recensés (Cailleret, 2011). La principale raison serait leur sensibilité à la sécheresse,

qui mène à des embolies (Mantova et al., 2022) et des attaques plus grave de scolyte. Le changement climatique intensifie et augmente la fréquence des sécheresses, ce qui va sans doute conduire à des pertes colossales de sapin d'ici 2050 ou 2100. Une étude de FiBois Bourgogne Franche Comté (BFC) indique que l'épicéa est encore plus touché que le sapin par ces sécheresses (FiBois, 2019b).

Malgré tout, le bois de sapin est généralement apprécié par les charpentiers de la région AuRA. Bulteau et al. (2022) ont d'ailleurs mené une étude de cas sur l'usage historique du sapin pectiné dans le patrimoine bâti du Livradois-Forez. Ils ont prélevé des carottes sur différents bâtis de cette région et la forte présence de sapin atteste de son importance historique. À son avantage, il aurait une meilleure résistance mécanique que l'épicéa, et c'est un bois clair et facile à usiner donc apprécié en architecture (FiBois, 2019a). L'absence de résine le rend aussi avantageux pour la menuiserie.

Par l'intermédiaire des rencontres avec FiBois AuRA, des données sur les propriétés du sapin pectiné issues de rapports industriels ont pu être obtenues. Ces rapports d'étude sont multi-acteurs et font partie de la littérature grise du sujet :

- Rapport final de la "Qualification de la production de sciages résineux du massif vosgien destinés au marché de la construction et possibilités de valorisation notamment pour les qualités inférieures", rédigé en 2011 par l'institut technologique FCBA ;
- rapport final des "Essais de classement mécanique d'essences locales Ardèche-Drôme", rédigé en 2006 par FIBRA ;
- la "Certification technologique des sciages alsaciens", rédigé en 2007 par FiBois Alsace ;
- rapport final "Caractérisation mécanique du vieux sapin du massif central", rédigé en 2009 par CERIBOIS ;
- la présentation de "Étude de caractérisation du sapin du Jura", issue de FiBois BFC en 2019.

Ces études concernent particulièrement le classement mécanique des bois de structure. Le marquage CE (Conformité Européenne) est obligatoire en France pour une pièce de bois destinée à un usage en structure. Ce marquage sert entre autres à attribuer une classe mécanique à la pièce de bois, qui définit la résistance et la rigidité par une approche statistique selon les normes NF EN 14081 parties A, B et C (AFNOR, 2018, 2022a,b). Elle peut être classée visuellement par la norme NF B52-001-1 (AFNOR, 2018) ou par machine. Pour les résineux, les classes les plus importantes sont C18, C24 et C30. Le nombre indique la résistance en flexion assurée dans au moins 95% des cas (une poutre C18 possède 95% de chance de résister à une contrainte de 18 MPa). Un bois C18 peut être utilisé en charpente traditionnelle, un C24 en charpente industrielle et un C30 en charpente haute performance ou pour du lamellé collé. Toutes les études évoquées ci-dessus montrent que le classement visuel est moins fiable et beaucoup plus pénalisant que le classement par machine.

En figure 1.8 sont représentées les répartitions des classements par machine de trois de ces études pour le sapin pectiné. Chaque graphique devrait idéalement représenter le classement moyen des poutres de sapin pectiné d'une région. Il est intéressant de constater que les

résultats sur le sapin des Vosges ont été obtenus à partir de questionnaires envoyés à des scieries, tandis que les résultats pour le sapin du Massif Central ont été obtenus à partir d'une étude indépendante réalisée en aveugle. La méthode par questionnaire implique probablement un biais qui explique l'exceptionnelle qualité du sapin des Vosges.

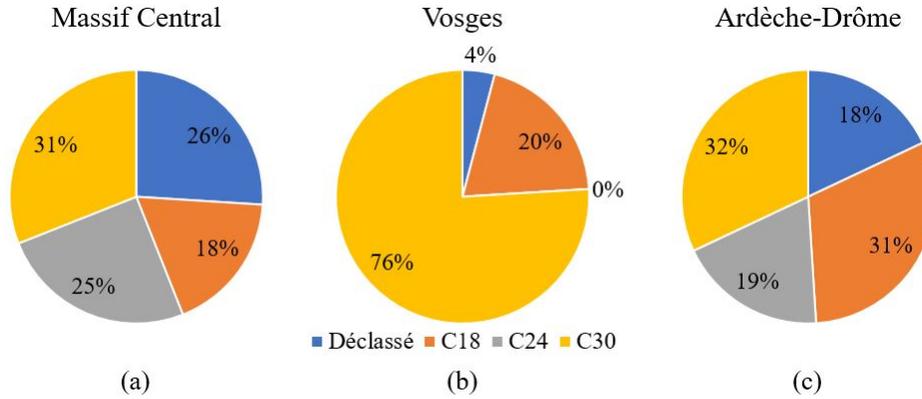


FIGURE 1.8 – Répartition régionale des classements de pièces de bois de sapin : (a) Massif Central, (b) Vosges, (c) Ardèche et Drôme.

En comparaison avec l'épicéa, le sapin semble légèrement meilleur, en cela qu'il a un MOR (*Modulus of rupture*), c'est-à-dire la résistance en flexion à 12% de TE et une densité plus grande, tableau 1.2. Le MOE (*Modulus of elasticity*), c'est-à-dire la rigidité longitudinale à 12% de TE, est également indiquée dans le tableau mais n'est pas discriminante. L'étude de FiBois BFC a également montré que le bois de sapin qui pousse en altitude est de meilleure qualité mécanique.

TABLEAU 1.2 – Comparaison des propriétés mécaniques moyennes entre le sapin et l'épicéa selon l'étude de FiBois BFC sur le Jura et du FCBA sur le massif des Vosges

	Massif du Jura		Massif des Vosges	
	Épicéa	Sapin	Épicéa	Sapin
MOR [MPa]	40,1	41,6	41,6	44,8
MOE [GPa]	10,6	10,4	11,6	12,5
ρ [kg.m ⁻³]	417	423	437	467

Enfin, le bois de sapin pectiné serait fissile (CIRAD, 2012), et "*un bon bois de fente*" (Compagnons du Devoir, 1977). Alors que les mécaniciens utilisent les termes de ténacité ou fragilité pour quantifier les propriétés de rupture d'un matériau, les professionnels du bois utilisent plutôt la fissilité ou la résistance au fendage. La ténacité représente la capacité d'un matériau à résister à la propagation de fissure, et la fragilité représente son incapacité à se déformer en dehors du domaine élastique. La fissilité représente la propriété d'un bois à se diviser en couches, en feuillets, et la résistance au fendage correspond au degré de fissilité. Selon Triboulot (2003), les parenchymes radiaux, canaux résinifères, trachéides radiales créent un maillage

(figure 1.3, 1.5) qui rend le bois moins fissile. La longueur des trachéides longitudinales augmente également la fissilité. Or le sapin possède des trachéides longitudinales longues, n'a pas de canaux résinifères et peu de parenchymes longitudinaux, pouvant expliquer en partie sa grande fissilité.

Cette place qu'occupe le sapin pectiné dans la filière bois de la région a poussé des instituts de recherche, notamment clermontois, à mener des investigations sur les propriétés et les innovations possibles avec cette essence.

1.2.2 Travaux de recherche à Clermont Auvergne INP

Le projet ANR CLIMBOIS (impact des variations CLImatiques et Mécaniques sur la durabilité des constructions BOIS) géré par Rostand Moutou Pitti et l'arrivée de Joseph Gril ont porté une grande part des travaux de recherche récents sur le bois de sapin pectiné à Clermont Auvergne INP, par le biais du laboratoire Institut Pascal. Le projet ANR avait pour objectifs d'étudier les couplages entre fluage et fissuration associés à des variations hygro-thermiques, et de monter en compétences sur des méthodes de mesures non destructives (Corrélation d'Image Numérique, émissions acoustiques ...). Le sapin pectiné s'est retrouvé en partie sujet de ces études parce qu'il est abondant dans la région AuRA, mais aucun contact avec la filière n'était encore initié. Ce projet étant également en partenariat avec le centre national de la recherche scientifique et technologique du Gabon, les bois tropicaux y sont impliqués. Des stages, des thèses et du matériel expérimental ont ainsi pu être financés.

En premier lieu, le stage de master de Adjovi Loko (2015) a consisté en des essais de fissuration sur du douglas et du sapin, ainsi qu'en un dimensionnement de poutres entaillées prévues afin de réaliser des essais de fluage couplés à la fissuration. Les résultats de fissuration ont montré que la TE augmente la ténacité et que le sapin est moins tenace que le douglas. L'étude du dimensionnement s'est basée sur un modèle éléments finis Cast3M de poutre entaillée pour prévoir la longueur et hauteur d'entaille nécessaire pour assurer une rupture par fissuration plutôt que par flexion dans la zone centrale. La poutre devait également avoir une section suffisamment grande pour assurer un effet tampon lors des variations de TE et respecter les contraintes du banc d'essais. Après validation expérimentale du dimensionnement, l'étude des poutres entaillées était commencée, figure 1.9.

La thèse de Pambou Nziengui (2019) a pour objet l'étude du fluage de ces poutres entaillées en environnement extérieur, figure 1.10. Le banc d'essais de cette étude a été financé par le Pack Ambition Recherche de CAP 20-25 et a été un défi expérimental permettant d'identifier les difficultés de mesure dans de telles conditions. Le MOE de ces poutres de sapin était entre 11,3 et 15,2 GPa, meilleur que la moyenne des bois de sapin du Massif Central (figure 1.8(a)). Les essais ont montré une augmentation des propagations de fissure lors des journées chaudes et sèches, et un modèle analytique de calcul de flèche centrale prenant en compte le cisaillement a été développé.

Les thèses d'Asseko (2022) et celle-ci font suite à ce travail de recherche du couplage entre fluage et fissuration en environnement sévère, le travail de Pambou Nziengui (2019) est donc

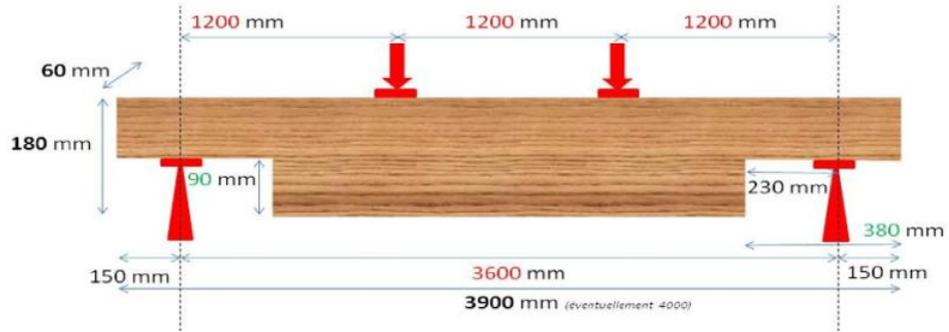


FIGURE 1.9 – Dimensionnement des poutres entaillées pour assurer la rupture par fissuration en flexion 4-points, par Adjovi Loko (2015).



FIGURE 1.10 – Photos des essais de fluage de poutres entaillées en extérieur, issues de Pam-bou Nziengui (2019).

abondamment évoqué dans ce mémoire. Le stage de Phan (2019) a également porté sur l'étude des poutres entaillées mais sous une approche purement numérique. Il a développé un modèle éléments finis Cast3M afin de simuler les paramètres mécaniques et les comparer aux résultats de fluage de la thèse d'Asseko (2022) en ambiance contrôlée. Le modèle a aussi servi à calculer le taux de restitution d'énergie critique pour des bois de feuillus.

Le travail d'Asseko (2022) a également consisté en des essais de diffusion qui ont fourni des paramètres de sorption du sapin du Massif Central. Enfin, le stage de Mambili (2017) a montré que le sapin est plus tenace que le peuplier par des essais de fissuration.

En tableau 1.3 sont recensées quelques propriétés du sapin pectiné issues de travaux de recherche.

TABLEAU 1.3 – Propriétés mesurées sur le sapin pectiné à 12% de TE.

	Sapin pectiné
Masse volumique ρ [kg.m^{-3}] (CIRAD, 2012)	490
Module élastique longitudinal E_L [GPa] (CIRAD, 2012)	14,3
Module élastique radial E_R [GPa] (Guitard, 1987)	1
Module élastique tangentiel E_T [GPa] (Guitard, 1987)	0,636
Point de saturation des fibres [%] (CIRAD, 2012)	29
Coefficient de retrait-gonflement radial α_R [%/%] (Nguyen, 2016)	0,19
Coefficient de retrait-gonflement tangentiel α_T [%/%] (Nguyen, 2016)	0,37
Coefficient de retrait-gonflement longitudinal α_L [%/%] (Nguyen, 2016)	0,008
Coefficient de diffusion radial D_R [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] (Nguyen, 2016)	$3,28.10^{-11}$
Coefficient de diffusion tangentiel D_T [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] (Nguyen, 2016)	$1,64.10^{-11}$
Coefficient de diffusion longitudinal D_L [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] (Nguyen, 2016)	$3,39.10^{-9}$

Conclusion sur le contexte de ce travail de recherche

La première section de ce chapitre introduit brièvement l'anatomie et les caractéristiques du bois. Elle montre que le bois est hygroscopique, anisotrope, hétérogène et vieillissant et que ces propriétés s'expliquent par les fonctions qu'il occupe dans l'arbre. La deuxième section fait un état des lieux de la place du sapin pectiné dans la filière bois et des recherches menées à Clermont Auvergne INP. Le sapin est particulièrement présent dans les forêts du Massif Central et ses propriétés en font un bon bois de structure, bien qu'il soit de moins en moins demandé au profit de l'épicéa et du douglas. Les travaux de recherche sur le bois à Clermont Auvergne INP ont porté en partie sur le sapin pectiné, développant des études sur des poutres entaillées subissant du fluage et de la fissuration.

Dans le but de s'approcher des problématiques de la filière bois d'AuRA, une enquête de terrain auprès des professionnels a été menée au cours de cette thèse et fera l'objet du prochain chapitre. Il s'agit notamment de se demander pourquoi le sapin pectiné est de moins en moins demandé ? Est-il une essence d'avenir ?

Chapitre 2

Les usages et problématiques du sapin pectiné dans la filière bois d’Auvergne Rhône-Alpes

2.1 Enquête auprès de la filière bois

2.1.1 Matériel et méthodes

Afin de s’assurer de répondre à des problématiques rencontrées lors de l’usage du sapin pectiné en Auvergne Rhône-Alpes (AuRA), une enquête de terrain est menée. Elle commence par une rencontre avec l’association d’interprofessions FiBois AuRA, puis se poursuit par une série d’entretiens avec différents acteurs de la filière bois de la région. La première rencontre avec FiBois met en exergue que le sapin pectiné est une essence importante en AuRA mais qu’elle fait face à deux problèmes principaux : un massif vieillissant impliquant une grande proportion de gros bois (figure 2.1(b)) et un problème de séchage dû à la présence de poches d’eau dans le duramen. Il est alors décidé de se concentrer sur la problématique du séchage du sapin : quelles sont les causes de ces poches d’eau et comment s’adapter à un bois difficile à sécher ?

Les acteurs sont choisis pour leur connaissance de ce sujet ou pour leur travail du sapin pectiné. Les scieries et charpentiers sont les principaux concernés, et un bureau d’étude et des membres du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) sont également questionnés. L’enquête est réalisée en deux temps, des premières rencontres de février à avril 2020 par moi-même ; puis d’avril à juin 2022 par Florence Mathieu, stagiaire à Clermont Auvergne INP pendant cette période.

La liste des acteurs rencontrés est présentée en tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Liste des acteurs rencontrés pour l’enquête de terrain.

Organisme	Personne rencontrée	Type	Localisation	Date	Intérêt
FiBois AuRA	A. Laffon, N. Da Silva, J.P. Mathé, F. Castaings	Association d’interprofes- sions	Clermont- Ferrand (AuRA)	09/01/20	Fédérateur de la fi- lière bois d’AuRA
Sylva Conseil	J.L. Vigier	Bureau d’étude	Clermont- Ferrand (AuRA)	18/02/20	Bureau d’étude en construction bois
LRMH	C. Lavier	Archéo- dendromètre	Champs-sur- marne (IDF)	23/03/20	Étude des monu- ments historiques
LRMH	E. Maurin	Ingénieur bois	Champs-sur- marne (IDF)	25/03/20	Étude des monu- ments historiques
Scierie du Fo- rez	E. Planche- Foulhoux	Scierie	Vollore Mon- tagne (AuRA)	21/02/20	Sciage de sapin d’AuRA
Scierie Cho- rain	J.F. Cho- rain	Scierie	Marhles (AuRA)	27/03/20	Sciage de sapin pectiné d’AuRA
Scierie Borie	D. Marian	Scierie	Salzuit (AuRA)	09/05/22	Sciage de sapin pectiné d’AuRA
Entre toits et bois	M. Garros	Charpentier	Toulouse (Occi- tanie)	09/04/20	Charpente tradi- tionnelle
/	M. Ma- nesse	Charpentier	Verjux (BFC)	04/04/22	Charpente tradi- tionnelle
/	M. Séra- phin	Charpentier	Beaufort (Quey- ras)	05/04/22	Costes équarries
Bolver	T.Verdier, L.Bollengier	Charpentier	Jax (AuRA)	21/04/22	Charpente tradi- tionnelle
/	P. Zahnd	Charpentier	Pontarlier (BFC)	27/04/22	Charpente tradi- tionnelle
Tout en Ron- dins	J.C.Chatelus	Charpentier	St Jean Soley- mieux (AuRA)	20/05/22	Fustes façonnées

Les trois scieries rencontrées sont en AuRA et travaillent le sapin, elles sont directement concernées par les problèmes de séchage. La scierie du Forez se situe dans le nord du Massif Central et la scierie Borie au sud. Les six charpentiers ne sont pas tous en AuRA mais illustrent la diversité des usages contemporains du bois vert ou partiellement séché et les pratiques mises en oeuvre pour gérer les instabilités dimensionnelles et mécaniques du bois. Ils pourraient pour la plupart être qualifiés de "charpentier-forestier", compte tenu de leur intime connaissance de l'arbre et car tous sélectionnent leurs arbres en forêt. Un fustier est inclus, soit un professionnel qui utilise la technique des fustes consistant à empiler tête-bêche des grumes, figure 2.1(a). Enfin, C. Lavier et E. Maurin du LRMH ont une grande connaissance des techniques de construction anciennes utilisant du bois vert. Les thématiques abordées dépendent de l'acteur questionné et sont multiples : de l'avis du charpentier sur le sapin pectiné aux causes de la disparition progressive de la construction en bois vert. En annexe A se trouvent les trames utilisées pour les entretiens. À cela s'ajoutent des informations glanées au fur et à mesure des rencontres, comme celle de Joseph Brihiez et Pascal Warrengo de l'association Charpentiers Sans Frontières.



FIGURE 2.1 – Exemple de (a) gros sapin pectiné sur pied à La Chapelle Agnon (Puy de Dome) ©J.Facy, (b) chantier de construction utilisant la technique des fustes ©F.Mathieu.

2.1.2 Résultats et discussion

La liste des comptes-rendus des entretiens est en annexe B.

La scierie du Forez, la scierie Chorain et la scierie Borie s'approvisionnent en bois locaux dans un rayon de 50 km. À l'exception de la scierie Chorain, elles ne scient pas les gros bois, c'est-à-dire ceux au-delà de 47 cm de diamètre. En effet, ces gros bois nécessitent des bûcherons manuels, sont lourds à transporter et ne peuvent pas être sciés par les canters industriels. Par ailleurs, la scierie Chorain, scierie du Forez et Sylva Conseil rapportent que les gros bois sont fréquemment pourris à cœur. Les trois scieries ont connaissance du problème des poches d'eau et seule la scierie Chorain sèche le sapin en séchoir, seulement si la météo ou l'urgence l'impose. Les scieries Borie et du Forez appliquent tout au plus un séchage à l'air libre, appelé ressuyage. En général, il est commun d'associer l'épicéa et le sapin, mais les poches

d'eau rendent ces deux essences incompatibles dans un même cycle de séchage (FCBA, 2019). Or, sécher séparément le sapin nécessiterait un cycle indépendant en séchoir et serait trop onéreux. Par ailleurs les trois scieries et le bureau d'étude Sylva Conseil rapportent que le sapin supporte mal le séchage en séchoir, en cela qu'il se fend et présente un profil hydrique très hétérogène. La scierie Chorain compte ainsi s'équiper d'un séchoir grande capacité à basse température qui pourrait permettre de laisser le sapin sécher plus longtemps (OLERGIE et FiBois, 2019). La scierie Borie rapporte que ce type de séchage, initialement adapté au "bois dur" comme le chêne, est idéale pour le sapin. La vente de sapin à l'état vert ou partiellement séché est donc pour le moment monnaie courante, l'excluant d'office de tout débouché utilisant des techniques de collage (lamellé-collé, contreplaqué, BRM). Les débouchés principaux pour un bois de sapin vert ou partiellement séché sont la charpente traditionnelle, le coffrage et dans une moindre mesure l'emballage (FiBois, 2019a). Ainsi pour la scierie Borie, 60% de ses débouchés sont la charpente traditionnelle et 40% le coffrage et l'emballage. Or, les trois scieries rapportent que le marché des bois secs prend de plus en plus d'ampleur, notamment par le développement des techniques constructives de bois collés et par la rigueur imposée par les normes de construction. Enfin, les trois scieries ont de bons retours de la part des charpentiers quant à l'usage du sapin, étant considéré comme ayant une meilleure résistance mécanique que l'épicéa.

Tous les charpentiers interrogés travaillent effectivement le sapin à l'état vert, en charpente traditionnelle ou fustes. Néanmoins, aucun d'entre eux n'a connaissance d'une problématique de poches d'eau, en tout cas pas selon cette dénomination. Ils constatent parfois des zones colorées et humides au toucher, mais n'en tiennent pas rigueur. Pour eux, la construction en bois vert n'est pas une contrainte, bien au contraire, elle fait partie intégrante de leur métier. En effet, l'ensemble des charpentiers enquêtés ont un lien étroit avec la scierie qui les approvisionnent, en allant parfois eux-mêmes sélectionner les arbres qui seront abattus et le charpentier de Tout en Rondins va jusqu'à exiger que la construction d'un bâtiment soit réalisée à partir d'arbres issus d'un même peuplement. Pour les charpentiers, la qualité d'une construction dépend de toute la chaîne opératoire : la sylviculture, l'abattage, l'écorçage, l'équarrissage ou le sciage et enfin la charpente. Sans une maîtrise de chacun de ces maillons, la qualité d'un ouvrage est compromise. Il est important de préciser ici que par "qualité" il n'est pas fait uniquement référence à l'efficacité d'une structure à remplir sa fonction, mais aussi à l'histoire et l'unicité qu'elle porte en elle. Il ressort de ces entretiens le rôle de chacun des maillons :

1. Il est préférable de choisir des arbres rectilignes et peu branchus pour éviter la présence de nœuds et les pentes de fil. Un sapin ayant poussé en altitude a par ailleurs une croissance plus lente lui conférant des cernes serrés, gage d'une grande densité et donc d'une meilleure résistance mécanique ;
2. l'abattage doit ensuite se faire en période hors-sève, en hiver, et même à la "bonne" lune. Cette période d'abattage permet de réduire la teneur en eau et la teneur en sucre du bois, permettant de réduire sa période de séchage et d'augmenter sa durabilité. L'arbre ne doit également subir aucun choc lors de sa chute, au risque que les propriétés mécaniques périclitent ;

3. l'écorçage précoce est préférable, si possible en forêt, pour éviter les attaques d'insectes. Il permet également d'éviter d'abîmer les lames des outils, que ce soit au sciage ou à l'équarrissage ;
4. le sciage ou l'équarrissage doit suivre le fil du bois autant que faire se peut. E. Maurin et la scierie Chorain rapportent que le débit sur quartier (figure 2.3(b)) permet d'éviter les déformations du séchage comme le tuilage ou le vrillage. Ce type de débit provoque toutefois d'importantes pertes de matière. L'équarrissage à la hache (figure 2.2(a)) permet d'obtenir systématiquement un débit sur quartier qui suit le fil du bois, il est utilisé par Charpentiers Sans Frontières et P. Zahnd. Autrement, les pièces sont choisies en fonction de leur usage : un débit sur dosse aura le coeur orienté vers le soleil (Entre toits et bois), la contre-flèche d'une poutre sera utilisée intelligemment (figure 2.3(a)), etc. ;
5. les charpentiers laissent ensuite le bois en ressuyage pendant quelques mois, à l'exception du fustier qui l'utilise directement à l'état vert. Chaque pièce de bois est utilisée intelligemment selon les principes de la charpente traditionnelle. Notamment, les cernes du bois permettent d'anticiper les retraits (figure 2.3(b)) et les techniques d'assemblage par contact bois-bois sont privilégiées. En effet, une pièce de bois séchant dans la direction tangentielle viendrait serrer une pièce séchant dans la direction radiale, en raison de la supériorité du coefficient de retrait-gonflement tangentiel (figure 2.3(d)). Par exemple, les tenons-mortaises (figure 2.3(c)) consistent à piéger une pièce mâle dans une pièce femelle. Ainsi, ces techniques d'assemblage ne s'accommodent pas seulement d'un bois à l'état vert, elle le recherche. Toutefois, elles demandent davantage de compétences et de temps pour la construction d'un bâtiment, notamment parce qu'il faut anticiper les retraits et garantir que ceux-ci assureront la stabilité de l'ouvrage. La technique des costes utilisée par M. Seraphin consiste en l'empilage tête-bêche des grumes tout juste équarries. Cette méthode et celle des fustes sont aussi des bons exemples de techniques constructives s'accommodant des retraits du bois : la structure perd 15 cm de hauteur par étage.



FIGURE 2.2 – Equarrissage à la hache : (a) ©F. Calame de Charpentiers Sans Frontières et (b) J. Gril pendant l'école thématique Pluribois 2022.

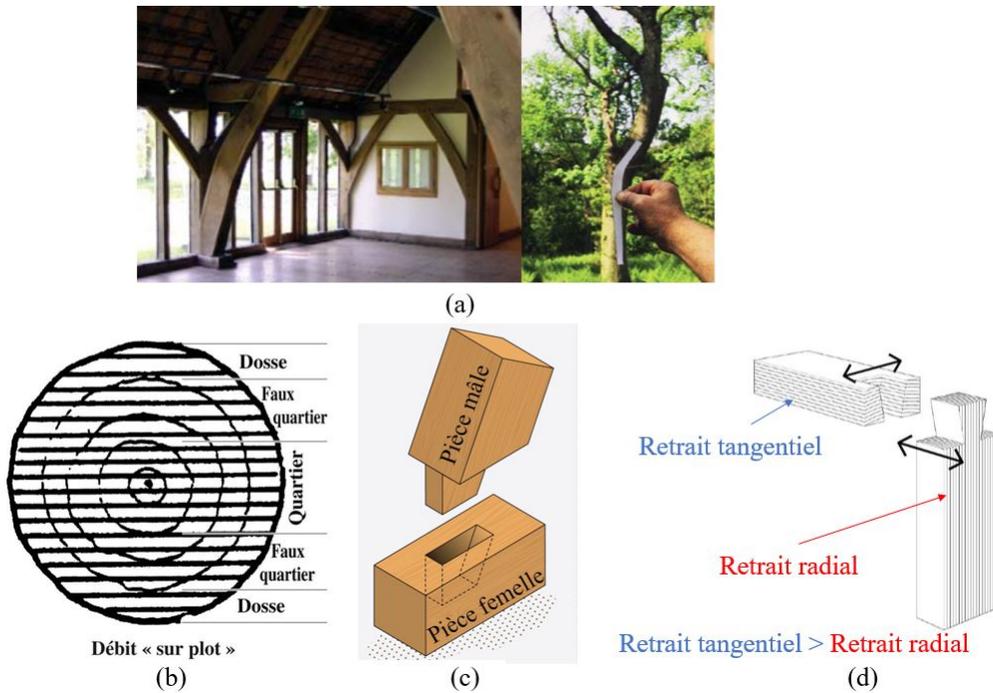


FIGURE 2.3 – Illustration des techniques de charpente traditionnelle : (a) exploitation intelligente de la courbure naturelle d'un arbre pour une structure ; (b) les différents types de débit lors d'un sciage d'une grume, (c) la technique d'assemblage tenon-mortaise ; (d) la technique d'assemblage à queue d'aronde où la pièce femelle est en retrait tangentiel afin de piéger la pièce mâle qui est en retrait radial.

En suivant ces recommandations, qui sont fortement inspirées des techniques constructives traditionnelles, une construction en bois vert n'est pas un problème et fait même partie du processus. Selon E. Maurin et C. Lavier, l'intégralité des monuments historiques a été construit en bois vert à partir de ces mêmes principes, en attestent les analyses dendrochronologiques et les recherches historiques sur le sujet. Cette observation est en soi une preuve de la faisabilité d'une construction en bois vert et les techniques constructives présentées par les charpentiers enquêtés en expliquent les fondamentaux. Enfin, de l'avis de tous les charpentiers et C. Lavier, la durabilité d'un ouvrage n'est pas remise en cause lors d'un assemblage en bois vert, tant que la structure est ventilée. L'aubier est la partie à risque, étant donné qu'il contient potentiellement encore des sucres, mais c'est aussi le cas du bois sec et cet aspect se gère par la date d'abattage et le sciage.

Enfin, ces techniques ne promeuvent pas la productivité et la répétabilité. Elles exigent plutôt un couplage entre tous les maillons de la chaîne opératoire et une réflexion appropriée sur l'usage de chaque pièce de bois. Brihiez (2021) voit même le bois vert comme un "*matériau temporel*", en cela qu'il "*est constitué par son écoulement dans le temps, il apparaît en séchant et selon la manière dont il sèche*". C'est d'ailleurs en partie pour cette raison que l'usage du bois vert s'éteint au profit du bois sec. Dans l'ère technologique actuelle, un modèle de construction productif, qui permet de construire des immeubles en lamellé-collé et qui minimise les pertes matières, s'est sans surprise imposé.

En conclusion, cette enquête a mis en exergue que des problèmes de séchage du sapin sont rencontrés par les scieries du Massif Central qui se contraignent donc à le vendre à l'état vert. Ce bois vert part majoritairement en charpente traditionnelle, qui est un principe constructif tout à fait adéquat au bois vert mais qui est un marché en perte de vitesse. Le cœur du problème de séchage vient du phénomène de poches d'eau, dont la section suivante en fera l'état de l'art. Les normes et modèles de construction actuels privilégient le bois sec, mais il est envisageable d'imaginer de nouveaux débouchés s'accommodant de bois vert en s'inspirant des techniques traditionnelles telles des structures ventilées type bâtiment agricole ou ombrières.

Cette enquête a donc permis de préciser la problématique autour de deux questions : comment évolue le comportement en fluage du sapin à l'état vert lorsqu'il est utilisé en structure ventilée ? Également, comment évolue le couplage fluage et fissuration couramment rencontré en structure ?

2.2 Étude bibliographique du phénomène des poches d'eau dans le duramen

2.2.1 Définition et hypothèses sur leurs origines

Dans la littérature anglo-saxonne, de nombreux termes utilisés peuvent correspondre au nom de poches d'eau : "*red heart*", "*false heartwood*", "*wetwood*", "*wet pocket*", "*water pocket*" et "*wet spots*". C'est aux États-Unis que la littérature est la plus riche sur ce sujet et la pluralité des termes suppose qu'il y a des cas particuliers non distingués en français. Le nom le plus

général est "*wetwood*". Ce terme a différentes acceptation, il a été défini par Ward et Pong (1980) comme un type de duramen dans l'arbre sur pied qui est rempli d'eau, par Coutts et Rishbeth (1977) comme une zone centrale de bois mort et imbibée d'eau, par Worrall et Jr (1982) comme un bois mort imbibée d'eau dans l'arbre sur pied ou encore par Nakada (2006) comme le phénomène d'accumulation d'eau dans le duramen. Le point commun de ces définitions est qu'un duramen imbibé d'eau dans l'arbre sur pied. Des poches d'eau sont illustrées en figure 2.4.

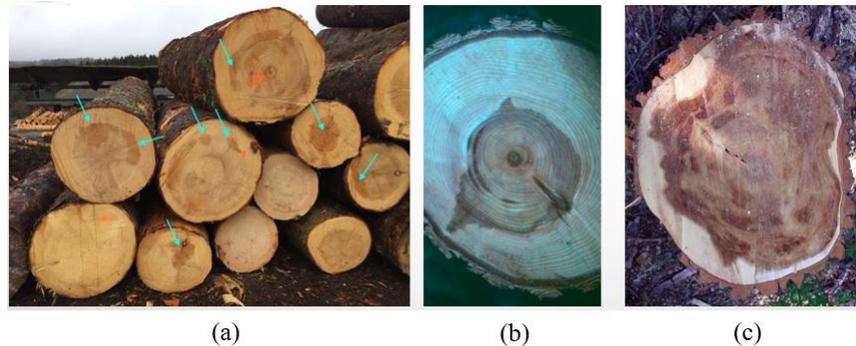


FIGURE 2.4 – Photos de poches d'eau : (a) chez le sapin pectiné, (b) chez le sapin du colorado (*Abies concolor*) et (c) chez le peuplier à feuilles étroites (*Populus angustifolia*).

Dans ce mémoire le terme poches d'eau se réfère au terme général "*wetwood*".

Les essences présentant le plus fréquemment des poches d'eau sont :

- chez les résineux : principalement le genre *Abies* (*Abies alba*, *Abies grandis*, *Abies balsamea*, *Abies concolor*) (Worrall et Parmeter, 1982; Coutts et Rishbeth, 1977; Worrall et Jr, 1982; Jeremic et al., 2011; Ohsaki et al., 2007; Alkan et al., 2007) et le genre *Tsuga* (Ward et Pong, 1980);
- chez les feuillus : le genre *Populus* (certains peupliers et le tremble) (Baettig et al., 2017), le genre *Ulmus* (les ormes) (Murdoch et al., 1987) et au moins le hêtre (*Fagus Sylvatica*) (Goncz et al., 2018).

Cette liste n'est pas exhaustive. Un tableau recensant les occurrences des poches d'eau sur des essences nord américaines été établi par Ward et Pong (1980).

Ce sont principalement des bois à aubier non différencié qui sont sujets à la présence de poches d'eau, à l'exception du genre *Ulmus* (Trouy, 2015).

Dans la mesure où les poches d'eau sont une accumulation d'eau dans une zone du duramen, discuter de leur origine revient à expliquer comment l'eau est arrivée dans le duramen et comment elle y reste. Dans la littérature, les mécanismes identifiés comme potentiellement responsables de l'apparition des poches d'eau sont :

- une infiltration provenant d'une source extérieure, au travers de blessures ou de branches mortes;
- une activité bactérienne élevée, capable de produire de l'eau liquide;

- une arrivée d'eau par les racines, qui passe de l'aubier au duramen par une différence de potentiel hydrique.

Il est important de préciser que le processus de formation des poches d'eau ne fait pas encore consensus dans la communauté scientifique. Aucune de ces propositions n'a été définitivement démontrée ou exclue, et chacune est présentée ci-dessous.

Infiltration d'eau extérieure

Le projet Sap-In du PIAF (Physique et Physiologie Intégrative de l'Arbre en environnement Fluctuant) à Clermont-Ferrand consiste en l'étude de la formation des poches d'eau du sapin pectiné d'Auvergne (*Abies alba*). Les premiers résultats publiés semblent indiquer que l'eau pénètre l'arbre au niveau des branches mortes et atteint les trachéides embolisées du duramen (Martin et al., 2021). La figure 2.5 illustre le passage de l'eau par une branche morte.

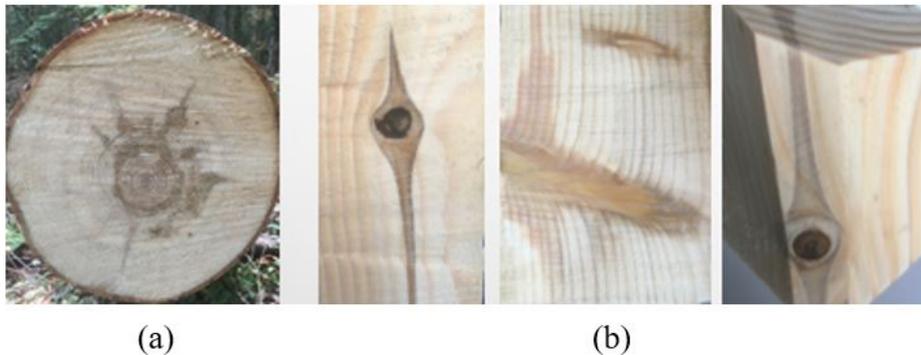


FIGURE 2.5 – Infiltration de l'eau par les branches mortes : (a) poche d'eau visible quelques jours après abattage d'un sapin, (b) trois images représentant l'infiltration d'eau par un nœud.

Une analyse anatomique des poches d'eau indique que les torus sont aspirés comme dans le reste du duramen. Cette aspiration provoque une diminution de la perméabilité, l'eau est alors piégée.

Les poches d'eau identifiées dans le projet Sap-In se situent dans la prolongation de nœuds associés à des branches mortes. L'eau pourrait aussi s'infiltrer après une blessure ou un élagage. D'autres auteurs ont également évoqué cette hypothèse (Ward et Pong, 1980).

Un contre argument a été proposé par l'étude expérimentale conduite par Coutts et Rishbeth (1977). Ces derniers ont perforé des sapins de Vancouver (*Abies grandis*) et colmaté hydriquement le trou par l'extérieur. Cinq mois plus tard, une poche d'eau s'était formée au niveau du trou bien qu'une infiltration soit impossible, suggérant qu'il est possible qu'une poche d'eau se forme autrement.

Production bactérienne

Une activité bactérienne élevée est systématiquement identifiée dans les poches d'eau. Les bactéries fréquemment associées aux poches d'eau dans la littérature sont les genres *Ewinia*

et *Clostridium*. Ces dernières peuvent être soit initialement présentes et produire de l'eau ou être favorisées par une arrivée d'eau, soit coloniser le duramen après que l'eau se soit infiltrée.

Les bactéries sont identifiées par :

- la présence d'acide propionique et d'acide acétique,
- un processus de fermentation apportant une odeur de fermentation,
- un pH différent du reste du bois de l'arbre (généralement plus acide chez les résineux et plus basique chez les feuillus) (Ward et Pong, 1980).

Il semblerait que l'activité bactérienne soit plutôt une conséquence qu'une cause des poches d'eau (Coutts et Rishbeth, 1977; Worrall et Parmeter, 1982). Il peut arriver que l'activité bactérienne soit si importante que la fermentation fasse monter la pression dans la poche d'eau jusqu'à expulser le liquide par les fragilités de l'écorce (blessures, entailles) (Douglas Hamilton, 1980). Lorsque cette situation survient, elle est dangereuse pour l'arbre et peut entraîner sa mort en détruisant les tissus vivants lorsque la pression est trop élevée. Cette pathologie est appelée en anglais "*bacterial wetwood*" ou "*slime flux*", elle concerne des feuillus tels que les ormes ou les peupliers, figure 2.6.

De nouveau, un contre argument a été proposé par Coutts et Rishbeth (1977) dans leur étude expérimentale. Ils ont perforé des arbres d'*Abies grandis*, injecté du chlorure de mercure $HgCl_2$ puis colmaté hydriquement le trou. Cinq mois plus tard une poche d'eau s'était formée au niveau du trou, le chlorure de mercure empêchant tout développement bactériologique, suggérant qu'il est possible qu'elle se forme encore autrement.



FIGURE 2.6 – Illustration d'un "*bacterial wetwood*", on remarque un suintement (anneau noirci au niveau de la plaie) et une décoloration de l'écorce

Transfert d'eau depuis l'aubier

Entre le duramen et l'aubier existe un "bois de transition" (ou "bois intermédiaire"), sous forme d'une fine bande sèche (IAWA, 1964). Cette zone est le lieu de formation du duramen. Pendant cette étape, les parenchymes meurent en provoquant des thylles chez les feuillus, une aspiration des torus chez les résineux et parfois en libérant des extractibles.

Un transfert d'eau de l'aubier vers le duramen implique donc que l'eau traverse le bois intermédiaire. Cette zone est illustrée en figure 2.7, issue de Coutts et Rishbeth (1977). Sur cette figure la poche est allongée sur plus de 5 mètres dans le duramen.

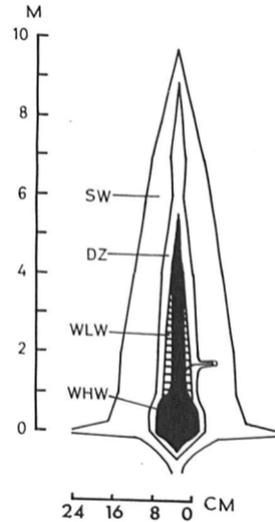


FIGURE 2.7 – SW : aubier, DZ : bois intermédiaire, WLW : poche d'eau en cours de formation, WHW : poche d'eau.

Physiquement, l'eau se déplace dans le cas où elle est soumise à une différence de potentiel hydrique $\Delta\Psi$ [MPa], allant du plus élevé vers le plus bas. Pour de l'eau contenue dans des plantes, le potentiel hydrique se définit par :

$$\Psi = \Psi_o + \Psi_g + \Psi_m + \Psi_p \quad (2.1)$$

où Ψ_o représente le potentiel osmotique, traduisant la présence de substances dissoutes, est toujours négatif ; Ψ_g représente le potentiel gravitationnel, plus l'eau est en hauteur et plus il est élevé ; Ψ_m représente le potentiel matriciel, regroupant les forces de capillarité, de tension ou de cohésion ; Ψ_p représente le potentiel hydrostatique.

Soit $\Delta\Psi_{H-S}$ la différence de potentiel entre l'aubier et le duramen, Ψ_{HW} le potentiel hydrique du duramen (HW pour HeartWood) et Ψ_{SW} le potentiel hydrique de l'aubier (SW pour SapWood).

Si l'eau traverse l'aubier, le bois de transition et le duramen radialement, alors :

$$\boxed{\Delta\Psi_{H-S} < 0} \quad (2.2)$$

Quelques remarques :

- dans le cas où le transfert d'eau est uniquement radial, la différence de potentiel de pesanteur est nulle.
- la teneur en eau du bois dans l'arbre vivant est toujours au dessus du PSF, la différence entre l'aubier et le duramen est que l'aubier contient de l'eau libre. Selon Zelinka et al. (2016), le PSF peut se définir comme la teneur en eau où le potentiel chimique de l'eau liée est égal à celui de l'eau libre. Le potentiel chimique dépend des pressions de capillarité et celles-ci varient principalement sous le PSF (au dessus, la largeur des colonnes d'eau est constante puisqu'il n'y a pas de retrait-gonflement). A pression de capillarité quasi équivalente, la différence de potentiel matriciel entre l'aubier et le duramen sera faible.
- lorsque deux compartiments (ici l'aubier et le duramen), séparés par une membrane semi-perméable (bois intermédiaire), remplis d'eau et contenant un soluté (dans le cas du bois des ions métalliques par exemple), alors un transfert d'eau se fait entre le compartiment ayant la faible concentration de ce soluté vers celui ayant la plus grande concentration. C'est le phénomène d'osmose qu'on caractérise par un potentiel osmotique. Le potentiel osmotique variera en fonction de la concentration d'ions métalliques parfois présents dans le bois. Ainsi, les ions potassium et calcium sont souvent identifiés dans les poches d'eau.
- le potentiel hydrostatique désigne une pression qu'exerce l'eau sur la surface d'un corps immergé. Dans les plantes, c'est la pression qu'exerce l'eau sur les parois des colonnes d'eau. Le potentiel hydrostatique variera en permanence dans l'arbre en fonction de l'évapotranspiration.

Finalement :

$$\Delta\Psi_{H-W} = \Psi_{p,HW} - \Psi_{p,SW} + \Psi_{o,HW} - \Psi_{o,SW}$$

Pour réaliser un transfert d'eau de l'aubier vers le duramen, il faut donc que $\Delta\Psi_{H-W} < 0$, ce qui signifierait que le potentiel hydrique de l'aubier soit supérieur à celui du duramen. En l'occurrence, Ψ_p varie quotidiennement du fait de l'évapotranspiration (négatif puis positif) alors que le potentiel osmotique peut rester négatif plusieurs mois et ne s'équilibre qu'une fois que le transfert d'eau a été réalisé. Ainsi, l'osmose est la plus sujette à former des poches d'eau.

Une étude réalisée par Nakada et al. (2019) sur le cryptomeria du Japon (*Cryptomeria japonica*) et le mélèze du Japon (*Larix kaempferi*) montre que ce mécanisme peut être suffisant pour expliquer l'apparition de poches d'eau. Le cryptomeria est une essence sujette aux poches d'eau alors que le mélèze l'est beaucoup moins. Leur étude a permis de montrer que :

- la différence de potentiel hydrique permet un transfert d'eau de l'aubier vers le duramen chez certaines essences, lorsque la différence est suffisamment négative,
- la différence de potentiel hydrique varie au cours des saisons. Chez le cryptomeria, elle est négative toute l'année alors que chez le mélèze elle est négative en été mais positive en hiver (pendant la formation du duramen). Ainsi, chez le mélèze la formation du duramen ne permet pas la formation de poches d'eau,

- pour que le transfert d'eau soit possible, il faut que l'eau soit en état vapeur, puisque le bois de transition est quasi imperméable à l'eau liquide mais perméable à l'air.

Il est alors supposé que la formation du duramen de certaines essences développent des ions calcium et potassium dans l'aubier, permettant à la vapeur d'eau d'être transférée au duramen par osmose, le bois intermédiaire jouant le rôle de membrane semi-perméable.

L'étude de Worrall et Jr (1982) suggère que plus il y a de parenchymes qui meurent plus il y a de chance d'avoir des poches d'eau. Là encore, ils soutiennent que la mort des parenchymes va accumuler des solutés dissous et que le mécanisme d'osmose est important, corroborant la conclusion de l'étude de Nakada et al. (2019).

Enfin, l'étude expérimentale de Coutts et Rishbeth (1977) précédemment évoquée a montré que les poches d'eau peuvent se former sans activité bactérienne et sans infiltration extérieure chez *Abies grandis*. Cela suppose que l'eau est d'origine interne, issue de l'aubier. Par ailleurs, les poches d'eau ne se forment que dans l'arbre sur pied et jamais dans des grumes. L'hypothèse proposée par Coutts et Rishbeth (1977) est que la formation des poches d'eau est intrinsèquement liée à l'activité de l'arbre, compatible avec une formation par un mécanisme d'osmose supportée par Nakada et al. (2019).

2.2.2 Conséquences physiques

Les poches d'eau ont des conséquences physiques à la fois dans l'arbre sur pied et lors des usages du bois, chacune décrite ci-dessous.

Conséquences dans l'arbre sur pied

À priori, les poches d'eau ne sont pas préjudiciables à la croissance des arbres dans la mesure où elles ne dérivent pas en une activité bactérienne trop importante (Ward et Pong, 1980). Mieux encore, l'environnement que crée les bactéries anaérobies protège le bois des attaques de champignons. C'est notamment la présence d'acide propionique et la très faible concentration de dioxygène dans la poche d'eau qui empêche tout développement de champignons (Worrall, 1983).

Par contre, un inconvénient évident déjà évoqué précédemment est que l'activité bactérienne des poches d'eau peut provoquer une pathologie appelée "*bacterial wetwood*". Ce phénomène peut être à l'origine de la mort prématurée de l'arbre. Un autre inconvénient est que l'activité bactérienne produit des pectinases¹ qui dégradent la lamelle mitoyenne du bois (Ward et Pong, 1980). En effet, le composé prédominant de la lamelle mitoyenne est la pectine. Cette dégradation fragilise et diminue la ténacité du bois, ce qui augmente la probabilité de subir des roulures, fentes ou gélivures dans l'arbre sur pied. Celles-ci peuvent alors survenir lors des contraintes de croissance (bois de réaction), des vents violents. Les fentes et roulures correspondent respectivement à une fissure radiale et une fissure en arc de cercle suivant un cerne. Dans une grume, les fentes radiales surviennent lors d'un déphasage de séchage entre le

1. Enzyme capable de décomposer la pectine

cœur et la périphérie : le cœur sera encore humide quand la périphérie séchera, l'empêchant de se rétracter et impliquant des contraintes internes pouvant provoquer des fissures. Dans l'arbre sur pied, les contraintes de croissance peuvent en elles-même provoquer des fentes radiales et des roulures. Les gélivures surviennent lors d'une brutale chute de température, qui solidifiera l'eau dans le bois et donc "écartera" les fibrilles de cellulose.

Conséquences pour les usages du bois

Évidemment, les poches d'eau vont être un problème important lors du séchage. Tout d'abord, elles présentent une TE élevée : de 92% à 269% chez le genre *Abies* et de 88% à 152% chez *Populus* (Jeremic et al., 2011).

Ensuite, la perméabilité du bois contenant les poches d'eau est faible car anatomiquement similaire au duramen. Il en résulte une durée de séchage augmentée comme illustré en figure 2.8 issue de Jeremic et al. (2011). Dans cette étude, l'aubier et le duramen atteignent une TE d'environ 25% au bout de 30 heures alors qu'il faut 50 heures pour la poche d'eau. L'augmentation de la durée de séchage est de 60%.

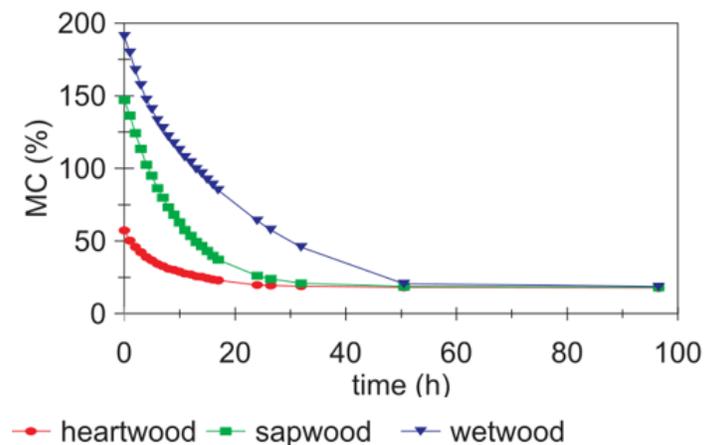


FIGURE 2.8 – Comparaison des temps de séchage entre aubier, duramen et poche d'eau chez le sapin baumier (*Abies balsamea*) (Jeremic et al., 2011)

Par ailleurs, la fragilisation de la lamelle mitoyenne par les pectinases va rendre le bois de poche d'eau plus sensible au risque de "collapse", c'est-à-dire d'effondrement d'une colonne d'eau lors d'une cavitation ou de fentes radiales. L'effondrement signifie la destruction d'une colonne d'eau due à une grande dépression provoquée par un gradient de TE élevé. Ces problématiques peuvent néanmoins être atténuées avec de bonnes méthodes de séchage (séchage à l'air libre ou séchage lent). De même, le problème du séchage va négativement affecter les colles pour lamellé-collé, contreplaqué ou contrecollé en diminuant leur efficacité. Enfin, les acides présents dans les poches d'eau vont s'évaporer lors du séchage et peuvent être corrosifs pour les étuves, diminuant leur durée de vie (Ward et Pong, 1980).

Quand l'on compare les propriétés mécaniques du bois de poches d'eau au bois issu du duramen, celles-ci doivent toujours être normalisées à TE et densité équivalente. Ainsi, le bois de poche d'eau à TE de 200% est nécessairement moins rigide que le duramen à TE de 20%, non pas à cause de particularités anatomiques mais simplement parce que la TE est plus élevée. Le raisonnement est le même avec la densité. À TE et densité équivalente, ce sont les propriétés intrinsèques du matériau qui sont évaluées.

De fait, les différences mécaniques entre bois de poches d'eau et bois du duramen ne font pas consensus, bien qu'il y ait une tendance à affirmer que le bois des poches d'eau soit moins rigide (Ward et Pong, 1980). La rigidité longitudinale est peu affectée par la dégradation de la lamelle mitoyenne, puisqu'elle dépend principalement des microfibrilles de la couche S2 de la paroi cellulaire. En revanche, la rigidité transverse devrait être affectée, au même titre que la ténacité, bien que peu d'étude le confirme.

L'étude de Ohsaki et al. (2007) sur les propriétés vibratoires du sapin de Sakhaline (*Abies sachalinensis*) a pu mettre en évidence que, chez cette essence, le coefficient d'amortissement et la fréquence de résonance du bois de poche d'eau étaient comparables à celui de bois du duramen.

Il est fréquent d'observer une coloration brune, rougeâtre ou sombre au niveau des poches d'eau. Lors de l'abattage de l'arbre, les poches d'eau passent d'un environnement anaérobie à un environnement aérobie et une oxydation se produit. L'oxydation colore alors la zone de la poche d'eau. Ce phénomène est illustré chez le hêtre en figure 2.9 issue de Goncz et al. (2018). C'est parfois ce qu'on appelle faux-duramen ou cœur rouge de hêtre. Cette coloration pose des problèmes esthétiques lors de la vente du bois et peut entraîner des impacts économiques.



FIGURE 2.9 – Coloration d’une poche d’eau chez un hêtre (*Fagus sylvatica*) (Goncz et al., 2018)

2.2.3 Bilan sur le phénomène des poches d’eau dans le duramen

Le vocabulaire francophone pour décrire le phénomène des poches d’eau est moins riche que le vocabulaire anglo-saxon. C’est probablement parce que la littérature scientifique est plus abondante aux Etats-Unis, Canada et Japon qu’en France. De ce fait, le terme de poche d’eau contient une diversité de phénomènes tels que les "*bacterial wetwood*" précédemment présentés, les duramens imbibés par infiltration d’eau extérieure ou encore les duramens imbibés d’eau simplement lors de leur formation. Davantage d’études permettraient de mieux distinguer ces phénomènes. D’une manière générale, les caractéristiques qui peuvent se manifester dans ce qu’on nomme poches d’eau sont :

- une zone dans ou chevauchant le duramen et le bois de transition et ayant une TE plus élevée que le reste du duramen et parfois plus élevée que celle de l’aubier,
- une zone de coloration plus sombre, voir rougeâtre,
- une odeur fétide, de fermentation,
- une colonisation par des bactéries anaérobies.

Les conséquences observées dépendent évidemment du type de poche d’eau concerné. Les poches d’eau peuvent dans de rares cas devenir pathologiques et tuer l’arbre, mais dans la majorité des cas elles sont neutres voire avantageuses pour l’arbre sur pied en le protégeant contre le développement de champignons. Il est intéressant de noter par ailleurs que les essences les plus sujettes aux poches d’eau sont des essences à aubier non différencié. Il n’est pas exclu que la poche d’eau soit une stratégie de durabilité alternative aux extractibles. Lors de l’enquête réalisée auprès de la profession bois du Massif Central, il est fréquemment revenu le problème des pourrissements à cœur des vieux sapins. Pourrait-on ainsi faire un lien entre le pourrissement à cœur et l’absence des poches d’eau dans ces sapins ?

Les principales contraintes concernent la profession bois et plus particulièrement le séchage des poches d’eau. L’impact sur les propriétés mécaniques est faible mais le séchage en étuve est lourdement affecté. Dans ce cadre là, les recherches vers des solutions techniques en construction bois vert sont pertinentes.

Conclusion de la partie A et transition vers une campagne expérimentale de poutres de sapin en dimensions d'emploi

Cette partie a d'abord introduit le matériau bois, de l'anatomie des résineux à quelques unes de ses propriétés physiques. Le bois est notamment hygroscopique, anisotrope, hétérogène et vieillissant, propriétés qui s'expliquent par les fonctions qu'il occupe dans l'arbre.

Ensuite, la place du sapin pectiné dans la filière bois est décrite. Il est entre autres très présent dans les forêts du Massif Central, où ses propriétés sont appréciées pour des usages en structure. Cette présence se caractérise par une grande importance pour l'économie de la filière bois régionale et par une place de premier choix dans les sujets de recherche à Clermont Auvergne INP.

Une enquête auprès de la profession a été réalisée dans le but d'adapter la problématique du sujet de thèse aux difficultés rencontrées par la profession. Cette enquête, présentée dans le chapitre 2 de cette partie, met en évidence des difficultés de séchage du sapin pectiné en raison d'une grande proportion des grumes contenant des poches d'eau. Elle met aussi en évidence le clivage entre les industriels souhaitant toujours plus de contrôle sur l'approvisionnement en bois et une partie des artisans qui promeut l'approche traditionnelle pour répondre aux problématiques de séchage.

Enfin, le chapitre 2 se termine par un état de l'art sur ces mêmes poches d'eau. Il montre qu'elles ne concernent pas que le sapin pectiné et que leur formation implique des phénomènes complexes. Elles ont en outre un impact nuancé et débattu dans la communauté scientifique : protectrices contre les attaques de ravageurs dans l'arbre sur pied, elles sont aussi source de dégradation du bois et d'augmentation du temps de séchage.

La partie A s'est donc consacrée à établir le contexte et la problématique du travail de recherche. Les parties B, C et D concernent le travail scientifique réalisé sur la mécanique et la physique du matériau étudié.

Des solutions de construction en bois vert répondent à la problématique de séchage posée pendant cette première partie. Nos ancêtres utilisaient déjà des techniques de construction bois vert, ce qui de fait atteste de sa faisabilité. Toutefois, le monde d'aujourd'hui exige des

études pour certifier la viabilité et la fiabilité des techniques utilisées. Ce travail s'inscrit dans cette démarche et vise à décrire une campagne expérimentale sur du bois de sapin pectiné partiellement séché. Cette campagne consiste en des essais de fluage sur des poutres en dimensions d'emploi, qui sont représentatifs de la réalité d'une structure et donc intéressants pour la filière. Dans l'idée de s'approcher de solutions constructives en structure ventilée, les essais sont réalisés en environnement extérieur semi-abrité. Enfin, la mécanique de la rupture joue un rôle déterminant sur la durée de vie des structures et les poutres étudiées sont entaillées dans le but d'exacerber et mesurer la propagation des fissures.

Cette thèse s'inscrit aussi dans la continuité des projets de recherche sur le bois portés par Clermont Auvergne INP. Les techniques de mesure de l'institut y sont développées et choisir une approche expérimentale est adéquate. Toutes ces raisons décrivent l'état d'esprit dans lequel a été réalisé ce travail et justifient au moins en partie l'approche qui a été choisie.

Ainsi, la partie B présente le matériel végétal étudié et les outils expérimentaux utilisés pendant la campagne d'essai. Elle fait office d'un matériel et méthodes général du travail de thèse, bien que les essais en eux-mêmes soient décrits dans les parties C et D.

Deuxième partie

Matériel et mises au point

L'objet de cette partie est de présenter le matériel d'étude et les méthodes appliquées dans les parties C et D concernant les essais expérimentaux. L'enjeu de cette présentation est d'évaluer la fiabilité et de mieux apprécier les résultats qui ont été obtenus. En effet, le matériau bois est particulièrement complexe et décrire finement les conditions initiales des essais est essentiel. Ce travail a été réalisé grâce à l'aide de Théo Lefranc pour les essais BING, stagiaire à Polytech Clermont ; Tancrede Alméras pour le groupement de triplet mécanique, chargé de recherche au CNRS ; et Florence Mathieu pour la calibration des capteurs de déplacement, stagiaire à Polytech Clermont.

Chapitre 3

Caractérisation du matériel d'étude

3.1 Approvisionnement

3.1.1 Informations sur le lot de poutres

Le matériel d'étude est constitué d'un lot de trente poutres fournies par la scierie du Forez le huit avril 2021. Elles sont issues de sapins locaux et classées C18 par la scierie du Forez. Elles ont subi un traitement de surface au Wolsit EC 100 P2 (BASF Wolman GmbH, 2019) leur donnant un aspect jaunâtre et garantissant la protection contre les termites et autres insectes xylophages pendant au moins dix ans. Étant donné la nature surfacique du traitement, il est supposé que les propriétés mécaniques ne sont pas affectées. Par ailleurs, le traitement ne prétend pas imperméabiliser le bois et il est également supposé qu'il n'affecte pas les transferts hydriques en périphérie.

Le lot commandé a été reçu dans un état proche de l'état vert : l'écorçage des grumes s'est fait une semaine avant la livraison des poutres et celles-ci ne sont pas passées en étuve. Elles sont en dimensions dites d'emploi : $4000 \times 175 \times 63 \text{ mm}^3$, figure 3.1.

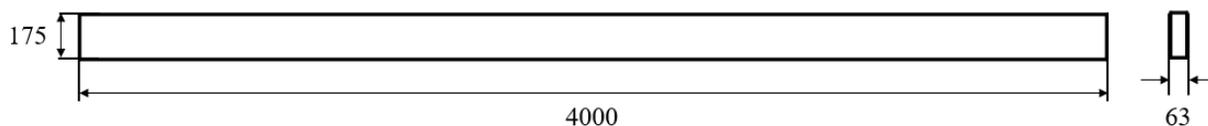


FIGURE 3.1 – Dimensions des poutres demandées. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.

Le tableau 3.1 présente les résultats des mesures des dimensions le jour de la réception du lot de poutres. L , H et e représentent respectivement la longueur, la hauteur et l'épaisseur ; m représente la masse et ρ la densité. Les incertitudes dépendent du matériel de mesure utilisé,

et pour la densité elle est calculée par l'équation (3.1) :

$$\delta\rho = \left(\frac{\delta m}{m} + \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta e}{e} + \frac{\delta H}{H} \right) \times \rho \quad (3.1)$$

où $\delta\rho$, δL , δe et δH sont les incertitudes respectives de ρ , L, e et H.

TABLEAU 3.1 – Résultats des dimensions des poutres le jour de la réception. Les incertitudes ont été déterminées à partir de l'appareil de mesure utilisé.

	m [kg] \pm 0,01	L [mm] \pm 0,5	H [mm] \pm 0,25	e [mm] \pm 0,01	ρ [g/cm ³] \pm 0,001
Minimum	22,4	4003	171,77	59,91	0,512
Maximum	33,4	4030	176,5	65,91	0,749
Moyenne	26,36	4004,9	174,44	62,59	0,603
Écart-type	3,14	4,79	1,2	1,27	0,07

La densité observée est supérieure à celle attendue pour un résineux standard de classe C18 : 380 kg.m⁻³ (AFNOR, 2016), suggérant que le bois des poutres est humide et n'a effectivement pas été séché. Les poutres ont ensuite été numérotées S_i , S pour sapin et i variant de 01 à 30.

3.1.2 Observations des cernes, des fentes initiales et des poches d'eau

Le jour de la livraison du matériel d'étude, les six faces de chaque poutre ont été prises en photo. Cela permet de réaliser un état des lieux de la poutre à l'instant de réception et de faire des observations sur le type de débit, les fentes initiales, l'angle de fil, les poches d'eau ou autres défauts remarquables.

D'une façon générale, trois types de débits sont observés : les débits sur dosse sont majoritaires (21/30) figure 3.2(a), puis des débits à coeur (6/30) figure 3.2(c) et enfin des débits sur faux quartier (3/30) figure 3.2(b).

De même, une grande majorité des poutres présente des fentes aux extrémités, figure 3.3. Une partie de cette majorité est notamment due à la libération des contraintes de croissance lors de l'abattage de l'arbre (Alméras et al., 2008) figure 3.3(a) et celles aux extrémités peuvent aussi être dues à des fentes de retrait figure 3.3(b),(c),(d). Ce phénomène est bien connu des charpentiers et regroupe les gerces et les gélivures. Une roulure est également observée figure 3.3(d). Ces fentes sont normales et pas encore préjudiciables aux propriétés mécaniques, mais elles sont fréquemment le siège de l'initiation de fissures.

Des suspicions de poches d'eau sont aussi observées sur le lot de poutre, figure 3.4. En réalité seules celles ayant provoqué une décoloration visible sont constatées mais il est possible que de nombreuses autres poches d'eau soient présentes, notamment au niveau des noeuds ou dans le coeur d'une poutre.

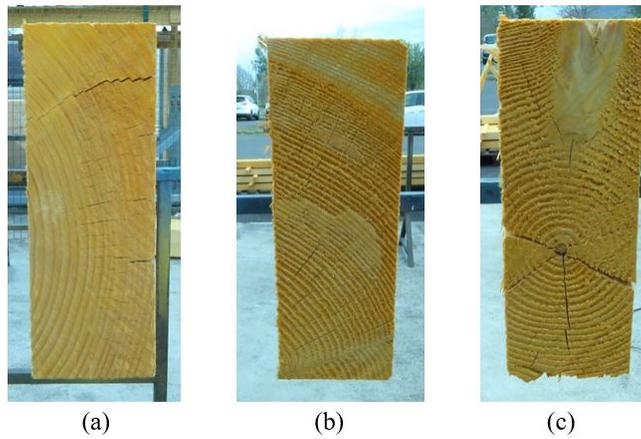


FIGURE 3.2 – Les types de débit du lot de poutre : (a) débit sur dosse (*S19*), (b) débit sur faux quartier (*S29*), (c) débit à coeur (*S10*).

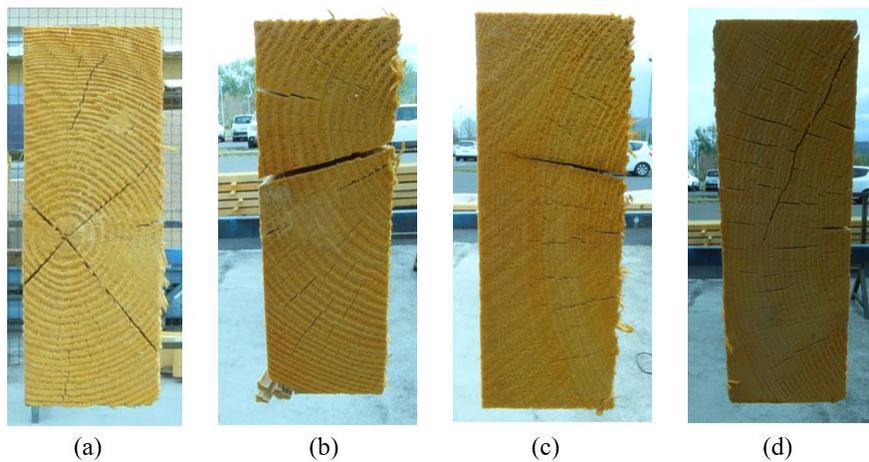


FIGURE 3.3 – Les types de fentes observés : (a) fente radiale partant du coeur (*S20*), (b) fente radiale traversante (*S19*), (c) fente radiale non traversante (*S07*), (d) agglomérat de petites fentes radiales et fente tangentielle (roulure) (*S16*).

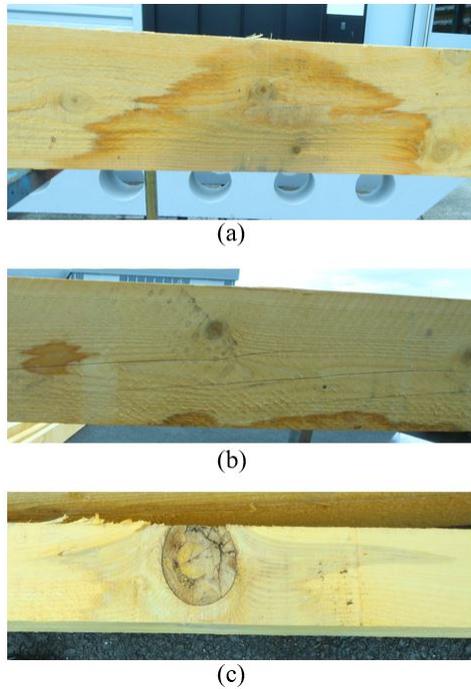


FIGURE 3.4 – Les poches d’eau observées sur le lot de poutre : (a) S03, (b) S04, (c) S18.

Enfin, l’angle de fil de certaines poutres est observé en comparant les cernes de chacune des extrémités, figure 3.5. L’album photo de l’intégralité des cernes des poutres est en annexe C.

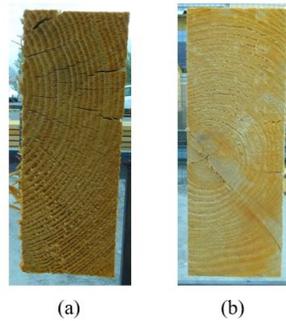


FIGURE 3.5 – Angle de fil constaté sur la poutre S21 : (a) extrémité gauche, (b) extrémité droite en miroir.

3.2 Essais non destructifs et regroupement

3.2.1 Essais vibratoires et mesures d'infradensité

Le lot est caractérisé mécaniquement par la méthode BING[©]. Cette méthode non destructive consiste à estimer le module élastique axial dynamique E_L^d , le module de cisaillement dynamique G_{LT}^d et le frottement interne axial $\tan(\delta)$ d'une poutre en la faisant vibrer par un coup sur une de ses extrémités (Brancheriau, 2007). Le module de cisaillement dépendra de l'orientation des cernes de croissance et pour un débit sur dosse, c'est le plan longitudinal-tangentiel qui est concerné, d'où G_{LT}^d . Étant donné que dans toute la suite de ce mémoire le module élastique fait référence au module axial et le module de cisaillement à celui longitudinal-tangentiel, E_L et G_{LT} seront notés E et G , respectivement.

Brancheriau (2002) a montré que cette méthode peut s'utiliser dans le cas où l'objet étudié respecte les hypothèses de la théorie des poutres en résistance des matériaux. Dans le cas du lot de poutres, l'hypothèse d'homogénéité est la plus compromise compte tenu des noeuds et autres défauts présents dans les poutres. Les conditions d'élanement longitudinal $L/H \geq 20$ et transversal $e/H \leq 2$ sont bien vérifiées.

Chaque poutre est installée sur deux chambres à air de vélo au quart et au trois quarts de la longueur puis est frappée avec un maillet. Les chambres à air de vélo faisant office d'appui libre. L'acquisition du signal est réalisée par un microphone et un oscilloscope portable conformément au protocole de Brancheriau (2020). Les modules de toutes les poutres sont évalués avec une excitation en compression dynamique et une autre en flexion dynamique. Les mesures en flexion dynamiques apportent davantage d'informations que celles en compression dynamique, notamment en se basant sur les hypothèses de Timoshenko. Les mesures en compression dynamique viennent donc simplement valider la fiabilité des mesures en flexion dynamique. La méthode BING est illustrée en figure 3.6.

En flexion dynamique, au minimum deux pics doivent être clairement identifiables sur le signal vibratoire pour déterminer le module élastique avec les hypothèses de Timoshenko. Comme le montre la figure 3.6, c'est largement le cas pour les poutres de ce lot. C'est donc toujours le module dynamique tenant compte des effets de cisaillement qui est présenté dans ce mémoire.

L'infradensité ρ_{ID} de toutes les poutres a ensuite été mesurée. Pour cela, un échantillon de 3 cm de longueur est prélevé sur l'extrémité de chacune des poutres. L'infradensité représente la quantité de xylème dans un volume de bois saturé, elle se définit donc comme la masse anhydre sur le volume saturé en eau, équation (3.2) :

$$\rho_{ID} = \frac{m_{anh}}{V_s} \quad (3.2)$$

Le volume saturé est mesuré par la méthode de poussée d'Archimède après saturation du bois. La masse anhydre est mesurée par une pesée après séchage en étuve à 103 °C pendant 17 heures 30, la masse ne diminuant plus après cette durée.

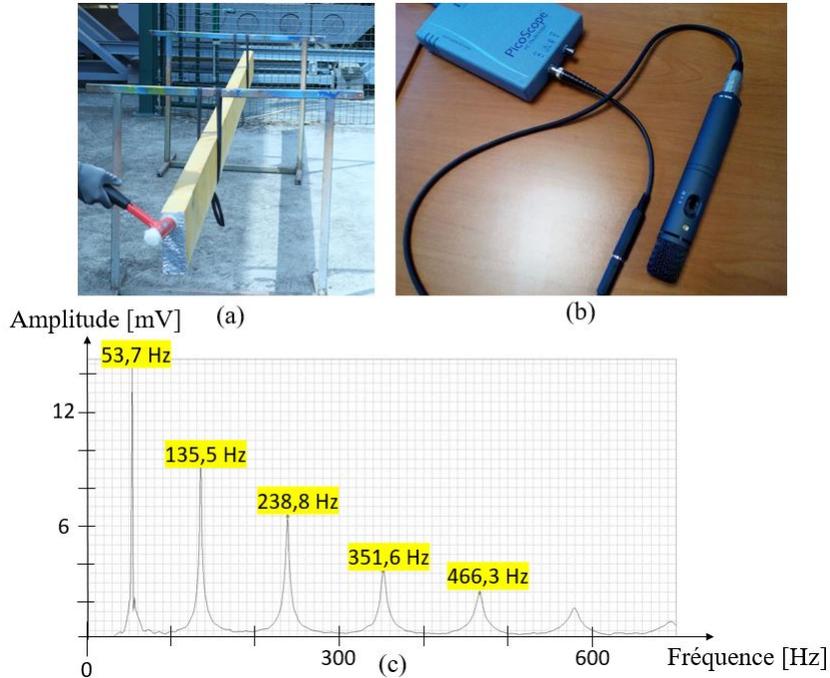


FIGURE 3.6 – Illustration d’un essai avec la méthode BING : (a) installation de la poutre *S16* sur les chambres à air de vélo, (b) microphone et picoscope utilisés, (c) signal vibratoire obtenu lors d’une vibration en flexion.

En figure 3.7 est illustré le principe de la méthode de poussée d’Archimède : l’échantillon de bois est totalement immergé dans un bassin installé sur une balance. Le bois ne doit pas couler pour qu’une légère force soit nécessaire à son immersion, sans toucher le fond. La masse lue sur la balance est alors le poids d’eau déplacé. À partir de la masse volumique de l’eau, il est possible de calculer le volume d’eau déplacée et donc le volume de l’échantillon de bois.

L’infradensité mesurée sur les échantillons de 3 cm est considérée comme représentative de celle du reste de la poutre, parce que c’est une propriété intensive, c’est à dire qui ne dépend pas de la taille de l’objet. Cette hypothèse est d’autant plus plausible dans le cas d’une poutre orientée dans le sens longitudinal : les gradients de propriétés du bois sont moins forts dans le sens des fibres que dans les autres directions. Cependant, trois échantillons permettant de mesurer l’infradensité avaient des petits noeuds : *S03*, *S10*, et *S28*. Il faut donc savoir raison garder lors de conclusions issues de résultats concernant ces trois poutres, puisque les noeuds peuvent perturber la mesure d’infradensité.

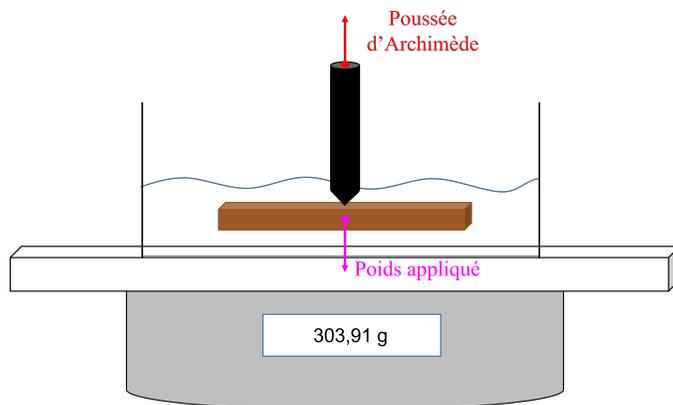


FIGURE 3.7 – Illustration de la méthode de poussée d’Archimède pour mesurer un volume.

3.2.2 Résultats et observations sur la caractérisation du lot de poutres

Les distributions, minima, maxima, moyennes et écarts-types des paramètres principaux mesurés en flexion dynamique sont présentés dans le tableau 3.2. Les résultats des distributions sont obtenus par un test de Shapiro-Wilk, en prenant la valeur-p maximale entre une distribution normale et log-normale à condition que cette valeur dépasse 0,05. E_S^d correspond à l’infra-module spécifique, défini par :

$$E_S^d = \frac{E^d}{\rho_{ID}} \quad (3.3)$$

E_S^d est un indicateur de la qualité du bois : s’il est rigide et léger (peu dense), alors E_S^d sera élevé et inversement. L’unité choisie pour ce paramètre est le $\text{Mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ parce qu’il est équivalent au carré de la vitesse d’un son qui se propagerait dans le matériau. L’infra-module spécifique peut donc être obtenu sans mesure de module élastique. Uniquement à partir des mesures de module élastique dynamique, un nouveau classement mécanique peut être proposé pour ce lot de poutre, figure 3.8. À noter que ce classement devrait normalement prendre en compte la résistance des poutres et pas seulement leur rigidité. A priori, les résultats sont légèrement supérieurs à un lot moyen de sapin du Massif Central.

Il est important de rappeler que ces propriétés ont été mesurées le jour de réception des poutres, donc sur un lot en bois vert ou partiellement sec et avec des mesures dynamiques. Selon Brancheriau et Baillères (2002), E^d est en moyenne 4% plus grand que le module élastique longitudinal mesuré en statique E . Les valeurs moyennes et écarts-types sont conformes à ce qui se trouve dans la littérature pour du sapin pectiné à l’état vert : $E = 11,8 \text{ GPa}$ (CIRAD, 2012) avec un écart type de 3 GPa, $\rho_{ID} = 375 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Billard et al., 2019). Le module élastique d’un résineux standard C18 selon les normes de résistance de l’Eurocode 5, à 12% de TE, vaut $E = 9 \text{ GPa}$. Malgré la différence entre mesure dynamique et statique, le lot est au moins plus rigide que ce que suggère le classement proposé par la scierie du Forez. Par ailleurs, les distributions et les coefficients de variation observés sont conformes à ce que propose le Joint Committee on Structural Safety (2006). De même, le coefficient de

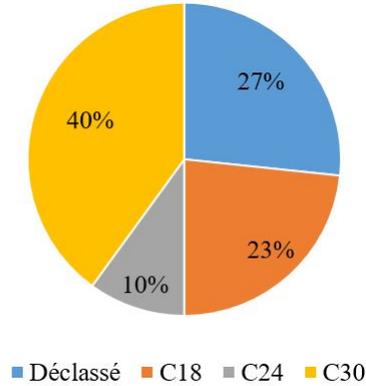


FIGURE 3.8 – Répartition des poutres du lot selon les classes de résistance à partir des mesures de E^d .

corrélation entre E^d et ρ_{ID} vaut 0,66 contre 0,6 proposé par le Joint Committee on Structural Safety (2006).

TABLEAU 3.2 – Résultats des essais non destructifs.

	E^d [GPa]	G^d [GPa]	E^d/G^d [//]	ρ_{ID} [kg.m ⁻³]	E_S^d [Mm ² .s ⁻²]
Distribution	Log-normal	Normal	Log-normal	Normal	Log-normal
Minimum	7,54	0,451	13,63	333	21,49
Maximum	16,34	0,672	30,55	430	40,84
Moyenne	11,01	0,553	20,1	379	28,9
Écart-type	2,3	0,055	4,9	27,4	4,7
Coefficient de variation	0,02	0,1	0,24	0,07	0,16

En figure 3.9 sont représentées des corrélations entre les différents paramètres mesurés, afin de s'assurer de la cohérence des mesures. Tout en étant bien corrélés, les résultats en flexion dynamique sont légèrement inférieurs à ceux en compression dynamique, corroborant les observations de Brancheriau (2002), figure 3.9(a). Entre E^d et G^d , la corrélation est très mauvaise, figure 3.9(b). Cette corrélation est forcée à 0 et c'est donc la moyenne quadratique "RMS" des erreurs entre la régression linéaire et les résultats obtenus qui est calculée. Ce résultat montre que le rapport d'anisotropie E^d/G^d n'est pas constant, suggérant que malgré l'apparente majorité du débit sur dosse, l'orientation des cernes et donc les propriétés mécaniques transverses sont bien différentes d'une poutre à l'autre. Il faut néanmoins préciser que l'incertitude de mesure du G^d est plus élevée que celle du E^d . Le rapport d'anisotropie est quant à lui assez bien corrélé à E_S^d , figure 3.9(c). Cette corrélation exponentielle corrobore d'ailleurs celle faite par Thibaut et Gril (2021). Enfin, la corrélation entre E^d et ρ_{ID} est visible bien que mauvaise, figure 3.9(d). Sur du bois parfait, la rigidité est proportionnelle à l'infradensité et la droite de corrélation devrait passer par 0. Ici les noeuds, poches d'eau, pentes de fil ont pu avoir un rôle déterminant sur la rigidité mesurée par la méthode BING. De même, ces défauts ont pu venir exacerber les erreurs de mesures de l'infradensité et du

module élastique.

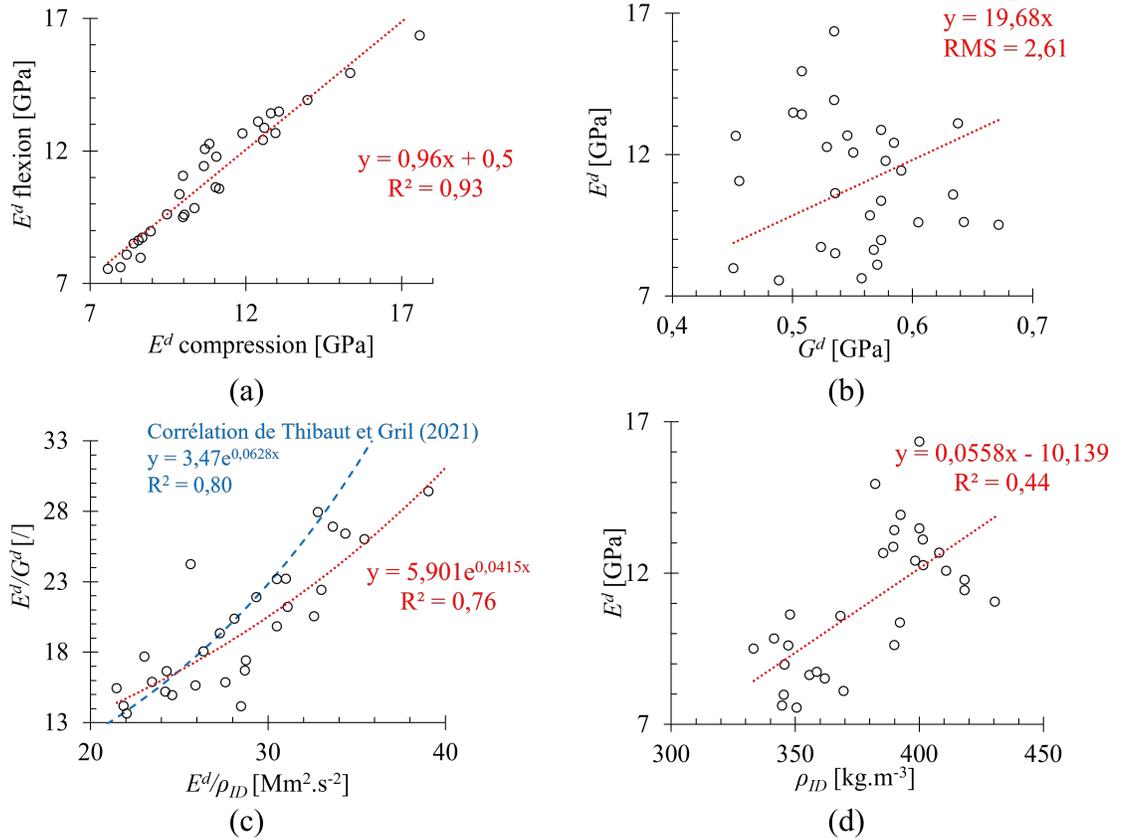


FIGURE 3.9 – Résultats des mesures des propriétés mécaniques du lot de poutres par la méthode BING : (a) E^d mesuré en flexion en fonction de E^d mesuré en compression, (b) E^d en fonction de G^d , corrélation forcée à 0, (c) E^d/G^d en fonction de E^d/ρ_{ID} et (d) E^d en fonction de ρ_{ID} . Sur chaque graphique sont indiqués l'équation et soit le coefficient de détermination R^2 soit la moyenne quadratique RMS de l'erreur entre la régression linéaire appliquée et les résultats obtenus.

Les mesures de ρ_{ID} ont ensuite été utilisées pour estimer la masse anhydre de chacune des poutres et donc leur TE moyenne. En effet, en supposant le bois à l'état vert le jour de la réception du lot, leur volume correspondait au volume saturé. Ainsi, la masse anhydre peut simplement être calculée à partir de l'équation (3.2) : $m_{anh} = \rho_{ID} \times V_s$. À partir de la masse anhydre, la TE est calculée par l'équation 1.1.

Le tableau 3.3 présente les résultats des estimations de TE du lot de poutres. De nouveau, une grande variabilité est constatée avec des poutres déjà sous le PSF en moyenne (S13) et des poutres gorgées d'eau à plus de 100% de TE (S07, S09).

La figure 3.10 présente de nouveau des corrélations pour vérifier la cohérence des estimations de TE. La TE est bien corrélée à la densité (figure 3.10(a)), suggérant que c'est bien la quantité d'eau contenue dans le bois et non la quantité de xylème qui augmente la densité. À

TE équivalente, les poutres auraient des densités relativement proches. D'ailleurs, l'équation de la droite de corrélation renvoie une densité anhydre d'environ 0,4, ce qui est cohérent. La figure 3.10(b) présente une corrélation visible, bien que peu excellente, entre la TE et ρ_{ID} . Par définition, l'infradensité ρ_{ID} est indépendante de la teneur en eau TE. Elle représente la quantité de xylème dans un volume de bois saturé en eau. Il est alors compréhensible que plus cette quantité est élevée (ρ_{ID} élevée), moins il y a de place pour l'eau (TE faible). L'inversion proportionnelle observée est donc également cohérente.

TABLEAU 3.3 – Résultats des teneurs en eau du lot de poutres.

	TE [%]
Distribution	Log-normal
Minimum	25,1
Maximum	117,5
Moyenne	60,3
Écart-type	23,9

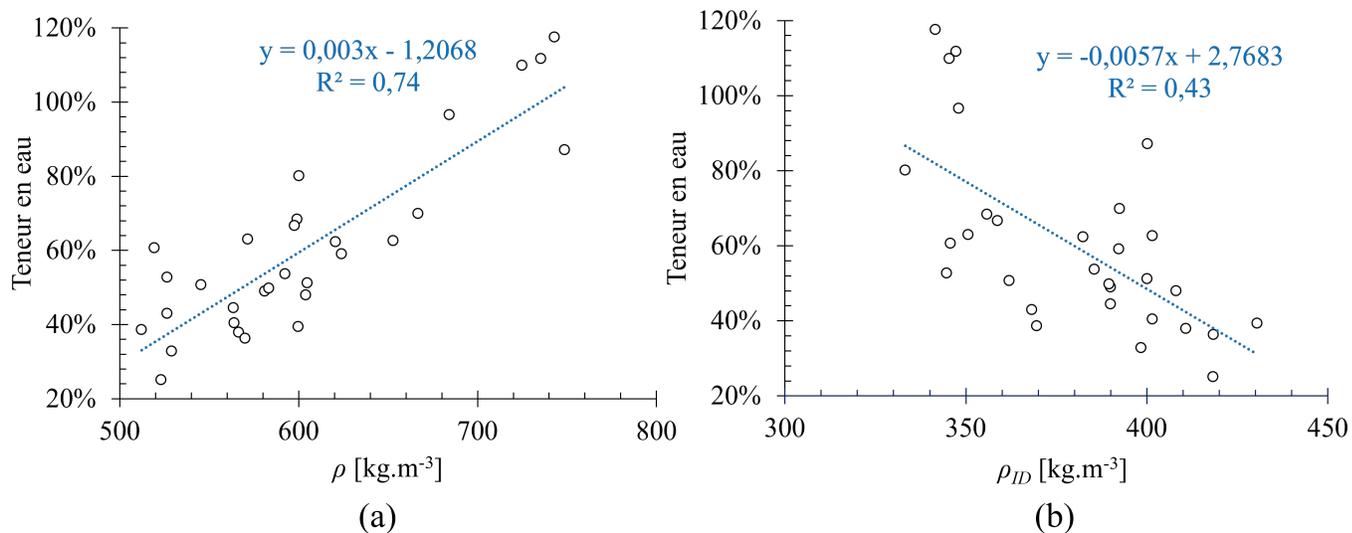


FIGURE 3.10 – Résultats des mesures de teneur en eau le jour de la réception : (a) TE en fonction de la densité ρ , (b) TE en fonction de l'infradensité ρ_{ID} .

3.2.3 Stratégie expérimentale

Comme mentionné en fin de partie A, le travail expérimental a pour but de tester la performance mécanique de poutres de sapin pectiné à l'état vert ou partiellement séché et soumises à un environnement extérieur. Des essais de fluage en flexion et de flexion à rupture ont notamment été réalisés, qui seront détaillés en partie C.

De la même manière que dans les travaux de Pambou Nziengui (2019), les poutres sont entaillées pour ces essais. Les termes de PE (poutre entaillée) et PNE (poutre non entaillée) sont alors utilisés dans la suite de ce mémoire. Les entailles permettent d'exacerber et localiser les phénomènes de fissuration par la concentration de contrainte en une zone. Ces mécanismes de fissure primordiaux quand il s'agit d'une structure, sont étudiés dans ce travail et mis en corrélation avec le comportement thermo-hygro-viscoélastique.

Les entailles sont réalisées à mi-hauteur et sur 43 cm de long, figure 3.11(a),(b). Elles sont faites à la scie circulaire puis terminées à la scie à main figure 3.11(c). C'est le même dimensionnement que Adjovi Loko (2015) multiplié par un coefficient d'échelle, comme étudié en partie A. Cette géométrie garantit la rupture par fissuration au niveau de l'entaille plutôt que la rupture par flexion, ce qui facilite le suivi de propagation de fissure. Par ailleurs, les noeuds sont préférentiellement placés sur la partie supérieure de la poutre, c'est à dire celle qui n'est pas entaillée. En effet, la flexion est toujours appliquée sur la partie supérieure (non entaillée) et il est préférable d'avoir les noeuds dans la zone comprimée (partie supérieure) plutôt que dans la zone tendue (partie inférieure). Pareillement aux propriétés transverses du bois, les noeuds sont plus résistants à la compression qu'à la traction (AFNOR, 2016). Enfin, dans le but de conserver un profil hydrique assez homogène dans les poutres, celles-ci sont entaillées juste avant d'être testées.

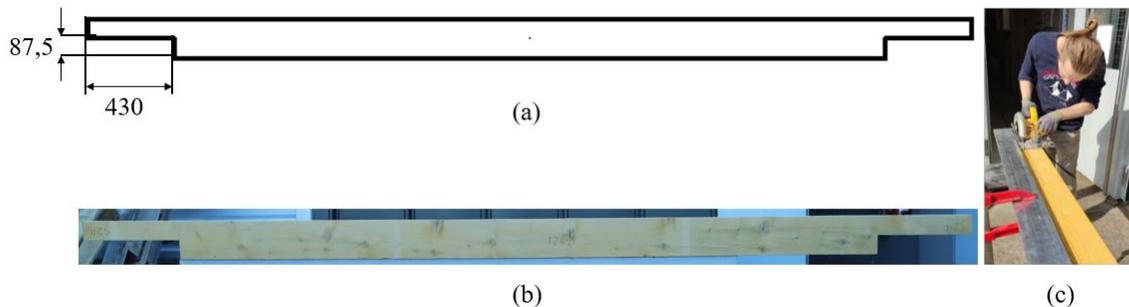


FIGURE 3.11 – Entailles réalisées sur les poutres : (a) dimensions des entailles, (b) photos d'une poutre entaillée (PE), (c) découpe à la scie circulaire. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.

Au regard de l'hétérogénéité constatée du lot de poutre, tant d'un point de vue mécanique que de TE du bois, une stratégie de regroupement a été mise en place. En effet, il est préférable de comparer des essais de fluage lorsqu'un seul ou très peu de paramètres varient. Les résultats des essais non destructifs permettent alors de former des groupes d'homogénéité mécanique. L'homogénéité mécanique est définie par des E_S^d et ρ_{ID} similaires dans un groupe. Dans le

cadre de ce travail expérimental et compte tenu du matériel disponible, six groupes de trois poutres (appelés triplets) ont été formés et chargés en fluage. En effet, les bancs d’essais sont les mêmes que ceux de Pambou Nziengui (2019) : deux bancs disposant de trois places chacun. C’est donc au maximum six poutres qui sont chargées simultanément. Avec six triplets, un total de 18 poutres a donc été chargé en fluage, réparti en trois vagues. Chaque vague dure environ six mois, la première a été chargée au printemps-été 2021, la deuxième en hiver 2021-2022 et la dernière au printemps-été 2022. Enfin, dans le but d’observer le rôle de la TE initiale dans les essais de fluage, les triplets sont constitués de deux poutres vertes ou partiellement sèches et une poutre sèche servant d’élément de comparaison.

Pour former les triplets, le critère de l’équation (3.4) est minimisé.

$$crit = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left(\frac{ET_{trip_i}^{\rho_{ID}}}{ET_{lot}^{\rho_{ID}}} \right)^2 + \left(\frac{ET_{trip_i}^{E_S^d}}{ET_{lot}^{E_S^d}} \right)^2 \right)} \quad (3.4)$$

Où $ET_{trip_i}^{\rho_{ID}}$ est l’écart-type des infradensités d’un triplet donné ; $ET_{lot}^{\rho_{ID}}$ est l’écart-type des infradensités du lot ; $ET_{trip_i}^{E_S^d}$ est l’écart-type des infra-modules spécifiques d’un triplet donné et $ET_{lot}^{E_S^d}$ est l’écart-type des infra-modules spécifiques du lot. $ET_{trip_i}^{\rho_{ID}}/ET_{lot}^{\rho_{ID}}$ représente la disparité des infradensités dans le triplet par rapport à la disparité dans le lot ; de la même façon que $ET_{trip_i}^{E_S^d}/ET_{lot}^{E_S^d}$ pour les modules spécifiques. La moyenne quadratique de ces deux rapports de disparités forme alors une évaluation de l’homogénéité mécanique d’un triplet. Le critère minimisé correspond à la moyenne arithmétique de cette évaluation sur les six triplets choisis. Un poids équivalent a été appliqué à l’indradensité et au module spécifique. À ce critère s’ajoutent trois contraintes : (i) les essais étant destructifs, une poutre ne peut appartenir qu’à un seul triplet ; (ii) les débits à coeur sont proscrits, parce que leur propagation de fissure risque d’être drastiquement différente de celle ayant un débit sur dosse et (iii) au moins une poutre doit être relativement sèche. Si plusieurs étaient sèches elles pouvaient être réhumidifiées. Les pentes de fil et les noeuds n’ont pas été pris en compte dans le critère. En figure 3.12 sont indiqués les résultats du groupement. Les triplets 1 et 2 sont chargés pendant la première vague, les triplets 3 et 4 pendant la deuxième vague et les triplets 5 et 6 pendant la troisième vague. En pointillés sont représentées des courbes d’isomodule, c’est-à-dire les couples (ρ_{ID}, E_S^d) qui renvoient à une valeur précise de E^d . La rigidité longitudinale de chaque poutre peut donc être lue sur la figure 3.12. Enfin, les croix noires représentent les 12 poutres non groupées qui ne seront pas chargées en fluage.

Une erreur ayant été commise lors du premier regroupement, le triplet 2 ne présente pas une bonne homogénéité mécanique. Pour les autres triplets, c’est la meilleure minimisation respectant les contraintes définies plus haut.

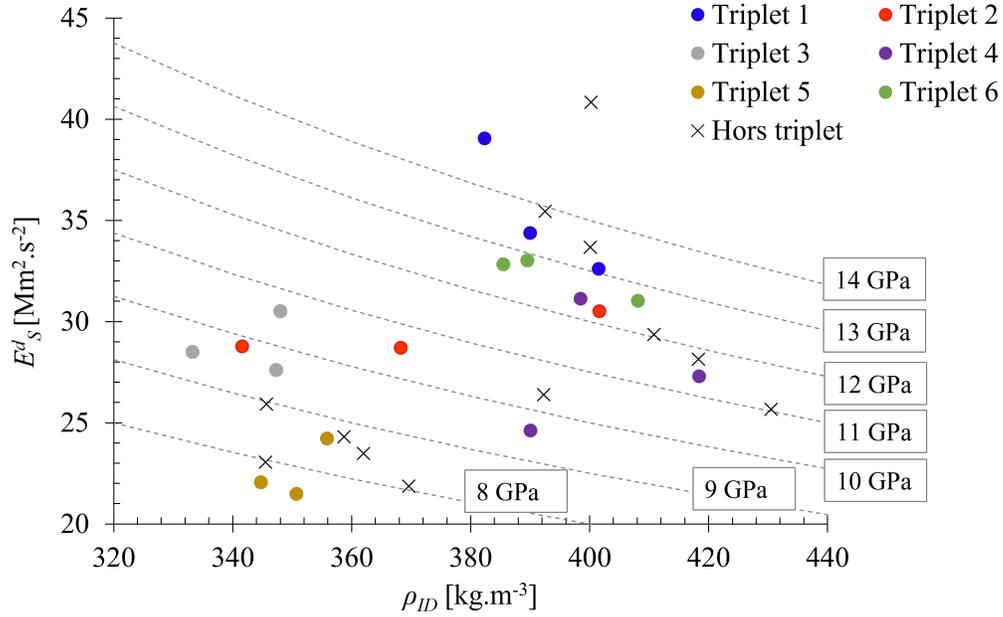


FIGURE 3.12 – Répartition des six triplets choisis sur le graphique E_S^d en fonction de ρ_{ID} .

Parmi les poutres restantes, neuf d'entre elles ont été entaillées puis testées en flexion en déplacement imposé jusqu'à rupture. Le but de ces essais est de déterminer les contraintes maximales dans la zone centrale lors de la rupture des PE. Cette contrainte est notée σ_{max} . Les propagations de fissures ont aussi pu être observées. Ces essais sont détaillés en partie C chapitre 6. Afin d'établir une corrélation entre les propriétés mécaniques du lot et les forces maximales à la rupture, les poutres choisies doivent balayer toute la plage du graphique E_S^d en fonction de ρ_{ID} , figure 3.13. Par ailleurs, une partie est testée à l'état vert, une autre partiellement sèche et enfin une autre sèche. De nouveau, l'objectif est d'observer le rôle de la TE dans les résultats de ces essais. Il peut être noté que deux poutres sont passées à la fois en fluage et en flexion en déplacement imposé (*S21* fluage vague 1, *S06* fluage vague 2). Ces dernières n'avaient pas rompu après les six mois de fluage. En tableau 3.4 est récapitulée la répartition des poutres dans les différents essais. La TE indiquée dans ce tableau correspond à celle mesurée juste avant l'essai indiqué dans la colonne "Type de test".

En attendant d'être testées, les poutres ont été stockées en environnement extérieur sous une bâche et légèrement espacées les unes des autres, figure 3.14(a). La TE étant difficile à contrôler, elles ont également toutes été colmatées sur leurs extrémités, figure 3.14(b). Le colmatage consiste en une feuille d'aluminium collée avec un mastic silicone. Cette opération assure un blocage des transferts hydriques (Varnier, 2019). La diffusion n'est donc que transverse et homogène le long de la poutre (hétérogénéité du bois mise à part). Enfin, pour les poutres des vagues 2 et 3 qui devaient rester à l'état vert ou partiellement séché, elles ont été emballées dans du cellophane afin de ralentir leur séchage, figure 3.14(c), et réhumidifiées dans un bassin si nécessaire, figure 3.15.

TABLEAU 3.4 – Récapitulatif du plan expérimental.

Type de test			Poutre	E_S^d [GPa]	ρ_{ID} [°]	TE [%]
Fluage en extérieur	Première vague : Printemps-été 2021	Triplet 1	S03	28,7	0,37	21,6
			S04	30,5	0,4	27,1
			S07	28,8	0,34	49,5
		Triplet 2	S14	32,6	0,4	31,8
			S12	39,1	0,38	34,1
			S21	34,4	0,39	26,4
	Deuxième vague : Automne-hiver 2021-2022	Triplet 3	S05	28,5	0,33	19,5
			S06	30,5	0,35	31,8
			S09	27,6	0,35	26,8
		Triplet 4	S28	27,3	0,42	20
			S25	31,1	0,4	14,4
			S26	24,6	0,39	28
	Troisième vague : Printemps-été 2022	Triplet 5	S29	24,2	0,36	60,3
			S24	22,1	0,34	23,5
			S18	21,5	0,35	61
		Triplet 6	S19	32,8	0,39	47,1
			S22	31	0,4	32
			S23	32,5	0,39	16,6
Flexion à l'intérieur en déplacement imposé			S02	26,4	0,39	36,3
			S11	21,9	0,37	54,6
			S16	40,8	0,4	46,2
			S27	23,1	0,35	56,6
			S17	33,7	0,4	25
			S06	30,5	0,35	20,7
			S21	34,4	0,39	15,9
			S13	28,1	0,42	16,6
			S20	29,4	0,41	19

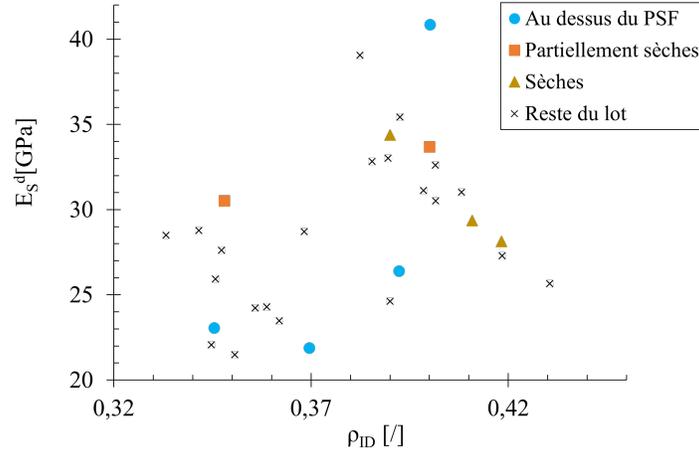


FIGURE 3.13 – Répartition des poutres choisies pour les essais de flexion en déplacement imposé sur le graphique E_S^d en fonction de ρ_{ID} .

Il est important de préciser qu’un bois réhumidifié n’est pas un bois vert. Bien que nécessaire pour s’approcher d’un comportement à l’état vert, cette opération apporte des biais dans l’analyse des résultats. D’abord, la teneur en eau d’équilibre au premier séchage est toujours supérieure à celle obtenue pour un séchage après réhumidification (Kollmann et Côté, 1968). Ensuite, E^d et le frottement interne $\tan(\delta)$ seront respectivement plus grand et plus petit pour du bois vert que pour du bois réhumidifié (Kojiro et al., 2008).

3.3 Conclusion sur la caractérisation du matériel d’étude

Le matériel végétal consiste en un lot de 30 poutres de sapin pectiné local, reçues à l’état vert. Une première observation macroscopique montre que les hétérogénéités principales du lot sont : (i) des débits sur dosse, à coeur et sur faux quartier ; (ii) des fentes aux extrémités et (iii) quelques poches d’eau. Le lot a ensuite fait l’objet d’une caractérisation mécanique dans le but d’établir une stratégie expérimentale répondant aux objectifs fixés dans ce travail : analyser les performances mécaniques de poutres en sapin pectiné à l’état vert ou partiellement séché. D’abord, les résultats sont cohérents avec ce qui peut être attendu d’un lot de poutre de sapin à l’état vert, mais il est classé C18 alors qu’il pourrait être C24. Ensuite, l’infra-module spécifique E_S^d et l’infradensité ρ_{ID} ont été utilisés pour regrouper les poutres par triplet. Chaque triplet présente une homogénéité mécanique, c’est à dire des E_S^d et ρ_{ID} similaires. Chaque triplet a été chargé en fluage et cette homogénéité au sein des groupes permet de comparer les résultats entre eux.

Les détails des essais de flexion en déplacement imposé jusqu’à rupture et de fluage en flexion sont analysés dans les chapitre 6 et 7 de la partie C. Il sera alors fait référence aux paramètres mécaniques présentés dans ce chapitre.

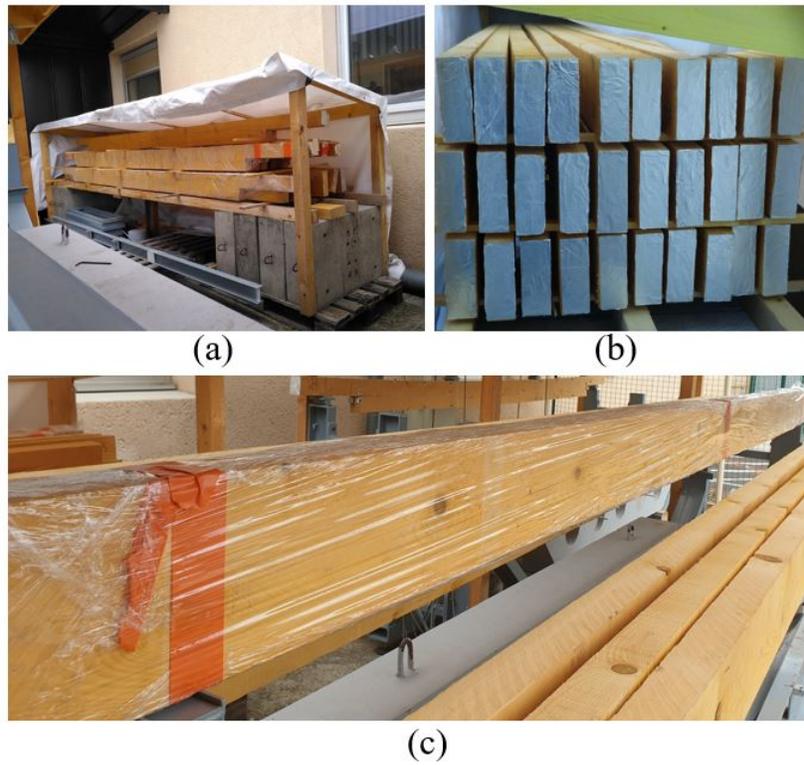


FIGURE 3.14 – Conditions de stockage du lot : (a) abri sous bâche, (b) colmatage des extrémités, (c) emballage d'une poutre sous cellophane.



FIGURE 3.15 – Bassin d'immersion des poutres pour réhumidification.

Chapitre 4

Outils expérimentaux

Ce chapitre présente les principaux outils expérimentaux utilisés. Dans un premier temps, la fiabilité des capteurs de déplacement et dans un second temps la méthode de suivi de marqueur développée pour les essais de fluage.

4.1 Les capteurs de déplacement

4.1.1 Étalonnage

Pour les essais de flexion deux types de capteurs de déplacement ont été utilisés, des capteurs utilisant une technologie de pont de jauge (marque AEP, référence LDT), des capteurs inductifs LVDT de marque HBM. Les capteurs LDT sont principalement utilisés pour les essais de flexion à rupture en intérieur et les LVDT pour les essais de fluage en extérieur.

Avant d'être utilisés, ils ont tous été étalonnés par la procédure suivante :

- mesure de déplacement d'une série d'étalons intercalés entre le palpeur et sa référence : 2, 6, 10, 20, 30 et 40 mm (figure 4.1(b)),
- tracé de la droite d'étalonnage : déplacements mesurés en fonction des déplacements imposés par les cales étalon (figure 4.2(a)),
- identification de la pente de la droite obtenue,
- application du facteur correctif ($1/\text{pente}$) aux futures mesures
- nouvelle série de mesure pour vérification.

Ces cinq étapes permettent d'estimer la dérive systématique qui correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage et la dérive de sensibilité correspondant à la différence entre la pente de la droite d'étalonnage et la pente théorique $y = x$. Après application du facteur correctif, la dérive de sensibilité a toujours été inférieure à 0,01 mm (figure 4.2(b)) et la dérive systématique d'au plus 0,06 mm.

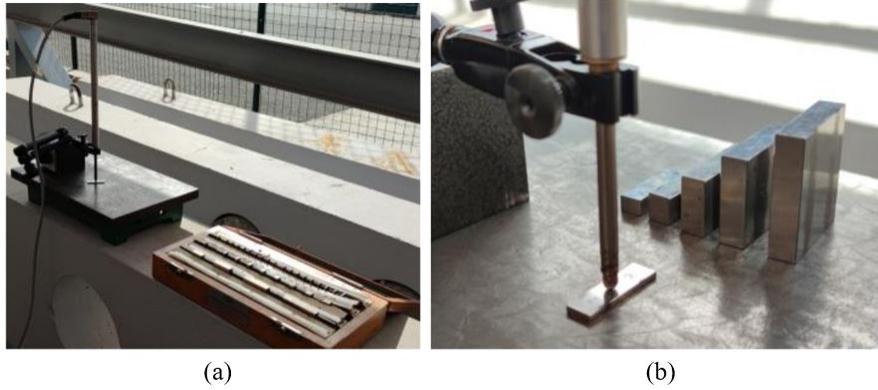


FIGURE 4.1 – Étalonnage des capteurs LDT à l'aide d'un bras articulé et de cales étalons : (a) dispositif d'étalonnage, (b) zoom sur le capteur et les cales.

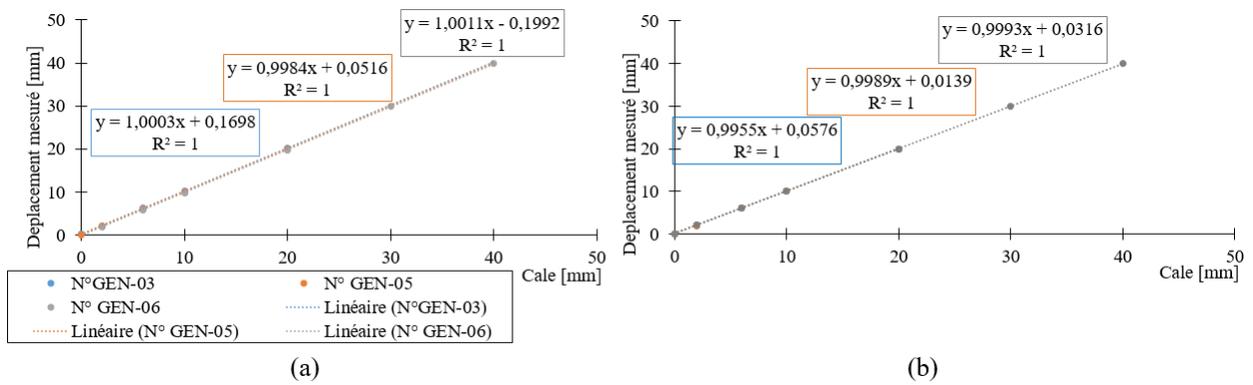


FIGURE 4.2 – Étalonnage de trois capteurs LDT à 20° : (a) détermination des facteurs correctifs, (b) dérive de sensibilité initiale et corrigée.

Par ailleurs, étant donné que les mesures sont toujours faites par rapport à un état de référence (le 0), la dérive systématique se simplifie. Une dérive de sensibilité de l'ordre de 0,01 mm est négligeable devant les déplacements observés pendant les essais : de 20 à 60 mm de flèche ou de 0,2 à 1 mm de d'ouverture de fissure.

4.1.2 Estimation de l'influence de la température sur les mesures de déplacement

Les essais de fluage étant en environnement extérieur, les capteurs de déplacement ont été soumis à des variations permanentes de température et d'humidité relative. Les fiches techniques des LDT et LVDT assurent qu'ils fonctionnent de -10 à 70 °C et -20 à 60 °C, respectivement. Ainsi, sauf en cas d'hiver particulièrement froid, les capteurs utilisés sont adaptés à l'environnement extérieur des campagnes d'essais. Ce genre de capteurs peut toutefois dériver avec les variations de température. Deux capteurs LDT (étendue de mesure de 25 et 50 mm) et un capteur LVDT (étendue de mesure de 50 mm) ont par conséquent fait l'objet d'une étude de l'impact de la température sur la précision de mesure. Pour cela, ils ont été placés à l'extérieur au début du mois d'avril et ont été mécaniquement bridés pendant trois jours en début de course, trois jours en milieu de course puis trois jours en fin de course.

Les résultats du capteur LVDT n°50-09 sont présentés en figure 4.3. Les conditions météorologiques et donc les plages de températures ne sont pas les mêmes pour le début, milieu et fin de course. Il est constaté sur chacun des capteurs qu'en début de course il n'y a pas de corrélation entre température et mesure de déplacement, figure 4.3(a) pour le LVDT n°50-09. Cette observation n'est pas encore expliquée mais l'amplitude de variation de mesure est plus faible que celle du milieu et de la fin de course. Il est alors supposé que la dérive en température des mesures de déplacement en début de course est négligeable devant celle en milieu et fin de course.

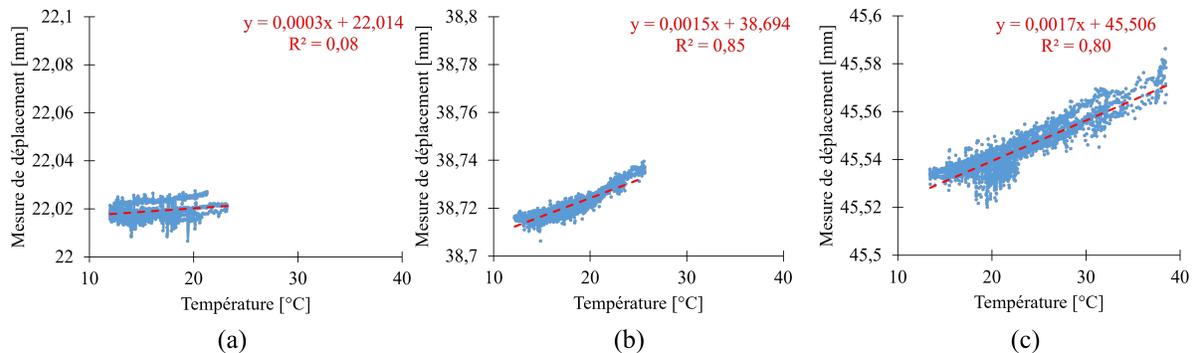


FIGURE 4.3 – Mesure de déplacement par le LVDT n°50-09 en fonction de la température : (a) fixée à une course de 22 mm, (b) fixée à une course de 38,5 mm et (c) fixée à une course de 45,5 mm.

En figure 4.4 sont représentées les corrélations pour le milieu et la fin de course des trois capteurs. Il est constaté que ce coefficient est plus élevé pour la fin de course que pour le milieu de course, mais dans tous les cas il reste en dessous de 0,004 mm/°C. Pour une variation

quotidienne de température de 10°C , c'est donc une variation de flèche de moins de $0,04\text{ mm}$, ce qui est négligeable devant les flèches observées au cours des essais. Pour les ouvertures de fissure, elles sont soudaines et n'impliquent pas de variation de température.

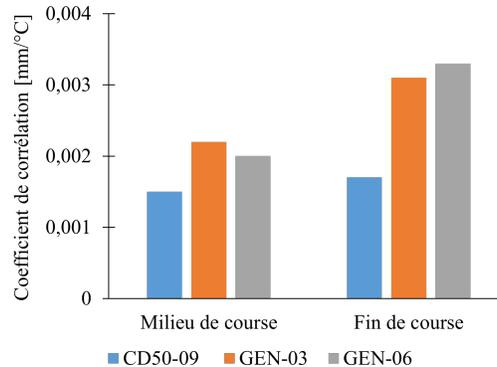


FIGURE 4.4 – Coefficient de corrélation entre la mesure de déplacement et la température pour le milieu et la fin de course des trois capteurs.

Cette étude permet donc de valider la fiabilité des capteurs de déplacement utilisés pendant la campagne expérimentale.

4.2 Développement d'une méthode de suivi de marqueur

Dans le but d'améliorer les conditions expérimentales des essais de fluage de Pambou Nziengui (2019), une méthode de suivi de marqueurs polyvalente et avec un budget par point de mesure raisonnable a été développée.

En mécanique expérimentale, les mesures par méthodes optiques sont particulièrement performantes. Les plus connues sont : suivi de marqueurs, corrélation d'image numérique (CIN), méthode de grille, photoélasticimétrie, interférométrie (Brémand et al., 2011). De même, à l'Institut Pascal de nombreux travaux portent sur une nouvelle méthode de mesure de champ appelée LSA (pour *Localized Spectrum Analysis*) (Grédiac et al., 2019). Ces méthodes fournissent des hauts niveaux de précision et sont parmi les seules capables de réaliser des mesures de champ (Bornert et al., 2009). Cette précision est atteinte dans la majorité des cas car elles sont appliquées dans des conditions expérimentales contrôlées : température et luminosité de la pièce, position de la caméra, ... Néanmoins, pour le suivi de structures ou d'essais en conditions extérieures, l'environnement est variable et ces méthodes sont impraticables.

Par ailleurs, la communauté scientifique de reconnaissance d'image développe des algorithmes de plus en plus efficaces pour estimer la position d'une caméra (Muñoz-Salinas et al., 2017). Ainsi, dans la navigation robot, il est important de pouvoir localiser la caméra à partir de sa prise de vue pour que le robot puisse se situer dans son environnement, d'autant qu'en réalité augmentée il est important de savoir où est l'observateur pour efficacement virtualiser l'environnement. Récemment, des efforts ont été réalisés pour introduire ces développements

dans l'ingénierie mécanique. Germanese et al. (2018) ont ainsi utilisé la caméra d'un drone et des marqueurs ArUco pour suivre les propagations de fissures d'un bâtiment historique. Également, Valença et al. (2013) ont utilisé une méthode de traitement d'image pour le suivi automatique de fissures sur des éprouvettes de béton à partir de marqueurs circulaires et de calcul d'homographie.

La méthode de suivi de marqueurs développée pour les essais de fluage s'inscrit dans cette même dynamique : utiliser les développements de la reconnaissance d'image pour alléger les contraintes sur les méthodes de mesure optique.

4.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la méthode repose sur les marqueurs ArUco de la librairie OpenCV ainsi que sur le processus d'homographie réalisé par des mires. Ces éléments sont présentés ci-dessous.

Les marqueurs ArUco et la librairie OpenCV

Les marqueurs utilisés dans cette méthode sont des marqueurs ArUco. Ils sont habituellement utilisés pour estimer la position d'une caméra mais servent ici à mesurer des déplacements relatifs. Le principe est de coller au moins deux marqueurs sur un objet, de prendre des photos de cet objet contenant les marqueurs puis de mesurer la distance entre les deux sur chaque photo. Ainsi, s'ils sont collés sur les extrémités d'une poutre en bois soumise à un chargement hydrique, leur position va évoluer avec les variations dimensionnelles du bois. La distance entre les deux mesure alors le retrait-gonflement. Les avantages des marqueurs ArUco sont leur fiabilité et leur identification rapide sur une photo (Garrido-Jurado et al., 2014). Ils sont constitués d'une bordure noire sur fond blanc contenant une matrice de carrés noirs et blancs, figure 4.5. Le motif dessiné sur le marqueur lui confère un numéro unique.

Pendant ce travail de recherche, ils sont imprimés sur du papier blanc standard d'une imprimante laser Sharp MX-3051, de dimensions 18×18 mm et protégés par une plastification mate afin d'éviter les reflets lumineux et la dégradation due à l'humidité. Il a été vérifié que la plastification n'affecte pas la détection des marqueurs.

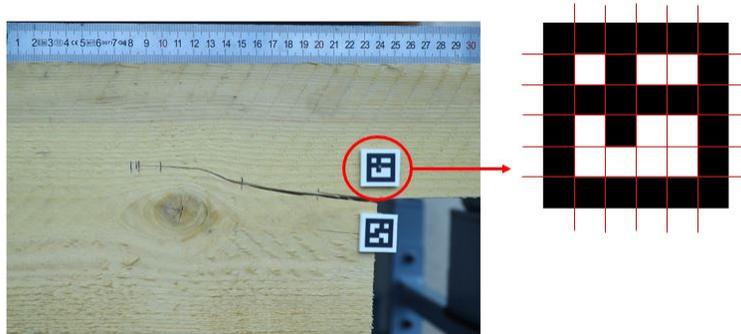


FIGURE 4.5 – Schématisation d'un marqueur ArUco.

Les marqueurs ArUco sont intégrés dans la bibliothèque OpenCV. C’est une bibliothèque *open source* d’algorithmes de reconnaissance d’images écrits en Python ou C++. Le module ArUco contient des fonctions de création et détection des marqueurs dans une image, de calibration de caméra et appareil photo et de calcul d’homographie. Plus d’informations sont disponibles sur le site d’OpenCV¹. Dans le cadre de cette étude, les configurations suivantes sont utilisées :

- Python 3.8.5 ;
- environnement de développement Spyder 5.2.2 ;
- le module OpenCV 4.5.2.52.

Les marqueurs ArUco sont identifiés sur une photo avec une méthode de seuillage expliquée par Garrido-Jurado et al. (2014) puis la position des coins est affinée par un algorithme de recherche qui permet d’atteindre une précision inférieure au pixel. Cette procédure est décrite par Forstner et Gulch (1987). Le centre des marqueurs est ensuite calculé à partir de la détection des quatre coins, améliorant encore la précision de la localisation.

Homographie et mires

Lorsque les marqueurs sont identifiés et localisés sur une photo, leurs positions sont données dans le repère de la photo, en pixels (px). Pour obtenir une mesure de distance relative, il faut transformer ces coordonnées en positions dans le repère de l’espace réel, en millimètres par exemple. Cette opération est réalisée par un calcul d’homographie. Cela consiste à projeter le plan de l’image dans le plan de la métrique souhaitée. Cette projection se fait par l’intermédiaire d’une matrice de passage de la base photo (en px) à la base réelle (en mm), ici appelée :

$$\underline{\underline{Hg}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Cette matrice est déterminée sur chaque photo à l’aide d’une mire, c’est à dire un objet de référence placé dans une photo. Cette mire se compose de quatre marqueurs collés sur une pièce d’aluminium et dont la distance réelle entre chacun est connue. À partir de la mire, la matrice $\underline{\underline{Hg}}$ peut être calculée, projetant ensuite la position de chaque marqueur de la photo dans la métrique de la mire. Plus de renseignements sont fournies en annexe D. Deux mires ont été créées : une mire fer à cheval et une mire fenêtre, figure 4.6.

Par ailleurs, l’homographie corrige intrinsèquement l’angle de vue de la photo. Pour respecter les hypothèses de changement de repère de l’homographie, il est impératif que tous les marqueurs soient dans le même plan.

1. <https://docs.opencv.org/4.x/index.html>

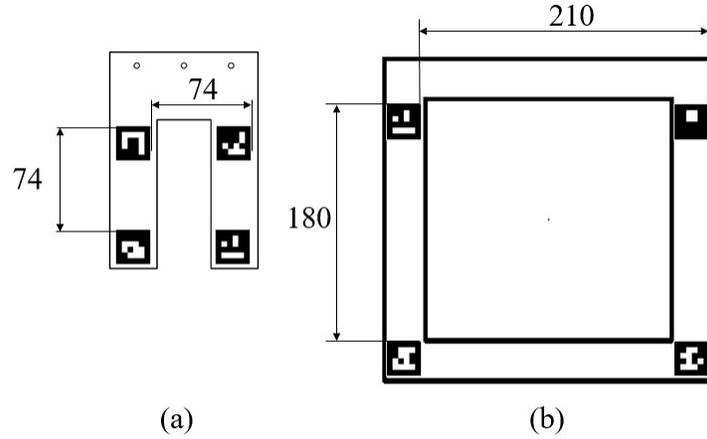


FIGURE 4.6 – Dimensions des mires utilisées : (a) mire fer à cheval, (b) mire fenêtre. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres.

Lors des essais de fluage, ces mires en aluminium sont soumises à des variations de température dues aux conditions extérieures. Les mires ont été soumises à un choc thermique $\Delta T = 70$ K dans une chambre climatique tandis que leurs dimensions ont été mesurées avec une mire de contrôle. Les résultats, figure 4.7, suggèrent clairement un coefficient de dilatation de $\alpha_{al} = 22.10^{-6}$ K $^{-1}$. Ce résultat est proche du coefficient théorique (23.10^{-6} K $^{-1}$ pour l'aluminium), confirmant que la technique de mesure fonctionne et qu'il n'y a pas de glissement au niveau du plan de colle entre les marqueurs et le support. Pour un choc thermique de $\Delta T = 60$ K (le maximum attendu en un an) et une longueur de $L_0 = 210$ mm de la mire fenêtre, cela implique une dilatation de :

$$\Delta L = \alpha_{al} L_0 \Delta T = 0,29 \text{ mm} \quad (4.2)$$

et pour la mire fer à cheval, à partir de la même équation (4.2) : $\Delta L = 0,102$ mm. Cette dilatation thermique est donc non négligeable et son effet a été corrigé pour les essais de fluage.

Ces deux mires sont adaptées à différentes plages de mesures. Les petites distances ont été mesurées avec la mire fer à cheval et les grandes distances avec la mire fenêtre. En effet, il est constaté que plus la distance relative mesurée est proche des dimensions de la mire, plus la précision est élevée.

Pour être exploitable, chaque photo contient systématiquement une mire. Le marqueur haut droit est considéré comme l'origine du repère. Chaque photo a donc son propre repère local par rapport au positionnement de la mire.

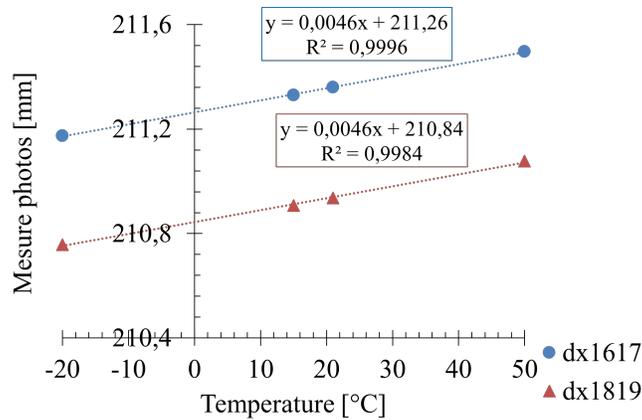


FIGURE 4.7 – Mesures de la largeur de la mire fenêtre à différentes températures. dx1617 et dx1819 correspondent respectivement à la distance horizontale entre les deux marqueurs du haut et celle entre les deux marqueurs du bas.

4.2.2 Quantification des erreurs

L'appareil photo principalement utilisé dans cette étude est un Canon EOS 1D X Mark II : 5472×3648 px, appelé Canon dans la suite de ce mémoire. C'est un appareil photo professionnel de type reflex numérique équipé d'un capteur CMOS. Il traite efficacement les distorsions, la diffraction et autres aberrations chromatiques. Les paramètres de l'appareil photo utilisés tout le long de l'étude sont :

- objectif avec une distance focale fixe de 50 mm,
- ISO variant de 1000 à 4000 ;
- ouverture de F6.3,
- autofocus activé,
- vitesse d'obturation dépendante de la luminosité ambiante.

En théorie, les distorsions de l'appareil photo doivent être corrigées à partir de la calibration de l'appareil. Cependant, une calibration d'appareil photo n'est valable que pour un ISO et un focus donné. Dans le cas d'une application avec différentes positions de l'appareil photo et différentes luminosités ambiantes, il aurait fallu calibrer l'appareil photo à chaque prise. La méthode se voulant flexible et simple, une telle procédure n'était pas envisageable. Dans la mesure où un objectif de focale fixe 50 mm ne présente que de légères distorsions sur les bords des photos, les distorsions générales de l'appareil photo ne sont pas corrigées. En conséquence, les distorsions de l'appareil photo ne sont pas corrigées.

Dans chaque cas, le niveau de gris entre les marqueurs et leur fond blanc est estimé. L'idée est de vérifier que le gradient de niveau de gris est le maximum sans saturer, c'est à dire que le niveau de gris est le plus grand possible mais compris entre 0 (noir) et 255 (blanc). Afin de fournir cette information dans les analyses, tous les résultats concernant la méthode de suivi de marqueurs comprendront :

- `diffgris` : le gradient de niveau de gris moyen entre le noir des marqueurs et leur fond blanc,
- `mingris` : le niveau de gris minimal atteint, qui doit être supérieur à 0,
- `maxgris` : le niveau de gris maximal atteint, qui doit être inférieur à 255.

La qualité de l'appareil photo, la distance entre celui-ci et les marqueurs, l'angle de vue ou encore un déplacement hors plan ont des impacts sur la précision de mesure. Ainsi, ces quatre éléments sont présentés ci-dessous.

Impact de la qualité de l'appareil photo

Des mesures de distances relatives entre marqueurs ont tout d'abord été réalisées avec différents appareils photo. Le but est d'estimer la précision obtenue avec un bon appareil tel que le Canon et de la comparer avec celle obtenue à l'aide d'un appareil photo de téléphone portable classique.

Vingt photos d'une feuille de papier contenant des marqueurs ont alors été prises avec le Canon et avec un téléphone portable Fairphone 3 (12 MPx), figure 4.8. La distance réelle entre chaque marqueur est connue. L'homographie est réalisée par les marqueurs 10, 11, 12, 13 qui sont équivalent à la mire fer à cheval et les marqueurs 14, 15, 16, 17 à la mire fenêtre (figure 4.6). Les autres marqueurs sont des sujets de mesure. La distance entre les marqueurs 1 et 2 (40 mm) ainsi que celle entre les marqueurs 3 et 4 (175 mm) est calculée en utilisant chacune des mires. Pour chaque appareil les photos sont prises à la même distance de la feuille de papier : 120 cm. Aucun trépied n'a été utilisé.

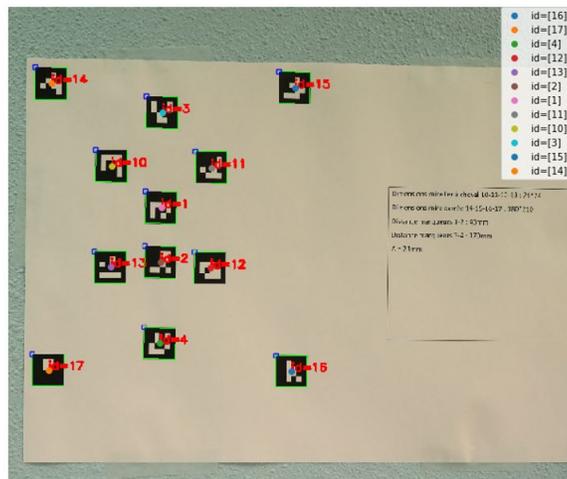


FIGURE 4.8 – Photo d'une feuille de papier contenant des marqueurs ArUco prise avec l'appareil photo Canon. Les marqueurs 1 et 2 sont espacés de 40 mm et les marqueurs 3 et 4 de 175 mm. Les marqueurs 10, 11, 12, 13 forment un carré de 74×74 mm et les marqueurs 14, 15, 16, 17 un rectangle de 210×180 mm.

Des photos ont ensuite été prises en situation d'essai mécanique avec la mesure des ouvertures de fissures (O_F) dans un essai de flexion en déplacement imposé jusqu'à rupture de PE. Pour

cela, des marqueurs sont placés de part et d'autre de l'entaille où la fissure doit se propager. Deux appareils photo étaient de nouveau utilisés : un téléphone portable Asus X00TD Zenfone Max (12 MPx) et le Canon, figure 4.10(a),(b). L'homographie est réalisée par la mire fer à cheval. La distance dx entre les marqueurs correspond à la fissure mode II et la distance dy la fissure mode I, figure 4.9.

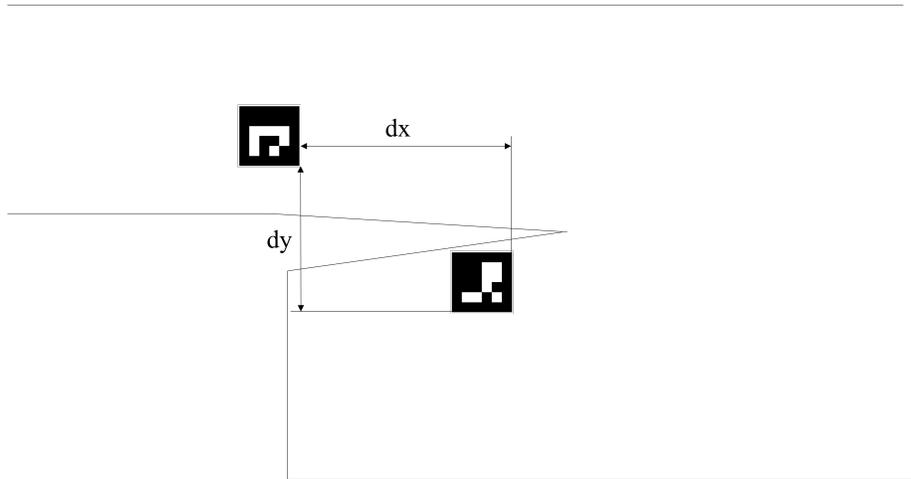


FIGURE 4.9 – Illustration des mesures de distances relatives dx et dy sur une poutre entaillée (PE).

La courbure de la poutre impliquée par la flexion n'impacte pas les mesures puisque le repère local de la mire suit cette rotation. L'épaisseur de la mire étant 3 mm, les marqueurs sont également collés sur un support imprimé en plastique PLA de 3 mm.

L'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 408+A1 (AFNOR, 2012) et contrôlé en déplacement. Chaque fois que le déplacement imposé est incrémenté de 2 mm, ou chaque fois qu'une propagation de fissure est observée, une série de cinq à dix photos par appareil est prise sur chaque côté de la poutre.

Les résultats sur la feuille de papier sont présentés dans le tableau 4.1 et ceux sur l'essai mécanique dans la figure 4.10(c). Comme cela était anticipé, le Canon mesure plus précisément des distances entre marqueurs que l'appareil photo des téléphones portables utilisés dans cette étude. L'écart-type sur vingt photos de la feuille de papier est environ dix fois plus faible et la mesure plus proche de la distance vraie, ce qui s'observe par la quasi-superposition des croix rouges sur le graphique.

TABLEAU 4.1 – Résultats pour vingt photos prises avec deux appareils photo : celui du Fairphone 3 et le Canon. Niveau de gris : diffgris = 155, mingris = 18, maxgris = 190.

		Marqueurs 1-2	Marqueurs 3-4
Appareil photo téléphone Fairphone 3	distance moyenne [mm]	39,984	175,019
	écart-type [mm]	0,026	0,033
Appareil photo Canon	distance moyenne [mm]	40,002	175,034
	écart-type [mm]	0,002	0,003

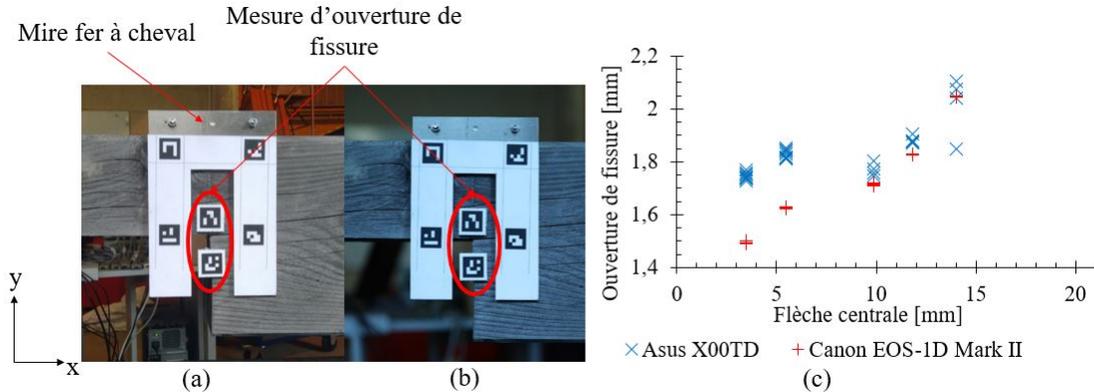


FIGURE 4.10 – Mesure d’ouverture de fissure (OF) sur l’essai de flexion : (a) photo prise avec le téléphone Asus, (b) photo prise avec l’appareil photo Canon, (c) résultats de l’ouverture de fissure (OF) du côté gauche de la poutre en fonction de la flèche centrale imposée. Chaque point représente la mesure sur une photo. Niveau de gris : diffgris = 171, mingris = 37, maxgris = 248.

Impact de la distance entre l’appareil photo et les marqueurs

La configuration des bancs d’essais de fluage imposant de prendre des photos à différentes distances entre l’appareil et les marqueurs, l’impact de ce paramètre sur la précision d’une mesure de distance relative a été estimé sur le Canon. La distance appareil-marqueurs affecte à la fois la taille des marqueurs en pixels et leur position dans la photo. Plus l’appareil est éloigné, plus les marqueurs sont petits et centrés. La même feuille de papier (figure 4.8) est prise en photo avec des distances appareil-marqueur allant de 40 à 200 cm par pas de 10 cm, sans angle de vue, figure 4.12. Cinq photos sont prises à chaque pas de distance.

La figure 4.11 montre l’évolution de l’erreur, de l’erreur relative et de l’écart-type avec la distance appareil-marqueur. L’erreur correspond à la différence entre valeur réelle et valeur mesurée, où la valeur réelle est la distance réalisée par l’imprimante et la valeur mesurée est la distance calculée après homographie. L’erreur relative correspond à l’erreur divisée par la valeur réelle, c’est à dire 40 mm pour dy12 et 175 mm pour dy34. L’écart-type correspond à celui de la valeur mesurée sur cinq photos à chaque pas de distance.

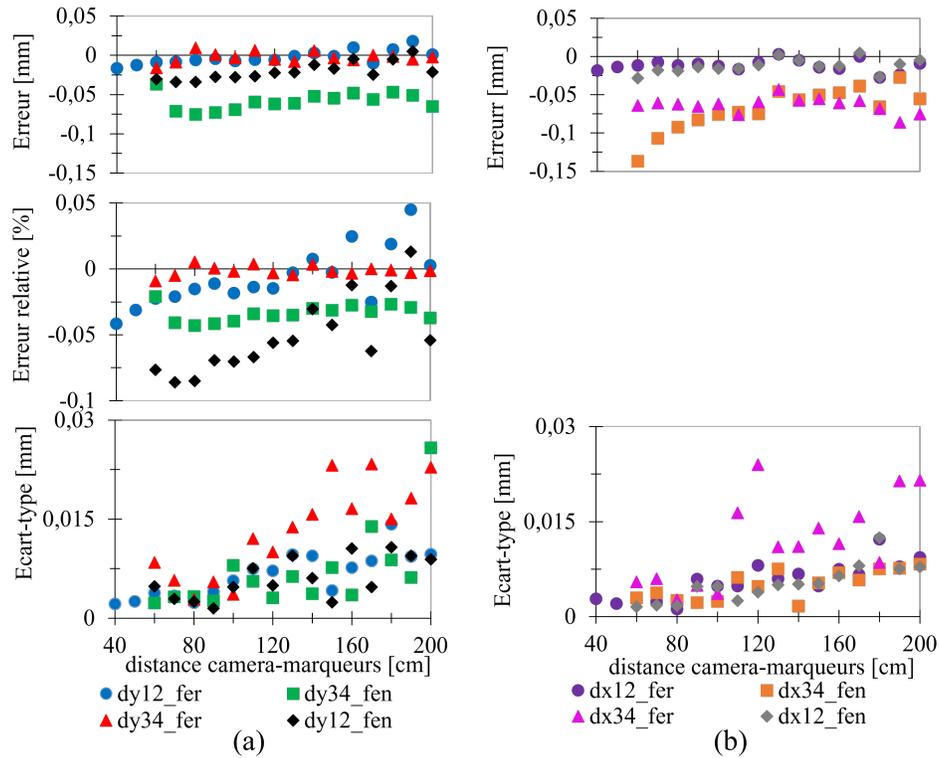


FIGURE 4.11 – Impact de la distance entre l’appareil et les marqueurs : (a) erreur : différence entre distance réelle et distance mesurée, erreur relative : erreur divisée par la distance vraie, écart-type des distances mesurées sur dix photos pour la distance en y, (b) erreur et écart-type pour la distance en x. dy12 et dy34 sont les distances en y entre les marqueurs 1-2 (40 mm) et 3-4 (175 mm), respectivement ; dx12 et dx34 sont les distances en x entre les marqueurs 1-2 (0 mm) et 3-4 (0 mm), respectivement. Mires utilisées pour l’homographie : fer, mire fer à cheval ; fen, mire fenêtre. Niveau de gris : diffgris = 156, mingris = 29, maxgris = 201.

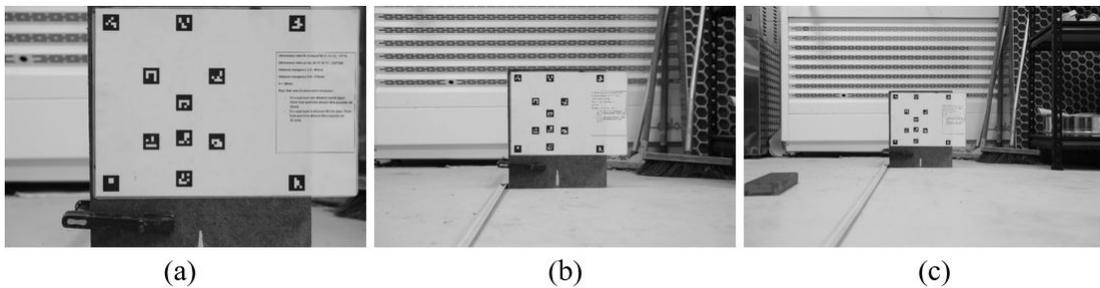


FIGURE 4.12 – Photos de mesure de l’impact de la distance entre l’appareil et les marqueurs, distance de : (a) 60 cm, (b) 130 cm, (c) 200 cm.

Il est alors constaté que :

- la distance n'a pas d'impact observable sur l'erreur et très peu sur l'erreur relative,
- l'écart-type augmente avec la distance. Cela peut être expliqué par la réduction de la taille des marqueurs. Pour une distance de 60 cm, les marqueurs font environ 250×166 px alors que pour la distance de 200 cm ils font environ 85×53 px, réduisant ainsi la précision de détection.

L'erreur relative provoquée par la distance appareil-marqueurs est au plus de 0,1%.

Comparativement, Brémand et al. (2011) ont montré que l'erreur de localisation d'un marqueur augmentait si leur taille diminuait. Abawi et al. (2004) ont également trouvé que la distance caméra-marqueur augmentait l'écart-type et l'erreur sur l'estimation de positionnement de la caméra.

Impact de l'angle de vue

La configuration des bancs d'essais de fluage imposant également de prendre des photos avec un angle de vue non nul, l'impact de ce paramètre a été estimé. Pour simuler différents angles de vue, la feuille de papier est pivotée de 0 à 45° par pas de 5° (figure 4.13). Un angle horizontal ou vertical signifie respectivement un angle entre le plan contenant la feuille de papier et un plan horizontal ou vertical. Dix photos sont prises à chaque pas angulaire, l'appareil est à 90 cm des marqueurs et installée sur un trépied.

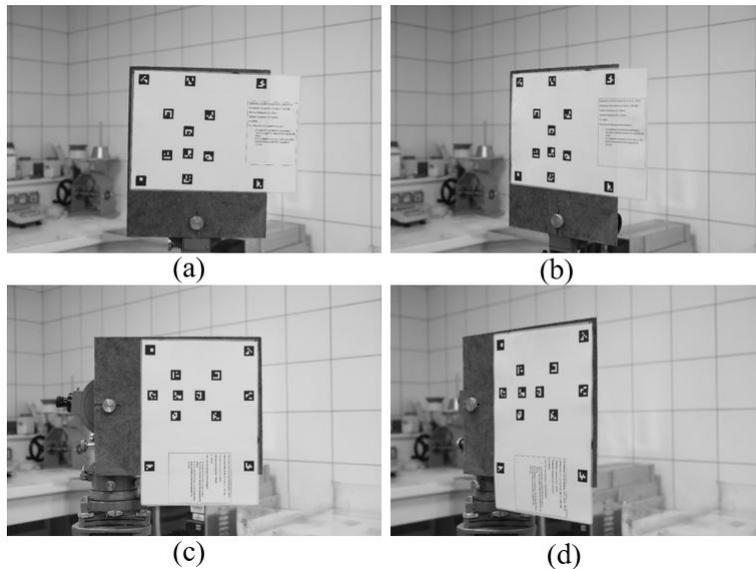


FIGURE 4.13 – Photos de mesures de l'impact d'un angle de vue sur une mesure de distance relative : (a) appareil photo en face de la cible, (b) angle de 45° , (c) appareil photo en face de la cible pivotée de 90° , (d) angle de 45° et cible pivotée de 90° .

La figure 4.14 montre l'évolution de l'erreur, erreur relative et écart-type en fonction de l'angle horizontal. Ces paramètres ont été définis dans la partie précédente. L'erreur relative sur dx

ne peut pas être calculée car la valeur réelle est égale à 0 et qu'elle est au dénominateur. Des résultats similaires ont été obtenus pour un angle vertical et ce n'est donc que l'impact de l'angle horizontal qui est affiché. L'erreur impliquée par une distance de 90 cm est soustraite des résultats présentés.

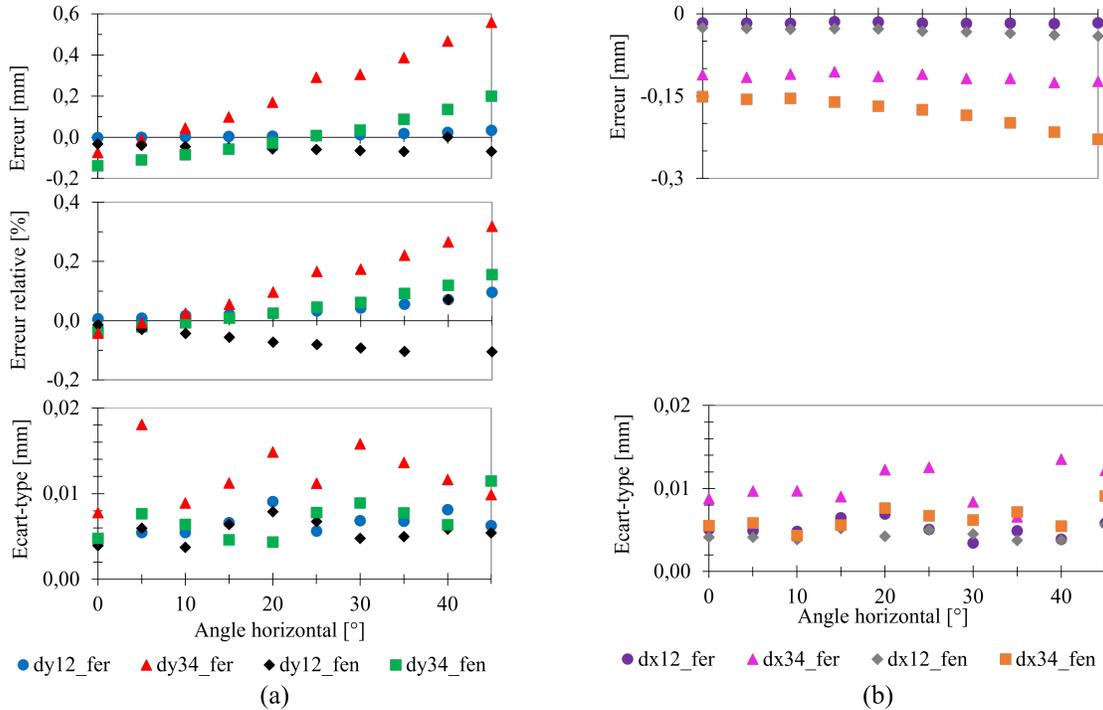


FIGURE 4.14 – Impact d’un angle horizontal : (a) erreur, erreur relative et écart-type sur la mesure de distance relative en y, (b) erreur et écart-type sur la mesure de distance relative en x. La légende est la même que pour la figure 4.11. Niveau de gris : diffgris = 164, mingris = 35, maxgris = 216.

Il est constaté que l’angle de vue n’a pas d’impact sur la dispersion des mesures de dix photos. Cependant, l’erreur augmente spécialement dans la direction considérée : l’erreur en dy augmente avec l’angle horizontal et l’erreur en dx avec l’angle vertical. C’est particulièrement vrai pour les grandes distances (dy34). Une croissance positive de l’erreur signifie que la distance mesurée diminue, comme si elle était réduite avec une augmentation de l’angle de vue. La profondeur de champ peut être la responsable, étant donné que certains marqueurs sont moins nets que les autres, mais dans ce cas l’écart-type doit aussi augmenter. L’hypothèse actuelle est que le calcul d’homographie est imparfait en raison du faible nombre de marqueurs utilisés pour calculer la matrice.

Les résultats montrent que l’erreur relative peut atteindre 0,3% dans des conditions défavorables, c’est à dire une grande distance mesurée avec une petite mire (dy34_fer). Excepté pour dy12_fer, dy34_fen et dy12_fen, l’erreur relative reste sous 0,2% et même sous 0,08% tant que l’angle de vue est inférieur à 25°.

Comparativement, Malbezin et al. (2002) ont observé une augmentation de l’erreur sur l’es-

timation de la position de la caméra dans une photo lorsque l'angle de vue augmente dans la direction considérée. Cependant, Abawi et al. (2004) ont observé que l'angle de vue diminuait l'erreur de localisation d'un marqueur, notamment entre 30 et 40°, contrairement aux observations faites dans ce travail.

Impact du déplacement hors-plan

Le bois étant un matériau hygroscopique, il peut vriller lors de son séchage. Parmi les différents vrillages possibles, le tuilage est la configuration qui amène le plus de déplacement hors-plan. Un problème hors-plan survient quand les marqueurs de la mire et ceux de l'objet mesuré ne sont plus coplanaires, ceux de la mire étant toujours coplanaires puisqu'ils sont collés sur une pièce d'aluminium rigide. L'homographie réalisée transforme les coordonnées images en coordonnées physiques, mais une erreur apparaît si les marqueurs ne sont pas dans le même plan. Le tuilage survient sur un débit sur dosse, lorsque le bois tire à coeur, c'est-à-dire que la poutre forme un arc de cercle dont le coeur est au sommet. Toutefois, l'opérateur peut également provoquer une erreur de positionnement de la mire provoquant du hors-plan.

Les effets du tuilage sur un déplacement hors-plan sont présentés en figure 4.15. L'erreur ainsi provoquée peut être estimée géométriquement.

Soit d le déplacement hors-plan, D_1 et D_2 la distance entre l'appareil photo et deux marqueurs collés à une pièce de bois tuillée, H_{p1} la distance entre ces deux marqueurs projetée sur la mire et H_{p2} la distance réelle entre ces deux marqueurs. Selon le théorème de Thalès (figure 4.15b) :

$$\frac{D_1}{H_{p1}} = \frac{D_1 + d}{H_{p2}} \quad (4.3)$$

où $H_{p1} = H$; $H_{p2} = H + Er$, $D_1 = D_2 = D$ et Er est l'erreur de localisation due au déplacement hors-plan. Pour une erreur relative, l'erreur est divisée par la valeur vraie H . Il vient :

$$\frac{Er}{H} = \frac{d}{D} \quad (4.4)$$

Ce résultat est valable pour n'importe quel angle de vue.

Le déplacement hors plan dû au vrillage du bois est un processus long dépendant de la vitesse de séchage. Si la mire est toujours placée de la même façon, alors ce déplacement implique une erreur systématique. Cette dernière s'élimine lors de l'observation de variations journalières ou hebdomadaires, mais garde son importance sur des variations à long terme. Toutefois, des variations à long terme sont bien souvent prédominantes devant une telle erreur. Ainsi, pour un séchage partant d'un état de bois vert, le retrait peut atteindre 10 voire 20%, écrasant les effets de cette erreur. Cependant, l'erreur hors-plan peut aussi provenir d'un mauvais placement de la mire, c'est dans ce cas une erreur aléatoire. Au cours des essais de fluage, cette erreur de placement atteint au maximum $d = \pm 1$ mm, impliquant une erreur de 0,2% pour $D = 1000$ mm.

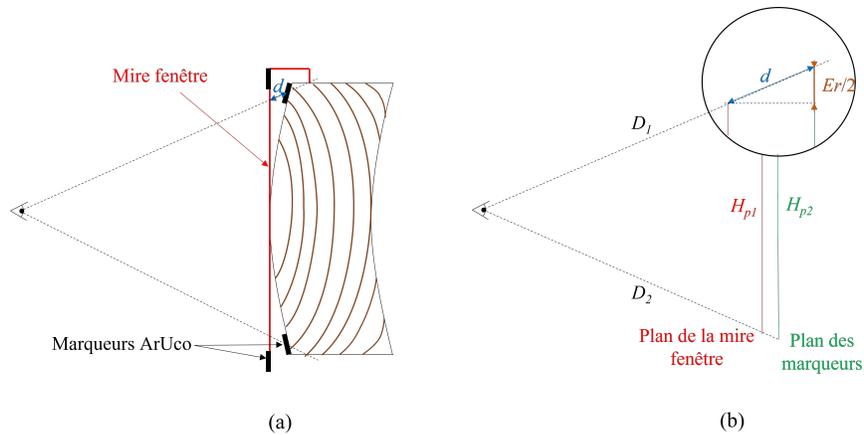


FIGURE 4.15 – Effet du tuilage du bois sur une mesure de retrait-gonflement d’une poutre : (a) illustration du déplacement hors-plan, (b) application du théorème de Thalès.

4.3 Conclusion sur les performances des outils expérimentaux utilisés

Deux types de capteurs de déplacement linéaire ont été utilisés, les capteurs LDT et LVDT. L’étalonnage et l’estimation de l’influence de la température assurent la fiabilité de leur mesure même pour les essais à l’extérieur. En effet, devant les flèches et ouverture de fissure observées, une précision de l’ordre de 0,01 mm est suffisante.

Pour la méthode de suivi de marqueurs, les résultats montrent que choisir un appareil photo reflex plutôt que celui d’un téléphone portable standard diminue la dispersion d’une série de mesure. Lorsque des distances de 175 mm doivent être mesurées, pour connaître par exemple les retraits-gonflements des poutres chargées en fluage, les résultats suggèrent d’utiliser la mire fenêtre. L’angle de vue ayant plus d’impact sur la précision que la distance entre l’appareil et les marqueurs, il doit être le plus faible possible. Lors des essais de fluage, les distances dy_{12_fer} , dy_{12_fen} et dy_{34_fen} sont mesurées. Les conditions d’essai imposent une distance appareil marqueurs d’environ 90 cm et un angle de vue variant de 0 à 25°, menant à une erreur relative normalement inférieure à 0,08%. À cela s’ajoute l’erreur hors-plan aléatoire, estimée au maximum à 0,2%. Cela correspond à une erreur de 0,112 mm pour des distances initiales de 40 mm et 0,49 mm pour des distances de 175 mm. Considérant un coefficient de retrait-gonflement du bois entre 0,2 et 0,3%/° (Guitard, 1987), une variation de 1% de TE est donc difficilement observable sur les poutres chargées en fluage mais des variations long terme le seront assurément. Une propagation de fissure sur PE implique également une augmentation de distance minimale entre marqueur de 0,3 mm, ce qui correspond à 0,75% d’une distance initiale de 40 mm. Les propagations de fissure doivent donc aussi être observées sur les mesures par suivi de marqueurs. Néanmoins, d’autres sources d’erreurs ne sont pas prises en compte telles les variations de luminosité ou les paramètres de l’appareil photo.

La technique de suivi de marqueurs a été développée parce qu’elle est flexible, polyvalente et

à coût raisonnable par point de mesure tout en maintenant un niveau de précision cohérent avec les mesures déployées pour les essais. En effet, l'homographie et les mires permettent de prendre des photos avec un angle de vue et avec un appareil photo qui se déplace. Ces caractéristiques sont particulièrement utiles dans les essais de fluage. Par ailleurs, cette méthode permet de mesurer une grande gamme de distance sans efforts additionnels. Les marqueurs peuvent ainsi être espacés de 20 mm tout comme 500 mm. La seule limite est la nécessité pour la photo de contenir tous les marqueurs. C'est un avantage non négligeable par rapport aux capteurs LVDT qui demandent, de préférence, de connaître la gamme de mesure désirée avant de les acheter. Le coût financier de l'application de cette méthode est également attractif. L'équipement le plus onéreux est l'appareil photo. Il est recommandé d'utiliser un appareil d'excellente qualité, du point de vue résolution et distorsions optiques. Une fois l'acquisition de l'appareil photo, le nombre de mesure peut augmenter sans coût supplémentaire. Ensuite, les marqueurs doivent seulement être imprimés sur du papier standard et protégés, par une plastification mate par exemple. Enfin, les principes expliqués dans cette partie sont librement accessibles grâce à la communauté d'OpenCV. Les algorithmes et principes mathématiques sont disponibles en libre accès sur leur plateforme.

Conclusion de la partie B

Cette partie a d'abord présenté le matériel végétal étudié. Celui-ci consiste en un lot de 30 poutres en dimensions d'emploi, c'est-à-dire de dimensions $4000 \times 175 \times 63 \text{ mm}^3$. Des essais BING et des mesures d'infradensité ont permis de caractériser mécaniquement le lot et de former des groupes d'homogénéité mécanique. Ces groupes sont ainsi utilisés dans la partie C dédiée aux essais de flexion.

Le deuxième chapitre de cette partie présente les outils expérimentaux utilisés pendant la campagne d'essai de flexion de la partie C. Notamment, l'étalonnage des capteurs de déplacement et la méthode de suivi de marqueurs spécialement développée pour ces essais. C'est une méthode flexible et polyvalente qui a fait l'objet d'un article de recherche dans la revue *Experimental Techniques*. L'impact d'un angle de vue, de la distance entre l'appareil photo et les marqueurs ainsi que d'un déplacement hors-plan y sont développés et quantifiés.

La partie C fera l'objet de la description et de l'analyse des essais de flexion déjà mentionnés dans cette partie.

Troisième partie

Comportement du bois en flexion

L'objet de cette partie est de présenter les conditions et les résultats des essais de flexion 4-points réalisés sur les poutres entaillées de sapin pectiné. Cette partie se décline en trois chapitres : le chapitre 5 est une description du comportement théorique d'une poutre en flexion 4-points et les conditions des essais réalisés ; le chapitre 6 est une présentation des résultats des réponses mécaniques ; le chapitre 7 est une présentation de la fissuration des poutres entaillées. L'enjeu de cette partie est d'apporter une description et une analyse approfondies des essais réalisés. Le problème qui se pose avec ce type d'essais est que le bois a l'opportunité d'exprimer sa complexité. Les études expérimentales sur le comportement différé de poutres en dimensions d'emploi et en environnement extérieur sont complexes à analyser. Par la nature même d'un environnement extérieur variable, ces essais ne sont pas reproductibles. Il est en effet impossible d'avoir un environnement exactement équivalent à celui qu'ont subi les poutres chargées. Ils n'en demeurent pas moins des expériences scientifiques, tout comme l'observation d'un phénomène astronomique exceptionnel en est une. Il est en effet impossible de reproduire ces essais exactement dans les mêmes conditions. Toutefois, ils sont semblables à ce que subissent certains éléments de structure en bois et les décrire finement permet de confronter de futurs modèles numériques simulant le comportement différé du bois. Ils sont également l'opportunité d'observer l'évolution mécanique du bois partiellement séché lors d'un usage en structure.

Ce travail a été réalisé grâce à la contribution de : Sarra Bouhleb, pour l'aide à la réalisation et l'analyse des essais de flexion à rupture, stagiaire à Polytech Clermont ; Florence Mathieu, pour son aide lors de la mise en place des essais de flexion à rupture et de fluage, stagiaire à Clermont Auvergne INP ; Théo Sallat et Charles-Hubert Granet pour l'entaillage des poutres, stagiaires à Clermont Auvergne INP ; Julien Salazard, menuisier à l'Université Clermont Auvergne pour l'entaillage des poutres.

Chapitre 5

La flexion 4-points

5.1 Étude analytique de la flexion 4-points

5.1.1 Hypothèses de travail

L'analyse mécanique des essais de flexion requiert de poser les hypothèses de théorie des poutres, d'homogénéité, d'élasticité, de petites perturbations, du principe de Saint-Venant et de Navier-Bernoulli. Cette base permettra d'utiliser les outils mathématiques de la résistance des matériaux (RDM). Ces hypothèses sont admises pour le reste de cette partie mais les poutres montrent une particularité qu'il faut d'abord présenter, celle de l'état de contrainte dans l'entaille.

- **Singularité de contrainte dans l'entaille**

Une poutre entaillée présente une singularité de contrainte en fond d'entaille, c'est-à-dire que l'état de contrainte est indéfini. En effet, les changements brutaux de géométrie créent des concentrations de contraintes en ce lieu, par exemple dans le cas d'une entaille. Toutes les composantes du tenseur de contrainte sont affectées, dont les contraintes de traction perpendiculaire à la fibre moyenne qui provoquent des propagations de fissures (Toussaint et al., 2016), figure 5.1. La résistance des matériaux, par hypothèse de base, considère que la contrainte de traction perpendiculaire est négligeable.

- **Théorie des poutres**

Les objets étudiés sont des poutres, c'est-à-dire qu'ils ont une longueur grande devant les deux autres dimensions, comparables entre elles. Le volume de la poutre est engendré par le déplacement d'une section droite le long de la fibre moyenne. La section droite de la poutre peut varier progressivement suivant l'axe longitudinal mais pas brutalement comme dans le cas d'une entaille. Les poutres entaillées ne valident donc pas cette hypothèse au droit de l'entaille, mais partout ailleurs.

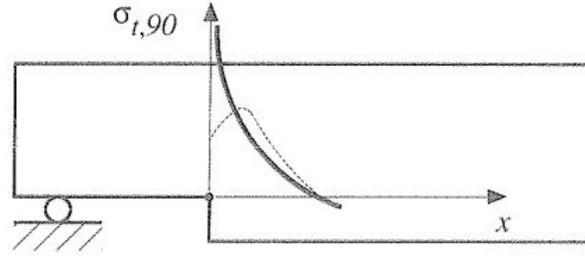


FIGURE 5.1 – Contrainte de traction perpendiculaire en fond d’entaille selon la théorie de l’élasticité linéaire (courbe continue) et estimée expérimentalement (courbe en pointillé), (SEDIBOIS, 2000).

Les poutres entaillées de sapin pectiné de cette étude valident cette hypothèse mais présentent une discontinuité de la fibre moyenne au niveau de l’entaille, figure 5.3.

- **Matériau**

Le matériau constitutif de la poutre est supposé homogène, orthotrope et viscoélastique linéaire. Dans la mesure où le bois est intrinsèquement hétérogène (anatomie, noeuds, ...), l’hypothèse d’homogénéité est fautive, mais nécessaire pour mettre en équation le problème mécanique. Les hétérogénéités sont donc négligées dans le calcul des contraintes, des déformations ou encore du module élastique.

L’orthotropie du bois n’est pas directement prise en compte car la direction axiale prédomine en théorie des poutres. Le rapport (E/G) élevé dans le cas du bois traduit indirectement l’orthotropie, puisque le coefficient de Poisson, défini pour un matériau isotrope par $\nu = E/(2G) - 1$, renvoie alors des valeurs impossibles. Concernant la viscoélasticité linéaire, l’expérience montre que celle-ci représente généralement bien le comportement différé du bois.

- **Petites perturbations**

Les déplacements sont petits devant la longueur de la poutre et les déformations sont faibles ($\leq 1\%$). Cette hypothèse permet de confondre la configuration à tout instant avec la configuration initiale et de linéariser le tenseur des déformations tel que dans un cas 1D : $\epsilon_x = \Delta L/L_0$.

Dans le génie civil, les états limites sont assurés par des exigences d’état de contrainte, calculés sous les hypothèses de la RdM et de faibles flèches. Les petits déplacements sont dans ce cas une hypothèse acceptable. De même, le bois a un comportement plutôt fragile. Il se déforme peu avant la rupture et l’hypothèse des petites déformations est acceptable.

- **Principe de Saint-Venant**

L’état de contrainte en un point d’une section suffisamment éloignée d’efforts ponctuels ne dépend que du torseur des forces appliquées sur la partie isolée du solide étudié.

Cette hypothèse est valable pour les calculs de module élastique global ou de contrainte normale dans des zones éloignées des entailles. Au niveau des entailles, les contraintes transverses ne sont plus définies par les hypothèses de la RdM.

- **Navier-Bernoulli et Timoshenko**

L'hypothèse de Navier-Bernoulli consiste à supposer que les sections droites avant déformation restent planes et normales à la fibre moyenne au cours de la déformation. Cette hypothèse néglige donc les effets du cisaillement qui sont généralement faibles en théorie des poutres.

L'hypothèse de Timoshenko consiste à supposer que la section plane reste plane après déformation, mais pas nécessairement perpendiculaire à l'axe neutre. Ce cas de figure prend en compte les effets d'un cisaillement sur la déformée de la poutre. Pour une PE, l'effort tranchant, donc les contraintes de cisaillement, sont élevées au niveau de l'entaille.

5.1.2 Contraintes, déformations et calcul de flèches

La flexion 4-points est un essai sur une poutre posée sur un appui simple (rouleau), un appui double (articulation) et chargée en deux points. La figure 5.2 montre le diagramme des moments de l'essai. Un tel diagramme, aussi appelé diagramme V-M, représente le tracé de l'effort tranchant et du moment fléchissant le long de la poutre. Entre les points de chargement, l'effort normal et l'effort tranchant sont nuls et le moment fléchissant est constant et maximal. Il n'y a donc pas de contrainte de cisaillement et la courbure est constante. Cette zone est qualifiée de flexion pure ou flexion circulaire.

Par définition, les champs de contrainte et de (petite) déformation dans un solide quelconque s'écrivent en un point M :

$$\underline{\underline{\sigma}}_M = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} ; \quad \underline{\underline{\epsilon}}_M = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Sous les hypothèses définies ci-dessus, notamment la théorie des poutres, toutes les composantes du tenseur de contraintes sont négligées sauf σ_{xx} , σ_{xy} et σ_{xz} . Les concentrations de contrainte au niveau de l'entaille impose également de prendre en compte σ_{yy} . De même, seules les composantes ϵ_{xx} , ϵ_{xy} sont étudiées et dans le cas d'une entaille également ϵ_{yy} . Ainsi, les notations choisies sont :

$$\underline{\underline{\sigma}}_M = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad \underline{\underline{\epsilon}}_M = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 & \epsilon_y & \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 & \gamma_{yz}/2 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

où $\gamma_{xy} = 2\epsilon_{xy}$, $\gamma_{xz} = 2\epsilon_{xz}$ et $\gamma_{yz} = 2\epsilon_{yz}$ représentent les angles de distorsion et τ_{xy} et τ_{xz} les contraintes de cisaillement.

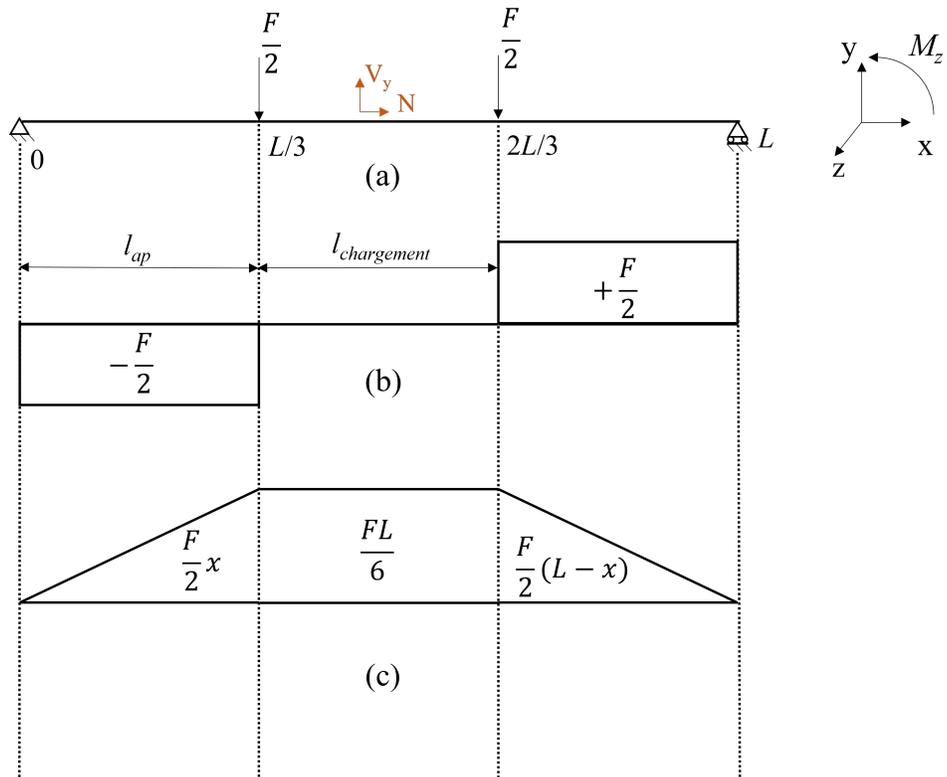


FIGURE 5.2 – Diagramme des moments d'un essai de flexion 4-points : (a) représentation d'une poutre isostatique chargée en flexion 4-points, (b) effort tranchant V_y le long de la poutre, (c) moment fléchissant M_z le long de la poutre.

Pour une poutre à section rectangulaire, travaillant dans le repère principal d'inertie $((\vec{x}, \vec{y}))$ en figure 5.2(a)), la contrainte normale s'écrit :

$$\sigma_x = \frac{M_z(x)}{I_z} y \quad (5.3)$$

où x représente la position le long de la poutre, de 0 à L ; y la position dans la hauteur, de $-H/2$ à $H/2$; z l'axe autour duquel la flexion s'opère; $I_z = eH^3/12$ le moment quadratique dans la zone centrale; $M_z(x) = FL/6$ le moment fléchissant dans la zone centrale; et la force F correspond à la force totale appliquée. Au sein d'une section droite, la contrainte normale est donc constante dans l'épaisseur et linéaire dans la hauteur, figure 5.3.

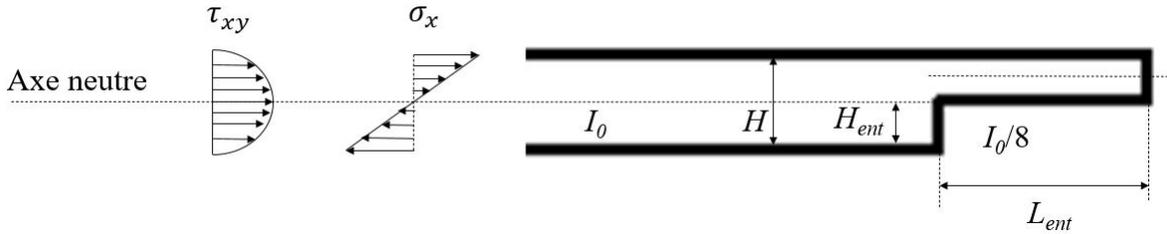


FIGURE 5.3 – Représentation de l'état de contrainte normale et tangentielle le long d'une poutre entaillée

Dans une zone à courbure constante (zone centrale), le calcul de la déformation maximale, c'est-à-dire à $H/2$ ou $-H/2$, peut se faire selon l'approximation proposée par Pambou Nziengui (2019) :

$$\epsilon_x \approx \frac{4\Delta U_r H}{l_{\text{chargement}}^2} \quad (5.4)$$

où $\Delta U_r = U_c - (U_g + U_d)/2$ et U_c , U_g et U_d représentent respectivement la flèche à $L/2$, $L/3$ et $2L/3$. ΔU_r est représentatif de l'effet de la courbure dans la zone centrale et $l_{\text{chargement}}$ est la distance entre U_g et U_d , dans ce cas égale à la distance entre les points de chargement (figure 5.6). C'est une approximation géométrique qui considère le matériau homogène et néglige les effets locaux autour des points de chargement (écrasement, compression transverse ...).

Pour les entailles de poutres mi-hauteur, le diagramme des moments est le même que celui de la figure 5.2 avec un moment quadratique I_z divisé par huit dans la zone entaillée.

Entre un appui et un point de chargement, la poutre est en flexion simple, c'est à dire soumise à un effort tranchant constant et un moment fléchissant linéaire. En l'absence d'effort tranchant dans l'épaisseur, τ_{xz} est nulle. Pour une section rectangulaire, la contrainte de cisaillement τ_{xy} est parabolique dans la hauteur et maximale sur l'axe neutre, figure 5.3. Elle vaut en ce lieu :

$$\tau_{xy} = -\frac{3V_y}{2eH} \quad (5.5)$$

si la hauteur vaut H (zone non entaillée) et où V_y est l'effort tranchant.

Cette contrainte de cisaillement doit être vérifiée attentivement pour le bois dont le module de cisaillement G est généralement faible (Guitard, 1987). Dans le cas d'une PE, la contrainte de cisaillement est maximale dans le fond d'entaille et elle est en partie responsable d'une apparition de fissure, notamment dans le mode 2. Dans l'Eurocode 5 le critère ultime en cisaillement intègre d'ailleurs un facteur correctif K_v fortement pénalisant (AFNOR, 2004).

Le calcul analytique de la flèche se fait par l'équation :

$$\frac{d^2U}{dx^2}EI_z = M_z(x) \quad (5.6)$$

où $U(x)$ représente la flèche le long de la poutre et E le module élastique axial.

Avec le modèle de Navier-Bernoulli, pour une poutre non entaillée en flexion 4-points la flèche centrale vaut alors :

$$\Delta U_c = \frac{23\Delta FL^3}{1296EI_z} \quad (5.7)$$

Une formule analytique pour une PE à mi-hauteur avec le modèle de Timoshenko a été développée par Pambou Nziengui (2019) :

$$\Delta U_c = \frac{23 l_{ap}L^2}{36 EeH^3} \left(1 + \frac{189}{23}\beta_0^3\right) \times \left[1 + \frac{108}{115} \left(\frac{H}{L}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right) \frac{1 + (3/2)\beta_0}{1 + (189/23)\beta_0^3}\right] \times \Delta F \quad (5.8)$$

où l_{ap} est la distance entre un appui et le point de chargement suivant (ici $L/3$, figure 5.2), ΔU_c est la variation de flèche centrale impliquée par l'incrément d'effort ΔF , et β_0 est le facteur d'entaille :

$$\beta_0 = \frac{2L_{ent}}{L} \quad (5.9)$$

avec L_{ent} la longueur d'entaille (figure 5.3).

Ces développements ne prennent néanmoins pas en compte l'impact du temps sur la flèche ou la déformation.

5.1.3 Comportement différé

Généralement, les éléments de structure sont soumis à un chargement variable au cours du temps. Dans le génie civil, le coefficient K_{mod} permet de considérer l'affaiblissement de la structure au cours du temps et corrige la résistance lors d'une vérification à l'état limite ultime. De même, le coefficient K_{def} permet de prendre en compte l'effet du temps sur les déformations en augmentant la flèche finale lors d'une vérification d'état limite de service. Cet effet du temps se manifeste différemment selon les matériaux en fonction de leur viscosité. Le bois est un matériau légèrement visqueux, à l'instar du miel qui résiste à son écoulement et met du temps à couler, le bois résiste à la contrainte et met du temps à se déformer. Cette propriété lui vient de sa nature polymérique du bois : la cellulose non cristalline, les hémicelluloses et la lignine sont des polymères dissipatifs dont le réseau moléculaire se réarrange lorsqu'une contrainte est appliquée suffisamment longtemps. Ce réarrangement diminue la rigidité du matériau et se manifeste par une augmentation de la flèche dans

le cas de la flexion. Cette dualité entre comportement élastique instantané (réversible) et comportement différé visqueux représente la viscoélasticité. Lorsque la contrainte appliquée est constante, on parle de fluage, figure 5.4(a). La viscoélasticité linéaire obéit au principe de superposition de Boltzmann : la réponse à une combinaison de sollicitations est la somme des réponses de chaque sollicitation. Ce principe permet de considérer un essai de flexion à contrainte variable comme un fluage multi-paliers, figure 5.4(b). Par exemple, dans un essai de fluage à N paliers de chargement donnés, la réponse de la déformation s'écrit :

$$\epsilon(t) = \sum_{i=0}^N J(t - t_i) \cdot \Delta\sigma(t_i) \quad (5.10)$$

où $J(t)$ représente la complaisance, qui est l'inverse du module élastique. Cette fonction est généralement exprimée par des modèles rhéologiques. Le comportement du bois est bien décrit par ce type d'approche (Holzer et al., 1989; Bardet, 2001). Ceci étant, Mukudai (1983) a montré que la linéarité de la réponse différée n'est valable que si le chargement est inférieur à 30% de la charge de rupture. Par ailleurs, le fluage du bois est sensible aux variations d'humidité et de température. De même que E , la viscosité du bois est diminuée avec l'augmentation de la température et de la teneur en eau (TE). Le fluage dans un environnement humide ou chaud est donc accéléré (Hunt, 1999; Perré et Aguiar, 1999). De même, le fluage d'un bois initialement "vert" est plus rapide que celui d'un bois sec (Nakano, 1999; Montero, 2010). Toutefois, la viscosité du bois est aussi et surtout sensible aux variations de TE. Le couplage entre chargement mécanique et variations de TE est connu sous le terme d'effet mécano-sorptif. Cet effet est complexe et étudié par de nombreux auteurs dans la littérature (Hunt, 1984; Mukudai et Yata, 1986; Gril, 1988; Pittet, 1996; S. Stevanic et Salmén, 2020). Il se manifeste par exemple par une augmentation drastique du fluage lors de variations de TE. Il survient également lors d'un simple séchage, provoquant des gradients de TE impliquant des contraintes internes en même temps qu'une variation de TE (Grossman, 1976). Par ailleurs, Hearmon et Paton (1964) ont montré que l'influence du taux de chargement sur la réponse mécano-sorptive présente une limite de linéarité : à partir d'un certain seuil de contrainte l'effet est beaucoup plus important et ce de façon non-linéaire. Hunt (1999) a soumis plusieurs arguments suggérant qu'en réalité l'effet mécano-sorptif n'est qu'une accélération du fluage, qui surviendrait plus lentement sans variation de TE. C'est cependant un avis débattu dans la communauté scientifique (Montero, 2010). L'effet mécano-sorptif est observé sur d'autres matériaux cellulotiques comme le papier (Back et Salmen, 1983), ainsi que le béton (Bazant et Chern, 1985). En réalité, il semble se manifester dès lors que le matériau est hygroscopique.

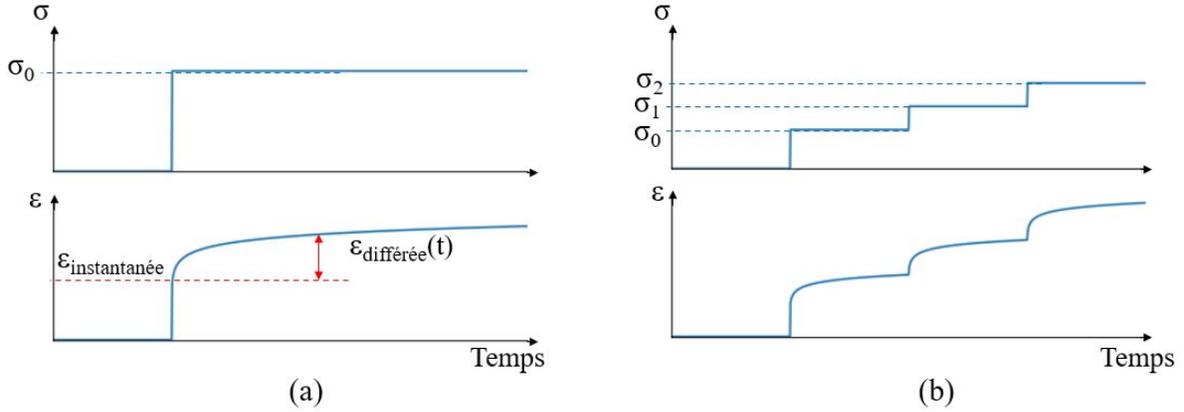


FIGURE 5.4 – Illustration théorique de : (a) un essai de fluage, (b) un essai de fluage multi-paliers.

Le fluage du bois est pris en compte par l’Eurocode 5 au moyen du paramètre K_{def} , estimateur du fluage relatif. Si l’élément de structure est en classe de service 1, 2 ou 3 alors K_{def} vaut 0,6 ; 0,8 ou 2, respectivement ; si le bois est massif et initialement à l’état vert, alors K_{def} est augmenté de 1. Les normes de construction pénalisent donc bien un bois qui présenterait des conditions de fluage accéléré. Cependant par volonté de simplification, l’Eurocode 5 ne propose pas de formule pour calculer l’évolution de la flèche centrale au cours d’un fluage, mais seulement une flèche finale ultime. C’est une approche cohérente dans le cas où le fluage du bois tend vers un état limite. Or, ce point ne fait pas consensus et dépend de multiples autres paramètres tels que l’environnement, le niveau de charge ou les conditions initiales (Hunt, 1999; Montero, 2010). Rien ne garantit donc que le fluage tend bien vers un état limite.

La complaisance étant l’inverse du module élastique, elle peut être déduite pour une PE de l’équation (5.8) :

$$J(t, \beta_0) = \frac{1}{E} = \frac{U_c(t)}{A \cdot F(t) \cdot f(\beta_0)} \quad (5.11)$$

où $A = (23l_{ap}L^2)/(36eH^3)$, $F(t)$ est l’évolution du chargement au cours du temps et $f(\beta_0)$ est la fonction prenant en compte le cisaillement et l’entaille :

$$f(\beta_0) = \left(1 + \frac{189}{23}\beta_0^3\right) \times \left[1 + \frac{108}{115} \left(\frac{H}{L}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right) \frac{1 + (3/2)\beta_0}{1 + (189/23)\beta_0^3}\right] \quad (5.12)$$

L’ensemble de ces outils de calculs mécaniques, basés sur les hypothèses de la RDM comprenant homogénéité et linéarité, sont utilisés dans la suite du mémoire.

5.1.4 Dimensionnement selon l’Eurocode 5

Cette section développe le dimensionnement qu’exige l’Eurocode 5 pour des poutres de résineux classées C18, utilisées pour une structure extérieure semi-pérenne type bâtiment agricole et construite en bois vert. L’état limite de service et l’état limite ultime sont détaillés. La

poutre est considérée comme subissant une charge permanente en flexion 4-points. Aucune charge variable n'est prise en compte, la situation est donc purement fictive mais correspond aux essais de fluage sur les poutres du lot de sapin pectiné. La question est de savoir quelle charge avant rupture supporte théoriquement ces poutres. Chaque paramètre et équation de cette section est issue d'au moins une de ces sources : SEDIBOIS (2000); AFNOR (2004); Benoit et al. (2007).

- **État limite ultime**

La situation est la suivante :

- poutre de classe C18 : module axial moyen $E_{0,mean} = 9$ GPa, module axial au 5ème percentile $E_{0,05} = 6$ GPa, module de cisaillement moyen $G_{mean} = 0,56$ GPa, résistance en flexion $f_{m,k} = 18$ MPa, résistance en cisaillement $f_{v,k} = 2$ MPa ;
- dimensions : longueur $L = 3600$ mm, épaisseur $e = 63$ mm, hauteur $H = 175$ mm, moment quadratique : $I_z = eH^3/12 = 2,8 \cdot 10^{-5}$ m⁴ ;
- classe de service 3 (bois régulièrement soumis à des conditions amenant à une TE supérieure à 20%) : CS3 ;
- pour CS3 avec chargement moyen terme (une semaine à six mois) : $K_{mod} = 0,65$;
- le coefficient partiel d'une poutre en bois massif : $\gamma_M = 1,3$;
- le coefficient d'instabilité géométrique provenant du déversement :

$$\sigma_{crit} = \frac{0,78E_{0,05} e^2}{H \times (0,8L + 2H)} = 32,86 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{crit}}} = 0,74; \lambda_{rel,m} < 0,75$$

Donc pas de déversement, $K_{crit} = 1$;

- coefficient d'effet système : $K_{sys} = 1$;
- bois massif, $K_n = 5$;
- paramètres d'entaille : $i = 1/\tan(\pi/2) = 0$; $a_1 = H_{ent}/H = 1/2$ avec H_{ent} la hauteur d'entaille ; $a_2 = L_{ent}/H = 1,3$ (figure 5.5).

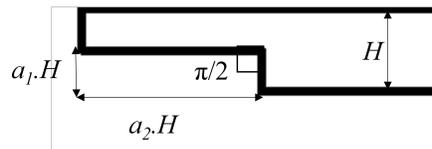


FIGURE 5.5 – Paramètres d'entaille pour le dimensionnement de l'Eurocode 5

L'état limite ultime (ELU) est vérifié si les contraintes appliquées sont inférieures à la résistance de la poutre. Une vérification sur la contrainte normale et une autre sur la contrainte

de cisaillement sont réalisées.

La résistance en flexion corrigée vaut :

$$f_{m,d} = f_{m,k} \cdot \frac{K_{mod}}{\gamma_M} K_{sys} \cdot K_h \cdot K_{crit} = 9 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

À partir de l'équation (5.3), dans la zone centrale $\sigma_x = (FL)/(eH)^2$. Le critère sur la contrainte normale donne alors :

$$\sigma_x \leq f_{m,d} \quad \Rightarrow \quad F \leq \frac{f_{m,d} e H^2}{L} \quad (5.14)$$

Soit $F \leq 4,8 \text{ kN}$.

La résistance de cisaillement corrigée vaut :

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot K_{mod}}{\gamma_M} = 1 \text{ MPa} \quad (5.15)$$

et la contrainte de cisaillement τ_{xy} peut être calculée par l'équation (5.5), de 0 à $L/3$: $\tau_{xy} = (3F)/(4eH_{ef})$ où H_{ef} est la hauteur réelle exposée au cisaillement, soit $H_{ef} = H_{ent}$ pour une PE. L'Eurocode 5 prend également en compte la mécanique de la rupture par l'application d'un coefficient de réduction K_v . Ce coefficient est issu des travaux de Gustafsson (1998) qui utilise la mécanique linéaire élastique de la rupture :

$$K_v = \min \left(1; \frac{K_n \cdot (1 + \frac{1,1i^{1,5}}{\sqrt{H}})}{\sqrt{H} \left(\sqrt{a_1 - a_1^2} + 0,8a_2 \sqrt{\frac{1}{a_1} - a_1^2} \right)} \right) = 0,2 \quad (5.16)$$

Le critère sur la contrainte de cisaillement donne alors :

$$\tau_{xy} \leq f_{v,d} \cdot K_v \quad \Rightarrow \quad F \leq \frac{4eH_{ent} K_v f_{v,d}}{3} \quad (5.17)$$

Soit $F \leq 1,5 \text{ kN}$.

• État limite de service

Pour un bois vert ou peu séché, en bois massif et soumis à une classe de service 3 : $K_{def} = K_{def} + 1 = 2 + 1 = 3$. Pour des "bâtiments agricoles et similaires", l'état limite de service se vérifie si la flèche centrale dite "instantanée" est inférieure à $L/200$ et la finale à $L/100$.

Les conditions sont donc les suivantes :

$$\Delta U_{c,instantanee} \leq \frac{L}{200} \quad ; \quad \Delta U_{c,finale} \leq \frac{L}{100} \quad (5.18)$$

où la flèche centrale finale pour un bois en fluage est calculée par :

$$U_{c,finale} = U_{c,instantanee} (1 + K_{def}) \quad (5.19)$$

Le chargement appliqué peut être extrait de l'équation (5.8), et le résultat pour la flèche instantanée est : $F \leq 5,2 \text{ kN}$ et pour la flèche finale : $F \leq 3,5 \text{ kN}$. Dans les conditions définies ci-dessus, le critère de service est donc validé tant que la masse est inférieure à 350 kg.

- **Conclusion sur le dimensionnement selon l’Eurocode 5**

C’est finalement la résistance au cisaillement qui est critique, imposant une masse d’au maximum 150 kg. L’Eurocode 5 prévoit donc une rupture au niveau des entailles plutôt que dans la zone centrale. Il est intéressant de noter qu’ici ce n’est pas le bois vert ou le fluage mais bien l’entaille qui pénalise fortement la poutre.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Essais en déplacement imposé jusqu’à rupture

Il s’agit d’abord de présenter les objectifs et les conditions des essais puis les dispositifs de mesure.

Objectifs et conditions des essais

L’objectif des essais de flexion en déplacement imposé jusqu’à rupture est de mesurer la contrainte à rupture σ_{max} de quelques poutres du lot, afin de vérifier que cette contrainte dépend des propriétés mécaniques évoquées en partie B, notamment E^d et ρ_{ID} . Le déplacement est piloté manuellement mais maintient un chargement monotone. En établissant une corrélation entre propriétés mécaniques et σ_{max} , une prévision de σ_{max} pour les poutres restantes est alors possible et un taux de charge peut être calculé pour les essais de fluage. En même temps, ces essais ont permis de faire une première observation des propagations de fissure partant des entailles : les poutres cassent-elles bien par fissuration ? La propagation est-elle brutale ou saccadée ?

Le choix des neuf poutres testées en flexion en déplacement imposé ainsi que leurs propriétés sont rapportées en tableau 3.4. Les essais se déroulent sur un banc expérimental en intérieur (figure 5.6(a)) et sont conformes à la norme NF EN 408+A1 (AFNOR, 2012) (figure 5.6(b)) :

- la poutre est suffisamment élancée : $L \approx 21H$,
- la distance entre les points de chargement est : $L/3$,
- des plaques sont interposées entre la poutre, les têtes de chargement et les appuis et sont de longueur inférieure à la moitié de la hauteur de la poutre.

Le chargement est appliqué à l’aide d’une presse hydraulique pilotée manuellement. Des capteurs mesurent en continu l’effort appliqué et la flèche centrale. Un chargement en déplacement permet de gérer une propagation de fissure par étape plutôt que brutale.

Dispositifs de mesure

En figure 5.6(b) sont indiqués les positionnements des capteurs de déplacement linéaire LDT. Ils ont permis de mesurer la flèche gauche, centrale et droite ainsi que les ouvertures de fissure gauche et droite. Pour qu’un capteur LDT mesure l’ouverture de fissure (OF, défini par la variable O_F), il est accroché à l’entaille au moyen d’une pièce de PLA imprimée en 3D. Le

palpeur est en contact avec une pièce d'aluminium collée sur la face d'appui de la poutre, figure 5.7. Ce système assure une mesure en continu de OF, avec une fréquence choisie à 10 Hz.

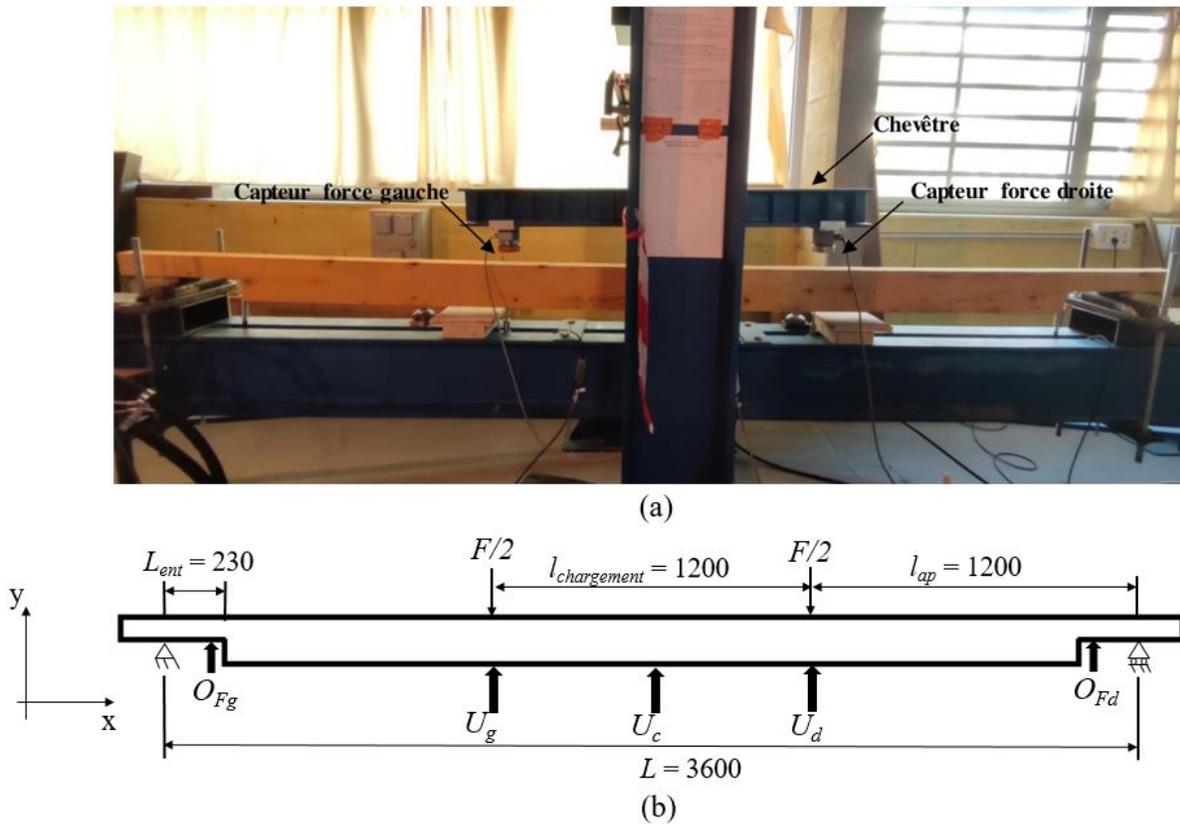


FIGURE 5.6 – Conditions des essais de flexion à rupture : (a) photo d'un essai, (b) positionnement des dispositifs de mesure. Toutes les valeurs numériques sont en millimètres. U_g , U_c et U_d correspondent respectivement à la mesure de flèche gauche, centrale et droite. O_{Fg} et O_{Fd} correspondent respectivement à la mesure d'ouverture de fissure gauche et droite.

Les capteurs LDT ont une étendue de mesure de 50 mm pour U_c , 25 mm pour U_g et U_d et 10 mm pour O_{Fg} et O_{Fd} . La référence de ces capteurs est une réglette en aluminium non liée au bâti. En effet, lors du chargement le bâti va légèrement se déformer par principe d'action-réaction. Si la référence est indépendante du bâti, alors elle n'est pas affectée par le chargement.

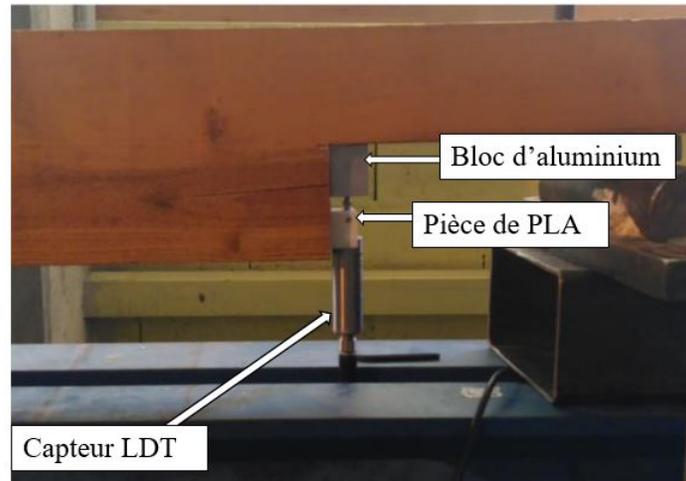


FIGURE 5.7 – Photo du dispositif de mesure automatique d'ouverture de fissure à l'aide d'un capteur LDT.

5.2.2 Essais de fluage multi-paliers

Il s'agit d'abord de présenter les objectifs et les conditions des essais puis les dispositifs de mesure.

Objectifs et conditions des essais

Comme présenté dans la section stratégie expérimentale en partie B, le but de ces essais est d'étudier le couplage entre fluage et fissuration sur des PE chargées à l'état vert ou partiellement sec dans un environnement extérieur semi-abrité. Semi-abrité signifie que les poutres sont abritées de la pluie mais seulement partiellement du rayonnement solaire. La protection contre la pluie permet d'éviter qu'elle ne provoque des erreurs de mesure et des transferts d'eau liquide dans le bois, ce qui avait été observé lors de travaux des Pambou Nziengui (2019). En fonction de la période de l'année, les rayons du soleil frappent certaines poutres une partie de la journée. L'abri est néanmoins construit en tôles bac acier blanches fixées sur des plaques d'OSB, ce qui assure que le toit en lui-même rayonne peu (figure 5.8(a)).

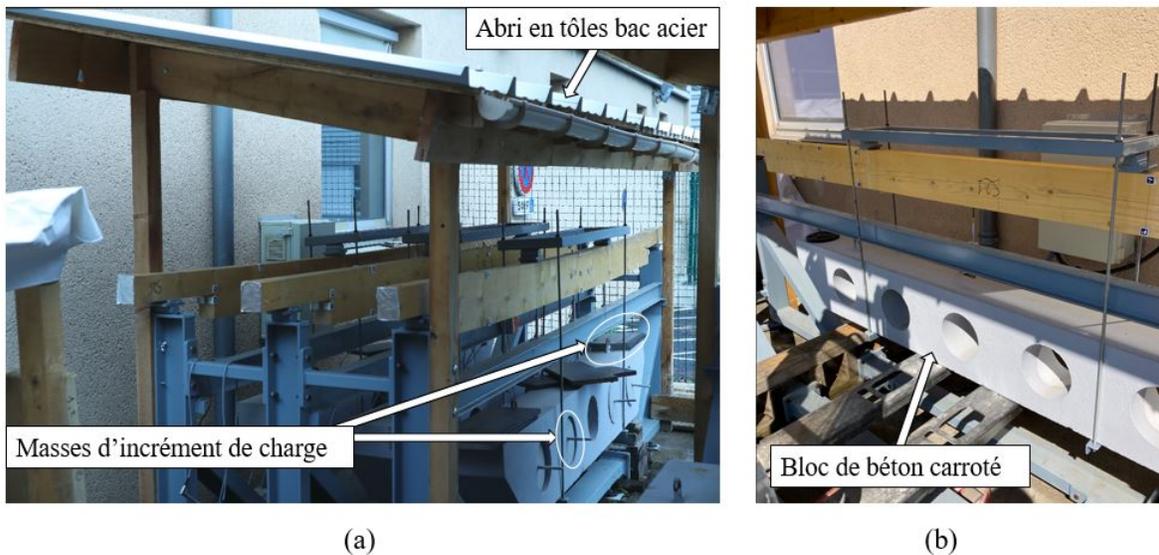


FIGURE 5.8 – Photos des essais de fluage : (a) trois poutres chargées sous l'abri, (b) application du chargement par l'intermédiaire du bloc de béton.

Le placement des points d'appuis et points de chargement est le même que pour les essais en déplacements imposés, figure 5.6(b). Le chargement est appliqué par l'intermédiaire d'un bloc de béton caroté et peint pour éviter les transferts hydriques, figure 5.8(b). La masse des blocs de béton et de l'équipement nécessaire pour appliquer le chargement (cadre en acier, tiges filetées, plaques interposées entre la poutre et les points de chargement) fait entre 342 et 388 kg. C'est environ le double du chargement maximal dimensionné selon l'Eurocode 5, où la ruine est prévue par fissuration au niveau des entailles. Les poutres sont donc chargées à 200% de leur résistance normative, mais ce taux de chargement est à distinguer de la limite de linéarité du comportement différé, identifiée à 30% de la charge à rupture du bois. En effet, cette limite considère la rupture par flexion dans la zone centrale et pas celle par fissuration au niveau des entailles. Il est donc cohérent de largement dépasser la résistance des poutres entaillées pour pouvoir observer des propagations de fissure et la ruine des poutres dans les temps impartis.

Par ailleurs, la durée d'un essai de ce type est incertaine (Pambou Nziengui, 2019), il a donc été décidé de réaliser un fluage "multi-paliers" : la masse est incrémentée de 14 à 32 kg par mois, puis chaque jour au bout de cinq mois pour terminer la vague. Un chargement de ce type permet de contrôler la durée de l'essai, qui dans ce cas ne peut dépasser six mois. Compte tenu de la configuration du banc d'essai, les poutres centrales ne pouvaient pas être surchargées tant que les deux autres n'avaient pas cassées, figure 5.9.

Enfin, il est arrivé que des poutres soient légèrement vrillées lors du chargement, figure 5.10. Cette situation provoque de la flexion déviée et potentiellement de la torsion mais elles ont été chargées telles quelles. Lors du chargement d'une poutre vrillée, le moment de flexion sort des plans principaux d'inertie et se projette en un moment M_z et un moment M_y (conformément

à la figure 5.2). En conséquence, la flèche totale se projette en une flèche verticale et une flèche horizontale. La flèche verticale mesurée est plus grande que celle d'une poutre qui n'est pas vrillée, puisque le moment quadratique effectif est diminué, biaisant légèrement l'analyse. Ainsi pour un angle de 10° , c'est jusque 20% d'augmentation de flèche centrale (voir annexe E)! De même, si la poutre est vrillée la résultante du chargement n'est plus appliquée au centre de cisaillement et crée un moment M_x , c'est-à-dire une torsion. En figure 5.10(b) la situation est schématisée : la force F n'est pas dans le repère principal d'inertie (z, y) et se situe à une distance notée d du centre de cisaillement, créant une torsion. Il est par ailleurs sans doute arrivé que des poutres sèchent en chargement et subissent une torsion au cours de l'essai.

Dispositifs de mesure

Les capteurs LVDT ont été utilisés pour les mesures de déplacements lors des essais de fluage, à l'exception de la poutre S18 équipée de capteurs LDT. Seulement dix capteurs LVDT étaient disponibles, donc sur deux poutres U_g , U_c et U_d ont été mesurées et sur quatre poutres seulement U_c . Les placements des capteurs sont représentés en figure 5.11. La référence de ces capteurs est une poutre IPE posée sur le bâti, observable en figure 5.8(a). Les impacts des dilatations thermiques du bâti sur les mesures de flèches sont négligées. De même, des plaques d'aluminium sont collées au bois de sorte que le palpeur de chaque capteur ne soit pas en contact direct avec le bois, figure 5.12(b).

Une station météorologique est placée à proximité des bancs d'essai et mesure l'humidité relative de l'air, la température de l'air et le rayonnement solaire (figure 5.12(a) et indiquée en 5.9). Des thermomètres sont également installés en haut et en bas des zones centrales de chaque poutre, figure 5.11 et 5.12(b).

La méthode de suivi de marqueur développée en partie B est utilisée pour mesurer les ouvertures, longueurs et hauteurs de fissures O_F , L_F et H_F , respectivement ; et les retraits de hauteur RG . Les paramètres de fissures sont mesurés aux quatre coins d'entaille : deux côtés et deux faces ; les retraits sont mesurés en six points : la zone "gauche", centrale et "droite" de chaque face. Les mesures de retrait-gonflement utilisent la "mire fenêtre" (figure 5.13(b)) et les mesures des paramètres de fissuration la "mire fer à cheval". De même, une "fente amovible" en acier est utilisée pour placer un marqueur magnétique sur la pointe de fissure, figure 5.13(a). La distance horizontale et verticale entre ce marqueur et le coin de l'entaille donne L_F et H_F , respectivement. Le coin de l'entaille est repéré par les deux marqueurs utilisés pour mesurer O_F .

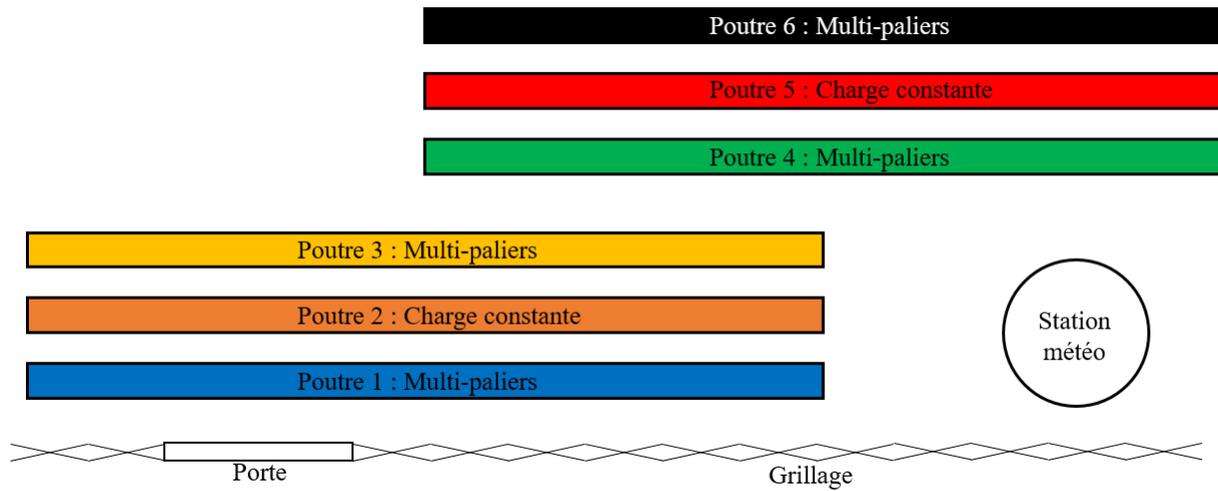


FIGURE 5.9 – Illustration de la configuration des deux bancs d’essai. Ces couleurs sont utilisées pour illustrer les résultats.

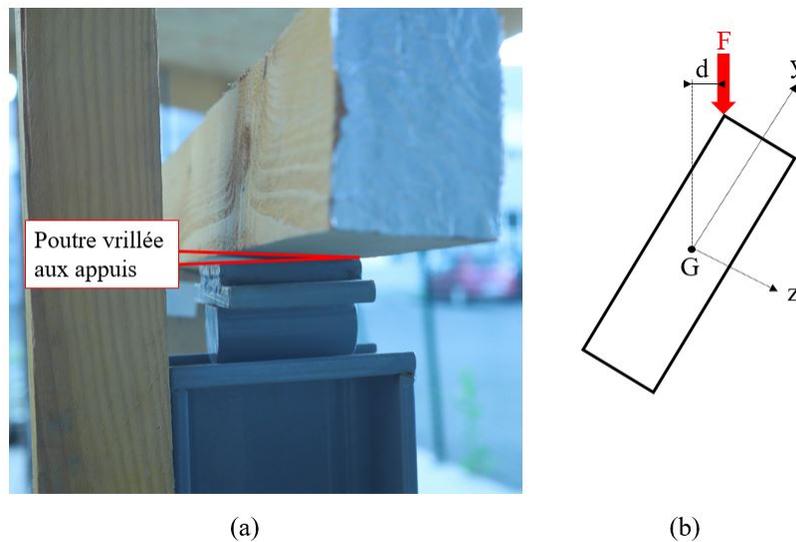


FIGURE 5.10 – Illustration du problème des poutres vrillées en chargement : (a) photo d’installation d’une poutre vrillée sur le banc d’essais de fluage, (b) schéma de la flexion déviée, flexion torsion. Le point G représente le centre de cisaillement (ici équivalent au centre de gravité).

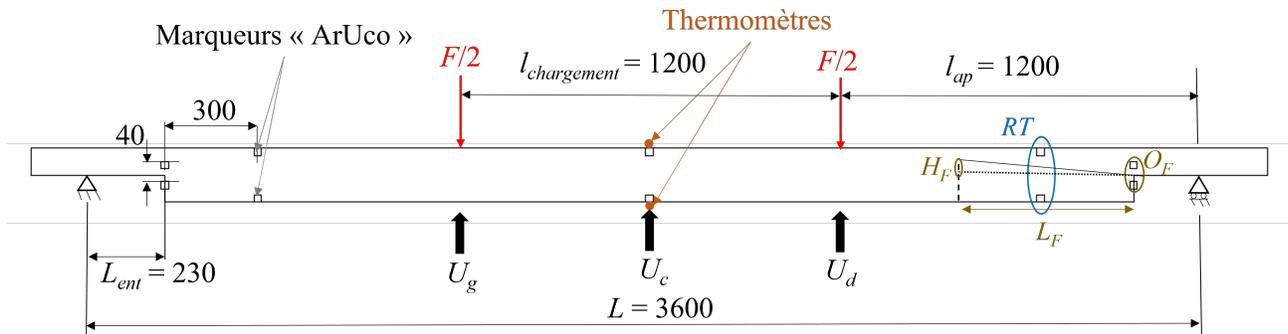
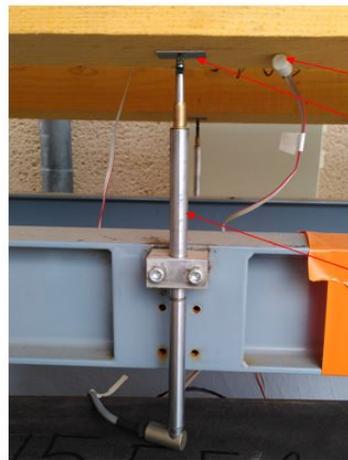


FIGURE 5.11 – Positionnement des dispositifs de mesure des essais de fluage.



(a)



(b)

FIGURE 5.12 – Photos de : (a) la station météorologique, (b) un capteur LVDT pour mesure de la flèche centrale U_c .

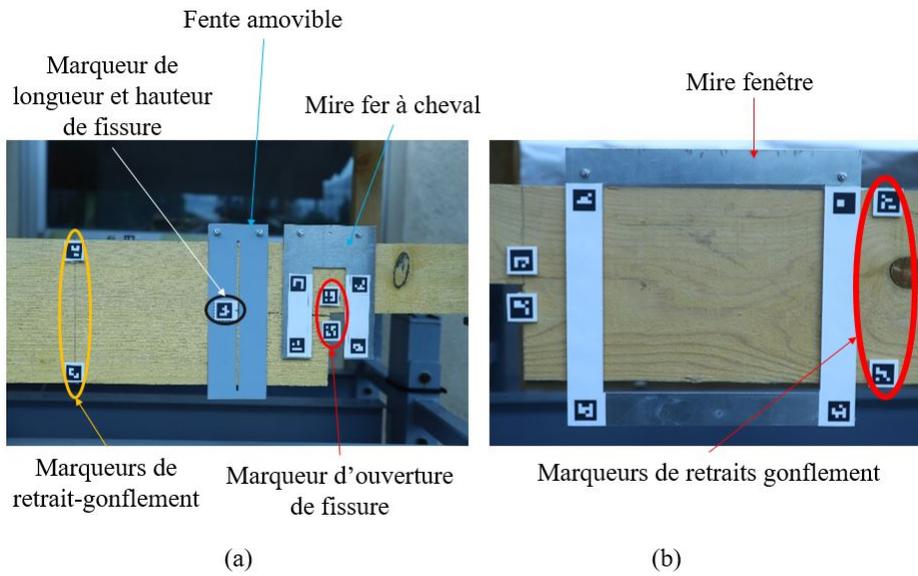


FIGURE 5.13 – Dispositifs de mesure de : (a) paramètres de fissuration et des variations de hauteur par la méthode de suivi de marqueurs, (b) variations de module par des masses de décharge-recharge.

TABLEAU 5.1 – Récapitulatif des conditions des essais de fluage.

		N° de poutre	Étendue de mesure	Masse initiale [kg]
Première vague : Printemps-été 2021	Triplet 1	S03	$U_g, U_c, U_d : 50 \text{ mm}$	347
		S04	$U_c : 50 \text{ mm}$	347
		S07	$U_c : 50 \text{ mm}$	347
	Triplet 2	S14	$U_g, U_d : 10 \text{ mm} ; U_c : 50 \text{ mm}$	347
		S12 S21	$U_c : 50 \text{ mm}$ $U_c : 50 \text{ mm}$	346 349
Deuxième vague : Automne-hiver 2021-2022	Triplet 3	S05	$U_g, U_d : 10 \text{ mm} ; U_c : 50 \text{ mm}$	346
		S06	$U_c : 50 \text{ mm}$	346
		S09	$U_c : 50 \text{ mm}$	347
	Triplet 4	S28	$U_g, U_c, U_d : 50 \text{ mm}$	376
		S25 S26	$U_c : 50 \text{ mm}$ $U_c : 50 \text{ mm}$	388 349
Troisième vague : Printemps-été 2022	Triplet 5	S29	$U_c : 50 \text{ mm}$	342
		S24	$U_c : 50 \text{ mm}$	342
		S18	$U_g, U_d : 25 \text{ mm} ; U_c : 50 \text{ mm}$	343
	Triplet 6	S19	$U_g, U_d : 10 \text{ mm} ; U_c : 50 \text{ mm}$	371
		S22 S23	$U_c : 50 \text{ mm}$ $U_c : 50 \text{ mm}$	373 370

Conclusion sur la flexion 4-points et les conditions des essais réalisés

Ce chapitre a d'abord posé le cadre théorique dans lequel s'inscrit cette campagne expérimentale. Les hypothèses et les équations utilisées pour l'analyse des essais ont été présentés, notamment les équations (5.3), (5.4), (5.5), (5.8) et (5.11) qui décrivent les états de contrainte et déformation de l'objet, et qui lie la flèche centrale au module élastique d'une poutre entaillée. Le comportement différé du bois en environnement variable implique un effet de couplage complexe appelé effet mécano-sorptif dont les grandes lignes théoriques ont également été présentées. Le dimensionnement selon l'Eurocode 5 des poutres entaillées de cette étude a été montré et indique qu'un chargement au delà de 150 kg ne respecterait pas les normes pour une utilisation en structure type bâtiment agricole. Enfin, les conditions des essais principaux de cette campagne ont été détaillés : essais de flexion en déplacement imposé et essais de fluage en extérieur abrité. Des capteurs de déplacement permettant de mesurer des flèches, la méthode de suivi de marqueurs mesurant les paramètres de fissures et les retraits-gonflements, la station météorologique ainsi que des thermomètres qui mesurent les température et humidité relative de l'environnement autour du banc d'essai ont été décrits. La fiabilité et la précision de ces outils de mesure ont été détaillés en partie B.

Le prochain chapitre présente les résultats mécaniques des essais, mettant de côté la rupture qui sera analysée dans le chapitre 7.

Chapitre 6

Réponse mécanique

6.1 Comportement instantané

6.1.1 Comparaison avec les résultats des essais non destructifs

Les essais en déplacement imposé n'ont jamais duré plus de cinq minutes sauf pour les poutres S06, S13 et S20 (tableau 6.3). Pour ces poutres, le chargement a du être interrompu afin de protéger les capteurs LDT ou de prendre des photos au cours de l'essai. Pendant ce temps le déplacement était imposé à une valeur fixe et la poutre se relaxait, figure 6.1(b). En figure 6.2 sont présentées les courbes force-déplacement et contrainte-déformation de l'ensemble des poutres chargées en déplacement imposé, à $y = H/2$ dans la zone centrale. Le calcul de σ_x est réalisé par l'équation (5.3) et celui de ϵ_x par l'équation (5.4).

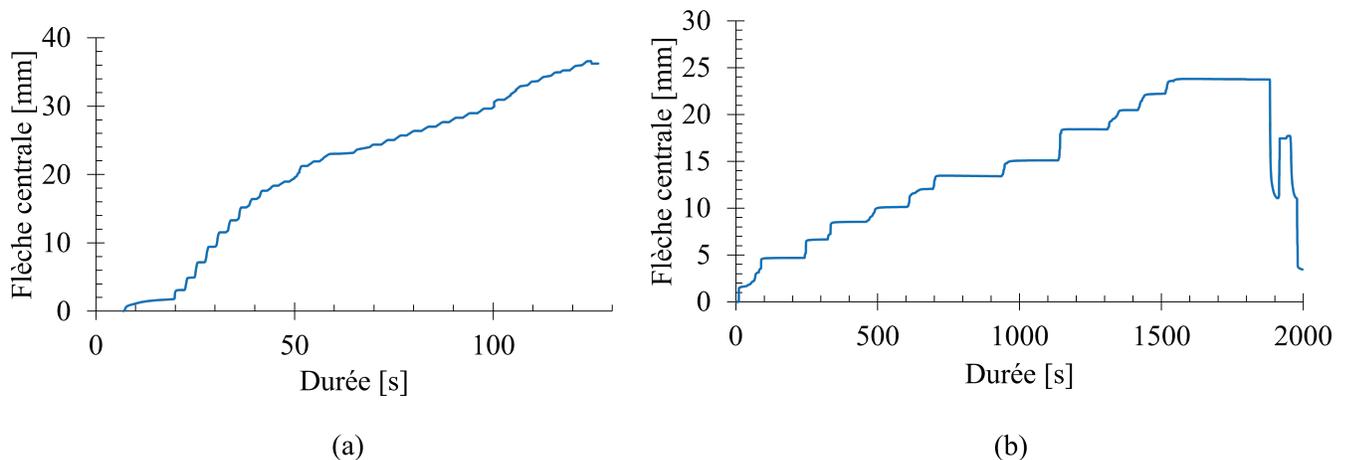


FIGURE 6.1 – Courbes de déplacement en fonction du temps : (a) pour la poutre S06 et (b) pour la poutre S20 avec des arrêts pour prendre des photos et protéger les capteurs LDT.

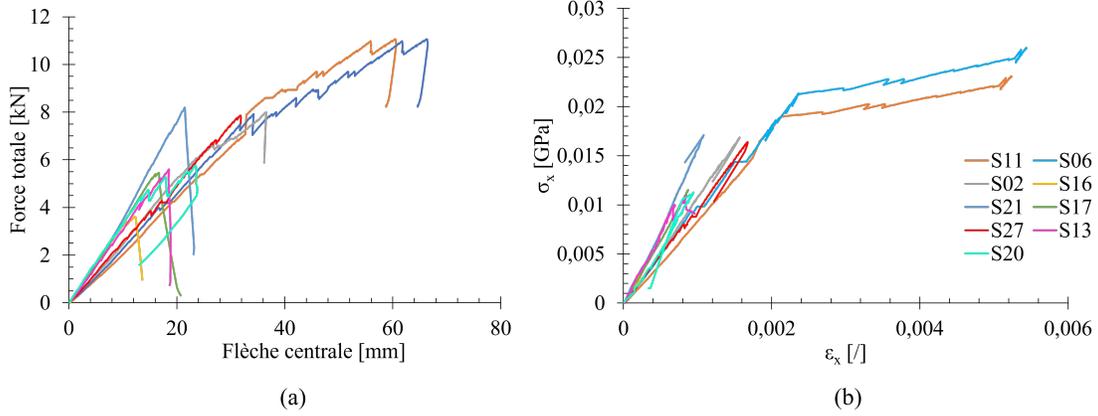


FIGURE 6.2 – Résultats des essais de flexion en déplacement imposé : (a) courbes force-déplacement, (b) courbes contrainte-déformation.

Les parties finales des courbes contrainte-déformation sont tronquées pour n’avoir que la partie linéaire. La pente de cette zone linéaire, avant la première propagation de fissure, donne le module élastique local dans la zone centrale d’une poutre E . Puis, à partir de la formule développée par Pambou Nziengui (2019) (équation (5.8)), le rapport (E/G) est calculé.

Les flèches centrales "instantanées" des poutres chargées en fluage sont calculées de la façon suivante :

1. détermination de la durée d’application du chargement Δt ainsi que la demi-durée notée $t_0 = \Delta t/2$, figure 6.3(a),
2. tracé de la flèche centrale U_c en fonction de $\log(t - t_0)$, figure 6.3(b)¹,
3. sélection d’une zone de $10 \times \Delta t$ à $10 \times \Delta t + 1$ heure. Cette zone est linéaire ou parabolique,
4. application d’une régression linéaire ou polynomiale d’ordre 2 dans cette zone, l’équation de la droite permet de calculer la flèche à l’instant désiré, figure 6.3(c).

Par cette procédure, la flèche centrale à dix minutes est calculée et considérée comme étant la flèche instantanée, U_c^{10min} . En considérant que $(E/G) = (E/G)^d$, cette valeur de flèche permet de calculer E via l’équation (5.8).

Les résultats présentés dans les tableaux 6.1 et 6.2 permettent de comparer les essais dynamiques avec les résultats des réponses instantanées. À partir de ces résultats sont tracés E en fonction de E^d pour les essais de fluage et pour les essais en déplacement imposé, figure 6.4. Les régressions sont forcées à 0 et donc le coefficient de détermination R^2 n’est pas calculé. À la place, la moyenne quadratique de l’erreur entre la régression et les valeurs obtenues est présentée, elle est appelée RMS (pour *Root Mean Square*).

1. Par abus de langage, il est indiqué sur le graphique la seconde comme unité du logarithme, c’est en réalité le temps qui est en seconde. Par exemple lorsqu’il est noté $\log(t - t_0) = 2,45$ s c’est en réalité $(t - t_0) = 10^{2,45}$ s

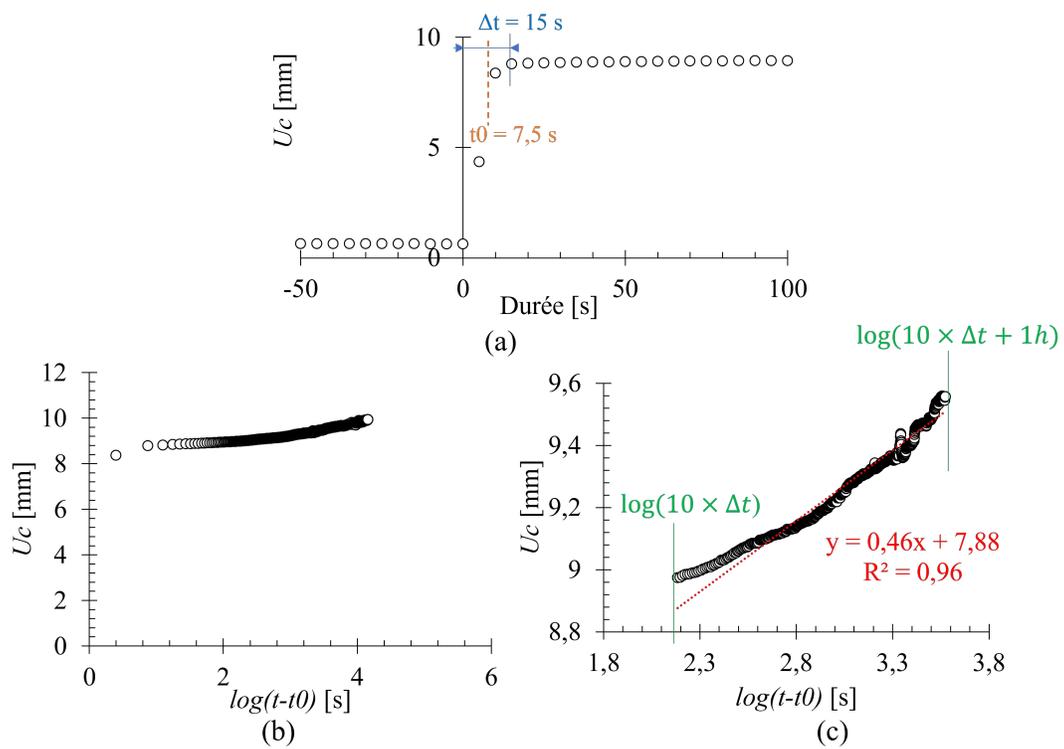


FIGURE 6.3 – Détermination de la flèche à dix minutes : (a) flèche centrale en fonction de la durée au début de l’essai et illustration de Δt et t_0 , (b) flèche centrale en fonction de $\log(t - t_0)$; (c) régression polynomiale d’ordre 2 sur la zone d’intérêt.

Sachant que E^d a été mesuré sur les poutres à l'état vert, E "vert" est calculé pour les rendre comparables. Pour cela E est diminué de 0,15 GPa/% (Guitard, 1987) entre TE lors du chargement et l'état vert supposé à 30% :

$$\Delta E_{1\%} = 0,015 \cdot E_{12\%} \quad (6.1)$$

où $E_{12\%}$ est supposé égal à 10 GPa par volonté de simplification. Par ailleurs, l'écart relatif entre E^d et E est calculé par :

$$Ecart\ relatif = \frac{E^d - E}{E^d} \times 100 \quad (6.2)$$

L'écart relatif entre $(E/G)^d$ et (E/G) est calculé de façon analogue. La courbe contrainte-déformation des essais de fluage ne pouvant être tracée, (E/G) n'est calculé que pour les essais de flexion en déplacement imposé.

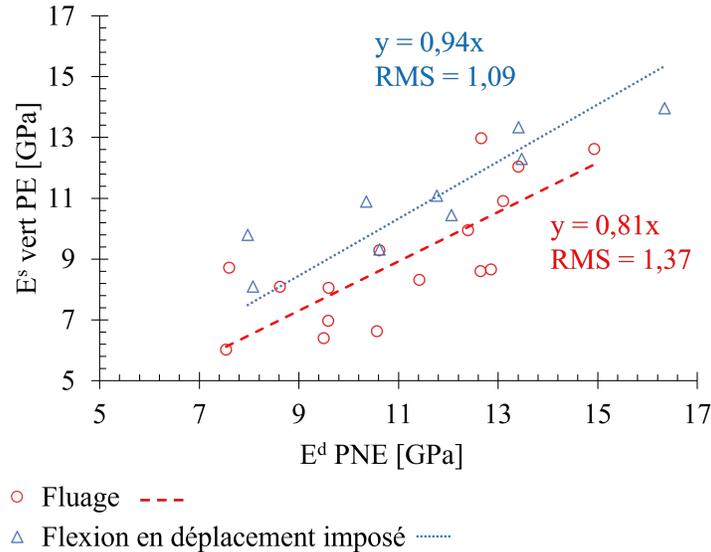


FIGURE 6.4 – Module calculé à partir des réponses instantanées sur PE (E^s) en fonction du module mesuré par les essais de flexion dynamique sur PNE (E^d).

TABLEAU 6.1 – Résultats des modules élastiques issus des réponses instantanées, des modules élastiques à l'état vert corrigés par l'équation (6.1) et écart relatif avec les mesures des essais dynamiques.

Type de test	Poutre	TE [%]	E^d [GPa]	E [GPa]	E "vert" [GPa]	Écart relatif [%]
Essais en déplacement imposé	S27	56,6	7,97	9,8	9,8	-23
	S11	54,6	8,08	8,1	8,1	-0,2
	S16	46,2	16,34	13,96	13,96	14,6
	S02	36,3	10,35	10,89	10,89	-5,2
	S17	25	13,47	13,05	12,3	8,7
	S06	20,7	10,62	10,71	9,32	12,3
	S20	19	12,06	12,1	10,45	13,3
	S13	16,6	11,77	13,1	11,09	5,8
	S21	15,9	13,41	15,46	13,34	0,5
Essais de fluage	S03	21,6	10,57	7,34	6,62	30,6
	S04	27,1	12,25	/	/	/
	S07	49,5	9,83	/	/	/
	S14	31,8	13,1	10,9	10,9	16,8
	S12	34,1	14,93	12,62	12,62	15,5
	S21	36,4	13,41	12,04	12,04	10,3
	S05	19,5	9,5	7,96	6,39	32,8
	S06	31,8	10,62	9,28	9,28	12,6
	S09	26,5	9,59	7,48	6,96	27,4
	S28	20	11,42	9,81	8,31	27,3
	S25	14,4	12,4	12,29	9,95	19,8
	S26	28	9,6	8,35	8,05	16,1
	S29	60,3	8,62	8,08	8,08	6,22
	S24	23,5	7,6	9,68	8,71	-14,5
	S18	61	7,54	6,02	6,02	20,1
S19	47,1	12,65	8,6	8,6	32,1	
S22	31,9	12,66	12,97	12,97	-2,5	
S23	16,6	12,86	10,66	8,65	32,7	

TABLEAU 6.2 – Résultats des rapports $(E/G)^s$ issus de l'équation (5.8) et comparaison avec les mesures des essais dynamiques.

n° poutre	$(E/G)^d$ [/]	(E/G) [/]	Ecart relatif [%]
S27	17,66	10,06	43
S11	14,16	40,74	-188
S16	30,55	29,96	2
S02	18,04	37,52	-108
S17	26,89	20,11	25
S06	19,81	-38,69	295
S20	21,07	69,52	-230
S13	19,39	98,36	-407
S21	26,39	303,86	-1050

Les écarts relatifs entre E^d et E varient de -23 à 32,8%. Ils semblent plus élevés pour les réponses des essais de fluage. Le premier élément qui peut expliquer ces variations est que les poutres étaient non entaillées pour la mesure de E^d et entaillées pour la mesure de E . Le module élastique est une propriété physique intensive, mais celui qui est mesuré avec le BING est un module global avec effet du cisaillement, moyenné sur toute la poutre. Changer la géométrie peut affecter sa valeur moyenne pour un matériau hétérogène. Par ailleurs E est une mesure locale du module dans la zone centrale, également différente de E^d global pour un matériau hétérogène. Pambou Nziengui et al. (2019) ont effectué des essais de flexion 4-points sur PNE puis sur PE et ont observé un module sur PNE systématiquement supérieur de 19% au module sur PE. Ici, la régression proposée pour les réponses instantanées des essais de fluage donne également un module élastique sur PNE supérieur de 19% à celui sur PE (figure 6.4). Ensuite, il y a une différence intrinsèque entre le module dynamique et le module statique. Chiffrer cette différence est délicat, mais Brancheriau (2013) constate que E^d a tendance à être 4% supérieur à E . Enfin, les poutres ayant atteint les plus grands écarts relatifs sont celles qui ont été réhumidifiées (S27 et S16), or un bois réhumidifié n'est pas un bois vert. Les E^d ont bien été obtenus sur du bois vert mais les E ont été obtenus sur des bois réhumidifiés ou corrigés par l'équation (6.1). Les poutres qui ont été réhumidifiées ne sont en réalité pas revenues à leur état initial. Ainsi, si des fentes sont apparues au premier séchage elles ne se sont pas recollées lors de la réhumidification.

Les écarts relatifs entre $(E/G)^d$ et (E/G) sont nettement plus élevés : de -1050 à 295%. Ce sont les valeurs calculées à partir des essais statiques qui sont aberrantes, par exemple avec une valeur négative pour S06. Le rapport (E/G) est sensé se situer entre 7 et 30 (Thibaut et Gril, 2021), et c'est rarement le cas pour les (E/G) déterminés ici. Le calcul de ce paramètre à partir de l'équation (5.8) est sensible et une petite erreur de mesure ou de lecture de E modifie drastiquement le résultat. Par la suite, ce ne sont donc que les valeurs de $(E/G)^d$ qui sont interprétées.

6.1.2 Rôles des paramètres mécaniques dans la résistance instantanée

Sur la figure 6.2(a), un comportement fragile ou quasi-fragile est observé sur l'ensemble des poutres. C'est conforme à ce qui est attendu pour du bois (Phan, 2016). Le tableau 6.3 présente les résultats de forces et contraintes maximales atteintes pour les essais en déplacement imposés, en même temps que ρ_{ID} et E_S^d utilisés comme paramètres d'homogénéité mécanique en partie B. Certaines poutres atteignent une résistance supérieure à 11 kN (S11, S06) et une autre seulement 3,6 kN (S16). Pour un même lot de poutres, c'est une différence considérable. En figure 6.5(a) est représentée la force F_{max} atteinte en fonction de l'infradensité ρ_{ID} . Il peut être observé qu'une grande infradensité n'est pas associée à une forte force F_{max} . C'est même une tendance inverse qui est observée, contrairement à ce qui était prévu. En effet, on aurait pu penser que l'infradensité augmente la résistance d'une poutre en augmentant l'énergie nécessaire à la propagation de fissure. Si le bois est plus dense, plus d'énergie élastique est nécessaire pour séparer la matière. Ces résultats suggèrent que la mécanique de la rupture ne dépend pas que des propriétés mécaniques, d'autres éléments sont à prendre en compte, tel que la structure anatomique. D'ailleurs, Pambou Nziengui et al. (2019) avaient également observé qu'il n'y avait pas de corrélation entre la résistance et les caractéristiques mécaniques initiales. Dans le matériau bois, une grande infradensité implique généralement une grande rigidité (Trouy et Triboulot, 2019) et donc implicitement un fil droit et peu de noeuds. Ces deux caractéristiques sont appréciées par les charpentiers mais dans le cas d'une poutre entaillée, ceci peut être une porte ouverte à la propagation des fissures. Les noeuds ou déviation de fil sont des éléments pouvant freiner la propagation d'une fissure en l'obligeant à dévier de sa trajectoire. Par ce raisonnement, une poutre pleine de noeuds pourrait s'avérer peu rigide mais particulièrement résistante lors d'un chargement impliquant des propagations de fissures.

TABLEAU 6.3 – Résultats des forces et contraintes maximales atteintes

n° poutre	TE [%]	ρ_{ID} [/]	E_S^d [GPa]	F_{max} [kN]	σ_{max} [MPa]	Durée [s]
S27	56,6	0,35	23,06	7,857	14,84	97
S11	54,6	0,37	21,87	11,06	20,87	266
S16	46,2	0,4	40,84	3,616	6,84	124
S02	36,3	0,39	26,39	7,998	15,25	120
S17	25	0,4	33,68	5,459	10,42	90
S06	20,7	0,35	30,51	11,06	23,52	705
S20	19	0,41	29,36	5,76	10,93	1997
S13	16,6	0,42	28,13	5,6	11,3	1718
S21	15,9	0,39	34,38	8,192	16,35	87

La TE ne semble pas jouer un rôle sur F_{max} , figure 6.5(b). Ce résultat est moins surprenant étant donné la nature des essais car la rupture est atteinte en moins de trente minutes. Très peu de transferts hydriques est impliqué et la TE n'a qu'un rôle sur les dimensions et la rigidité initiale de l'essai.

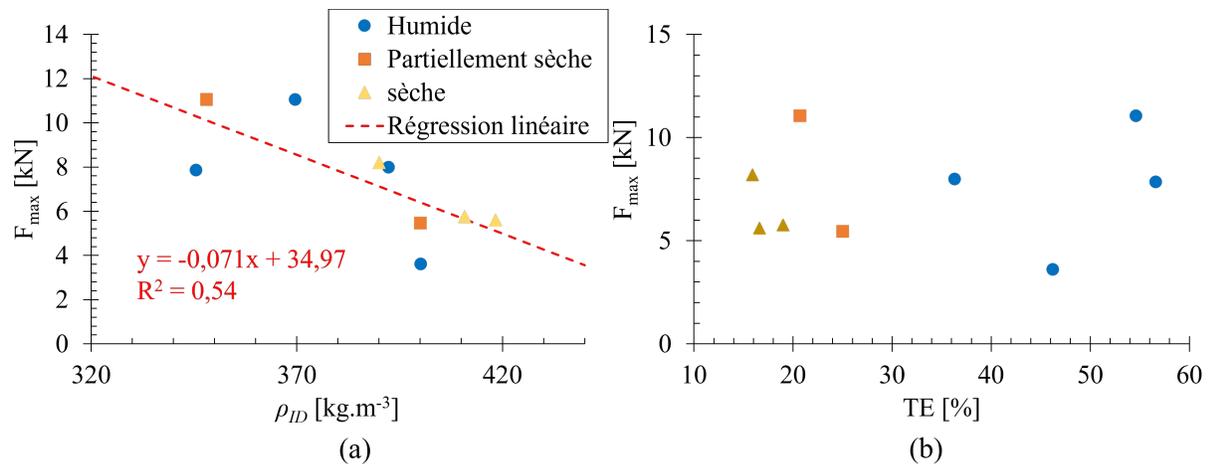


FIGURE 6.5 – Force maximale atteinte F_{max} en fonction de (a) l’infradensité ρ_{ID} , (b) la teneur en eau TE mesurée au moment de l’essai. La couleur des points indique également le groupe de TE.

Il semble alors qu’un taux de charge pour les essais de fluage doit prendre en compte les caractéristiques anatomiques avant même de considérer les propriétés mécaniques. Et encore, ce taux de charge ne sera valable que pour le chargement initial, mais dès lors que le temps intervient dans l’essai, le séchage et donc la TE initiale auront également un rôle sur l’évolution du taux de charge.

Lors du chargement des essais de fluage, deux poutres de la vague 1, S04 et S07, ont cassé instantanément. Pour ces deux poutres, le chargement appliqué était de 3,41 kN et elles ont rompu avant d’atteindre le chargement complet, donc $F_{max} \leq 3,4$ kN. S04 était rigide ($E^d = 12,3$ GPa) et dense ($\rho_{ID} = 0,4$) et S07 moyennement rigide ($E^d = 9,8$ GPa) et peu dense ($\rho_{ID} = 0,34$). Ce résultat supporte l’idée que F_{max} , pour une poutre en dimensions d’emploi, ne dépend pas que des propriétés mécaniques supposées.

6.2 Réponse différée

En fluage multi-paliers, le temps intervient dans le critère de ruine. La flèche centrale maximale atteinte, représentative du chargement appliqué et du temps écoulé, est ainsi plus intéressante pour analyser la résistance d’une poutre. En effet, comme le montre le tableau 6.4, la force maximale atteinte est 6,99 kN (S24), inférieure au 11 kN des essais en déplacement imposé. C’est bien la composante différée du fluage qui s’ajoute à la flèche instantanée, résultant en une force maximale atteinte inférieure.

TABLEAU 6.4 – Résultats finaux des essais de fluage.

		N° de poutre	Durée de chargement [jours]	Force maximale atteinte [kN]
Première vague : Printemps-été 2021	Triplet 1	S03	141	4,41
		S04	0	< 3,44
		S07	0	< 3,44
	Triplet 2	S14	148	5,06
		S12	158	5,23
		S21	175	6,11
Deuxième vague : Automne-hiver 2021-2022	Triplet 3	S05	150	5,5
		S06	150	5,51
		S09	4	3,44
	Triplet 4	S28	134	4,87
		S25	150	4,54
		S26	176	3,74
Troisième vague : Printemps-été 2022	Triplet 5	S29	73	3,66
		S24	197	6,99
		S18	10	3,35
	Triplet 6	S19	0,13	3,64
		S22	191	6,32
		S23	21	3,63

6.2.1 Évolution de flèche relative et teneur en eau

Étant donné que les poutres sont entaillées, les retraits en hauteur affectent directement la mesure de flèche. Les mesures sont donc corrigées par :

$$U_{c,corrigee}(t) = U_{c,mesuree}(t) - 0,5 \times RG(t) \quad (6.3)$$

où $U_{c,mesuree}$ est la mesure de flèche centrale, RG est la mesure de variation de hauteur par la méthode de suivi de marqueurs (négative en cas de retrait et positive en cas de gonflement), interpolée linéairement entre chaque mesure périodique sur marqueurs. Ensuite, la flèche instantanée U_c^{10min} n'est provoquée que par le chargement initial appliqué, c'est-à-dire la masse du bloc béton avant le premier incrément de charge, alors que la flèche différée est également provoquée par le poids propre de la poutre et les incréments de charge, un paramètre q est alors défini tel que :

$$q(t) = \frac{m_{initiale}}{m_{initiale} + m_{increment}(t) + m_{poutre}} \quad (6.4)$$

où $m_{initiale}$ fait référence aux masses initiales du tableau 5.1. Les variations de masse de la poutre lors du séchage sont négligées devant les incréments de charge. Une flèche relative peut finalement être définie par :

$$U_{c,rel}(t) = q(t) \frac{U_{c,corrigee}(t) - U_c^{10min}}{U_c^{10min}} \quad (6.5)$$

La flèche relative est indépendante du module élastique E puisque celui-ci s'élimine dans le rapport de flèche différée sur flèche instantanée, et indépendante des incréments de charge qui sont compensés par le facteur q . En réalité, avec l'approche de l'Eurocode 5 qui considère $U_{c,corrigee} = U_c^{10min}(1 + K_{def})$, la flèche relative est équivalente au K_{def} . Les évolutions des $U_{c,rel}$ sont représentées en figure 6.6.

La couleur choisie pour chacune des courbes dépend de l'emplacement de la poutre dans le banc de fluage, figure 5.9. Les poutres S04 et S07 ont cassé instantanément (vague 1) et la poutre S19 au bout de deux heures (vague 3), elles ne sont donc pas sur la figure 6.6(a),(c). Par ailleurs, la poutre S09 (vague 2) a cassé au bout de quatre jours. Elle est donc presque invisible en figure 6.6(b). À l'inverse, les poutres S21 (vague 1) et S26 (vague 2) n'ont pas cassé au bout de six mois et ont été déchargées pour passer à la vague suivante.

Il peut être constaté qu'à 60 jours après chargement, les vagues 1 et 3 présentent déjà des poutres ayant une flèche relative supérieure à 1,6 et 2,2 respectivement, alors que pour la vague 2 elles sont toutes inférieures à 1. Les vagues 1 et 3 étant des vagues estivales le fluage a certainement été accéléré. Il peut également être observé que pour ces vagues estivales les positionnements des poutres 1, 3 et 4 sont ceux qui provoquent le plus de fluage. En l'occurrence ces trois positionnements sont ceux les plus exposées au rayonnement solaire, ce qui implique des chocs thermo-hydriques encore plus importants.

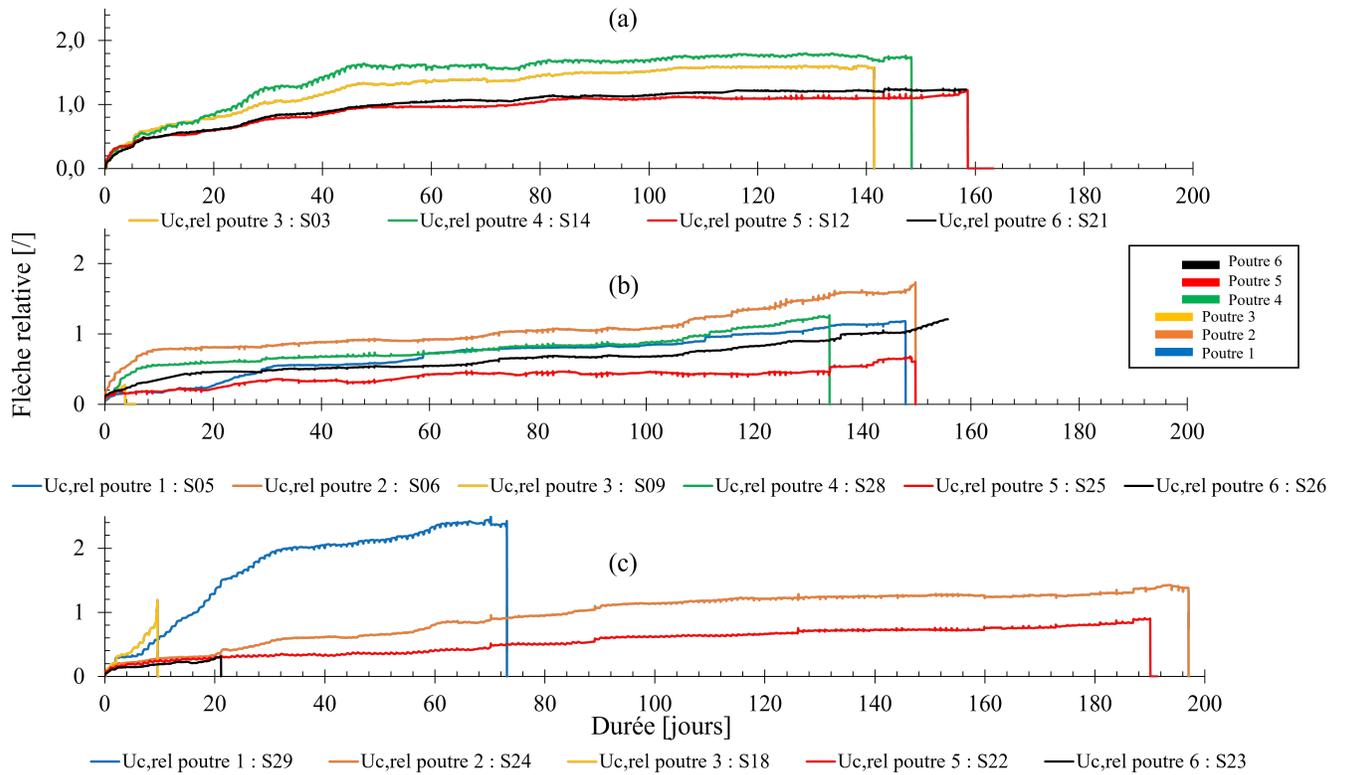


FIGURE 6.6 – Évolution de la flèche relative en fonction du temps : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3. Si la flèche redescend à 0 la poutre a rompu, sinon c'est que la poutre a été déchargée et l'essai arrêté (poutre 6 vague 1 et vague 2).

Au bout de six mois, $U_{c,rel}$ n'a jamais atteint 3 comme le suggère l'Eurocode 5 pour le K_{def} en classe de service 3 avec un bois initialement vert. C'est évidemment un facteur de surdimensionnement. En comparaison, les travaux de Pambou Nziengui (2019) sur les poutres de sapin pectiné chargées en fluage en extérieur montrent une flèche relative qui ne dépasse jamais 2 au bout de deux ans. En figure 6.6 les poutres S14 (vague 1) et S06 (vague 2) ont déjà atteint 1,7 en moins de six mois et la poutre S29 (vague 3) a dépassé 2 au bout de 34 jours. Au moins deux différences peuvent expliquer cet écart : (i) la réponse mécano-sorptive au chargement est non linéaire au dessus de 20% de la charge à rupture (Hearmon et Paton, 1964), or le poids appliqué sur les essais présentés ici est incrémental et dépasse celui qu'appliquait Pambou Nziengui (2019) ; (ii) les poutres de Pambou Nziengui (2019) ont été chargées sèches alors que S14, S06 ou S29 l'ont été au dessus du PSF. La TE initiale peut avoir augmenté le fluage. De même, les essais de fluage en classe de service 2 (bâtiment abrité) de Varnier (2019) sur du douglas et des feuillus chargés à environ 300 kg n'ont jamais montré de flèche relative supérieure à 1 pendant un an. En comparaison avec les résultats de cette étude en classe de service 3, la flèche relative est parfois deux fois plus grande.

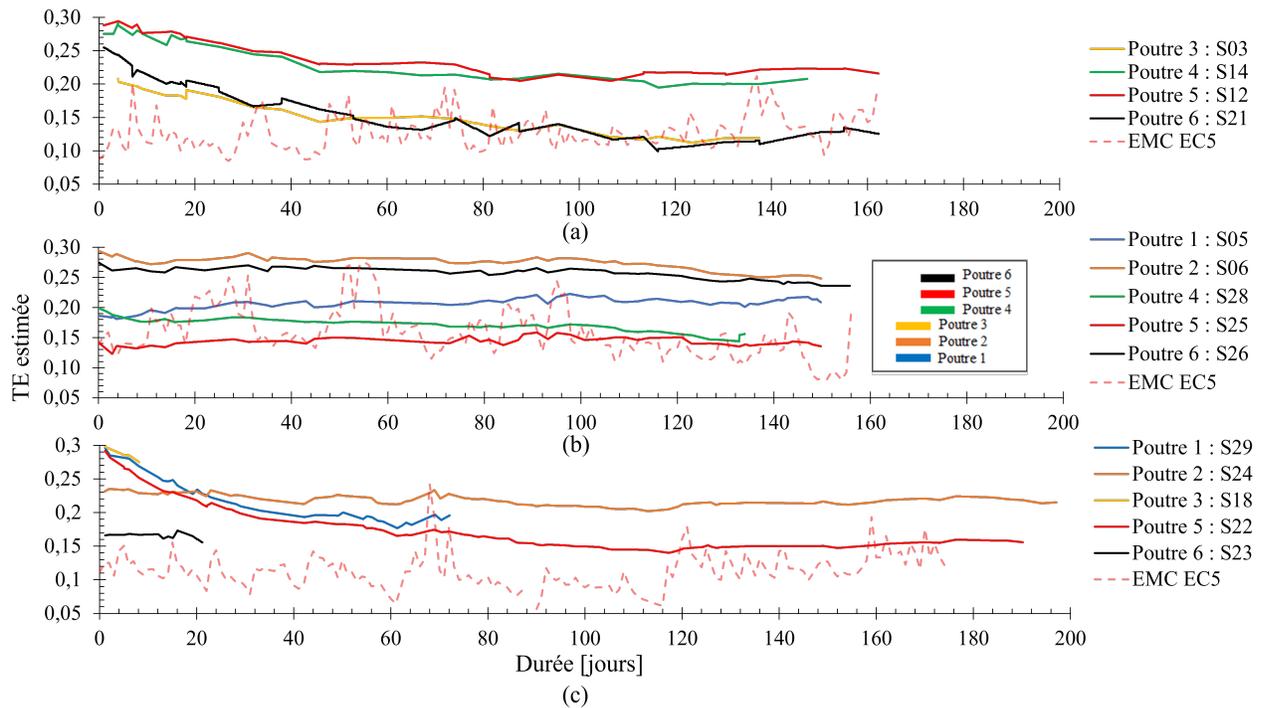


FIGURE 6.7 – Évolution des TE estimées et de la TEE calculée par l'abaque de l'annexe française de l'Eurocode 5 en fonction du temps : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3.

En figure 6.7 sont représentées les évolutions de TE estimées au cours des essais de fluage, pour les trois vagues.

La TE n'était pas mesurée mais elle a pu être estimée à partir des mesures de RG . Nguyen (2016) a rapporté des propriétés du sapin pectiné issues de la littérature, notamment les coefficients de retrait tangentiel et radial : $\alpha_t = 0,37$ et $\alpha_r = 0,19$ respectivement. En

considérant que pour un débit sur dosse le retrait en hauteur moyen est (2/3) tangentiel et (1/3) radial, sur faux quartier (1/2) tangentiel et (1/2) radial et à coeur (1/3) tangentiel et (2/3) radial, les coefficients de retrait en hauteur peuvent être estimés à :

- débit sur dosse : $\alpha_H = 0,325$;
- débit sur faux quartier : $\alpha_H = 0,28$;
- débit à coeur : $\alpha_H = 0,235$.

La TE peut alors être calculée par :

$$w(t) = w_{initiale} + \frac{RG(t)}{H_{initiale}\alpha_H} \quad (6.6)$$

où w représente la teneur en eau TE.

La teneur en eau d'équilibre imposée par l'environnement est également représentée en figure 6.7 sous le terme "TEE EC5". Cette TEE (pour Teneur en Eau d'Équilibre) est calculée par l'abaque de l'annexe française de l'Eurocode 5 (AFNOR, 2004), prenant comme paramètre d'entrée la température et l'humidité relative mesurées par la station météo.

Il peut être constaté que certaines poutres ne semblent pas atteindre un équilibre hygroscopique conforme à ce qu'impose l'environnement au bout de 160 jours : S14 et S12 (vague 1) ; S05, S06 et S26 (vague 2) ; S24 (vague 3). Le plus probable est que la masse anhydre et donc la TE estimée soit fausse. En effet, l'allure des courbes est cohérente mais semble décalée sur l'axe des ordonnées, comme si la TE initiale était fausse. La masse anhydre est estimée à partir de l'infradensité et du volume vert lors de la réception du lot de poutres. Or une poutre apparemment au dessus du PSF peut en réalité être sèche en périphérie et humide au centre, surtout s'il y a présence de poches d'eau. Dans ce cas, le volume n'est pas celui d'une poutre totalement saturée et la valeur du volume du bois vert est fausse.

6.2.2 Calcul de complaisance et trajectoires mécano-sorptives

L'équation (5.11) permet de calculer la complaisance J à chaque instant des essais de fluage à partir de $U_{c,corrigee}$. Cette équation prend également en compte l'entaille par la fonction $f(\beta_0)$ et les contraintes de cisaillement. En supposant qu'une propagation de fissure n'est autre qu'une prolongation de l'entaille, c'est à dire que la fissure reste rectiligne et à mi-hauteur, le facteur d'entaille β_0 devient un facteur de fissure β tel que :

$$\beta(L_F) = \frac{2(L_{ent} + L_F)}{L} \quad (6.7)$$

La fonction $f(\beta)$ peut alors être calculée à chaque instant, étant dépendante de la longueur de fissure L_F . L'évolution de L_F est supposée être par palier, donc aucune interpolation linéaire entre les points de mesure n'est effectuée. La valeur de L_F est considérée comme étant égale à la valeur précédente tant qu'aucune propagation n'est visible. Pour ces essais de fluage, c'est la longueur de fissure moyenne des quatre lieux où elle est mesurée (deux côtés et deux

faces) qui est calculée. Cette opération permet de calculer une complaisance relative qui, en théorie, élimine l'effet de la fissuration :

$$J_{rel}(L_F, t) = \frac{J(L_F, t) - J_{instantanee}}{J_{instantanee}} \quad (6.8)$$

où $J(L_F, t)$ est calculée par l'équation (5.11) et $J_{instantanee}$ est la complaisance issue de la flèche centrale instantanée U_c^{10min} . Le facteur q utilisé pour le calcul de la flèche relative n'est plus nécessaire puisque la complaisance est indépendante du chargement appliqué.

Les évolutions des complaisances relatives sont représentées en figure 6.8 pour les trois vagues d'essais de fluage. Ces évolutions sont représentées en fonction du logarithme (base 10) de la durée en heures. Le fluage étant un phénomène de migration progressive d'un état vers un autre, il est adapté de représenter cette évolution en fonction du logarithme du temps.

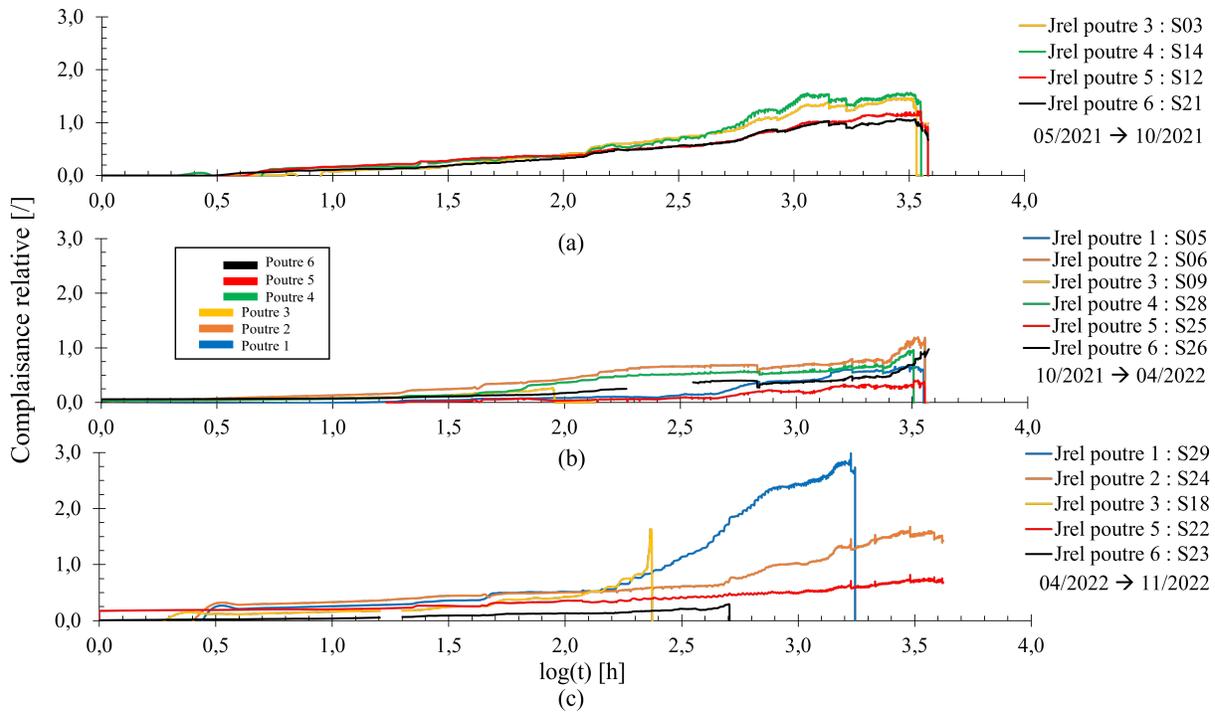


FIGURE 6.8 – Evolution des complaisances relatives en fonction du $\log(t)$: (a) vague 1, (b) vague 2 et (c) vague 3.

Certains incréments de charge sont observés sur la figure 6.8 par des micro-chutes de la complaisance relative. En effet, lors d'un incréments de charge, la composante différée s'écrase un peu plus devant la composante instantanée.

En dehors de ces anomalies, les complaisances relatives présentent toute une évolution en double pente, figure 6.9. Ce passage d'une pente à l'autre ne se fait pas toujours à la même durée : par exemple à $\log(t) = 2,65$ (soit dix-huit jours) pour S25 mais à $\log(t) = 1,45$ (soit trente heures) pour S03. Dans tous les cas, ce passage se fait avant l'ajout d'un incréments

de charge, qui n'en est donc pas la cause. En l'occurrence, ce sont les poutres exposées au soleil pendant une vague estivale qui semblent passer à la seconde pente plus rapidement. Cette formulation en double pente a déjà été décrite par Van der Put (1989), qui la définit comme étant une évolution naturelle du comportement différé d'un polymère thermoplastique. Hunt (2004) a identifié le passage d'une pente à l'autre aux alentours de vingt-quatre heures pour un fluage en environnement constant. C'est moins que ce qui est identifié ici malgré l'environnement variable.

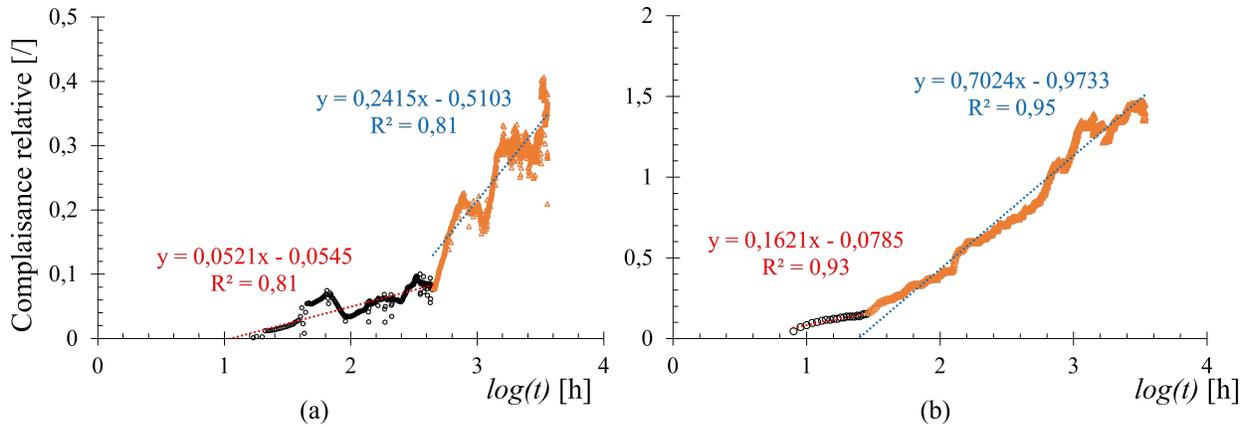


FIGURE 6.9 – Évolution du fluage relatif en double pente en fonction du logarithme de la durée : (a) S25 vague 2 changement de pente à $\log(t) = 2,65$, (b) S03 vague 1 changement de pente à $\log(t) = 1,45$.

À partir de la TE calculée par l'équation (6.6), il est possible de tracer la complaisance en fonction de la TE. Cette représentation correspond à une trajectoire mécano-sorptive (Hunt, 1984), figure 6.10. Les poutres S05 et S24 représentées sur ce graphique subissent respectivement une faible réhumidification et un faible séchage. Sur les poutres ayant perdues jusqu'à 15% de TE les différentes phases de séchage ou d'humification sont invisibles sur les trajectoires. Il est intéressant de constater que les mêmes phases listées par Hunt (1984) sont identifiables sur ces trajectoires : des désorptions (-), des adsorptions (+) et des adsorptions au delà du seuil précédent (++). Les phases (++) ont effectivement des pentes supérieures à celles des phases (+). Comme mentionné précédemment, les incréments de charges diminuent subitement la complaisance et expliquent les sauts entourés en rouge. La poutre S05 en figure 6.10(a) semble même atteindre un "seuil" mécano-sorptif indiquant un pseudo-fluage de pente négative, conforme à ce qu'observait Hunt (1986). Les trajectoires mécano-sorptives et les évolutions de fluage en double pente pour toutes les poutres chargées sont en annexe F.

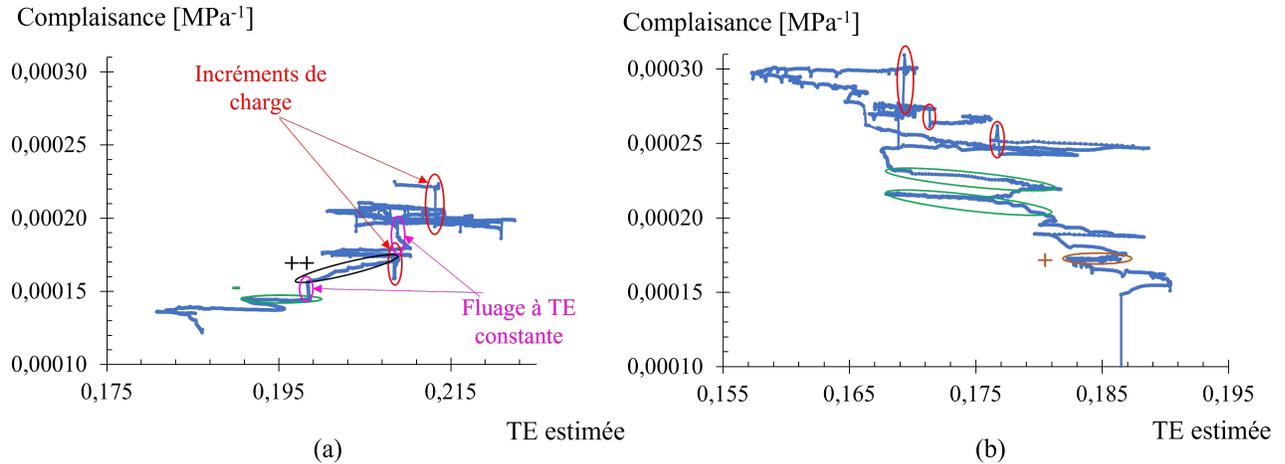


FIGURE 6.10 – Trajectoire mécano-sorptive de : (a) S05 vague 2, (b) S24 vague 3. Les incréments de charge sont indiqués en rouge, certaines désorptions (-) en vert, les adsorptions (+) en orange et adsorptions au dessus du seuil précédent (++) en noir.

Enfin, la figure 6.11 présente les complaisances relatives maximales atteintes en fonction de la TE initiale des essais. La complaisance relative maximale atteinte semble proportionnelle à la TE initiale bien qu'avec une mauvaise corrélation. Les poutres exposées au soleil sont encadrées en rouge. Parmi celles ayant atteint les complaisances relatives les plus élevées, la majorité étaient exposées au soleil et chargées pendant l'été. Ces observations justifient le choix de prendre un paramètre K_{def} plus élevé pour une classe de service 3, mais viennent nuancer l'importance de la TE initiale des poutres. En effet, en supposant que les TE initiales au dessus de 30% n'ont pas plus d'effet que celle égale à 30%, c'est à dire en plaçant tous les points au maximum à 30% sur l'axe des abscisses, la corrélation se détériore davantage. En effet, l'effet mécano-sorptif se manifeste principalement dans le domaine hygroscopique puisque des variations dimensionnelles sont nécessaires à son activation. À l'inverse les poutres exposées au soleil ont significativement plus de complaisance relative, figure 6.8 et 6.11.

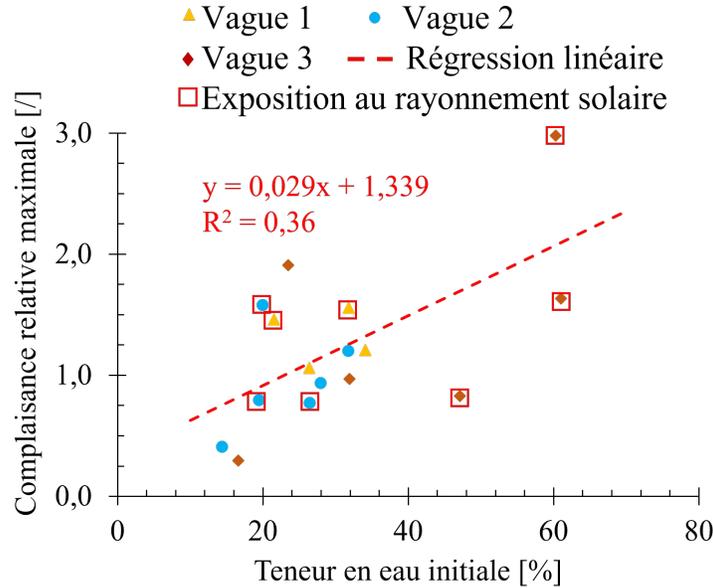


FIGURE 6.11 – Complaisance relative maximale atteinte en fonction de la TE initiale des poutres. Points encadrés en rouge : poutre exposée au rayonnement solaire.

Conclusions sur les réponses mécaniques des essais

Les modules élastiques E ont pu être calculés à partir des résultats instantanés des essais. La différence avec les modules dynamiques mesurés par la méthode BING E^d est conséquente mais explicable, principalement par le fait que les poutres sont entaillées pour les essais statiques. En revanche, les différences entre les rapports (E/G) mesurés en dynamique et en statique sont considérables, le calcul de ce rapport étant trop sensible aux variations de mesure.

Les résultats de résistance à la rupture ont présenté une grande hétérogénéité : de 3,6 à 11 kN. En l'occurrence la force maximale atteinte semble linéairement décroissante avec l'infradensité et indépendante de la TE de l'essai. La décroissance avec l'infradensité est surprenante mais peut s'expliquer par le fait que le bois est trop homogène et permet à la fissure de se propager aisément. Cette hypothèse va être vérifiée dans le chapitre suivant.

Les résultats des essais de fluage ont d'abord été illustrés avec l'évolution de la flèche relative, qui est équivalente au K_{def} . Cette flèche relative n'atteint jamais le $K_{def} = 3$ proposé par l'Eurocode 5 dans cette situation, suggérant que les normes de calcul imposent un surdimensionnement excessif pour les bois de haute teneur en eau.

L'évolution de la TE des poutres au cours des essais a pu être estimée grâce aux mesures de RG , en faisant des hypothèses sur le calcul du coefficient de retrait. Les valeurs ne sont donc qu'indicatives. Globalement, les TE estimées illustrent le séchage des poutres mais montrent que certaines valeurs de TE initiale sont fausses. Cela est probablement dû au fait que certaines poutres n'étaient pas à l'état vert à la réception, faussant la mesure du volume

vert.

Les complaisances relatives ont été calculées en s'affranchissant des propagations de fissure. Elles sont plus faibles sur la vague hivernale (vague 2) que sur les deux autres. Dans tous les cas, leur évolution suit une double évolution linéaire, dans laquelle le changement de pente est atteint entre trente heures et dix jours. Le rayonnement solaire semble accélérer et intensifier ce changement de pente.

Grâce aux estimations de TE, des trajectoires mécano-sorptives ont pu être tracées. Elles sont cohérentes par rapport à ce qui est observé dans la littérature et représentent bien un effet mécano-sorptif.

Enfin, les résultats suggèrent une tendance à l'augmentation du fluage pour un bois initialement vert. La comparaison avec les essais de Pambou Nziengui (2019) et les complaisances relatives maximales atteintes en fonction de la TE confirment que le bois vert a tendance à fluer plus rapidement que le bois sec, mais c'est à mettre en regard avec d'autres facteurs comme l'exposition au soleil et les potentielles erreurs sur l'estimation de la TE initiale.

Le prochain chapitre présente le comportement à la rupture des poutres entaillées.

Chapitre 7

Fissuration des poutres entaillées

7.1 Comportement théorique du bois à la rupture

7.1.1 Mécanique de la rupture du bois

Une fissure peut se propager selon trois modes distincts appelés modes de rupture, figure 7.1. Le mode I est le mode d'ouverture tandis que les deux autres sont des modes de cisaillement. La plupart du temps, une fissure est en réalité une mixité de ces modes, au moins de deux d'entre eux. De plus, le bois est un matériau orthotrope et six plans de propagation se dessinent, figure 7.2.

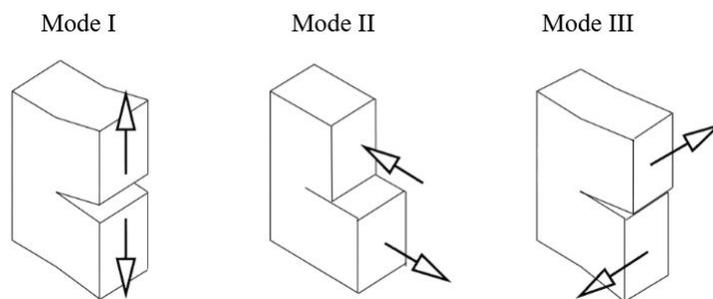


FIGURE 7.1 – Représentation des trois modes de rupture.

Les trois modes de rupture peuvent se manifester dans ces six plans. Le cas d'une PE en débit sur dosse soumise à de la flexion correspond à une fissure en mode mixte I et II dans le plan TL (tangentiellongitudinal). En effet, les travaux de Sorin et al. (2016); Sorin (2018) montrent que les PE en flexion sont soumises à du mode mixte, le mode II étant provoqué par l'effort tranchant.

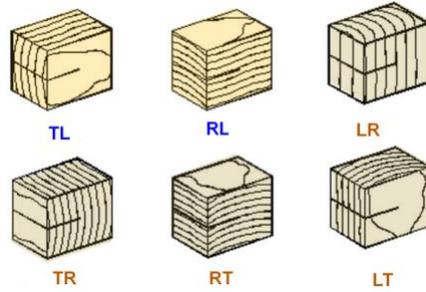


FIGURE 7.2 – Six plans principaux de propagation de fissure dans le bois (Phan, 2016).

Par ailleurs, la fissure se propage différemment selon que le matériau est fragile ou ductile. Un matériau fragile fissure brutalement, le faciès de rupture est net, le verre étant l'exemple typique. Un matériau ductile va plastifier et de grandes déformations s'opèrent avant la rupture, c'est par exemple le cas de l'acier. Cette propriété est fortement dépendante de la température : on parle de température de transition fragile-ductile quand un matériau cristallin passe de fragile à ductile au delà d'une certaine température.

Dans tous les cas, une propagation de fissure en un lieu donné est précédée du développement d'une zone d'élaboration, appelée *Fracture Process Zone* (FPZ). La FPZ est une zone d'endommagement irréversible du matériau. Sa taille est négligeable pour des matériaux fragiles, mais très grande pour des matériaux ductiles. C'est en réalité cette zone de plastification qui définit si un matériau est ductile ou fragile. Le bois est considéré comme étant un matériau quasi-fragile (Morel et al., 2005), c'est-à-dire que la taille de sa FPZ est non négligeable mais qu'il est globalement fragile. En effet, les résultats présentés dans la figure 6.2 suggèrent un comportement fragile, mais la littérature montre qu'il existe bien une zone d'élaboration en pointe de fissure (Phan, 2016; Sorin, 2018).

Un problème de mécanique de la rupture fragile se résout par les outils de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER). Pour un matériau quasi-fragile, c'est la MLER équivalente (MLEReq) qui est utilisée. La MLEReq utilise les mêmes outils que la MLER mais considère que la FPZ est équivalente à une propagation de fissure, figure 7.3. En effet de même qu'une propagation de fissure, le développement d'une FPZ augmente la complaisance d'un échantillon par l'endommagement et a un effet mécanique équivalent.

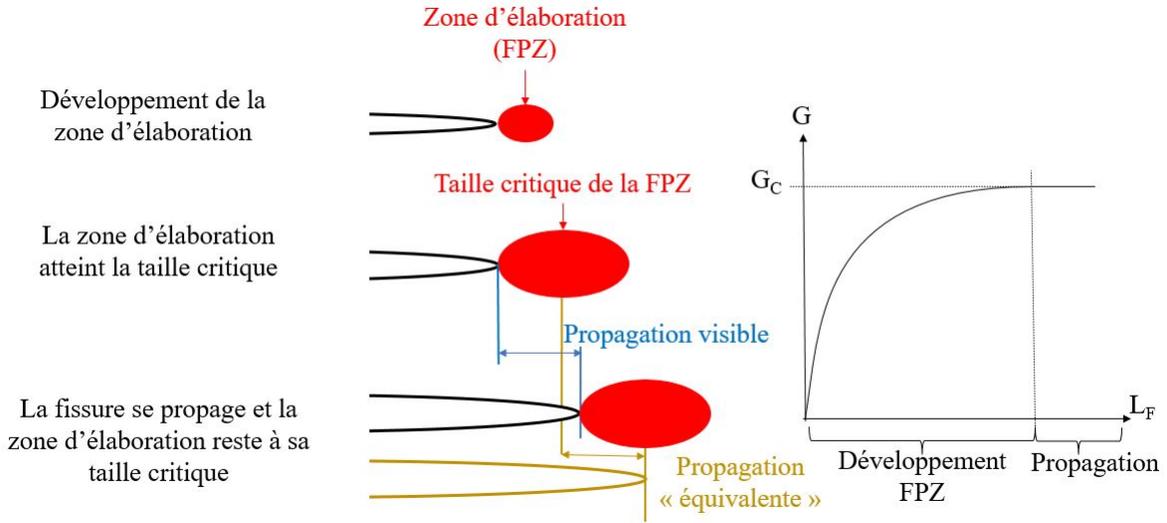


FIGURE 7.3 – Représentation du comportement d'un matériau quasi-fragile et équivalence avec un matériau fragile. G : taux de restitution d'énergie (indice c pour critique) ; L_F longueur de fissure.

Un problème de MLER se résout soit par une approche globale, en établissant le bilan énergétique d'une propagation de fissure (Griffith et Taylor, 1921), soit par une approche locale en analysant l'état mécanique aux alentours de la fissure. C'est l'approche globale qui est privilégiée dans ce travail. Cette approche a largement fait ses preuves sur les matériaux fragiles.

Le bilan énergétique d'une PE chargée en fluage qui subit une propagation de fissure de longueur ΔL_F s'écrit :

$$\Delta W_{ext} = \Delta W_{elas} + \Delta W_S + \Delta W_{visco} + \Delta E_c \quad (7.1)$$

où W_{ext} est le travail des efforts extérieurs, W_{elas} est l'énergie élastique emmagasinée, W_S est l'énergie dépensée pour agrandir la surface lors de la propagation de fissure, W_{visco} est l'énergie dissipée par les propriétés visqueuses du bois, E_c est l'énergie cinétique de la pointe de fissure, et où Δ indique la variation de ces grandeurs durant la propagation ΔL_F . Ils peuvent être écrits en taux de variation d'énergie : $G_w = \partial W_{ext} / \partial L_F$, $G_e = \partial W_{elas} / \partial L_F$, $G_S = \partial W_S / \partial L_F$, $G_{visco} = \partial W_{visco} / \partial L_F$. Ce qui donne l'équation :

$$G_w - G_e = G_{visco} + G_S + \frac{\Delta E_c}{\Delta L_F} \quad (7.2)$$

Le terme de gauche peut être interprété comme l'énergie qui alimente la propagation de fissure, alors que le terme de droite est l'énergie nécessaire à cette propagation (G_S représente l'énergie nécessaire à la création de deux surfaces et G_{visco} l'énergie dissipée). Soit $G_v = G_w - G_e$ et $G_C = G_{visco} + G_S$. La fissure se propage alors si $G_v \geq G_C$, où G_C est le taux de

restitution d'énergie critique :

$$\begin{cases} G_v < G_C & \text{fissure fixe} \\ G_v = G_C & \text{propagation de la fissure} \\ G_v > G_C & \text{propagation de la fissure et le surplus d'énergie est } \Delta E_c / \Delta L_F \end{cases} \quad (7.3)$$

G_C est donc la propriété physique qui caractérise une rupture fragile. Il s'apparente à la ténacité, bien que cette propriété soit plutôt adaptée à l'approche locale et aux facteurs d'intensité des contraintes. Dans le cas d'un matériau quasi-fragile, le critère de rupture est donné par une courbe de résistance qui est fonction de la longueur de fissure équivalente, appelé courbe-R, figure 7.3. La partie croissante de la courbe représente le développement de la FPZ et une fois le G_C atteint, la fissure se propage. Les courbes-R sont donc utiles pour le dimensionnement d'éléments de structure d'un matériau quasi-fragile et pour déterminer la taille de la FPZ. Cette approche suppose qu'une propagation de fissure n'est qu'une balance énergétique qui cherche à maximiser ses gains. À l'instar de l'électricité qui cherche le plus court chemin, une fissure cherche le chemin le moins cher énergétiquement. La plupart du temps, une fissure cherchera donc à se propager dans le sens du fil, en séparant les fibres au niveau de la lamelle moyenne et dans une zone de faible densité. Si un noeud se trouve sur sa trajectoire, elle le contournera plutôt que passer au travers ce qui nécessiterait plus d'énergie. C'est toujours une compétition énergétique qui a lieu entre les différents chemins possibles. un chemin qui traverse un noeud perdra la compétition face à un chemin contournant le noeud, même si ce dernier est plus long.

Il est important de préciser que le dimensionnement proposé par l'Eurocode 5 par le K_v et présenté dans le chapitre précédent suppose que le bois soit un matériau fragile et soumis à du mode I pur. Cette hypothèse est donc doublement discutable : une FPZ se développe dans le bois qui est donc quasi-fragile et une PE est en réalité soumise à du mode mixte.

Enfin, les propriétés de rupture du bois sont dépendantes de nombreux paramètres : la densité du bois, la TE, la température, les défauts, la vitesse de déformation ou encore le vieillissement (Phan, 2016). Les noeuds peuvent, par exemple, augmenter ou diminuer la résistance à la fissuration du bois selon leur nombre et leur position (Conrad et al., 2003). Également, une forte TE a tendance à augmenter la taille de la FPZ et rendre le matériau d'autant plus ductile, en plus de diminuer le G_C . De plus, le fluage du bois vert atteint des niveaux de déformation plus élevés que pour du bois sec, donc l'énergie élastique accumulée est également plus élevée et la rupture plus rapide (Phan, 2016). Le G_C dépend aussi de la vitesse de déformation, il est plus élevé si la déformation est plus rapide. Par conséquent, le taux de restitution d'énergie critique en fluage est plus faible que pour les essais en déplacement imposé. Ces remarques, non exhaustives, sont utiles pour comprendre les résultats obtenus et montrent la complexité de la mécanique de la rupture dans le cas d'une PE en bois vert, en conditions d'emploi et soumise à de la flexion 4-points en extérieur abrité.

7.1.2 Calcul analytique de la longueur de fissure

La propagation d'une fissure peut être visualisée géométriquement dans le cadre de la RDM. Pour cela, il est supposé que la fissure est rectiligne à mi-hauteur en plus des hypothèses

montrées en début de cette partie. Cela implique qu'il n'y ait pas de noeud dans sa trajectoire. La figure 7.4 schématise la propagation d'une telle fissure dans une poutre entaillée en flexion 4-points. Le repère utilisé a comme origine la pointe de fissure et suit la rotation de la poutre.

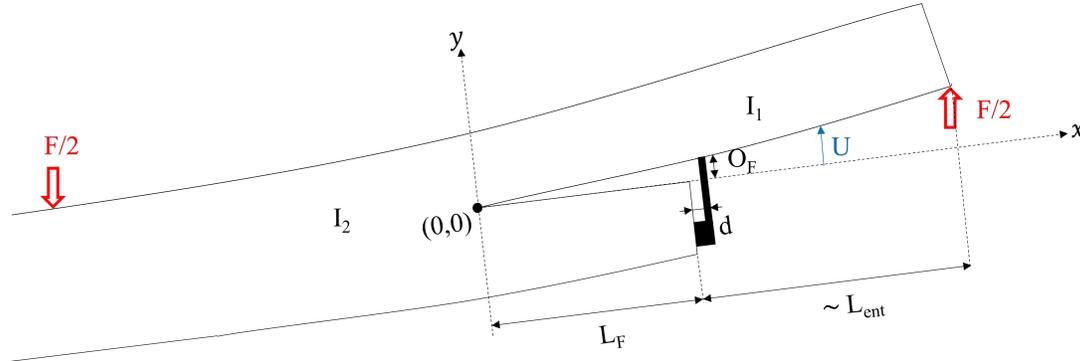


FIGURE 7.4 – Schéma d'une propagation de fissure idéale dans une poutre entaillée en flexion 4-points.

Le moment fléchissant dans la zone de l'entaille vaut :

$$M_z(x) = \frac{F}{2}(L_F + L_{ent} - x) \quad (7.4)$$

Soit $I_2 = I_z = (eH^3)/12$. D'après l'équation (5.6), il vient :

$$\frac{dU}{dx} = \frac{4Fx}{EI_2}(L_F + L_{ent}) - \frac{Fx^2}{4} \quad ; \quad U(x) = \frac{2F}{E.I_2}([L_F + L_{ent}]x^2 - x^3/3) \quad (7.5)$$

La mesure d'ouverture vaut dans ce cas :

$$U(L_F + d) = O_F = \frac{2F}{E.I_2}(L_F + d)^2 \left(L_F + L_{ent} - \frac{L_F + d}{3} \right) \quad (7.6)$$

Ceci peut se mettre sous la forme :

$$a_1 L_F^3 + a_2 L_F^2 + a_3 L_F + a_4 = 0 \quad (7.7)$$

où $a_1 = (2/3)$; $a_2 = L_{ent} + d$; $a_3 = 2L_{ent}d$ et $a_4 = d^2 L_{ent} - d^3/3 - (O_F E I_2)/(2F)$.

Cette équation peut être écrite sous la forme d'une fonction :

$$f(L_F) = a_1 L_F^3 + a_2 L_F^2 + a_3 L_F + a_4 \quad (7.8)$$

Cette fonction n'est valable que pour $L_F \in]0, L/3]$. Rechercher les racines de cette fonction revient à rechercher la longueur de fissure qu'impose une certaine ouverture de fissure à une certaine force, selon des considérations purement géométriques et basées sur les hypothèses de la RDM.

Les racines de la fonction (7.8) peuvent être trouvées par la méthode de Newton-Raphson puisqu'elle est dérivable et sa dérivée ne s'annule pas (monotonie de la fonction). Une solution exacte pourrait être trouvée mais la réalité s'éloigne parfois des hypothèses de ce modèle. Par exemple, si la fissure n'est pas rectiligne la solution analytique peut-être aberrante et une méthode numérique d'approximation de la solution est moins risquée. Cette fonction peut alors être appliquée aux essais de flexion dans lesquelles la force et l'ouverture de fissure sont connues.

7.2 Résultats des mesures de fissuration

7.2.1 Ouverture de fissure en fonction de la flèche centrale

La figure 7.6(a) présente les résultats de O_F moyenne en fonction de la flèche centrale U_c pour les essais en déplacement imposé. Sur ces essais, l' O_F est mesurée automatiquement par des capteurs LDT. Il peut d'abord être observé que sur chaque poutre, sauf S27, des sauts sont observables malgré une fréquence de mesure à 10 Hz. Cette observation illustre le caractère incrémental d'une propagation de fissure : les fissures se propagent bien de façon brusque. Toutefois, l' O_F croît aussi linéairement avec U_c , notamment au début de l'essai, figure 7.6(b). Une croissance aussi linéaire est simplement due à l'évolution de la courbure, mais pas à une réelle ouverture de fissure. En effet, le capteur LDT est associé au repère de l'entaille alors que le point de mesure est décalé d'une distance d de l'entaille (figure 7.4). Ainsi, le capteur mesure bien une variation linéaire de longueur lorsque la poutre se courbe, même si la fissure ne s'est pas propagée, figure 7.5.

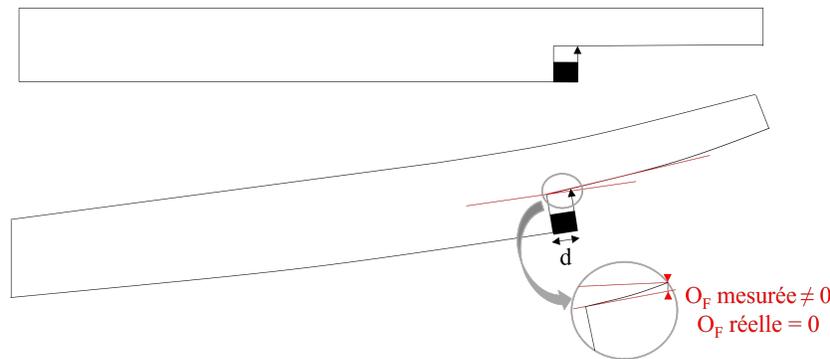


FIGURE 7.5 – Schéma explicatif d'une augmentation d' O_F lorsque la poutre se courbe, même sans propagation de fissure.

Cependant, les poutres S11, S16 et S17 présentent une évolution linéaire puis exponentielle des valeurs de O_F en fonction de U_c , toujours sans saut de mesure (figure 7.6). Cette observation peut être une réelle augmentation de O_F sans propagation apparente de L_F , c'est ce que Pambou Nziengui (2019) appelle "l'augmentation de O_F jusqu'à une valeur seuil". C'est potentiellement le développement de la FPZ qui caractérise la quasi-fragilité du bois. La FPZ endommagerait localement le bois, ce qui augmente la mesure de O_F jusqu'à ce que la FPZ atteigne sa taille critique permettant à la fissure de se propager.

Par ailleurs, les capteurs LDT utilisés pour ces mesures n'avaient qu'une étendue de 10 mm et n'ont donc pas permis de mesurer des OF au delà de cette distance.

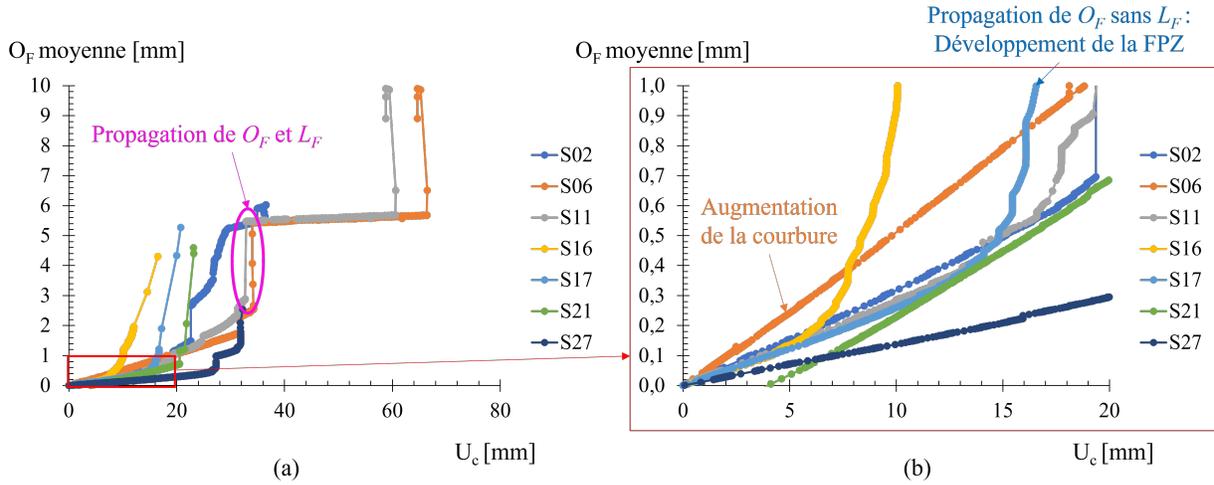


FIGURE 7.6 – Ouverture de fissure moyenne (OF) en fonction de la flèche centrale U_c sur les essais en déplacement imposé : (a) intégralité des mesures et observation des augmentations brusques de longueur de fissure (L_F), (b) focalisation sur les mesures de 0 à 1 mm de O_F et observation des évolutions linéaires ou exponentielles, illustrant le développement de la zone d'élaboration (FPZ).

La figure 7.7 présente l'évolution des OF moyennes des essais de fluage pour les vagues 1, 2 et 3. O_F est mesuré avec la méthode de suivi de marqueurs et n'évolue pas avec la courbure. En effet, c'est bien une distance relative entre deux marqueurs qui est mesurée, donc directement O_F . Les mesures sont néanmoins beaucoup moins fréquentes qu'avec les capteurs LDT, apportant moins de finesse dans les résultats. Les mesures des vagues 2 et 3 sont corrigées des retraits-gonflements RG . Pour cela, les côtés des poutres apparemment non fissurées sont utilisés pour établir une corrélation entre les mesures de O_F et de RG . En l'absence de propagation de fissure, la mesure de O_F est équivalente à une mesure de RG au niveau de l'entaille, en mettant de côté les effets de seuil expliqués ci-dessus. La figure 7.8 présente la corrélation pour un des côtés de la poutre S22 vague 3. Les retraits-gonflements étant proportionnels à la longueur initiale, les mesures sont exprimées en pourcentage de cette valeur initiale afin de les rendre comparables. D'une façon générale, les pentes des droites de corrélation oscillent entre 0,7 et 1,3. Les corrélations sont parfois mauvaises ($R^2 < 0,5$), probablement dues à la progression d'une zone d'élaboration qui augmente O_F non linéairement avec RG , dans ce cas elles ne sont pas considérées. La moyenne des pentes pondérée au R^2 vaut 0,97 pour la vague 2 et 1,01 pour la vague 3. Les résultats pour la vague 1 sont trop bruités et donc aucune correction n'est appliquée. Il est rassurant d'observer que la moyenne de cette pente est proche de 1, bien que les mesures de O_F puissent être davantage affectées que les mesures de RG par la diffusion longitudinale au niveau de l'entaille. Les mesures de O_F sont finalement corrigées par :

$$O_{F,corrigé} = O_{F,mesure} - pente \times O_{F,ini} \times \frac{RG}{RG_{ini}} \quad (7.9)$$

où *pen*te représente la moyenne pondérée des pentes de corrélation entre RG et O_F (si $R^2 > 0,5$) sur les poutres non fissurées; $O_{F,ini}$ et RG_{ini} représentent les distances initiales entre les marqueurs utilisés pour ces mesures respectives.

On constate que les valeurs maximales avant la rupture totale n'atteignent pas les O_F mesurées pendant les essais en déplacement imposé, sauf S29 qui est montée à $O_F = 7,1$ mm. Même en s'affranchissant de l'augmentation de O_F à cause de la courbure pour les essais en déplacement imposé, les sauts de O_F sont plus importants que pour les essais de fluage. En déplacement imposé, la force est libre est de diminuer, donc la propagation de fissure est plus stable qu'en fluage où la force est maintenue. En conséquence, les propagations de fissures en fluage sont davantage brutales impliquant la ruine d'une poutre pour une plus faible longueur de fissure, donc une plus faible ouverture de fissure.

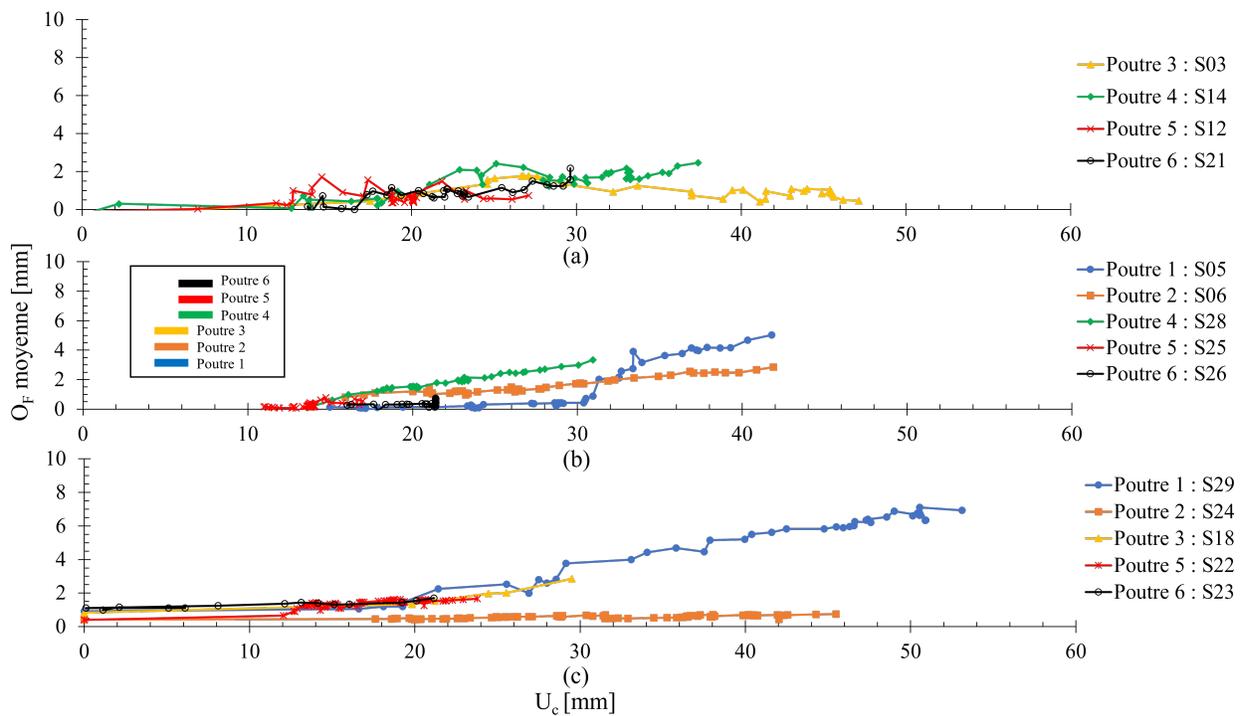


FIGURE 7.7 – Évolution des ouvertures de fissure O_F en fonction de la flèche centrale U_c : (a) vague 1, (b) vague 2, (c) vague 3.

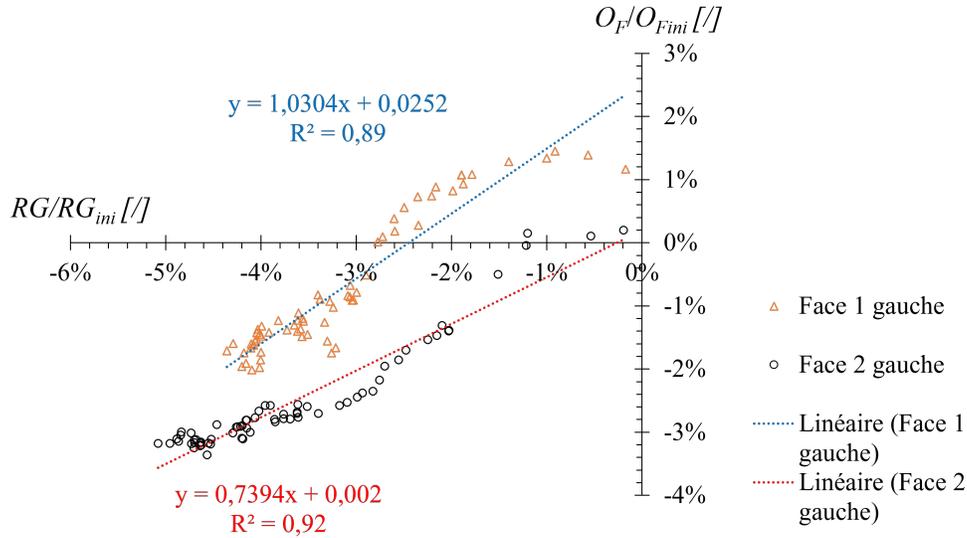
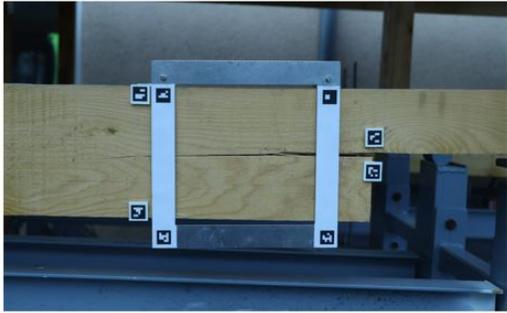


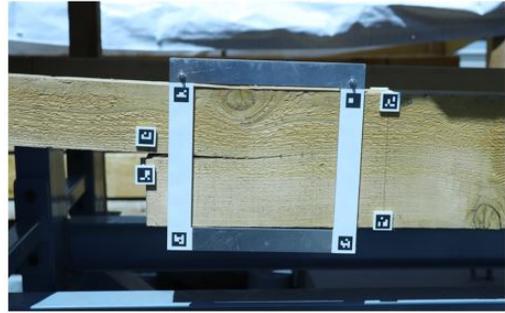
FIGURE 7.8 – Corrélation entre l’ouverture de fissure OF dans les zones non fissurées et le retrait-gonflement RG , tous deux rapportés à leur valeur initiale.

7.2.2 Application du modèle analytique et estimation de la flèche engendrée par la fissuration

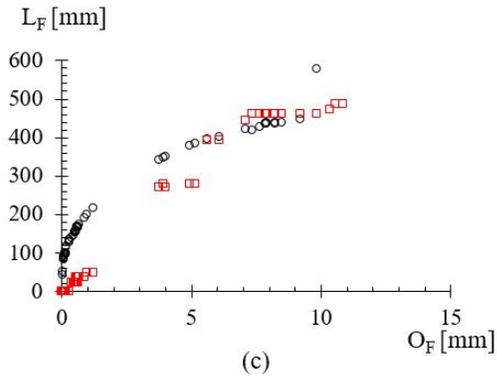
Une comparaison entre des mesures expérimentales de L_F et la solution de l’équation (7.7) est montrée en figure 7.9. Dans le cas des essais de fluage, c’est l’inverse de la complaisance calculée à chaque instant par l’équation (5.11) qui est utilisé à la place du module élastique E . Les incréments de charge et les retraits de hauteur sont donc également pris en compte. Des poutres ayant des fissures rectilignes à mi-hauteur et avec le plus d’état de propagation observé ont été choisies pour la comparaison. L’équation (7.7) suppose que la longueur de fissure ne fait qu’augmenter avec l’ouverture de fissure. En effet, de même que les évolutions linéaires observées en figure 7.6(b), le terme a_4 de l’équation (7.7) contient O_F/F , ce qui est équivalent à la pente de ces évolutions linéaires. Mais en réalité, des évolutions exponentielles ont également été observées en figure 7.6(b), suggérant que OF peut augmenter sans que LF augmente. Cette équation ne prend pas en compte cet effet d’endommagement mais l’OF utilisée comme paramètre d’entrée le subit bel et bien. En un sens l’équation (7.7) calcule ce qui pourrait être assimilé à la longueur de fissure équivalente évoquée en mécanique de la rupture quasi-fragile. Les résultats expérimentaux concernent des observations à l’œil d’une pointe de fissure. Il est donc cohérent d’avoir un écart par morceaux entre la solution analytique et l’expérimental. Compte tenu de cette remarque, la comparaison en figure 7.9(c) est intéressante. La comparaison en figure 7.9(d) est moins satisfaisante mais la tendance y est la même, une propagation logarithmique de la longueur de fissure en fonction de l’ouverture.



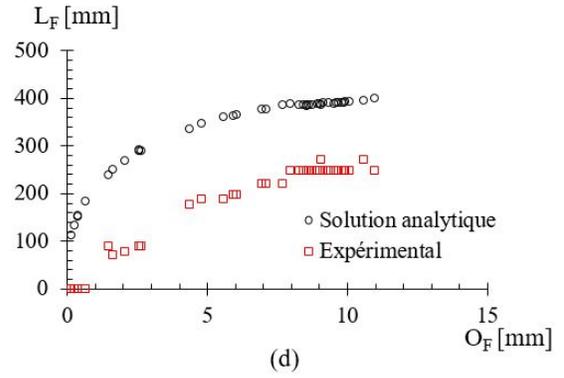
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 7.9 – Comparaison des résultats expérimentaux avec la solution de l'équation (7.7) : (a) photo de la poutre S05 (vague 2) face 1 à droite, (b) photo de la poutre S29 (vague 3) face 1 à gauche, (c) résultats sur S05 et (d) sur S29.

Enfin, il est possible de soustraire à la flèche totale celle qui est calculée par la complaisance issue de l'équation (5.11), comme si la poutre était intacte. Cette flèche fictive se calcule donc ainsi :

$$U_{fictive} = J(\beta).A.F(t).f(\beta_0) \quad (7.10)$$

Le terme $J(\beta)$ prend en compte les propagations de fissure et $A.F(t).f(\beta_0)$ va éliminer tout ce qui ne vient pas d'une fissure. Ainsi, une "flèche de fissure", c'est-à-dire la flèche centrale uniquement provoquée par une propagation de fissure, peut être calculée par :

$$U_{fissure} = U_{c,corrigee} - U_{fictive} \quad (7.11)$$

L'évolution de $U_{fissure}$ est présentée en figure 7.10 pour les poutres S03 (vague 1) et S05 (vague 2). L'évolution de S03 en figure 7.10(a) est représentative de ce qu'a subi la majorité des poutres, une flèche de fissure inférieure à 1 mm tout au long des essais. Néanmoins les poutres ayant le plus flué et fissuré, comme S05 ou S29, présentent des flèches de fissure qui montent jusque 4 mm, figure 7.10(b). Ces flèches de fissure sont directement issues de la perte de module élastique lors d'une propagation. Pour le bois, des augmentations de flèche centrale de 1 et 4 mm sont équivalentes à une diminution d'environ respectivement 1 et 3,3 GPa de module élastique. Bien entendu, cette variation dépend aussi des dimensions et de la valeur initiale du module élastique, ces valeurs ne sont alors qu'indicatives.

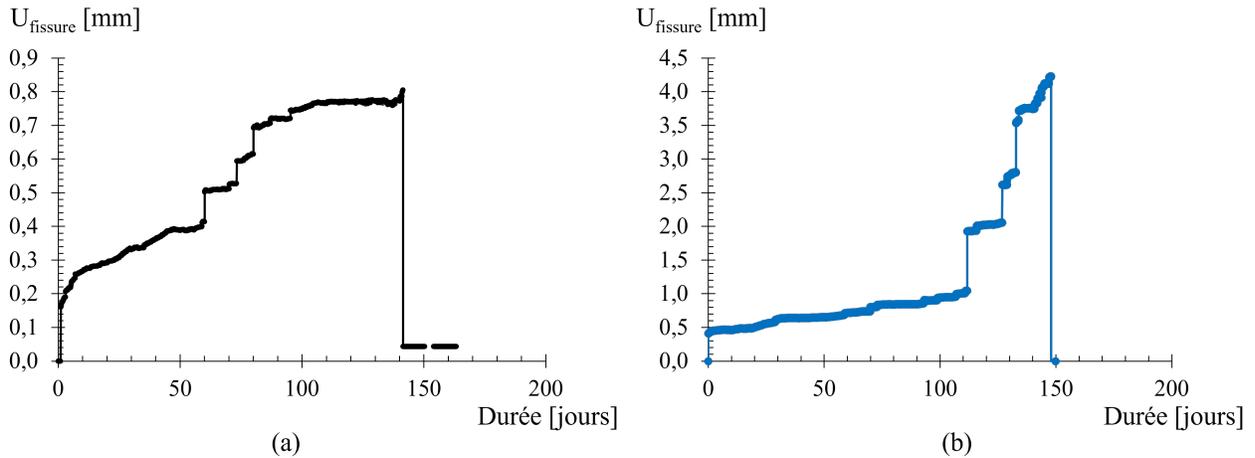


FIGURE 7.10 – Évolutions des flèches de fissure $U_{fissure}$ en fonction de la durée des essais : (a) S03 vague 1 et (b) S05 vague 2.

7.3 Observations des faciès de rupture

Dans le but de vérifier que la décroissance linéaire entre F_{max} et ρ_{ID} est expliquée par les défauts macroscopiques, des inspections à posteriori des poutres cassées ont été réalisées. Les noeuds, fentes initiales, état de surface et pentes de fil sont observés.

Il est intéressant de constater que les poutres ayant atteint les forces F_{max} les plus élevées ont soit un noeud placé au niveau des entailles, soit un profil de fissure oblique, figure 7.11(a),(b) et 7.12(c). C'est par exemple le cas de la poutre S11, dont $F_{max} = 11$ kN, figure 7.11(b). Des fentes de libération de contraintes de croissance ont probablement été le siège de l'initiation de fissure et ont poussé à propager une fissure en V. Une fissure en V demande de séparer une plus grande surface. Elle est donc plus énergivore. C'est également le cas de S06, chargée en fluage vague 2 pendant 150 jours et avec une charge à rupture appliquée de 5,5 kN, figure 7.11(a),(c). Dans ce cas la fissure a commencé à se propager d'un côté mais avec une trajectoire descendante. Puis, lorsque la contrainte est devenue suffisamment importante, elle a brusquement rompu du côté contenant un noeud précisément dans le coin de l'entaille. L'amorce de fissure s'est alors faite sous le noeud et la trajectoire était montante. Il est d'ailleurs intéressant de constater le profil en dent de scie de la fissure initiée sous l'entaille. On peut y voir des alternances de propagation dans le bois initial (moins dense) puis dès qu'un rayon ligneux est atteint, la fissure passe par ce rayon jusqu'à une nouvelle zone de bois initial. Ce type de trajectoire correspond aux observations de Bigorgne (2011) sur les fissures transverses. Enfin, c'est aussi le cas de la poutre S05, qui a été chargée en fluage vague 2 pendant 150 jours et jusque 5,5 kN, figure 7.12(b). Elle a également commencé à fissurer du côté exempt de noeud mais avec une trajectoire descendante, jusqu'à ce que, brusquement une fissure se propage de l'autre côté sans signe avant coureur et malgré qu'un noeud soit présent, mais cette fois avec une trajectoire montante.

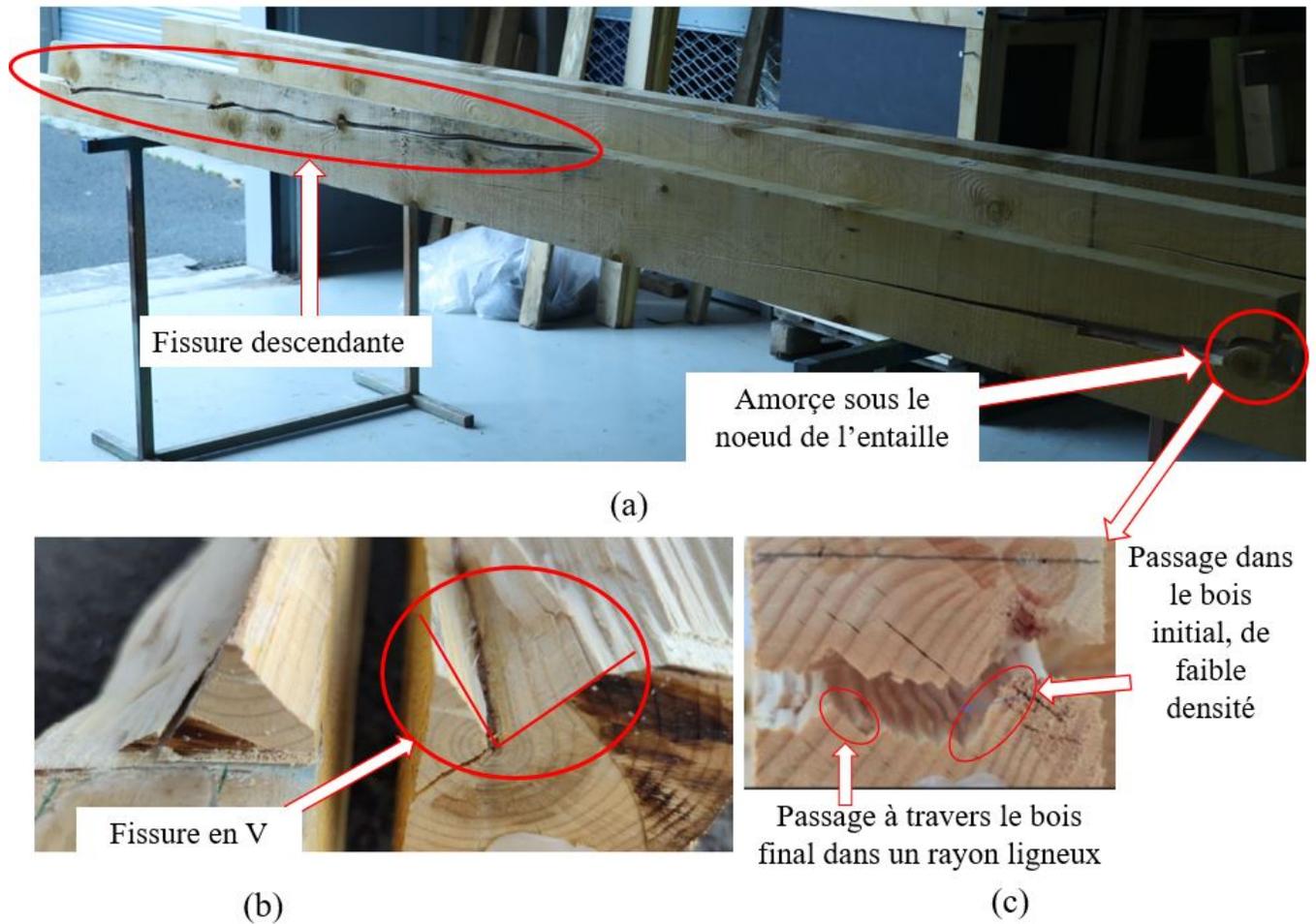


FIGURE 7.11 – Observation macroscopique des faciès de rupture : (a) fissure descendante et amorce sous l'entaille pour la poutre S06 (vague 2), (b) fissure en V pour la poutre S11 (essai en déplacement imposé), (c) zoom de la fissure de S06 pour une observation du profil.

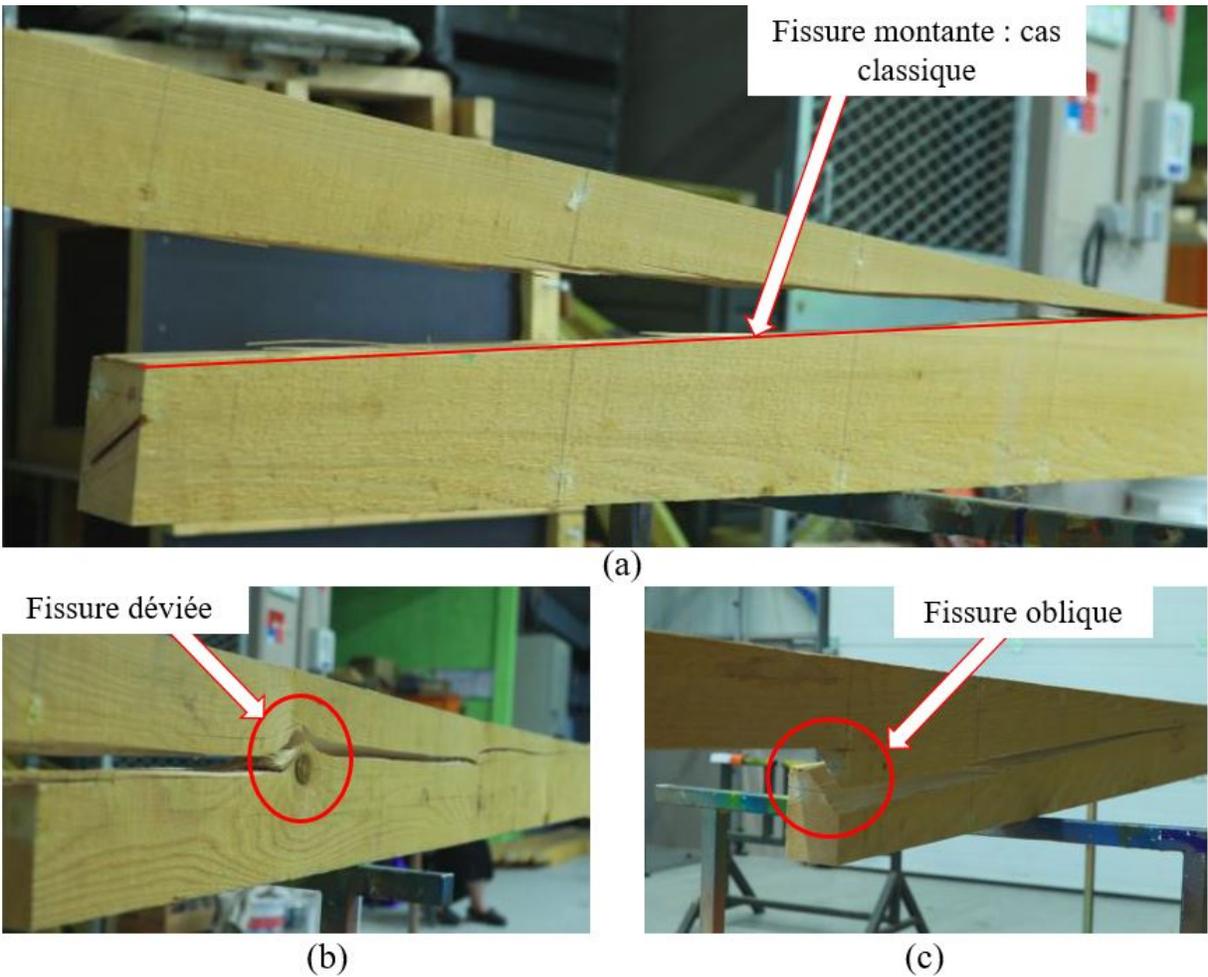


FIGURE 7.12 – Observation macroscopique des faciès de rupture : (a) fissure montante sur S14 (vague 1), (b) fissure déviée par un noeud sur S05 (vague 2), (c) fissure oblique sur S12 (vague 1).

À l'inverse, les poutres les moins résistantes ne présentent généralement pas de noeud dans la trajectoire de la fissure. C'est par exemple le cas de S16, dont $E^d = 16$ GPa mais qui a cassé à seulement $F_{max} = 3,6$ kN. C'est une poutre sans noeud et avec un fil droit mais qui finalement s'avère médiocre en résistance à la fissuration. C'est aussi le cas de S04 et S07, qui ont cassé avant l'application totale du chargement de la vague 1 mais dont $E^d = 12,3$ GPa et $E^d = 9,8$ GPa, respectivement. Elles ne présentent pas de noeud dans la trajectoire de la fissure.

Évidemment, les observations macroscopiques n'expliquent pas à elles seules les résultats de force F_{max} obtenus. Par exemple, la poutre S14 a été chargée pendant 148 jours en fluage vague 1 et a atteint une charge de 5 kN alors qu'elle est exempte de noeud, figure 7.12(a). De même, la poutre S18 n'a tenu que dix jours en fluage pour une charge de 3,3 kN, alors que la fissure a débuté sous l'entaille et que quelques noeuds étaient présents sur la trajectoire. Ces deux contre exemples viennent nuancer toutes conclusions hâtives, mais la tendance est que les noeuds sur la trajectoire de fissure renforcent la poutre, de même que les profils obliques.

Enfin, quelques observations méritent d'être faites :

- dans le cas où deux fissures préexistent, il peut être plus facile de fusionner ces deux fissures par une propagation totalement transverse, donc en coupant les trachéides, plutôt que continuer à propager longitudinalement. C'est le cas des poutres S09 et S27, dont deux fissures horizontales sont reliées par une fissure verticale, figure 7.13 ;



FIGURE 7.13 – Fusion de deux fissures entourée en rouge sur la poutre S09.

- il est fréquent que les fissures soient asymétriques entre les deux faces (toutes sauf S14 et S18). Cela peut être dû à des hétérogénéités ou des fentes de séchage ayant guidé la fissure d'un côté. D'un point de vue macroscopique, toute hypothèse consistant à faire de la fissuration 2D plutôt que 3D est donc discutable ;
- la fissure partira plus probablement de l'amorce au coin de l'entaille si elle est orientée radialement, c'est-à-dire si c'est un débit sur dosse parfait ;
- les fissures entraînant la ruine d'une poutre sont systématiquement montantes. Elles partent généralement de l'entaille et atteignent un point entre l'appui et le centre de la poutre, indépendamment des nœuds ou des pentes de fil. Une pente de fissure est

illustrée en figure 7.12(a). En figure 7.14 sont représentées les fréquences observées de chaque pente de fissure. Elles varient de 3 à 10%, soit une ascension allant jusque 10 cm/m ! Une pente de fil ne peut expliquer à elle seule une telle pente. La configuration d'une fissure montante est en effet celle qui maximise le travail de forces extérieures car c'est celle qui maximise la flèche centrale. Toutefois, la ténacité du bois est la plus faible dans le sens du fil, donc pour une fissure suivant la ligne moyenne. Une fissure montante résulterait donc de la compétition entre la maximisation du travail des forces extérieures et la minimisation de la ténacité du bois. Du reste, une fissure peut être montante sans couper le fil du bois, c'est-à-dire en conservant la ténacité la plus faible. Le chevauchement entre les trachéides n'est pas précisément connu pour le sapin pectiné, mais une fissure peut escalader petit à petit les trachéides au niveau des ponctuations (Trouy et Triboulot, 2019), figure 7.15. L'ordre de grandeur des dimensions d'une trachéide est : $L_{trach} = 3 \text{ mm}$ et $D_{trach} = 30 \mu\text{m}$. Soit θ l'angle de montée de fissure, très petit car $L_{trach} \gg D_{trach}$, il vient, pour des trachéides qui se chevauchent en quinconce $\theta = (D_{trach}/(L_{trach}/2)) = 2 \%$. La fissure pourrait monter de 20 mm/m sans coût énergétique supplémentaire. Ces éléments réunis peuvent expliquer une propagation de fissure montante, pouvant même monter jusqu'à 10% si une pente de fil est également présente.

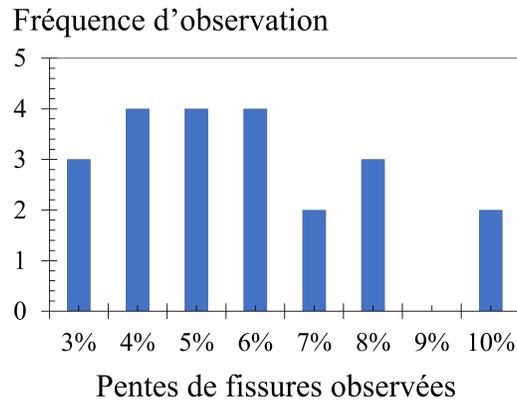


FIGURE 7.14 – Fréquence d'observation des pentes de fissures.

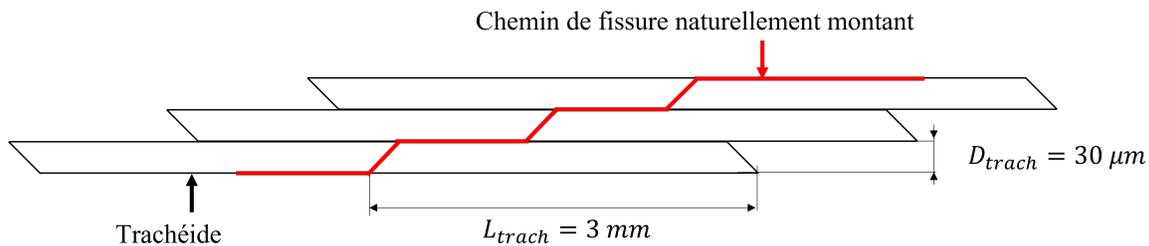


FIGURE 7.15 – Schéma d'une fissure montante en suivant le chevauchement des trachéides dans les résineux.

L'hypothèse d'absence de canaux résinifères et de résine favorisant la fissilité du sapin pectiné est à approfondir. Il n'en reste pas moins que les différentes observations attestent de la diversité des paramètres influençant la propagation de la fissuration pour cette essence. Selon le débit et l'orientation initiale de la fissure par rapport aux cernes, elle pourra se propager plus ou moins facilement.

Conclusion sur la rupture des poutres entaillées

Ce chapitre a brièvement défini les principes théoriques de la mécanique de la rupture du bois. Le bois est un matériau dit quasi-fragile dont les propagations de fissure peuvent être étudiées par des méthodes énergétiques. Dans ce cadre, la propriété physique principale qui définit la rupture est le taux de restitution d'énergie critique G_C . Il dépend de nombreux paramètres tels que la TE, la température ou encore la vitesse de déformation. Les outils de la RDM ont par ailleurs permis d'établir une relation mathématique entre l'ouverture et la longueur de fissure.

Les résultats des mesures d'ouverture de fissure dans les essais en déplacement imposé permettent d'observer le développement de la zone d'élaboration. Les résultats sur les essais de fluage sont corrigés des retraits-gonflements du bois qui impactent la mesure d'ouverture. Les ouvertures de fissure corrigées n'atteignent toutefois pas les mêmes ordres de grandeur que celles dans les essais en déplacement imposé. Enfin, la relation analytique entre ouverture et longueur de fissure n'est satisfaisante que pour une fissure parfaitement rectiligne à mi hauteur, ce qui est rarement le cas. Et encore, elle calcule plutôt une longueur de fissure équivalente, différente de la mesure à l'oeil nu.

Enfin, les observations macroscopiques des faciès de rupture suggèrent que les noeuds sont des renforts à la résistance à la propagation de fissure dans la majorité des cas observés. Ils expliquent ainsi pourquoi des poutres de bonne qualité, qui sont bien souvent exemptes de noeud, peuvent s'avérer médiocres en résistance à la rupture. Le profil de rupture semble également important, si des fentes initiales préexistent, elles peuvent guider la fissure et, soit fragiliser la poutre, soit la renforcer. Enfin, les directions des propagations sont systématiquement montantes, ce qui peut s'expliquer par l'intérêt énergétique d'une diminution de I_z , sans coût énergétique supplémentaire en cas de pente de fil ou du fait de l'enchevêtrement des trachéides.

Conclusion de la partie C

Cette partie pose d'abord le cadre théorique dans lequel s'insère la suite des analyses mécaniques. Les outils mathématiques de la flexion 4-points y sont développés, ainsi que le matériel et les méthodes des essais réalisés. Les deux chapitres suivants présentent l'analyse des résultats.

D'abord, un chapitre sur la réponse mécanique, c'est-à-dire les résultats des mesures de flèche et de retrait-gonflement. On y constate notamment que les paramètres d'homogénéité mécanique définis dans la partie B ne sont pas prédictifs de la résistance maximale d'une poutre. Contre-intuitivement, les poutres les plus rigides et denses s'avèrent être les moins résistantes. Les réponses différées des essais de fluage confirment la tendance attendue à l'augmentation de la flèche différée pour un bois initialement vert. Cela est cependant à relativiser par rapport à d'autres paramètres, tels que l'exposition au soleil, la nodosité ou la température ambiante.

Ensuite, vient un chapitre sur la mécanique de la rupture des poutres entaillées. Il aborde les concepts théoriques nécessaires à l'étude, puis développe les résultats de fissuration observés pendant les essais. Un modèle analytique tente de relier la longueur et l'ouverture de fissure par des considérations géométriques et les résultats sont comparables pour des propagations de fissure rectilignes horizontales. On y constate aussi que les ouvertures de fissure atteintes sont plus élevées pour les essais en déplacement imposé. Les propagations de fissures sont quasi-systématiquement montantes et déviées par les noeuds. Cette dernière observation explique potentiellement la grande résistance des poutres peu rigides : elles présentent de nombreux noeuds.

Aucune mesure de teneur en eau n'a été réalisée pendant les essais de fluage, parce qu'il est particulièrement délicat de peser une poutre sans en perturber son chargement. Des humidimètres auraient pu permettre de mesurer la teneur en eau en cours d'essai, mais la précision des dispositifs actuels est insatisfaisante. Dans cette étude, ce sont les retraits-gonflements RG qui ont été utilisés pour tenter de prévoir la teneur en eau TE . Mais ces mesures ne sont pas automatiques et reposent sur la connaissance préalable des coefficients de retrait. Une solution est d'utiliser un modèle de diffusion, qui prévoit la teneur en eau du bois à partir de son environnement et de ses conditions initiales. De tels modèles font l'objet de nombreuses études et leur efficacité est avérée. La prochaine partie exposera ainsi une étude préliminaire sur le développement d'un calcul de diffusion par approximation aux

différences finies. La construction d'une prévision efficiente de TE est à la fois scientifiquement intéressante et utile pour mieux appréhender des problématiques de séchage.

Quatrième partie

Diffusion de l'eau dans le bois

L'objet de cette partie est de présenter le travail expérimental et numérique réalisé pour déterminer les propriétés de diffusion du sapin pectiné. Cette partie concerne un travail préliminaire pour lequel l'enjeu est d'en capitaliser les premiers résultats pour à terme prévoir l'évolution hygroscopique du sapin pectiné à partir de son environnement. En effet, dans le cas d'une construction en bois vert, avoir une estimation des temps de séchage et des retraits associés est utile pour assurer une maîtrise des propriétés de l'ouvrage. De même, dans le cas d'une étude sur le fluage du bois où les mesures de TE par pesée sont impossibles et les humidimètres classiques imprécis, il est particulièrement utile d'avoir un moyen d'estimer cette TE. Ce travail a été rendu possible par la contribution déterminante de Gaël Godi qui a développé le système de pesées automatiques et les premières ébauches d'approximation par différences finies.

Chapitre 8

Détermination des coefficients de diffusion

8.1 Physique et modélisation de la diffusion unidimensionnelle

8.1.1 Principes physiques

Les principes physiques ici étudiés sont la diffusion et la teneur en eau d'équilibre.

La diffusion

Lorsque l'eau et le bois interagissent, un transport de molécules d'eau s'opère. C'est la diffusion. Qu'elle soit d'énergie (transfert de chaleur) ou de matière, la diffusion peut être mise en équation par une *équation de diffusion*. Dans le cas d'une diffusion de matière, comme c'est le cas pour la teneur en eau (TE), c'est la deuxième loi de Fick, équivalente à l'équation de la chaleur, qui est utilisée :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(\underline{D} \cdot \underline{\text{grad}}(w)) \quad (8.1)$$

où \underline{D} est le tenseur des coefficients de diffusion ; div et $\underline{\text{grad}}$ sont respectivement les opérateurs divergence et gradient et t représente le temps.

Comme mentionné en partie A, l'eau peut être à l'état *d'eau liée* (domaine hygroscopique) ou *d'eau libre* (au dessus du PSF). Ces deux types d'eau interagissent simultanément lorsque l'eau se diffuse dans le bois. En dessous du PSF, lorsque l'eau est transportée, elle traverse une association en parallèle de paroi cellulaire (eau liée) et de lumens (eau libre). On peut ainsi distinguer le mécanisme de diffusion dans la paroi cellulaire par un coefficient de diffusion D_B (B pour "Bound") et celui à l'état vapeur dans les lumens par un coefficient D_F (F pour "Free"). Il est alors possible de définir un coefficient de diffusion global D qui prend en compte l'ensemble de ces deux mécanismes de diffusion. C'est ce coefficient D qui est utilisé

dans l'équation de diffusion (8.1). Dans un cas unidimensionnel, l'équation se met sous la forme :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (8.2)$$

où D_x est le coefficient de diffusion dans la direction considérée. Dans la suite de cette section, les développements concernent la diffusion unidimensionnelle.

Dans le cas de la diffusion de l'eau dans le bois, D_x ne peut pas sortir de l'opérateur divergence car il dépend de TE. Dans les directions transverses du bois, la relation entre D_x et TE est soit considérée comme linéairement croissante (Alkadri, 2020), soit exponentiellement croissante (Siau, 1984). Celle dans la direction longitudinale est exponentiellement croissante puis décroissante, figure 8.1.

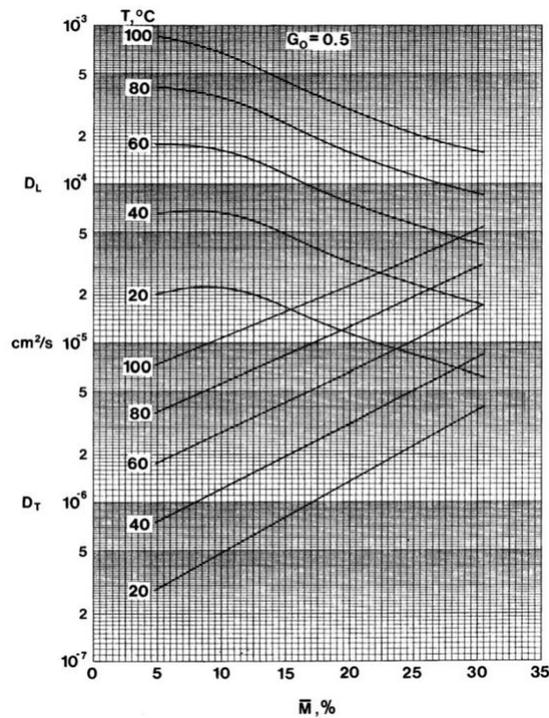


FIGURE 8.1 – Coefficient de diffusion transverse D_T et longitudinal D_L en fonction de la teneur en eau \bar{M} , issue de Siau (1984) page 164.

Les résultats d'Asseko (2022) sur les estimations des coefficients de diffusion du sapin pectiné montrent une dépendance polynomiale d'ordre 2 avec la teneur en eau, figure 8.2. Cette dépendance semble fiable pour les directions transverses et longitudinale ($R^2 > 0,97$).

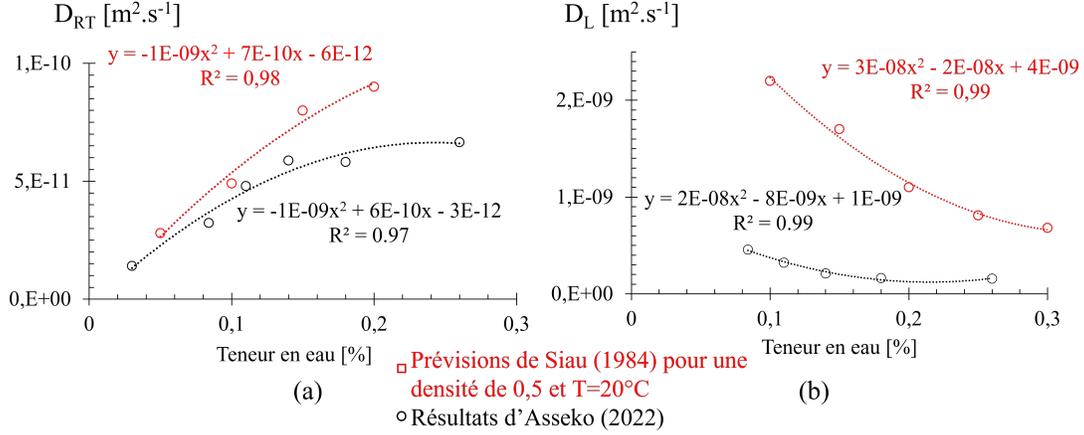


FIGURE 8.2 – Corrélations expérimentales d’Asseko (2022) et de Siau (1984) entre les coefficients de diffusion du sapin pectiné la teneur en eau : (a) pour la diffusion transverse, (b) pour la diffusion longitudinale à partir de 10% de teneur en eau. Les corrélations sont polynomiales d’ordre 2.

Dans un premier temps, une corrélation linéaire est supposée entre les coefficients de diffusion et la teneur en eau, exprimée de la manière suivante :

$$D_R = k_{DR} \cdot w + D_{R0} \quad ; \quad D_T = k_{DT} \cdot w + D_{T0} \quad ; \quad D_L = k_{DL} \cdot w + D_{L0} \quad (8.3)$$

où D_{R0} , D_{T0} , D_{L0} sont les coefficients à l’état anhydre et k_{DR} , k_{DT} , k_{DL} sont les pentes de proportionnalité entre TE et D . k_{DL} est théoriquement négatif pour tenir compte de l’évolution linéairement décroissante entre D et w .

Les coefficients de diffusion sont aussi dépendants de la température selon une loi d’Arrhenius (Siau, 1984). La relation peut donc s’écrire, dans n’importe quelle direction :

$$D = C \cdot e^{-E_b/RT} \quad (8.4)$$

où C est une constante, E_b représente l’énergie d’activation, R la constante des gaz parfaits et T la température. L’énergie d’activation est également dépendante de TE. Cette évolution exponentielle est observable dans la figure 8.1, puisque les différents niveaux de température semblent suivre une évolution exponentielle.

L’équation (8.2) montre le transport de l’eau dans le bois, mais les échanges à l’interface entre l’air environnant et le bois sont décrits par un phénomène de convection hydrique. Ce transport convectif peut être mis en équation par la loi de Newton :

$$\vec{\Phi} = S_x (w_{surf} - w_{eq}) \cdot \vec{n} \quad (8.5)$$

où $\vec{\Phi}$ représente le flux hydrique entrant ; S_x le coefficient d’échange surfacique ; w_{surf} la teneur en eau en surface du bois ; w_{eq} la teneur en eau imposée par HR et T de l’environnement et \vec{n} le vecteur unitaire normal à la surface d’échange. Le flux hydrique $\vec{\Phi}$ peut être exprimé par la première loi de Fick, analogue à la loi de Fourier en thermodynamique :

$$\vec{\Phi} = -D_x \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \vec{n} \quad (8.6)$$

Le coefficient d'échange surfacique S_x dépend de nombreux paramètres dont la teneur en eau, la température, l'état de surface et la vitesse de l'air. En transfert thermique, sa valeur est approximée à l'aide des nombres adimensionnels tels que le nombre de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl. C'est un coefficient qui est particulièrement difficile à déterminer et il est considéré constant dans cette étude.

La teneur en eau d'équilibre

w_{env} représente une teneur en eau d'équilibre (TEE) imposée par l'environnement. En effet, au bout d'un temps infini dans un environnement stable, le bois atteint un équilibre hygroscopique, c'est-à-dire une teneur en eau stable et égale en tout point. Cette TEE ne dépend donc plus du temps, mais seulement de la température T et de l'humidité relative HR auquel le bois a été soumis pendant un temps infini. On peut ainsi indiquer qu'un environnement (HR, T) impose une TEE qui serait atteinte au bout d'un temps infini, et cette TEE est une condition aux limites du problème. L'abaque de l'Eurocode 5 qui prévoit la teneur en eau du bois en fonction de son environnement est une TEE atteinte dans un environnement donné (AFNOR, 2004). Elle est cependant très simplificatrice : (i) la même relation est utilisée pour toutes les essences, résineuses comme feuillues, alors que la TEE est légèrement variable d'une essence à l'autre ; (ii) elle ne prend pas en compte l'hystérésis de sorption. En effet, à température ambiante, la TEE atteinte est toujours inférieure en adsorption qu'en désorption, formant alors une hystérésis, figure 8.3. La TEE dépend ainsi de l'état hydrique précédent du bois. Les valeurs et l'aire de la boucle d'hystérésis dépendent de la température, à tel point qu'à partir de 75°C l'hystérésis n'existe plus (Salmén et Larsson, 2018). Une hystérésis est donc valable pour une température, c'est pourquoi on appelle ces courbes *isothermes de sorption*. Toutefois, un bois dont TE se situerait sur la courbe d'adsorption et soumis à du séchage ne va pas directement "sauter" sur la courbe de désorption. Il va progressivement migrer vers la courbe de désorption. Par "progressivement" il n'est pas fait référence à une durée puisque le temps n'intervient pas dans la TEE, mais plutôt à une courbe partielle qui tend vers la courbe de désorption. Ces courbes sont appelées *isothermes partielles*, figure 8.3. Enfin, si TE atteint par exemple la courbe d'adsorption, elle y reste tant qu'elle n'est pas soumise à de la désorption, et réciproquement. Donc, dans tous les cas, TE reste entre les courbes enveloppes d'adsorption et de désorption.

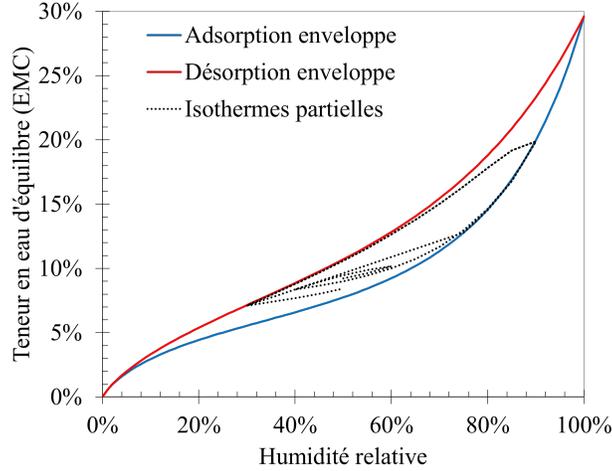


FIGURE 8.3 – Hystérésis de sorption avec les paramètres de Merakeb et al. (2009).

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cette hystérésis :

- l'augmentation de la température de transition vitreuse lors de la désorption durcirait le bois et bloquerait des molécules d'eau qui aurait dû partir (Salmén et Larsson, 2018) ;
- l'adsorption créerait des nouvelles liaisons chimiques dans le bois lors du gonflement, réduisant ainsi le nombre de sites de sorption disponibles. À l'inverse, la désorption augmenterait le nombre de sites de sorption permettant à plus de molécules d'eau d'entrer (Olek et Bonarski, 2012) ;
- il existerait une différence d'énergie nécessaire entre adsorber et désorber une molécule d'eau, l'énergie nécessaire pour adsorber étant plus grande que celle pour désorber la teneur en eau serait plus faible en adsorption (Rawat et Khali, 1996) ;
- l'augmentation du volume des macromolécules de bois lors de l'adsorption freine le mouvement des molécules d'eau (Merakeb, 2006).

L'expression mathématique de l'hystérésis enveloppe de sorption a par exemple été proposée par Merakeb (2006) :

$$\ln\left(\frac{w_{eq}}{w_s}\right) = \phi \cdot \ln(HR) \cdot e^{a \cdot HR} \quad (8.7)$$

où w_s la teneur en eau de saturation, c'est-à-dire le PSF, par ailleurs dépendante de la température et de l'essence ; ϕ et a sont des paramètres empiriques dépendant du type de sorption et de l'essence.

Pour exprimer mathématiquement les isothermes partielles, Varnier (2019), se basant sur les travaux de Pedersen (1990); Merakeb (2006); Kulasinski (2015) a défini la capacité hydrique :

$$\xi = (1 - \gamma)^{c_1} \cdot P_d \cdot C_d + \gamma^{c_1} \cdot P_a \cdot C_a \quad (8.8)$$

où ξ est la capacité hydrique ; γ est la position relative entre les deux isothermes : $\gamma = (w_{eq,de} - w_{eq,t-1}) / (w_{eq,de} - w_{eq,ad})$, avec $w_{eq,t-1}$ la teneur en eau d'équilibre précédente ; P_d

et P_a sont les pentes des isothermes enveloppes à (HR, T) donné (calculées par dérivée de l'équation (8.7)), respectivement en désorption et en adsorption ; C_a, C_d, c_1, c_2, c_3 sont des paramètres phénoménologiques tels que :

$$C_a = \begin{cases} 1 & \text{si adsorption} \\ c_2 & \text{si désorption} \end{cases} \quad C_d = \begin{cases} c_3 & \text{si adsorption} \\ 1 & \text{si désorption} \end{cases} \quad (8.9)$$

La TEE des isothermes partielles est ensuite calculée par :

$$w_{eq,t} = \xi \cdot \Delta HR + w_{eq,t-1} \quad (8.10)$$

où ΔHR est la différence entre l'humidité relative actuelle à laquelle est soumis le bois et la précédente l'ayant amené à $w_{eq,t-1}$. Toutefois, cette approche souffre d'une dérive de la solution lors de petits cycles d'adsorption-désorption en raison de la différence entre ξ_{ad} et ξ_{de} .

Rémond et al. (2018) ont proposé une formulation des hystérésis partielles utilisant le concept de "*gripped-box*", qui semble régler le problème.

8.1.2 Approximation numérique de la solution

L'équation (8.2) est une équation aux dérivées partielles comportant une infinité de solutions analytiques. Sous certaines conditions aux limites et conditions initiales, les solutions réelles de ce type d'équation peuvent être obtenues par approximation. La méthode d'approximation choisie dans ce travail est la *méthode des différences finies*. Elle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et adaptée à la résolution d'équation de diffusion. Cette méthode est basée sur la formule de Taylor qui approxime la valeur d'une fonction par un polynôme dont les coefficients dépendent des dérivées de cette fonction.

Soit $x_0 \in \mathfrak{R}$ et f une fonction définie au voisinage de x_0 , si f est n fois dérivable en x_0 alors :

$$f(x_1) = f(x_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \frac{(x_1 - x_0)}{1!} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{(x_1 - x_0)^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \frac{(x_1 - x_0)^n}{n!} + o((x_1 - x_0)^n) \quad (8.11)$$

où $o((x_1 - x_0)^n)$ représente le reste de la somme et elle est considérée négligeable.

La formule de Taylor est abondamment utilisée en physique et en mathématique, notamment pour les développements limités ou les différences finies (DF). Généralement, les termes dominants de cette somme sont les premiers termes, et l'équation (8.11) permet ainsi d'estimer la dérivée de f :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} + o((x_1 - x_0)^2) \quad (8.12)$$

C'est avec ce type d'approximation des dérivées que l'on peut résoudre l'EDP (8.2). Pour cela, il est nécessaire de discrétiser les composantes temporelles et spatiales.

Soit un morceau de bois de 60 mm maillé régulièrement en $I = 60$ points, dont TE est mesurée toutes les cinq minutes, illustrée en figure 8.4.

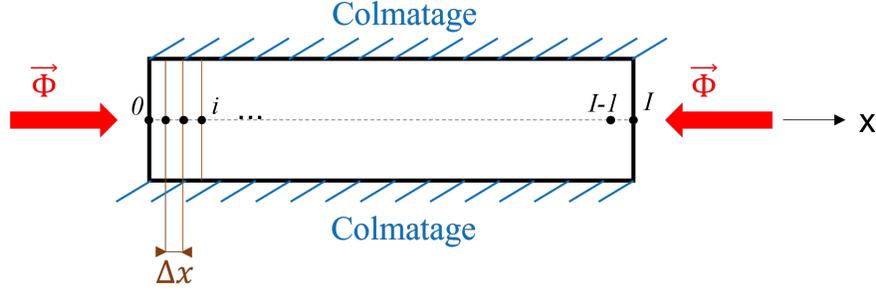


FIGURE 8.4 – Illustration d'une modélisation de diffusion unidimensionnelle.

On note alors i l'indice spatial et n l'exposant temporel, de sorte que f_i^n soit la valeur de la fonction f au point i et au temps n . Pour un maillage régulier on a quelque soit i : $x_i - x_{i-1} = \Delta x = 1 \text{ mm}$, et quelque soit n : $t_n - t_{n-1} = \Delta t = 5 \text{ min}$.

À partir de la formule de Taylor (8.12) :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_i^n = \frac{f_i^n - f_i^{n-1}}{\Delta t} \quad ; \quad \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_i^n = \frac{f_{i+1}^n - 2f_i^n + f_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (8.13)$$

Afin de sortir D_{xi}^n de la dérivée spatiale dans l'équation (8.2), on peut définir un \bar{D}_{xi}^n comme la moyenne arithmétique de D_{xi}^{n-1} entre les points $i-1$ et $i+1$. Soit :

$$\bar{D}_{xi}^n = \frac{D_{xi+1}^{n-1} + 2D_{xi}^{n-1} + D_{xi-1}^{n-1}}{4} \quad (8.14)$$

L'équation (8.2) peut alors être approximée par :

$$\frac{w_i^n - w_i^{n-1}}{\Delta t} = \bar{D}_{xi}^n \frac{w_{i+1}^n - 2w_i^n + w_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (8.15)$$

Ce type de formulation est appelé *schéma implicite* car la résolution d'une telle équation sera matricielle. La dérivée seconde spatiale aurait très bien pu être estimée à l'instant $n-1$ plutôt que n . Dans ce cas, le schéma aurait été *explicite* et la résolution aurait été incrémentale. Il est aussi possible de définir un θ -schéma, qui permet de choisir le type de schéma en fixant une valeur de θ :

$$\frac{w_i^n - w_i^{n-1}}{\Delta t} = \frac{\bar{D}_{xi}^n}{\Delta x^2} (\theta(w_{i+1}^n - 2w_i^n + w_{i-1}^n) + (1-\theta)(w_{i+1}^{n-1} - 2w_i^{n-1} + w_{i-1}^{n-1})) \quad (8.16)$$

où si $\theta = 0$ le schéma est explicite ; si $\theta = 1$ le schéma est implicite et si $\theta = 1/2$ le schéma est en quelque sorte semi-implicite (schéma de Crank-Nicolson).

Le choix d'un schéma plutôt qu'un autre n'est pas trivial, mais on peut lister quelques caractéristiques de chacun :

- le schéma explicite est conditionnellement stable : $\Delta t \leq \Delta x^2 / (2\bar{D}_{xi}^n)$. Il est donc adapté à des faibles Δt , associés à des variations brutales de TE. Il est aussi particulièrement simple à implémenter ;

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} w_{env}^n + (1 - \theta)\bar{D}_{x0}^n F_2(w_1^{n-1} - w_0^{n-1}) \\ w_1^{n-1} + F_1(1 - \theta)(w_2^{n-1} - 2w_1^{n-1} + w_0^{n-1}) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ w_{I-1}^{n-1} + F_1(1 - \theta)(w_I^{n-1} - 2w_{I-1}^{n-1} + w_{I-2}^{n-1}) \\ w_{eq,env}^n + (1 - \theta)\bar{D}_{xI}^n F_2(w_{I-1}^{n-1} - w_I^{n-1}) \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

$$(\underline{w}^n)^T = [w_0 \quad w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_{I-1} \quad w_I]^n \quad (8.23)$$

À chaque instant n , le vecteur \underline{b} est connu puisqu'il dépend uniquement de l'état à l'instant $n - 1$ et de ce qu'impose l'environnement $w_{eq,env}^n$; le système se résout donc en inversant la matrice \underline{A} . Un script Python permettant une telle opération est en annexe G.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif était d'estimer les coefficients de diffusion du sapin pectiné. Pour cela des mesures expérimentales de TE ont été réalisées et les valeurs des coefficients de diffusion du système (8.20) sont optimisées pour que la résolution soit le plus proche possible des résultats expérimentaux.

8.2 Descriptif des essais

Dans le but d'estimer les paramètres de diffusion du sapin pectiné d'AuRA, des essais de pesées automatiques en environnement extérieur abrité ont été réalisés. À partir de la masse anhydre, les pesées permettent de mesurer la teneur en eau.

Le dispositif de mesure est basé sur un plateau piloté par un servomoteur qui monte et descend sur une balance toutes les cinq minutes. Le plateau et l'objet qu'il porte ne sont pesés que lorsque le plateau descend. Une structure lattice imprimée en 3D utilise un système de poulie pour effectuer ces montées et descentes à partir de la rotation du servomoteur. Juste avant de descendre le plateau, la balance est tarée. L'avantage de ce procédé est d'éviter la dérive de la tare, par exemple si l'échantillon était simplement laissé sur la balance pendant l'essai. La dérive de la tare est d'autant plus importante si la température varie, comme c'est le cas en environnement extérieur. À proximité de chacune des balances est placé un thermo-hygromètre, mesurant température et humidité relative de l'air. Ces opérations sont réalisées automatiquement, chaque cinq minutes, à l'aide d'une carte d'acquisition qui procède de la façon suivante :

- tare de la balance ;
- rotation du servomoteur qui entraîne la descente du plateau ;
- enregistrement de la moyenne des pesées sur trente secondes ;
- enregistrement de la moyenne des température et humidité relative sur trente secondes ;
- envoi des résultats de mesure sur un serveur ;

- rotation inverse du servomoteur qui entraîne la remontée du plateau.

Les balances sont calibrées à l'achat et il a été vérifié que les mesures sont stables avec une masse étalon pesée par le dispositif pendant une semaine. À titre d'illustration, les vérifications ont validé une précision de mesure inférieure à 70 mg malgré des variations de température de 15°C, soit 5 mg.°C⁻¹. Sans système de tare automatisée, la précision estimée était de 100 mg.°C⁻¹, soit diminuée d'un facteur 20. Une photo du dispositif est en figure 8.5.

Huit éprouvettes de bois de sapin pectiné soumises à un environnement extérieur ont été pesées à l'aide de ce dispositif, aucune ne présentant de poche d'eau. Les balances étaient placées à l'ombre. Sept des éprouvettes proviennent des chutes lors des entailles des poutres S03, S05 et S21, et une provient de la zone centrale de la poutre S13. Six éprouvettes ont commencé à être pesées le 26 mai 2021 et deux autres le 12 octobre 2021. Toutes les pesées ont été stoppées le 5 avril 2022, soit entre six et onze mois de mesures. Avec une mesure chaque cinq minutes, ces durées permettent d'avoir suffisamment de données pour estimer des paramètres de diffusion (Varnier, 2019).

La diffusion d'eau dans les éprouvettes a été forcée à un régime 1D ou 2D. Pour cela, une ou deux directions de diffusion sont colmatées par un mastic silicone et une feuille d'aluminium. Ce colmatage assure que tout transfert hydrique est impossible mais permet un transfert thermique. Pour avoir effectivement une diffusion 1D ou 2D, il faudrait en réalité appliquer un colmatage hydrique et thermique, car le transfert thermique dans une direction peut accélérer ou ralentir la diffusion d'une autre direction (thermophorèse). Le but étant initialement d'estimer un coefficient de diffusion commun pour les directions radiale et tangentielle, trois éprouvettes subissent de la diffusion 2D radiale-tangentielle et trois éprouvettes de la diffusion 1D longitudinale. Cependant une éprouvette en diffusion 1D radiale et une en diffusion 1D tangentielle sont aussi pesées afin d'observer les différences entre les directions transverses. Pour s'assurer que la diffusion est favorisée suivant les directions tangentielle ou radiale, une éprouvette en débit sur quartier est choisie, figure 8.6(a). Les éprouvettes en diffusion longitudinale sont en débit sur faux-quartier, figure 8.6(b). Enfin, sur une des éprouvettes en diffusion 2D radiale-tangentielle, un colmatage thermique en plus du colmatage hydrique a été ajouté, figure 8.5(b). Le colmatage thermique est réalisé par du polystyrène extrudé collé par du mastic silicone à la couche d'aluminium. Il a été vérifié que la masse du polystyrène extrudé ne varie pas lors d'un changement de température et d'humidité relative. Comme observé en figure 8.6, des fentes radiales issues du séchage ou de la libération des contraintes de croissance sont présentes sur les éprouvettes. Ces fentes sont des hétérogénéités non prises en compte dans l'approximation DF et peuvent perturber l'estimation du coefficient de diffusion.

Les masses initiales des éprouvettes ont été choisies pour que la pesée soit proche de la pleine échelle de mesure, parce que s'approcher de la pleine échelle augmente la précision relative. Six des balances ont une capacité de 650 g et deux de 360 g. En ajoutant la masse des plateaux de pesées (environ 80 g) et du colmatage (environ 10 g pour le colmatage hydrique et 50 g pour le colmatage thermique), et, en laissant au moins 100 g de marge pour ne pas saturer la pesée, les masses des éprouvettes sont fixées à environ 400 g pour les balances d'une capacité de 650 g et 175 g pour les balances d'une capacité de 360 g. Étant issues des

restes d'entailles (sauf l'éprouvette issue de S13), les dimensions transverses sont imposées et seule la dimension de la direction longitudinale est choisie pour atteindre la masse désirée.

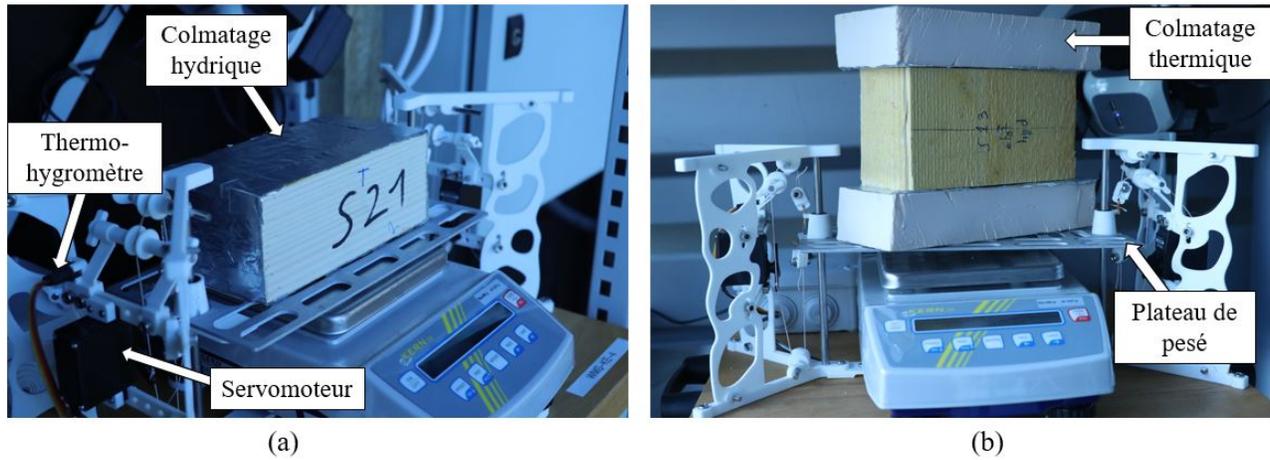


FIGURE 8.5 – Photos des balances et des éprouvettes de diffusion : (a) diffusion 1D tangentielle, (b) diffusion 2D transverse avec colmatage thermique.

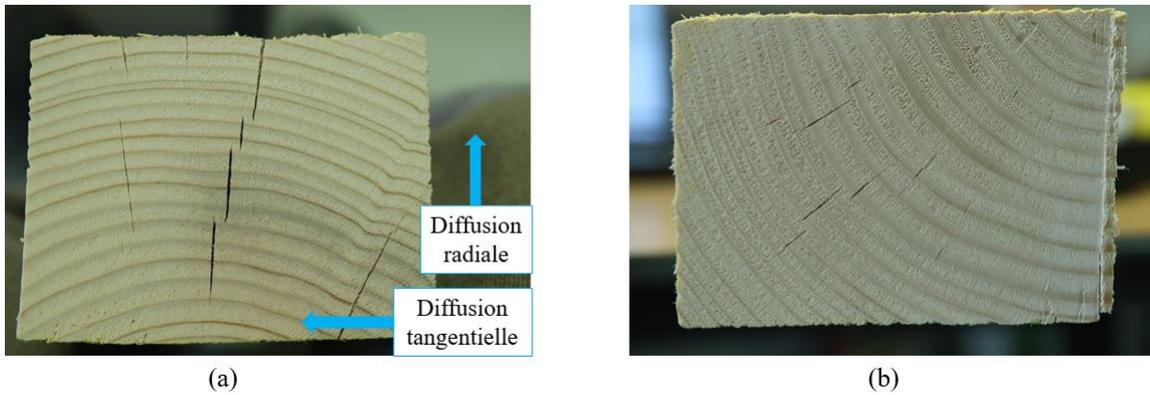


FIGURE 8.6 – Photos des cernes des éprouvettes utilisées pour les essais de diffusion : (a) éprouvette issue de la poutre S21, (b) éprouvette issue de la poutre S03.

TABLEAU 8.1 – Récapitulatif des conditions des essais de diffusion. La colonne "Capacité" fait référence à la capacité de la balance utilisée et la colonne "Dimensions" aux dimensions de la direction de diffusion considérée.

Origine	Date	Direction	Capacité [g]	Masse initiale [g]	Dimensions [mm]	Balance
S13	26/05/2021	RT	650	431	162 × 55	WMS-KE-2
S03	26/05/2021	RT	650	416	60 × 79	WMS-KE-6
S05	12/10/2021	RT	650	448	78 × 62	WMS-KE-7
S21	26/05/2021	L	360	203	75	WMS-KE-5
S03	26/05/2021	L	650	453	174	WMS-KE-9
S05	18/10/2021	L	360	168	81	WMS-KE-8
S21	26/05/2021	R	650	458	63	WMS-KE-3
S21	26/05/2021	T	650	418	78	WMS-KE-4

8.3 Résultats et discussion

8.3.1 Filtrage et validation de l'approximation par différences finies

Les résultats des mesures de pesées automatiques sont bruitées, figure 8.7(a). Ces erreurs de mesures proviennent de divers facteurs : (i) bruit provoqué par l'environnement extérieur en général (par exemple le vent qui perturbe la pesée ou les poussières qui se déposent sur le plateau de pesée); (ii) le système de poulie permettant de monter et descendre le plateau utilise un fil qui peut rompre après un certain nombre de cycles relâchant une partie de l'échantillon sur la balance.

Les erreurs de mesure dues au système de poulie impliquent des valeurs globalement aberrantes, alors que le bruit de l'environnement extérieur implique des valeurs localement aberrantes, c'est-à-dire des valeurs qui sont aberrantes en comparaison avec leurs proches voisins mais globalement qui ne le sont pas.

Pour corriger les mesures, un double filtre a été appliqué. Il consiste en un premier filtrage des valeurs globalement aberrantes à partir des écarts interquartiles (IQR) et un deuxième filtrage dit de *Hampel* pour les valeurs localement aberrantes. La procédure est la suivante :

- calcul du premier ($Q1$) et troisième ($Q3$) quartile de l'ensemble des pesées ;
- calcul de l'interquartile ($IQR = Q3 - Q1$), puis des bornes des valeurs non aberrantes : borne inférieure : $Q1 - 1,5 \times IQR$; borne supérieure : $Q3 + 1,5 \times IQR$. Toute valeur hors de ces bornes est considérée comme globalement aberrante, donc éliminée. Illustration en figure 8.7(a)(b) ;
- application du filtre de Hampel du module *sktime* de Python. Le filtre de Hampel utilise une fenêtre de taille déterminée (ici cent mesures) pour balayer l'ensemble des données. Sur une fenêtre, il calcule l'écart médian absolu (MAD) qu'il multiplie par une constante (ici 1,4826 pour une distribution gaussienne) et considère qu'une valeur est aberrante si elle sort de l'intervalle : médiane $\pm 3 \times (1,4826 \times MAD)$. Illustration en figure 8.7(c).

Néanmoins certaines valeurs aberrantes subsistent. Un filtre plus avancé type filtre de Kalman pourrait être utilisé.

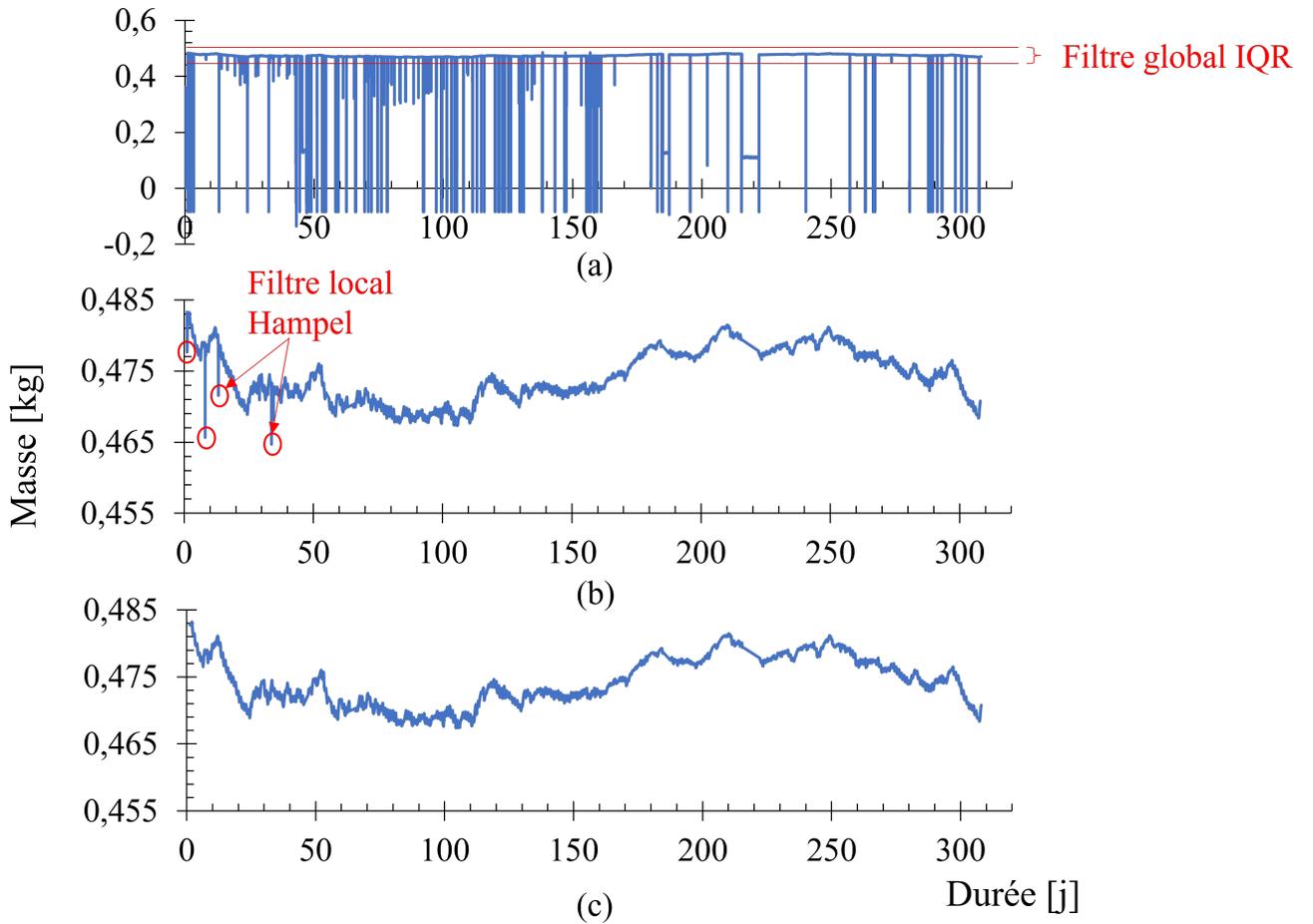


FIGURE 8.7 – Pesées automatiques de la balance wms-ke-2 : (a) valeurs brutes, (b) correction des valeurs globalement aberrantes, (c) correction des valeurs localement et globalement aberrantes.

Avant d’appliquer l’approximation par différences finies (système (8.20)) sur les résultats expérimentaux, celle-ci à été comparée à une solution analytique. C’est la solution de Crank (1975), valable pour un morceau de bois ayant une TE initiale homogène et soumis à un chargement thermo-hydrigue constant purement 1D :

$$E(x, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left(-D(2n+1)^2 \pi^2 t / (4l^2)\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2l}\right) \quad (8.24)$$

où l’on définit $E(x, t)$ le taux d’avancement de la diffusion, puis la teneur en eau en un point x et à un instant t vaut :

$$w(x, t) = w_{ini} + E(x, t) \times (w_f - w_{ini}) \quad (8.25)$$

où w_{ini} est la teneur en eau initiale ; w_f est la teneur en eau finale issue du chargement thermo-hydrigue, qui peut-être calculée par des modèles simples tels que celui de Simpson (1973) ou par des modèles tenant en compte l’hystérésis de sorption. L’équation (8.24) ne prend pas en compte d’échange convectif à l’interface entre l’air et le bois, tout se passe comme si la périphérie du bois était immédiatement à l’équilibre.

Le cas test pour comparer la solution analytique et la solution approximée par DF est un passage de $w_{ini} = 0,075$ à $w_f = 0,0985$ d’un échantillon de 20 mm. Le coefficient d’échange surfacique de l’approximation DF S_x est fixé à 1×10^{10} pour que le bois soit immédiatement à l’équilibre en surface, comme le suppose la solution analytique. Enfin, le coefficient de diffusion D_x est le même pour les deux résolutions, issu des travaux d’Asseko (2022) sur le sapin pectiné : $D_x = 4,63 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Les résultats de la solution approximée par DF sont comparés à la solution analytique en figure 8.8, assurant la fiabilité de l’approximation DF. Une différence est observable en figure 8.8(b), mais compte tenu de l’échelle de l’axe des ordonnées celle-ci reste très faible.

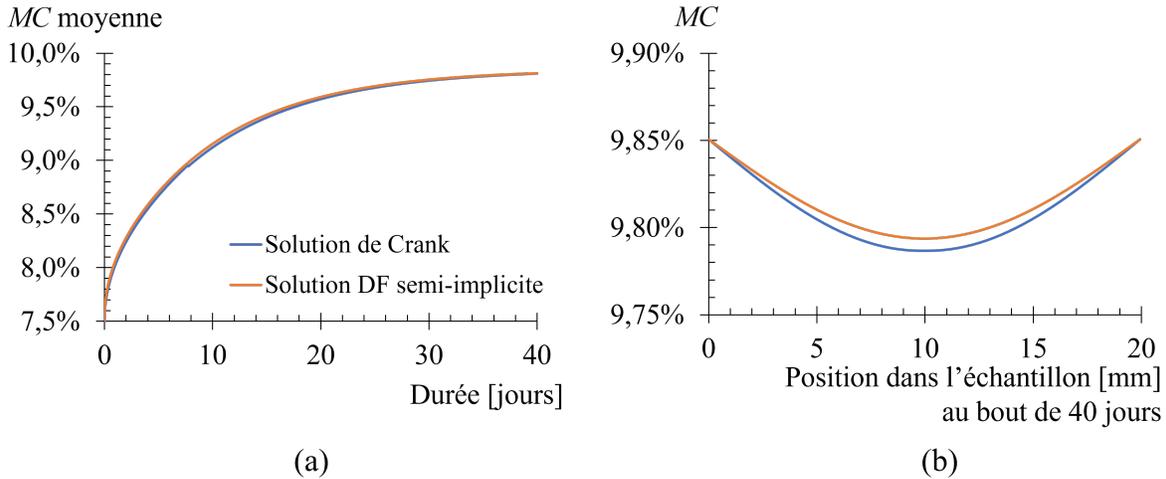


FIGURE 8.8 – Comparaison entre la solution analytique de Crank (1975) et l’approximation DF pour $\theta = 1/2$: (a) évolution de TE moyenne, (b) tracé du profil hydrique après quarante jours

8.3.2 Application des différences finies sur les pesées automatiques

La teneur en eau d’équilibre qu’impose l’environnement w_{eq} est calculée à partir des isothermes enveloppes définies en équation (8.7) et du modèle gripped-box de Rémond et al. (2018) pour les isothermes partielles. Les paramètres ainsi fixés aux valeurs par défaut de Varnier (2019); Rémond et al. (2018) pour l’épicéa sont :

- paramètres de l’hystérésis enveloppe, définis dans l’équation (8.7) : $\phi_{ad} = 0,8$; $\phi_{de} = 0,75$; $a_{ad} = 1,435$; $a_{de} = 0,988$;
- paramètres de l’hystérésis partielle issus de Rémond et al. (2018) : $\alpha_{gp} = 0.133$; $\beta_{gp} = 0.466$

Entre l'épicéa et le sapin pectiné, ces paramètres varient peu et peuvent être utilisés en première approximation. Le paramètre de réglage le plus significatif est la teneur en eau de saturation (le PSF) w_s . Elle doit être la même, quelque soit la direction de diffusion et évoluer de façon affine avec la température Merakeb et al. (2009), soit :

$$w_s(T) = w_{s0} - k_{w_s} \cdot T \quad (8.26)$$

Avec les six paramètres des coefficients de diffusion D_{0R}, D_{0T}, D_{0L} et k_{DR}, k_{DT}, k_{DL} respectivement pour les directions radiales, tangentielles et longitudinales (équation (8.3)) et les deux coefficients d'échange surfacique S_{RT}, S_L (les coefficients d'échange radial et tangentiel sont considérés comme égaux), il y a finalement dix paramètres de réglage dans le système d'équation de diffusion résolue par DF. Les pas temporel et spatial Δt et Δx sont fixés à une valeur garantissant la convergence de la solution : $\Delta t = 1200$ s et $\Delta x = 1$ mm. Le paramètre θ est toujours fixé à $1/2$, appliquant un schéma de Crank-Nicolson. Les trois essais R, T et L des balances WMS-KE-3, KE-4 et KE-5 sont réalisés sur des éprouvettes issues de la poutre S21 et sont donc optimisés simultanément, avec les mêmes w_s et k_{w_s} . Les essais de diffusion L de WMS-KE-8 et WMS-KE-9 sont issus des poutres S05 et S03, respectivement, les paramètres sont alors optimisés séparément. Afin d'estimer l'efficacité de l'approximation DF pour un jeu de paramètres, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMS pour *Root Mean Square*) entre la solution et l'expérimental est calculée :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_{exp}^i - w_{DF}^i)^2} \quad (8.27)$$

où N est le nombre de points de mesure, w_{exp}^i est la i ème mesure de teneur en eau, w_{DF}^i est la i ème approximation DF. Une procédure d'optimisation des dix paramètres de diffusion pour minimiser la RMS est alors mise en place :

1. les dix paramètres sont estimés un par un à la main jusqu'à avoir une idée des bornes de leur valeur optimale ;
2. un algorithme d'optimisation non-linéaire dit de Nelder-Mead est appliqué. Il consiste en la minimisation de RMS en réglant les dix paramètres précédemment définis par une procédure similaire à celle du simplexe. Cet algorithme est directement implémenté dans la fonction "*minimize*" du module *scipy* de Python. À noter qu'il recherche un minimum local, et n'est donc efficace que si les bornes des valeurs optimales ont été préalablement déterminées.

Les résultats de ces optimisations sont en tableau 8.2, 8.4, 8.3, et les évolutions de TE sont illustrées en figures 8.9 et 8.10.

TABLEAU 8.2 – Résultats de l’optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S21. R : diffusion radiale; T : diffusion tangentielle; L : diffusion longitudinale.

Δt [s]	Δx [mm]	θ [°]	w_{s0} [°]	k_{ws} [°C ⁻¹]	ρ_{ID} [kg.m ⁻³]
1200	1	1/2	0,2685	$3,39 \times 10^{-4}$	390
Direction de diffusion		D_0 [m ² .s ⁻¹]	k_D [m ² .s ⁻¹]	S_x [m.s ⁻¹]	RMS ($\times 10^{-2}$) [°]
R		$9,64 \times 10^{-11}$	$7,61 \times 10^{-12}$	6×10^{-8}	0,32
T		$9,5 \times 10^{-11}$	$1,51 \times 10^{-11}$	6×10^{-8}	0,24
L		$3,93 \times 10^{-10}$	$-1,42 \times 10^{-10}$	$8,97 \times 10^{-6}$	0,94

TABLEAU 8.3 – Résultats de l’optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S05, balance WMS-KE-8. L : diffusion longitudinale.

Δt [s]	Δx [mm]	θ [°]	w_{s0} [°]	k_{ws} [°C ⁻¹]	ρ_{ID} [kg.m ⁻³]
1200	1	1/2	0,3032	$2,74 \times 10^{-9}$	333
Direction de diffusion		D_0 [m ² .s ⁻¹]	k_D [m ² .s ⁻¹]	S_x [m.s ⁻¹]	RMS ($\times 10^{-2}$) [°]
L		$3,38 \times 10^{-10}$	$-7,89 \times 10^{-12}$	$1,49 \times 10^{-5}$	0,460

TABLEAU 8.4 – Résultats de l’optimisation des paramètres de diffusion pour les essais 1D des échantillons issus de la poutre S03, balance WMS-KE-9. L : diffusion longitudinale.

Δt [s]	Δx [mm]	θ [°]	w_{s0} [°]	k_{ws} [°C ⁻¹]	ρ_{ID} [kg.m ⁻³]
1200	1	1/2	0,2902	$4,2 \times 10^{-4}$	368
Direction de diffusion		D_0 [m ² .s ⁻¹]	k_D [m ² .s ⁻¹]	S_x [m.s ⁻¹]	RMS ($\times 10^{-2}$) [°]
L		$5,37 \times 10^{-10}$	$-3,39 \times 10^{-11}$	$3,20 \times 10^{-6}$	0,214

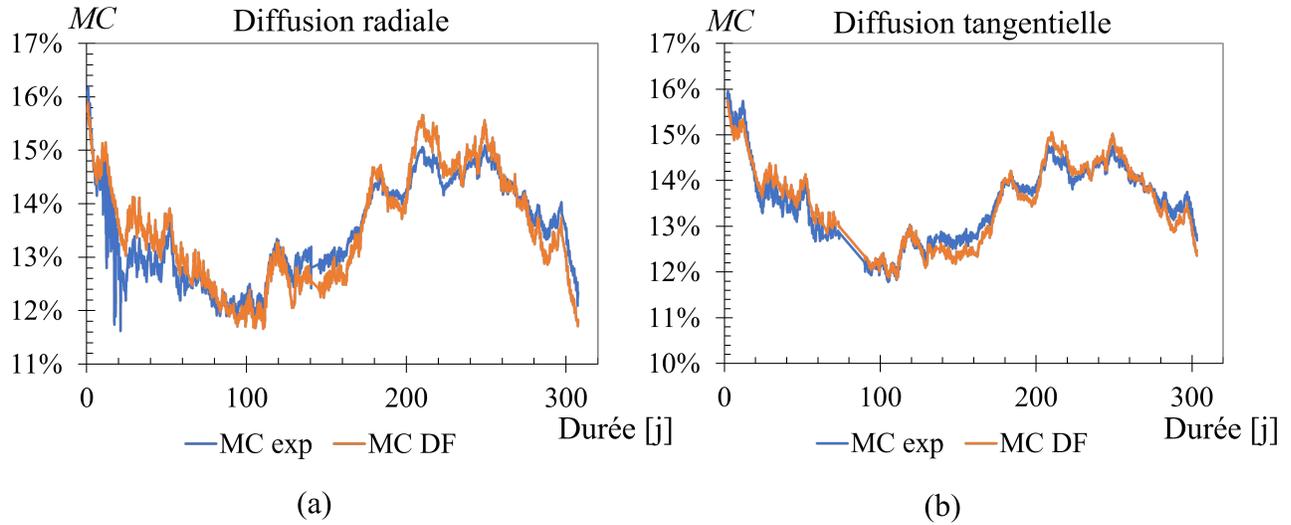


FIGURE 8.9 – Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de l’approximation DF, à partir de la teneur en eau (TE) en fonction de la durée des essais : (a) pour l’éprouvette en diffusion purement radiale, (b) pour l’éprouvette en diffusion purement tangentielle.

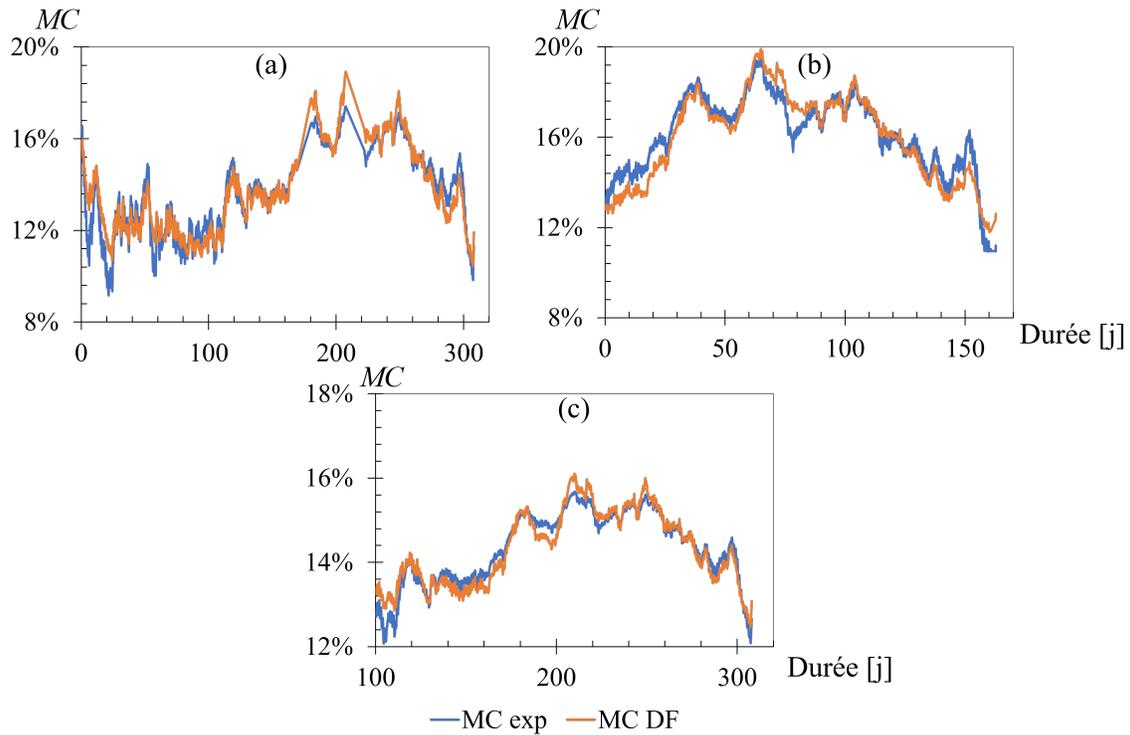


FIGURE 8.10 – Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de l’approximation DF de diffusion longitudinale, à partir de la teneur en eau (TE) en fonction de la durée des essais : (a) pour la balance wms-ke-5, (b) pour la balance wms-ke-8, (c) pour la balance wms-ke-9.

Le coefficient de diffusion tangentiel serait plus sensible à la température que celui dans la direction radiale (k_{DT} deux fois plus grand que k_{DR}), mais D_{R0} et D_{T0} seraient semblables, de l'ordre de $9,5 \times 10^{-11}$. En théorie, D_{T0} est environ deux fois supérieur à D_{R0} , mais les valeurs expérimentales de la littérature montrent plutôt une quasi égalité entre D_{T0} et D_{R0} , Agoua et al. (2001) pour des essences tempérées et Alkadri (2020) pour des essences tropicales. Nguyen (2016) a obtenu un D_{0RT} de $2,2 \times 10^{-11}$ et Asseko (2022) 7×10^{-11} pour le sapin pectiné. À noter que les cernes de l'éprouvette figure 8.6(a) n'offrent pas une diffusion purement tangentielle ou radiale. Le coefficient de diffusion longitudinale est estimé à $3,6 \times 10^{-10}$ pour S21 et S05, et $5,37 \times 10^{-10}$ pour S03, soit trois à cinq fois plus grand que le coefficient transverse. Ces résultats se situent entre Nguyen (2016) qui a obtenu $D_{0L} = 3,39 \times 10^{-9}$ et Asseko (2022) 4×10^{-11} pour le sapin pectiné. Siau (1984) évoque un rapport théorique de 10 entre diffusion longitudinale et transverse mais là encore, les résultats expérimentaux de la littérature ne sont pas unanimes (Agoua et al., 2001; Alkadri, 2020).

Le coefficient d'échange surfacique estimé est environ cent fois plus grand pour les faces de diffusion longitudinale $S_L = 8,97 \times 10^{-6}$ que transverse $S_{RT} = 6,00 \times 10^{-8}$ pour S21. Asseko (2022) a expérimentalement identifié cette même hiérarchie bien qu'avec un rapport plus faible : $S_L = 8,45 \times 10^{-7}$ et $S_{RT} = 6,86 \times 10^{-8}$. Enfin, en ramenant la teneur en eau de saturation à 20° C à partir des résultats de w_{s0} et k_{ws} obtenus, les valeurs atteintes sont : 26,3% pour S21, 30,32% pour S05 et 29% pour S03. En comparaison, la valeur de référence de CIRAD (2012) à 20° C est 29%, plus en adéquation avec les résultats de S05 et S03.

RMS est inférieure à 0,01, signifiant qu'en moyenne, l'approximation DF s'écarte de moins de 1% de la valeur expérimentale de TE. C'est une bien meilleure précision que des humidimètres classiques, tout en permettant d'avoir le profil hydrique (TE en chaque point) et de faire des prévisions. Ce travail présente des sources d'erreurs numériques et expérimentales, voici une liste de celles qui ont été identifiées :

- **Sources d'erreurs expérimentales**

Comme montré précédemment, les mesures des pesées en extérieur sont bruitées par le vent et les variations thermo-hydriques. Elles sont en partie corrigées par le filtre de Hampel mais il subsiste nécessairement du bruit.

De même, les échantillons ne sont pas parfaitement homogènes comme le suppose l'approximation DF : ils présentent des fentes (figure 8.6), des hétérogénéités anatomiques voire même des petits noeuds. Au cours de la diffusion transverse les cernes ne sont d'ailleurs pas parfaitement tangentiel ou radial, biaisant les résultats obtenus sur R et T.

Enfin, le colmatage est seulement hydrique, impliquant un transfert thermique même dans les directions supposées colmatées. Par thermophorèse, la diffusion est ainsi accélérée ou ralentie dans la direction considérée par rapport à l'approximation DF.

Pour réduire ces sources d'erreurs, le bruit pourrait être atténué par un filtre plus avancé que celui de Hampel, type filtre de Kalman. Les éprouvettes transverses pourraient être préparées pour être purement en diffusion tangentielle ou purement en diffusion radiale, quitte à les

usiner. Un colmatage thermique pourrait être ajouté en plus du colmatage hydrique, comme cela a été expérimenté sur l'éprouvette figure 8.5(b).

- **Sources d'erreurs de l'approximation**

L'approximation DF décrite ici ne prend pas en compte les variations de coefficient de diffusion avec la température ainsi que les variations des coefficients d'échange S_{RT} et S_L . Elle ne prend pas en compte la diffusion thermique, même dans la direction de diffusion considérée.

Enfin, les paramètres du modèle utilisé pour déterminer les hystérésis de sorption ne sont pas spécifiquement adaptés au sapin pectiné d'Auvergne (paramètres $\phi, a, \alpha_{gp}, \beta_{gp}$).

Pour réduire ces sources d'erreurs, le coefficient de diffusion pourrait varier avec la température selon l'équation (8.4), augmentant ainsi le nombre de paramètres de réglage. Les coefficients d'échange S_{RT} et S_L pourraient être estimés en utilisant les nombres adimensionnels de la mécanique des fluides qui prendraient en compte la température et la vitesse du vent. L'état de surface paraît cependant plus délicat à prendre en compte. L'équation de la chaleur pourrait être résolue avant l'équation de Fick afin d'actualiser les paramètres matériaux important dans la diffusion hydrique. Enfin, des essais préalables en enceinte climatique permettraient de déterminer les paramètres de sorption du sapin pectiné d'Auvergne.

Conclusion et perspectives sur l'étude de la diffusion du sapin pectiné

La diffusion de l'eau dans le bois se formalise par l'équation proposée par Fick (8.1). Le coefficient de diffusion D_x de cette équation n'est pas constant, il est notamment sensible aux variations de température et de teneur en eau. L'échange de molécules d'eau entre l'air et le bois se formalise par la loi de Newton (8.5), définissant le coefficient d'échange surfacique S_x . Le problème est donc posé en deux équations : une définissant les échanges à l'interface entre l'air et le bois (conditions aux limites) et l'autre en définissant la diffusion de l'eau au sein du bois. Dans un cas unidimensionnel, la solution peut aisément être approximée par la méthode des différences finies. Un θ -schéma est utilisé, formalisant le système d'équation (8.20). Ce schéma est inconditionnellement stable et convergent d'ordre 2. Il est résolu par un script Python en annexe G. La solution approximée a été testée sur une solution de référence analytique, attestant de sa fiabilité pour un cas simple.

La résolution numérique du problème a ensuite été comparée à des résultats expérimentaux. Ces résultats proviennent de pesées automatiques d'éprouvettes de sapin pectiné par un système de balance en environnement extérieur. Sur cinq des huit essais réalisés, la diffusion était 1D grâce à un colmatage dans les autres directions. Ces mesures sont bruitées et un filtrage des valeurs aberrantes a été appliqué. Les paramètres d'hystérésis de sorption sont fixés ($\phi, a, \alpha_{gp}, \beta_{gp}$), laissant dix paramètres de réglage pour approximer la solution sur les cinq essais considérés : $w_{s0}, k_{ws}, D_{0R}, D_{0T}, D_{0L}, k_{DR}, k_{DT}, k_{DL}, S_{RT}, S_L$. Ces paramètres sont optimisés par un algorithme de Nelder-Mead afin de minimiser RMS entre la solution approximée et l'expérimental. Finalement, une RMS moyenne systématiquement inférieure à 0,01 est obtenue, ce qui est nettement plus précis qu'un dispositif de mesure expérimentale de TE. L'ordre de grandeur des paramètres physiques optimisés est physiquement cohérent et proche des résultats issus de la littérature.

Par bien des égards ces résultats pourraient être améliorés : filtrer les mesures plus efficacement, assurer une diffusion purement tangentielle ou radiale, ajouter un colmatage thermique, prendre en compte les variations du coefficient de diffusion avec la température, prendre en compte des variations des coefficients d'échange S_{RT} et S_L , résoudre l'équation de la chaleur avant l'équation de diffusion ou encore déterminer les paramètres d'hystérésis de sorption du sapin par des essais préalables en enceinte climatique.

L'approximation DF devrait être passée en 2D, afin de l'appliquer aux trois essais RT déjà réalisés ou même sur les poutres en dimensions d'emploi chargées en fluage. L'application des différences finies à un problème 2D est déjà bien connue dans la littérature et ne représente pas un challenge en soi, elle augmenterait par contre le temps de calcul. Rigoureusement, en diffusion 2D il faudrait déterminer la part de diffusion tangentielle et la part de diffusion radiale dans la section à partir de la lecture des cernes, ce qui nécessite un découplage complet du processus.

Conclusion et perspectives

Rappel de la problématique

Ce travail porte sur la recherche expérimentale des propriétés mécaniques du bois. La problématique scientifique découle du travail de Pambou Nziengui (2019) : étudier les couplages entre fluage, fissuration et diffusion par une approche phénoménologique sur des essais à l'échelle 1. Par ailleurs, le financement régional et les projets de Clermont Auvergne INP l'insèrent dans un contexte de volonté de la filière de valoriser le sapin pectiné (*Abies alba*) d'Auvergne Rhône-Alpes, essence par ailleurs abondante dans la région mais faisant face à des problématiques de séchage.

Ce contexte a ainsi poussé à la réalisation d'une enquête de terrain auprès de professionnels et d'experts de la filière bois : scieurs, charpentiers, chercheurs et ingénieurs. Les problèmes de séchage ont alors été associés au phénomène de poches d'eau fréquemment présentes dans les grumes de sapin. Les solutions proposées par les artisans interrogés se basent sur des techniques de construction traditionnelles qui utilisaient déjà du bois vert. Une étude bibliographique sur les mécanismes de formation des poches d'eau et leurs impacts sur les propriétés du bois a également été menée. Aujourd'hui, pour que les solutions industrielles utilisent du bois vert ou s'inspirent des techniques traditionnelles, un travail scientifique est nécessaire pour mieux appréhender, comprendre et quantifier le comportement mécanique de telles structures. S'ajoute alors à ce travail une problématique filière qui s'inscrit dans cette démarche : étudier le comportement physico-mécanique du sapin pectiné à l'état vert ou partiellement séché pour des applications constructives.

Approche expérimentale du travail

Le matériel de cette étude expérimentale est un lot de 30 poutres issues de sapins pectinés locaux, reçues à l'état vert et en dimensions d'emploi ($4000 \times 175 \times 63 \text{ mm}^3$). Ce lot, fournit et classé C18 par la scierie du Forez, a été caractérisé par des essais non destructifs, des essais BING© pour la rigidité axiale et des mesures d'infradensité. Ces mesures ont permis de calculer un module spécifique et d'estimer la masse anhydre des poutres, permettant ensuite de calculer leur teneur en eau à chaque pesée. Ces données ont servi à former des "groupes d'homogénéité mécanique" utilisés pendant l'analyse des essais réalisés ultérieurement soit des essais de flexion 4-points en déplacement imposé et en fluage.

Les poutres ont été entaillées pour les essais de flexion afin d'exacerber une propagation de fissure. Une partie de ces poutres a été chargée à l'état vert, une autre partiellement séchée et une autre à l'état sec. La flèche centrale et l'ouverture de fissure étaient mesurées. Les essais en déplacement imposé ont été réalisés en intérieur, tandis que les essais de fluage l'ont été en environnement extérieur semi-abrité, c'est-à-dire abrité de la pluie mais pas du rayonnement solaire. Des mesures complémentaires de longueur de fissure, retrait-gonflement et température-humidité relative de l'air ont été réalisées pour les essais de fluage.

Les conditions de mesure en environnement extérieur étant difficiles, une méthode de suivi de marqueur polyvalente a été développée. Elle consiste à suivre des marqueurs de référence, uniques et facilement identifiables, collés sur la poutre et pour lesquels une homographie permet de corriger les erreurs dues au déplacement de l'appareil photo au cours de l'essai.

Enfin, la diffusion de l'eau dans le bois a été étudiée par des pesées automatiques successives sur des échantillons de sapin soumis à un environnement extérieur. Une approximation de la solution mathématique de l'équation de diffusion a été réalisée par la méthode des différences finies, afin de déduire des propriétés de diffusion à partir de ces essais.

Principaux résultats obtenus

La méthode de suivi de marqueur atteint une erreur relative au maximum de 0,28% malgré des conditions de mesure défavorables, tels les déplacements d'appareil photo et un léger déplacement hors-plan. Cette précision suffit pour observer des retraits-gonflements long-termes, des ouvertures et des longueurs de fissure. La polyvalence, l'adaptabilité et le coût attractif de cette méthode sont particulièrement prometteurs.

La réponse dite "instantanée" des essais de fluage a été analysée selon une procédure permettant de calculer la flèche centrale à 10 minutes après chargement. Ces résultats ont permis d'établir une corrélation entre le module d'élasticité axiale dynamique E^d d'une poutre non entaillée et celui statique d'une poutre entaillée E , corroborant les observations de Pambou Nziengui (2019). Les résultats montrent d'ailleurs que E , la densité ρ ou encore la teneur en eau d'une poutre ne sont pas des paramètres prédictifs de la résistance d'une poutre. Cette dernière semble plutôt associée à la présence des nœuds et des pentes de fil.

La réponse différée des essais de fluage a été analysée par l'intermédiaire de la flèche relative, en quelque sorte représentative du K_{def} de l'Eurocode 5 et de la complaisance relative. L'évolution de cette complaisance relative en fonction du logarithme de la durée était représentée par une succession de deux régressions linéaires de pentes différentes, comme si un seuil de transition existait entre un fluage lent puis un fluage plus rapide. Ceci corrobore les observations de Hunt (1999). Par ailleurs, les valeurs maximales atteintes de cette complaisance relative étaient plus élevées pour les poutres exposées au soleil ou chargées à l'état vert. Ce résultat suggère que si le bois vert flue davantage que le bois sec, cela est à mettre en regard d'autres paramètres tels que l'exposition au soleil, la position des nœuds ou encore les propriétés mécaniques initiales.

La mécanique de la rupture des poutres entaillées a également été analysée au cours des es-

sais de flexion. Les évolutions d’ouvertures de fissure ont permis d’identifier le développement d’une zone d’élaboration, conforme à la mécanique de la rupture quasi-fragile (Sorin, 2018). Par ailleurs, un modèle de RDM permettant de calculer la longueur de fissure en fonction de l’ouverture de fissure par des considérations géométriques a été développé et comparé aux mesures expérimentales. Seules quelques poutres développaient une fissure conforme aux hypothèses du modèle, qui dans ce cas montrait des résultats en adéquation avec l’expérimental. Des poutres apparemment peu rigides et peu denses se sont avérées très résistantes, et la présence de noeuds sur la trajectoire de fissure est supposée en être la cause. Finalement, les propagations de fissures ont toujours été montantes, ce qui suggère qu’une fissure ne se propage pas uniquement dans le sens du fil.

Après optimisation des propriétés de diffusion du sapin dans l’approximation DF, celle-ci s’éloignait d’un *RMS* inférieur à 1% des résultats expérimentaux. Les propriétés ainsi obtenues sont du même ordre de grandeur que celles de la littérature. En comparaison avec des dispositifs expérimentaux de mesure de teneur en eau, c’est une excellente précision sachant que le modèle DF permet également d’avoir le profil hydrique et de faire des prévisions.

Finalement, ce travail fournit un jeu de données expérimentales utiles pour de futurs modélisateurs, une première version d’un modèle de diffusion et a contribué au développement des méthodes expérimentales. Concernant la problématique filière, les résultats confirment que le K_{def} de l’Eurocode 5 qui prend en compte la teneur en eau, de même que le K_{mod} qui prend en compte la classe de service, doivent être adaptés si le bois est vert et soumis à un environnement extérieur. Toutefois, les résultats montrent également que la grande disparité des propriétés d’un même bois de résineux, due aux conditions de croissance de l’arbre ou à sa nodosité, est également importante. Ces éléments ne sont pris en compte que dans le classement visuel des poutres, qui attribue une résistance de flexion selon de nombreux paramètres dont la taille et le nombre de noeuds. La prise en compte des noeuds dans la résistance d’une poutre a déjà été étudiée numériquement, notamment en considérant les variations d’angle de fil locales qu’ils provoquent (VIGUIER et al., 2017; Lukacevic et al., 2019). Toutefois, ils sont généralement considérés comme des faiblesses. Le rôle des noeuds dans l’augmentation de la résistance des poutres entaillées, selon leur position, ouvre ainsi des nouvelles perspectives de recherche.

Des réponses définitives aux problématiques que la filière rencontre concernant l’usage du sapin pectiné en construction ne sont pas atteignables en une campagne expérimentale sur 30 poutres de sapin pectiné. Toutefois, il peut être souligné que ce lot s’est montré mécaniquement meilleur que la moyenne et que l’état vert n’était pas le seul facteur impactant la résistance d’une poutre. Bien qu’ayant une influence, la teneur en eau se couple avec d’autres facteurs tels que l’exposition au soleil, les hétérogénéités du bois ou encore le type de méthode constructive. En conséquence, l’épicéa ne devrait pas être préféré au sapin pectiné uniquement parce qu’il est plus simple à sécher, d’autant plus qu’il est davantage touché par les sécheresses que le sapin.

Limitations

Des limitations sont apparues en bilan de cette étude à la fois dans les entretiens auprès des professionnels, dans les outils expérimentaux utilisés et dans les hypothèses de travail. Ainsi, au cours de l'enquête de terrain, aucun charpentier industriel n'a été interrogé. L'avis de ces professionnels sur les solutions concernant les problématiques de séchage ou sur l'efficacité des constructions bois vert n'a pas été enquêté. De même, l'institut technologique FCBA mène de grandes études sur les propriétés du bois mais n'a pas été interrogé.

De nombreux éléments impactent probablement la précision de la méthode de suivi de marqueurs utilisée en environnement extérieur, mais le choix a été de se concentrer sur l'impact d'un angle de vue, de la distance entre l'appareil photo et les marqueurs et celui d'un léger déplacement hors plan. Enfin, l'impact des variations de luminosité ou des paramètres de l'appareil photo doivent avoir un impact moindre mais toutefois non nul.

Dans ce travail, il a été supposé que les poutres chargées au delà de 30% de teneur en eau étaient chargées à l'état vert. Or, du fait du premier séchage, toutes les poutres ayant été réhumidifiées ne représentent pas correctement un bois vert.

Les décharges-recharges réalisées au cours des essais de fluage ayant pour but de mesurer un module élastique à différents instants n'ont pas donné des résultats significatifs. En effet, les poids de 30 kg sont insuffisants et des décharges-recharges complètes auraient probablement été meilleures.

Les essais en environnement extérieur sont également sources de nombreuses erreurs de mesure, en particulier avec le bois. Les déformations de séchage ont été supposées n'être que du retrait en hauteur, mais des vrillages, tuilages et retraits en épaisseur sont évidemment apparus. En conséquence, les mesures de flèche centrale ou les calculs de complaisance relative ont pu être affectées sans qu'aucune correction ne soit apportée. Les prendre en compte ne changerait pas les évolutions globales observées, mais viendrait fiabiliser les valeurs numériques.

Les capteurs de déplacement LVDT ont du être placés sous les poutres chargées en fluage. Il est arrivé que lors de la rupture, des capteurs soient cassés. Idéalement, les capteurs de déplacement devraient être placés au-dessus des poutres.

Enfin, certaines hypothèses utilisées se sont avérées fausses, toutes les poutres n'étaient pas à l'état vert lors de la réception et les fissures ne sont jamais rectiligne horizontale, biaisant le calcul de la complaisance relative et le modèle analytique couplant longueur et ouverture de fissure.

Perspectives

Les résultats de ce travail et les limitations observées ouvrent de nombreuses perspectives dont les plus utiles et réalistes sont listées ci-dessous :

- **Sur les méthodes de mesures**

Les mesures automatiques sont nettement plus simples à analyser et plus utiles que des mesures manuelles. Automatiser la méthode de suivi de marqueur serait donc idéal, mais complexe à mettre en œuvre. À l'inverse, installer un système de mesure d'ouverture de fissure par des capteurs LVDT comme pratiqué sur les essais en déplacement imposé est simple à mettre en œuvre à condition d'avoir suffisamment de capteurs. Si de nouvelles poutres entaillées sont chargées en fluage en extérieur, il serait préférable d'installer des capteurs de déplacement pour la mesure automatique d'ouverture de fissure.

- **Sur les essais de flexion**

Afin de comprendre et quantifier les propriétés mécaniques du bois à l'état vert, il serait préférable de mener une campagne expérimentale à grande échelle impliquant diverses scieries locales. Le bois devrait être fourni à l'état vert au fur et à mesure de la campagne, de façon à éviter toute étape de réhumidification. Par ailleurs, des informations sur les conditions de croissance et d'abattage des arbres seraient grandement utiles pour l'analyse des essais.

L'analyse de l'évolution du fluage en double pente gagnerait à être approfondie. Par exemple, en réalisant une analyse statistique sur les valeurs de ces pentes et sur le point de transition afin d'établir des facteurs prédictifs de la vitesse de fluage à un instant donné.

L'analyse des trajectoires mécanosorptives gagnerait également à être développée. Il s'agirait d'estimer la valeur de la pente de la complaisance relative en fonction de la teneur en eau, lorsque cette dernière oscille autour d'une valeur stable. Cette grandeur serait caractéristique d'un pseudo-fluage et pourrait être comparée à des résultats de la littérature.

- **Sur la mécanique de la rupture**

Le modèle RDM de calcul de longueur de fissure en fonction de l'ouverture pourrait prendre en compte les mesures de hauteur de fissure afin de calculer précisément la variation de moment quadratique lorsque la fissure évolue. En effet une propagation rectiligne horizontale est en réalité un cas marginal de propagation de fissure dans cette configuration d'essai. Ainsi, le modèle pourrait être appliqué à l'ensemble des poutres chargées.

D'une façon plus générale, les observations macroscopiques des faciès de rupture, identifiant les fissures montantes et les nœuds comme renforts à la propagation sont des sujets intéressants sur lesquels de nouvelles investigations pourraient être menées. Notamment, un modèle éléments finis de poutres entaillées chargées en flexion 4-points et contenant des nœuds sur la trajectoire de fissure donnerait des informations hautement utiles.

- **Sur la diffusion**

Des essais en enceinte climatique permettraient de tracer les isothermes de sorption du sapin pectiné du Massif Central et donc d'estimer plus précisément les paramètres du modèle "*gripped-box*" : α_{GP} , β_{GP} . Ensuite, le code de diffusion serait généralisé à des cas bidimensionnels et pourrait alors être appliqué aux poutres chargées en fluage extérieur. Les valeurs de teneur en eau seraient ainsi nettement plus précises, de même que la pente du pseudo-fluage évoqué précédemment.

Une lecture minutieuse des cernes de croissance des poutres, montrés en annexe C donnerait les parts de diffusion tangentielle et radiale observées dans les mesures de retrait. À partir de

cela, les coefficients de retrait respectifs pourraient être estimés et associés aux coefficients de diffusion calculés à partir de l'approximation différences finies.

Enfin, l'utilisation du bois vert ou partiellement séché en structure, introduit dans ce travail par la problématique filière, ne se développera correctement qu'à la condition que les normes de construction telle que l'Eurocode 5 soient plus robustes dans leur prise en compte des caractéristiques d'une poutre. L'amélioration d'une norme passe par un agrégat de résultats scientifiques consensuels, nécessitant des études à grande échelle. Sur le bois, ce type de projet est généralement multi-acteurs et inclut FCBA et FiBois. Les essais de fluage à l'échelle 1 sont toutefois longs et complexes à mettre en place, et ce travail apporte un exemple de configuration d'essai et des premiers résultats concernant le sapin pectiné du Massif Central.

Bibliographie

D.F. Abawi, J. Bienwald, et R. Dorner. Accuracy in optical tracking with fiducial markers : an accuracy function for ARToolKit. In *Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 260–261, November 2004. doi : 10.1109/ISMAR.2004.8.

Raoul Adjovi Loko. Fissuration des éléments en bois sous sollicitation hydriques. Rapport de stage, Université de Limoges, Clermont-Ferrand, 2015.

AFNOR. NF EN 1995-1-1, 2004. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-199511/eurocode-5-conception-et-calcul-des-structures-en-bois-partie-11-generalite/fa102394/26075>.

AFNOR. NF EN 408+A1 - Structures en bois. Bois de structure et bois lamellé-collé., 2012. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-408-a1/structures-en-bois-bois-de-structure-et-bois-lamellecolle-determination-de/fa178999/39837>.

AFNOR. NF EN 338, 2016. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-338/bois-de-structure-classes-de-resistance/fa170486/57555>.

AFNOR. NF B52-001-1, 2018. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-b520011/regles-dutilisation-du-bois-dans-la-construction-classement-visuel-pour-le/fa190902/80578>.

AFNOR. NF EN 14081-2, 2022a. URL <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-140812/structures-en-bois-bois-de-structure-a-section-rectangulaire-classe-pour/fa183210/82163>.

AFNOR. NF EN 14081-3, 2022b. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-140813/structures-en-bois-bois-de-structure-a-section-rectangulaire-classe-pour-sa/fa160802/39073>.

E. Agoua, S. Zohoun, et P. Perré. A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions : determination of the best fitting

- method by numerical simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02682129>.
- Ahmad Alkadri. *Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent*. These de doctorat, Montpellier, September 2020. URL <https://www.theses.fr/2020MONTS039>.
- Sencer Alkan, Yaoli Zhang, et Felix Lam. Moisture Distribution Changes and Wetwood Behavior in Subalpine Fir Wood during Drying Using High X-Ray Energy Industrial CT Scanner. *Drying Technology*, 25(3) :483–488, March 2007. ISSN 0737-3937. doi : 10.1080/07373930601184023. URL <https://doi.org/10.1080/07373930601184023>. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/07373930601184023>.
- Tancrede Alméras, Joseph Gril, Delphine Jullien, et Meriem Fournier. Les contraintes de croissance dans les tiges : modélisation de leur mise en place et de leur fonction biologique. *Revue Forestière Française*, 2008. ISSN 1951-6827, 0035-2829. doi : 10.4267/2042/28374. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546298>.
- Martian Asseko. *Effet de la mécanosorption et de l'hygroviscoélasticité sur la fissuration des feuillus gabonais et résineux européens*. phdthesis, Université Clermont Auvergne, June 2022. URL <https://theses.hal.science/tel-03953610>.
- Back et Salmen. Transient effects of moisture sorption on the strength properties of paper and wood-based materials. *Svensk Papperstidning*, 1983. ISSN 0346-2188. URL https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Transient+effects+of+moisture+sorption+on+the+strength+properties+of+paper+and+wood-based+materials.&author=Back+E.L.&publication_year=1983.
- Ernst Back, Lennart Salmén, et Richardson. Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi Journal*, 65 :107110, July 1982.
- Ricardo Baettig, Jorge Cornejo, et Jorge Guajardo. Detection and delimitation of false heartwood in Populus using an electrical impedance method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(6) :1003–1008, November 2017. ISSN 1436-736X. doi : 10.1007/s00107-017-1176-9. URL <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1176-9>.
- Sandrine Bardet. *Comportement thermoviscoélastique transverse du bois humide : application à une essence tropicale dense : Bocoa Prouacensis Aubl.* These de doctorat, Montpellier 2, January 2001. URL <https://www.theses.fr/2001MON20195>.
- BASF Wolman GmbH. Certificat de qualité Wolsit EC-100 P2, 2019.
- Z. P. Bazant et J. C. Chern. Concrete creep at variable humidity : constitutive law and mechanism. *Materials and Structures*, 18(1) :1–20, January 1985. ISSN 1871-6873. doi : 10.1007/BF02473360. URL <https://doi.org/10.1007/BF02473360>.

- Yves Benoit, Bernard Legrand, et Vincent Tastet. *Calcul des structures en bois*. Librairie Eyrolles, 2007.
- Loanne Bigorgne. *Mécanique et mécanismes de rupture dans le plan transverse du bois résineux*. PhD thesis, INSA Lyon, Lyon, 2011.
- Antoine Billard, Rodolphe Bauer, Frédéric Mothe, Francis Colin, et Fleur Longuetaud. Wood Density Variations between Tree Components Should Be Considered to Correctly Estimate Tree Biomass Available for Different Uses. *HAL - archives ouvertes*, 2019.
- M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin, J.-C. Dupré, M. Fazzini, M. Grédiac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.-J. Orteu, L. Robert, Y. Surrel, P. Vacher, et B. Wattrisse. Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors : Methodology and Results. *Experimental Mechanics*, 49(3) :353–370, June 2009. ISSN 1741-2765. doi : 10.1007/s11340-008-9204-7. URL <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9204-7>.
- Brancheriau. Principe de mesure : la méthode BING, 2007.
- Brancheriau. BING - Installation and quick start guide., 2020.
- Loïc Brancheriau. *EXPERTISE MECANIQUE DES SCIAGES PAR ANALYSES DES VIBRATIONS DANS LE DOMAINE ACOUSTIQUE*. phdthesis, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, September 2002. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008291>.
- Loïc Brancheriau. *Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites*. thesis, UM2, 2013. URL <https://agritrop.cirad.fr/570011/>.
- Loïc Brancheriau et Henri Baillères. Natural vibration analysis of clear wooden beams : A theoretical review. *Wood Science and Technology*, 2002. doi : 10.1007/s00226-002-0143-7. URL <https://agritrop.cirad.fr/520385/>.
- Joseph Brihiez. Une forêt pour charpente : enquête avec le bois vert pour explorer les liens entre des charpentiers et des forêts. Mémoire de recherche, Muséum national d’Histoire naturelle, September 2021. URL <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03644123>.
- Fabrice Brémand, Mario Cottron, Pascal Doumalin, Jean-Christophe Dupré, Arnaud Germaneau, et Valéry Valle. Mesures en mécanique par méthodes optiques. *Techniques de l’ingénieur*, page 28, 2011.
- Lucie Bulteau, Florence Mathieu, Elorry Masselin, Mbete Edvan, Jullien Delphine, Langbour Patrick, Clair Etienne, et Malard Morgane. Les usages historiques du sapin pectiné et sa place dans le patrimoine bâti du Livradois-Forez. Etude de cas, Master Sciences du bois, Montpellier, Montpellier, 2022.
- Maxime Cailleret. *Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence*. These de doctorat, Aix-Marseille 3, July 2011. URL <https://www.theses.fr/2011AIX30012>.

- CIRAD. Fiche TROPIX 7 *Abies alba*, 2012.
- Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers. La charpente et la construction bois. Tome 4.*, volume 4. Librairie du compagnonnage, 1977.
- M.P.C. Conrad, Gregory Smith, et G. Fernlund. Fracture of solid wood : A review of structure and properties at different length scales. *Wood and Fiber Science*, 35 :570–584, October 2003.
- Alain Corbin. *La douceur de l'ombre*. Fayard, fayard edition, 2013. URL <https://www.fayard.fr/histoire/la-douceur-de-lombre-9782213661650>.
- M. P. Coutts et J. Rishbeth. The formation of wetwood in Grand fir. *European Journal of Forest Pathology*, 7(1) :13–22, 1977. ISSN 1439-0329. doi : <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1977.tb00556.x>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0329.1977.tb00556.x>. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1439-0329.1977.tb00556.x>.
- John Crank. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford, 2nd edition edition, 1975. ISBN 978-0-19-853411-2.
- Jana Dlouhá, Bruno Clair, Olivier Arnould, Petr Horáček, et Joseph Gril. On the time-temperature equivalency in green wood : Characterisation of viscoelastic properties in longitudinal direction. *Holzforschung*, 63(3) :327–333, May 2009. ISSN 1437-434X. doi : [10.1515/HF.2009.059](https://doi.org/10.1515/HF.2009.059). URL <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/HF.2009.059/html>. Publisher : De Gruyter Section : Holzforschung.
- Douglas Hamilton. Wetwood and slime flux in landscape trees. *Journal of Arboriculture*, pages 247 – 249, 1980.
- FCBA. Séchage du sapin. Aspects techniques., 2019.
- FCBA. Memento de la filière bois. Technical report, FCBA, 2020.
- AuRA FiBois. Dossier thématique : le sapin pectiné. *Mention bois*, 17, 2019a.
- BFC FiBois. Etude de caractérisation du sapin du Jura, 2019b.
- Forstner et Gulch. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. *Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, page 25, 1987.
- S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, et M. J. Marín-Jiménez. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6) :2280–2292, June 2014. ISSN 0031-3203. doi : [10.1016/j.patcog.2014.01.005](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320314000235>.

- Danila Germanese, Giuseppe Riccardo Leone, Davide Moroni, Maria Antonietta Pascali, et Marco Tampucci. Long-Term Monitoring of Crack Patterns in Historic Structures Using UAVs and Planar Markers : A Preliminary Study. *Journal of Imaging*, 4(8) :99, August 2018. doi : 10.3390/jimaging4080099. URL <https://www.mdpi.com/2313-433X/4/8/99>. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Balazs Goncz, Ferenc Divos, et Laszlo Bejo. Detecting the presence of red heart in beech (*Fagus sylvatica*) using electrical voltage and resistance measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(2) :679–686, March 2018. ISSN 1436-736X. doi : 10.1007/s00107-017-1225-4. URL <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1225-4>.
- Alan Arnold Griffith et Geoffrey Ingram Taylor. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221(582-593) :163–198, January 1921. doi : 10.1098/rsta.1921.0006. URL <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.1921.0006>. Publisher : Royal Society.
- Joseph Gril. *Une modelisation du comportement hygro-rheologique du bois a partir de sa microstructure*. These de doctorat, Paris 6, January 1988. URL <https://www.theses.fr/1988PA066271>.
- Joseph Gril. Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches. In *International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015) and 60th Anniversary of the Japan Wood Research Society*, volume IAWPS 2015 proceedings, March 2015. URL <https://hal.science/hal-01295470>.
- P. U. A. Grossman. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Science and Technology*, 10(3) :163–168, September 1976. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/BF00355737. URL <https://doi.org/10.1007/BF00355737>.
- M. Grédiac, B. Blaysat, et F. Sur. Extracting Displacement and Strain Fields from Checkerboard Images with the Localized Spectrum Analysis. *Experimental Mechanics*, 59 (2) :207–218, February 2019. ISSN 1741-2765. doi : 10.1007/s11340-018-00439-2. URL <https://doi.org/10.1007/s11340-018-00439-2>.
- Daniel Guitard. *Mécanique du matériau bois et composites*. Collection Nabla. Librairie Eyrolles, 1987. URL <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/mecanique-du-materiau-bois-et-composites-9782854281521/>.
- Gustafsson. A study of strength of notched beams. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures*, 1998.
- Richard Hartley et Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, Cambridge, 2 edition, 2004. ISBN 978-0-521-54051-3. doi : 10.1017/CBO9780511811685. URL <https://www>.

cambridge.org/core/books/multiple-view-geometry-in-computer-vision/
0B6F289C78B2B23F596CAA76D3D43F7A.

Hearmon et Paton. Moisture content changes and creep of wood. *Forest products journal*, 1964.

Siegfried M. Holzer, Joseph R. Loferski, et David A. Dillard. A Review Of Creep In Wood : Concepts Relevant To Develop Long-Term Behavior Predictions For Wood Structures. *Wood and Fiber Science*, pages 376–392, 1989. ISSN 0735-6161. URL <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1389>.

D. G. Hunt. A unified approach to creep of wood. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1991) :4077–4095, November 1999. doi : 10.1098/rspa.1999.0491. URL <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1999.0491>. Publisher : Royal Society.

David Hunt. The prediction of long-time viscoelastic creep from short-time data. *Wood Science and Technology*, 38(7) :479–492, November 2004. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/s00226-004-0244-6. URL <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0244-6>.

David G. Hunt. Creep trajectories for beech during moisture changes under load. *Journal of Materials Science*, 19(5) :1456–1467, May 1984. ISSN 1573-4803. doi : 10.1007/BF00563040. URL <https://doi.org/10.1007/BF00563040>.

David G. Hunt. The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties. *Journal of Materials Science*, 21(6) :2088–2096, June 1986. ISSN 1573-4803. doi : 10.1007/BF00547951. URL <https://doi.org/10.1007/BF00547951>.

IAWA. Multilingual glossary of terms used in wood anatomy, 1964.

Dragica Jeremic, Paul Cooper, et Usha Srinivasan. Comparative analysis of balsam fir wetwood, heartwood, and sapwood properties. *Canadian Journal of Forest Research*, 34 : 1241–1250, February 2011. doi : 10.1139/x03-287.

Joint Committee on Structural Safety. JCSS Probabilistic Model Code. Part 3 : Resistance Models. Technical report, JCSS, 2006.

Keisuke Kojiro, Yuzo Furuta, et Yutaka Ishimaru. Influence of histories on dynamic viscoelastic properties and dimensions of water-swollen wood. *Journal of Wood Science*, 54 (2) :95–99, April 2008. ISSN 1611-4663. doi : 10.1007/s10086-007-0926-4. URL <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-007-0926-4>. Number : 2 Publisher : SpringerOpen.

Franz F. P. Kollmann et Wilfred A. Côté. *Principles of Wood Science and Technology : I Solid Wood*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1968. ISBN 978-3-642-87930-2 978-3-642-87928-9. doi : 10.1007/978-3-642-87928-9. URL <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-87928-9>.

- Karol Kulasinski. *Physical and Mechanical Aspects of Moisture Adsorption in Wood Biopolymers Investigated with Atomistic Simulations*. Doctoral Thesis, ETH Zurich, 2015. URL <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/112291>. Accepted : 2017-08-03T10 :59 :12Z.
- Laurent Larrieu et Pierre Gonin. L'indice de biodiversité potentielle (ibp) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 2008. ISSN 1951-6827, 0035-2829. doi : 10.4267/2042/28373. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03449570>.
- Catherine Lenne. *Dans la peau d'un arbre : Secrets et mystères des géants qui vous entourent*. BELIN, Paris, illustrated édition edition, March 2021. ISBN 978-2-410-01818-9.
- Markus Lukacevic, Georg Kandler, Min Hu, Anders Olsson, et Josef Füssl. A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards. *Materials & Design*, 166 :107617, March 2019. ISSN 0264-1275. doi : 10.1016/j.matdes.2019.107617. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519300541>.
- Maisons paysannes de France. *Recueil technique charpentes et pans de bois*. Maisons paysannes de France, 2014.
- P. Malbezin, W. Piekarski, et B.H. Thomas. Measuring ARTootKit accuracy in long distance tracking experiments. In *The First IEEE International Workshop Augmented Reality Toolkit*, pages 2 pp.–, September 2002. doi : 10.1109/ART.2002.1107000.
- Mambili. Suivi d'endommagement par fissuration du bois vert via la modélisation numérique et la micro-tomographie à rayons X. Rapport de stage, Clermont Auvergne INP, Clermont Ferrand, 2017.
- Marylou Mantova, Stéphane Herbette, Hervé Cochard, et José M. Torres-Ruiz. Hydraulic failure and tree mortality : from correlation to causation. *Trends in Plant Science*, 27 (4) :335–345, April 2022. ISSN 1360-1385. doi : 10.1016/j.tplants.2021.10.003. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138521002788>.
- Ludovic Martin, Hervé Cochard, Stefan Mayr, et Eric Badel. Using electrical resistivity tomography to detect wetwood and estimate moisture content in silver fir (*Abies alba* Mill.). *Annals of Forest Science*, 78(3) :1–17, September 2021. ISSN 1297-966X. doi : 10.1007/s13595-021-01078-9. URL <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-021-01078-9>. Number : 3 Publisher : BioMed Central.
- J. F. Mazet et G. Nepveu. Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le sapin pectiné et l'épicéa commun. *Annales des Sciences Forestières*, 48(1) :87–100, 1991. ISSN 0003-4312, 1878-6545. doi : 10.1051/forest:19910107. URL <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19910107>. Publisher : EDP Sciences.

- Seddik Merakeb. *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. These de doctorat, Limoges, January 2006. URL <https://www.theses.fr/2006LIM00031>.
- Seddik Merakeb, Frédéric Dubois, et Christophe Petit. Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood Science and Technology*, 43(7) :575–589, November 2009. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/s00226-009-0249-2. URL <https://doi.org/10.1007/s00226-009-0249-2>.
- Cédric Montero. *Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois*. phd-thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2010. URL <https://theses.hal.science/tel-00583101>.
- Stéphane Morel, Nuno Dourado, et Gérard Valentin. Wood : a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation. *International Journal of Fracture*, 131(4) :385–400, February 2005. ISSN 1573-2673. doi : 10.1007/s10704-004-7513-0. URL <https://doi.org/10.1007/s10704-004-7513-0>.
- J. Mukudai. Evaluation on non-linear viscoelastic bending deflection of wood. *Wood Science and Technology*, 17(1) :39–54, March 1983. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/BF00351831. URL <https://doi.org/10.1007/BF00351831>.
- J. Mukudai et S. Yata. Modeling and simulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change. *Wood Science and Technology*, 20(4) :335–348, December 1986. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/BF00351586. URL <https://doi.org/10.1007/BF00351586>.
- C. W. Murdoch, R. J. Campana, et C. J. Biermann. Physical and chemical properties of wet wood in american elm (*Ulmus americana*). *Canadian Journal of Plant Pathology*, 9(1) :20–23, March 1987. ISSN 0706-0661. doi : 10.1080/07060668709501906. URL <https://doi.org/10.1080/07060668709501906>. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/07060668709501906>.
- Rafael Muñoz-Salinas, Manuel J. Marín-Jimenez, Enrique Yeguas-Bolivar, et Rafael Medina-Carnicer. Mapping and Localization from Planar Markers. *arXiv :1606.00151 [cs]*, January 2017. URL <http://arxiv.org/abs/1606.00151>. arXiv : 1606.00151.
- Ryogo Nakada. Within-Stem Water Distribution in Living Trees Of Some Conifers. *IAWA Journal*, 27(3) :313–327, January 2006. ISSN 0928-1541, 2294-1932. doi : 10.1163/22941932-90000157. URL https://brill.com/view/journals/iawa/27/3/article-p313_7.xml. Publisher : Brill Section : IAWA Journal.
- Ryogo Nakada, Naoki Okada, Takahisa Nakai, Katsushi Kuroda, et Satoshi Nagai. Water potential gradient between sapwood and heartwood as a driving force in water accumulation in wetwood in conifers. *Wood Science and Technology*, 53(2) :407–424, March 2019. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/s00226-019-01081-4. URL <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01081-4>.

- T. Nakano. Analysis of creep of wood during water adsorption based on the excitation response theory. *Journal of Wood Science*, 45(1) :19–23, February 1999. ISSN 1611-4663. doi : 10.1007/BF00579519. URL <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/BF00579519>. Number : 1 Publisher : SpringerOpen.
- Sung Lam Nguyen. *Modélisation hydromécanique du bois : application au sapin blanc du Massif Central*. These de doctorat, Clermont-Ferrand 2, July 2016. URL <https://www.theses.fr/2016CLF22717>.
- Hisashi Ohsaki, Yoshitaka Kubojima, Mario Tonosaki, et Masamitsu Ohta. Vibrational properties of wetwood of todomatsu (*Abies sachalinensis*) at high temperature. *Journal of Wood Science*, 53(2) :134–138, April 2007. ISSN 1611-4663. doi : 10.1007/s10086-006-0828-x. URL <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0828-x>.
- Wiesław Olek et Jan Bonarski. Influence of cyclic sorption on wood ultrastructure. *Biore-sources*, 7 :1729–1739, February 2012. doi : 10.15376/biores.7.2.1729-1739.
- OLERGIE et AuRA FiBois. Analyse et optimisation du séchage du sapin, 2019.
- Claude Feldman Pambou Nziengui. *Fissuration du bois en climat variable sous charges de longues durées : applications aux essences européennes et gabonaises*. These de doctorat, Clermont Auvergne, July 2019. URL <https://www.theses.fr/2019CLFAC018>.
- Claude Feldman Pambou Nziengui, Rostand Moutou Pitti, Eric Fournely, Joseph Gril, Gaël Godi, et Samuel Ikogou. Notched-beam creep of Douglas fir and white fir in outdoor conditions : Experimental study. *Construction and Building Materials*, 196 :659–671, January 2019. ISSN 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.139. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818328265>.
- Pedersen. *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. PhD thesis, DTU, Copenhagen, 1990. Last Modified : 2013-07-25T08 :05+02 :00.
- Patrick Perré et Osmar Aguiar. Fluage du bois « vert » à haute température (120 °C) : expérimentation et modélisation à l’aide d’éléments de Kelvin thermo-activés. *ANNALS OF FOREST SCIENCE*, 56(5) :403–416, 1999. ISSN 0003-4312. doi : 10.1051/forest:19990505. URL <http://www.afs-journal.org/10.1051/forest:19990505>.
- Phan. Modélisation numérique d’une poutre entaillée en bois chargée en flexion 4-points. Rapport de stage, Clermont Auvergne INP, Clermont-Ferrand, 2019.
- Ngoc Anh Phan. *Simulation of time-dependent crack propagation in a quasi-brittle material under relative humidity variations based on cohesive zone approach : application to wood*. phdthesis, Université de Bordeaux, January 2016. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314118>.

- Nhat-Tung Phan, François Auslender, Joseph Gril, et Rostand Moutou Pitti. Influence of the cross-linking of the cellulosic fibrillar network on the effective hygro-mechanical behavior of the wood cell wall. *Acta Mechanica*, 233(11) :4985–5007, November 2022. ISSN 1619-6937. doi : 10.1007/s00707-022-03355-8. URL <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03355-8>.
- Valérie Pittet, editor. *Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée*. EPFL, Lausanne, 1996. doi : 10.5075/epfl-thesis-1526.
- Guillaume Pot, Evelyne Toussaint, et Coutand Catherine. Viscoelastic Behaviour of Maturing Green Poplar Wood. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 1, June 2013. ISSN 978-3-319-00770-0. doi : 10.1007/978-3-319-00771-7_54.
- S. P. Rawat et D. P. Khali. Enthalpy-entropy compensation during sorption of water in wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 60(5) :787–790, 1996. ISSN 1097-4628. doi : 10.1002/(SICI)1097-4628(19960502)60:5<787::AID-APP18>3.0.CO;2-W. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291097-4628%2819960502%2960%3A5%3C787%3A%3AAID-APP18%3E3.0.CO%3B2-W>.
_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/%28SICI%291097-4628%2819960502%2960%3A5%3C787%3A%3AAID-APP18%3E3.0.CO%3B2-W>.
- Hassen Riahi, Rostand Moutou Pitti, Frédéric Dubois, et Alaa Chateaneuf. Mixed-mode fracture analysis combining mechanical, thermal and hydrological effects in an isotropic and orthotropic material by means of invariant integrals. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 85 :424–434, October 2016. ISSN 0167-8442. doi : 10.1016/j.tafmec.2016.06.002. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216300362>.
- Romain Rémond, Giana Almeida, et Patrick Perré. The gripped-box model : A simple and robust formulation of sorption hysteresis for lignocellulosic materials. *Construction and Building Materials*, 170 :716–724, May 2018. ISSN 0950-0618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.116. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818303659>.
- Jasna S. Stevanic et Lennart Salmén. Molecular origin of mechano-sorptive creep in cellulosic fibres. *Carbohydrate Polymers*, 230 :115615, February 2020. ISSN 01448617. doi : 10.1016/j.carbpol.2019.115615. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0144861719312834>.
- Lennart Salmén et Per A. Larsson. On the origin of sorption hysteresis in cellulosic materials. *Carbohydrate Polymers*, 182 :15–20, February 2018. ISSN 01448617. doi : 10.1016/j.carbpol.2017.11.005. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014486171731281X>.
- SEDIBOIS. *Structures en bois aux états limites - Tome 1 - UNFCMP - Librairie Eyrolles*. Librairie Eyrolles, 2000. URL <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/structures-en-bois-aux-etats-limites-tome-1-9782212118322/>.

- John Finn Siau. *Transport Processes in Wood*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1984. doi : 10.1007/978-3-642-69213-0.
- William T. Simpson. Predicting Equilibrium Moisture Content of Wood by Mathematical Models. *Wood and Fiber Science*, pages 41–49, 1973. ISSN 0735-6161. URL <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/740>.
- E. Sorin, J. L. Coureau, M. Chaplain, F. Lanata, A. Cointe, et P. Galimard. Design de poutres entaillées en bois par les courbes de résistance. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1) :196–203, June 2016. ISSN 2680-1000. doi : 10.26168/ajce.34.1.24. URL <https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/ajce.34.1.24>. Number : 1.
- Edouard Sorin. *Fissuration en modes mixtes dans le bois : diagnostic et évaluation des méthodes de renforcement local*. These de doctorat, Bordeaux, November 2018. URL <https://www.theses.fr/2018BORD0264>.
- L. C. E. Struik. Physical aging in plastics and other glassy materials. *Polymer Engineering & Science*, 17(3) :165–173, 1977. ISSN 1548-2634. doi : 10.1002/pen.760170305. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.760170305>. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pen.760170305>.
- Bernard Thibaut et Joseph Gril. Tree growth forces and wood properties. *Peer Community Journal*, 1, 2021. ISSN 2804-3871. doi : 10.24072/pcjournal.48. URL <https://peercommunityjournal.org/articles/10.24072/pcjournal.48/>.
- E. Toussaint, E. Fournely, R. Moutou Pitti, et M. Grédiac. Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements. *Engineering Structures*, 113 :277–286, April 2016. ISSN 0141-0296. doi : 10.1016/j.engstruct.2016.01.052. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616000766>.
- Marie-Christine Triboulot. Le choix des essences de bois. La durabilité naturelle vis-à-vis des agents biologiques de dégradation. *Cahier des thèmes transversaux ArScAn*, 2003.
- Marie-Christine Trouy. *Anatomie du bois. Formation, fonctions et identification*. Editions Quae, 2015. URL <https://www.furet.com/livres/anatomie-du-bois-marie-christine-trouy-9782759223497.html>.
- Marie-Christine Trouy et Pascal Triboulot. Matériau bois - Structure et caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur*, page 41, 2019.
- J. Valença, D. Dias-da Costa, E. Júlio, H. Araújo, et H. Costa. Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. *Measurement*, 46(1) :433–441, January 2013. ISSN 0263-2241. doi : 10.1016/j.measurement.2012.07.019. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112002941>.
- T. A. C. M. Van der Put. *Deformation and damage processes in wood* /. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, January 1989.

- Maximin Varnier. *Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie*. These de doctorat, Limoges, March 2019. URL <https://www.theses.fr/2019LIM00035>.
- J. VIGUIER, D. BOURREAU, J. F. BOCQUET, G. POT, L. BLÉRON, et J. D. LANVIN. Modelling mechanical properties of spruce and Douglas fir timber by means of X-ray and grain angle measurements for strength grading purpose. *EUROPEAN JOURNAL OF WOOD AND WOOD PRODUCTS*, 75 :527–541, 2017.
- Ward et Pong. *Wetwood in trees : a timber resource problem*. United States Department of Agriculture, USA, August 1980.
- J. J. Worrall et J. R. Parmeter. Wetwood formation as a host response in white fir. *European Journal of Forest Pathology*, 12(6) :432–441, 1982. ISSN 1439-0329. doi : <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1982.tb01299.x>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0329.1982.tb01299.x>. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1439-0329.1982.tb01299.x>.
- James Worrall. Inhibition of Wood-Decay Fungi by Wetwood of White Fir. *Phytopathology*, 73 :1140–1145, January 1983. doi : 10.1094/Phyto-73-1140.
- James Worrall et John Jr. Formation and Properties of Wetwood in White Fir. *Phytopathology*, 72 :1209–1212, January 1982. doi : 10.1094/Phyto-72-1209.
- Samuel L. Zelinka, Samuel V. Glass, Joseph E. Jakes, et Donald S. Stone. A solution thermodynamics definition of the fiber saturation point and the derivation of a wood–water phase (state) diagram. *Wood Science and Technology*, 50(3) :443–462, May 2016. ISSN 1432-5225. doi : 10.1007/s00226-015-0788-7. URL <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0788-7>.

Annexe A

Trame des entretiens

Annexe 11 : Questionnaire « Charpentier » - Bois d'œuvre, bois massif

1. **Histoire de la/des personne(s) ? En quoi consistent vos activités professionnelles et où les exercez-vous ?**
 - a. **Parcours professionnel, formation...**
 - b. **Statut « entreprise, asso... », équipe ?**
 - c. **Qui sont vos clients, dans quel cadre intervenez-vous (si association par exemple) ?**
 - i. Locaux ou non
 - ii. Réguliers ou non (recherche de nouveaux clients) ? Si recherche de nouveaux clients : comment s'y prendre ?
2. **Pour quel(s) usage(s), quelles réalisations : bâtis de quelle nature ? neufs, rénovations, agrandissements ?**
3. **Quelle(s) essence(s) de bois privilégiez-vous et pourquoi ?**
 - i. Cas du Sapin pectiné
 - ii. Comparaison Sapin pectiné avec les autres essences travaillées
 - a. **Provenance ? Local ?**
 - b. **Quelles pratiques pour votre scieur / scierie et pour vous ? Construisez-vous en bois vert ou partiellement séché ?**
 - i. Bois vert (définition « vert ») ? Mix bois vert bois sec ? Quand, comment, pourquoi ?
 - ii. Débit ?
 - iii. Comment gérez-vous le débit des avivés pour éviter des « anomalies » (tuilage...) ?
 - iv. Dimensionnement ? (retraits...)
 - v. Rencontrez-vous des problèmes de pentes de fil lors des assemblages ? Si oui comment les identifiez et les traitez-vous ?
 - vi. Assemblage ?
 - vii. Traitement ?
 - c. **Atouts, avantage de ces pratiques : pour vous, pour vos clients ?**
 - d. **Limites, complémentarité avec d'autres pratiques et/ou d'autres produits (lamellé-collé, etc) ?**
4. **Explications sur des points plus techniques (en lien plus particulièrement avec le sapin ou résineux plus largement si pas/peu de sapin pectiné)**
 - a. **Aubier non visible (non différencié), durabilité**
 - b. **Bois « branchus » => nœuds ? Nœuds morts, nœuds vivants ?**
 - c. **Séchage préalable du bois ? (lié au temps entre abattage et usage ? Stocké comment ? sous quelle forme ? Quelle teneur en eau ?) cas du sapin pectiné : poches d'eau ?**
 - d. **Imprégnation (traitement...) ?**

- e. **Critères de qualité ?** Aspect, nœuds, pente de fil – fil droit ? stabilité, anticipation des retraits et déformations, débit et orientation des pièces de bois, période abattage, conditions de conservation du bois, absence d'attaque d'agents biologiques (avant/après coupe), xylophages, chancre, gui...)
5. **Quelles sont vos interactions avec les autres scieurs ou autres acteurs de la filière ?**
6. **Difficultés spécifiques à votre métier et à l'usage de bois « vert » ?**
- a. **Ses responsabilités ?** garantie décennale, cas de durabilité si bois non traité (attaque aubier par xylophages...)
 - b. **Normes, réglementations** (Eurocode 5 => « surdimensionnement »)
 - c. **Angle économique** (prix>>charpente traditionnelle, marché, clients, concurrence...)
 - d. **Conditions climatiques**
 - e. **Manque de personnel ou de formation du personnel, autres corps de métiers ?**
 - f. **Manque de bois de « qualité » ?**
 - g. **Qualité, disponibilité outils et de leur entretien**

Annexe 12 : Questionnaire « Scierie »

1. **Histoire de la/des personne(s) qui nous reçoit/reçoivent, lien avec la scierie ?**
 - a. Parcours professionnel

2. **Histoire de la scierie ?**
 - a. Familiale ou rachat ?
 - b. Le nombre d'employés ?
 - c. La capacité de production ?
 - d. Quels types de produits ?
 - e. Qui sont ses clients ?
 - i. Locaux ou non
 - ii. Réguliers ou non (recherche de nouveaux clients) ?
 - Si recherche de nouveaux clients : comment s'y prendre ?
 - f. Provenance de ses bois dont en particulier le sapin pectiné ?
 - g. Principales essences de bois travaillées ?
 - i. Cas du Sapin pectiné : comment est-il géré dans la scierie ? Bois livré sec ou partiellement séché ? (les différentes opérations, dont le séchage : ressuyage ? artificiel ?)
 - ii. Comparaison Sapin pectiné avec les autres essences travaillées (plus lourd...)
 - iii. Cas particulier du sapin : poches d'eau ?
 - h. Qui fait l'abattage ? Importance de la période d'abattage (hors sève, lune...) ?

3. **Investissements financiers pour le matériel ?**
 - a. Marge de prix (vente/achat) ?

4. **Explications sur des points plus techniques (en lien plus particulièrement avec le sapin)**
 - a. Passage de grumes de fort diamètre (gros bois)
 - b. Aubier non visible
 - c. Bois « branchus », nœuds nombreux
 - d. Séchage du bois
 - e. Imprégnation (traitement...) ?
 - f. Collage (lamellé collé...)
 - g. Critères de qualité

5. **Difficultés spécifiques à votre métier ?**
 - a. Angle économique
 - b. Conditions climatiques
 - c. Manque de personnel ou de formation du personnel
 - d. Manque de bois
 - e. Concurrence
 - f. Valorisation des déchets ou non ?

Annexe B

Compte rendus des entretiens

Réunion de discussion
Orientation de la thèse d'Arthur Bontemps

<u>Date</u> : 09/01/2020, 16h00 – 17h30 <u>Durée</u> : 1h30	<u>Lieu</u> : FiBois Clermont-Ferrand (Maison de la forêt et du bois d'Auvergne, Lempdes) Salle chêne
<u>Présents</u> :	

- Rostand Moutou Pitti (Polytech)
- Joseph Gril (Polytech/Inra)
- Eric Fournely (Polytech)
- Arthur Bontemps (Polytech)
- Nicolas Da Silva (FiBois)
- Jean-Pierre Mathé (FiBois)

Ordre du jour :

- Présentation de la diapositive concernant les réflexions côté Polytech
- Discussion sur le projet de thèse de Arthur Bontemps

Éléments de discussion :

Le but de la réunion était de discuter de l'orientation de la thèse d'Arthur Bontemps parmi :

Première orientation : *Caractérisation du comportement mécanique de bois de petit diamètre mis en œuvre à l'état vert, rond ou partiellement équarris, par exemple en vue d'applications constructives de bâtiments agricoles.*

Seconde orientation : *Caractérisation du comportement mécanique des gros bois pas ou peu séchés, par exemple en vue d'applications de construction en charpentes traditionnelles.*

Les deux orientations concernent prioritairement le sapin pectiné, essence fortement présente dans la région Auvergne Rhône Alpes.

A première vue, Nicolas et Jean-Pierre seraient plus intéressés par la seconde orientation. Celle-ci paraît mieux répondre à la réalité actuelle des besoins de la profession que la première. Ce choix reste néanmoins à confirmer auprès des professionnels.

Écueils de la seconde orientation :

Les gros arbres présentent plus fréquemment des pentes de fil au sein du tronc, venant nuire aux performances mécaniques. En général, ces difficultés sont laissées à la responsabilité des charpentiers qui doivent s'assurer que la structure entière serait fiable malgré la présence de pentes de fil sur certaines poutres. Par exemple, un assemblage intelligent permettrait de « compenser » les problèmes mécaniques que provoqueraient normalement les bois avec des pentes de fil. Dans ce cas, il faut s'assurer que les charpentiers aient des méthodes de détection et quantification des pentes de fil adaptées.

Comment gérer ces défauts ?

Ces pentes de fils peuvent être traitées de différentes manières :

- Effectuer un tri de sélection des arbres, filtrant ceux présentant des pentes de fil importantes. Il est dans ce cas nécessaire d'avoir des méthodes de détection et de quantification des pentes de fil ;
- Atténuer l'impact des pentes de fil sur les propriétés mécaniques avec des techniques de transformation : le déroulage (qui étale le défaut sur toute la surface), le lamibois (LVL) ou les prédalles mixte bois-béton en sont des exemples concrets.

A noter que l'utilisation de bois rond (cas de la première orientation), peut dans certains cas lisser les défauts de fil car chaque fibre reste continue.

A propos des poches d'eau :

Les poches d'eau, très présentes dans les sapins pectinés, n'affectent pas les propriétés mécaniques si les poutres sont séchées naturellement. Cependant, au cours du séchage elles peuvent déclencher des fissures qui peuvent être dues à la manifestation de contraintes de croissance, aux effets du temps et du retrait ou dessiccation. Ces fissures sont préjudiciables en structure.

Dans le cas d'un séchage artificiel, les poches d'eau dans les grumes seraient onéreuses à sécher.

Conclusions :

Il a été décidé, conformément au plan de thèse initial, de faire une enquête auprès des professionnels pour trancher définitivement sur l'orientation privilégiée de la thèse. Bien qu'en première approximation la seconde semble être favorisée, la première est probablement plus facilement réalisable et présente des intérêts scientifiques, il est nécessaire d'évaluer le besoin en construction bois rond à l'état vert dans la région.

Pour l'heure, la construction de bâtiment agricole en bois est beaucoup demandée (bien que l'acier soit majoritaire sur ce marché), elle représente environ 25% des constructions bois de la région. Les entreprises proposant des services de construction agricoles sont spécialisées sur ce type de construction. Par ailleurs, de nombreux paysans possèdent leur propre ressource forestière qu'ils pourraient utiliser comme bois de construction agricoles.

L'enquête :

L'enquête se fera sur 4 types d'entreprises :

- Les scieries, pour les deux orientations ;
- La charpenterie, pour l'orientation 2 ;
- La charpenterie de bâtiments agricoles, pour l'orientation 1 ;
- Des bureaux d'étude, pour les deux orientations.

L'idéal serait de rencontrer 3-4 entreprises sur chacun de ces types, comprenant des petites entreprises et des moyennes/grosses, donnant un total de 10-15 industriels à rencontrer et questionner.

Les rencontres seraient facilitées par FiBois et s'appuieraient sur un questionnaire préalablement défini.

TO DO

Quoi	Quand	Qui
Etablir le questionnaire	31/01/2020	Arthur et relecture par al.
Etablir la liste des contacts	31/01/2020	FiBois
Rencontrer et questionner les acteurs	Du 01/02/2020 au 27/03/2020	Arthur et ceux qui peuvent
Analyse des résultats de l'enquête et trancher sur l'orientation précise de la thèse	Fin mars	Tous

Rencontre Sylva Conseil

<u>Date</u> : 18/02/2020, 8h30 – 11h	<u>Lieu</u> : Sylva Conseil Clermont-Ferrand
<u>Durée</u> : 2h30	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Joseph Gril • Eric Fournely • Jean-Louis Vigier 	

1. Quelle est votre place parmi les acteurs de la construction bois ? Quelles sont vos interactions avec eux ?

Sylva Conseil intervient à deux niveaux : En amont lors de concours de projet et en aval lorsqu'ils sont directement contactés par des entreprises de construction.

Dans le cas de concours, ils sont en équipe avec un cabinet d'architecte et sont en concurrence avec d'autres binômes (bureau d'étude-cabinet d'architecte) pour répondre à un projet.

Ils sont donc en contact avec des constructeurs bois et des cabinets d'architectes.

2. Quels sont les types de construction que vous traitez (lamellé-collé, LVL, charpentes, ...) ?

Sylva Conseil traite tout type de construction.

3. Dans vos projets, quelles essences sont majoritairement utilisées ?

Les résineux sont majoritairement utilisés, l'épicéa en tête. Les constructions en sapin sont rares.

4. Quel est votre avis sur la construction bois vert ? Ses applications les plus intéressantes et ses limites ?

Selon Jean-Louis Vigier, la construction bois vert pose peu de problèmes mécanique tant qu'elle est anticipée. En solivage, elle est problématique car déforme le plancher qui doit normalement rester plat.

En revanche, la construction bois vert pose des problèmes de durabilité : le sapin pectiné vert est sensible aux attaques d'insectes.

Le sapin sèche bien à l'air libre mais pas très bien si on le force en étuve (y compris les poches d'eau du duramen). Cet argument va en faveur de la construction bois vert qui sèche en structure.

5. *Quel est votre avis sur la construction en éléments de structures bois rond ? Ses applications les plus intéressantes et ses limites ?*

6. *D'après vous, comment pouvons-nous valoriser dans des éléments de structures les bois issus de grumes de gros diamètre ?*

Le mythe des pentes de fil dans les grumes de gros diamètre est infondé. De manière générale, le sapin pectiné présente moins de pente de fil que le douglas ou l'épicéa.

En revanche, les gros bois ont tendance à dépérir à cœur plus tôt que les petits, entraînant un pourrissement accéléré et une ruine des propriétés mécaniques. Par conséquent, les grumes de gros diamètres doivent être triées selon la qualité du bois de cœur.

Remarques :

Le sapin pectiné est un bois qui a peu de précontraintes et donc peu de recouvrance. Il sera moins sujet à des fentes à cœur une fois abattu.

La bonne période d'abattage des sapins est en hiver, sinon les arbres sont gorgés de sève et donc beaucoup plus humide. A noter que poussé face nord et à conditions de croissance égales, le sapin est plus résistant que l'épicéa et le douglas.

Joseph propose la réalisation d'un toit de démonstration au parking de Polytech : L'idée serait de faire une construction alternée : sapin vert, sapin légèrement séché, sapin anhydre ; afin de démontrer que le bois vert fonctionne aussi bien que le bois sec. Attention, pour ce projet il faut faire une demande de subventions auprès du Massif Centrale, le deadline étant en avril 2020 !

En ce moment, Sylva conseil travaille sur un projet de construction en sapin à Dunières. Pour avoir des informations sur ce chantier, contacter le maire de la ville : M.Vala.

Les scieries Moulins et Philipon travaillent le sapin pectiné.

Il est important de souligner que le sapin pectiné est apprécié par ses utilisateurs (charpentiers, bureaux d'études ...). Ces derniers sont demandeurs de sapin, les freins résident essentiellement dans le séchage pour atteindre le taux d'humidité demandé et le massif vieillissant.

Conclusion :

Ma thèse étant orientée sur l'utilisation du sapin pectiné, un des objectifs peut être de casser les clichés à son encontre. Le sapin a mauvaise réputation (grosses grumes, peu durable, faibles performances mécaniques ...), l'idée serait de décortiquer ces arguments, puis les infirmer ou les affirmer.

Rencontre scierie du Forez

<u>Date</u> : 21/02/2020, 14h-16h	<u>Lieu</u> : Scierie du Forez à Vollore montagne
<u>Durée</u> : 2h	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Joseph Gril • Frédéric Castaings • Estelle Planche Foulhoux 	

1. De quels départements ou de quels massifs proviennent vos bois ? Quelles sont les essences privilégiées ?

Toutes les grumes proviennent de Loire ou du puy de dôme, dans un rayon de 60 km avec la scierie du Forez. La scierie traite environ :

- 55% de douglas
- 30% d'épicéa
- 15% de sapin

2. Quelles sont vos interactions avec les charpentiers ou autres acteurs de la filière ?

Ils reçoivent des grumes qu'ils découpent/équarrirent, puis sèchent et revendent à des charpentiers.

3. Lorsque vous séchez des pièces de bois issues de gros troncs, arrivez-vous systématiquement au taux d'humidité souhaité ? Autrement comment procédez-vous ?

Le séchage ne pose pas de problème pour la plupart des essences. Les gros bois concernent principalement le sapin pectiné, qui présente un massif vieillissant.

Le cas du sapin pectiné est particulier, celui-ci n'est plus séché dans les séchoirs traditionnels de la scierie du Forez car trop onéreux à sécher. En général, il est revendu humide à des charpentiers qui procèdent à son ressuyage pendant 6 mois à 1 an.

4. Si vous séchez du sapin pectiné, rencontrez-vous des problèmes de séchage ? Est-il possible de pallier ces problèmes ?

Oui, comme évoqué à la réponse précédente. Tout d'abord, le sapin est naturellement plus humide que l'épicéa ou le douglas (juste après abattage, son taux d'humidité est élevé). On constate une masse volumique d'environ 850-900 kg/m³ après abattage, soit 2 fois plus élevée que la masse volumique anhydre.

Deuxièmement, les sapins présentent fréquemment des poches d'eau dans le duramen, parfois impossible à sécher. Selon le FCBA, ces poches d'eau se situeraient prioritairement au pied de bille mais la scierie du Forez constate que les poches d'eau se situent tout le long des grumes. Les

recherches menées par l'INRA semblent également indiquer que les poches d'eau sont présentes sur tout la longueur des grumes.

Enfin, le sapin sèche mal lorsqu'on le force en séchoir, il sèche bien mieux naturellement.

5. Transformez-vous des grumes de gros diamètre ? Rencontrez-vous des problèmes ?

Le problème principal des grumes de gros diamètre est qu'elles présentent un pourrissement à cœur. En effet, les propriétaires forestiers ont laissé trop longtemps les sapins sur pied et ceux-ci sont devenus particulièrement gros (massif vieillissant), accompagnés d'un pourrissement à cœur. A priori, il est impossible en observant un arbre sur pied s'il va être pourri à cœur.

6. Lors de la transformation (de grosses grumes particulièrement), rencontrez-vous des difficultés liées à des pentes de fil dans le bois ?

Pas plus que chez les autres essences.

7. Seriez-vous intéressé par la vente de pièce de charpente en bois vert (sapin blanc par exemple) ? Si non, quel serait le taux d'humidité maximal toléré ?

Bien sûr, mais la réglementation l'en empêche. Le marché demande de plus en plus de bois sec, malgré le fait que les charpentiers apprécient le sapin pour ses qualités mécaniques, ils ne peuvent l'utiliser car le taux d'humidité imposé par l'Eurocode 5 est trop onéreux à atteindre chez le sapin.

8. Seriez-vous intéressé par un développement de l'utilisation de gros bois ?

Bien sûr, mais il faut dans ce cas éviter les bois pourris et procéder à un séchage suffisant ...

Remarques :

Un autre problème auquel est confronté le sapin est les gélivures. Les gélivures sont des fentes radiales dues au gel de la sève dans le bois. Si une vague de froid brutale survient, l'arbre n'est pas prêt et est gorgé d'eau, celle-ci prend plus de volume et crée parfois des fentes radiales.

Il est important de noter que le sapin a de bons retours de la part des charpentiers (efficace en structure), ses principaux problèmes sont le pourrissement à cœur et le séchage. Ce fait corrobore ce qu'expliquait Sylva Conseil.

Discussion avec Catherine Lavier

<u>Date</u> : 23/03/2020, 10h00 – 11h00	<u>Lieu</u> : Téléphone
<u>Durée</u> : 1h	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Catherine Lavier 	

Présentation de Catherine Lavier :

Catherine Lavier est archéodendromètre et enseignante chercheuse. Elle recherche l'origine des bois de structures ou d'objets (œuvres d'art, instruments de musique).

Quels types de structures avez-vous étudiée ?

J'étudie des bâtiments publics et privés. Par exemple, des églises, offices du tourisme, chalets, maisons ...

Quelles essences sont majoritairement utilisées ?

L'essence dépend de la région. Dans les montagnes françaises, les résineux sont principalement utilisés : sapin, épicéa et mélèze. Dans d'autres régions, on trouve du chêne et du hêtre. Le sapin se trouve par exemple dans le massif central.

Est-il possible de connaître l'humidité initiale du bois d'une structure ?

La teneur en eau du bois à proprement parlé, non. Cependant, on peut connaître la date d'abattage de l'arbre par dendrochronologie d'un prélèvement (en déterminant l'essence également) puis avec les archives ou en étudiant les fentes des éléments de structures, il est possible de savoir la date de mise en œuvre. Ainsi, on sait si le bois était sec ou vert lorsqu'il a été posé. A noter qu'à partir de l'échantillon l'arbre peut être reconstitué par ordinateur.

Dans ce cas, comment étaient les structures anciennes, bois vert ou sec ?

L'écrasante majorité des constructions anciennes étaient assemblées en bois vert. La coutume en Europe (époque romaine et moyen âge par exemple) était d'abattre les arbres en hiver (minimisation de la quantité de sève présente), de ressuyer (de laisser sécher quelques mois en extérieur) puis de construire. Le taux d'humidité initiale du bois était donc bien au-dessus du PSF.

Rencontraient-ils alors des problèmes avec ces structures construites bois vert ?

Très peu ! Les attaques de xylophages sont minimales si la structure est suffisamment ventilée, les fentes ne sont pas dangereuses si le bois est correctement débité et si le séchage est lent, le retrait-gonflement du bois peut être anticipé et ajoute de la souplesse à l'assemblage. Au contraire, les structures tenaient des siècles.

Auriez-vous des exemples de bâtiment construit bois vert visitables ?

Je n'en ai pas de précise en tête. Les bâtiments historiques « nobles » sont souvent en chêne (église, ...), les chalets de montagnes sont souvent en résineux (ils tiennent des siècles), les étayages de mines étaient en sapin, les ponts sur pilotis étaient en bois vert (enfoncé dans l'eau !).

Pourquoi sèche-t-on alors aujourd'hui ?

Pour des raisons économiques. Dans l'objectif de minimiser le plus possible les pertes matière et pour aller plus vite, on sèche le bois. Le laisser vert impose de plus grosses pertes matière (à approfondir). Cela dit, certains artisans travaillent encore le bois vert (charpentes traditionnelles).

Le bois vert a-t-il un avantage sur le bois sec ?

Le bois sec est beaucoup plus difficile à travailler, au moindre coup il fissure. L'humidité permet d'adapter le bois, de le déformer.

Remarques :

Lors du séchage, le débitage est très important. En effet, les retraits tangentiel, radial et longitudinal sont différents et on peut avoir des fissures plus ou moins grosses selon la position du repère.

La structure encore sur pied la plus vieille que Catherine connaît a 1 millénaire (notre dame et d'autres constructions romaines).

Quelques contacts :

Emmanuel Maurin, ingénieur bois, ministère de la culture.
Frédéric Guibal, dendrochronologue et climatologue.
Charpentier sans frontières.
Compagnon du devoir.
Charpentier restaurateur
l'Etude Charpente et Structure Bois à Chalonnes.

Discussion avec Emmanuel Maurin

<u>Date</u> : 25/03/2020, 14h00 – 14h30	<u>Lieu</u> : Téléphone
<u>Durée</u> : 30 minutes	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Emmanuel Maurin 	

Présentation de Emmanuel Maurin :

Emmanuel Maurin est ingénieur bois, il travaille au laboratoire de recherche pour les monuments historiques. Son métier consiste à aider les maîtrises d'ouvrage sur le choix des solutions techniques de restauration de monuments historiques. Très souvent, les solutions sont des reconstitutions à l'identique (donc bois vert). Il est à la base chimiste du bois, mais maintenant généraliste du matériau bois.

Son travail consiste également en l'appui aux architectes de la connaissance du matériau bois, et en l'identification d'essence à l'échelle microscopique.

Les structures que vous étudiez sont toujours en bois vert ?

Si c'est une reconstruction complète, oui. Si c'est une restauration partielle, le risque est d'assembler un élément de structure en bois vert avec des éléments qui sont maintenant secs (ils étaient verts initialement mais ont séché sur place). Dans ce cas cette différence doit soit être prise en compte soit l'élément de structure reconstitué est séché.

Les bâtiments historiques sont-ils soumis aux normes de l'Eurocode 5 également ?

Si c'est une reconstruction à l'identique, non. En effet, justifier que la structure a tenu des siècles suffit pour la reconstruire à l'identique. Par contre, si celle-ci est changée (dans son usage ou dans la solution constructive), alors il faut justifier que ce changement ne sera pas dangereux. Les justifications passent souvent par un calcul sur les bases de l'Eurocode 5, mais il peut arriver que l'E5 surdimensionne tellement une structure qu'il ne soit plus possible du tout de reconstituer ...

Avez-vous travaillé sur des restaurations de bois de résineux ?

Peu, c'est souvent du chêne ou du peuplier. Peut-être le château de Lunéville, près de Nancy, à vérifier. S'il a été reconstruit en résineux il est probable qu'une partie soit en sapin.

Si le bois vert est efficace en structure, pourquoi sèche-t-on désormais ?

Dans un premier temps, il faut savoir qu'avant nous construisions bois vert parce que le bois sec est beaucoup plus **dur** et difficile à usiner et travailler que le bois vert. A l'arrivée des machines d'usinage et de l'automatisation, il a alors été possible de travailler le bois sec.

On sèche pour plusieurs raisons :

- D'abord, pour minimiser les pertes matières. Lorsqu'on construit bois vert, il faut **débité sur quartier**, c'est-à-dire que les poutres débitées doivent être issues du cœur de la grume (proche de l'axe longitudinal). Ce faisant, les poutres vont peu se déformer. Si une poutre est issue d'une dosse, lors du retrait elle aura tendance à « tirer à cœur » par exemple. Débité sur quartier signifie une poutre par arbre ... Donc il y a de fortes pertes matières par rapport à un

arbre où l'on débite plusieurs poutres qu'on a ensuite séchées. On peut quand même obtenir plusieurs poutres par arbre en débit sur quartier si l'on découpe la grume en tronçons.

- Deuxièmement, et toujours dans la même idée, construire en bois vert nécessite plus de formation pour les charpentiers. Pour des poutres non débitées sur quartier, les charpentiers compétents savent comment vont se déformer les poutres en observant leur position par rapport à l'axe de la grume et peuvent ainsi construire en prenant en compte les effets de tuilages et de tirées à cœur. Mais cette approche nécessite de former correctement les charpentiers, ce qui coûte aux entreprises.
- Ensuite, le développement des technologies de bois lamellé-collé, BMR, LVL ... Utilisant des colles nécessite un état sec du bois. L'humidité du bois nuit à la qualité du collage.
- Enfin, c'est culturel. Des entreprises ont pris la décision de sécher à une époque, et ont adapté leur technologie à cela et l'ont transmis à leur descendant. Les descendants ont considéré que la construction bois vert n'était pas viable et ont continué sur la lancée. La technologie peut alors progresser sans que l'on remette en question cette vision de la construction bois sec, même si peut-être que la construction bois vert est économiquement plus intéressante désormais.

Aujourd'hui, 2 mondes s'affrontent : les archéodendrochronologues qui démontrent que la construction bois vert est faisable, les industriels du génie civil qui veulent un modèle optimisé.

Quels sont les erreurs à ne pas commettre si on construit en bois vert ?

Le débit est essentiel, il faut débiter sur quartier pour faciliter la démarche (mais c'est quand même possible avec débit classique, supposant que les charpentiers sont compétents, voir ci-dessus).

Choisir une essence durable selon la classe de service.

Le bois vert ne risque-t-il pas d'être attaqué pas des xylophages ?

Non, en tout cas pas le chêne. Les résineux comme le sapin il faut être plus prudent.

Remarques :

En moyenne, un monument historique brûle tous les 10 ans.

Quelques contacts :

François Calame de charpentiers sans frontières.

Mathieu Garros, de « entre toits et bois », charpentier de construction bois vert.

Rencontre scierie Chorain

<u>Date</u> : 27/03/2020, 11h – 11h45	<u>Lieu</u> : Skype
<u>Durée</u> : 45 min	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Jean-François Chorain 	

1. De quels départements ou de quels massifs proviennent vos bois ? Quelles sont les essences privilégiées ?

Tout l'approvisionnement de la scierie Chorain provient d'un rayon de moins de 25km. L'essence principale est le sapin, puis quelques grumes de douglas, épicéa et pin. Ils ne travaillent que des résineux.

2. Quelles sont vos interactions avec les charpentiers ou autres acteurs de la filière ?

Le secteur d'activité principal est la vente de sapin à des charpentiers traditionnels et à des négociants en matériaux de construction. Une partie du sapin est aussi vendu en lamelle à des colleurs pour de la construction de bois lamellé collé. L'épicéa est à destination du coffrage, le pin de planche pour terrasses. Les clients sont en partie localisés dans la région, mais d'autres sont dans le sud de la France.

3. Quelles transformations opérez-vous (séchage, équarrissage, collage, ...) ?

Dans l'ordre :

1. Réception des grumes ;
2. écorçage des grumes. Garder l'écorce pendant le transport permet de maintenir humide le bois, le rendant plus simple à scier ;
3. sciage des grumes. Elles doivent être écorcées avant d'être sciées pour rendre la surface « propre ». Si des cailloux ou de la terre sont sur les surface du tronc elles risquent d'abimer les lames ;
4. séchage naturel ou sous traitement du séchage en séchoir. Ce choix dépend de la météo et du temps à disposition. S'ils peuvent éviter le séchoir ils évitent (beaucoup plus cher), mais s'il y a des contraintes de temps ou selon la saison il peut être nécessaire de passer par là.

La sylviculture, le transport des arbres sur pied, le collage, le séchage en séchoir ou tout autres transformations sont donc sous traitées.

La scierie Chorain s'apprête à installer un séchoir basse température de grande capacité. Celui-ci est plus adapté au séchage du sapin car il est lent et permet d'y sécher de grosses grumes.

4. Prenez-vous en compte le débit de la poutre avant de la sécher ?

Le débit n'est pas pris en compte pour le séchage. Bien que le débit sur quartier soit idéal pour minimiser les effets « tuilages » ou autres déformations indésirables, celui-ci n'est pas adapté à la technologie de sciage présente. Le débit sur quartier est très compliqué et implique de grosses pertes matières.

5. *Lorsque vous séchez des pièces de bois issues de gros troncs, arrivez-vous systématiquement au taux d'humidité souhaité ? Autrement comment procédez-vous ?*

Oui, il faut attendre plus ou moins longtemps. Le taux d'humidité exigé par les charpentiers est 18% à 20%, celui exigé par les colleurs (pour du lamellé collé par exemple) est de 12%. Si les charpentiers achètent le bois vert, alors ils sèchent chez eux mais cette étape est systématique.

6. *Quels sont vos retours d'expérience de séchage du sapin pectiné ?*

Le sapin est plus difficile à sécher que les autres résineux. Non seulement le séchage est plus long mais en plus il n'est pas uniforme. Il est fréquent qu'après une période de ressuyage, les deux extrémités d'une poutre ne soient pas au même taux d'humidité. La faute revient au phénomène des poches d'eau, fortement présentes dans les sapins. Il arrive que lors du séchage naturel à la scierie il y ait des fentes, mais ce phénomène apparaît majoritairement dans les séchoirs artificiels.

Un séchage naturel doit être ventilé et ne pas être en plein soleil, autrement le gradient de température entre le cœur et la périphérie est trop grand et des fentes peuvent apparaître.

7. *Concernant le vieillissement du massif de la région, cela vous pose-t-il des problèmes ?*

La scierie Chorain scie des gros sapins (contrairement aux grosses scieries), elle est donc preneuse des gros bois. Cependant, ceux qui sont trop vieux présentent fréquemment des pourritures et des fentes à cœur, impliquant de grandes pertes matière. Malgré le fait que les grumes soient belles en extérieur, elles peuvent être pourries à cœur. Ces arbres sont en retard d'exploitation. C'est un problème de sylviculture.

8. *Lors de la transformation (de grosses grumes particulièrement), rencontrez-vous des difficultés liées à des pentes de fil dans le bois ?*

Pas spécialement, peut-être en bille de pied.

Remarques :

Le sapin est supérieur mécaniquement que l'épicéa et le douglas, c'est une excellente essence pour la construction. Lorsqu'il est traité, il n'implique pas de problème de durabilité en charpente.

Pour qu'un séchoir soit efficace, il faut qu'il soit plein. L'idée est ne pas laisser trop « d'air » ou de « trou » pour que tout sèche correctement.

Si vous décidez de construire en bois vert, un des risques est de ne pas laisser ventiler le bois en posant une isolation immédiatement. Si le bois n'est pas ventilé, il ne sera pas durable et pourrira rapidement. Lors d'une construction bois vert il est important d'attendre avant de poser l'isolation.

Discussion Mathieu Garros

<u>Date</u> : 09/04/2020, 9h00 – 9h30	<u>Lieu</u> : Téléphone
<u>Durée</u> : 30 minutes	
<u>Présents</u> :	
<ul style="list-style-type: none"> • Arthur Bontemps • Mathieu Garros 	

1. *En quoi constitue exactement vos activités professionnelles et où les exercez-vous ?*

Je suis charpentier chez « Entre toits et bois ». Nous réalisons des charpentes traditionnelles, des solivages, des ossatures bois. Nos charpentes traditionnelles sont principalement en bois massif, mais on peut également y ajouter du contre-collé. Nos clients sont essentiellement des particuliers. Nous exerçons à Toulouse.

2. *Quelle essence de bois privilégiez-vous ? Quelle en est la raison ?*

Nous utilisons beaucoup du douglas (en charpente traditionnelle par exemple), mais aussi du « sapin de pays ». L'entreprise a une vocation écologique, et l'idée est de prendre le plus possible des bois locaux.

3. *Quelles sont vos interactions avec les scieurs ou autres acteurs de la filière ?*

Nous nous fournissons principalement chez un scieur, M.Daussion. Celui-ci ne sèche pas mais peut le sous-traiter, et il peut appliquer un traitement au bois.

4. *Construisez-vous en bois vert ou partiellement séché ?*

Une bonne partie de nos charpentes traditionnelles sont construites en bois vert ou en mixte bois vert-bois sec. Egalement, nous réalisons des solivages en bois vert. Quand on parle de bois vert, il est généralement entre 20 et 30% d'humidité, jamais au-delà. En effet le délai entre l'abattage et la pose est suffisant pour abaisser sa teneur en eau à ces niveaux-là.

5. *Rencontrez-vous des difficultés ?*

C'est une question d'habitude. Lorsqu'on construit en bois vert, il faut plus regarder et observer les pièces de bois. Celles-ci doivent être correctement orientées. Par exemple, on a coutume de mettre le « cœur au soleil », c'est-à-dire le cœur vers l'extérieur de la structure, afin d'éviter les problèmes liés au tuilage.

Dimensionnement : Par ailleurs, nous dimensionnons grâce aux normes de l'Eurocode5, donc nous pénalisons nos bois humides. Le dimensionnement se fait par un logiciel.

Assemblage : Nous faisons attention à ne pas rencontrer de problèmes de « jeu » lors de l'assemblage.

Durabilité : Si la charpente est apparente et lorsqu'on utilise du douglas, nous n'avons pas besoin de le traiter puisque la charpente peut être diagnostiquée visuellement en permanence. En revanche si celle-ci n'est pas apparente, alors le bois doit être traité par le scieur.

6. *Comment gérez-vous le débit des avivés, pour éviter le tuilage ou autres anomalies ?*

Nous n'avons pas d'exigences officielles envers notre scieur concernant le débit des avivés, mais celui-ci sait selon notre demande s'il doit plutôt limiter la quantité d'aubier, plutôt débiter sur quartier, ...

7. *Rencontrez-vous des problèmes de pentes de fil lors des assemblages ? Si oui comment les identifiez et les traitez-vous ?*

Pas particulièrement, et encore moins avec le sapin de pays, son fil est plutôt droit.

Remarques :

Le secteur de la charpente traditionnelle fait face à une lourde concurrence en Occitanie. Une charpente traditionnelle revient en moyenne 2 fois plus chère qu'une charpente industrielle et c'est pourquoi nous n'en faisons pas énormément. Nos clients qui font le choix d'une charpente traditionnelle le font pour des raisons esthétiques et environnementales.

A vérifier que le « sapin de pays » correspond bien au sapin pectiné.

Contacts suggérés :

Les compagnons.



Etude expérimentale des propriétés mécaniques de poutres de Sapin pectiné à différents teneurs en eau (état de bois vert et partiellement séché).

Charpentier : Mourad MANESSE

Entretien téléphonique avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois

le 4 avril 2022

Mourad est autodidacte ; après des études scientifiques et techniques, il souhaitait avoir une activité plus créative - source de motivation, et a fait un CAP charpentier en tant que candidat libre.

Il exerce depuis plus de 15 ans, à son compte et au gré des sollicitations grâce au « bouche à oreille ».

Il est contraint de travailler seul du fait de la difficulté à mobiliser d'autres personnes alors même qu'il pourrait en avoir besoin sur certains chantiers.

Basé en Soane et Loire (Verjux, 71590), Mourad intervient dans toute la France.

Il a eu quelques expériences par le passé auprès de collectivités, et d'associations en tant que bénévole : il a par exemple participé à un chantier participatif avec « Charpentiers sans frontières » dont les réalisations permettent de faire découvrir et donner envie au grand public.

Depuis plusieurs années, ses clients sont presque exclusivement des particuliers.

Bien qu'ayant à son actif bon nombre de restaurations, Mourad fait beaucoup de constructions neuves et extensions, qui lui laissent le plus grand degré de liberté pour sa créativité, en partant du dessin et qui donnent une grande cohérence au projet. Il souligne cependant que même une rénovation constitue un défi créatif et artisanal (la phase de démolition reste cependant source de pénibilité).

Mourad travaille peu avec des architectes.

Il ne note pas d'évolution ou de tendance spécifique, et met en avant l'intérêt de ses clients pour des projets particuliers : recherche d'authenticité, d'une réalisation qui « a du cachet », à laquelle un soin particulier a été apporté. De fait ce n'est pas pour « tout le monde » ni pour toutes les bourses.

Mourad travaille toutes les essences de bois et affectionne particulièrement le châtaignier, « assez idéal » pour les charpentes de taille modeste et ne nécessitant pas du bois long (car plus il est gros plus il risque de ne pas être droit).

En Bresse bourguignonne on retrouve de nombreux exemples datant des 18^e et 19^es de charpentes en chêne de petites dimensions, avec des pièces tordues.

Mourad associe volontiers le bois de feuillus avec du bois de résineux.

Les résineux sont plus fragiles sur le plan mécanique en flexion que le chêne par exemple, mais comme en charpente la triangulation permet de convertir les efforts en traction et compression, les pièces sont surdimensionnées au regard des contraintes mécaniques qui vont s'exercer.

Les résineux sont privilégiés pour les usages où de grandes longueurs sont nécessaires : façonnage de pannes, sablières, solives.

Le sapin et l'épicéa sont alors adaptés grâce à leur morphologie bien droite, et ils sont assez légers ce qui est également un avantage.

Même s'il y a peu de différences entre ces deux essences, Mourad préfère l'épicéa au sapin pectiné car il « se tient mieux », a un fil plus joli ; de belles billes qui donnent un beau bois de brins (pas de section refendue) pour la charpente.

Les billes de bois vert sont travaillées à la hache : équarrissage et corroyage. Cette opération est plus facile avec les résineux.

Les fibres de l'arbre sont conservées dans leur intégralité ; une poutre est une section d'arbre avec le cœur au centre. L'aubier - non différencié pour l'épicéa et le sapin pectiné donc non visible - est quoi qu'il en soit minoritaire en volume sur la pièce finale.

La durabilité (en présence d'aubier) ? On trouve des charpentes de plus d'un siècle en sapin en bon état de conservation et même s'il y a une altération dans le temps, celle-ci n'est pas problématique. Il peut y avoir des traces (trous de vrillettes pas exemple) mais il est très rare de voir des insectes vivants, et Mourad n'a jamais constaté de pièces cassées.

Les éléments peuvent avoir été fortement endommagés par une attaque fongique s'il y a eu un contact avec de l'eau (fuite...) et présence d'humidité excessive, mais c'est là une autre cause, bien spécifique.

Dans le cadre de son métier, Mourad a découpé beaucoup de pièces anciennes et n'a été témoin qu'une seule fois d'une attaque de capricornes (dans le sud) ; il conclue qu'une infestation dure 2-3 ans puis s'arrête (suite au séchage ?). Il en résulte une partie du bois plus ou moins spongieuse limitée à la périphérie de la pièce, et le cœur est toujours en bon état.

Il n'est donc pas nécessaire de traiter le bois de charpente, quelle que soit l'essence.

L'usage de bois vert se retrouve en charpente traditionnelle depuis des siècles, en attestent les études de dendrochronologie qui permettent de faire des datations y compris de l'année d'abattage de l'arbre (si le dernier cerne est visible) : la date de construction suit généralement l'année d'abattage.

Dès lors que le linéaire est suffisamment aéré - ce qui est le cas pour une charpente traditionnelle même à usage d'habitation, le bois va sécher sans retrait en longueur. Certains assemblages doivent faire l'objet d'une attention particulière [du fait des retraits radial et tangentiel], qu'ils soient d'équerre ou en coupes biaisées : ces retraits sont anticipés et au final on aura une « mauvaise adaptation » toute relative qui ne remet pas en cause la qualité mécanique de l'assemblage.

Le séchage dans le temps d'une charpente ne pose pas de problème particulier ; la durée dépend des conditions bien évidemment, mais on peut à titre indicatif donner une durée de 5 ans pour une belle section de 25cm de diagonale (examen sur des chutes de charpentes, bois sec à cœur).

Pour certaines réalisations, pour des raisons esthétiques notamment, les retraits doivent être minimisés et pour cela le bois est ressuyé (séchage naturel notamment à la belle saison) : le ressuyage est effectué sur le bois d'œuvre lorsque celui-ci a été préparé (après l'équarrissage et corroyage).

La durée du ressuyage est de 2-3 ans pour le chêne et le châtaignier, alors qu'il est très rapide pour les résineux (dure quelques mois).

On pourrait dire que l'eau interstitielle s'évacue lors du ressuyage.

La présence de poches d'eau ? Mourad a parfois remarqué pour le sapin pectiné de grosses différences d'aspect et de densité dans de grandes parties du bois de cœur (forte humidité – la forte teneur en eau pouvant expliquer la densité plus élevée, odeur caractéristique...) qui s'apparenteraient à des « poches d'eau » même si ce terme n'est pas utilisé. Ce comportement n'affecte de toute façon pas la qualité du bois.

Mourad respecte l'idée qu'il faut abattre l'arbre en hiver uniquement, et ceci est particulièrement vrai pour les résineux qui ont une activité qui reste plus forte même en hiver, selon la visualisation du bois initial [bois de printemps] et du bois final [bois d'été] sur chaque cerne.

Un arbre abattu en été sera encore gorgé d'eau ; il en suivra de forts retraits et c'est pour Mourad un point de vigilance important.

Ce type de bois serait réservé pour du bois de second œuvre (lambris, voliges) qui sèche plus vite compte tenu de ses dimensions réduites.

Bois vert et bois sec peuvent ainsi être utilisés simultanément.

Il est possible de chevronner avec du bois vert ; avec du lambris, le séchage du bois provoque l'ouverture des joints ; Mourad a trouvé des astuces et cela donne une finition rustique. Donc cela dépend de la réalisation et de l'effet recherché : pour des réalisations plus fines, comme le solivage d'une mezzanine raffinée, cette approche ne sera pas retenue.

Qu'en est-il des avivés, des bois refendus et des risques de déformations liées au séchage ?

Dans tous les cas le bois n'a pas été coupé ni scié la veille ! Il y a toujours un petit temps de stockage qui permet d'observer les déformations qui apparaissent au séchage, avant l'utilisation. Là s'effectue un tri « en aval », de même que le scieur doit avoir trié en amont, avant le sciage, pour éliminer les fils tors, le bois trop nouveau ou trop tordu...

L'observation du fil revêt un caractère prédictif. Selon l'usage - comme pour un voligeage par exemple - il est possible de clouer la pièce pour la contraindre en force ; si Mourad suspecte un chevron en regardant le fil, il procède à un « contrôle destructif » pragmatique, en appuyant dessus pour vérifier qu'il ne cassera pas...

Concernant la présence de nœuds : ceux-ci sont tolérés pour les poteaux (bois de brin) qui travaillent en compression. « Les nœuds n'arrêtent pas les fibres ».

En revanche, pour une panne refendue qui serait noueuse, il convient d'être très vigilant car un nœud mal situé risque de provoquer une casse. Si le nœud est adhérent, bien au cœur et non coupé, il est placé vers le dessus, la face à l'effort.

Un bon bois pour l'emploi en charpente traditionnelle c'est un « bois de fil » (fil parallèle à la face) et sans nœuds !

NB : Mourad n'a pas connaissance de bois affecté par le gui.

L'approvisionnement du bois ? C'est la plus grande difficulté mise en avant par Mourad concernant la conduite de son activité, et il n'a malheureusement pas pu cultiver d'habitudes de travail ni de collaborations à ce sujet.

Les scieries par définition fournissent du bois scié alors qu'il doit s'approvisionner en grumes, et à l'interface les grumiers rechignent à transporter des volumes « faibles » (1 camion lui étant suffisant), cette profession cherchant manifestement le gain rapide dans le domaine « industriel » plutôt qu'à établir une relation de travail durable avec un artisan.

C'est un aveu d'impuissance... et en découle un « rêve », celui d'avoir ses propres ressources forestières !

Dans la mesure du possible, et c'est ainsi le cas pour la moitié d'entre eux, Mourad fait venir du bois local pour ses chantiers conséquents – avec une provenance d'au maximum quelques centaines de km.

L'évolution de la normalisation et de la réglementations ?

Concernant la normalisation portant sur l'usage du bois de construction et séchage / teneur en eau (bois sec à 12%), Mourad ne voit pas de relation avec le travail artisanal et la mise en œuvre du tenon-mortaise sur bois vert ou partiellement sec.

L'usage du bois vert et ressuyé est pratiqué de tout temps par les charpentiers, et la démonstration de son intérêt n'est plus à démontrer - notamment en charpente traditionnelle.

La garantie décennale s'applique sur ses chantiers.

Sur le plan de la propriété intellectuelle, certains pourraient être tentés de privatiser des recettes traditionnelles, ce qui peut représenter un danger (cas du purin d'orties en exemple).

Possibilité de venue sur un chantier : dans la région de Belfort pour les prochains mois.

Prochaine étape (Florence) : envoyer le CR à Mourad et voir l'organisation pour aller sur le chantier

A préciser : le douglas et le mélèze ne seraient pas utilisés de la même façon que le sapin et l'épicéa (?)

Etude expérimentale des propriétés mécaniques de poutres de Sapin pectiné à différentes teneurs en eau (état de bois vert et partiellement séché).

Charpentier : Marc SERAPHIN

Entretien téléphonique avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois

le 5 avril 2022

Marc est charpentier, et garde-forestier de formation.

Habitant dans le Beaufortain, il exerce en Savoie et travaille essentiellement avec l'épicéa, essence locale.

Dans cette région, le sapin pectiné - aussi appelé « vargne » (nom vernaculaire) - n'est pas ou que peu utilisé, bien qu'on le retrouve en partie basse du couvert forestier du secteur : ceci est lié à son odeur (de avis d'un vieux scieur qui a fait part de son expérience à Marc) et à sa moindre qualité en lien notamment avec sa sensibilité au gui et à la dorger.

Actuellement Marc intervient sur un chantier de restauration d'un bâti traditionnel brûlé dans le Beaufortain selon la technique ancestrale d'empilage de bois horizontaux, pour laquelle l'épicéa a toujours été utilisé.

Sont assemblés par superpositions des costes équarries à partir de billes rectilignes ou peu tordues, de l'ordre de 25 cm de diamètre au pied, pouvant aller jusqu'à 14m de longueur et de conicité constante. Pour cette technique, la présence de nœuds n'est pas problématique.

L'équarrissage est effectué de façon à obtenir 4 faces planes sans aller jusqu'à l'arête (conservation de l'arrondi du tronc aux angles), le cœur au centre.

L'empilage est effectué en mettant les costes tête-bêche, aussi bien pour les murs et le bois est travaillé frais (vert) ou semi-frais.

Les retraits dus au séchage sont pris en compte et une majoration en résulte à la construction.

Dans ces conditions, plusieurs méthodes sont possibles pour la mise en œuvre des menuiseries et des ouvertures ; Marc effectue l'ajustement des montants verticaux au fur et à mesure du séchage, et la pose des huisseries peut être pratiquée en applique. Certains prévoient des jeux de compression.

L'isolation répond à une exigence de confort pour une rénovation ou construction neuve (ajout de laine entre les costes par exemple, et isolation par l'intérieur incluant un pare-pluie et pare-vapeur). Le pare-pluie est installé lorsque le bois est sec (12% de teneur en eau).

Dans le cas de la construction, avec un cycle climatique comme en 2021, il faut compter un an à partir de l'abattage pour arriver à 12% en séchage naturel.

S'agissant d'économie et pratique rurale, « tout » le bois était conservé et parfois réutilisé, et des bâtis de plusieurs centaines d'années construits en épicéa dans le beaufortain attestent de la bonne durée de vie de ce type de construction, sur plusieurs générations.

Des traces de vrillettes peuvent parfois être visibles dans l'aubier, en démontant de l'ancien, et même très ancien (Marc évoque un bâti de 1752) mais pas toujours et ce sans que l'on sache pourquoi.

Le bois utilisé sur les façades est éloigné du sol (base maçonnée) et protégé grand débord de toit : « une bâtisse doit avoir de bonnes bottes et un bon chapeau ».

A noter que l'aubier de l'épicéa est durable s'il est à l'abri des intempéries et dans une zone bien aérée ; le bois se dégrade lorsqu'il ne peut pas sécher correctement et reste à l'état mi-sec, donc l'hygrométrie est un

paramètre essentiel. Lorsque le bois reste à l'état mi-sec (teneur en eau >20%), l'un des risques majeurs est le mérule.

Un autre emploi traditionnel de l'épicéa dans cette région : les tavaillons.

C'est un exemple qui montre d'ailleurs en quoi la durabilité est liée aux conditions d'usage et à l'environnement, qui réduisent les attaques d'origine biologique dégradant le bois : cette « protection » du bois est ainsi favorisée soit à l'état suffisamment sec comme vu précédemment, soit à l'état complètement saturé en eau, soit grâce au gel.

Les tavaillons sont des tuiles fendues faites traditionnellement en épicéa ; dorénavant les tavaillons sont souvent en red cedar et faute d'en trouver encore en épicéa, Marc travaille également avec du mélèze qui est très durable.

A Gruyère en Suisse on continue d'en fabriquer en épicéa, avec du bois d'une qualité exceptionnelle : les planchettes sont fendues au droit fil et sont suffisamment fines pour sécher rapidement, ce qui contribue à leur durée de vie : sur un toit elles sont remplacées tous les 60 ans, et tous les 100 ans en façade.

Marc met enfin en avant l'importance de la sylviculture pour la qualité mécanique et la durabilité : il cherche avant tout des bois à accroissements serrés.

Les plus grandes difficultés dont Marc fait part sont de trouver des projets intéressants et de la main d'œuvre qualifiée.

En revanche l'approvisionnement en épicéa ne lui pose pas de problème. L'épicéa est très présent localement, le bois qu'il utilise provient pour moitié de la forêt publique et pour moitié de parcelles privées. Cela se passe d'autant mieux que Marc va identifier les arbres sur pied et peut les couper, et il intervient ainsi sur toute la chaîne.

Dans cette région les bucherons doivent intervenir sur un relief très escarpé, rendant le travail d'autant plus difficile. Cependant le métier de bucheron est peu rémunérateur - donc cette complémentarité dans ses activités aide Marc à trouver un équilibre.

Concernant l'évolution de la réglementation et l'application des DTU, Marc constate que c'est un frein pour tous ceux qui veulent promouvoir et utiliser des techniques traditionnelles compte tenu de l'impact au niveau des garanties et des assurances.

Être charpentier traditionnel aujourd'hui, c'est croire en ses projets et avoir du tempérament ; c'est s'appuyer sur toutes ses connaissances et son savoir-faire, qui lui apportent aussi l'assurance de la longévité du projet réalisé.

Etude expérimentale des propriétés mécaniques de poutres de Sapin pectiné à différentes teneurs en eau (état de bois vert et partiellement séché).

Charpentiers : Thomas VERDIER et Lucas BOLLENGIER

Entreprise : BOLVER à JAX (43) SARL, activités de sciage, charpente et couverture

Entretien à JAX avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois

le 21 avril 2022

Thomas a fait un BTS en gestion forestière et travaillé auprès d'un charpentier.

Autodidacte en sciage (il a pris conseil auprès de nombreux scieurs au moment de se lancer dans cette activité) et souhaitant travailler à son compte, il a obtenu une licence pro en gestion et commercialisation des produits de la filière forestière.

Il exerce en tant que charpentier depuis 12 ans et a lancé la société il y a 7 ans, avec 3 activités complémentaires : sciage (usage propre et petites commandes), charpente et couverture.

Également bucheron à ses heures, il connaît ainsi toutes les étapes : du choix de l'arbre sur pied à la couverture du toit en passant par l'abattage, le sciage, le ressuyage et la construction de la charpente.

Lucas a un BTS en gestion et protection de la nature. Il a également travaillé plusieurs années chez un charpentier. Il apportait régulièrement de l'aide à Thomas, et ils ont décidé de s'associer.

Thomas et Lucas travaillent avec des bois locaux, essentiellement des résineux.

Lorsqu'ils effectuent le sciage, l'objectif est de valoriser le plus possible tout le bois à partir de la grume écorcée : aubier et duramen sont utilisés et le bois ne subit aucun traitement.

Il est utilisé à l'état vert ou partiellement séché (après ressuyage).

Le modèle est un circuit court, on pourrait même dire « on ne peut plus court » !

Thomas et Lucas s'approvisionnent notamment auprès de la coopérative forestière GPF (20 km de Jax).

Lorsqu'ils réalisent eux-mêmes le sciage (en période « creuse » et à hauteur de 40m³/an approximativement donc de façon limitée), ils font faire l'écorçage à la scierie BORIE, située à 10km de Jax. Il y a encore peu de temps ils écorçaient eux-mêmes manuellement les grumes mais ce travail est très éprouvant (notamment pour le dos) et leur demandait beaucoup de temps - entre 20mn et 2h par arbre, selon la taille de la grume.

L'écorçage permet d'éviter d'abîmer les lames et outils (car présence de cailloux dans l'écorce du fait de l'abattage et stockage, transport) mais a également un rôle important pour la durabilité du bois : c'est donc une opération importante, sur laquelle nous reviendrons plus longuement par la suite.

Thomas et Lucas font uniquement des chantiers auprès de particuliers, localement, grâce au « bouche à oreille ». Pour l'activité charpente, il s'agit de charpente traditionnelle à 95%, presque exclusivement en rénovation.

Ils travaillent le douglas essentiellement « parce que c'est ce qu'on nous demande » ; c'est de surcroît un beau bois (sa couleur, son aspect), bien disponible localement.

Ils aiment également travailler le sapin pectiné, qui est la principale ressource forestière de la région (plus de 90% du couvert forestier) : cette essence a de grandes qualités mais également certains inconvénients sur lesquels nous allons revenir.

A noter que le prix du douglas a fortement augmenté (+1/3 en 4 ans), contrairement au sapin dont le prix a plutôt baissé sur cette période.

Il leur arrive d'associer le bois massif à une pièce en lamellé-collé, là encore « parce qu'on nous le demande ou parce qu'on a pas le choix en termes de portée », répondant alors à un besoin particulier mais cela reste exceptionnel.

Tout d'abord qu'est-ce qu'un « joli » bois à usage de charpente ?

- rectiligne et droit : régulier et avec une conicité peu prononcée
- peu de nœuds (ils sont acceptables selon leur taille et localisation)
- à accroissement lent, un arbre « haut » et aux cernes serrés : c'est en lien avec la vitesse de croissance (dans ce cas celle-ci est lente en diamètre). Davantage de branches, et plus grosses, sont situées en hauteur.

Un arbre qui a poussé trop vite en diamètre ne présente pas de bonnes propriétés mécaniques (nous observons en exemple un morceau de douglas qui a des cernes de près de 1cm de large (bien qu'ayant de moins bonnes propriétés mécaniques, cela reste utilisable pour du douglas).

Cette observation vaut pour toutes les essences de résineux, elle est en lien notamment avec la sylviculture et la gestion forestière.

Des cas « extraordinaires » sont à l'inverse mentionnés par les anciens et ces bois étaient recherchés (observation en forêt) : par exemple la présence d'un chancre à plus de 10m de hauteur permet d'avoir un bois de qualité exceptionnelle (bille située en dessous), les veines étant très serrées.

Même observation pour un résineux présentant une fourche (due à la casse de la cime lors de sa croissance). Ce bois est « réservé » pour des pièces « maîtresses » de charpente présentant une grande résistance mécanique.

Ces cas mériteraient de s'y intéresser (anatomie, propriétés, raisons de ce comportement...).

Le sapin est très facile à scier, aussi bien vert que sec - en comparaison avec le douglas - et c'est là l'une de ses grandes qualités, en plus de ses propriétés mécaniques. Le douglas est très compliqué à scier car la lame suit le fil du bois et ne va pas droit...

Cependant un sapin sec sur pied (dépérissant ou mort) est de mauvaise qualité.

Un sapin « trop » vieux (plus de 80cm de diamètre) sera difficile à scier : la présence d'un fil torturé/tortueux dévie la lame de la scie, et il de surcroît il subira de grosses déformations lors du séchage.

Un diamètre de 70cm maximum est souhaité pour leur machine.

Le sapin « vert » peut dégager une mauvaise odeur au sciage, qui disparaîtra au séchage : nous évoquons les « poches d'eau » car cette odeur pourrait être liée à la présence de bactéries qui peuvent s'y développer.

Thomas et Lucas remarquent qu'en effet des zones de bois très humide et plus foncé sont parfois présentes sur les coupes (présence de poches d'eau ?) ; en tous cas elles ne leur posent pas de problème et d'ailleurs ils n'utilisent pas ce terme.

Or ces poches d'eau - dont la présence peut être fréquente selon des études scientifiques dédiées - sont pointées du doigt par les scieries car elles rendent long et difficile le séchage (bois sec, teneur en eau de 12%). De ce point de vue la mise en œuvre de sapin pectiné sous forme de bois vert ou partiellement séché offre un avantage indéniable, en comparaison avec du bois sec.

Cette teneur en eau élevée du sapin fraîchement abattu explique à l'inverse pourquoi les grumiers préfèrent transporter de l'épicéa et surtout le douglas, beaucoup moins lourds !

Inconvénient à ce stade (*Note : même si après séchage c'est le sapin qui a la densité plus faible et donnera des pièces de charpente plus légères*).

Bien sûr la période d'abattage (en hiver uniquement) est très importante : l'arbre doit être « hors sève ». Le savoir traditionnel met en avant l'importance de couper à la lune montante ou descendante (selon qu'il s'agit d'un résineux ou feuillu), à la « lune fine pour les épinés »... *L'approfondissement de ces aspects sera possible auprès d'anciens scieurs des environs.*

Ceci influence la teneur en eau, donc le séchage et la durabilité du bois.

Ainsi, après une coupe en août ou septembre, le bois risque de subir un bleuissement et d'être attaqué par les insectes (ici les capricornes sont mentionnés) : *à quoi cela est-il dû ? à davantage de sucres seraient présents dans le bois (provenant de la sève élaborée) ? Phénomène qu'il serait utile d'approfondir et étudier.*

Un voisin bucheron à ses heures, écorce et ressuye en forêt ses grumes de sapins après abattage ; il leur fournit du bois de très bonne qualité, résultant de ce savoir-faire.

Le principe est de surélever les grumes et de les laisser sécher une année. Le bois est facile à scier.

Donc à noter ici l'intérêt d'écorcer avant ressuyage : cette pratique permet également d'augmenter la durabilité.

L'écorçage se fait à la main, en avril/mai : ceci évite que les insectes piquent le bois et donc que celui-ci ne se colore « de toutes les couleurs », ce qui le déprécie.

Un autre avantage de l'écorçage est d'éviter d'abîmer les lames des outils (provoquant des marques, nécessité de réaffûtage voire remplacement) et aussi d'avoir des trainées et traces sur le bois au moment du sciage, dues au frottement d'écorce...

Thomas et Lucas pratiquent également le ressuyage après sciage : c'est très long ! Pour des pannes par exemple, il faut compter 6 à 7 mois et le séchage n'est pas encore à cœur... (arbre abattu l'hiver, scié en janvier/février).

Et 5 ans pour un séchage naturel à cœur de poutres de section 20x20cm, à titre indicatif.

Attention : au séchage de voliges en sapin, même correctement ventilées, il y a un risque est d'avoir un bleuissement (bleuissement qui peut apparaître même sur du douglas, et même sur son duramen ! sa classe de durabilité a d'ailleurs été revue à la baisse : classe 3 => 2 il y a 3 ans).

Faire de la charpente à partir de bois vert ou partiellement séché (ressuyé) est tout-à-fait adapté.

Thomas et Lucas disposent d'une scie à lame ruban mono-coupe (MARQCOL, 1950) et maîtrisent le sciage, pour débiter les différents éléments de structure (arbalétriers, solives, pannes, chevrons, liteaux, voliges...).

Le débit est effectué de façon à faire le moins de chutes possible.

Par exemple : 2 pannes et 5 planches pour une grume de diamètre de 30-35cm.

Quelques précisions :

- le bois situé en pointe est de moins bonne qualité et contrairement à ce que pratiquaient les anciens (tous les conseils ne se sont pas valables), Thomas et Lucas n'y font pas de chevrons car il y a beaucoup de nœuds. Utilisation : voliges et bûches
- les billons de pied (près de la souche) ne sont pas beaux : aussi ils sont coupés plus petits et utilisés pour faire des planches, poinçons, petites pannes et contre-pied
- l'aubier est conservé, même pour le douglas : voliges.
Attention aux grands diamètres, car les avivés avec aubier vont davantage se déformer au séchage (attention aussi à l'usage, selon les essences il ne faut pas utiliser de bois avec aubier pour de la menuiserie ni du bois de cœur)
- si une fente importante est présente sur la grume, et due au séchage, la coupe se fera préférentiellement selon cette direction.

Lors du sciage du bois, des grumes visuellement correctes peuvent être très problématiques : en cas de coup de vent (bois tempête) ou si l'arbre a été endommagé lors de sa chute, ayant par exemple percuté un tronc : fils sectionnés, flambement, fissures liées à l'abattage, fil tors et fendu... rendent ce bois inutilisable.

Question : un test type « BING » permettrait-il de diagnostiquer et d'anticiper ce type de problème sur la grume ?

Concernant le dimensionnement des éléments, « on met les mêmes sections qu'il y a 200ans » (par exemple une panne est en 10x20 - ou 12x22 si plus longue).

Ainsi la résistance est assurée, même si par la suite une partie était exposée à des insectes xylophages.

Dans le cadre réglementaire actuel, les DTU sont source d'incohérences ou contradictions : cas par exemple de la surélévation de 2cm du toit (en lien avec le risque d'incendie) et en même temps l'étanchéité de la maison pour son isolation thermique.

Ils ont pu trouver un assureur pour leur activité, sachant qu'ils ont la responsabilité de la qualité de la charpente qu'ils réalisent.

Dans le cadre de leurs activités professionnelles, Thomas et Lucas n'ont pas de relations particulières avec les acteurs institutionnels de la filière (Fibois...).

La difficulté dans le métier, ce sont les conditions météorologiques : s'il pleut - ou si risque de pluie - on ne peut pas découvrir une toiture car cette opération doit être effectuée de façon ininterrompue.

En hiver, si le bois est gelé il faut éviter de le scier : il est même insciable s'il est gelé à l'extérieur et pas à cœur.

Ils ne rencontrent en revanche aucune difficulté pour le transport des grumes, car des grumiers passant régulièrement dans la localité (2 par jour).

Au fil des années, des investissements ont pu être réalisés (dalle de la scierie, camion).

Leur souhait ? Que les marchés restent « raisonnables » car actuellement les prix des tuiles et de l'OSB s'envolent... n'oublions pas que Thomas et Lucas sont également couvreurs.



Etude expérimentale des propriétés mécaniques de poutres de Sapin pectiné à différents teneurs en eau (état de bois vert et partiellement séché).

Charpentier : Paul ZAHND

Entretien téléphonique avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois

le 27 avril 2022

A 20 ans, Paul travaillait avec le charpentier de son village qui lui a payé son apprentissage chez les Compagnons, et il acquiert de façon poussée la technique ancienne des charpentes traditionnelles. Il se met à son compte et crée son entreprise, dans le Doubs-Jura. Celle-ci bénéficie au fil des années de plus en plus de visibilité et de beaucoup de crédit ; elle se développe et Paul a aujourd'hui un associé et deux salariés. Sa nouvelle société, coopérative « l'Atelier de la grande Oye », a vocation à être une école de charpente : depuis cette année, elle propose une formation d'une semaine pour transmettre le savoir-faire de la fabrication de charpentes à l'ancienne en bois équarri local.

Après de nombreuses rénovations au début de son activité, Paul travaille maintenant exclusivement sur de la construction de maisons neuves, avec des bois locaux : ossature bois et paille, charpente traditionnelle. L'assurance décennale n'intégrant plus la charpente en bois vert au niveau des DTU, seuls des chantiers auprès de particuliers sont réalisés. Ses clients recherchent avant tout une belle charpente, ceci même si elle ne peut être couverte par une garantie. Paul précise de façon imagée que « la maison n'est pas un consommable comme l'est une voiture » et malheureusement il faut actuellement « prendre le risque de ne pas être dans les clous ».

Sur ses chantiers, Paul travaille pour moitié des feuillus (chêne) et l'autre moitié des résineux : indifféremment du sapin pectiné et de l'épicéa (mêlés lors de l'approvisionnement, même s'il peut les reconnaître). Le sapin présente l'inconvénient, par rapport à l'épicéa, d'être plus lourd à l'état de bois vert. Côté vieillissement mécanique, Paul ne voit pas de différence pour un usage en charpente. Il ne fait pas état de présence de « poches d'eau » pour le sapin.

Les arbres sont choisis en forêts, et la date d'abattage est très importante. Les grumes sont équarries à la hache et les éléments de charpente sont assemblés avec des chevilles en bois (aucun connecteur métallique) ; l'un des principaux assemblages est le tenon-mortaise (*note : l'approfondissement de ces techniques nécessiterait un entretien dédié*). Les bois sont non traités.

La grande durée de vie des charpentes construites en bois vert n'est plus à démontrer : il a en tête une vieille charpente avec un mélange épicéa et de sapin, équarries sur laquelle les flèches sont présentes avec donc avec présence d'aubier ; cette charpente était encore en bon état après 300 ans...

Lorsqu'on aborde la question de la durabilité de ces deux essences – sapin pectiné et épicéa - à aubier indifférencié (donc aubier et duramen sont utilisés), Paul insiste sur l'importance de la période d'abattage de l'arbre, selon la saison et le calendrier lunaire : attention ce dernier a un cycle qui change tous les ans !

L'arbre doit être hors sève au moment de l'abattage, durant cette phase il n'a plus aucune activité : dans cette localité c'est entre le 15 novembre et le 15 décembre (avant, en octobre les températures sont fréquemment trop élevées, et en janvier l'hiver peut être « doux »).

Donc la période d'abattage est très courte et les conditions peuvent être difficiles, souvent avec de la neige, requièrent un véritable savoir-faire ; et si l'on prend en compte le cycle lunaire, cela restreint encore la fenêtre d'intervention.

Paul n'a pas de fait de tests poussés pour comprendre l'incidence de la lune, parce c'est compliqué de voir des différences sur de petits volumes, à l'échelle à laquelle il travaille.

L'avantage est de ressuyer beaucoup plus vite : **en combien de temps ?** (alors que si l'arbre est coupé alors qu'il est plein de sève, le ressuyage durera deux ans).

Paul travaille avec un bucheron qu'il connaît bien et comme expliqué précédemment, il impose la période d'abattage : il n'achète que du bois pour lequel ces conditions d'abattage ont pu être respectées.

Les bois sont de plus d'excellente qualité dans cette région d'altitude (entre 800 et 1100m) qui a de très beaux arbres : c'est une « région de bois » ! Veines sont serrées, peu de nœuds.

Parfois il y a bien un arbre qui « tourne un peu plus », un bois un peu trop fendu...

La technique intègre tout cela et Paul n'a jamais eu de problèmes mécaniques à déplorer.

Les grumes sont équarries à la hache : les diamètres utilisés sont de 30cm en moyenne (allant de 17-20cm à 45).

La scierie locale fournit également des produits exceptionnels : « c'est un excellent scieur » précise Paul. Il fait ainsi appel à quelques partenaires locaux avec lesquels il travaille en confiance.

Des conditions climatiques parfois difficile ? Paul n'en souffre pas particulièrement.

Les difficultés rencontrées sont d'ordre relationnel, lorsqu'il s'agit de concilier toutes les contraintes et exigences – parfois avec des changements de dernière minutes – des clients, des architectes, tout en prenant en compte les normes et nouvelles règles thermiques RE2020... En plus de la capacité d'écoute apportée, cela demande énormément de temps et d'énergie, de concessions, pour un résultat parfois contreproductif.

Construire une maison neuve selon les techniques anciennes demande du temps : 6 mois de travail (pour 4 personnes), soit 2 maisons par an.

On comprend bien la disproportion en comparaison avec des entreprises montant des maisons de façon quasi-industrielle : le ratio de prix et le marché sont les mêmes... ici avec 3 maisons livrées par jour !

Aussi, lorsqu'on demande à Paul ses souhaits pour l'avenir, il aimerait que soient accordés aux pratiques qu'il valorise plus de sens et de reconnaissance, comme une « entreprise du patrimoine vivant en plus poussé » : avec des critères qualité et la mise en œuvre de savoir-faire établis.

Pour faciliter, favoriser ces techniques anciennes et ainsi assurer leur préservation, cette démarche pourrait aussi conduire à l'allègement de contraintes d'ordre réglementaire et des avantages le plan fiscal et économique.

Dans d'autres pays d'Europe ce savoir-faire est déjà reconnu.

Au Japon cette reconnaissance est extrêmement poussée, la préservation du patrimoine et perpétuation du savoir-faire ancestral est essentielle : le travail est exécuté entièrement à la main, sans électricité, et objet d'un recommencement sans fin des ouvrages réalisés (l'affutage des outils constituant d'ailleurs aussi un des savoir-faire ainsi préservés).

Grâce à son expertise de la construction en bois vert et fabrication de charpentes à l'ancienne en bois équarri, Paul et son entreprise ont pu se positionner pour participer au prestigieux et exceptionnel chantier de reconstruction de Notre Dame ; il attend la réponse aux appels d'offres.

ANNEXE

Coopérative La Grande Oye (Doubs-Jura) : Société coopérative et participative à responsabilité limitée.

Formation d'une semaine « Constructions durables : initiation à la fabrication de charpentes à l'ancienne en bois équarri local : sélectionner un arbre et travail à la hache-doloire »

<https://formations.coop/shop/constructions-durables-charpente-ancienne-70#attr=>



 **Paul Zahnd**
Artisan Charpentier

Accueil | Charpente | Construction | Restauration | Galerie | Vidéos | Liens | Contact

Savoir-faire

Equarrissage



L'équarrissage à la hache est la technique qui fut la plus utilisée pour le façonnage des poutres dans l'histoire de la charpente. Elle a de grands avantages:

- chaque poutre obtenue par cette méthode est issue d'une bille entière ce qui lui confère une très grande solidité.
- **le bois équarri est beaucoup moins sensible à l'altération car les fibres ne sont pas ou peu coupées.**
- on peut facilement équarri des pièces naturellement courbes ou tordues qui donnent à une construction un charme particulier.
- l'aspect esthétique est inégalable dans un ouvrage neuf.
- elle permet une restauration parfaite des ouvrages anciens



L'arbre



Le choix du bois d'œuvre mérite une attention toute particulière. On ne doit jamais oublier que derrière les éléments d'une charpente, il y a des arbres qui par leur nature, leur structure, leur qualités et défauts, relatent une histoire. De ces particularités découlent leur aptitudes à être équarris, façonnés et mis en œuvre pour jouer un rôle précis dans un ouvrage. Les essences locales seront privilégiées pour leur adaptation évidente aux conditions climatiques d'une région, et l'on veillera à ce que les bois choisis aient été abattus dans les meilleures conditions (saisons et lune) afin d'en assurer la durabilité.

Source : <http://www.charpentealancienne.com/charpente.html>



Propriétés et usages du sapin pectiné (*Abies alba*) mis en œuvre à l'état vert ou partiellement séché pour des applications en structure

Questionnaire « scierie »

Scierie BORIE : David MARIAN

Entretien avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois
le 9 mai 2022

Après une expérience de 20 ans en milieu industriel dans différents secteurs (mécaniques, microélectronique, matières plastiques), David MARIAN – ingénieur de formation - souhaitait prendre la tête d'une entreprise de type industriel lui permettant de travailler un matériau durable et selon un modèle « vraiment vertueux ».

Il a racheté en 2015 une scierie créée en 1946, à la tête de laquelle deux générations de la famille BORIE se sont succédées.

La scierie BORIE est située dans le Massif Central en région Auvergne Rhône Alpes, à Salzuit, Le Marcet (43230). Ce village se trouve en limite occidentale du PNR Livradois Forez, entre les massifs du Haut Livradois à l'Est et les contreforts de Margeride à l'Ouest.

Elle s'est développée et compte aujourd'hui 19 salariés, pour un CA annuel de 3M€.

Une scierie, explique David, c'est l'acteur qui introduit le matériau bois en amont de la filière : « le bois, il est comme il est », l'approvisionnement est local dans un rayon d'une trentaine de Km à la ronde, auprès de propriétaires forestiers privés essentiellement et de quelques coopératives.

Sa transformation en scierie lui confère de la valeur ajoutée et apporte du choix à la filière en aval.

La scierie BORIE travaille uniquement des résineux.

Questionné sur les pratiques en sylviculture et l'influence sur la qualité du bois, David indique que les parcelles de la région sont généralement soumises à des éclaircies régulières et les bois présentent peu de nœuds, même pour le sapin : pour un arbre de 25 à 30m de long, il y a naturellement peu de branches au niveau de la bille de pied et de la surbille.

Si la récolte a lieu suffisamment tôt, les nœuds présents seront d'autant plus petits (arbres plus jeunes).

A sa connaissance l'élagage est peu voire pas du tout mis en œuvre par les propriétaires forestiers.

Concernant l'abattage, David confirme que la période à laquelle celui-ci est effectué est très importante : il faut éviter de le faire après la montée de sève, pour réduire le risque d'échauffure et assurer une bonne conservation du bois jusqu'au sciage.

Après sciage, le bois est traité en surface à moins qu'il ne soit amené à être raboté (cas du parquet).

20000m³ de bois rond sont transformés à la scierie chaque année, soit 12000m³ de sciage. L'objectif est d'aller vers la valorisation la plus poussée possible de ces bois.

La scierie est certifiée PEFC® à hauteur de 30% des ventes, cela suffit actuellement (un client demande ce label).

« La concurrence c'est l'international », donc une certification pertinente doit mettre en avant une reconnaissance de type « Made in France » ; les labels de bois régionaux, comme BTMC® – Bois du Territoire du Massif Central – ou Sapin du Jura®, mettent en avant une « concurrence » au niveau national qui n'aurait pas lieu d'être, selon David.

De plus, la certification a un coût, elle doit à ce titre pouvoir être justifiée.

Les essences se répartissent comme suit :

- 50% de sapin pectiné et épicéa commun, mélangés à l'achat. Le sapin est majoritaire et pourrait représenter 80 à 90% de ce volume, car il est une ressource très abondante localement. Il n'y a de traçabilité sapin/épicéa que pour des commandes spécifiques imposant telle ou telle essence, ou pour les besoins en bois sec dont le sapin est exclu sauf cas particulier (les raisons en seront détaillées plus loin).
- 50% de douglas,
- à la marge : pin, mélèze et épicéa de Sitka.

Les volumes traités sont majoritairement en 25-30cm de diamètre (diamètre de l'arbre à 1,30m de hauteur), pour les applications suivantes :

- 60% dans le bâtiment et la construction,
- 40% en emballage et en coffrage (50/50), le coffrage revenant d'ailleurs à la construction.

Pour le bois d'œuvre, on a tendance à penser que « plus l'arbre est gros mieux c'est » : c'était vrai il y a 50-60 ans. Dorénavant on n'utilise plus de pièces très grosses en charpente car l'évolution est d'aller vers du lamellé-collé pour ces usages, ce qui limite l'intérêt de travailler avec de très gros arbres.

Les plus gros diamètres encore travaillés en charpente sont :

- de 50-60cm de diamètre pour les gros sapins,
- jusqu'à 62,5cm (très gros sapins),
- le diamètre maxi est de 90cm (très très gros sapins) : cette limite n'est pas uniquement due aux propriétés mécaniques (arbre) et de l'outil industriel, elle tient aussi compte :
 - o de la manutention parce qu'il faut garder en tête qu'il s'agit de sapin vert d'une densité pouvant être supérieure à 1000Kg/m³ [à l'état sec on sera de l'ordre de 500Kg/m³, donc deux fois plus léger],
 - o du plan de débit des avivés. Plus la bille est grosse (50cm et plus) et plus le nombre de reprises est important, ce qui impacte le coût des opérations de sciage.

Un arbre de plus de 60cm de diamètre, aujourd'hui plus personne ne va le chercher en forêt...

Donc l'intérêt d'utiliser du très (très) gros sapin réside surtout dans le « nettoyage » de la forêt :

scier et valoriser ces arbres permet de créer un débouché car la vraie problématique régionale, c'est l'espace occupé par les sapins non récoltés et qui devraient l'avoir été, tout en considérant que le prix au m³ sera supérieur compte tenu des surcoûts, de l'abattage au sciage en passant par le transport (grumier).

Il faudrait ainsi « passer » ces volumes et leur trouver de meilleures voies de valorisation que le coffrage : ce serait plus facile si le sapin pouvait être séché industriellement, à un prix compétitif, le collage et le rabotage permettant d'accéder à d'autres applications.

La scierie a un séchoir sous vide, mais qui n'est pas utilisé pour le sapin car le procédé n'est pas adapté (nous verrons un peu plus loin pour quelle raison).

Ce séchoir est mis en œuvre sur de grosses sections d'épicéa ou de douglas lorsque le délai de livraison est court car quelques jours de séchage suffisent. Les conditions de séchage sont équivalentes pour ces deux essences ; le process est standardisé et il y a peu de déformations dues aux retraits.

Le bois sec ne représente qu'une toute petite partie des ventes car le cœur du métier de sciage est actuellement la mise à disposition de pièces en bois vert.

Jusqu'à présent, le sciage français s'est focalisé sur le bois vert pour lequel il a toujours trouvé des débouchés : on a ainsi de l'ordre de 70% des ventes en bois vert ou partiellement séché alors qu'on devrait plutôt être de l'ordre de 80-90% si l'on considérait l'évolution des besoins du marché, car de plus en plus d'applications nécessiteraient d'utiliser du bois sec. Pour le dire autrement, le marché se contente de bois vert et partiellement séché, mais cela risque de ne plus durer longtemps !

D'une part, un bois sec est plus facile à mettre en œuvre pour les charpentiers.

D'autre part, pour une maison ossature bois et à basse consommation, le niveau de qualité des pièces utilisées et assemblées doit être très bon : il faut éviter autant que faire se peut que le bois « travaille », les déformations, l'apparition de fentes – ce qui ne peut être favorisé que si le bois est correctement séché avant la mise en œuvre en construction.

C'est également nécessaire pour toutes les techniques faisant appel au collage (aboutage, lamellé-collé, etc).

Or la présence de poches d'eau dans le sapin est une problématique majeure pour son séchage, du fait de l'hétérogénéité et de la forte teneur en eau du bois.

Le sapin se sèche bien comme un bois dur, le chêne par exemple : à très basse température (40°C) et beaucoup de temps. On perd alors l'avantage compétitif du sapin versus l'épicéa en termes de prix.

Actuellement la scierie sèche le sapin en séchage naturel (cela ne représente que de très faibles volumes).

Ce séchage dure en moyenne 5 à 6 mois après le sciage :

- pour des pièces de charpente, rabotées après séchage, celui-ci peut même durer encore plus longtemps (il s'agit de pièces exceptionnelles),
- pour le lambris et le parquet, également rabotés, le séchage est plus rapide car les sections sont plus petites.

Considérant la disponibilité en sapin - très importante sur le territoire - et son prix attractif en comparaison avec les autres résineux (en particulier l'épicéa qui devient d'ailleurs de plus en plus rare), l'un des objectifs de David pour l'avenir est de sécher de plus en plus de sapin et donc trouver un procédé industriel efficace et accessible.

Ce d'autant plus que le sapin présente encore d'autres avantages : bien que faisant partie de la famille des résineux, il n'y a pas de résine (elle est uniquement dans l'écorce), ce qui réduit considérablement l'encrassement des outils. De plus sa densité plus importante à l'état vert que celle de l'épicéa lui évite peut-être de souffrir de la critique parfois manifestée à l'encontre de ce dernier : être « léger » cela paraît suspect pour certains...

David suit depuis plus de 3 années les actions engagées par Fibois AuRA sur le sujet, visant d'une part à comprendre l'origine des poches d'eau (l'eau s'infiltré depuis les branches cassées et les nœuds non adhérents), d'autre part à trouver une solution de séchage artificiel du sapin.

Sécher par micro-ondes, ou par radiofréquences ? Oui ce serait une option intéressante sur le plan technique selon David, qui a expérimenté à une petite échelle ; mais après consultation d'un fabricant de matériel industriel de séchage par hautes fréquences, le développement n'a pu être mené car en plus d'un investissement conséquent, la consommation énergétique donc le coût à l'usage auraient été très élevés du fait de la taille du four (liée à la taille des pièces).

Autre projet innovant pour ouvrir de nouveaux débouchés aux sapins de gros diamètres - et ici la forte teneur en eau devient même un avantage puisqu'il n'y aurait pas besoin d'un étuvage préalable : c'est le déroulage !

Là encore la faisabilité technique est au rendez-vous - des essais de déroulage puis collage sous presse ont été réalisés pour prototyper du LVL - mais il n'y a aucun dérouleur sur le territoire.

Plus d'1M€ seraient nécessaire pour le déroulage, 70M€ pour l'unité complète ; les acteurs locaux intéressés par le projet sont forcés de l'abandonner car ils ne peuvent s'engager sur de tels investissements.

Pour autant, rien ne garantit qu'un « gros » industriel ne viendra pas à l'avenir s'installer sur le territoire pour profiter de l'opportunité, car la forêt attise les convoitises...

En conclusion, pour David, les principaux enjeux sont en lien avec les achats donc l'amont de l'activité :

- la qualité du bois en forêt,
- la disponibilité des bûcherons - professionnels des forêts pour la font vivre,
- les prix.

Dans le contexte actuel chaque échantillon de bois compte.

David souhaite qu'en aval les professionnels connaissent mieux le sapin pectiné, les techniques de mise en œuvre et qu'une vision positive de cette essence se développe.

Ce serait tout l'intérêt d'une argumentation bien construite et largement communiquée, montrant que le sapin « fait bien le travail » !

Le séchage reste comme on l'a vu une étape critique.

La recherche et l'industrialisation doivent se poursuivre pour trouver un procédé adapté et soutenable économiquement.

Il serait utile de s'appuyer également sur les retours d'expérience dans ce domaine (Autriche par exemple).



Propriétés et usages du sapin pectiné (*Abies alba*) mis en œuvre à l'état vert ou partiellement séché pour des applications en structure

Fustier : Jean-Charles CHATELUS

Entretien avec Florence Mathieu / stage M1 Sciences du Bois
le 20 mai 2022

Jean-Charles CHATELUS est fustier à Saint-Jean-Soleymieux (42560), village situé sur le versant oriental des Monts du Forez, à proximité de Montbrison.

Le grand terrain de 3500m² - qui aurait avantageusement pu être de 5000m² comme le souligne Jean-Charles, lui permet de travailler sur le chantier avec son équipe « par tous les temps ». C'est son lieu de vie, toute une philosophie. *Extrait de son site Internet (Cf Annexe) : « La fuste n'est pas un métier, ni même une activité, c'est un art. Un art de vivre, un art de créer. À l'heure du plastique, du béton et de l'acier, le travail du bois devient un bol d'air pur. Une rareté exquise. »*

Jean-Charles est juriste en droit environnemental.

Après une première expérience pour la construction de sa propre maison, il a travaillé avec un fustier en Allemagne et a décidé d'en faire son métier : « on part de l'arbre brut et on arrive à une maison en rondins » dit-il avec enthousiasme. Il faut anticiper, faire des calculs car les bois s'entrecroisent, se superposent...

C'est aussi toute une manière de vivre, de s'entraider pour construire, de le faire entre amis.

« Ce qui me plaît, c'est que c'est un métier qui ne peut être fait par une machine, qui ne pourra jamais être automatisé ».

Après 2 à 3 ans d'apprentissage, il vole de ses propres ailes et revient s'installer en France et dans sa région d'origine ; son entreprise s'appelle, cela va de soi, « Tout en rondins » créée il y a 5 ans [*activité APE Travaux de charpente*].

Il lui aura fallu tout d'abord une bonne année pour créer « avec convivialité » sa filière locale (propriétaires forestier, grumiers, etc).

Les 3 autres personnes qui travaillent avec lui sont des locaux, ce qui a bien « aidé » à cette mise en route.

« La maison en fuste existe depuis que la hache existe »...

Le principe de la maison en fuste de bois est l'empilage de rondins en bois vert ou partiellement séchés (ressuyé), appelés fustes : les fustes sont montées tête-bêche pour constituer les murs et les cloisons.

Ce sont des grumes tronçonnées à la longueur voulue, écorcées ; une gorge est « creusée » sur la face inférieure de façon à s'encaster sur la fuste qui se trouve juste en-dessous (qui elle conserve sa surface arrondie d'origine), et elle est également travaillée sur chacune de ses extrémités pour permettre l'encastrement aux angles.

La première image qui nous vient en tête est celle des maisons canadiennes en bois....

Or Jean-Charles rappelle qu'historiquement les maisons en fustes existaient en France, dans le Queyras : c'étaient les maisons des forestiers. Ce sont les colons français partis au Canada, qui ont emmené avec eux ce savoir-faire (voir annexe).

Thierry HOUDART a recréé la filière de fustier en France dans les années 1980. Installé à la Pessière (Franche Comté), cet ingénieur forestier est auteur de plusieurs ouvrages de référence [dont « L'art de la fuste »] et sa technique est reconnue comme étant la plus performante dans le monde entier. S'y référer pour des informations à caractère technique, en complément du présent entretien.

Aujourd'hui 15 fustiers exercent sur le territoire.



Le terrain comportant une aire de stockage des grumes, elle-même séparée en deux : avant et après écorçage. La zone de travail : découpe et construction/assemblage, la grue en position centrale (deux chantiers peuvent être conduits simultanément, comme ici).

Certaines pièces sont découpées également une fois mises en place sur le bâti, celles par exemple nécessitant des assemblages pour la charpente.

Le pré-montage est maintenu par des sangles, puis démontage, transport et remontage sur le lieu de la construction où la préparation de la dalle et la mise à niveau sont des étapes cruciales.

Les 3 outils principaux pour le fustier : le compas, la grue et la tronçonneuse.

Contrairement aux apparences, manier la tronçonneuse n'est pas difficile physiquement car le poids repose essentiellement sur la jambe et il s'agit de la guider, très précisément. Selon les coupes, différents guides et chaînes sont utilisés.

NB : tronçonneuse « normale » : Steel MS261 pour 90% des modalités, même pour les grosses coupes.

Chaque maison est unique.

Une maison de 100m² demandera près de 80m³ de bois, 6-8 mois de travail (à 4 personnes) puis 10 à 15j.

La maison peut comporter un deuxième étage. Une maison peut ainsi atteindre 300m², demandant alors 1,5 an de construction.

Les fustiers utilisent différentes essences d'arbres selon la région (utilisation d'arbres issus de peuplements locaux).

Jean-Charles travaille exclusivement une essence de résineux : le douglas, à cœur rouge.

Les cœurs blancs (sapin, épicéa) sont selon lui trop sensibles aux nuisibles : à la Pessière, explique-t-il, les cabanes pour chasseurs faites en bois à cœur blanc se tiennent moins bien dans le temps, et nécessitent plus de traitements.

La raison de ce choix est donc une meilleure durabilité du douglas.

Jean-Charles a par le passé travaillé une fois avec du sapin pectiné, pour un collègue qui construisait sa maison en sapin.

Approvisionnement :

groupement de propriétaires forestiers vers Noiretable : SYLV'ACCTES ? Groupement des sylviculteurs du Haut Forez ? des hauts vents ? Ou autre ? En attente info Jean-Charles

Le but est d'avoir une filière éthique, avec de petites éclaircies, bucheron avec tronçonneuse (les abatteuses abiment trop).

L'approvisionnement n'est pas facile car il faut négocier auprès des exploitants afin que les besoins précis soient respectés. Les contrats sont passés 6 à 8 mois à l'avance.

C'est uniquement du bois local, du douglas : les prix augmentent car il est de moins en moins disponible...

Les arbres sont sélectionnés sur pied, en forêt. Selon quels Critères ?

Pour les ¾ des arbres choisis : pas torse, bonne rectitude (sauf si courbe pour un usage différent, ou débité différemment pour isoler la partie courbe), diamètre à 1m30 sans l'épaisseur d'écorce.

Si l'aspect n'est pas correct, il sera utilisé en charpente, partie non visible.

Le ¼ restant est volontairement « bizarre » pour des traverses, poteaux... tout le charme, le cachet et l'originalité de ce type de construction.

Très important : pour une même maison, **tous les arbres choisis sont issus du même peuplement** ; ils ont grandi à la même altitude et sont coupés au même moment. C'est l'une des clés car cela **permet d'avoir un comportement homogène sur toute la maison lors du séchage qui se poursuit une fois la maison montée**. Il y a une interaction en eux et le climat.

C'est la raison pour laquelle des arbres à croissance plus rapide (moins denses donc plus isolants) ne sont pas utilisés pour les murs.

La période d'abattage est également très importante : hors sève « comme les anciens » entre mi-novembre et mi-mars, et à la bonne lune (lune décroissante/descendante pour les résineux (appelée également vieille lune c'est-à-dire une grume peut faire jusqu'à 900 Kg !

Les grumes sont choisies selon leur usage (selon leur diamètre, si elles tournent.), le départ « vers la racine » est conservé (joli).

Les pièces de bois (forme, taille...) sont liées à la partie de structure : formes régulières pour les murs.

Les tailles pourraient varier (diamètres) sur le principe mais pour des raisons techniques et d'esthétique les grumes utilisées ont des diamètres du même ordre.

Avant de 25-30cm, dorénavant - du fait de **la RT2012 (la construction en fuste est alors 100% conforme) - de 35cm minimum de diamètre.**

La base du tronc est conservée, permettant d'avoir le « relief » spécifique à chaque arbre dans cette partie, visible à l'extérieur (aux angles). Les fustes sont mises tête-bêche compte tenu de leur conicité, si bien qu'aux angles et jonction s'alternent les bases et les sommets des fustes (en décalé, les bases étant trop « larges » pour que toutes les extrémités dépassent au même niveau).

Dans les pièces, les poteaux sont généralement des pièces « uniques » du point de vue de leur forme, renforçant le caractère exceptionnel au niveau architectural. De même qu'une pièce ayant de belles irrégularités en surface peut être mise en valeur sur une poutre dans une partie apparente. Il est également possible d'utiliser des brins écorcés pour des pièces particulières.



Elles sont ensuite écorcées avec un jet

d'eau (nettoyeur haute pression) : l'objectif est de conserver le cambium intact car il protège le bois (par expérience il sait que si le cambium est altéré ou supprimé, le bois sera plus faible et risque davantage d'être attaqué par les insectes). L'écorçage à la fraise et à la raboteuse ne le permet pas.

Cela fait comme une peau et lorsque le bois sèche en surface après l'écorçage par jet d'eau, de petites fissures apparaissent le long du rondin :



Photo : <https://www.federation-artisans-fustiers.fr/index.php/metier-fustier>

Il arrive que des arbres apparemment sains présente des défauts à ce stade (photo de droite), soient endommagés une fois écorcés => réservés pour des pièces non visibles.

Sur le moment cela consomme de l'eau mais est réalisé sur une période de temps restreinte (15 jours dans l'année) et système de récupération et réserve d'eau est à l'étude.

Pour être en conformité avec la RT2012 et appliquer la garantie décennale, un traitement insecticide et fongicide préventif est appliqué par badigeonnage ou aspersion en surface sur toute la grume (obbiatex*) en insistant dans les fentes et les parties usinées.

Les fentes qui se prolongent jusqu'aux parties « creusées » pour assurer la jonction aux coins, et situées en face extérieure, font également l'objet d'un soin particulier pour ce traitement et leur usinage (trait de scie effectué pour que l'eau s'écoule et s'évacue avant) : éviter les défauts de conception qui génèrent l'accumulation et stagnation d'eau et donc la dégradation du bois.

NB : ce traitement a lieu ou pas selon la volonté du client.

Il existe un traitement naturel à base de propolis, mais beaucoup trop onéreux = prix de la maison ! [axe de recherche...]

*Doc fabricant Obbiatex : mélange en phase solvant, à usage professionnel et grand public, pour le traitement des bois feuillus et résineux en classes d'emploi 1, 2 et 3.1 risques réduits. Efficace contre les champignons basidiomycètes de pourriture cubique et fibreuse et contre les insectes à larves xylophages (hors termites). Protège les bois en service contre les champignons de bleuissement.

Utilisation en classe 3.1 contre les champignons de bleuissement : doivent être revêtus d'une finition de protection adaptée, dans les 3 mois suivant le traitement.

Un saturateur incolore protège du grisaillement (le cambium ne noircit pas) et après quelque temps la couleur est plus ou moins foncée « miel de forêt ». En revanche il faut éviter l'exposition directe au soleil grâce à un grand rebord de toit.

C'est la stagnation d'humidité et les infiltrations d'eau qui posent problème et doivent à tout prix être évitées. Dans la région, en cas de pluie sur la façade (contrairement au Jura elle n'arrive pas à l'horizontal), ou d'humidité à l'intérieur dans une pièce d'eau comme la salle de bain, le bois va ensuite sécher. Entrée, rebords de fenêtres : tout est légèrement en pente de sorte que l'eau n'y stagne pas.

Pour le sol, soit la maison est posée sur une dalle (75% des cas) : pour éviter les remontées par capillarité, une peinture goudronnante est appliquée et la dalle est « remontée » jusqu'à 1/3 de la hauteur du 1^{er} rondin.

La maison peut également être montée sur pilotis, auquel cas il est fait appel à une entreprise spécialisée pour la stabilisation. Nécessite un solivage - cette solution est plus chère.

Après écorçage, certains fustiers pratiquent un ressuyage de 2 ans :

les billes sont parfois entreposées durant cette période : elles ne doivent alors pas être exposées aux éléments, ne sont pas placées à même le sol, sont rangées sur rondins. Il n'y a pas de variation de volume pendant un an environ (*encore au-dessus du PSF*) puis au fur et à mesure de la 2^{ème} année il y a un retrait de 3 à 4% (rétraction due à la perte d'humidité).

Jean-Charles lui utilise les billes écorcées au fur et à mesure : le bois est semi-vert lorsqu'il est mis en œuvre sur la maison, et va donc descendre beaucoup plus du fait du retrait au séchage. Mais en réalité le travail reste le même, car même dans le cas précédent, après réessayage de 2 ans, la rétraction se poursuit sur la maison, ce qui impose également de prévoir les jeux pour les menuiseries.

Le rondin à préparer est monté sur la structure et marqué après avoir été posé sur des cales à la hauteur définie.

Le marquage du contour de la gorge correspond au relief de la fuste se trouvant au-dessous : le tracé s'effectue à l'aide avec le compas à double niveau (le compas américain ou russe est très pratique).



Le rondin marqué est ensuite descendu, positionné face à travailler sur le dessus : la gorge, dont les pourtours ont été tracés, est délimitée très précisément avec la tronçonneuse puis taillée : l'évidement central est effectué en adaptant sur la tronçonneuse un outil permettant de creuser : un rabot fraise. La profondeur de la gorge : de 2,3 à 2,5 cm.



Fraise adaptée pour tronçonneuse

Aux extrémités du rondin ou en position plus centrale, d'autres types de découpe : dessus et dessous pour assurer les croisements aux angles, ou encastremets en charpente.

La largeur moyenne de cet encastrement est de 10 à 15 cm, la largeur minimale de 5cm pour une longueur maximale de 15cm (l'écartement d'une main).

Pour être conforme à la RT2012, un joint fustier (polymère synthétique) est ajouté à l'interface pour assurer l'étanchéité et l'isolation (avant c'était de la mousse ou de laine qui pouvaient être utilisés pour le calfeutrage), avant la pose de la fuste supérieure.



Photo : <https://www.federation-artisans-fustiers.fr/index.php/metier-fustier>

La charpente est réalisée également avec des fustes, et Jean-Charles assure également la réalisation des toits végétalisés (sinon la couverture est réalisée par un couvreur, les propriétaires de la maison assurant la maîtrise œuvre et donc la coordination avec les différents corps de métiers de gros œuvre et aménagement intérieur).

La RE2020 est également largement appliquée (va dans le bon sens à 95% et non le métier n'a pas disparu, a « résisté » a résisté aux évolutions de réglementation) mais aucune étude performance thermique n'existe dans la profession => intérêt pour étude thermiques :

- réglementation madriers
- 2 à 3 fois plus isolant que construction bois
- les 5% restant... accentuer l'isolation. Pourquoi, quel intérêt ? Et obligerait à doubler les murs ou avoir des fustes de 60cm de diamètre...

Donc l'idéal serait de réussir à faire passer la Pessière avec un thermicien et renforcer au maximum l'isolation (sol, toiture, menuiserie) : site de référence pour obtenir une « accréditation ».

Mais il est très difficile de faire faire de telles études thermiques... Une solution à court terme : pas de déclaration de fin de travaux et vente au moins après 10 ans.

Et puis cela risque d'être contre-productif car la maison devient « étanche » (cas de la VMC avec le risque de prolifération bactérienne) : le « plus » au niveau thermique apportant une baisse de consommation énergétique fait perdre **l'intérêt de la fuste pour la qualité de l'air** : grâce à sa diffusivité, le bois restitue un air sain. or malheureusement ce critère, fondamental pour le bien-être et la santé, n'est pas pris en compte et aucune étude n'est à sa connaissance disponible.

.Pour les menuiseries (portes, fenêtre) : découpe de l'ouverture à mi-bois en laissant un jeu calculé selon la somme des retraits qu'auront tous les rondins soit 12 à 15cm de retrait en haut d'un mur (6% de retrait en hauteur).

En hiver la maison va avoir un séchage du au chauffage :

il ne faut surtout pas jointer à l'extérieur (photo) car les retraits ne sont pas les mêmes qu'à l'intérieur. A terme après le séchage complet (le séchage extérieur intervenant plus lentement), l'extérieur sera jointé comme l'intérieur.

Attention à l'obtention du permis de construire !!! Au PLU local avec clause qui interdit le « style canadien », ou avec un style traditionnel (le parpaing en fait partie) ou qui exclut ce qui ne s'intègre pas assez au paysage... Ceci se comprend bien sûr dans un lotissement, mais en pleine campagne...

Et banques peuvent aussi être frileuses.

Aussi ses clients sont dans une démarche engagée, ce sont des personnes passionnées, têtues et pro-actives ! Il faut de la motivation pour aboutir et 6 à 8 mois pour échanger (ce n'est pas une maison clé en main).

Sur 100 prises de contact, 4 à 5 aboutiront.

Jean-Charles a participé avec succès au concours « Initiatives remarques » (mais ce n'est pas ce qu'il recherche, précise-t-il aussitôt).

Ses souhaits ?

Que l'Administration joue davantage le jeu, le législatif aussi en ne mettant pas de bâtons dans les roues.

La conséquence des difficultés actuelle, c'est d'être dans une niche et cela lui plaît : reste confidentiel, cela n'est pas donné à tout le monde.

2 à 3 maisons par an (x4 personnes), éthique car 3 camions / ans de bois, petites éclaircies en forêt...

NB : et ce n'est guère plus cher qu'une maison en parpaing (+5%)

En complément : annexes

Site Internet Jean-Charles : <https://www.toutenrondins.com/>

Fédération des artisans fustiers (Cf mail perso 08/05) : <https://www.federation-artisans-fustiers.fr/index.php/metier-fustier>

« Les canadiens les appellent les « maisons de rondin », les premières y ont été construites par les colons dans le territoire de la Nouvelle-France à partir du 16eme siècle. »

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/maisons-de-rondins>

Cette technique rappelle celle des costes.



Annexe C

Album photos des cernes des poutres

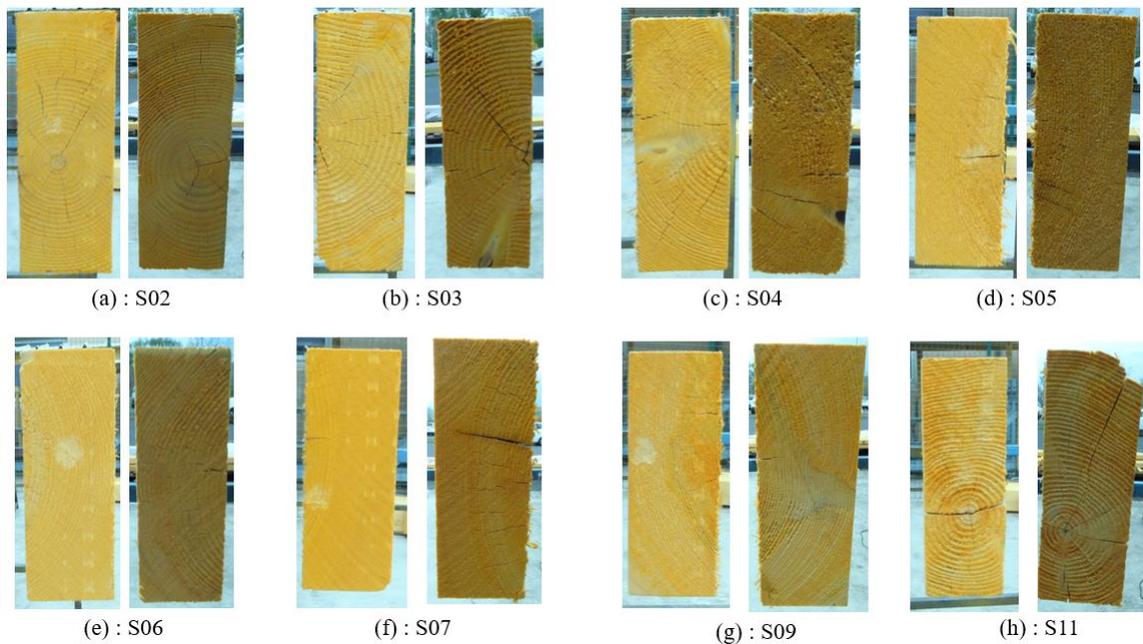


FIGURE C.1 – Cernes des poutres : (a) S02 ; (b) S03 ; (c) S04 ; (d) S05 ; (e) S06 ; (f) S07 ; (g) S09 ; (h) S11.

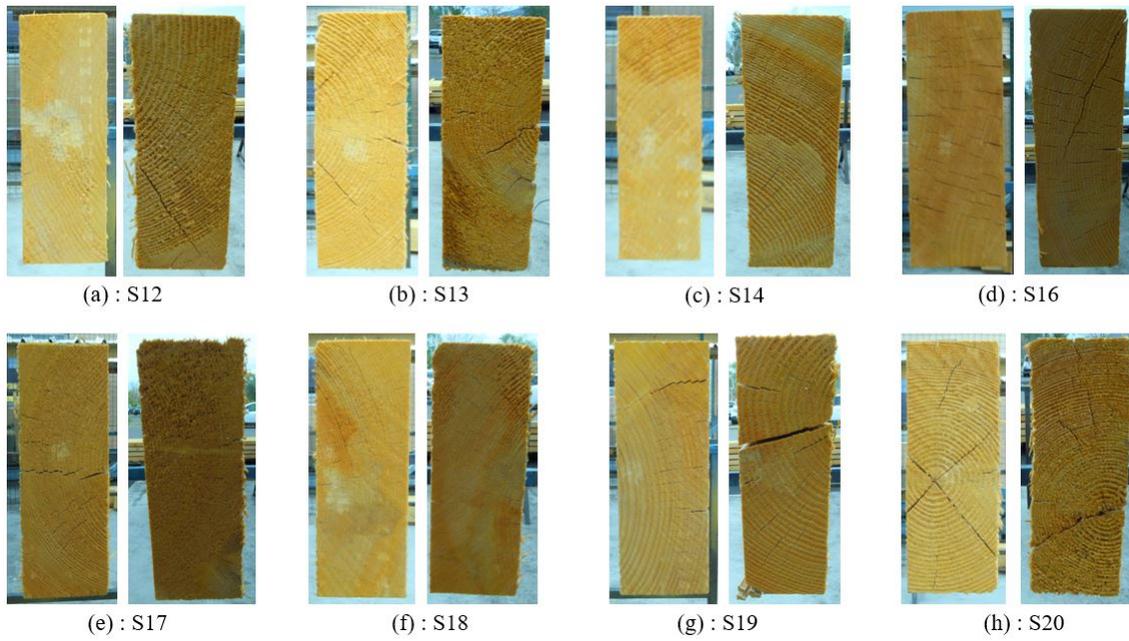


FIGURE C.2 – Cernes des poutres : (a) S12 ; (b) S13 ; (c) S14 ; (d) S16 ; (e) S17 ; (f) S18 ; (g) S19 ; (h) S20.

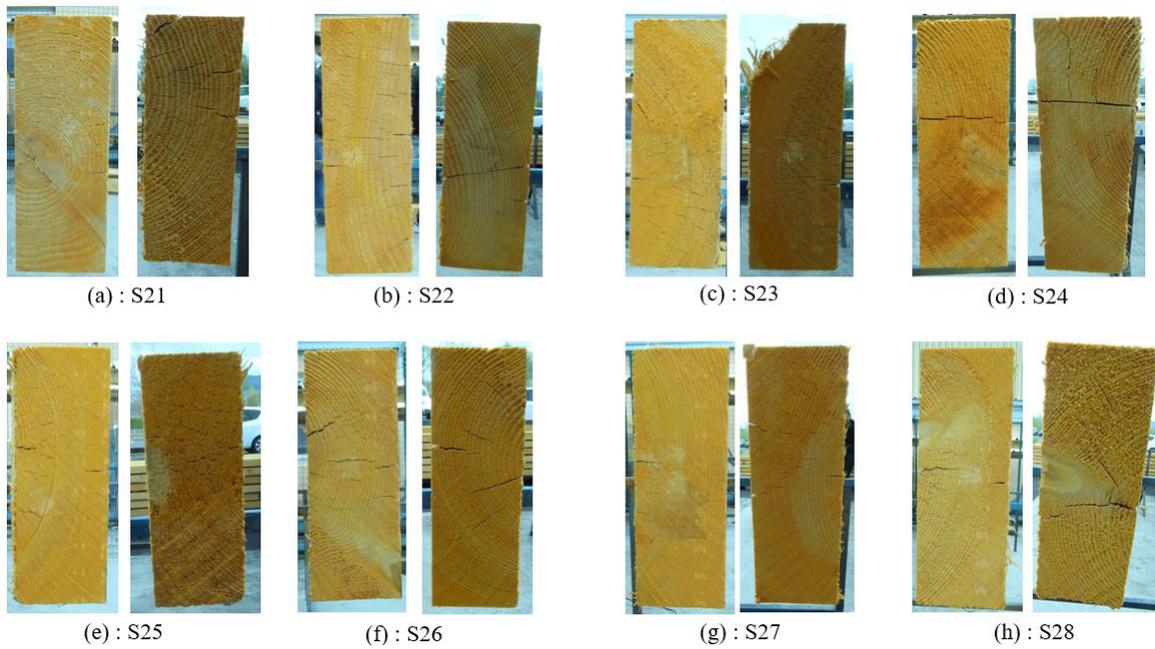


FIGURE C.3 – Cernes des poutres : (a) S21 ; (b) S22 ; (c) S23 ; (d) S24 ; (e) S25 ; (f) S26 ; (g) S27 ; (h) S28.



(a) : S29

FIGURE C.4 – Cernes de la poutre S29.



(a)

(b)

FIGURE C.5 – Photos des poches identifiées sur le lot de poutres : (a) poutre S03; (b) poutres S18 (haut) et S04 (bas).

Annexe D

Principe de l'homographie

L'homographie consiste en la projection des coordonnées d'un repère 2D (un plan) dans un nouveau, comme illustré en figure D.1 issu de Hartley et Zisserman (2004). Dans la figure de gauche la photo est prise avec un angle de vue et dans celle de droite elle est projetée sur un plan parallèle au mur.

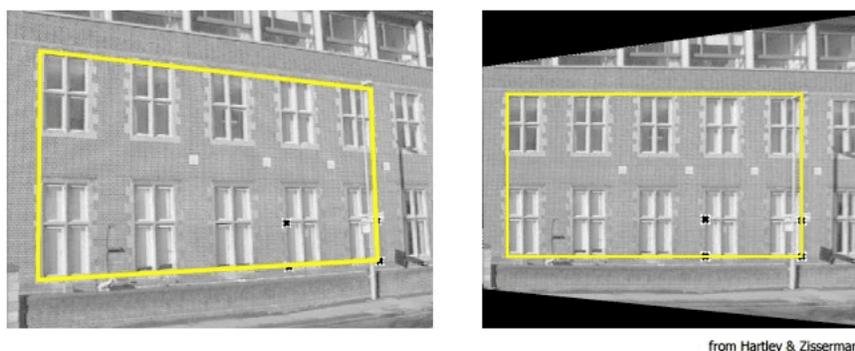


FIGURE D.1 – Image de gauche : prise de photo d'un mur avec un angle de vue ; image de droite : transformation de la photo comme si l'appareil photo était en face du mur.

La fonction `detectMarkers` d'OpenCV utilisée dans ce travail renvoie la position des marqueurs dans le repère image (en pixel), le but est donc de passer des coordonnées images aux coordonnées physique (en millimètres). Pour cette transformation, un calcul d'homographie est réalisé.

$$\underline{X} = \omega \underline{Hg} \cdot \underline{x}$$

Où :

- $\underline{X} = (X, Y, Z)$ sont les coordonnées physiques, en mm ;
- $\underline{x} = (x, y, 1)$ sont les coordonnées homogènes 2D de l'image. Lorsqu'on passe des coordonnées Euclidiennes aux coordonnées homogènes, une nouvelle dimension est ajoutée. Cette distance est fixée à 1 et assure la cohérence mathématique.

- $\underline{\underline{Hg}}$ est la matrice d'homographie 3×3 :

$$\underline{\underline{Hg}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{D.1})$$

- ω est un facteur d'échelle. En coordonnées homogène, $(x, y, 1)$ et $(\omega x, \omega y, \omega)$ représentent le même point pour ω un scalaire non nul. Il peut être fixé à $\omega = \frac{1}{h_{33}}$ et injecté dans $\underline{\underline{Hg}}$. Dans ce cas on peut noter :

$$\tilde{h}_{ij} = \frac{h_{ij}}{h_{33}}, \quad (i, j) = ((1, 2, 3), (1, 2, 3))$$

La transformation nécessaire pour obtenir des coordonnées homogènes dans le repère physique est :

$$\underline{\hat{X}} = \begin{pmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\underline{X}}{Z} \quad (\text{D.2})$$

Ce qui donne :

$$\underline{\hat{X}} \cdot Z = \underline{\underline{\tilde{H}g}} \cdot x$$

Pour un point donné les équations sont donc :

$$\begin{cases} \hat{x} \cdot Z = \tilde{h}_{11}x + \tilde{h}_{12}y + \tilde{h}_{13} \\ \hat{y} \cdot Z = \tilde{h}_{21}x + \tilde{h}_{22}y + \tilde{h}_{23} \\ Z = \tilde{h}_{31}x + \tilde{h}_{32}y + 1 \end{cases}$$

Ainsi :

$$\begin{cases} \hat{x} \cdot (\tilde{h}_{31}x + \tilde{h}_{32}y + 1) = \tilde{h}_{11}x + \tilde{h}_{12}y + \tilde{h}_{13} \\ \hat{y} \cdot (\tilde{h}_{31}x + \tilde{h}_{32}y + 1) = \tilde{h}_{21}x + \tilde{h}_{22}y + \tilde{h}_{23} \end{cases}$$

En transformant $\underline{\underline{Hg}}$ en vecteur, l'équation devient :

$$\begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x\hat{x} & -y\hat{x} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -x\hat{y} & -y\hat{y} & -1 \end{pmatrix} \cdot (\tilde{h}_{11}, \tilde{h}_{12}, \tilde{h}_{13}, \tilde{h}_{21}, \tilde{h}_{22}, \tilde{h}_{23}, \tilde{h}_{31}, \tilde{h}_{32}, 1)^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{D.3})$$

Soit finalement :

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{\tilde{H}g}} = \underline{0}$$

Résoudre ce problème, évitant la solution évidente $\underline{\underline{\tilde{H}g}} = \underline{0}$, est le calcul d'homographie. C'est un problème de minimisation étant donné que la solution ne tombe jamais précisément à 0 pour des images obtenues expérimentalement. Un point sur une photo dont les coordonnées physiques sont connues donne deux équations, et la matrice d'homographie présente huit inconnues. En conséquence, au moins quatre points aux coordonnées physiques connues sont nécessaires pour calculer la matrice d'homographie intégralement. Ces quatre points peuvent

être les quatre coins d'un marqueur, ou comme c'est le cas pour les mires de cette étude les centres de quatre marqueurs différents.

Il y a au moins deux raisons pour utiliser les quatre centres de quatre marqueurs plutôt que les quatre coins d'un marqueur :

- les centres sont localisés plus précisément que les coins ;
- la projection des pixels dans le plan physique est globalement meilleure si les quatre points couvrent une grande partie de l'image plutôt que quatre points très rapprochés comme c'est le cas avec quatre coins d'un seul marqueur.

Évidemment, trois points colinéaires donnent des informations redondantes, donc maximum deux marqueurs utilisés pour le calcul d'homographie peuvent être alignés. Si plus de quatre points dont les positions physiques sont connues, la minimisation du calcul d'homographie sera meilleure.

L'homographie utilisée pour obtenir les coordonnées physiques dans une image donnée est la même pour tous les marqueurs. Ainsi, ils sont tous projetés sur le même plan. Par conséquent, l'homographie doit être calculée une fois sur chaque photo et corrige ainsi un potentiel angle de vue.

Annexe E

Quantification de l'impact de la flexion déviée

Soit un chargement d'une poutre dont la section est orientée d'un angle α , figure E.1. Dans cette situation, la flexion est déviée et implique une flèche horizontale en plus de la flèche verticale. Soit (z_1, y_1) le repère associé à la section, (z_2, y_2) le repère associé au chargement et à la mesure de flèche.

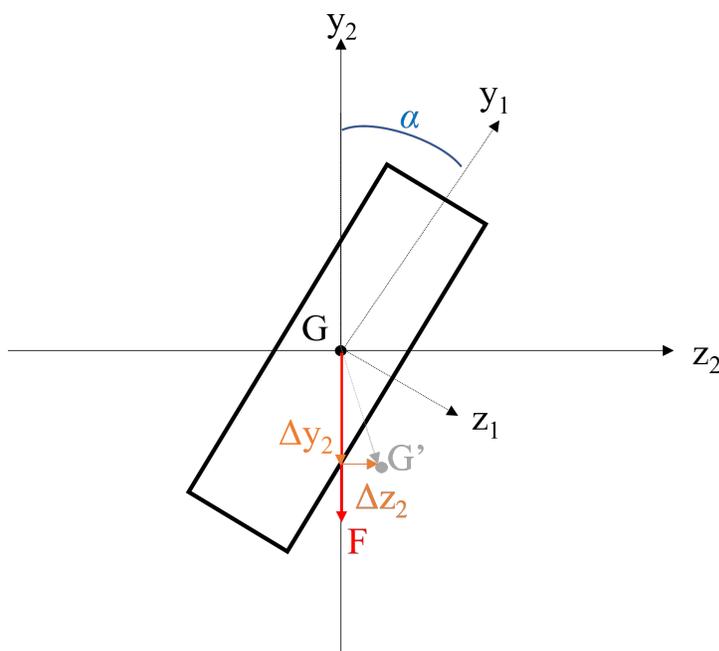


FIGURE E.1 – Schéma d'un chargement en flexion déviée.

Partant de la formule de la flèche centrale définie en partie C, on peut définir les flèches dans

le repère (z_1, y_1) :

$$\Delta y_1 = -\frac{23FL^3}{1296EI_z} \cos(\alpha) \quad ; \quad \Delta z_1 = \frac{23FL^3}{1296EI_y} \sin(\alpha) \quad (\text{E.1})$$

où F représente le chargement, L la longueur de la poutre ; E le module élastique axial, I_{y1} et I_{z1} respectivement le moment quadratique de de la section droite autour de l'axe $y1$ et autour de l'axe $z1$: $I_{y1} = He^3/12$ et $I_{z1} = eH^3/12$. Par l'équation (E.1), on a bien si $\alpha = 0$:

$$\Delta y_1 = -\frac{23FL^3}{1296EI_z} \quad ; \quad \Delta z_1 = 0 \quad (\text{E.2})$$

Ensuite, il vient la relation entre les deux repères :

$$\begin{cases} \Delta z_2 = \Delta z_1 \cos(\alpha) + \Delta y_1 \sin(\alpha) \\ \Delta y_2 = \Delta z_1 \sin(\alpha) - \Delta y_1 \cos(\alpha) \end{cases} \quad (\text{E.3})$$

En combinant les équations (E.3) et (E.1), il vient :

$$\Delta y_2 = \frac{23FL^3}{1296E} \left[\left(\frac{1}{I_z} + \frac{1}{I_y} \right) - \left(\frac{1}{I_y} - \frac{1}{I_z} \right) \cos(2\alpha) \right] \quad (\text{E.4})$$

De même, si $\alpha = 0$ on retrouve l'équation (E.2).

L'impact relatif d'une flexion déviée peut ainsi s'exprimer, pour un angle $\alpha = 10^\circ$, $H = 175$ mm et $e = 63$ mm :

$$\frac{\Delta y_2(\alpha) - \Delta y_2(0)}{\Delta y_2(0)} = 0,03 \frac{H^2}{e^2} - 0,03 = 20\% \quad (\text{E.5})$$

Une flèche centrale d'une section inclinée de 10° est donc environ 20% plus élevée que cette même flèche pour une section non inclinée, indépendamment de toutes propriétés mécaniques.

L'angle réel de la section droite n'a pas été mesuré, mais à l'oeil peut être majoré à 10° . Par ailleurs, les mesures de flèche sont réalisées avec des capteurs LVDT munis de palpeurs. Le palpeur est fixe dans un repère lié au bâti. La flèche horizontale entraîne un décalage du point mesuré, pouvant également impacter la mesure de flèche verticale.

Annexe F

Trajectoires mécano-sorptives et évolution du fluage en double pente

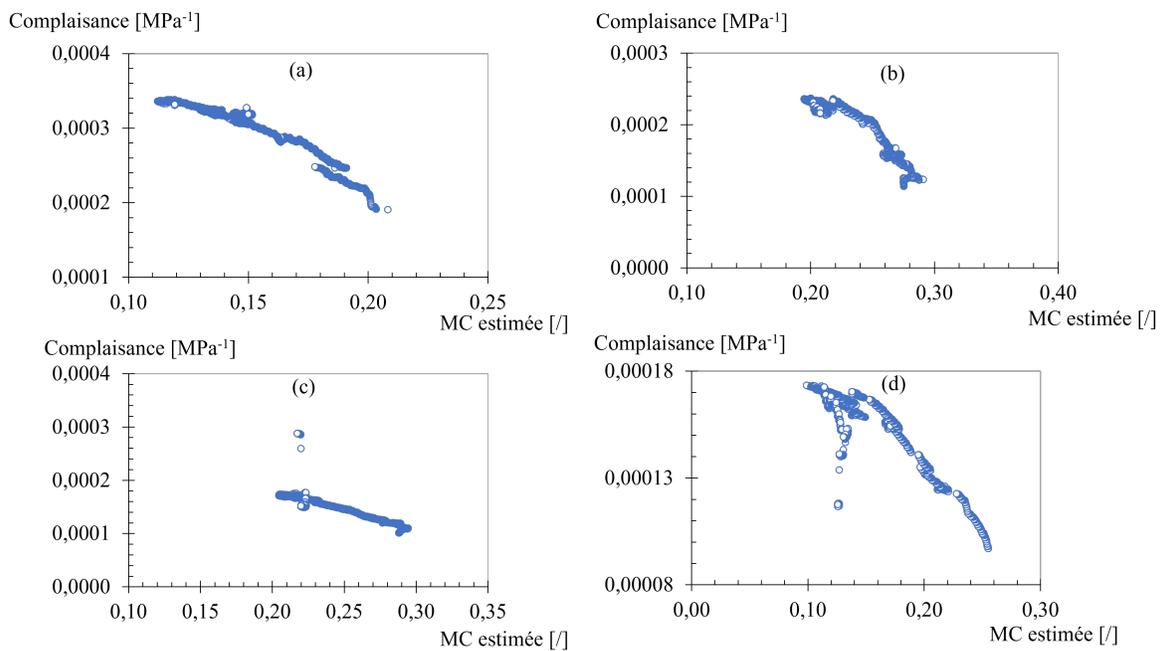


FIGURE F.1 – Trajectoire mécanosorptive de la vague 1, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S03 ; (b) S14 ; (c) S12 ; (d) S21.

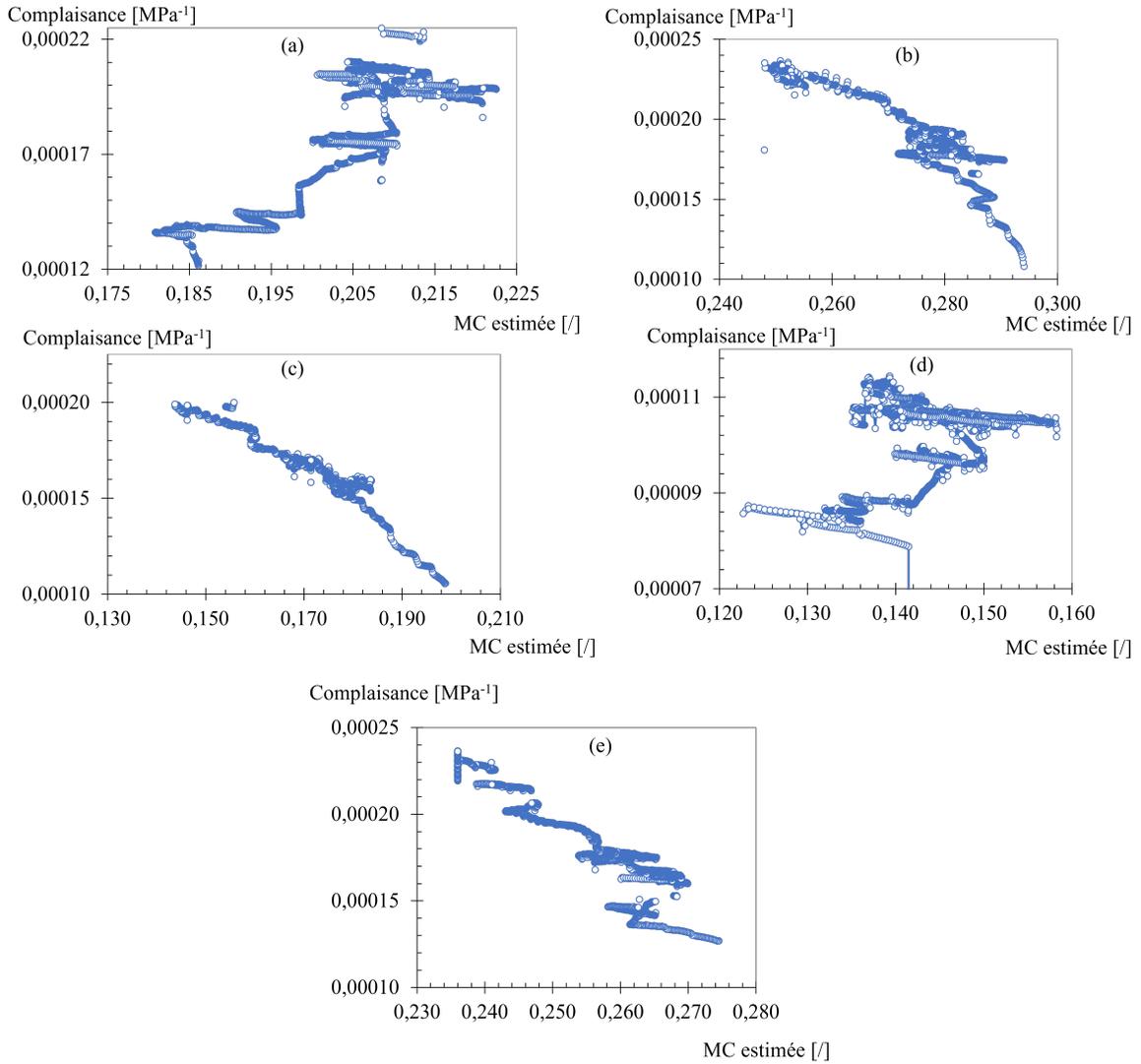


FIGURE F.2 – Trajectoire mécanosorptive de la vague 2, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S05 ; (b) S06 ; (c) S28 ; (d) S25 ; (e) S26.

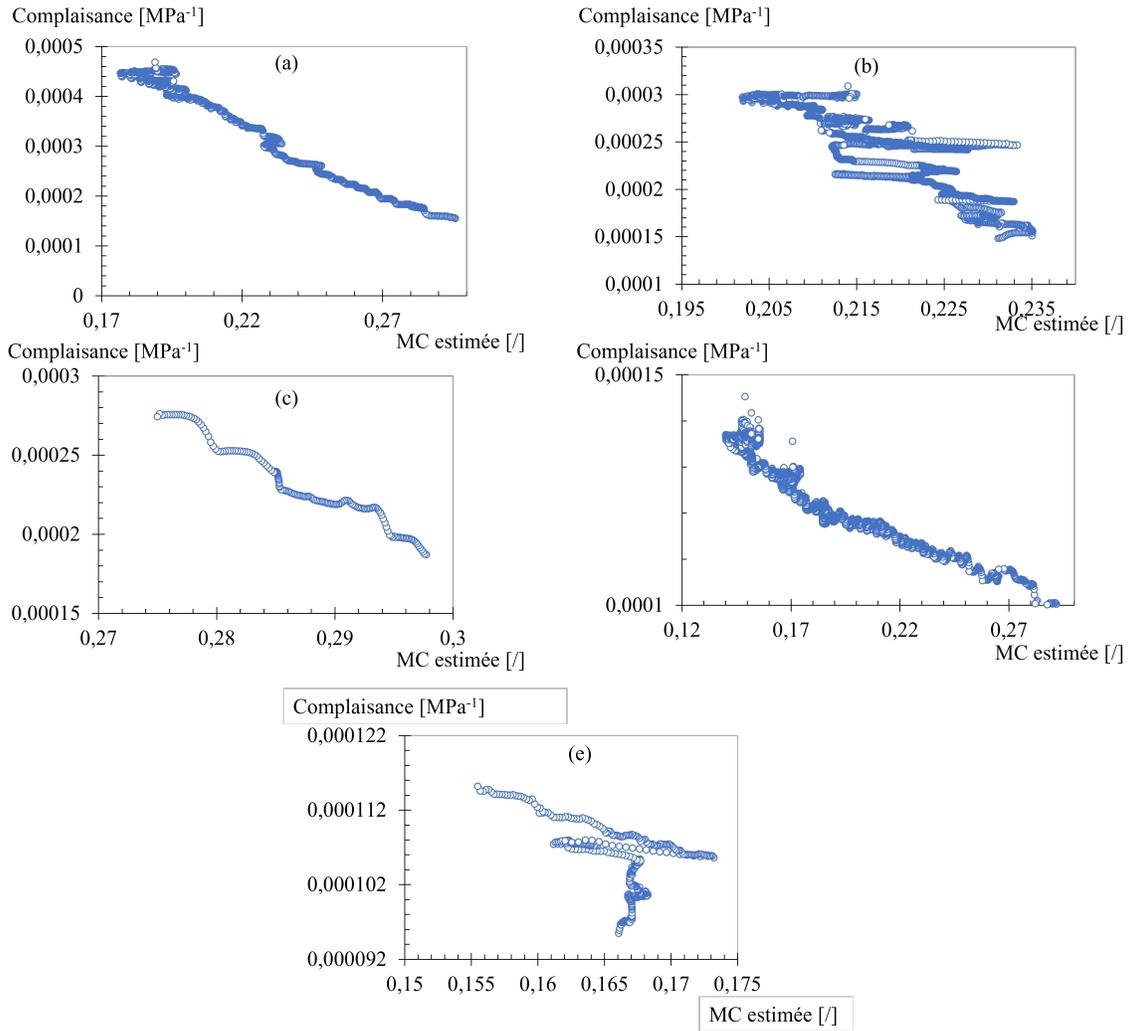


FIGURE F.3 – Trajectoire mécanosorptive de la vague 3, complaisance en fonction de la teneur en eau : (a) S29 ; (b) S24 ; (c) S18 ; (d) S22 ; (e) S23.

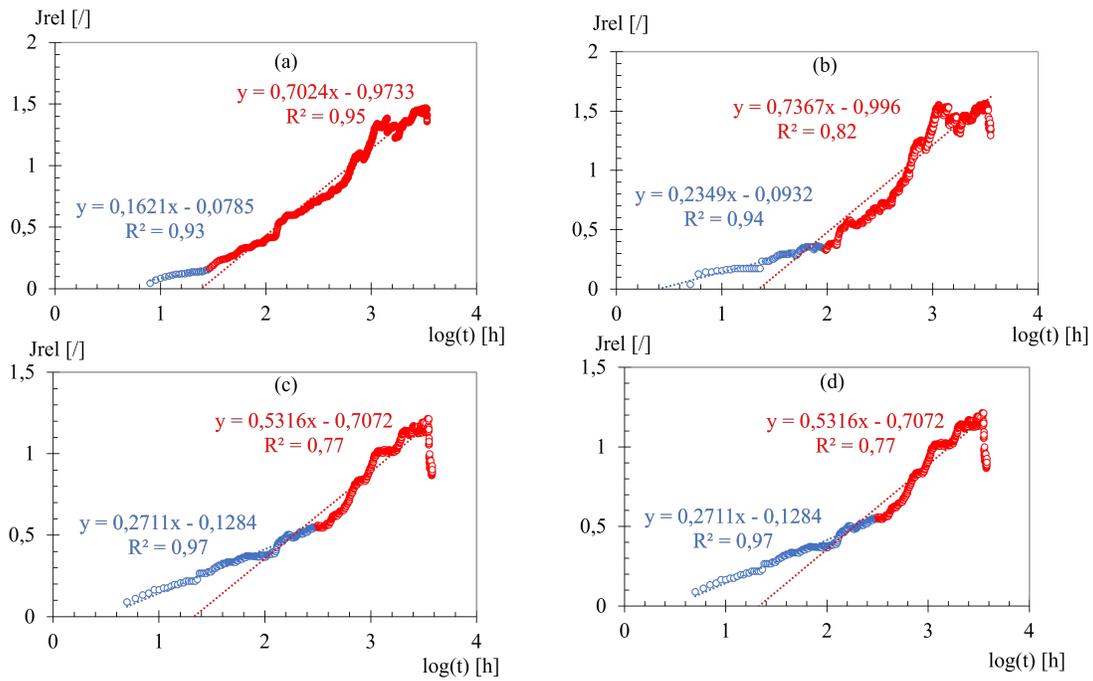


FIGURE F.4 – Évolution en double pente de la complaisance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S03; (b) S14; (c) S12; (d) S21.

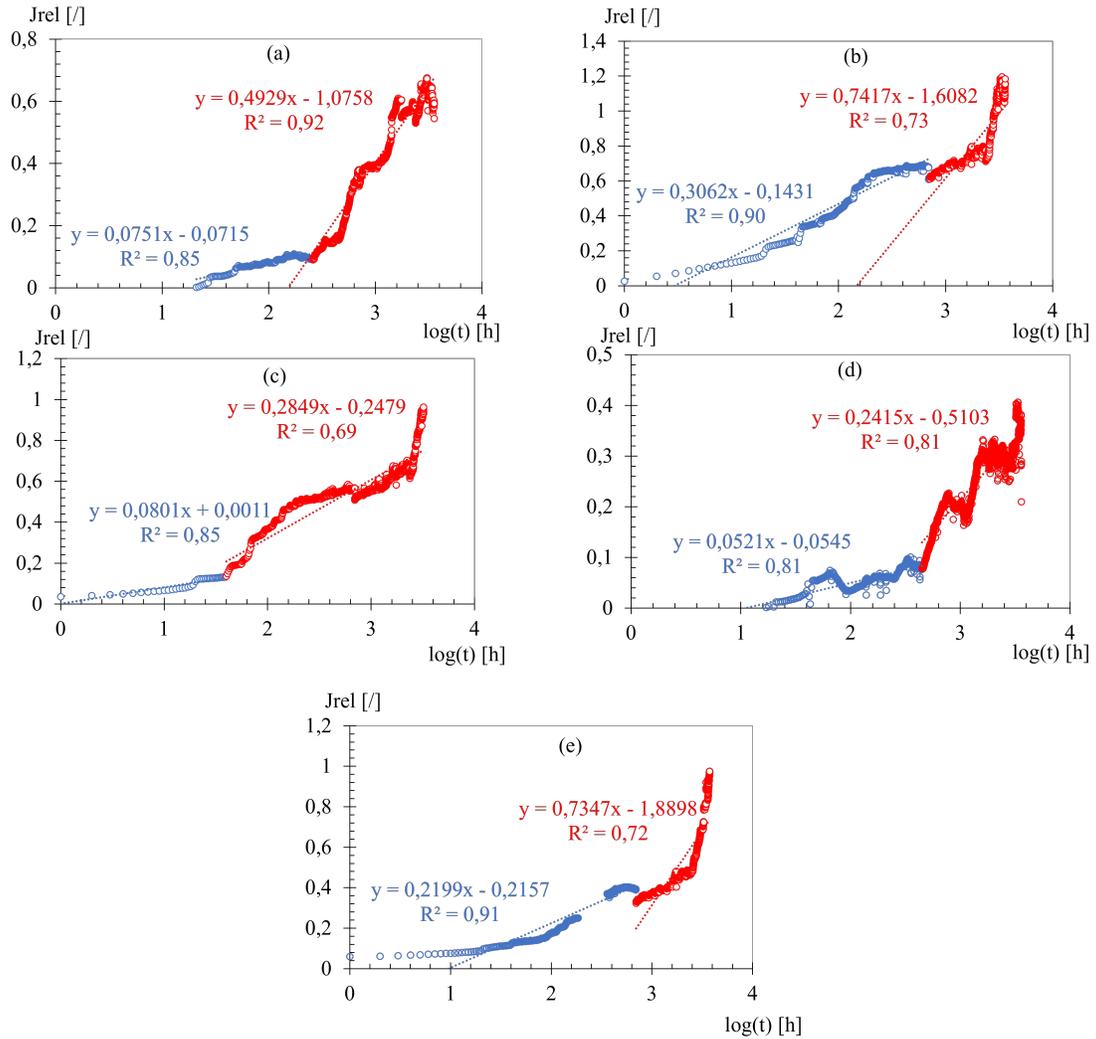


FIGURE F.5 – Évolution en double pente de la compliance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S05 ; (b) S06 ; (c) S28 ; (d) S25 ; (e) S26.

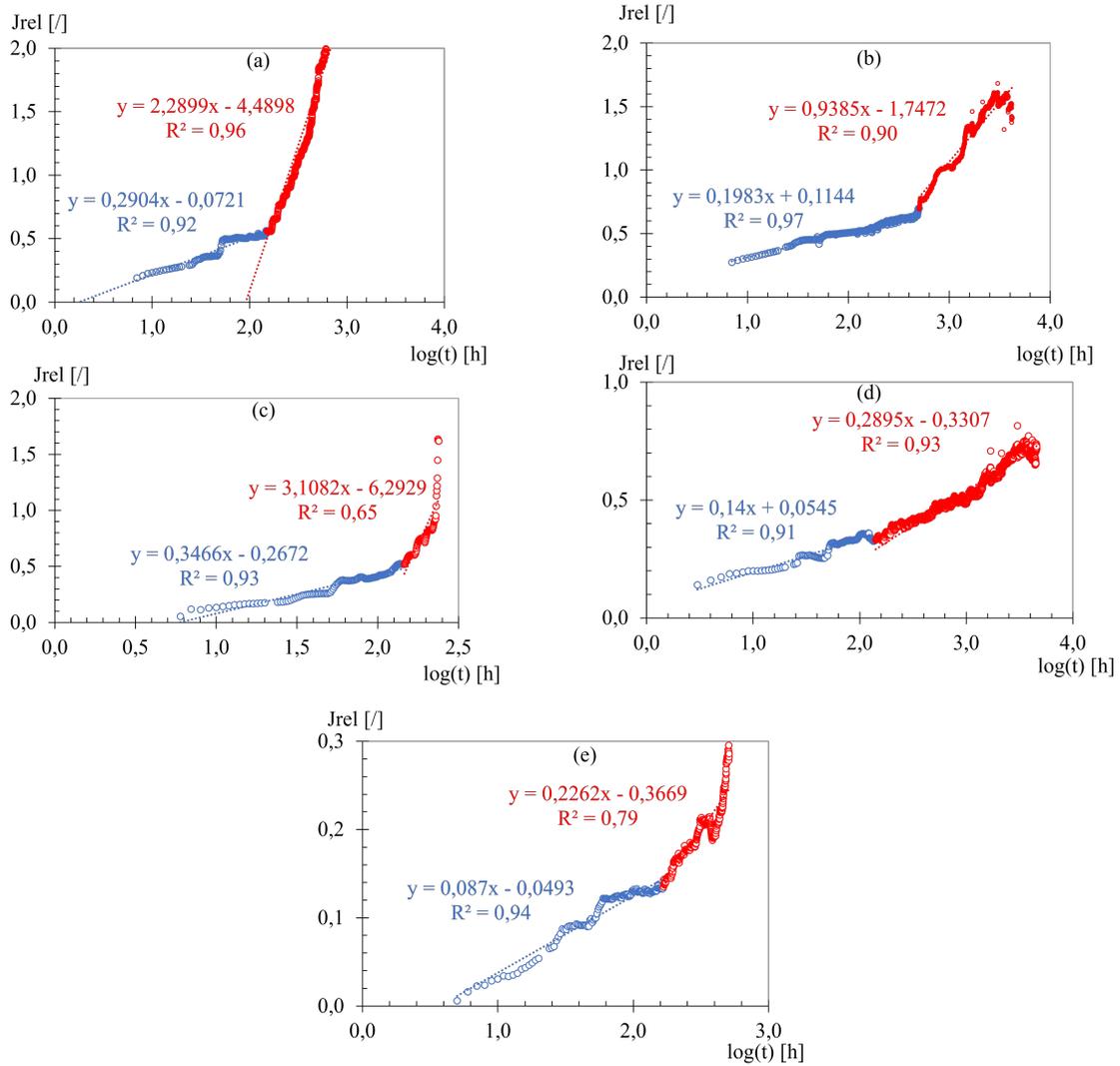


FIGURE F.6 – Évolution en double pente de la complaisance relative en fonction de $\log(t)$: (a) S29; (b) S24; (c) S18; (d) S22; (e) S23.

Annexe G

Script Python du Theta-schéma

```
1 import numpy as np
2 from scipy.interpolate import interp1d
3 from scipy.optimize import brentq
4 import scipy.sparse
5 import openpyxl
6
7
8 def Theta_scheme(Conf):
9     """
10     Theta method allows to choose the type of FD scheme:
11         theta = 0 : Forward Euler explicit, order of convergence 1
12         theta = 1 : Backward Euler implicit, order of convergence 1
13         theta = 1/2 : Crank-Nicholson (half-implicit), order of
14 convergence 2
15 Parameters
16 -----
17 Conf : Dictionnaire containing list of time, temperatures, relative
18 humidities,
19 number of element, thickness of each element, initial conditions,
20 diffusion coefficient parameters
21 D0 and kD, convective coefficient S, time step, modele choosed for the
22 boundary conditions
23 (i.e. Gripped-box, EC5 or Varnier), ws and kws.
24
25 Returns
26 -----
27 Res : Dictionnaire containing input parameters Conf, interpolated time
28 list of the simulation,
29 simulated moisture content at each point and each time step, simulated
30 mean moisture content
31 at each time step.
32 """
33     temps = Conf['temps']
34     S = Conf['S']
35     D0 = Conf['D0']
```

```

30 kD = Conf['kD']
31 NbElem = Conf['NbElem']
32 Ep = Conf['Ep']
33 MC_ini = Conf['MC_ini']
34 stepT = Conf['stepT']
35 HR = Conf['HR']
36 Temperature = Conf['Temperature']
37 theta = Conf['Theta']
38 Modele = Conf['Modele']
39 Dwmax = D0+kD*MC_ini[0]
40 kMCs = Conf['kMCs']
41 MCs0 = Conf['MCs0']
42 psi = Conf['psi_ini']
43
44 """ Min and max of diffusion coefficient """
45 print('Dwmin = ', D0, '\n', 'Dwmax = ', Dwmax)
46 if theta == 0:
47     print('Explicit Euler scheme')
48     stepTstab = (0.5*Ep**2)/Dwmax
49     print('Minimum time step = ', stepTstab, '\n', 'Time step = ',
stepT)
50 elif theta == 0.5:
51     print('Crank-Nicolson scheme')
52     stepTstab = (0.5*Ep**2)/Dwmax
53     print('Minimum time step for non-oscillation = ', stepTstab, '\n',
'Time step = ', stepT)
54 else:
55     print('Implicit Euler scheme, unconditionnally stable')
56 """Simulation time vector computation"""
57 temps_simu = np.arange(0, max(temps), stepT)
58 if max(temps) not in temps_simu:
59     temps_simu = np.append(temps_simu, max(temps))
60 Nt = len(temps_simu)
61 """ Boundary conditions interpolation on simulation time"""
62 f_interpT = interp1d(temps, Temperature)
63 Temperature_simu = f_interpT(temps_simu)
64 f_interpHR = interp1d(temps, HR)
65 HR_simu = f_interpHR(temps_simu)
66 """ Set initial condition"""
67 MC_simu = [[0 for i in range(NbElem+1)] for t in range(Nt)]
68 MC_simu = np.array(MC_simu)
69 MC_simu = MC_simu.astype('float64')
70 MC_simu[0, :] = MC_ini
71 """Initiation of sparse matrix and right-hand side"""
72 F1 = stepT/Ep**2
73 F2 = 1/(S*Ep)
74 main = np.zeros(NbElem+1)
75 lower = np.zeros(NbElem)
76 upper = np.zeros(NbElem)
77 b = np.zeros(len(MC_simu[0]))
78 b = b.astype('float64')
79 EMCi = MC_ini[0]

```

```

80     for n in range(1, Nt):
81         hri, Ti, hrii, Tii = HR_simu[n-1], Temperature_simu[n-1], HR_simu[
n], Temperature_simu[n]
82         MCs = MC_sat(kMCs, MCs0, Tii)
83         Dw, Dwb = coef_diffusion_lin(D0, kD, MC_simu[n-1])
84         """ EMCii refers to what impose the environnement at time n, and
EMCi
85         to the previous EMC value (time n-1) """
86         if Modele == 'Eurocode 5':
87             EMCii = EMC_EC5(hrii, Tii)
88         elif Modele == 'Simpson':
89             EMCii = EMC_Simpson(hrii, Tii)
90         elif Modele == 'Varnier':
91             EMCii = Isot_partielle_Varnier(hri, hrii, EMCi, Ti, Tii, MCs)
92             EMCi = EMCii
93         elif Modele == 'Gripped_box':
94             alpha = Conf['alpha']
95             beta = Conf['beta']
96             EMCii, psi = EMC_gripped_box(hri, hrii, EMCi, psi, alpha, beta
, MCs)
97             EMCi = EMCii
98             """ Computation of A matrix """
99             main[1:-1] = 1 + 2*F1*theta*Dwb[1:-1]
100             lower[:-1] = -F1*theta*Dwb[1:-1]
101             upper[1:] = -F1*theta*Dwb[2:]
102             """ Insert boundary conditions """
103             main[0] = 1 + F2*theta*Dwb[0]
104             main[-1] = 1 + F2*theta*Dwb[-1]
105             upper[0] = -F2*theta*Dwb[0]
106             lower[-1] = -F2*theta*Dwb[-1]
107             A = scipy.sparse.diags(diagonals=[main, lower, upper], offsets=[0,
-1, 1], shape=(NbElem+1, NbElem+1), format='csr')
108             """ Computation of right-hand side b """
109             b[0] = EMCii + (1-theta)*Dwb[0]*F2*(MC_simu[n-1, 1]-MC_simu[n-1,
0])
110             b[-1] = EMCii + (1-theta)*Dwb[-1]*F2*(MC_simu[n-1, -2]-MC_simu[n
-1, -1])
111             b[1:-1] = MC_simu[n-1, 1:-1] + (F1*Dwb[1:-1]*(1-theta)) * \
112                 (MC_simu[n-1, 2:] - 2*MC_simu[n-1, 1:-1] + \
113                 MC_simu[n-1, 0:-2])
114             """ Resolution of A*MC_simu = b """
115             MC_simu[n, :] = scipy.sparse.linalg.spsolve(A, b)
116             MC_moy_simu = np.array([np.mean(MC_simu[i, :]) for i in range(len(
MC_simu))])
117             Res = {'Conf' : Conf, 'temps_simu' : temps_simu, \
118                 'MC_simu' : MC_simu, 'MC_moy_simu' : MC_moy_simu}
119             return Res
120
121
122 def coef_diffusion_lin(D0, k, MC):
123     """
124     Compute diffusion coefficient as a function of moisture content

```

```

125 Linear law with MC of slope kD
126 Output is a matrix of diffusion coefficient in the mesh and average
127 diffusion coefficient matrix that is out of divergence operator
128 """
129 Dw = k*MC + D0
130 Dwb = np.zeros(len(MC))
131 Dwb[1:-1] = (Dw[2:] + 2*Dw[1:-1] + Dw[0:-2])/4
132 Dwb[0] = (Dw[0]*2 + Dw[1] + Dw[2])/4
133 Dwb[-1] = (Dw[-1]*2 + Dw[-2] + Dw[-3])/4
134 return Dw, Dwb
135
136 def MC_sat(kMCs, MCs0, T):
137     """
138     Saturation MC (i.e. PSF), linear law with temperature of slope kMCs
139     Return a scalar
140     """
141     MCs = MCs0 - kMCs*T
142     return MCs
143
144 def RMS(y_num, y_exp):
145     """
146     RMS computation
147     y_num, y_exp : vector of approximated solution, experimental
148     y_num and y_exp must be the same length and their elements coincide
149     """
150     RMS = np.sqrt(sum(np.square(y_exp - y_num))/len(y_exp))
151     return RMS
152
153 def EMC_EC5(HR, T):
154     """
155     EMC formulation from Eurocode 5
156     """
157     HR = HR * 100
158     CoefA = 5.03*10**-13*HR**5 - 1.13*10**-10*HR**4 + 9.24*10**-9*HR**3 -
159     \
160     2.65*10**-7*HR**2 - 5.38*10**-6*HR
161     CoefB = -3.54*10**-11*HR**5 + 5.82*10**-9*HR**4 - 4.44*10**-7*HR**3 +
162     \
163     2.21*10**-5*HR**2 - 8.8*10**-4*HR
164     CoefC = 2.14*10**-8*HR**5 - 4.22*10**-6*HR**4 + 3.18*10**-4*HR**3 - \
165     1.13*10**-2*HR**2 + 3.62*10**-1*HR
166     EMC = CoefA*T**2 + CoefB*T + CoefC
167     return EMC/100
168
169 def EMC_Simpson(HR, T):
170     """
171     EMC formulation from Simpson
172     """
173     omega = 349 + 1.29*T + 0.0135*T**2
174     K = 0.805 + 0.000736*T - 0.00000273*T**2
175     K1 = 6.27 - 0.00938*T - 0.000303*T**2
176     K2 = 1.91 + 0.0407*T - 0.000293*T**2

```

```

175 EMC = (1800/omega)*((K*HR/(1-K*HR)) + \
176          ((K1*K*HR+2*K1*K2*K**2*HR**2)/(1+K1*K*HR+K1*K2*K**2*HR**2)))
177 return EMC/100
178
179 def Param_isot():
180     """
181     Enveloppe isotherms parameters from Varnier, for basic softwood
182     """
183     phi_ad, a_ad = 0.82, 1.435
184     phi_de, a_de = 0.761, 0.988
185     C1, C2, C3 = 1.5, 0.06, 0.4
186     param_isot = [phi_ad, a_ad, phi_de, a_de, C1, C2, C3]
187     return param_isot
188
189
190 phi_ad, a_ad = Param_isot()[0:2]
191 phi_de, a_de = Param_isot()[2:4]
192 C1, C2, C3 = Param_isot()[4:]
193
194
195 def Isot_enveloppe(MCs, phi, HR, a):
196     """ Merakeb formulation for enveloppe isotherm """
197     return MCs * np.exp(phi * np.log(HR) * np.exp(a * HR))
198
199 def Isot_enveloppe_mean(MCs, phi_ad, a_ad, phi_de, a_de, HR):
200     """ Mean enveloppe isotherm """
201     adsorption = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HR, a_ad)
202     desorption = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HR, a_de)
203     return (adsorption + desorption)/2
204
205 def dIsot_enveloppe(MC_iso, phi, HR, a):
206     """ Slope of enveloppe isotherm """
207     return MC_iso * phi * np.exp(a * HR) * ((1 / HR) + a * np.log(HR))
208
209 def Isot_partielle_Varnier(HRini, HRf, MCi, Tini, Tf, MCs):
210     """ Compute partial isotherms with Varnier formulation """
211     EMC_iso_ad = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRf, a_ad)
212     EMC_isode = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HRf, a_de)
213     if MCi > EMC_isode:
214         MCi = EMC_isode
215     elif MCi < EMC_iso_ad:
216         MCi = EMC_iso_ad
217     gamma = (EMC_isode - MCi) / (EMC_isode - EMC_iso_ad)
218     if gamma < 0:
219         gamma = 0
220     p_a = dIsot_enveloppe(EMC_iso_ad, phi_ad, HRf, a_ad)
221     p_d = dIsot_enveloppe(EMC_isode, phi_de, HRf, a_de)
222     emc_ec5 = EMC_EC5(HRf, Tf)
223     """ Adsorption or desorption ? """
224     if emc_ec5 - MCi < 0:
225         C_d = 1
226         C_a = C2

```

```

227     else:
228         C_d = C3
229         C_a = 1
230         coefP = C_d * (1 - gamma)**C1 * p_d + C_a * gamma**C1 * p_a
231         EMCii = coefP * (HRf - HRini) + MCI
232         """ If MC is out of isotherm enveloppe, then it's reaffected to
enveloppe value """
233         if EMCii < EMC_isode:
234             EMCii = EMC_isode
235         elif EMCii > EMC_isode:
236             EMCii = EMC_isode
237         return EMCii
238
239 def EMC_gripped_box(HRi, HRii, EMCi, psi, alpha, beta, MCs):
240     """
241     Parameters
242     -----
243     HRi, HRii, EMCi, psi, alpha, beta, MCs :
244     starting equilibrium (HRi, EMCi) going to new equilibrium (HRii, EMCii
)
245     psi is the gripped-box parameter
246     alpha and beta the partial isotherms parameters
247     MCs saturation moisture content (i.e. PSF)
248
249     Returns
250     -----
251     EMCii, psi_new : new EMC reached, new gripped-box parameter
252     """
253     dHR = HRii - HRi
254     """ P_psi is the point (HR0, EMCmean) """
255     HR0 = psi
256     EMC0_isode = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HR0, a_ad)
257     EMC0_isode = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HR0, a_de)
258     EMC0mean = (EMC0_isode + EMC0_isode) / 2
259     """Find intersection between straight line of slope alpha and passing
through P_psi
260     and adsorption/desorption curves. To achieve that, find the roots of
the function
261     subtracting these two"""
262     intercep_isode = lambda HR: alpha*HR + (EMC0mean - alpha*HR0) - \
263         MCs * np.exp(phi_ad * np.log(HR) * np.exp(a_ad * HR))
264     intercep_isode = lambda HR: alpha*HR + (EMC0mean - alpha*HR0) - \
265         MCs * np.exp(phi_de * np.log(HR) * np.exp(a_de * HR))
266     """brentq is an algorithm finding the roots of a bracketed function,
here HR belongs [1e-5, 1]"""
267     HR1 = brentq(intercep_isode, 1e-5, 1)
268     HR2 = brentq(intercep_isode, 1e-5, 1)
269     EMC1 = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HR1, a_de)
270     EMC2 = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HR2, a_ad)
271     EMChight = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HRi, a_de)
272     EMClow = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRi, a_ad)
273     if HRii < HR1:

```

```

274     """HRii is out of the gripped-box, then compute a new psi """
275     EMCii = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HRii, a_de)
276     intercep_new = lambda HR : alpha*HR + (EMCii - alpha*HRii) - \
277         (MCs * np.exp(phi_ad * np.log(HR) * np.exp(a_ad * HR)) + \
278         MCs * np.exp(phi_de * np.log(HR) * np.exp(a_de * HR)))/2
279     psi_new = brentq(intercep_new, 1e-5, 1)
280     elif HRii < HR2:
281         if dHR < 0:
282             dEMC = ((EMCi - EMC1)/(HRi-HR1))*dHR*(1-beta*((EMChight-EMCi)
/(EMChight-EMClow)))
283             EMCii = EMCi + dEMC
284         elif dHR >= 0 and EMCi != Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRi, a_ad):
285             dEMC = ((EMCi - EMC2)/(HRi-HR2))*dHR*(1-beta*((EMCi-EMClow)/(
EMChight-EMClow)))
286             EMCii = EMCi + dEMC
287         else:
288             EMCii = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRii, a_ad)
289             psi_new = psi
290         if EMCii < Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRii, a_ad):
291             EMCii = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRii, a_ad)
292         elif EMCii > Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HRii, a_de):
293             EMCii = Isot_enveloppe(MCs, phi_de, HRii, a_de)
294     else:
295         """HRii is out of the gripped-box, then compute a new psi """
296         EMCii = Isot_enveloppe(MCs, phi_ad, HRii, a_ad)
297         intercep_new = lambda HR : alpha*HR + (EMCii - alpha*HRii) - \
298             (MCs * np.exp(phi_ad * np.log(HR) * np.exp(a_ad * HR)) + \
299             MCs * np.exp(phi_de * np.log(HR) * np.exp(a_de * HR)))/2
300         psi_new = brentq(intercep_new, 1e-5, 1)
301     return EMCii, psi_new

```