

École polytechnique de Louvain

Recherche d'un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes

Auteurs: **Maxime DEHAEN, Pierre-Louis PONTIERE**

Promoteur: **Pierre LATTEUR**

Lecteurs: **Hugues FRÈRE, Justin GOOSSE, Martin STEINMETZ,
Caroline VINCKE**

Année académique 2021–2022

Master [120] : ingénieur civil des constructions

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN

Recherche d'un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes



Auteurs :

Maxime DEHAEN
Pierre-Louis PONTIERE

Promoteur :

Pierre LATTEUR

Lecteurs :

Hugues	Justin	Martin	Caroline
FRÈRE	GOOSSE	STEINMETZ	VINCKE

Année Académique 2021-2022

RÉSUMÉ

Le bois est un matériau de construction durable et possède de bonnes caractéristiques mécaniques à l'état brut. Malheureusement, à cause de nombreuses transformations, il est souvent coûteux comparé au béton et à l'acier. Il pourrait alors être intéressant d'utiliser le bois sous sa forme la plus simple : un tronc écorcé et ébranché que l'on appelle communément **une grume**. Ce mémoire s'intéresse à la manière de **caractériser mécaniquement** les grumes de façon à offrir la possibilité de les utiliser en construction.

L'étude porte sur des essais en **flexion** de trente grumes de trois essences différentes mesurant de 6 à 8[m] et ayant un diamètre de 35 à 45[cm]. Ces tests ont permis de déterminer les paramètres indispensables pour les caractériser. Des batteries de test sur des éprouvettes ont également été réalisées pour comprendre le comportement long terme de ce matériau.

Il en est ressorti que sept facteurs sont à définir pour déterminer les attentes d'une grume dans un projet. Les résultats ont été comparés avec ceux communément admis dans les normes et ceux obtenus par V. HOUBEN (2022). Nous y observons beaucoup de similitudes.

Les essais sur éprouvettes, quant à eux, ont démontré que les coefficients proposés par l'Eurocode étaient certes sécuritaires, mais adaptables à chaque essence.

Finalement, nous proposons un **premier protocole industriel** adapté aux besoins de la filière bois. Celui-ci peut être automatisé et implémenté dans une scierie. Il inclut un pré-classement, un séchage, un usinage et un essai mécanique. Ce dernier est composé de plusieurs cycles de chargement visant à vérifier si la grume peut supporter une charge ultime sans être endommagée. Des signes précurseurs de faiblesse ont été déterminés de façon à anticiper toute dégradation et permettre d'interrompre l'essai afin de conserver les propriétés mécaniques en vue d'une autre valorisation.

Mots clés : Bois - Grume - Scierie - Caractérisation non destructive - Proof testing - Flexion quatre points - Fluage - Module de Young

ABSTRACT

Wood is a durable building material and has good mechanical properties in its raw state. Unfortunately, because of the many transformations, it is often expensive compared to concrete and steel. It could then be interesting to use wood in its simplest form : a debarked and delimbed trunk commonly called **a log**. This thesis focuses on **how to mechanically characterize logs** in order to offer the possibility of using them in construction.

The study is based on tests in **bending** of thirty logs of three different species measuring from 6 to 8[m] and having a diameter of 35 to 45[cm]. These tests allowed us to determine the essential parameters to characterize them. Test batteries on samples were also carried out to understand the long-term behavior of this material.

It was found that seven factors should be defined to determine the expectations of a log in a project. The results were compared with those commonly accepted in the standards and those obtained by V. HOUBEN (2022). Many similarities are observed. The tests on specimens showed that the coefficients proposed by the Eurocode were certainly safe, but adaptable to each species.

Finally, we propose **a first industrial protocol** adapted to the needs of the wood industry. This protocol can be automated and implemented in a sawmill. It includes a pre-grading, a drying, a machining and a mechanical test. The latter is composed of several loading cycles to check if the log can support an ultimate load without being damaged. Early signs of weakness were determined in order to anticipate any degradation and to interrupt the test in order to preserve the mechanical properties to allow another valorization.

Keywords : Wood - Log - Sawmill - Non-destructive characterization - Proof testing - Four-point bending - Creep - Young's modulus

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas été réalisable sans l'aide de nombreuses personnes que nous aimerions remercier.

Nous pensons d'abord à notre promoteur, Monsieur le Professeur Pierre Latteur, qui nous a donné la possibilité de travailler sur ce sujet passionnant. Nous le remercions pour le temps passé avec nous afin de nous aiguiller dans la bonne direction.

Nous n'oublions pas les assistants, Messieurs Justin Goose et Martin Steinmetz. Sans eux, un tel travail n'aurait pas été aussi abouti : leur disponibilité, leurs conseils avisés, leur expérience, sans oublier leur bonne humeur ont été un réel soutien dans nos recherches.

La compréhension de la complexité de ce matériau si particulier qu'est le bois nous a été transmise par Madame la Professeure Caroline Vincke et Monsieur le professeur Hugues Frère. Nous espérons avoir conservé leur philosophie d'approche de la filière bois dans la rédaction de ce mémoire.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans les nombreux efforts qui ont été fournis par le laboratoire LEMSC. Merci à Madame la Directrice Catherine Doneux, qui nous a fourni un espace non négligeable afin de pouvoir stocker nos grumes, les prendre en photos et réaliser nos essais. N'oublions pas tous les membres du laboratoire qui nous ont aidé de près ou de loin.

Sans Monsieur Alex Bertholet, le montage des œdomètres eut été difficile. Sa "manne" inépuisable d'outils et son inventivité nous ont, à maintes reprises, sorti de situations difficiles. Nous remercions également Monsieur Antoine Bietlot pour le temps passé à remettre en état les comparateurs de nos œdomètres. Nous n'oublions pas Messieurs Pierre Mertens de Wilmars, Quentin Mestrez et Vincent Gorski pour l'aide apportée à l'utilisation des machines d'usinage, à la manipulation des grumes et surtout pour leurs nombreux conseils.

Sans nos familles, nos lecteurs, nos amis mémorants et tous ceux qui nous ont accompagné tout au long de cette année, ce travail aurait été bien plus compliqué ; qu'ils en soient tous remerciés.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Le secteur de la construction et le matériau bois	2
1.1.1	Quels matériaux utilise-t-on aujourd'hui ?	2
1.1.2	Construire avec le bois	2
1.1.3	Construire avec des grumes	4
1.2	Les objectifs du travail de recherche	8
1.3	Plan de travail	10
2	Généralités sur le bois	11
2.1	Anatomie générale du bois	12
2.1.1	Structure cellulaire	12
2.1.2	Composition chimique	12
2.2	L'eau et le bois	13
2.3	Anisotropie du bois	14
2.4	La température et le bois	14
2.4.1	Comportement hygroscopique	15
2.4.2	Caractéristiques mécaniques	16
2.5	Propriétés mécaniques	17
2.5.1	Composition macroscopique du bois	17
2.5.2	Les modes de sollicitations majeurs	20
2.5.3	Valeurs caractéristiques de certains bois	21
2.6	Les différents états du bois	22
2.6.1	Le séchage du bois	22
2.6.2	Bois à l'état vert et ré-humidifié	23
2.6.3	Impact du séchage sur les grumes	24
2.7	Les défauts et singularités du bois	26
2.7.1	Les nœuds	26
2.7.2	Roulure	27
2.7.3	Bois de réaction	27
2.7.4	La pourriture	28
2.7.5	Courbure et défilement	28
2.7.6	Méplat et cœur excentré	29
2.7.7	Fente de cœur et cadranure/cœur étoilé	29

2.7.8	Autres défauts et singularités	29
3	Essais en flexion sur grumes	31
3.1	Objectif	32
3.2	État de l'art	33
3.2.1	Comportement du bois en flexion	33
3.2.2	Flexion quatre points	34
3.2.3	Calcul des éléments de bois	35
3.2.4	Test mécanique non destructif	37
3.2.5	Défauts et normes	43
3.3	Description du protocole	45
3.3.1	Classement visuel	45
3.3.2	Grindosonic	47
3.3.3	Essai en flexion	47
3.3.4	Description précise de l'essai type en laboratoire	53
3.4	Description du banc d'essai	55
3.4.1	Disposition du banc d'essai	55
3.4.2	Composition du banc d'essai	57
3.4.3	Les instruments de mesures	59
3.5	Analyse des résultats	62
3.5.1	Analyse des données par individu	63
3.5.2	Analyse des données par groupe	68
3.5.3	Analyse supplémentaire et comparaison	75
3.6	Proposition d'un protocole industriel	78
3.6.1	Protocole mécanique	79
3.6.2	Améliorations possibles	82
3.7	Exemple de dimensionnement pour un projet	82
4	Essais de fluage sur éprouvettes équarries	85
4.1	Objectif et contexte des essais de fluage	86
4.2	État de l'art	87
4.2.1	Le phénomène du fluage	87
4.2.2	Comportement viscoélastique du bois	90
4.2.3	Le comportement mécanosorptif du bois	91
4.2.4	La complaisance du bois	96
4.2.5	Définition de k_{def} dans l'Eurocode 5	98
4.3	Essais sur éprouvettes équarries	100
4.3.1	Généralités	100
4.3.2	Dispositif des essais de fluage	101
4.3.3	Échantillonnage	104
4.3.4	Protocole d'essai	105
4.3.5	Tableau récapitulatif	109
4.4	Analyse des résultats	109
4.4.1	Résultats types	110
4.4.2	Valeurs résultantes	110
4.4.3	Réflexion supplémentaire	118
4.4.4	Pistes d'améliorations	120

5 Conclusion	123
5.1 Les essais de flexion sur grumes	124
5.2 Les essais de fluage sur éprouvettes équarries	125
A Calcul de la flèche d'une flexion quatre points	127
A.1 Cas général quelconque	127
A.2 Comparaison avec la formule obtenue par ZHOU et al.	128
B Tableau de classement visuel des normes EN1927, EN1316, DIN1052 et DIN4074	129
C Utilisation du programme <i>APTOL</i>	135
D PDF type en sortie en Post-traitement	137
E A3 des graphiques de variation de E_g et de pente	141
F Courbe normale pour les modules de young des peupliers et tsugas	145
G Essai de fluage sur des éprouvettes équarries	147
G.1 Plan de montage des bancs d'essai	147
G.1.1 Plans côtés	148
G.1.2 Description de chaque pièce	149
G.2 Essais à la rupture sur des éprouvettes équarries	150
H Référence du matériel employé	155
H.1 Essai mécanique en flexion sur les grumes	155
H.2 Essais de fluage sur des éprouvettes équarries	156
H.3 Essais de rupture sur des éprouvettes équarries	157
H.4 Étalonnage des œdomètres	157
I Phasage simplifié d'un projet avec des grumes	159

Symboles et abréviations

$C_{ELS,LT}$	Combinaison de charges ELS long-terme
$C_{ELS,CT}$	Combinaison de charges ELS long-terme
C_{ELU}	Combinaison de charges à l'ELU
δ_{CT}^{projet}	Flèche court-terme d'un projet
δ_{LT}^{projet}	Flèche long terme d'un projet
δ_i^{exp}	Flèche centrale initiale et expérimentale des éprouvettes
δ_i^{th}	Flèche centrale initiale théorique des éprouvettes
δ_M	Flèche centrale théorique due à l'effort de flexion
δ_V	Flèche centrale théorique due à l'effort tranchant
$\delta_{M,LT}$	Flèche centrale théorique long-terme due à l'effort de flexion
$\delta_{V,LT}$	Flèche centrale théorique long-terme due à l'effort tranchant
$E_{m,g}$	Module de Young globale (calculé sur l'entièreté de l'élément)
$E_{m,l}$	Module de Young locale (calculé sur la travée centrale de l'élément)
$f_{m,rupt}$	Valeur moyenne de la résistance à la flexion
$f_{m,k}$	Valeur caractéristique de la résistance à la flexion
$F_{ELS,CT}^{projet}$	Force ELS court-terme déterminée dans le cadre d'un projet
$F_{ELS,CT}^{prot}$	Force ELS court-terme mesurée lors du protocole final dans le cadre d'un projet par l'application d'une flèche δ_{CT}^{projet}
$F_{ELS,CT}^{labo}$	Force ELS court-terme mesurée lors de nos essais en laboratoire avec l'essai type par l'application d'une flèche court-terme
$F_{ELS,LT}^{projet}$	Force ELS long-terme déterminée dans le cadre d'un projet grâce aux combinaisons de charges
$F_{ELS,LT}^{prot}$	Force ELS long-terme mesurée lors du protocole final dans le cadre d'un projet suite à l'application d'une flèche δ_{LT}
$F_{ELS,LT}^{labo}$	Force ELS long-terme mesurée lors de nos essais en laboratoire avec l'essai type suite à l'application d'une flèche δ_{LT}
$F_{ELS,CT(LT)}^{projet}$	Force à appliquer afin d'atteindre au long terme une flèche δ_{LT}^{projet} , déterminée dans le cadre d'un projet
$F_{ELS,CT(LT)}^{prot}$	Force à appliquer afin d'atteindre au long terme une flèche δ_{LT}^{projet} , calculée grâce à $F_{ELS,LT}$ et ω
$F_{ELS,CT(LT)}^{labo}$	Force à appliquer afin d'atteindre au long terme une flèche δ_{LT}^{projet} , calculée grâce à $F_{ELS,LT}$ et ω lors d'essai en laboratoire
F_{ELU}^{projet}	Force ELU déterminée dans le cadre d'un projet

F_{ELU}^{prot}	Force ELU mesurée lors du protocole final dans le cadre d'un projet
F_{ELU}^{labo}	Force ELU mesurée lors de nos essais en laboratoire avec l'essai type
$F_{ELS,CT,dim}$	Valeur max de $F_{ELS,CT}$ avant ELU utilisé pour calculer F_{ELU} pendant l'essai
γ_m	Facteur partiel pour les propriétés des matériaux, qui tient également compte des incertitudes du modèle et des variations dimensionnelles [1]
$J_i(t)$	Complaisance instantanée au temps t
$\bar{J}(t)$	Complaisance relative instantanée au temps t
k_{def}	Facteur de déformation long-terme [1]
k_{mod}	Facteur de modification pour la durée de la charge et la teneur en humidité [1]
μ	Rapport entre $F_{ELS,CT}$ et F_{ELU}
ω	Rapport entre $F_{ELS,LT}$ et $F_{ELS,CT(LT)}$

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Aujourd'hui, une grande diversité de matériaux est utilisée dans le domaine de la construction. Les principaux sont l'acier, le béton et le bois. Ce dernier est employé depuis la nuit des temps et offre indéniablement de nombreux avantages. Il est notamment :

- **esthétique** : il a un côté naturel, agréable et procure de la chaleur ;
- **durable** : il est renouvelable et son bilan carbone est très bon.

Cependant, il possède aussi certains inconvénients.

- C'est un élément **vivant**. Ses caractéristiques sont influencées par l'eau, la température, son essence, le climat, le lieu de croissance... et rendent compliquée la prédiction de son comportement.
- Son **coût** est élevé à cause des nombreuses transformations nécessaires à la production du bois équarri utilisé aujourd'hui et d'une sous-estimation de sa résistance.

La finalité de ce projet est de remédier à ces défauts et de rendre le bois plus compétitif que l'acier et le béton. L'idée est d'utiliser des troncs d'arbre ébranchés et écorcés, appelés grumes, à la place des poutres en bois mises en place sur chantier.

Cette solution simple utilise le bois "brut" en le transformant le moins possible. Ceci permettrait de diminuer radicalement son coût. Notre objectif est alors de déterminer un protocole mécanique non-destructif permettant de caractériser individuellement ces grumes.

Cependant, beaucoup de questions restent en suspens : à quelles sollicitations soumettre la grume ? Comment adapter les normes actuelles ? De tels essais existent-ils déjà ? Comment coordonner l'ensemble des acteurs de la filière bois ?

Nous allons nous intéresser principalement à deux comportements : la **flexion** et le **fluage** du bois. La flexion s'inscrit dans la continuité du travail réalisé par Christopher Moens et Jens Niclaes durant l'année académique 2021[2]. Le fluage est un nouveau thème que nous abordons dans ce projet afin de débiter une première phase d'étude et de réflexion.

1.1 Le secteur de la construction et le matériau bois

1.1.1 Quels matériaux utilise-t-on aujourd'hui ?

L'utilisation du bois dans le secteur de la construction n'est pas une nouveauté technologique de ces dernières années. Au contraire, ce matériau est utilisé sous de multiples formes depuis plus de 37 000 ans [3]. Depuis le début du vingtième siècle, il s'est fait cependant un peu oublier face aux nombreux avantages technologiques qu'ont apportés l'acier et le béton.

À l'heure actuelle, nous nous préoccupons de plus en plus de l'impact environnemental du secteur de la construction. La quantité moyenne d'émission de CO_2 créée par ce secteur a été estimée comme équivalente à 11% de l'émission de gaz carbonique total dans le monde[4]. Face à cette réalité, les concepteurs se tournent de plus en plus vers une utilisation du matériau bois car il possède de nombreux avantages écologiques et économiques.

1.1.2 Construire avec le bois

Le bois en Belgique

Le bois n'est pas une ressource en pénurie, en particulier en Europe où l'on voit la superficie des forêts en constante augmentation. En Belgique, la forêt recouvre 22,5% du territoire et l'on y compte un prélèvement annuel de 3.218.000 [m^3] de grumes de résineux et 950.000 [m^3] de grumes de feuillus [5].

Les avantages et désavantages du bois

Nous ne détaillerons pas tous les avantages mécaniques du bois par rapport aux autres matériaux, mais nous pouvons tout de même citer les caractéristiques suivantes [3] [6] :

- le bois est plus résistant au feu que l'acier ; en effet, une couche de carbonisation externe va protéger et ralentir la propagation du feu au sein de la section de l'élément ;
- il possède des capacités isolantes et acoustiques très performantes ;
- ce matériau possède l'un des meilleurs ratios résistance/poids propre ;
- le bois peut être considéré comme durable selon l'essence utilisée.

Le caractère durable du bois est l'un de ses plus grands avantages aujourd'hui. Il permet d'une part, de stocker du carbone tout au long de sa vie, et d'autre part, il remplace des matériaux tels que l'acier ou le béton qui sont connus pour leur bilan carbone négatif. Par exemple, la figure 1.1 montre la quantité de CO_2 émise ou absorbée pour créer une poutre de même résistance avec différents matériaux [6]. Enfin, si un ouvrage en bois vient à être détruit, le caractère naturellement recyclable du matériau rend également bien plus faciles les opérations de nettoyage.

Présenté comme cela, le bois semble la solution miracle. Cependant, contrairement à l'acier et au béton, le bois est un matériau vivant et cela peut rendre son utilisation plus complexe. Il réagit à son environnement extérieur (humidité, température, sécheresse...), à ses conditions de croissance (ensoleillement, vent, choc, corps étranger...) et est intrinsèquement dépendant des singularités de son essence. Tous ces paramètres font qu'un

échantillon de bois est difficile à caractériser mécaniquement et qu'il est ardu d'en tirer des tendances globales.

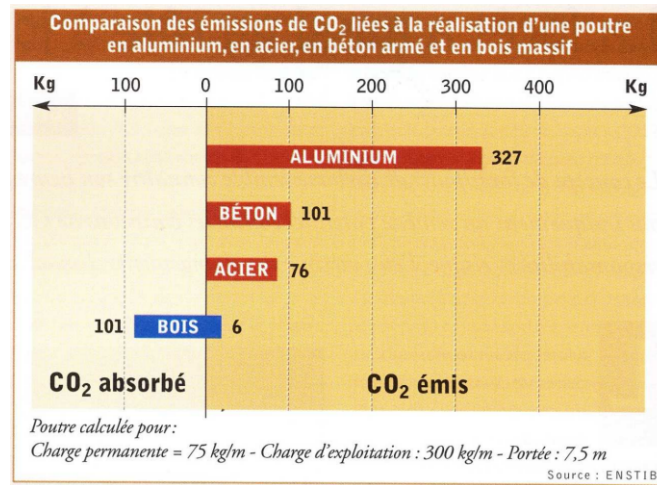


FIGURE 1.1 – Comparaison des émissions de CO_2 pour réaliser une poutre en aluminium, en acier, en béton et en bois [7]

Gestion actuelle

Dans le secteur de la construction, les "Eurocodes" sont les normes européennes applicables au calcul de structure des bâtiments. En particulier, l'Eurocode 5 [1] rassemble la littérature qui normalise l'utilisation du matériau bois. Pour aider à caractériser ce matériau, cette norme propose un classement visuel par essence qui met en évidence les défauts et singularités du bois afin de les classer dans des catégories dites "esthétiques". Dans la littérature européenne, il n'a pas encore été établi de correspondance entre l'esthétique du matériau et sa résistance mécanique. Il existe tout de même certaines normes, en Allemagne notamment, faisant le lien entre classement esthétique et classement mécanique.

Actuellement, nous constatons en scierie que ce classement visuel est certes utile, mais impossible à utiliser réellement sur une chaîne de production. En effet, il n'est pas concevable de prendre trop de temps par planche pour les classer alors que le rendement actuel d'une scierie de résineux est de presque une planche par seconde[7]. Grâce à leur expérience du métier, les scieurs réalisent plutôt un simple classement dichotomique. S'ils estiment que la planche de résineux est d'une qualité structurelle, elle sera classée dans la catégorie "C18+"¹, si au contraire elle n'a pas un bon aspect, elle sera classée en "C18-" et ne sera pas utilisée en structure. En Belgique, il n'est pas aberrant de dire que 95% des bois sont sous-classés en C18 alors que beaucoup d'entre eux ont une résistance en flexion bien supérieure. Cela permet aux vendeurs d'assurer un lot avec une bonne qualité moyenne.

Ce constat pose un réel problème pour la filière bois, car nous n'utilisons pas le plein potentiel de ce matériau naturel et durable, d'autant plus qu'il est actuellement touché par une hausse des prix très importante sur le marché. Par exemple, le prix d'un épicea

1. Valeurs caractéristiques prescrites par la norme NBN EN338 [8]. Pour une même classe de résistance (i.e. : toutes les planches classées en C18 ce qui équivaut à une résistance en flexion de 18[MPa]), 95% des échantillons auront une résistance supérieure à laquelle ils ont été assignés.

sain sur pied est de plus ou moins 100 €/m^3 ². Alors que le prix du bois transformé peut atteindre 400 à 1000 €/m³ à cause des nombreuses interventions (tronçonnage, transport, sciage, séchage, traitement de préservation, mise en vente...) qu'il a subi.

Le matériau bois est dénaturé, classé trop sévèrement, subit une forte augmentation de ses prix et souffre de pertes de matière due au rendement des débits que la scierie impose. Nous comptons en moyenne 2 à 18 %^[7] de perte de matière qui est en grande partie recyclée en produits connexes (bois de chauffage, copeaux...).

C'est cette situation qui a poussé la Wallonie et GreenWin à créer le projet "*Robotronc : Les troncs d'arbres pour la construction multi-étagées*". Pourquoi ne pas utiliser des grumes³, dans des systèmes tels que le poteaux-poutres, à la place d'éléments qui sont passés par de nombreuses étapes avant d'être mis en place ?

1.1.3 Construire avec des grumes

Définition

Une grume est un tronc d'arbre élagué et sans écorce et donc, par définition, pas équarri. L'idée de base du projet Robotronc est de sortir de la caractérisation de groupe telle qu'appliquée dans la filière bois et d'évoluer vers une caractérisation individuelle de chaque grume de façon à les utiliser au maximum de leur potentiel.

Les avantages des grumes

Dans la section précédente, nous avons pu mettre en avant les bienfaits de l'utilisation du matériau de manière structurelle. Cependant, plusieurs points négatifs sont à déplorer et l'utilisation des grumes a pour vocation de contrer ses inconvénients.

Quatre raisons principales sont mises en avant pour promouvoir l'utilisation de grumes.

- La diminution du nombre d'étapes pour transformer la grume estompe fortement le coût de production. Le prix d'achat se rapproche du prix du bois sur pied et les arbres (de tous les diamètres) prendront de la valeur chez les forestiers.
- Puisqu'elles ne sont pas transformées, nous maintenons l'intégralité de l'anatomie du bois sur pied et donc nous conservons toutes les caractéristiques mécaniques de la grume.
- Proportionnellement à la taille de l'élément, les défauts présents sur une grume auront un moins gros impact que sur une simple planche.
- Nous diminuons radicalement le gaspillage de la matière première lors des découpes.

Les défis à relever^[2]

Le design constructif : Travailler avec des éléments imposants de plusieurs mètres et de plusieurs centaines de kilos entraîne évidemment une nouvelle approche dans la manière de penser et de construire un bâtiment. Bien qu'un usinage de la grume sera réalisé pour préparer ses appuis, il faudra tenir compte de la courbure et de la conicité de chaque élément. Cela limite bien évidemment l'utilisation de grumes à certains types de constructions en bois. La plus logique est de considérer chaque grume comme un élément

2. <https://www.experts-forestiers.be/Tableauprixbois.pdf> consulté le 2 juin 2022

3. Tronc écorcé et ébranché

et de les assembler tel un ensemble poteaux-poutres.

Les assemblages : Lorsque l'on utilise le matériau bois dans une construction, bien souvent les points critiques sont les assemblages entre les éléments. Entre des grumes, cela le sera encore plus. En effet, il faut jouer avec des éléments ovales qui n'ont pas spécialement les mêmes tailles ou la même allure. Pour résoudre ce défi, il va falloir compter sur l'aide numérique afin de réaliser une approche paramétrique des assemblages[9].

Caractérisation mécanique des grumes : Utiliser des grumes sur un projet, c'est une chose. Mais comment caractériser⁴ des grumes, qui sont uniques et qu'on ne peut détruire, avant de les mettre en place? Cette question est le fil rouge de ce mémoire : *Rechercher un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes.*

Il existe actuellement trois méthodes principales pour caractériser une grume sans la détruire.

- **Réaliser un classement visuel sévère :** Cette méthode est fonctionnelle et est actuellement utilisée, mais ce mémoire a pour ambition de s'en éloigner le plus possible. Pour utiliser une grume au meilleur de son potentiel, il faut la considérer comme unique et éviter un classement trop pénalisant.
- **Tester mécaniquement le matériau :** Comme précisé ci-dessus, cette méthode est l'objet de notre recherche. Le défi est de trouver un protocole simple et réalisable en scierie, qui n'endommage pas la grume et qui permet d'utiliser tout son potentiel.
- **Les méthodes IET⁵ :** Ces méthodes non destructives utilisent le principe de propagation d'ondes via un léger impact pour déterminer notamment le module d'élasticité du matériau. Ce thème est abordé en détail dans le travail de recherche de V. HOUBEN[10]. Notre travail de recherche sera mis en parallèle au sien afin de comparer les résultats, vérifier le non-endommagement des grumes et élaborer un protocole qui pourrait allier ces deux méthodes.

Le phasage simplifié d'un projet

Pour concevoir un projet avec des grumes, il faut prévoir la manière dont sera réalisé l'approvisionnement et le cheminement des grumes jusqu'au chantier. J. NICLAES et C. MOENS [2] ont proposé différentes approches.

- **Le stock de grumes :** la scierie conserve un stock de grumes testées dans leur établissement en attendant l'appel d'un projet.
- **Projet par projet :** suite à un dimensionnement du bureau d'études à l'aide d'abaque de prédimensionnement, le maître d'œuvre achète un lot de grumes correspondant et les fait tester en scierie.
- **Stock vivant de grumes :** le forestier estime visuellement les caractéristiques des troncs d'arbre sur pied qui seront ensuite testés en scierie.

Ces trois méthodes ont des points positifs et négatifs. Durant cette année de recherche supplémentaire et par instructions proposées par la scierie Scidus, nous sommes parvenus à une nouvelle approche (un schéma global est présenté en annexe I) :

4. Déterminer la résistance et la capacité portante de la grume sur le court et le long terme

5. Impulse excitation technique

1. **Le maître d'œuvre et l'architecte (MO)** conçoivent un projet dans lequel ils fournissent des plans avec des niveaux et des épaisseurs de plancher libres minimales.
2. **Le bureau d'étude (BE)** propose à l'architecte des dimensions pour les éléments du projet en utilisant des abaques de prédimensionnement.
3. L'étape 1 et 2 sont répétées jusqu'à ce que le BE et le MO se soient mis d'accord sur les dimensions des éléments du projet. Le cahier des charges est alors envoyé à la scierie par le **BE**.
4. **La scierie** envoie une commande à l'exploitant forestier avec une marge de 5% sur les quantités.
5. **L'exploitant forestier** réalise un premier classement visuel des grumes pour faire une première sélection et envoie les grumes à la scierie.
6. **La scierie** trie et numérote les grumes pour ensuite réaliser une procédure de classement. Cette étape est celle pour laquelle nous réalisons nos recherches. Elle est constituée de plusieurs séries de tests qui nous permettent au fur et à mesure d'éliminer les mauvaises grumes (qui seront recyclées ou utilisées pour d'autres projets) et de ressortir les caractéristiques mécaniques de chaque grume.
7. **Le BE** reçoit un compte rendu des essais et des caractéristiques de chaque grume ayant réussi les tests.
8. Grâce à l'étape précédente, le **MO** peut adapter et finaliser les plans avec les dimensions correctes de chaque élément.
9. **La scierie** livre sur le chantier le lot de grumes étiquetées.

Les projets existants

Utiliser des troncs d'arbre n'est pas un nouveau système constructif. Une des premières applications a été de les employer comme base de fondation et comme pilotis (figure 1.2a). Même au contact permanent de l'eau, ces structures semblent conserver leurs propriétés et résister au cours du temps.

Les Navajos, peuple amérindien, ont utilisé les grumes de bois pour construire leurs maisons et lieux de culte traditionnels. Ces habitations, des "hogans", sont constituées d'un entassement ingénieux de grumes soutenues par des bois verticaux qui constituent les murs (figure 1.2b). Ces structures sont certainement surdimensionnées au vu de la section des éléments de bois, mais à nouveau, ce système constructif est efficace et nous prouve que les grumes de bois peuvent avoir leur rôle à jouer dans le monde de la construction.



(a) Reconstitution d'une maison du néolithique sur pilotis [11]



(b) Intérieur d'un hogan traditionnel [12]

FIGURE 1.2 – Utilisation ancestrale des grumes

Les chalets de montagne exploitent le principe de bois empilé. Ce principe constructif fonctionne également, mais le bois n'est pas du tout utilisé à son plein potentiel. Les sections sont largement supérieures aux besoins et le bois travaille perpendiculairement à ses fibres, ce qui n'est pas l'idéal avec ce matériau.

Aujourd'hui, les applications les plus courantes avec des grumes sont les abris, les hangars ou les granges de fermes (figure 1.3a et 1.3b). Dans ces structures, nous retrouvons là une utilisation intelligente et recherchée des grumes. Ces projets appartiennent généralement à la catégorie de l'autoconstruction car les structures portantes en grumes ne sont pas encore ancrées dans la philosophie des bureaux d'études. Les poteaux en grumes sont posés sur un plot en béton pour les protéger de l'humidité du sol, et s'élèvent sur plusieurs mètres pour venir accueillir des lisses de bardages ou encore une charpente complète.



(a) Grange de la ferme du Mont Charvet auto-construite en grumes [13]



(b) Abri composé en grume [14]

FIGURE 1.3 – Utilisation moderne des grumes

Certains bureaux d'étude commencent tout de même à se spécialiser dans la construction d'ouvrages constitués de grumes. En Belgique, le parc zoologique *Pairi Daiza* a construit le plus grand parking photovoltaïque au monde (figure 1.4). La structure portante est entièrement réalisée en grumes provenant des forêts locales [15].



FIGURE 1.4 – Parking photovoltaïque de Pairi Daiza [15]

Les grumes sont également accueillies dans des projets d’une tout autre ampleur. Nous pouvons par exemple citer le *Muroto Indoor Stadium* construit en 2017 (figure 1.5a). Nous y observons un toit formé de treillis en grumes avec des portées de cinquante mètres. Enfin, nous pouvons mentionner le *Festival Foods Grocery Store* à Madison (figure 1.5b). Ce magasin de nourriture est protégé par un toit supporté par des treillis en grumes qui sont eux même supportés par des grumes non usinées sur leur long [16].



(a) Muroto Indoor Stadium



(b) Festival Foods Grocery Store

FIGURE 1.5 – Structures de grandes envergures supportées par des grumes [16]

1.2 Les objectifs du travail de recherche

La construction avec grumes a de nombreux avantages mais tout est à faire et à inventer pour que cette méthode soit acceptée aujourd’hui.

L’objectif de notre recherche est de *définir un protocole industriel non destructif pour caractériser mécaniquement une grume*. Cette étude a déjà commencé l’année passée avec le travail de fin d’étude de J. NICLAES et C. MOENS [2]. Ils ont ainsi établi un banc d’essai et un premier protocole expérimental dans le laboratoire LEMSC⁶ de Louvain-La-Neuve. Nous avons repris leurs résultats et leurs observations pour essayer d’établir un protocole qui définira des critères d’exclusions de grumes. Nous avons également réfléchi à la méthodologie que devra suivre un bureau d’études pour concevoir un projet avec des grumes. En effet, de quelles données a-t-on besoin à la sortie du protocole (étape 7 du phasage d’un projet) pour assurer au client que la structure soit efficace ?

6. Laboratoire essais mécaniques, structures et Génie civil

Le bureau d'étude

Lorsqu'un bureau d'études reçoit des plans d'un architecte, il doit faire appel à ses connaissances pour avoir une première idée de la taille des éléments internes de l'édifice (poutres, planchers...) et entamer ses calculs. Or avec des grumes, nous ne connaissons pas encore les dimensions "de bonne coutume" dans les ouvrages car peu de projets non-surdimensionnés ont été réalisés et le bois reste un matériau versatile. Le projet Robotronc aimerait créer des abaques de prédimensionnement (figure 1.6) pour accélérer le processus de calcul et créer une base de données fiables. Pour cette recherche, nous avons travaillé avec 30 grumes ce qui est nettement insuffisant pour créer des abaques. Mais nous pouvons déjà réfléchir à la façon de les créer et aux informations qu'ils pourraient contenir.

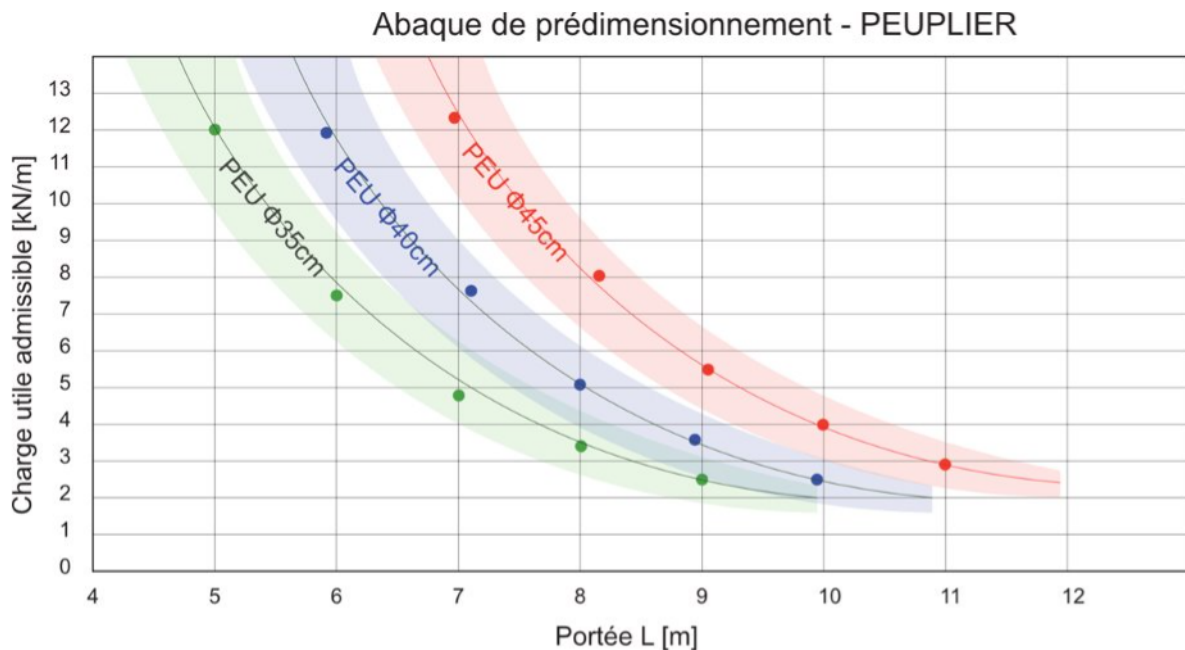


FIGURE 1.6 – Abaque de prédimensionnement fictif de grumes de peuplier

Afin de dimensionner un ouvrage, le bureau d'études doit se référer aux Eurocodes correspondants. Via ce design "normé", l'ingénieur doit réaliser deux vérifications.

1. L'ouvrage doit assurer un confort à l'utilisateur. Cela signifie que par exemple, le plafond d'un bâtiment, même s'il ne rompt pas, ne peut pas fléchir d'un mètre de haut. Cela rendrait bien évidemment les usagers mal à l'aise. Ce critère se nomme un "État Limite de Service" (ELS) et est une vérification de la flèche maximale à ne pas dépasser.
2. Sous un important effort, l'ouvrage ne peut pas rompre. Ce critère se nomme un "État Limite Ultime" (ELU). Théoriquement, un ouvrage ne devra jamais supporter un effort de ce type. C'est la raison pour laquelle des facteurs de sécurité sont utilisés dans les calculs pour assurer que cet état soit inatteignable. Ce critère est une vérification de la résistance des matériaux.

Le dimensionnement d'un ouvrage doit également prendre en compte le facteur temps. Un bâtiment en service bouge et réagit constamment aux contraintes qu'on lui impose (le vent, la neige, l'installation d'un piano...). Cela signifie que les matériaux sont chargés et

déchargés de manière répétitive. Ils peuvent donc s’abîmer et perdre leurs performances mécaniques. L’Eurocode applique alors des coefficients pour tenir compte de la réduction de la résistance des matériaux afin de réaliser des calculs **long terme** (LT).

En résumé, lorsqu’un bureau d’études réalise le dimensionnement d’un ouvrage, il doit déterminer pour chaque élément trois forces principales, les forces ELS court-terme et long terme et la force ELU. Nous les nommerons dans ce travail $F_{ELS,CT}^{projet}$, $F_{ELS,CT(LT)}^{projet}$ et F_{ELU}^{projet} . Notre objectif est de pouvoir comparer ces trois valeurs de forces pour chaque grume qui sera testée par le protocole mécanique que nous proposons.

En plus de cela, il est possible d’utiliser des méthodes vibratoires en amont afin d’avoir une première estimation des grumes testées. Cette partie est davantage présentée dans le mémoire de Valentine Houben [10]. Si nous y parvenons pour toutes les grumes, le bureau d’études pourra finaliser son dimensionnement sans peine.

Résumé des objectifs

- Valider un protocole non-destructif expérimental permettant de caractériser mécaniquement une grume.
- Définir des critères d’exclusions dans le protocole.
- Se libérer de l’Eurocode de façon à optimiser la caractérisation de chaque grume.
- Ajouter une interprétation du comportement de la grume.
- Proposer un protocole industriel réalisable.

1.3 Plan de travail

Notre premier chapitre traite de la littérature consacrée au bois. Il nous permet de répertorier les caractéristiques mécaniques du matériau, de comprendre comment il travaille avec son environnement et de quelle façon nous pouvons en retirer le meilleur.

Ensuite, nous entamons nos essais expérimentaux des grumes en flexion. Après un bref rappel théorique spécifique à ce sujet, nous expliquons comment nous avons établi un protocole d’expérimentation sur trente grumes de trois espèces différentes. Cette démarche nous a permis d’obtenir des résultats que nous avons analysés et interprétés.

Afin de prendre en compte le comportement du bois au long terme, nous réalisons des batteries d’essais sur vingt éprouvettes équarries d’épicéa provenant des grumes testées. Après un nouveau rappel théorique dédié à ce sujet, nous proposons un banc d’essai et un programme expérimental dont les résultats sont interprétés en fin de chapitre.

Enfin, vous pourrez retrouver nos résultats dans la section conclusion où nous résumons toutes les observations de ce travail de recherche d’un an. Cela permet de donner des outils et des indices sur les prochaines études à réaliser pour que le projet Robotrunc arrive à ses fins.

CHAPITRE 2

GÉNÉRALITÉS SUR LE BOIS

Dans l'introduction, nous avons mis en évidence que le bois est de plus en plus apprécié en construction. En plus de ses avantages écologiques non négligeables, il est résistant et esthétique, utilisable en massif ou en transformé. Cependant, le bois est naturel et vivant, ce qui a pour inconvénient qu'il réagit fortement à son environnement. De plus, nombreux sont les défauts qui peuvent l'habiter. Dans ce chapitre, nous allons donc aborder tout ce qui fait la richesse du bois mais aussi sa complexité.

Ce chapitre a pour but que tout un chacun comprenne aisément les différentes caractéristiques fondamentales à prendre en compte lorsque l'on utilise le bois en construction. Les sujets abordés seront l'anatomie du bois d'un point de vue général, son anisotropie, son comportement particulier envers son environnement extérieur, ses propriétés mécaniques et physiques ainsi que l'ensemble des éléments qui font qu'un bois est unique.

2.1 Anatomie générale du bois

2.1.1 Structure cellulaire

Puisque le bois est composé de cellules, il est considéré comme **vivant**. Ces cellules travaillent en synergie afin d'assurer la croissance et le développement de l'arbre. Or, toutes les essences de bois ne sont pas composées des mêmes cellules et leur disposition peut être différente. Ces cellules ont des rôles différents tels que le transport de la sève, le stockage des ressources, ou bien un rôle de soutien. Afin de différencier les arbres, deux grandes familles ont été définies. Il y a d'une part, les **résineux** et d'autre part, les **feuillus**. Les principales différences entre ces deux familles sont énoncées ci-dessous.

- Les résineux sont apparus bien avant les feuillus. Cela implique que les résineux ont une structure cellulaire plus simple. De plus, certaines spécificités propres aux résineux, vont se retrouver chez certains feuillus (i.e. la présence de fibres trachéides).
- Il y a une plus grande diversité chez les feuillus que chez les résineux.
- La densité est globalement plus élevée chez les feuillus et leur variabilité est plus importante au sein d'une même essence. Pour la suite, il est important de garder en mémoire que de nombreux éléments tels que la résistance, le module d'élasticité ou la dureté sont étroitement liés à la densité du bois.
- D'un point de vue cellulaire, les résineux seront composés de trachéides qui assurent à la fois un rôle de soutien et de transport. Par contre, les feuillus sont composés de vaisseaux et de fibres qui assurent respectivement un rôle de transport et un rôle de soutien.

2.1.2 Composition chimique

En plus d'être **vivant**, le bois est un matériau **composite**. Cela signifie qu'il est composé de plusieurs macromolécules différentes (figure 2.1). Il en existe 3 en particulier : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

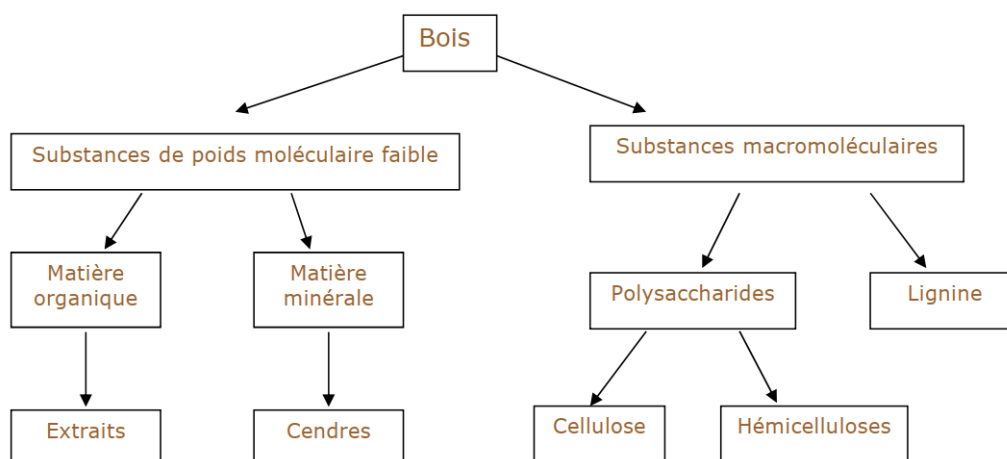


FIGURE 2.1 – Schéma général des constituants chimiques (Fenger/Wegener)[6]

- La **cellulose** est la macromolécule la plus présente dans les parois cellulaires du

bois (40-50%) [17]. C'est un polysaccharide¹ de glucose sous forme cristalline. Elle assure en grande partie la résistance à la traction du matériau.

- **L'hémicellulose** est aussi un polysaccharide mais celle-ci a des compositions plus variables que la cellulose. Elle est composée de différents sucres tels que le xylose, le mannose, le glucose, le galactose et l'arabinose. Elle compose 25-40% [17] des parois cellulaires et contrairement au glucose, sa structure est amorphe et assure un rôle important dans la résistance à la compression.
- **La lignine** est un polymère aromatique et sa composition est plus complexe. Elle enveloppe la cellulose et l'hémicellulose et joue donc le rôle de liant mais aussi de protection. En effet, la cellulose et l'hémicellulose étant composées de sucre, elles intéressent grandement les insectes et la lignine est donc là pour les repousser. Elle représente 20-35% [17] de la paroi cellulaire.

2.2 L'eau et le bois

Le bois a tendance à se mettre en équilibre avec l'humidité de son environnement², c'est la caractéristique d'un comportement hygroscopique. Il va donc réagir aux variations d'humidité ambiante, c'est pourquoi il est intéressant de pouvoir caractériser cette relation que le bois a avec son environnement.

On définit la teneur en eau du bois (w) comme le rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse de matière ligneuse. On l'exprime comme :

$$w = \frac{M_H - M_0}{M_0} \quad (2.1)$$

Où M_H est la masse du bois humide et M_0 la masse anhydre, la masse du bois totalement sec. Cette masse anhydre n'est jamais obtenue sauf en laboratoire. La teneur en eau du bois peut varier de 0% à 200% pour des essences très humides telles que le peuplier.

On distingue trois types d'eau dans le bois.

- **L'eau libre** se situe à l'intérieur des lumens³ et est rapidement perdue une fois que l'arbre est coupé. On considère que l'arbre perd son eau libre en premier et celle-ci s'est totalement échappée lorsque la teneur en eau atteint une valeur d'environ $w = 30\%$. On définit le point de saturation des fibres (*PSF*) comme le point à partir duquel toute l'eau libre s'est évaporée. Une fois ce point passé, le bois ne peut plus récupérer l'eau qu'il a perdu. Cette valeur du PSF est très variable selon les essences. Elle peut être de 23% pour l'afrormosia ou de 34% pour le hêtre. [6].
- **L'eau liée** est l'eau qui se situe entre les macro-molécules de bois telle que la cellulose [6]. On peut l'extraire suite à l'opération de séchage. Elle occupe la tranche de 5% à 30% de la teneur en eau mais peut varier selon les essences.
- **L'eau de constitution** est finalement l'eau qui est intrinsèque à la matière organique elle-même. Elle demande une grande quantité d'énergie pour être évacuée.

1. Les polysaccharides sont des glucides complexes constitués d'un grand nombre de sucres simples [18]

2. Il est question ici d'humidité relative.

3. Partie creuse d'une cellule, ils constituent les conduits qui traverse le bois

2.3 Anisotropie du bois

Comme défini dans le *Guide pour le bon usage du bois* [17]⁴, "L'anisotropie est la propriété d'un matériau de présenter des caractéristiques dépendantes de la direction". Cette particularité est due à l'anatomie du bois car il a une structure cellulaire qui est orientée.

On distingue trois plans (sections) ligneux tel que représenté sur la figure 2.2 :

- le **plan transversal** : perpendiculaire à l'axe longitudinal du tronc ;
- le **plan radial** : perpendiculaire aux cernes de croissances ;
- le **plan tangentiel** : tangent aux cernes de croissances.

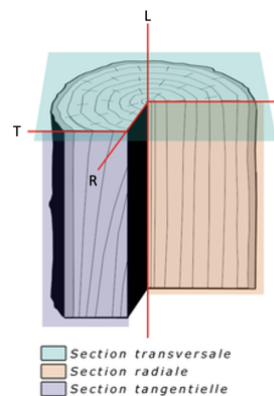


FIGURE 2.2 – Plans ligneux du bois [2]

Ces trois plans ont chacun leurs propres caractéristiques mécaniques et physiques. Ils vont avoir une influence sur le comportement hygroscopique du bois mais aussi sur de nombreuses caractéristiques mécaniques.

2.4 La température et le bois

Lorsque la température du bois augmente, le module d'élasticité et la résistance mécanique de celui-ci vont être impactés [6]. Cette diminution des propriétés mécaniques est représentée graphiquement dans la figure 2.3 pour des humidités constantes.

4. Au chapitre 2.2.2 : Anisotropie

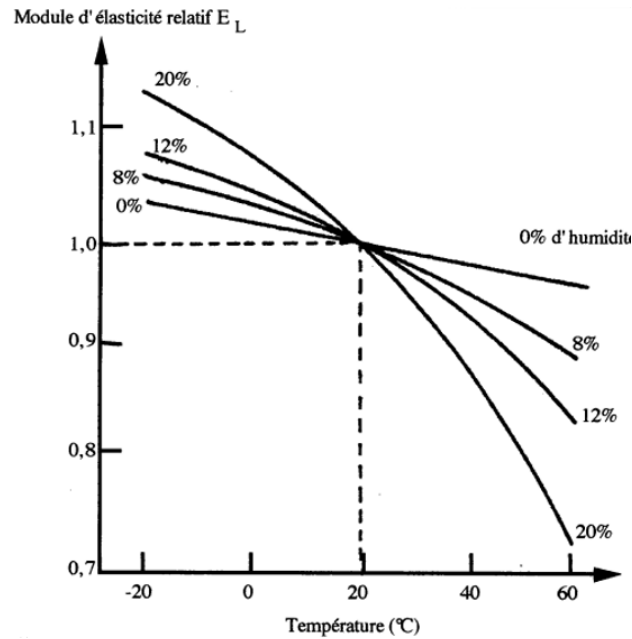


FIGURE 2.3 – Variation du module de Young en fonction de la température pour différentes humidités du bois (w) [19]

2.4.1 Comportement hygroscopique

De manière générale, on peut exprimer le comportement hygroscopique du bois grâce au coefficient de rétractibilité (β) qui exprime le retrait pour une variation d'humidité de 1%. La formule pour estimer les variations dimensionnelles du bois est :

$$\Delta L = \frac{\beta \cdot \Delta w \cdot L}{100} \quad (2.2)$$

avec

$$\begin{aligned} \beta &= \text{coefficient de rétractibilité}[\%/ \%] \\ \Delta L &= \text{allongement linéaire de la pièce de bois}[\text{mm}] \\ L &= \text{la longueur de l'élément}[\text{mm}] \\ \Delta w &= \text{variation hydrique}[\%] \end{aligned}$$

L'évolution du retrait et du gonflement du bois en fonction de la teneur en eaux peut être aussi représentée grâce au graphique 2.4. On remarque plusieurs éléments importants. D'une part, au-dessus du PSF le coefficient se stabilise. Cela est dû au fait que la disparation de l'eau libre n'a aucun effet sur les variations dimensionnelles car elle occupait simplement un emplacement vide. En dessous du PSF par contre, l'évolution est linéaire. D'autre part, on remarque que le coefficient de retrait est plus important en tangentiel qu'en radial qui est lui-même plus important qu'en axial.

Cette anisotropie sur l'humidité du bois va avoir un grand impact sur le choix du mode de débit. Comme montré sur la figure 2.5, le comportement du bois ne sera pas pareil si la planche a sa face principale sur le plan tangentiel (découpe sur dosse) ou sur le plan radial (découpe sur quartier).

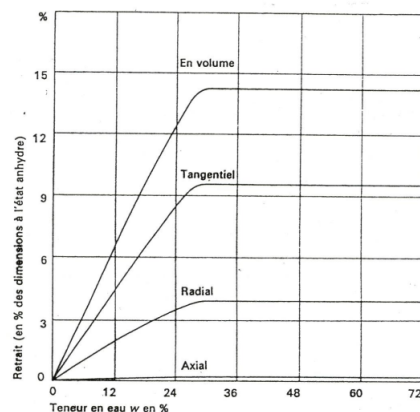


FIGURE 2.4 – Évolution du coefficient de retrait pour le sapin [6]

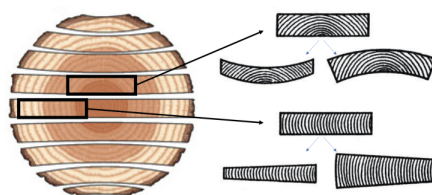


FIGURE 2.5 – Variations dimensionnelles dans le bois [3]

2.4.2 Caractéristiques mécaniques

Le module d'élasticité

Au vu de la constitution anatomique du bois, il est assez évident de retrouver la relation suivante concernant les modules d'élasticités : $E_L \gg E_R > E_T$ ⁵. En général, les différents tableaux fournis par l'Eurocode 5 [1] nous indiquent la valeur de E_L . Les deux autres valeurs peuvent être dérivées via des rapports de modules qui sont également fournis dans le tableau 2.1.

	Feuillus standard	Résineux standard
Humidité [%]	12	12
Masse volumique [g/cm ³]	0,65	0,45
Module d'élasticité [MPa]		
E_L	14400	13100
E_R	1810	1000
E_T	1030	636
Degré d'anisotropie		
E_L/E_R	8	13
E_L/E_T	14	21
E_R/E_T	1,7	1,6

TABLE 2.1 – Tableau général des modules de Young du bois en fonction de la direction considérée [6]

5. Les annotations L, R et T font référence aux directions longitudinale, radiale et tangentielle.

Le coefficient de Poisson

Tout comme le module d'élasticité (ou de Young), le coefficient de Poisson (ν) est influencé par la direction d'application de la force mais aussi par le plan d'observation de la déformation. La relation suivante est intrinsèque au bois : $\nu_{RT} > \nu_{LT} > \nu_{LR} \approx \nu_{TR} >> \nu_{RL} > \nu_{TL}$ ⁶ [[6][20]].

Le module de cisaillement

Dans la théorie de la résistance des matériaux, le module de cisaillement (G) est directement déduit du module de Young et du coefficient de Poisson du matériau. Pour les matériaux élastiques linéaires isotropes, ce coefficient est calculé grâce à la formule suivante[3] :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.3)$$

Cependant, le bois n'est pas du tout isotrope. Il faut alors le déterminer expérimentalement via notamment la norme NBN408 [21]. On peut toutefois observer la relation suivante : $G_{LR} > G_{TL} >> G_{RT}$.

Pour certaines utilisations, telles que la détermination du module d'élasticité, la norme propose de considérer une valeur de $G = 650[MPa]$ [[1][6]].

2.5 Propriétés mécaniques

2.5.1 Composition macroscopique du bois

Duramen et aubier

Le bois est divisé en différentes zones (figure 2.6) qui ont toutes un rôle bien distinct dans la vie de l'arbre.

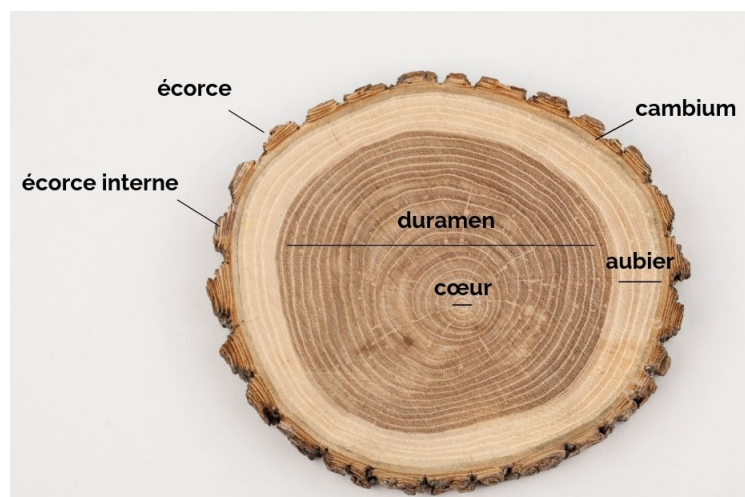


FIGURE 2.6 – Coupe transversale d'un tronc d'arbre [22]

6. ν_{XY} signifie que l'on applique une contrainte dans la direction X et que l'on observe sa déformation dans la direction Y.

Dans le secteur de la construction, on s'intéresse principalement à l'aubier et au duramen car l'écorce et le cambium seront généralement enlevés lors de la découpe du bois. L'aubier, issu de la croissance du cambium, est la partie **vivante** du bois qui véhicule la sève brute. Cette partie est beaucoup plus sensible aux attaques et n'est donc quasiment pas recherchée dans le domaine de la construction.

Lorsque le duramen et l'aubier ne sont pas distinguables à l'œil nu, nous nommons cela du "bois parfait". Nous observons souvent cela sur du bois blanc. Dans cette situation, il est donc impossible d'utiliser uniquement du duramen[6]. De manière générale, l'aubier est plus humide par rapport au duramen. Il n'y a que chez le peuplier, que l'inverse est observable.

Le duramen provient de la transformation de l'aubier via un processus de duraminisation. C'est la partie "ancienne" du bois qui est maintenant dite **morte** car les cellules ne grandissent plus mais elles restent tout de même fonctionnelles et ont un rôle majeur de soutien mécanique. Suite au processus de duraminisation, les vaisseaux du bois sont obstrués et l'échange hydrique avec l'extérieur est ainsi fortement réduit. De plus, le bois va se charger en extrait et cela signifie que cette partie est beaucoup moins sensible aux différentes attaques de champignons et d'insectes. [6]

Bois juvénile et bois adulte

Avant les années 50, le choix du bois dépendait principalement de la proportion d'aubier. Il a été démontré aujourd'hui, via diverses expériences, que la présence de bois juvénile est un critère essentiel pour prédire le comportement mécanique de l'élément bois.

Le bois juvénile est le premier bois qui est créé par la jeune pousse. Sa fonctionnalité initiale n'est donc pas le soutien mécanique, mais bien le transport de la sève. Il est généralement admis que *"chez les résineux, le bois juvénile constitue approximativement les 15 premiers cernes ; chez les feuillus, ce sont les 20 à 40 premières années."* [17]. Le bois adulte sera lui formé après la formation du bois juvénile.

La présence de bois juvénile a un grand impact sur les propriétés mécaniques du bois, et ce, principalement chez les résineux. Il a été observé qu'anatomiquement, ce jeune bois possède de plus grands cernes, une faible densité, des trachéides plus courtes et une variation dimensionnelle plus importante que le bois adulte [[6] [17] [23]].

Plusieurs études comparatives ont été menées sur les caractéristiques mécaniques du bois juvénile. Il a été conclu que ce bois fait malheureusement perdre le bon fonctionnement qu'apporte le bois de cœur (le duramen). On peut observer sur la figure 2.7 l'évolution schématique d'un arbre. Le bois varie sur toute la hauteur de l'arbre et donc ses caractéristiques mécaniques aussi.

S. CHARRON et al. [24] ont mené une batterie de tests sur du mélèze pour en ressortir le tableau 2.2 et les résultats suivants :

- la masse volumique du bois juvénile est nettement inférieure à celle du bois adulte ;
- le module de Young du bois juvénile est 20% inférieure à celui du bois adulte ;
- la dureté du bois juvénile est 23% plus faible que celle du bois adulte ;

- bien que le retrait longitudinal du bois juvénile soit plus important, le retrait volumique total semble être le même pour les deux bois.

Caractéristiques	Bois juvénile		Bois adulte	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Masse volumique [kg/m^3]	527	77	601	94
Module d'élasticité en flexion statique [MPa]	8600	3100	10800	3700
Contrainte de rupture en flexion statique [MPa]	82,5	20,9	101,0	30
Retrait volumique total [%]	13,07	2,69	13,84	2,92

TABLE 2.2 – Valeur moyenne (Moy.) et écart-type (ET) des caractéristiques physiques et mécaniques du bois juvénile ($n = 68$) et du bois adulte ($n = 68$) [24]

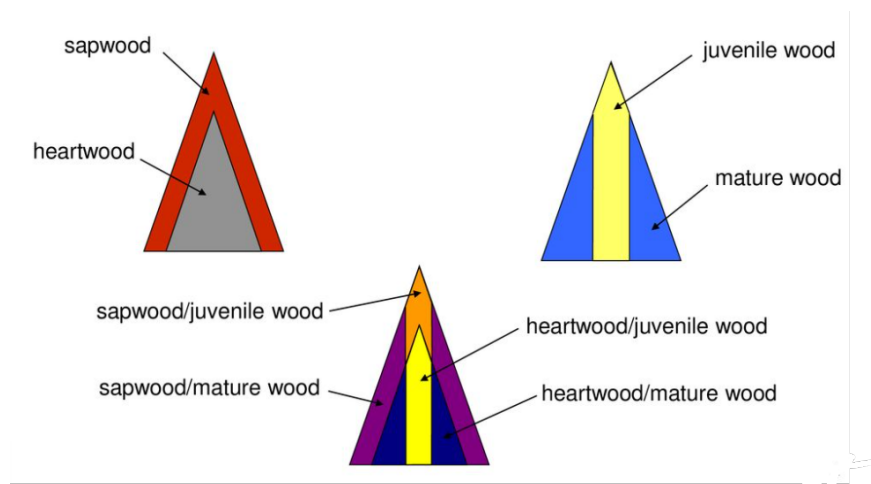


FIGURE 2.7 – Disposition du bois juvénile (juvenile)/bois adulte (mature) et du duramen (heartwood)/aubier (sapwood) dans un tronc [25]

2.5.2 Les modes de sollicitations majeurs

Le bois en traction, en compression et en flexion

De manière générale, le bois travaillera toujours mieux dans le sens de ses fibres que perpendiculairement ou obliquement à celles-ci. Au-delà de cela, la figure 2.8 résume de manière complète le comportement du bois sous une contrainte de traction ou de compression.

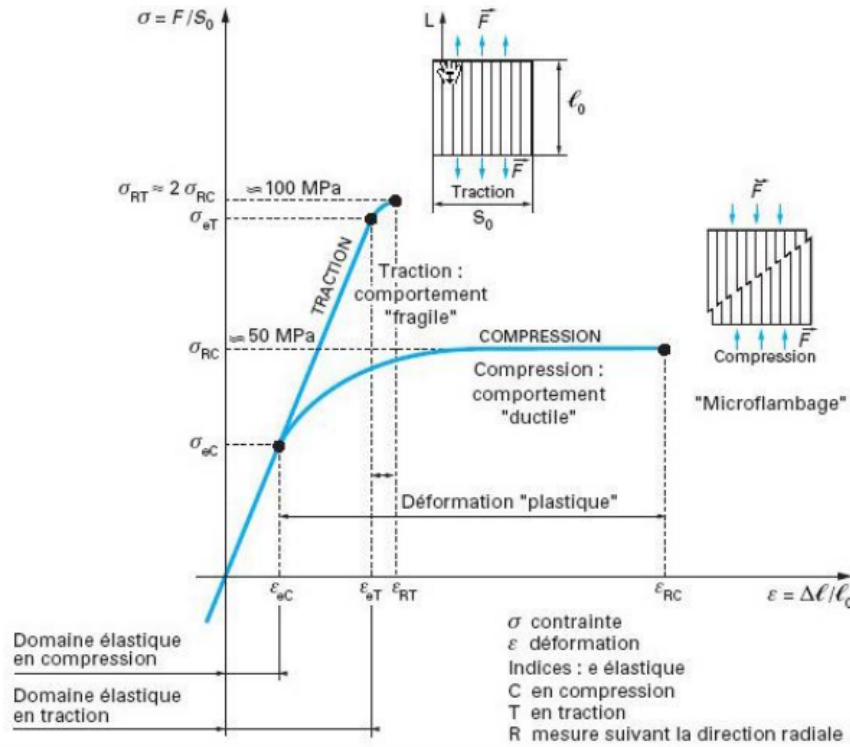


FIGURE 2.8 – Courbe théorique contrainte-déformation du bois sec sans défaut [26]

Afin de décrire la résistance globale du bois, on utilise la nomenclature suivante : $f_{X,Y,Z}$ avec X le mode de sollicitation (c : compression ; t : traction ; m : flexion), Y l'orientation de la force par rapport aux fibres (0 : parallèle aux fibres ; 90 : perpendiculaire aux fibres) et Z : la valeur considérée (k : caractéristique ; d : de design, avec des coefficients de sécurité et réducteurs).

Les résultats de la figure 2.8 sont obtenus avec des échantillons secs, sans défauts et dont les fibres sont parfaitement orientées. Cependant, une pièce de bois n'est jamais parfaite⁷. "La présence de nœuds et les déviations, même légères, des fibres par rapport à l'axe de l'élément provoquent une très forte réduction de $f_{t,0,k}$." [3] Voilà la raison pour laquelle les valeurs caractéristiques fournies dans l'Eurocode 5 [1] nous indiquent que le bois est meilleur en compression qu'en traction, ce qui contredit la figure 2.8.

En résumé, le bois suit la relation suivante : $f_{m,k} > f_{c,0,k} > f_{t,0,k} > f_{c,90,k} \gg f_{t,90,k} \approx 0$ [3] avec respectivement la résistance caractéristique en flexion, en compression et en traction parallèle au fil et en compression et en traction perpendiculaire au fil.

7. Une pièce est dite parfaite si sa pente de fil est parfaitement longitudinale, ce qui est en réalité purement théorique.

Les facteurs d'influence

Les influences de **l'humidité** du bois et de **la température** ont déjà été présentées précédemment dans les sections 2.2 et 2.4. Si la température du bois tend à augmenter, le bois aura un comportement moins bon qu'à son habitude. On peut voir cela sur la figure 2.3 qui démontre aussi que l'humidité a un rôle important. Lorsque l'humidité d'un bois se situe sous le PSF, plus sa teneur en eau est importante, moins bon sera son comportement mécanique.

Ce comportement est représenté sur la figure 2.9 où on peut observer la baisse de rigidité du bois jusqu'au PSF pour ensuite faire place à un plateau. Notons que si le PSF est dépassé, le bois a un risque très élevé d'être sujet à des attaques d'agents biologiques⁸ qui peuvent à terme le déstructurer[17] [6] [3].

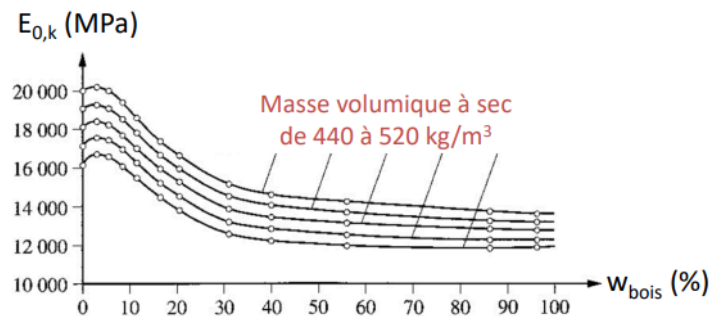


FIGURE 2.9 – Variation de la rigidité du bois en fonction de la teneur en eau du bois [%] [3]

Sur cette figure 2.9, on peut aussi découvrir l'influence de la **masse volumique** du bois sec. Plus celle-ci sera grande, meilleurs seront ses performances mécaniques.

Au vu du caractère anisotrope du bois, les **dimensions de la pièce** de bois vont jouer un rôle important dans son comportement mécanique. Au plus une pièce de bois est grande, au plus on retrouvera des irrégularités "internes". Il y aura une plus grande possibilité d'observer par exemple des **nœuds** ou une **pente de fil** importante. Ces deux paramètres vont mettre en défaut le comportement mécanique de la pièce. Les valeurs théoriques sur des échantillons sans défaut sont fournies par l'Eurocode 5 [[1][17]]. Les **défauts et singularités** du bois seront décrits de manière plus complète dans la section 2.7.

2.5.3 Valeurs caractéristiques de certains bois

Afin de pouvoir comparer les différentes valeurs mécaniques que nous allons déterminer par la suite, pour nos grumes ou nos éprouvettes de fluage, voici certaines valeurs caractéristiques qui nous sont fournies par la table 2.3.

8. En général, on considère qu'une humidité du bois supérieur à 20% est la limite à ne pas dépasser afin d'éviter tout type d'attaque.

Essences	Masse volumique à 12% [kg/m ³]	Module de Young [MPa]		$f_{m,k}$ [MPa]	
		Etat vert	12% d'humidité	Etat vert	12% d'humidité
Chêne (F) - Quercus spp.	710	9300	12500	59	97
Hêtre (F) - Fagus sylvatica	700	9500	13500	59	113
Peuplier (F) - Populus spp.	400	7000	9000	37	65
Douglas (R) - Pseudotsuga menziesii	550	10400	12000	53	85
Epicéa (R) - Picéa abies	450	9500	11000	42	71

TABLE 2.3 – Valeurs caractéristiques de certaines essences de feuillus (F) et de résineux (R) [17] [20]

2.6 Les différents états du bois

En fonction de son humidité et de sa condition de stockage, le bois peut être considéré selon trois états possibles :

- **bois à l'état vert** : bois qui vient d'être abattu et dont la teneur en humidité est supérieure à son PSF ;
- **bois humide** : bois dont la teneur en humidité varie entre l'état anhydre théorique et son PSF ;
- **bois sec ou à l'état anhydre** : "bois séché en étuve ventilée à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation du poids pendant 24 heures"⁹ [6]. Cela signifie en d'autres termes que l'entièreté de l'eau libre et de l'eau liée a été extraite [17].

2.6.1 Le séchage du bois

Comme on a déjà pu le comprendre dans la section 2.5.2, pour exploiter le maximum du matériau bois, il faut l'utiliser dans des conditions optimales. Le séchage du bois est dans ce sens primordial. D'autant plus que ce traitement n'apporte pas seulement une amélioration de son comportement mécanique. Un séchage "réussi" diminue la sensibilité du bois face aux attaques de champignons et équilibre le bois à sa future humidité d'utilisation (ce qui permet d'amoindrir les déformations dues à l'équilibre hygroscopique du bois). Cela permet également d'augmenter l'adhésion des colles ainsi que de diminuer le poids du bois et donc aussi son coût de transport[17] [7].

Le séchage n'est cependant pas aussi évident que cela et seul un personnel qualifié est capable de le faire correctement. En effet, qui dit séchage, dit aussi transfert de fluide, contraintes internes, modification de dimension de la pièce et donc apparition de fissures. L'ambiance extérieure de séchage doit donc être minutieusement choisie en fonction de trois paramètres : la température, l'humidité et la pression.

La stratégie la plus courante est la réalisation d'un séchage rapide en fonction de l'essence et de l'exigence finale attendue de la pièce. Si le séchage est trop lent, cette étape deviendra non rentable et pourrait même dégrader le visuel du bois [20]. Si, par contre, le séchage est trop rapide, la surface du bois va sécher, mais le cœur sera lui toujours humide. Il y aura alors dans un premier temps, une apparition de contraintes internes qui vont mener à des fissures. Dans un second temps, le cœur humide va venir ré-humidifier à

9. Il existe d'autre méthode de séchage comme le séchage naturel.

nouveau la pièce et le traitement de séchage aura été presque inutile. Aujourd'hui, il est notamment possible de sécher le bois à l'air libre ou de manière artificielle.

Séchage naturel à l'air libre

Pour ce type de séchage, le bois est simplement entreposé à l'air libre sur une aire de stockage. Les bois sont espacés entre eux afin que l'air puisse circuler. Ce séchage est toutefois irrégulier, difficilement contrôlable, très long et prend beaucoup de place. Avec ce principe, on peut abaisser la teneur en humidité du bois jusqu'aux environs des 15% [17][7].

Séchage artificiel

Les principales méthodes de séchage artificiel dans l'industrie du bois sont les séchages artificiels par air chaud climatisé, par pompe à chaleur ou sous vide(2.10). Les deux premiers systèmes fonctionnent avec des échanges d'air véhiculant l'humidité contenue dans le bois avec l'air chauffé par le système. Pour le système sous-vide, la diminution de pression permet d'accélérer et d'augmenter nettement l'évaporation de l'humidité du bois. Ce système est 2 à 5 fois plus rapide que les deux autres séchoirs artificiels [17] [7].

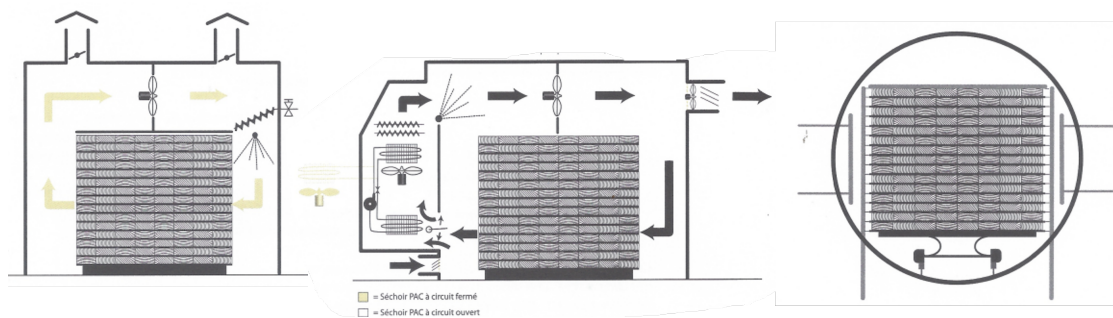


FIGURE 2.10 – De gauche à droite : Séchoir artificiel par air chaud climatisé, séchoir artificiel par pompe à chaleur et séchoir artificiel sous vide [17]

2.6.2 Bois à l'état vert et ré-humidifié

Lorsque l'on met en œuvre un bois qui a été préalablement séché, il est intéressant de comprendre son comportement si celui-ci vient à être ré-humidifié par les conditions extérieures. Plusieurs études ont été menées pour comparer les caractéristiques d'un bois vert avec celles d'un bois qui a été séché puis ré-humidifié.

Comme on peut s'y attendre, le séchage du bois permet d'améliorer ses caractéristiques. Mais le séchage est une opération complexe qui apporte la plupart du temps des déformations irréversibles [27].

Voici les résultats de deux expériences menées sur le sujet [27] [28] :

- pour tout type de séchage, la tendance montre que le module de rupture des échantillons est inférieur après ré-humidification ;
- lorsque le bois est séché naturellement à l'air, on n'observe pas de réelles différences entre un bois à l'état vert et un bois séché/ré-humidifié ;
- le module de Young ne varie pas entre les deux états comparés ;

- un bois ré-humidifié semble obtenir un plus grand taux d'amortissement¹⁰ en comparaison avec son état initial.

2.6.3 Impact du séchage sur les grumes

Le séchage des grumes est un processus assez particulier qui diffère par plusieurs points du séchage de copeaux ou de pièces traditionnelles en scierie. Les grumes, dans le contexte de notre mémoire, sont des éléments de presque 8m de long avec un diamètre médian avoisinant les 35-40 centimètres. Ces éléments sont massifs et imposants. Il est donc difficile de concevoir des fours qui permettront de réaliser un séchage de dizaines de grumes en même temps. La taille des grumes est évidemment à prendre en compte dans le processus. Il a été constaté assez logiquement qu'au plus leur diamètre est grand, au plus le temps de séchage sera long. De même, le temps de séchage est également proportionnel à la longueur de la grume en question [29].

Puisque l'on parle de grumes à l'état vert, il est également intéressant de se pencher sur la question du rôle de l'écorce dans le processus de séchage du bois. Plusieurs études ont été menées pour comprendre dans quelles directions l'eau présente dans le bois se dirigeait lors du traitement, mais aussi pour pointer le rôle de l'écorce dans ce processus [[29][30]]. Il en a été conclu qu'il existe un flux d'humidité dans la direction transversale mais aussi dans la direction longitudinale. L'écorce bloque le transfert d'humidité transversale et va considérablement diminuer la vitesse de séchage de la pièce dans sa globalité.

Il existe actuellement deux écoles dans le choix de la méthode de séchage pour les bois ronds de structure, avec chacune leurs avantages et désavantages. Notons que ces deux méthodes amènent les bois à la même teneur en humidité, seule la manière d'y arriver est différente [31].

La première est la méthode classique du séchoir à l'air libre que nous avons déjà brièvement introduite (section 2.6.1).

Avantages [31] [7]

- Séchage doux et progressif.
- Processus trivial.
- Méthode peu coûteuse.

Désavantages [31] [7]

- Prends énormément de place et de temps (jusqu'à un an de séchage pour certaines essences).
- Formation inévitable de fissures [32] [29].
- Les poches de résines peuvent se liquéfier lors de l'utilisation structurale de la grume si la température devient supérieure à sa condition d'équilibre de séchage.
- La météo reste le facteur le plus déterminant du temps de séchage.

L'autre méthode utilisée couramment est le séchage artificiel au four. Cela permet un séchage nettement plus rapide que la méthode naturelle, mais aussi cela permet de suivre un protocole contrôlé pour chaque espèce.

10. Le taux d'amortissement traduit la capacité de dissipation d'énergie d'un matériau mis en mouvement



FIGURE 2.11 – Séchage naturel à l'air libre [31]

Avantages [31] [7]

- Séchage contrôlé et adapté à chaque essence.
- Processus rapide et par conséquent, nécessite moins de place.
- Permet une meilleure imprégnation des traitements de protection et de coloration.
- Tue les champignons et les insectes.
- Diminue le risque de liquéfaction de la sève lors de l'utilisation de la grume, car la température ambiante ne dépassera jamais la température de séchage (entre 40°C et 100°C).

Désavantages [31] [7]

- Processus complexe qui nécessite donc un personnel qualifié.
- Machinerie chère et imposante.
- Rend le bois moins usinable.
- Le four sèche le bois à une teneur d'humidité entre 6 et 10 %. Cela signifie qu'après séchage, il faut placer les grumes dans une pièce ventilée pour qu'elles récupèrent l'humidité ambiante de manière progressive.
- Cette méthode peut dans certains cas créer des fissures dans le bois en fonction de l'essence, du diamètre et de la teneur en humidité de celui-ci. Une fente de pré-retrait est donc envisageable.

Fente de pré-retrait

Les fissures qui apparaissent lors du séchage du bois sont principalement dues à l'anisotropie du retrait/gonflement du bois. La figure 2.4 nous indiquait que le retrait tangentiel et radial sont les plus importants dans une section de bois. Dans le cas de la section transversale d'une grume, cela signifie que la périphérie tend à se rétrécir de manière plus importante que la partie radiale et donc des fissures apparaissent [33]. Voilà la raison pour laquelle il y a une tendance à réaliser une fente longitudinale de pré-retrait avant l'étape de séchage de la grume.

Cette fente permet de libérer et surtout de concentrer les contraintes que le bois subit [6] (figure 2.12). Grâce à cette méthode, il y a beaucoup moins de fissures aléatoires qui apparaissent sur la grume et cela permet de surveiller, mais aussi de protéger le bois contre les pourritures [34]. Enfin, d'un point de vue de la résistance caractéristique de la section, O. ESPINOZA et al. [35] ont conclu que la fente de pré-retrait réduit très légèrement la résistance en flexion de la pièce mais cela reste négligeable par rapport au bienfait du trait de scie. L'importance de la fente de pré-retrait varie d'une essence à l'autre. Par exemple, celle-ci est très importante chez le douglas afin d'éviter toute fissure traversante.

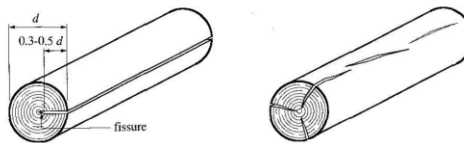


FIGURE 2.12 – Comportement d'une grume avec et sans fente de pré-retrait [3]

2.7 Les défauts et singularités du bois

Il est important de rappeler que le bois est un élément vivant. Cela signifie que sa croissance est influencée par son essence et qu'il porte le matériel génétique de ses prédécesseurs. De plus, sa croissance dépend aussi de tout élément extérieur qui pourrait venir gêner/modifier son bon développement tel que le vent, le soleil, la présence d'autres arbres, l'homme, la foudre, la nature du sol, l'inclinaison du terrain, etc.

Les singularités sont "*des malformations modifiant la structure du bois*". **Les défauts** sont "*des anomalies qui déprécient le bois*" généralement occasionnés par des agents extérieurs [36].

Dans cette section, nous présentons les principaux défauts (section 2.7.1, 2.7.2, 2.7.3 et 2.7.4) et singularités (section 2.7.5, 2.7.6 et 2.7.7) que nous retrouvons sur les grumes belges. Il est essentiel de bien comprendre ces défauts et singularités afin de pouvoir les repérer et les analyser pour suivre les normes de classement visuel belges tel que sur le tableau B [37] et allemandes [38] sur le tableau B.

2.7.1 Les nœuds

Les nœuds (figure 2.13) sont les vestiges de la présence d'une branche. Ils représentent une discontinuité sur les fibres du bois et selon leur nombre, leur taille et leur type ils peuvent fortement impacter le comportement mécanique du bois [6].

Voici la définition des différents types de nœuds¹¹[36] :

- **nœud sain et adhérent** : "*formé par l'inclusion d'une branche vivante, les tissus de la branche sont intimement liés à ceux du tronc*". On observe donc une continuité dans la fibre du bois ;

11. En réalité, il est assez difficile de faire la distinction entre les différents types de nœuds quand on observe une grume.

- **nœud sec, non adhérent (ou mort, noir)** : *"formé par l'inclusion d'une branche morte", il n'y a plus de cohésion cellulaire anatomique entre les éléments du bois ;*
- **nœud pourri, vicieux** : *"formé par l'inclusion d'une branche dont les tissus sont pourris".*



FIGURE 2.13 – De gauche à droite : Nœud adhérent, nœud mort et nœud pourri [6]

2.7.2 Roulure

La roulure (figure 2.14) est le décollement partiel ou total d'au moins deux cernes successifs. Ce défaut peut être dû à un hiver vigoureux ou à des vents importants qui tendent à plier l'arbre dont les cernes sont d'épaisseurs irrégulières [36]. La roulure est un défaut grave et amène souvent à une exclusion de la portion affectée [6].



FIGURE 2.14 – Roulure observée sur une section transversale [36]

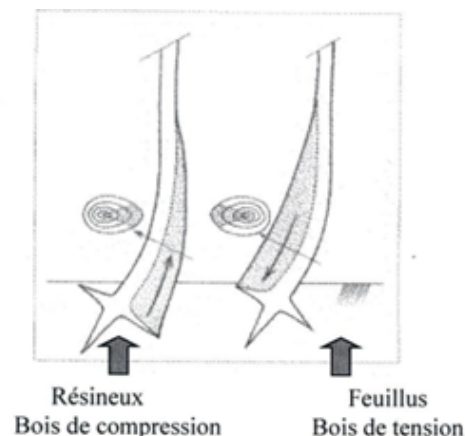
2.7.3 Bois de réaction

"Croissance radiale nettement excentrique produite par les arbres en réaction à une déviation de la tige par rapport à la verticale" [6]. Chez les résineux, on peut retrouver du "bois de compression" et chez les feuillus du "bois de tension" (figure 2.15b). Ce bois est caractérisé par une densité, une dureté et un retrait longitudinal supérieurs à la normale. Chez les résineux, le bois de compression sera caractérisé par une zone plus sombre (figure 2.15a) alors que chez les feuillus, le bois sera plus "pelucheux".

Les propriétés mécaniques de ce bois sont meilleures que celles du bois classique, mais inférieures à celles d'un bois de même densité. Il est à noter que ce bois développe beaucoup de contraintes internes lors de sa croissance et il n'est pas rare qu'il les relâche (fissure ou explose) lors de l'abattage [6].



(a) Section avec du bois de compression [36]



(b) bois de compression et bois de tension [6]

FIGURE 2.15 – Bois de réaction

2.7.4 La pourriture

"Suivant le champignon, les éléments du bois et l'essence concernés, la pourriture peut être blanche, rouge, brune, cubique, fibreuse, bleue, etc. Dans tous les cas, il s'agit d'une altération d'un ou de plusieurs éléments constitutifs du bois (cellulose ou lignine), entraînant une modification profonde de ses propriétés" [36].

Sur des grumes cependant, il n'est vraiment pas évident d'analyser les pourritures car on a uniquement accès à l'extérieur de la grume.

2.7.5 Courbure et défilement

Le défilement est la diminution de la circonférence observée sur le long du tronc. Cela induit des pertes de rendement pour le sciage du bois mais limite aussi la possibilité d'utiliser de grandes portées [36].

La courbure d'un tronc (figure 2.16) est d'origine héréditaire ou provient directement des conditions de croissance de l'arbre (concurrence pour la lumière, vent, neige, relief). Cette singularité a un impact sur la résistance mécanique du bois et réduit également l'utilisation d'un arbre courbe pour des grandes portées linéaires [36] [6].

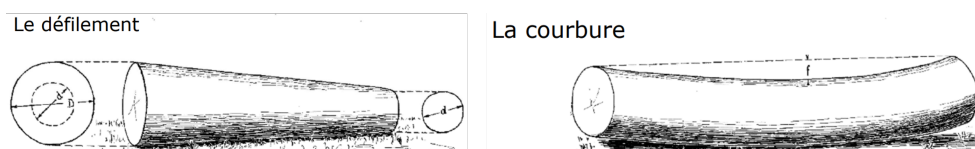


FIGURE 2.16 – Défilement et courbure d'un tronc d'arbre [6]

2.7.6 Méplat et cœur excentré

Un méplat (figure 2.17) correspond à la section transversale d'une grume qui n'a pas un diamètre constant. Cela provient des conditions de croissance de l'arbre et de sa concurrence avec les autres. Cette singularité peut cacher un cœur excentré qui est un défaut grave car cela rend le bois hétérogène au niveau de ses propriétés mécaniques [6][36].

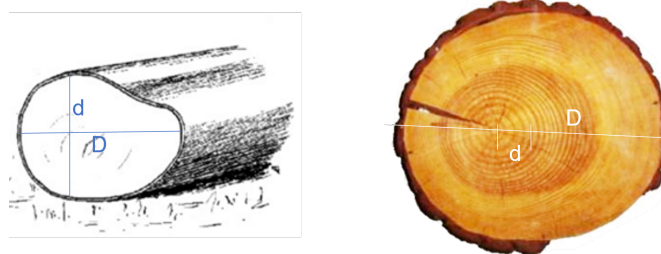


FIGURE 2.17 – Méplat [6] et cœur excentré [39] d'un tronc d'arbre

2.7.7 Fente de cœur et cadranure/cœur étoilé

Une fente de cœur est une fissure qui part de la moelle de l'arbre et qui se dirige transversalement vers la circonférence extérieure. La cadranure (figure 2.18) est le stade avancé des fentes de cœur, c'est un ensemble de fissures qui part dans des directions radiales différentes depuis la moelle. Ces singularités peuvent rendre le bois inutilisable en structure [36].



FIGURE 2.18 – Cadranure ou cœur étoilé d'une section [36]

2.7.8 Autres défauts et singularités

D'autres défauts et singularités sont abordés dans les normes mais ils sont plus rares et nous n'en avons pas rencontré durant nos travaux.

- **Gélivure** : Suite à l'action du gel, des fentes peuvent apparaître sur le tronc. Ce défaut se caractérise par l'apparition de bourrelets de cicatrisation dû à cette attaque [36] (figure 2.19a).
- **Fils tors** : Singularité, qui pourrait avoir une origine héréditaire, qui crée un effet de torsion dans les éléments axiaux du bois. Il rend alors celui-ci difficile à travailler. On le calcule comme un décalage (en cm) de la fibre principale sur un mètre [36] (figure 2.19b).



(a) Gélivure



(b) Fibre torse

FIGURE 2.19 – Autres défauts et singularités [6]

CHAPITRE 3

ESSAIS EN FLEXION SUR GRUMES

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux essais en flexion sur les grumes réalisés pour ce mémoire. Nous y détaillerons tout d'abord les différents objectifs et les attentes concernant ces essais. Nous ferons ensuite un état de l'art afin d'apporter des explications sur le comportement du bois en flexion, sur son approche dans l'Eurocode et sur les différents éléments influençant son comportement. Le protocole et le banc d'essai que nous avons utilisés seront également décrits avec précision, et pour finir, un aperçu du post-traitement et une discussion sur les résultats seront présentés.

Ce chapitre se base principalement sur les travaux de Niclaes J. et Moens C. [2] qui ont déjà proposé un protocole d'essai en flexion pour grume. Notre travail est donc une prolongation de leurs recherches. Les grumes utilisées proviennent d'essences variées. Au total, 10 grumes d'épicéas, 10 de peuplier et 10 de tsugas ont été testées.

3.1 Objectif

Comme évoqué plus haut, notre mémoire est inclus dans un grand projet qui vise à rendre possible et compétitive la construction de bâtiments à l'aide de grumes. Dans une structure de type poteaux/poutres, l'un des efforts principaux est la flexion. Dans cette partie, nous nous intéresserons à cet effort en particulier. Notre objectif est de pouvoir caractériser mécaniquement en flexion les grumes qui seront utilisées dans de futurs ouvrages.

Quelques normes existent déjà afin de classer visuellement les grumes après leur abatage. Nous pouvons citer la DIN 4074 [38] qui donne les clés pour classer esthétiquement les grumes en trois classes. De 1 pour les bois excellents à 3 pour les mauvais bois. Le problème de cette norme est sa tendance à sous-évaluer le potentiel des grumes de manière sécuritaire. On se retrouve alors avec beaucoup de grumes qui sont en classe 3. De plus, toutes les essences de bois sont classées suivant un unique tableau alors que chaque essence a ses particularités.

Cette sous-estimation va avoir un grand impact pour le classement mécanique des grumes car la DIN 1052 [40] fait le lien entre le classement esthétique de la DIN 4074 et la valeur caractéristique des résistances des normes européennes. Comme la plupart des grumes se trouvent en classe 3, celles-ci vont être considérées automatiquement en C16¹ qui est la classe de résistance la plus faible. D'autres normes telles que la EN 1316 [41] et la EN 1927 [37] réalisent un classement esthétique des grumes selon leur essence, mais il n'existe pas de norme qui, comme pour les normes allemandes, fait le lien entre esthétisme et capacité mécanique.

On constate que dans la situation actuelle, les normes ont une forte tendance à sous-évaluer les grumes qui sont particulièrement difficiles à caractériser uniquement selon leur aspect visuel. La complexité de l'anatomie du bois ainsi que son comportement avec l'atmosphère ambiante jouent un grand rôle sur ses caractéristiques mécaniques. Par contre, lorsque l'on utilise des chevrons, il est plus facile de réaliser un classement visuel précis et correct car les défauts y sont bien plus visibles que sur une grume.

De manière générale, la détermination de la résistance des éléments de structure va être décrite par la **résistance caractéristique**. Cette valeur provient d'une grande campagne d'essai et représente une valeur telle que 95% des échantillons ont une résistance supérieure à cette valeur caractéristique. Pour l'acier et le béton, cela est cohérent car la disparité des résultats est assez faible, contrairement au bois qui possède une très grande variation dans les résistances [3]. Notre objectif est donc aussi de s'éloigner de l'emploi de cette valeur caractéristique afin d'utiliser au mieux chaque grume.

Comme expliqué dans le mémoire de J. NICLAES et C. MOENS [2], une approche au "cas par cas" sera plus efficace car cela permet de ne plus être impactés par la sous-estimation de la résistance due à la grande diversité qui peut exister. Cependant, cela signifie que le protocole utilisé devra être rapide et peu coûteux afin qu'il puisse être réalisé à grande échelle.

1. Classe de résistance d'un résineux possédant une résistance caractéristique à la flexion de 16 [MPa]

Cette approche est déjà utilisée de manière industrielle en Nouvelle-Zélande sur des pins radiata[42]. Dans leur cas, chaque grume est testée selon sa densité et approuvée par un certificat d'essai selon la norme néo-Zélandaise [43]. Cette méthode permet d'avoir une classification simple en ne considérant qu'une seule essence bien connue sur place. Notre objectif est donc de créer un protocole similaire mais adapté pour les essences de nos régions.

3.2 État de l'art

3.2.1 Comportement du bois en flexion

Le comportement du bois en flexion est bien connu. La difficulté réside dans la grande différence qui peut exister entre les essences mais aussi entre les individus d'une même essence. Dans notre cas, nous allons nous intéresser aux efforts de flexion à court-terme². La contrainte de flexion intègre à la fois des contraintes de compression, de traction mais aussi de cisaillement. Contrairement à l'acier, le bois n'a pas le même comportement en traction et en compression. Comme représenté sur la figure 3.1 et déjà précisé dans la section 2.5.2, sa résistance est plus grande en traction mais son comportement est alors fragile tandis qu'en compression, celui-ci est ductile. Ce comportement est correct pour des éprouvettes sans défauts et ayant un fil droit, mais en réalité dès que des défauts sont présents, nous considérons que la compression est meilleure que la traction.

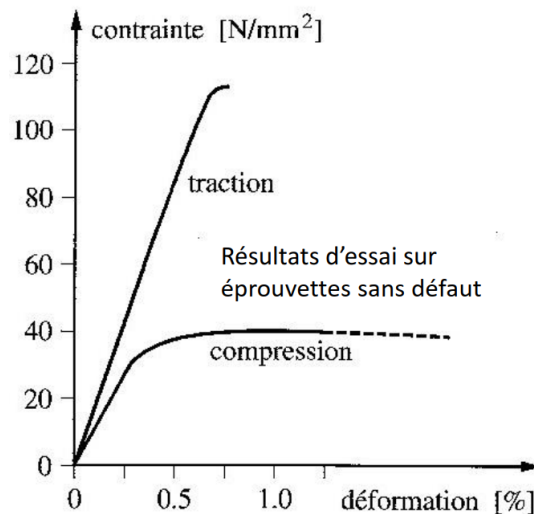


FIGURE 3.1 – Comportement du bois en traction et en compression [3]

Cette différence de comportement va avoir un réel impact sur la réaction du bois en flexion. En effet, la figure 3.2 indique l'évolution des contraintes dans le bois jusqu'à la rupture. Pour un faible chargement, les fibres supérieures et inférieures sont respectivement en compression et en traction élastique. Dès que le chargement augmente, la compression va progressivement rentrer en plasticité tandis que la traction augmente tout en restant en élasticité. Afin de garantir un équilibre des efforts, la fibre neutre va progressivement descendre.

2. Dans la suite, nous parlerons de comportement long-terme, mais celui-ci sera directement issu des normes et non d'une étude de notre part.

La rupture arrivera alors quand la fibre inférieure aura dépassé sa résistance à la traction car elle ne pourra pas se déformer de manière plastique. De manière générale, la rupture en flexion du bois se fera toujours sur la fibre tendue.

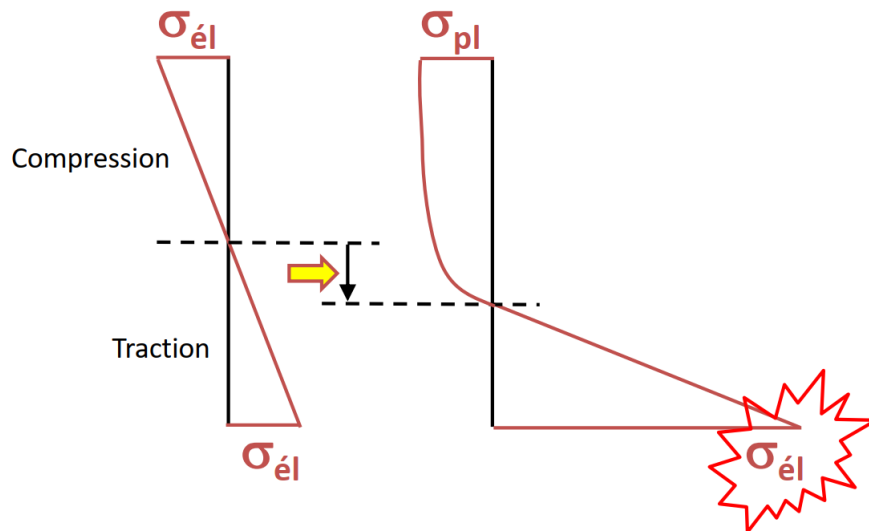


FIGURE 3.2 – Comportement à la rupture du bois [3]

Ici, nous présentons uniquement le comportement du bois au court terme. En réalité, la rupture du bois peut également se produire sur le long terme, mais cette partie est d'avantage traitée dans le chapitre 4.

Évidemment, les défauts vont avoir une influence majeure dans le comportement du bois mais aussi dans sa valeur de rupture. Pour les bois équarris, un classement visuel est réalisé en scierie afin d'observer tous les défauts qui pourraient nuire à la résistance mécanique du bois. Cela est discuté plus en détail à la section 2.7.

3.2.2 Flexion quatre points

Pour tester des éléments en flexion, les méthodes les plus couramment utilisées sont les flexions dites "trois points" ou "quatre points". Le nombre de points indique simplement le nombre d'appuis présents sur la face inférieure et supérieure de l'élément.

La figure 3.3 nous montre un comparatif des efforts internes dans une poutre testée en flexion trois et quatre points. L'un des principaux avantages de la flexion quatre points réside dans le fait qu'en travée centrale, nous pouvons y observer de la flexion pure. Grâce au chargement symétrique appliqué, l'effort tranchant s'annule entre les deux appuis. Le second avantage de cette méthode est l'emplacement des appuis de chargement. Cette disposition permet de ne pas placer l'appui à l'endroit où la rupture est attendue, c'est-à-dire en travée centrale ($\approx \frac{L}{2}$). Une disposition telle qu'une flexion trois points pourrait engendrer des dégâts à l'éprouvette ou une rupture anticipée de celle-ci. Les résultats peuvent donc être fortement impactés.

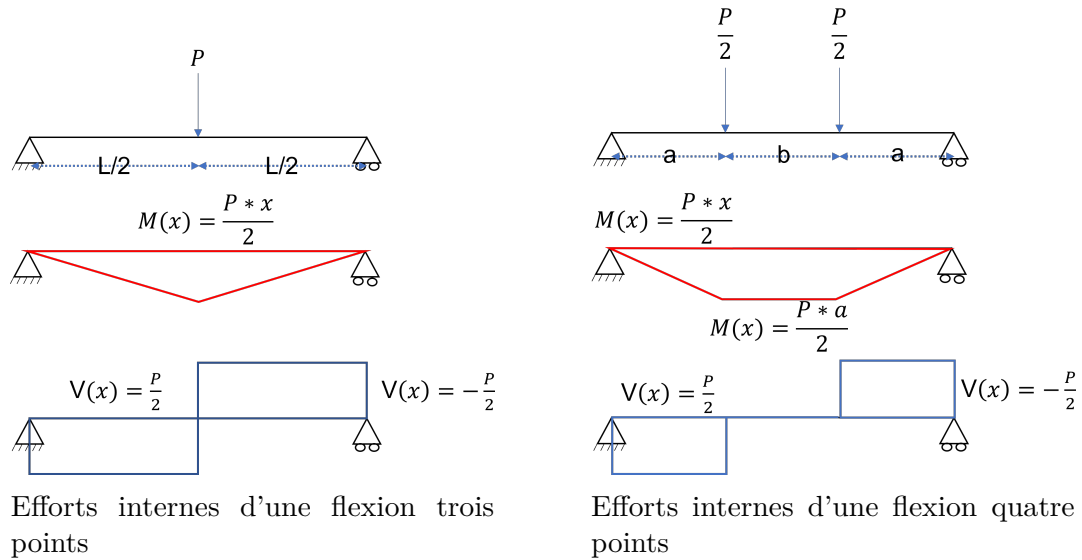


FIGURE 3.3 – Comparaison des efforts internes des deux méthodes

La formule la plus importante à retenir est celle de la flèche maximale attendue en $\frac{L}{2}$. La démonstration de cette formule est disponible en annexe A.

$$\delta_m = \frac{a \cdot P}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{a^2}{3} + \frac{b^2}{8} + \frac{a \cdot b}{2} \right) \quad (3.1)$$

Avec

a = La distance entre l'appui et le point d'application de la charge en $[mm]$.

b = La longueur de la travée centrale en $[mm]$.

E = Le module de Young en $[MPa]$.

I = L'inertie de flexion de la section testée en $[mm^4]$

3.2.3 Calcul des éléments de bois

En Belgique, l'ouvrage de référence pour le dimensionnement du bois est l'Eurocode 5 [1]. Ce document est utilisé pour les structures en bois équarris, il nous est donc utile pour comprendre les éléments qui interviennent dans le calcul de la résistance des ouvrages en bois. Comme décrit plus haut, nous nous intéressons ici uniquement à la flexion dans ce chapitre.

Lors d'un dimensionnement, deux critères sont à observer :

- la résistance de l'élément. Nous parlons alors de son état limite ultime (ELU) ;
- sa capacité à générer une déformation acceptable suite à l'augmentation d'une charge. Nous parlons alors de son état limite de service (ELS).

La norme indique la manière de prendre en compte ces deux éléments.

Etat limite Ultime (ELU)

Si nous partons du cas simple d'une poutre rectangulaire $B \times H$ à inertie constante et chargée perpendiculairement aux fibres, l'Eurocode nous indique que l'équation³ à utiliser est la suivante :

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (3.2)$$

où $\sigma_{m,d}$ et $f_{m,d}$ font respectivement référence aux contraintes et à la résistance de flexion de design (voir section 2.5.2). Ces deux expressions peuvent être chacune décrite comme :

$$\sigma_{m,d} = \frac{My}{I} = \frac{6M}{BH^2} \quad (3.3)$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \quad (3.4)$$

avec

M = Moment de flexion [MPa]

I = Inertie de la poutre [m^4]

y = Distance du bras de levier [m]

$f_{m,k}$ = Valeur caractéristique de résistance à la flexion fournie au tableau 2.3 [MPa]

k_{mod} = Le facteur de modification

γ_m = Le facteur partiel des propriétés du matériaux

Il y a donc deux paramètres qui vont varier selon le projet :

- γ_m : Dépend uniquement du type de bois utilisé. Pour du bois massif, sa valeur est de 1.3 ;
- k_{mod} : Coefficient prenant en compte la durée de la charge la plus courte mais aussi de la classe de service. Ses valeurs sont données dans la table de la figure 3.4.

Les classes de services représentent l'humidité globale dans laquelle évolue le bois. En effet, l'humidité a un réel impact sur la résistance du bois, tout ceci est discuté à la section 2.2

Classe de durée de charge	Durée de la charge	Exemple	Coefficient k_{mod} associé		
			Classe de service 1	Classe de service 2	Classe de service 3
Permanente	>10 ans	Poids propre	0,6	0,6	0,5
Long terme	6 mois → 10 ans	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme	1 semaine → 6 mois	Charges d'exploitation, neige	0,8	0,8	0,65
Court terme	<1 semaine	vent	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Instantanée	action accidentelle	1,1	1,1	0,9

FIGURE 3.4 – Valeur de K_{mod} définie dans l'Eurocode 5

3. Nous faisons référence ici à l'équation 6.11 et 6.12 de l'Eurocode 5

État limite de service (ELS)

L'état limite de service (ELS) observe les déformations de l'ouvrage en cours de service afin de garantir un sentiment de confort et de sécurité aux utilisateurs. Pour cela, il faut estimer la flèche maximale qui sera observée sur l'élément. Dans ce mémoire, nous allons uniquement nous intéresser à une flexion dite "quatre points". L'expression de sa flèche et sa démonstration se trouve à la section 3.2.2. Dans un projet, cette flèche sera observée pour un chargement court et long-terme. L'Eurocode 5 [1] impose la flèche maximale instantanée w_{inst} , la flèche maximale long terme $w_{net,fin}$ et la flèche finale w_{fin} prenant en compte une pré-courbure possible de la poutre tel que présenté sur la figure 3.5. Le tableau 3.1 résume ces exigences.

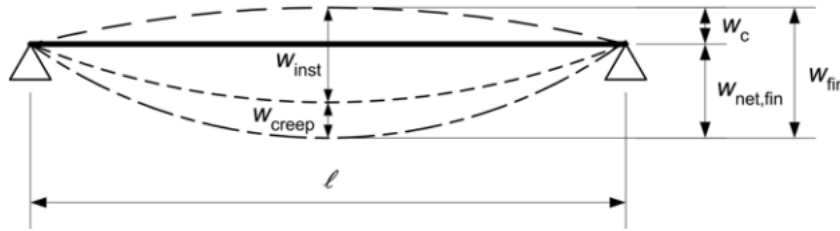


FIGURE 3.5 – Composant d'une flèche de poutre [1]

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Poutre sur deux supports	1/300 à 1/500	1/250 à 1/350	1/150 à 1/300

TABLE 3.1 – Limite de flèche maximale d'une poutre [1]

Pour chacun de ces dimensionnements, plusieurs cas de charge sont alors pris en compte. Nous en distinguons 3 :

- Combinaison ELU : $C_{ELU} = 1.35 \sum_j G_j + 1.5(Q_{dom} + \sum_{i \geq 2} \psi_{0,i} Q_i)$
- Combinaison ELS court-terme : $C_{ELS,CT} = \sum_j G_j + (Q_{dom} + \sum_{i \geq 2} \psi_{0,i} Q_i)$
- Combinaison ELS long-terme : $C_{ELS,LT} = (1 + k_{def}) \sum_j G_j + (Q_{dom} + \sum_{i \geq 2} \psi_{0,i} Q_i) + k_{def} \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_i$

Avec G , Q et ψ , les charges permanente, variable et les coefficients de pondérations définis dans l'Eurocode.

Comme précisé ci-dessus, la résistance d'un élément de bois en flexion est définie grâce à $f_{m,k}$, sa résistance caractéristique en flexion. Celle-ci peut être définie comme la résistance dont un élément à 5% de probabilité d'y être inférieure. Un tableau reprenant ces valeurs pour les résineux et les feuillus se trouve dans l'Eurocode (voir figure 2.3).

3.2.4 Test mécanique non destructif

Dans cette section, nous passons en revue la littérature scientifique concernant les protocoles de classification mécanique et de *proof-testing*⁴ qui sont utilisés en scierie pour classer des bois équarris et des grumes.

4. Méthode de contrôle de la résistance d'un élément en lui faisant passer un essai mécanique.

Dans le chapitre 2 nous avons mis en évidence le caractère singulier du bois. Il est presque impossible de retrouver deux bois équarris possédant exactement les mêmes caractéristiques mécaniques. Si deux échantillons proviennent du même arbre, toute singularité telle qu'un nœud ou du bois de compression créera une différence de comportement.

C'est pourquoi nous considérons qu'un classement non-destructif doit être établi avant de placer un bois dans une structure portante.

ROSS R. J. et al. [44] mettent en évidence dans leur article quatre manières de classer un bois sans le détruire :

- **classement visuel** : permet de mettre en évidence les défauts et singularités ;
- **tests chimiques** : donne des informations sur les causes et/ou mécanismes de détérioration ;
- **tests physiques** : toutes les méthodes qui utilisent la propagation d'onde, la vibration, les rayons X ou autres pour déterminer les caractéristiques du bois. Ces méthodes "IET"⁵ sont discutés dans les sections 3.3.2 ;
- **tests mécaniques** : via un *proof-loading* en flexion/compression/traction ou en réalisant une analyse de la résistance à la flexion.

La classification MSR

Sur le continent américain, une méthode très répandue pour classer le bois équarri est le "Machine-stress-rated" (MSR) qui s'inscrit dans la catégorie des tests mécaniques non destructifs. Ce dispositif a été créé dans les années 60 [45] et permet de manière automatique de déterminer le module élastique (MOE) d'une planche ainsi que de réaliser un tri visuel, lui aussi automatique. La MSR permet donc de garantir les performances mécaniques d'une planche une fois le processus achevé.

Le MOE est déduit de manière continue en observant la résistance à la flexion de la section (figure 3.6). Ce test est réalisé sur l'inertie la plus faible et le module de Young considéré sera la plus petite valeur observée au cours du test [45]. Ensuite, une inspection visuelle est réalisée via un ordinateur pour repérer les singularités et les défauts du bois tel que des fentes, des nœuds, de la pourriture ou encore de la décoloration [44].

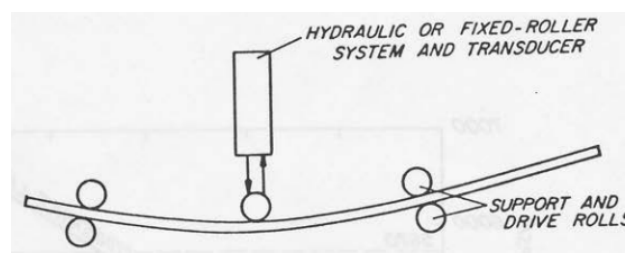


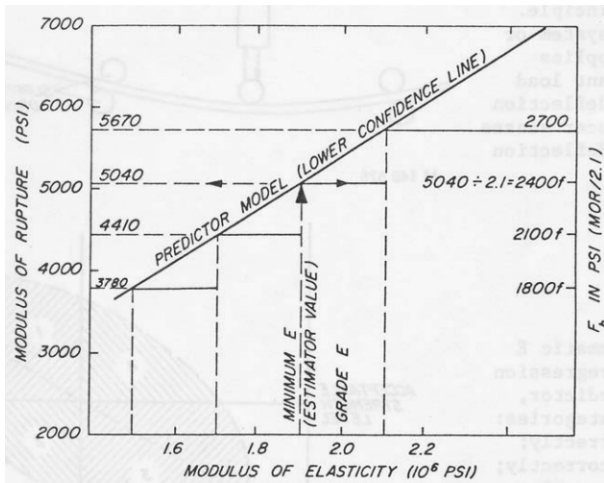
FIGURE 3.6 – Illustration du principe d'une machine MSR [45]

Le Canada et les États-Unis ont réalisé une gradation des performances des éléments testés pour accompagner le test MSR. Cette gradation dépend du module de Young et de la contrainte admissible en flexion (F_b). F_b est déduit du module de rupture (MOR) via un coefficient de "2.1" qui prend en compte un coefficient de sécurité et l'influence d'une

5. Impulse Excitation Technique

charge long-terme. Le MOR est quant à lui déduit du MOE minimum de la section via une relation qui prend le percentile 5 du MOR. Cette méthodologie est résumée sur la figure 3.7a.

Une fois la classification terminée, chaque élément reçoit un tampon indiquant la catégorie à laquelle il appartient. Le tableau des gradations est présenté à la figure 3.7b. Pour exemple, la catégorie "2100f-1,8E" signifie que le matériau possède un module de Young de $1.8 \cdot 10^6$ [psi]⁶ ($\simeq 12410$ [MPa]) et une résistance en flexion de 2100 [psi] ($\simeq 14,480$ [MPa]).



(a) Corrélation entre le MOE, MOR et F_b [45]

Grade	Bending (F_b) (psi)	MOE (E) (million psi)	Tension (F_t) (psi)	Compression (F_c) (psi)
1200-1.2E	1200	1.2	600	1400
1350f-1.3E	1350	1.3	750	1600
1400f-1.2E	1400	1.2	800	1600
1500f-1.3E	1500	1.3	900	1650
1500f-1.4E		1.4		
1600f-1.4E	1600	1.4	950	1675
1650f-1.4E	1650	1.4	1020	1700
1650f-1.5E		1.5		
1800f-1.5E	1800(2)	1.5	1300	1750
1800f-1.6E	1800	1.6	1175	1750
1950f-1.5E	1950	1.5	1375	1800
1950f-1.7E		1.7		
2000f-1.6E	2000	1.6	1300	1825
2100f-1.8E	2100	1.8	1575	1875
2250f-1.6E	2250	1.6	1750	1925
2250f-1.9E		1.9		
2400f-1.7E	2400	1.7	1925	1975
2400f-1.8E		1.8		
2400f-2.0E		2.0		
2550f-2.1E	2550	2.1	2050	2025
2700f-2.2E	2700	2.2	2150	2100
2850f-2.3E	2850	2.3	2300	2150
3000f-2.4E	3000	2.4	2400	2200
3150f-2.5E	3150	2.5	2500	2250
3300f-2.6E	3300	2.6	2650	2325

(b) Grade MSR du pin du sud[46]

FIGURE 3.7 – Détermination des caractéristiques par la méthode MSR et gradation qui s'en suit

Le *proof-loading* test

L'objectif de cette méthode est d'éliminer les grumes les plus faibles via un test mécanique non destructif. Dans la littérature, il y est défini deux types de tests expérimentaux[47] :

- **simple proof loadind (SPL)** : test en flexion sur une arête choisie au hasard ;
- **reverse proof loading (RPL)** : tests de flexion en séquence sur chacune des facettes.

L. A. MARIN et F. E. WOESTE [48] ont mené une étude sur la caractérisation mécanique de bois à l'aide d'une méthode RPL. Pour ce faire, ils ont réalisé 200 tests en flexion trois points sur du Pin du sud et ont imposé un niveau de charge équivalent au percentile 5 de la résistance à la flexion des éléments. Deux cents autres pièces ont été menées à la rupture en flexion pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec le RPL.

6. psi : "Pounds per square inch", 1 psi $\simeq 0,0069$ [MPa]

En conclusion de leur travail, ils ont démontré qu'un échantillon qui a subi un RPL possède une marge de 27 % sur son MOR par rapport à un échantillon non testé. Cela signifie que l'élément testé peut subir une perte de 27 % sur son MOR et toujours conserver le même coefficient de sécurité qu'un échantillon non testé classique.

B. MADSEN [49] a également réalisé un travail de recherche sur différents programmes de chargement. Il s'est notamment intéressé à l'influence de l'orientation de la force du test et des dégâts que cela peut créer au bois. Il en a conclu que si la charge de test et la charge finale de rupture ont la même orientation, aucun dégât ne peut être attribué au proof-testing. Cependant, si les deux forces ont des directions opposées, des dégâts ont été rapportés. Nous pouvons émettre ici une première réflexion sur le cas des grumes. Celles-ci ne sont pas symétriques et les nœuds présents en surface rendent difficile une possible interprétation du comportement d'une face qui n'a pas été testée.

Quelques années plus tard, les mêmes auteurs accompagnés de D.W. GREEN et K. A. TARBELL [47] ont mené de nouvelles campagnes de tests sur du Pin du sud. Ils ont comparé les bienfaits du SPL et du RPL avec un chargement en flexion quatre points au percentile 5 de la résistance à la flexion. Malgré ce chargement conservateur, ils ont observé plus de 5% de rupture. La raison est celle évoquée plus tôt : la répartition des nœuds a impacté le comportement du matériau lorsque la force n'était plus la même que lors des tests.

Finalement, les auteurs sont arrivés aux résultats suivants :

- pour des tests RPL, la probabilité de rupture est diminuée de 20% par rapport à des échantillons non testés ;
- pour des tests SPL, la probabilité de rupture est diminuée de 2% par rapport à des échantillons non testés ;
- ils ont observé une marge de 33% par rapport à la résistance à la flexion des échantillons pour un même coefficient de sécurité ;
- aucun dommage notable provenant des proof-loading n'est apparu lorsque les éléments ayant réussi le test ont été menés à la rupture.

Rattlesnake Creek Bridge Dans le cadre d'un projet de construction d'une passerelle, le *Rattlesnake Creek Bridge* au Montana, des grumes de 15 centimètres de diamètres ont été testées et gradées mécaniquement [50]. Cette étude est particulièrement intéressante pour comprendre le processus qui peut être suivi dans un projet réel. Avant de tester les rondins, un classement visuel est réalisé selon la norme américaine ASTM D3957 telle que présentée sur la figure 3.8. Ce classement permet de classer le bois dans différentes catégories auxquelles certaines propriétés mécaniques ont été attribuées.

Sur 292 grumes, 56 d'entre elles ont été exclues en majorité à cause d'une taille de nœud trop importante. Pour poursuivre leur investigation, ils ont déterminé le module élastique via une méthode de vibration transversale nommé " E_{tv} ". Ensuite, grâce à une grande base de données sur l'essence, des corrélations ont été définies pour déterminer le MOE. De la même façon que les méthodes MSR précédemment présentées, les auteurs classent les grumes dans certaines catégories de résistances en fonction de MOE et de F_b [50][51]. Enfin, avec le MOE maintenant déduit, il a été possible d'en déduire le MOR de chaque grume.

Grade ^b	Maximum knot size (in. diameter)	Maximum slope of grain	Allowable properties ^c		
			F_b	E	F_c
Unawn	1/2	1:15	1,500	1.1	775
No. 1	1/3	1:14	1,250	1.1	625
No. 2	1/2	1:10	1,050	1.1	525
No. 3	3/4	1:6	600	0.9	300

^aTP (1995). Rules apply to all diameters.

^bOther limits on grade characteristics are given in TP (1995).

^c F_b , fifth percentile MOR/2.1 (lb/in²); E , mean MOE (10⁶ lb/in²).

FIGURE 3.8 – Classement visuel selon la norme ASTM D3957 [50]

Les résultats des essais qu'ils ont réalisés sont présentés à la figure 3.9. Nous y remarquons le caractère très conservateur du classement visuel. Le protocole mécanique permet donc de fournir une attribution des propriétés mécaniques beaucoup plus efficacement que le classement visuel [50] [51].

Potential design values for lodgepole pine logs

Mechanical grade	Number of logs	Option 1 ^{a,b}				Option 2 ^{a,b}			
		F_b (lb/in ²)	F_t (lb/in ²)	$F_{c\parallel}$ (lb/in ²)	MOE (×10 ⁶ lb/in ²)	F_b (lb/in ²)	F_t (lb/in ²)	$F_{c\parallel}$ (lb/in ²)	MOE (×10 ⁶ lb/in ²)
1.9E	26	2,600	1,150	975	1.9	3,550	1,600	1,150	1.9
1.8E	49	2,500	1,150	975	1.8	3,350	1,500	1,100	1.8
1.7E	88	2,450	1,100	950	1.7	3,150	1,400	1,100	1.7
1.6E	147	2,350	1,050	950	1.6	2,950	1,350	1,050	1.6
1.5E	196	2,250	1,000	925	1.5	2,750	1,250	1,000	1.5
1.4E	215	2,150	950	900	1.4	2,550	1,150	1,000	1.4
1.3E	232	2,050	925	900	1.3	2,350	1,050	950	1.3
1.2E	233	1,950	875	875	1.2	2,150	975	900	1.2
1.1E	235	1,900	850	850	1.1	1,950	875	875	1.1
Original visual grades									
No. 1	188	1,250	675	625	1.1	1,250	675	625	1.1
No. 2	21	1,050	575	525	1.1	1,050	575	525	1.1
No. 3	27	600	325	300	0.9	600	325	300	0.9
Cull	56	—	—	—	—	—	—	—	—

^aOption 1 is based only on data for ponderosa pine, and option 2 is based on the combined ponderosa pine and Douglas-fir data.

^b $F_v = 95$ lb/in² and $F_{c\perp} = 395$ lb/in² for all grades (Log Home Grading Rules (including supplements 1–5). 1995. Timber Products Inspection, Inc., Conyers, Georgia).

FIGURE 3.9 – Résultats de caractérisations de grumes menés par D. W. GREEN et al. [50]

TTTested TTT Products est une industrie basée en Nouvelle-Zélande qui exécute des essais de *proof-testing* en flexion sur grumes de pin radiata à l'état vert afin d'en vérifier les capacités mécaniques. En fonction de la densité des grumes (normale ou haute), ils réalisent des essais de flexion 3 ou 4 points comme présentés dans la norme NZS3605-2001[52]. Cette classification selon la densité est issue de la norme NZS3603-1993[43] et donne les valeurs caractéristiques (figure 3.10).

Property	ND	HD	Unit
Bending strength (f'_b)	38	52	MPa
Tension parallel to grain (f'_t)	23	31	MPa
Shear strength (f'_s)	3.1	3.5	MPa
Compression parallel to grain (f'_c)	16	25	MPa
Elastic modulus (mean E)	8.7	12.1	GPa

FIGURE 3.10 – Tableau issu de la norme NZS3603-1993 donnant les valeurs caractéristiques de grumes classées en *Normal* ou *High density*[42]

Leur banc d'essai consiste en deux appuis extérieurs espacés de 3 à 18m et de deux vérins centraux pouvant se déplacer horizontalement. Cette disposition à l'avantage de faciliter la mise en place car il n'y a pas besoin de portique pour les vérins. Elle offre aussi une grande variabilité quant aux types d'essais possibles. En effet, ils peuvent réaliser 3 types d'essais comme illustré sur la figure 3.11.

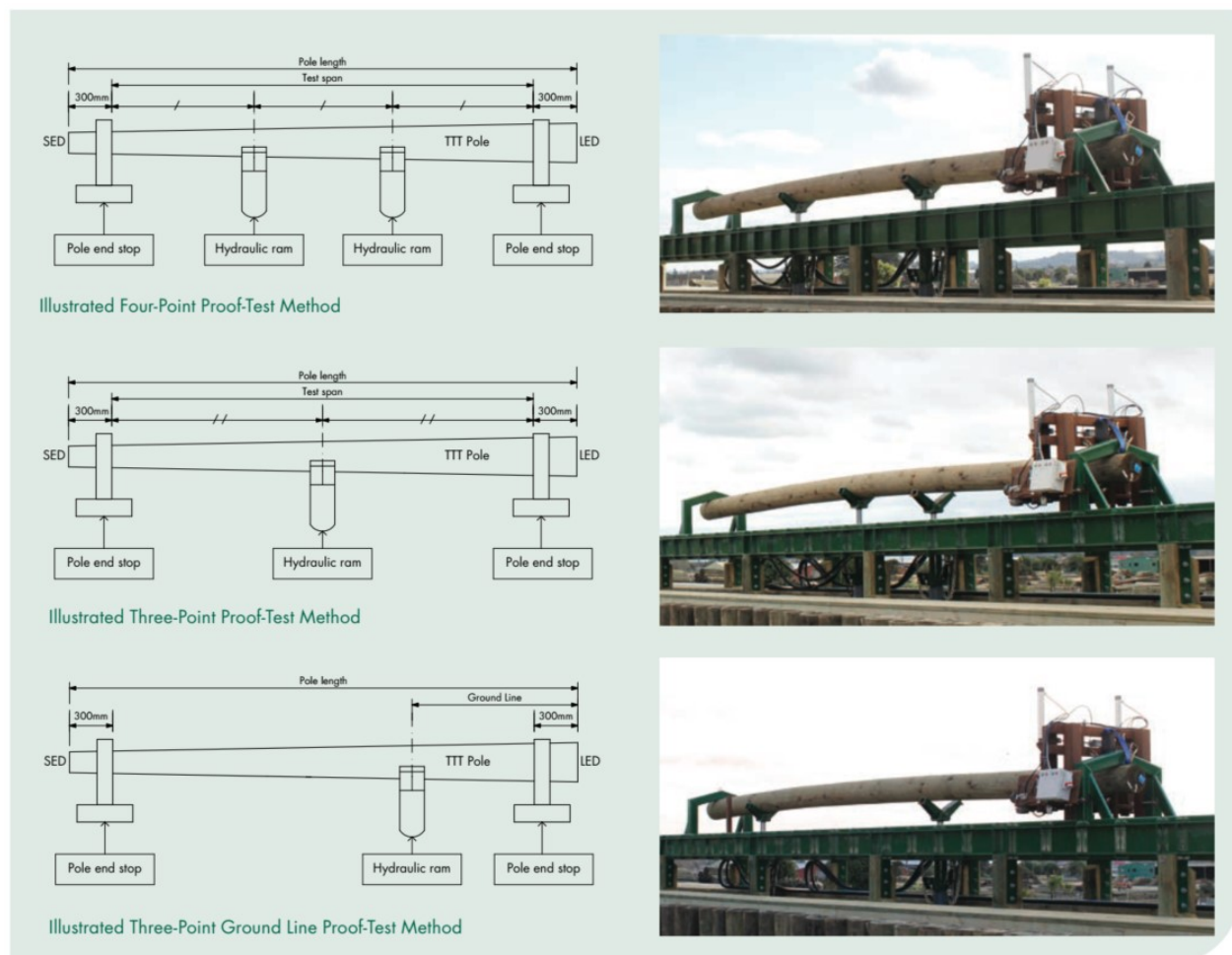


FIGURE 3.11 – L'ensemble des tests proposés par l'entreprise TTT Product.

Leur but est d'atteindre une résistance de 52 ou 38 [MPa] selon la densité afin d'observer ou non l'apparition d'un signe de faiblesse sur la grume. Malheureusement, il n'y a aucune mention sur la manière dont ils définissent un signe de faiblesse. La charge est appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique et le temps de chargement ciblé est de 3 minutes 30 secondes. Lorsque la valeur caractéristique est atteinte, ils maintiennent le chargement durant 15 secondes.

À la fin de ce test, un certificat est délivré pour chaque grume reprenant les informations essentielles telles que la force ultime [kN], la *Ground Line* et d'autre information concernant le forage et le marquage[42]. Cette méthode à l'avantage d'être rapide et simple à comprendre. Cependant, nous pouvons considérer que cette classification selon les normes ne définira pas le plein potentiel d'une grume et que l'essai est limité à une seule essence.

3.2.5 Défauts et normes

Nous avons déjà pu énumérer les différentes méthodes de caractérisation d'un bois de manière non destructive dans la section 3.2.4. En scierie et en forêt, c'est le classement visuel qui est le plus communément utilisé.

Plusieurs normes y font référence et quatre ont été utilisées dans ce mémoire.

- La DIN4074 [38] est une norme allemande qui nous permet de classer esthétiquement les grumes.
- La DIN1052 [40] est une norme allemande qui utilise la DIN4074 afin de faire un lien entre classement esthétique et classement mécanique.
- La EN1316 [41] est une norme européenne qui permet de réaliser un classement esthétique des bois feuillus.
- La EN1927 [37] est une norme européenne qui permet de réaliser un classement esthétique des bois résineux.

La DIN4074 nous propose le tableau B.4 disponible en annexe B. Ce tableau permet de classer esthétiquement une grume une fois abattue. Ici, il n'y a pas de différence selon les essences et le tableau est valable pour les feuillus et les résineux. Cette simplicité peut paraître comme une lacune, mais c'est aussi ce qui en fait sa force. Une fois connu, ce tableau est très simple d'utilisation et permet de rapidement classer une grume.

Cette norme classe les grumes en 3 niveaux allant de 1 à 3.

- Classe 1 : grumes avec une capacité portante particulièrement élevée ;
- Classe 2 : grumes avec une capacité portante normale ;
- Classe 3 : grumes avec une capacité portante faible.

La DIN1052 quant à elle, nous fournit le tableau 3.2 qui permet de faire le lien entre le classement visuel esthétique réalisé par la DIN4074 et les valeurs caractéristiques connues de l'Eurocode. Le tableau 3.2 en est un résumé mais sa version complète se trouve en annexe B.

Ce tableau nous indique donc les équivalences suivantes :

- classe allemande 1 $\iff$ Classe de résistance européenne C16 ;
- classe allemande 2 $\iff$ Classe de résistance européenne C24 ;
- classe allemande 3 $\iff$ Classe de résistance européenne C30.

Les EN1316 et EN1927 possèdent quant à elles de nombreux tableaux qui peuvent nous intéresser. Contrairement aux normes allemandes, chaque essence possède son propre classement et une différence est faite entre bois abattu et bois sur pied. Cependant, son utilisation est la même : selon les défauts et ses singularités la grume aura une note de A à C (ou D selon les essences). L'avantage ici est que chaque élément du tableau est dépendant de l'essence étudiée. Cela permet ainsi un meilleur classement des bois. L'ensemble des tableaux que nous avons utilisés se trouve dans l'annexe B.

Cette norme définit ainsi 4 classes [36] :

- classe A : qualité exceptionnelle ;
- classe B : belle qualité ;
- classe C : qualité courante ;
- classe D : toutes les autres grumes.

Dans le cas du peuplier, il n'y a que 3 classes. Pour cette essence, nous ne considérons pas la catégorie de "belle qualité", elle est soit exceptionnelle, de qualité courante ou autre. De manière générale, une classe C européenne correspond à une classe 3 allemande⁷. Ces normes se basent sur des éléments directement observables tels que le nombre de nœuds, mais elles se basent aussi sur des éléments qui doivent être calculés.

- Le défilement qui représente la conicité de l'arbre et peut être définie comme la différence entre le grand et petit diamètre divisée par la longueur de la grume $(D - d)/L$.
- La courbure peut être calculée comme la déflexion naturelle de l'élément sur sa longueur totale $d/L(cm/m)$.
- Le méplat peut être quantifié comme $((D - d) * 100)/D$ où D représente le grand diamètre et d le petit diamètre.

Tous les défauts cités dans la norme sont présentés à la section 2.7.

Type de bois	Origine	Référence selon la DIN4074	Classement de la DIN	Classe de résistance
Epicéa et sapin	CNE-Europe	22 et 1	III	C16
Pin et mélèze	CNE-Europe	47 et 15	II	C24
Douglas et pin du sud	Allemagne et USA	54 et 35, 36, 43, 48	I	C30
Cigue de l'ouest	USA et Canada	62	C35M	C35
Cèdre jaune	USA et Canada		C40M	C40

TABLE 3.2 – Tableau résumé issu de la DIN 1052

7. Sauf pour le peuplier qui correspond à une classe B

3.3 Description du protocole

Avant de parler du protocole, il est important de discuter du travail qui a été réalisé en amont. En effet, avant de faire passer nos grumes sur le banc d'essai, il nous a d'abord fallu les classer visuellement et les prendre en photo⁸. Cela a pour objectif de faire le lien entre les valeurs obtenues dans le commerce pour des bois de cette qualité et nos résultats. Cela nous permet également d'en garder une trace.

De plus, comme décrit dans l'introduction (section 1.1.3), notre mémoire est jumelé avec celui de V. HOUBEN[10] qui réalise une étude sur la caractérisation mécanique non destructive des grumes à l'aide du GrindoSonic. Le Grindosonic est un appareil permettant de caractériser un matériau en analysant sa réponse vibratoire à un impact. Son fonctionnement est expliqué par la suite (section 3.3.2). Lors de nos essais, nous avons donc utilisé le Grindosonic afin de vérifier si la grume avait été endommagée par notre essai mécanique.

Pour rappel, le protocole présenté ici n'est pas celui qui sera appliqué en industrie. Nous analysons les éléments qui pourraient être décisifs quant aux critères de déclassement d'une grume et nous faisons le parallèle avec d'autres méthodes existantes. Plus loin, nous indiquerons les améliorations et modifications qui pourraient être apportées au protocole afin de le rendre plus simple, moins coûteux et plus rapide.

3.3.1 Classement visuel

Comme décrit dans la section 3.2.5 de l'état de l'art, il existe des normes permettant de faire un classement visuel des grumes. Pour chaque grume, nous avons effectué un classement visuel suivant la norme allemande [38] et les normes européennes [41][37]. Il est important de garder en mémoire que la croissance d'un arbre est fortement influencée par son environnement.

Ainsi, un épicéa qui pousse en Allemagne ne sera pas le même qu'un arbre qui pousse en Belgique. Nous faisons ici l'hypothèse que ceux-ci sont suffisamment identiques afin de pouvoir comparer les normes entre elles. Ces normes nous ont permis d'établir le tableau 3.3 et de comparer les valeurs obtenues selon les normes.

Ce tableau nous intéresse, car il donne une première estimation de la qualité des grumes avant essais. Pour rappel, une grume "ordinaire" correspond à une classe européenne C (et B en particulier pour les peupliers) et une classe allemande 2.

Ici, plusieurs éléments peuvent être mis en évidence :

- de manière générale, au sein d'un même lot, il peut y avoir une grande diversité de qualité ;
- par son nombre réduit de classe, la norme allemande semble être plus catégorique quant à la qualité d'un lot ;
- pour les peupliers, les normes semblent s'accorder sur le fait que le lot est relativement de mauvaise qualité et que seules quelques grumes sont de qualités

8. La prise de photo a été utile pour garder une trace et pour réaliser une photogrammétrie. Cependant, nous n'avons pas exploité cette dernière, c'est pourquoi elle ne sera pas détaillée dans ce mémoire.

courantes ;

- pour les épicéas, la norme allemande est plus sévère que l'européenne ;
- pour les tsugas, nous avons observé une qualité normale voir une bonne dans ce lot.

Peuplier	Norme Allemande	Norme européenne
	Aucune grume de classe 1	Aucune grume de classe A
	3 grumes de classe 2	1 grume de classe B
	7 grumes de classe 3	9 grumes de classe C
Epicéa	Norme Allemande	Norme européenne
	Aucune grume de classe 1	Aucune grume de classe A
	Aucune grume de classe 2	2 grumes de classe B
	10 grumes de classe 3	5 grumes de classe C
		3 grumes de classe D
Tsuga	Norme Allemande	Norme européenne
	1 grume de classe 1	Aucune grume de classe A
	9 grume de classe 2	5 grumes de classe B
	Aucune grume de classe 3	5 grumes de classe C
		Aucune grume de classe D

TABLE 3.3 – Tableau récapitulatif du classement visuel des grumes utilisées pour nos essais

Il est aussi important d'indiquer que nous ne sommes pas formés pour réaliser un classement visuel. Malgré les importantes recherches que nous avons menées, certaines questions sont restées ouvertes. La distinction entre les différents types de nœuds peut dans certains cas être subjective et difficile à réaliser sur grumes écorcées. Le travail accompli ici nous semble être le plus correct, mais il nous faut le prendre comme une information supplémentaire à analyser et non comme une vérité absolue.

Ici, nous effectuons uniquement une analyse de lots par essence. Il serait possible de réaliser une analyse grume par grume, mais cela n'aurait pas été aussi révélateur. En effet, si le lot de grume considéré se trouve à la limite entre deux qualités, il serait difficile d'en tirer une conclusion.

Lors de notre classement visuel, nous avons remarqué que pour chaque lot, il y avait en général un ou plusieurs éléments qui étaient responsables du déclassement des grumes.

- Pour les peupliers, c'est principalement la taille des nœuds qui a été le facteur déclassant pour les deux normes.
- Pour les épicéas, la courbure a été l'élément critique pour la norme allemande et ce sont des défauts tels que les cœurs excentrés ou les roulures qui ont mené au déclassement selon les normes européennes.
- Pour les tsugas, le constat est essentiellement identique à celui des épicéas, à la différence que les fentes de cœurs ont aussi déclassé certaines grumes.

Pour obtenir le classement visuel détaillé de chaque grume, veuillez vous référer à la sauvegarde de nos données dans le dossier *Classement Visuel*.

3.3.2 Grindosonic

Comme décrit plus haut, notre mémoire est jumelé à celui de V. HOUBEN[10] qui réalise une étude sur la caractérisation mécanique non destructive des grumes à l'aide du **GrindoSonic**. Celui-ci nous permet d'avoir une estimation des caractéristiques mécaniques d'un élément par méthode CND⁹ et plus particulièrement par IET¹⁰. L'utilisation de cet appareil peut donc ajouter un réel intérêt à notre mémoire car d'une part, les méthodes IET sont utilisées dans le procédé industriel et d'autre part, cela peut nous donner une indication sur la qualité de l'évaluation de nos résultats.

Les méthodes IET sont relativement anciennes et apparaissent à la fin des années 1930. Ce principe repose sur la réponse dynamique d'un objet à un impact. Peu importe la puissance de l'impact, c'est la transmission de la vibration à travers l'élément étudié qui est importante. Évidemment, il faut que l'impact soit suffisamment élevé pour que l'objet rentre en vibration, mais il ne doit pas être trop élevé pour ne pas occasionner de déplacement sur ses appuis. La vibration créée par l'impact est alors détectée par un transducteur. Le signal capté est ensuite décomposé par une transformée de Fourier afin d'en extraire les fréquences dominantes. Celles-ci peuvent donc nous donner des indications quant aux modules de Young, au ratio de Poisson et à l'amortissement du matériau[53]. Cette méthode est déjà utilisée dans certaines scieries comme mentionné dans la section 3.2.4.

L'avantage du Grindosonic est qu'il nous permet de réaliser l'ensemble des mesures et l'analyse des données directement sur un appareil. En plus de la détection des vibrations par les micros, le Grindosonic nous montre directement de manière visuelle le signal, sa FFT¹¹, le calcul des modules de E, G, ν et la possibilité de filtrer une partie du spectre[54]. En fonction de la position du micro, les modules analysés seront soit longitudinaux, soit flexionnels. Le premier nous permet d'obtenir une valeur du module de E, tandis que le second pourra nous informer quant à la dégradation de la grume au cours de l'essai.

3.3.3 Essai en flexion

Il est important de définir certains éléments essentiels à la bonne compréhension. Pour rappel, le protocole réalisé vise à caractériser mécaniquement des grumes. Celui-ci n'est pas définitif et ne sera certainement pas utilisé dans une scierie. Pour l'instant, nous recherchons à déterminer quels pourraient être les critères de déclassement des grumes ou encore quelles sont les étapes indispensables à un futur protocole mécanique industriel.

Principe de base

Le protocole a deux objectifs principaux :

1. Donner une estimation de la résistance mécanique d'une grume.
2. Vérifier que l'essai n'a pas endommagé la grume.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons uniquement à la résistance en flexion. C'est pourquoi nous utilisons une mise en charge d'une flexion 4 points (figure 3.12).

9. Contrôle non destructif ("Non destructive testing" en anglais)

10. Impulse Excitation Technique

11. Fast Fourier Transform

Comme décrit dans la section 3.2.2, cette méthode a pour avantage de créer une flexion pure à mi-travée, mais aussi que la déformation maximale ne se trouve pas au droit des appuis.

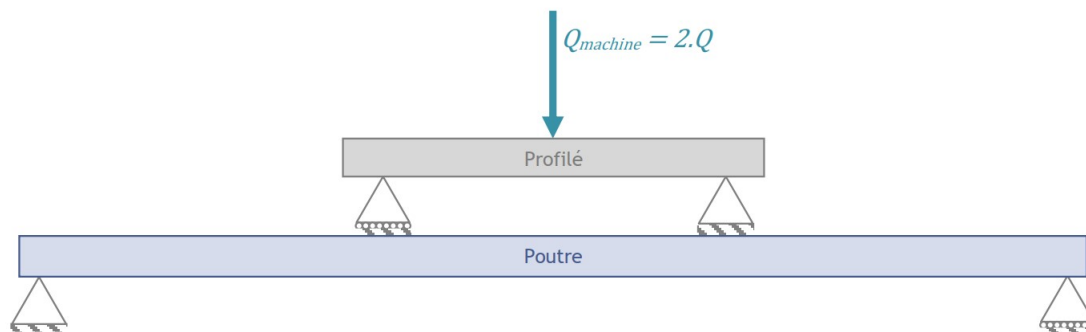


FIGURE 3.12 – Modélisation de la poutre en flexion 4 points [55]

Le principe de l'essai consiste en trois phases simples :

1. Une première série de cycles de chargements faibles.
2. Un cycle de chargement élevé.
3. Une seconde série de cycles de chargements faibles.

Les cycles de chargements faibles ont pour vocation de vérifier s'il y a eu une perte de résistance due au chargement élevé. Nous réalisons plusieurs cycles faibles afin d'assurer une homogénéité des résultats et parce que ce type de chargement est fréquent dans la vie d'un ouvrage. La répétition des cycles faibles après le cycle élevé nous permet aussi d'analyser l'influence du chargement élevé. Ces cycles de chargement peuvent donc être représentés par la figure 3.13.

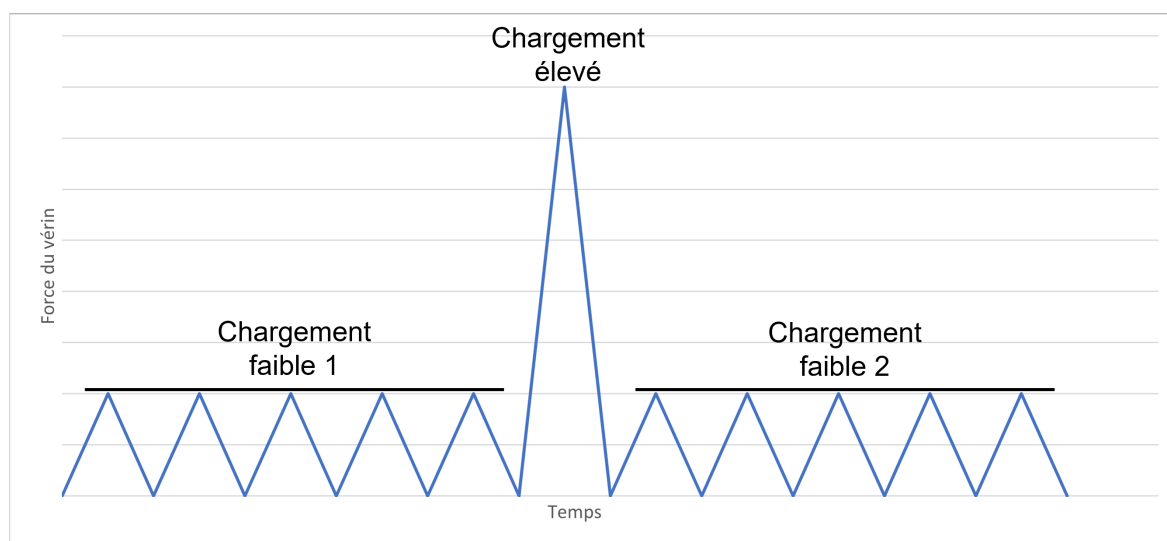


FIGURE 3.13 – Représentation simplifiée du protocole

Or, il est important de pouvoir quantifier ces forces que nous appliquons sur nos grumes. De manière générale, les cycles de forces faibles représentent les chargements à l'état limite de services (F_{ELS}) et le cycle de force élevée celui de l'état limite ultime (F_{ELU}).

Dans les Eurocodes, les **états limites de services** représentent le chargement maximal à appliquer pour un confort et un sentiment de sécurité des utilisateurs. Cette notion de confort et de sécurité est traduite par la flèche maximale que l'élément déploiera tout au long de sa vie. Ainsi, pour déterminer cette valeur de F_{ELS} , il nous suffit d'appliquer une flèche à notre élément en flexion et d'en mesurer la force nécessaire pour atteindre cet état. Cette flèche est arbitraire mais doit se trouver entre $L/300$ et $L/500$ [1] qui sont les valeurs prescrites par l'eurocode (tableau 3.1).

Cependant, la flèche étudiée ici est la flèche dite court-terme (CT). En effet, le temps a un effet néfaste sur le fléchissement des éléments en bois. Cet élément s'appelle le fluage et doit être pris en compte lors de la caractérisation mécanique de nos grumes. Nous devons donc faire une différence entre la charge admissible court-terme $F_{ELS,CT}$ et la charge admissible long-terme $F_{ELS,LT}$.

Grâce à l'Eurocode, il y a moyen de déterminer une relation entre la force résistante lors de l'application de cette flèche long-terme et la valeur de la force court-terme qui créera, au long terme, cette flèche. Cette relation peut être exprimée grâce à l'équation 3.5.

$$F_{ELS,CT(LT)} = \omega \cdot F_{ELS,LT} \quad (3.5)$$

où $F_{ELS,LT}$ représente la force en réaction à l'application de la flèche long-terme et $F_{ELS,CT(LT)}$ la force court-terme qui, au long terme (à cause du fluage), générera la flèche long-terme.

Pour ce qui est des **états limites ultimes**, il est aussi possible de définir une relation entre $F_{ELS,CT}$ et F_{ELU} :

$$F_{ELU} = \mu \cdot F_{ELS,CT} \quad (3.6)$$

Ces valeurs de ω et μ n'étant pas directement définie dans l'Eurocode, nous devons les déterminer.

Détermination de ω

Dans l'Eurocode, un artifice de calcul est utilisé pour tenir compte des effets long-terme. Pour ce faire, nous majorons les combinaisons de charge permanentes et une partie des charges variables à l'aide d'un coefficient adimensionnel : k_{def} . Nous allons utiliser cet artifice pour déterminer notre valeur de ω . Lors de nos essais, nous appliquons une flèche δ_{LT} long-terme. Cette flèche est définie par le projet et selon l'Eurocode, cette valeur doit varier entre $L/150$ et $L/300$ (tableau 3.1). Pour l'ensemble de nos grumes, nous avons considéré une valeur classique de $L/250$. Cette valeur donne en réaction une force : $F_{ELS,LT}$.

En réalité, à cause du fluage, la force qui créera cette flèche de $L/250$ au long-terme sera plus faible. Cette force se notera $F_{ELS,CT(LT)}$. Le coefficient ω est le rapport entre $F_{ELS,CT(LT)}$ et $F_{ELS,LT}$ comme indiqué à l'équation 3.5. L'idée ici est donc de trouver le lien entre le comportement court-terme de l'élément et sa résistance long-terme admissible.

La démarche pour obtenir $F_{ELS,CT(LT)}$ est la suivante :

1. Partons des équations de combinaisons de charge ELS court-terme et long-terme en prenant comme hypothèse que nous n'avons qu'une seule charge variable (Q) et qu'une charge permanente (G) :

$$C_{ELS,LT} = F_{ELS,LT} = (1 + k_{def})G + Q + k_{def}\psi_2Q \quad (3.7)$$

$$C_{ELS,CT} = F_{ELS,CT(LT)} = G + Q \quad (3.8)$$

2. Posons alors le facteur l comme la proportion de charge variable dans la combinaison ELS, CT . Nous pouvons alors écrire $Q = l \cdot F_{ELS,CT(LT)}$ et $G = (1 - l)F_{ELS,CT(LT)}$ et ainsi réécrire :

$$F_{ELS,LT} = (1 + k_{def})(1 - l)F_{ELS,CT(LT)} + l \cdot F_{ELS,CT(LT)} + k_{def}\psi_2l \cdot F_{ELS,CT(LT)} \quad (3.9)$$

3. Nous pouvons alors réécrire l'équation telle que :

$$F_{ELS,CT(LT)} = \frac{F_{ELS,LT}}{1 + k_{def}(1 - l + \psi_2l)} \quad (3.10)$$

4. Ainsi nous pouvons en déterminer ω tel que :

$$\omega = \frac{1}{1 + k_{def}(1 - l + \psi_2l)} \quad (3.11)$$

En prenant l'hypothèse que nous n'irons jamais en classe de service 3, la valeur de k_{def} prendra soit la valeur de 0.6 soit de 0.8. Nous prenons aussi l'hypothèse que le bois sera à l'état vert. Par conséquent, étant proche du point de saturation des fibres, nous augmentons les valeurs possibles de k_{def} de 1 comme indiqué dans l'Eurocode [1]. Ainsi, nous pouvons construire le tableau présenté sur la figure 3.14 :

Dans les faits, la valeur de F_{LT} que nous allons déterminer sera mesurée uniquement lors du chargement ELU quand celui-ci passera par la flèche δ_{LT} .

l	kdef = 1.6			kdef = 1.8		
	$\Psi_2 = 0.3$	$\Psi_2 = 0.6$	$\Psi_2 = 0.8$	$\Psi_2 = 0.3$	$\Psi_2 = 0.6$	$\Psi_2 = 0.8$
1	0.68	0.51	0.44	0.65	0.48	0.41
0.95	0.65	0.5	0.44	0.62	0.47	0.41
0.9	0.63	0.49	0.43	0.6	0.46	0.4
0.85	0.61	0.49	0.43	0.58	0.46	0.4
0.8	0.59	0.48	0.43	0.56	0.45	0.4
0.75	0.57	0.47	0.42	0.54	0.44	0.4
0.7	0.55	0.46	0.42	0.52	0.44	0.39
0.65	0.53	0.46	0.42	0.5	0.43	0.39
0.6	0.52	0.45	0.42	0.49	0.42	0.39
0.55	0.5	0.44	0.41	0.47	0.42	0.38
0.5	0.49	0.44	0.41	0.46	0.41	0.38
0.45	0.48	0.43	0.41	0.45	0.4	0.38
0.4	0.46	0.43	0.4	0.44	0.4	0.38
0.35	0.45	0.42	0.4	0.42	0.39	0.37
0.3	0.44	0.42	0.4	0.41	0.39	0.37
0.25	0.43	0.41	0.4	0.4	0.38	0.37
0.2	0.42	0.4	0.39	0.39	0.38	0.37
0.15	0.41	0.4	0.39	0.38	0.37	0.36
0.1	0.4	0.39	0.39	0.37	0.37	0.36
0.05	0.39	0.39	0.39	0.37	0.36	0.36
0	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.36

FIGURE 3.14 – Tableau des valeurs de ω possible

Détermination de μ

Le coefficient μ lie la force à l'état limite ultime et l'état limite de service court-terme (équation 3.6). Sa détermination se base sur les principes de l'Eurocode et celui-ci peut prendre de nombreuses valeurs.

1. Partons des équations des combinaisons de charges décrites dans l'Eurocode [1] en prenant comme hypothèse que nous n'avons qu'une seule charge variable (Q) et une charge permanente (G) :

$$C_{ELU} = 1.35G + 1.5Q \quad (3.12)$$

$$C_{ELS,CT} = F_{ELS,CT} = G + Q \quad (3.13)$$

2. Posons le facteur l comme la proportion de charge variable dans la combinaison ELS. Nous pouvons alors écrire $Q = l \cdot F_{ELS,CT}$ et $G = (1 - l)F_{ELS,CT}$ et ainsi réécrire :

$$C_{ELU} = 1.35(1 - l)F_{ELS,CT} + 1.5l \cdot F_{ELS,CT} = (1.35(1 - l) + 1.5l)F_{ELS,CT} \quad (3.14)$$

3. Lors du dimensionnement, nous utilisons cette combinaison de charge afin de déterminer la force réelle qui sera considérée, en y ajoutant les deux facteurs de sécurité k_{mod} et γ_m comme décrit dans la section 3.2.3. Nous pouvons donc écrire la relation suivante :

$$F_{ELU} = \frac{\gamma_m C_{ELU}}{k_{mod}} = \frac{\gamma_m (1.35(1 - l) + 1.5l)}{k_{mod}} F_{ELS,CT} \quad (3.15)$$

4. Nous voyons alors la relation suivante apparaître :

$$\mu = \frac{\gamma_m(1.35(1-l) + 1.5l)}{k_{mod}} \quad (3.16)$$

Notre valeur de μ dépend donc de k_{mod} , γ_m et l . Pour les bois massifs, γ_m vaut 1.3. Nous pouvons donc créer le tableau 3.15 où k_{mod} est défini par rapport à la classe de service et par rapport à la durée de la charge la plus courte.

	Permanente		Long terme		Moyen terme		Court terme		Instantanée	
l [%]	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 1 & 2	Classe 3
100	3.2500	3.9000	2.7857	3.5455	2.4375	3.0000	2.1667	2.7857	1.7727	2.1667
95	3.2338	3.8805	2.7718	3.5277	2.4253	2.9850	2.1558	2.7718	1.7639	2.1558
90	3.2175	3.8610	2.7579	3.5100	2.4131	2.9700	2.1450	2.7579	1.7550	2.1450
85	3.2013	3.8415	2.7439	3.4923	2.4009	2.9550	2.1342	2.7439	1.7461	2.1342
80	3.1850	3.8220	2.7300	3.4745	2.3888	2.9400	2.1233	2.7300	1.7373	2.1233
75	3.1688	3.8025	2.7161	3.4568	2.3766	2.9250	2.1125	2.7161	1.7284	2.1125
70	3.1525	3.7830	2.7021	3.4391	2.3644	2.9100	2.1017	2.7021	1.7195	2.1017
65	3.1363	3.7635	2.6882	3.4214	2.3522	2.8950	2.0908	2.6882	1.7107	2.0908
60	3.1200	3.7440	2.6743	3.4036	2.3400	2.8800	2.0800	2.6743	1.7018	2.0800
55	3.1038	3.7245	2.6604	3.3859	2.3278	2.8650	2.0692	2.6604	1.6930	2.0692
50	3.0875	3.7050	2.6464	3.3682	2.3156	2.8500	2.0583	2.6464	1.6841	2.0583
45	3.0713	3.6855	2.6325	3.3505	2.3034	2.8350	2.0475	2.6325	1.6752	2.0475
40	3.0550	3.6660	2.6186	3.3327	2.2913	2.8200	2.0367	2.6186	1.6664	2.0367
35	3.0388	3.6465	2.6046	3.3150	2.2791	2.8050	2.0258	2.6046	1.6575	2.0258
30	3.0225	3.6270	2.5907	3.2973	2.2669	2.7900	2.0150	2.5907	1.6486	2.0150
25	3.0063	3.6075	2.5768	3.2795	2.2547	2.7750	2.0042	2.5768	1.6398	2.0042
20	2.9900	3.5880	2.5629	3.2618	2.2425	2.7600	1.9933	2.5629	1.6309	1.9933
15	2.9738	3.5685	2.5489	3.2441	2.2303	2.7450	1.9825	2.5489	1.6220	1.9825
10	2.9575	3.5490	2.5350	3.2264	2.2181	2.7300	1.9717	2.5350	1.6132	1.9717
5	2.9413	3.5295	2.5211	3.2086	2.2059	2.7150	1.9608	2.5211	1.6043	1.9608
0	2.9250	3.5100	2.5071	3.1909	2.1938	2.7000	1.9500	2.5071	1.5955	1.9500

FIGURE 3.15 – Tableau des valeurs de μ

3.3.4 Description précise de l'essai type en laboratoire

Pour faire une rapide synthèse, il y a 3 forces à considérer.

- $F_{ELS,CT}^{labo}$ représente la force appliquée par le vérin pour simuler un chargement de service court-terme. Il correspond à la force qu'il faut appliquer pour atteindre une flèche δ_{CT} .
- $F_{ELS,CT(LT)}^{labo}$ représente la charge à appliquer afin d'atteindre au long terme une flèche δ_{LT} . Elle est déterminée grâce à $F_{ELS,LT}^{labo}$, la force instantanée mesurée suite à l'application d'une flèche δ_{LT} .
- F_{ELU}^{labo} correspond au chargement maximal que l'élément risque de subir dans sa vie dans le pire des cas.

Ces facteurs sont liés par 2 équations :

$$F_{ELU}^{labo} = \mu \cdot F_{ELS,CT}^{labo} \quad (3.17)$$

$$F_{ELS,CT(LT)}^{labo} = \omega \cdot F_{ELS,LT}^{labo} \quad (3.18)$$

Avec μ et ω définis plus haut. L'exposant *labo* indique simplement que ces résultats sont ceux des essais en laboratoire. Dans certains cas, nous utiliserons $F_{ELS,CT,dim}^{labo}$ au lieu de $F_{ELS,CT}^{labo}$ afin de préciser que nous utilisons la valeur maximale de tous les cycles ELS enregistré afin d'être le plus sécuritaire.

Durant les tests en laboratoire, nous avons réalisé un essai type pour la majorité des grumes en suivant les opérations suivantes :

1. **Placer les appuis** afin d'avoir un élanement constant pour toutes les grumes d'une même essence. Pour les peupliers et tsugas, nous avons un élanement de 20 et pour les épicéas, un élanement de 17.
2. **Vérifier que les appuis** ne soient pas libérés. Les appuis à rotule ne peuvent pas être libres lorsque l'on manipule la grume sur ses appuis.
3. **Positionner la grume** sur ces appuis en prenant compte sa courbure naturelle afin d'éviter tout renversement.
4. **Libérer les appuis**
5. **Placer les capteurs** comme indiqué dans la section 3.4.
6. **Réaliser 20 vibrations** sur la grume en longitudinale et en flexionnelle afin d'obtenir les données avec le Grindosonic. En fonction du type de vibration provoquée, les appuis doivent être libérés ou non[10].
7. **Mettre le vérin en contact** de la grume jusqu'à obtenir une force de 1 [kN]. Ce contact permet de s'assurer que les appuis soient bien installés. Si ce n'est pas le cas, il faut relever le vérin et réitérer cette étape.
8. **Réaliser 5 cycles ELS.** Les cycles ELS sont les cycles qui vont nous permettre d'obtenir la valeur de $F_{ELS,CT}^{labo}$ en imposant une flèche. Dans l'essai type, cette flèche est de $L/350$. Le premier cycle de cette série sera considéré comme un cycle de *placement*. Elle permet à la grume de bien se caler dans ses appuis. Lors du post-traitement, nous verrons l'intérêt d'un tel cycle. À la fin des 5 cycles, la valeur maximale sera alors utilisée pour déterminer la force de la montée à l'ELU. Cette force maximale est alors $F_{ELS,CT,dim}^{labo} = \max(F_{ELS,CT}^{labo})$.

9. **Relever le vérin** après cette première série de cycles.
10. **Réaliser des essais Grindosonic** afin de vérifier l'impact des cycles ELS comme à l'étape 6.
11. **Mettre le vérin en contact** comme à l'étape 7.
12. **Réaliser un cycle ELU et un ELU**. Comme pour les cycles ELS, le premier cycle a un rôle de placement. Tel que décrit plus haut, la force du cycle ELU est calculée grâce à la relation $F_{ELU}^{labo} = \mu F_{ELS,CT,dim}^{labo}$. La valeur de μ est prise égale à 3.25 afin de considérer le pire cas si nous restons en classe 2.
13. **Relever le vérin**.
14. **Réaliser des essais Grindosonic** afin de vérifier l'impact du cycle ELU comme à l'étape 6.
15. **Remettre le vérin en contact** comme à l'étape 7
16. **Réaliser 5 cycles ELS** comme à l'étape 8
17. **Remonter le vérin**.
18. **Réaliser des essais Grindosonic** afin de vérifier l'impact des cycles ELS comme à l'étape 6.
19. **Mener la grume à la rupture** dans certains cas après une mise en contact comme à l'étape 7

L'allure classique d'un graphique force-temps peut alors être représenté par la figure 3.16.

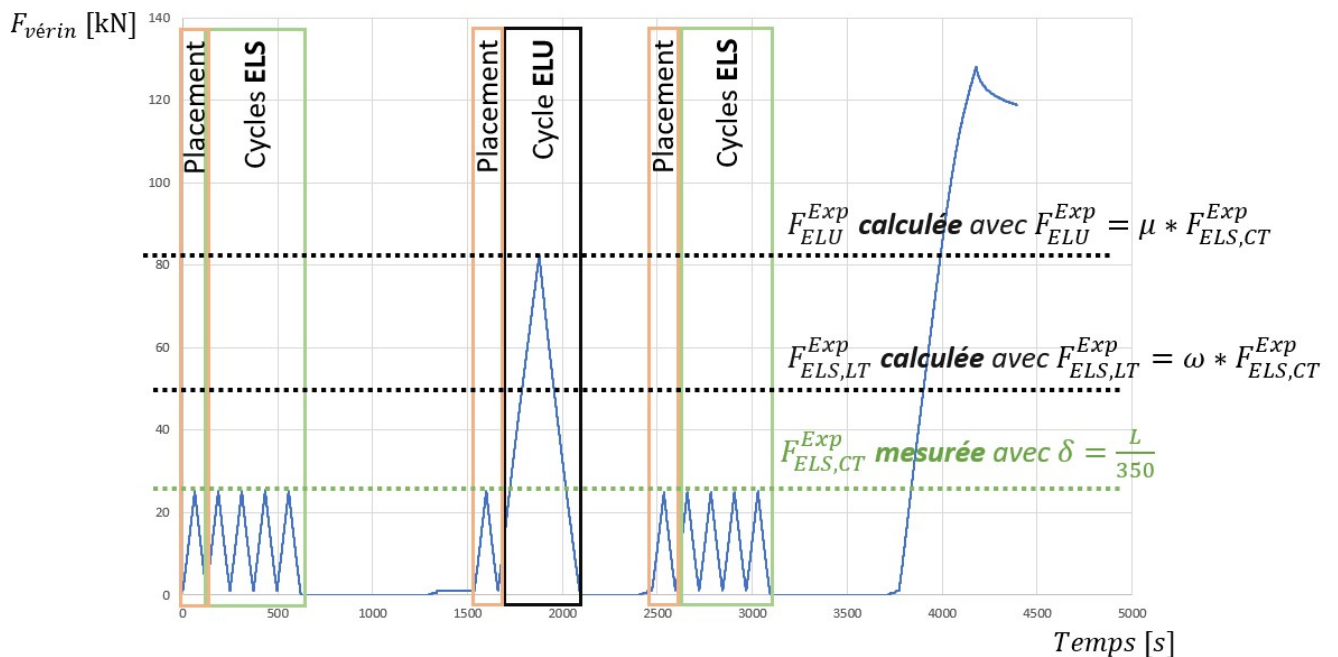


FIGURE 3.16 – Évolution de la force du vérin dans le temps - Essai du peuplier 01 à l'état vert

La succession des cycles peut aussi être représentée par le tableau 3.4. Notons que le premier cycle est compté comme 0 car il fait référence à un placement. Le véritable premier cycle ELS est le 1.

Cycles	Type	Rôle
0	Placement	Permet le placement de la grume dans ses appuis.
1 à 4	ELS	Avoir un élément de comparaison avant ELU.
5	Placement	Permet le placement de la grume dans ses appuis.
6	ELU	Vérifier la bonne tenue de la grume à un effort important.
7	Placement	Permet le placement de la grume dans ses appuis.
8 à 11	ELS	Avoir un élément de comparaison avant/après ELU.
12	Placement	Permet le placement de la grume dans ses appuis.
13	Rupture	

TABLE 3.4 – Tableau récapitulatif des cycles lors des essais en flexion

3.4 Description du banc d'essai

Il est à préciser que cette section est fortement inspirée du travail réalisé par Jens Niclaes et Christopher Moens [2] qui ont commencé les recherches sur ce sujet.

3.4.1 Disposition du banc d'essai

Pour réaliser notre recherche de protocole mécanique industriel sur des grumes, nous sommes inspirés des tests mécaniques non destructifs qui sont actuellement utilisés et présentés dans la section 3.2.4. Pour soumettre un élément à un effort de flexion, le test de flexion quatre points s'est avéré le plus efficace comme nous avons pu le démontrer dans la section 3.2.2. C'est donc sur ce type de test que notre choix s'est porté. Afin de respecter la norme européenne sur le test de bois rond écorcé NBN EN 14251 (2014) [56], nous avons respecté les exigences suivantes selon les notations de la figure 3.17 :

- longueur maximale entre appuis : $l = 18 \cdot d_{nom} \pm d_{nom}$ ¹² ;
- si les conditions ne le permettent pas, il est permis d'adapter la distance entre les points de charge et les supports de maximum 1,5 fois d_{nom} ;
- le chargement et la disposition doivent rester symétriques ;
- la grume doit être placée de telle façon que sa courbure soit dans le sens de la charge ;
- le chargement doit être appliqué via une vitesse constante afin que la rupture de la grume (si nous réalisons l'étape 19 de rupture) se déroule en 300 ± 120 [s].

Nous avons installé notre banc d'essai expérimental sur le plancher du laboratoire LEMSC de Louvain-La-Neuve. Le dispositif final est conséquent car il se doit d'accueillir et de stocker, en même temps au minimum dix grumes de huit mètres de long de diamètres médian moyen de 35 à 40 centimètres. La figure 3.18 est une représentation schématique globale du banc d'essai.

12. Selon la norme NBN EN 14251 [56], le diamètre nominal vaut le diamètre théorique si la grume a une ovalisation inférieure à 5% et vaut le diamètre minimal si la grume a une ovalisation supérieure à 5%.

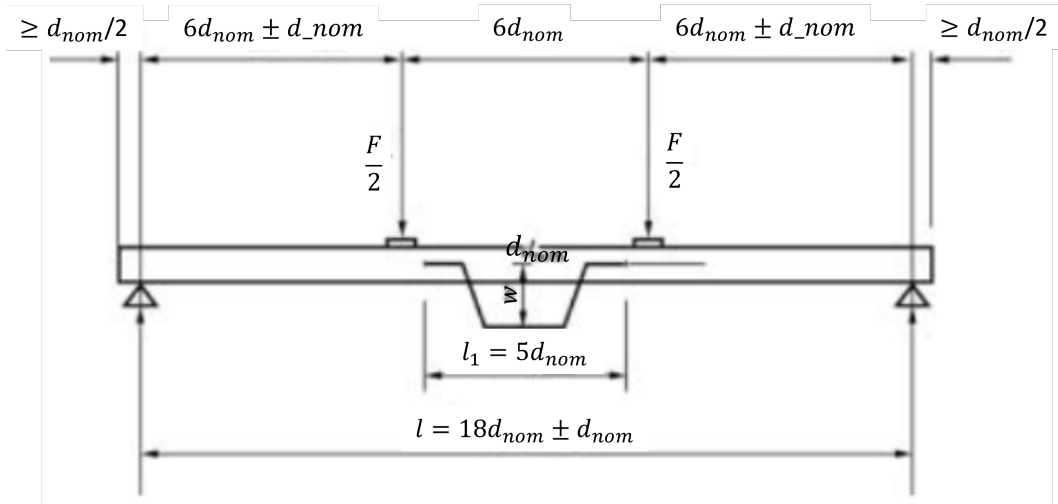


FIGURE 3.17 – Dispositif d'essai en flexion quatre points [56]

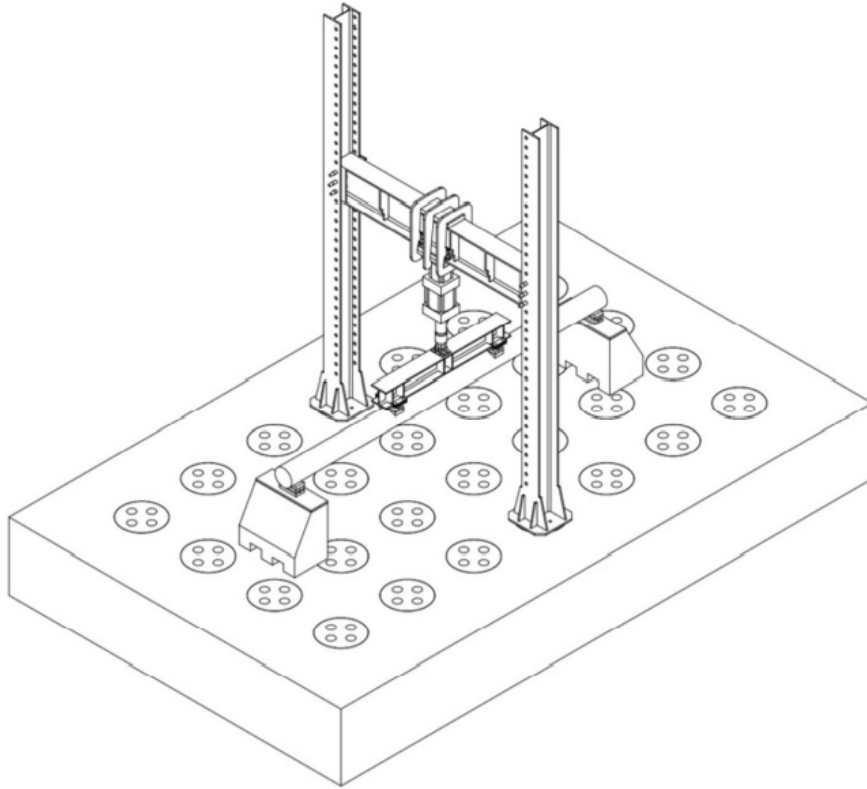


FIGURE 3.18 – Représentation SolidWorks du banc d'essai [2]

Afin de déterminer la vitesse du vérin, nous avons suivi les recommandations de la norme EN NBN 408 [21]. Elle stipule que la vitesse pour amener des éprouvettes de hauteur h à la rupture en flexion quatre points doit être égale à l'équation 3.19.

$$v \leq 0,003 \cdot h \quad (3.19)$$

Puisque les grumes sont de section circulaire, nous avons déterminé le rapport h/ϕ provenant de l'égalité de l'inertie d'une section carré ($\frac{h^4}{12}$) et d'une section circulaire ($\frac{\pi\phi^4}{64}$). Ce rapport vaut approximativement 0,88.

Grâce aux observations des recherches de J. NICLAES et C. MOENS, nous avons fait le choix de prendre le $\frac{1}{3}$ de cette vitesse. Finalement, la vitesse de la rampe est donnée par l'équation 3.20. Elle vaut 0,308 [mm/s] pour un diamètre moyen de 350 [mm].

$$v = \frac{1}{3} \phi \cdot 0,003 \cdot 0,88 \quad (3.20)$$

3.4.2 Composition du banc d'essai

Comme illustré sur la figure 3.18, le dispositif est composé de différents éléments. En voici leur description :

Le vérin de force

Pour nos essais, nous avons utilisé un vérin d'une capacité de 35 tonnes. Celui-ci est constitué "d'une cellule de force d'une précision de 0,02% et d'un capteur de déplacement relatif au vérin d'une précision de 0,89% (annexe H). Une rotule permet également de faire la jonction entre le vérin et la poutre de réparation afin que les charges se répartissent correctement sur les grumes dont la conicité peut être importante" [2]. Ce dispositif est présenté sur la figure 3.19.

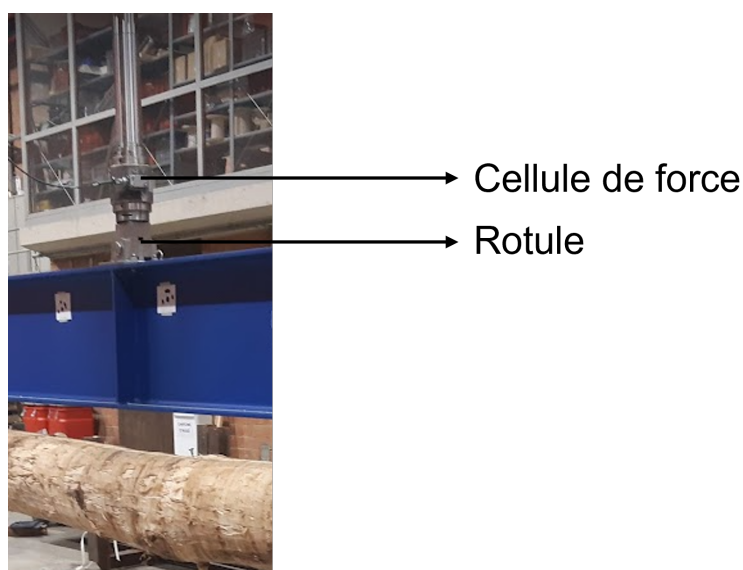


FIGURE 3.19 – Dispositif de mise en charge de la grume

La poutre de répartition (figure 3.20)

Le vérin applique une force sur la travée centrale d'une poutre HEB 400. Sur celle-ci sont fixés deux appuis en V inversé qui viennent accueillir la forme de la grume. Même si la norme NBN EN 14251 [56] ne parle pas explicitement du type d'appui, nous avons fait le choix de réaliser un appui à rotule et le second à rouleau disposé de façon opposée à leur analogue au niveau des points d'application de la charge. La distance entre eux respecte la directive de cette norme et est donc influencée par le diamètre nominal de la grume. Notre choix final de disposition est d'appliquer le chargement au tiers de la grume.

La grume est ainsi divisée en trois sections de même longueur. L'étape 7 du protocole est là pour vérifier que les deux appuis se placent correctement sur la grume.



FIGURE 3.20 – Poutre de répartition du banc d'essai

Les appuis

Les appuis de support ont également une forme de V. Ils ont été conçus pour pouvoir accueillir des grumes de diamètre de 10 à 50 centimètres de diamètre. Comme expliqué précédemment, il y a un appui à rouleau et l'autre simplement rotulé. Les types d'appuis sont positionnés de manière opposée par rapport à ceux de la poutre de répartition. Nous pouvons observer sur la figure 3.21 que nous avons placé des cales sous l'appui du petit bout afin de contrer le défilement¹³ de la grume et de conserver la poutre de répartition la plus horizontale possible.



FIGURE 3.21 – Appuis du gros (gauche) et petit (droite) bout [2]

Les supports

Pour accueillir les appuis de support, J. NICLAES et C. MOENS ont dimensionné deux supports en béton armé. Nous avons repris les mêmes supports qu'ils avaient utilisés pour leurs essais. Ceux-ci ont l'avantage d'être facilement déplaçable à l'aide d'un transpalette.

13. Explication de cette singularité dans la section 2.7.5



FIGURE 3.22 – Support en béton

3.4.3 Les instruments de mesures

Suite au travail de l'année passée, nous avons déterminé quels capteurs étaient essentiels pour le protocole d'essai en laboratoire. Nous sommes arrivés au résultat présenté sur la figure 3.23. Pour chaque essai, nous plaçons un laser, deux potentiomètres et quatre LVDTs¹⁴.

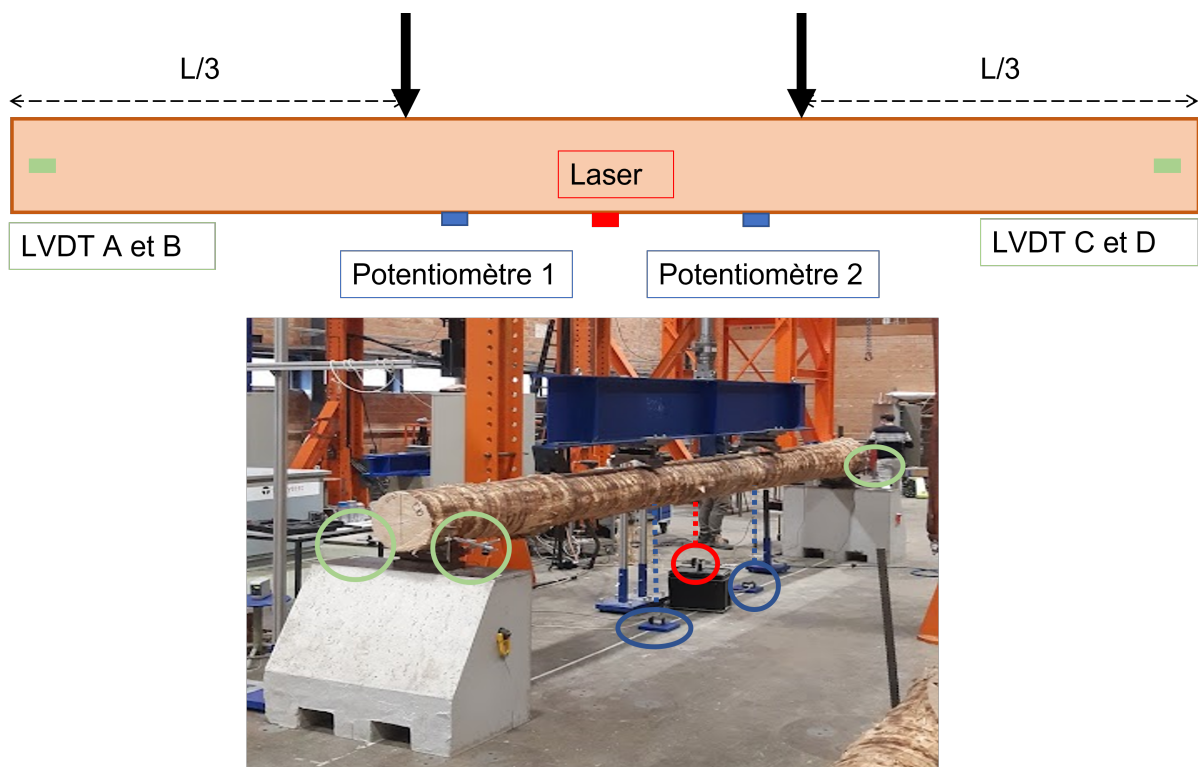


FIGURE 3.23 – Plan schématique et photo du banc d'essai

Laser

Le laser nous permet de prendre une mesure continue de la flèche centrale de la grume lorsque celle-ci est en chargement (figure 3.24). Celui-ci est donc placé sous la grume à une distance équivalente à $\frac{L}{2}$ avec le faisceau laser dirigé vers le haut. Afin d'assurer une bonne

14. Linear Variable Differential Transformer

réflexion, une plaquette métallique est collée sur la face inférieure de la grume. Lorsque nous menons celle-ci à la rupture, il est primordial de protéger le laser avec une boîte métallique. Les caractéristiques de cet instrument sont présentées dans l'annexe H.



FIGURE 3.24 – Dispositif de mesure de la flèche centrale

Potentiomètre

Les potentiomètres (caractérisés dans l'annexe H) sont utilisés dans notre banc d'essai pour venir compléter la mesure de la déformation de la grume en mesurant la déformée proche des appuis.

Leur mise en place consiste à placer l'appareil au sol et à tirer le fil métallique qui est enroulé dans une bobine jusqu'à l'endroit de mesure souhaité. Quand la grume sera déformée, le fil métallique va s'enrouler à nouveau sur lui-même et prendra ainsi la mesure. Le bout du fil métallique est aimanté pour nous permettre de le fixer sur la grume grâce à des plaquettes métalliques collées sur la face inférieure (figure 3.25). Ils nous servent notamment à calculer le module de Young local (celui du tiers central).

Au début de notre travail de recherche, nous avons placé les potentiomètres sous les deux points d'application pour tester les grumes de peuplier. Cependant, afin de ne pas être influencés par les points d'application du chargement, nous les avons déplacés. En d'autres mots, nous voulons être sûr que la mesure de la flèche locale se fasse là où le moment de flexion est constant et sans influence de l'effort tranchant¹⁵.

Nous avons donc placé, pour les tests de tsuga et d'épicéa, les deux potentiomètres à une distance respective de $\frac{L}{3} + \frac{\phi}{2}$ et $\frac{2L}{3} - \frac{\phi}{2}$ de l'appui du petit bout.

LVDT

Les LVDT's (caractérisé dans l'annexe H) permettent de calculer le tassement de la grume à ses appuis. Sur chaque extrémité de la grume, deux LVDT's sont placés. Pour ce faire, nous vissons à la mi-hauteur de la grume une plaque métallique en L de façon à avoir une surface plane la plus horizontale possible. Le LVDT va venir poser son extrémité sur l'aillette de la plaque métallique comme illustré sur la figure 3.26. Lorsque la grume sera chargée, les extrémités des LVDT's vont se déplacer suite au tassement que subit le

15. Le diagramme des moments d'une poutre en flexion quatre points est présenté à la figure 3.3



FIGURE 3.25 – Disposition d'un potentiomètre [2]

bois. Le fait d'en placer deux nous permet également de vérifier s'il y a une rotation de la grume lors de l'essai.

Lorsque nous menons à la rupture une grume, nous faisons le choix sécuritaire d'enlever ces quatre capteurs pour protéger le matériel. Ces valeurs sont prises en compte pour corriger les déplacements mesurés par le laser et les potentiomètres. Plus d'explications seront fournies dans la section 3.5.1.



FIGURE 3.26 – Disposition d'un LVDT [2]

Vérin

Comme illustré dans la section précédente, le vérin applique le chargement sur la poutre de répartition. L'ordinateur de commande enregistre son déplacement et la force appliquée dans le temps.

3.5 Analyse des résultats

À la suite des essais, de nombreuses données brutes en sont ressorties. Il est important maintenant de les traiter et d'en ressortir les valeurs pertinentes qui nous permettront de vérifier si nos essais ont été correctement réalisés.

Tout d'abord, nous aborderons la manière dont les valeurs intéressantes ont été extraites des données brutes et ensuite nous les discuterons et nous les confronterons avec celles utilisées dans les normes. Pour ce post-traitement des résultats, un programme python (*APTOL*) a été élaboré. Sa simplicité d'utilisation nous permet de rapidement réaliser l'analyse des données pour un grand nombre de grumes en une seule fois.

Celui-ci se présente sous la forme suivante :

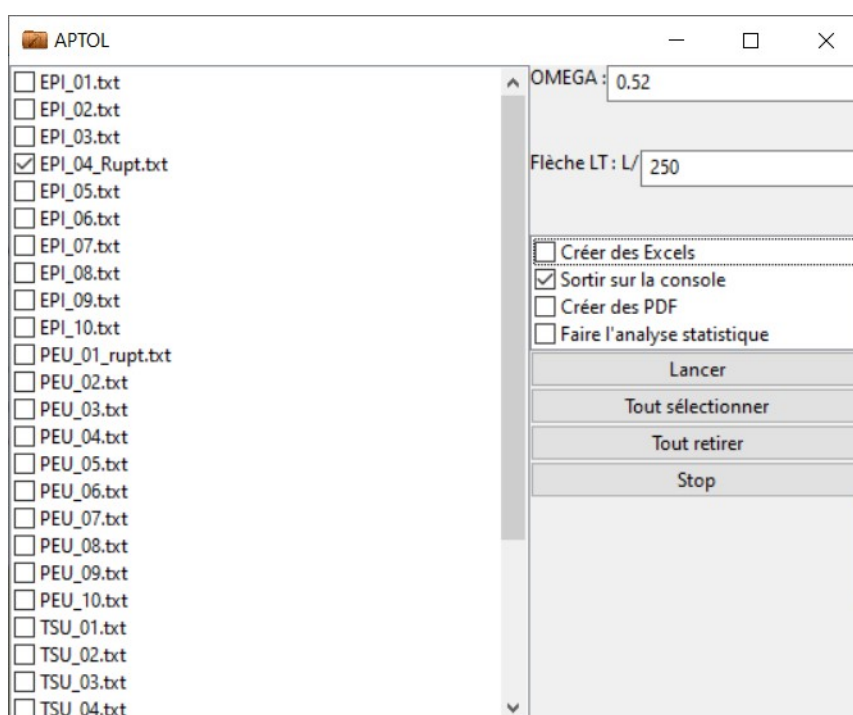


FIGURE 3.27 – Capture d'écran du programme de post-traitement APTOL

Pour chaque fichier *TXT* issu d'un essai, le programme donne la possibilité de réaliser 4 opérations :

1. Créer des fichiers Excel des données brutes (*fun Create_Excel*).
2. Afficher l'ensemble des résultats sur la console (*fun Log_on_consol*).
3. Créer un PDF avec l'ensemble des résultats d'une grume (*fun Create_pdf*).
4. Réaliser une étude statistique sur l'ensemble des grumes (*fun Stat*).

Nous allons nous intéresser ici uniquement aux deux dernières possibilités. La création d'un PDF nous permet d'obtenir en un seul document relativement court l'ensemble des résultats. À l'instar des certificats délivrés par TTTProduct [42], ce document¹⁶ est la

16. Un exemple se trouve à l'annexe D

"carte d'identité" d'une grume et nous permet donc de faire une analyse par individu. À nouveau, le document présenté ici ne sera pas celui obtenu après le protocole réalisé en scierie.

L'analyse statistique quant à elle nous permet de ressortir un comportement global autour d'un lot de grume.

À l'annexe C, vous trouverez un bref manuel d'utilisation du programme.

3.5.1 Analyse des données par individu

Durant les essais, 30 grumes ont été testées. Nous allons analyser les caractéristiques suivantes pour chacune d'entre elles :

- la force appliquée par le vérin ;
- le déplacement du vérin et du laser ;
- le déplacement des potentiomètres ;
- le tassement des LVDT's.

Toutes ces données vont nous permettre d'apporter les résultats suivants :

- la déformée de la grume ;
- l'évolution des pentes du graphique Force-Déplacement ;
- le tassement et la rotation de la grume dans ses appuis ;
- les modules de Young obtenus ;
- les valeurs de $F_{ELS,CT}^{labo}$, $F_{ELS,CT(LT)}^{labo}$ et F_{ELU}^{labo} .

Les trois premiers vont principalement nous permettre de vérifier si l'essai s'est correctement déroulé. Les deux autres vont nous donner des informations plus précises qui pourront nous être utiles pour réaliser un dimensionnement. Nous allons à titre d'exemple, montrer les graphiques obtenus pour la grume 06 d'épicéa afin de présenter les résultats. Le graphique force-déplacement de son essai est représenté ci-dessous (figure 3.28).

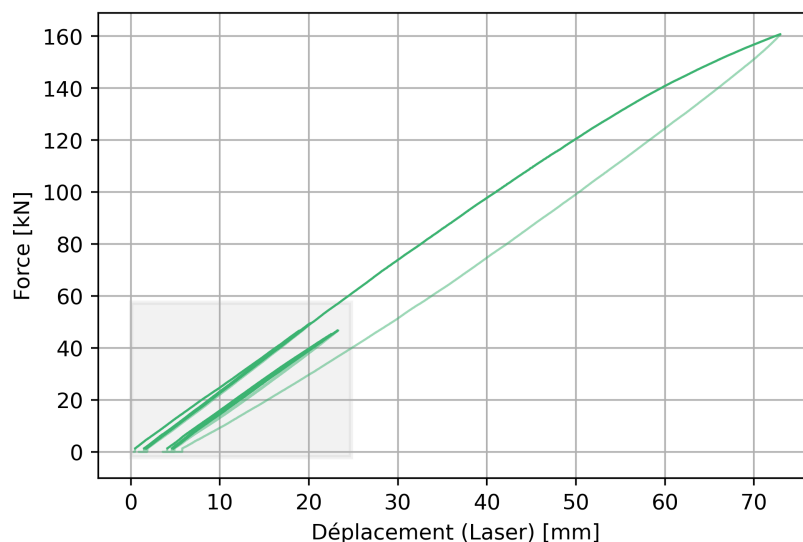


FIGURE 3.28 – Essais en laboratoire de la grume d'épicéa 06

Déformée de la grume

Pour obtenir la déformée de la grume, nous utilisons l'ensemble des données brutes de déplacement à notre disposition : le laser, les potentiomètres et les LVDT's. Comme représenté sur la figure 3.29, nous nous intéressons uniquement aux déformées maximales du premier cycle ELS et ELU¹⁷.

Les données brutes sont corrigées de la manière suivante.

- Les tassements sont corrigés par rapport au tassement mesuré au début du premier cycle. Ensuite, les tassements enregistrés par les LVDT's sont moyennés par rapport au gros et au petit bout¹⁸ $((LVDT\ A+LVDT\ B)/2$ et $(LVDT\ C+LVDT\ D)/2$) afin d'obtenir les valeurs pour chaque bout.
- Les potentiomètres et le laser sont corrigés aussi par rapport au tassement mesuré au début du premier cycle. Ici, comme les potentiomètres et le laser ne se trouvent pas exactement aux appuis, il faut pondérer la correction par rapport à chaque bout.

Après cela, il nous est possible d'estimer la déformée de la grume grâce à une régression polynomiale de degré 5. Nous obtenons alors les déformées que nous représentons sur la figure 3.29. Cela nous permet d'estimer la différence entre la flèche mesurée par le laser et la flèche réelle maximale observée afin de s'assurer que la conicité du tronc n'a pas trop d'impact. Dans ce cas-ci, pour le cycle ELU, la différence est de 0.18 [mm]. Celle-ci étant très faible, nous pouvons estimer que la mesure du laser est suffisamment précise pour montrer la déformée maximale.

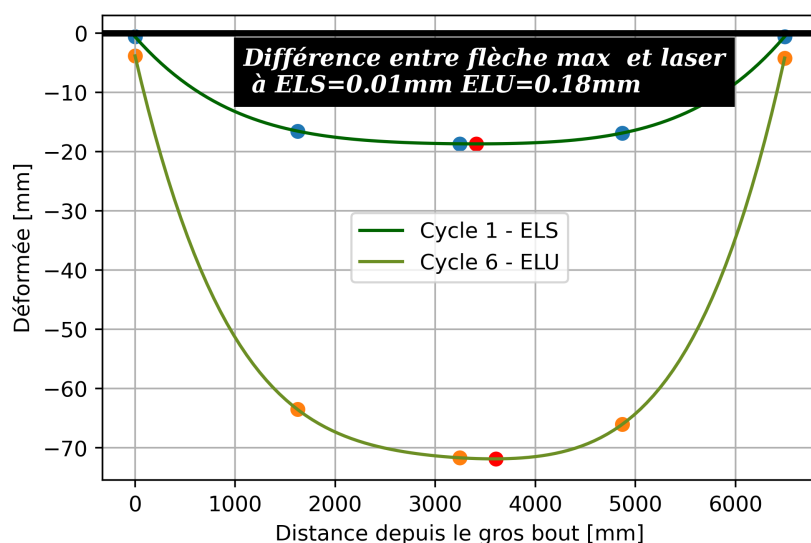


FIGURE 3.29 – Déformée pour la grume 06 d'épicéa pour les cycles 01 et 06

Évolution de la pente

La pente du graphique force-déplacement (figure 3.28) est un critère qui va être très intéressant à analyser, car si elle est trop importante, elle sera le signe d'une rentrée en plasticité de la grume. Nous nous intéressons uniquement à la montée des cycles de

17. cycle 1 et 6

18. Le petit bout fait référence à la tête de la grume et le gros bout au pied de la grume.

placement et du cycle ELU. Le but ici est d'observer l'évolution de la pente tout au long des cycles lors du chargement.

Il existe plusieurs méthodes pour y arriver, et pour notre part, nous avons choisi de réaliser une régression linéaire avec un chevauchement décalé. Autrement dit, nous prenons les 150 premières données de l'essai (environ 15 secondes) et nous effectuons une régression linéaire dessus afin d'en obtenir la pente. Ensuite, nous décalons la borne inférieure et supérieure de 15 points et nous recommençons une régression linéaire. Ainsi de suite jusqu'à arriver au sommet du cycle.

Pour la grume 06 d'épicéa, nous obtenons le graphique 3.30. Évidemment, le nombre de points choisis pour la régression et la valeur du chevauchement sont arbitraires, mais elles nous permettent d'avoir un résultat lissé qui correspond mieux à la réalité.

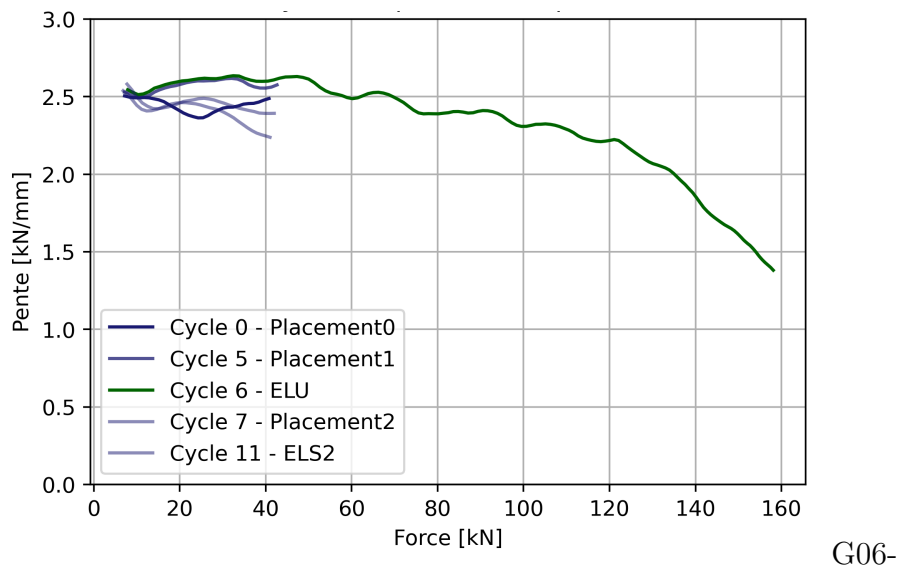


FIGURE 3.30 – Évolution de la pente au cours des cycles 1, 5, 6 et 7.

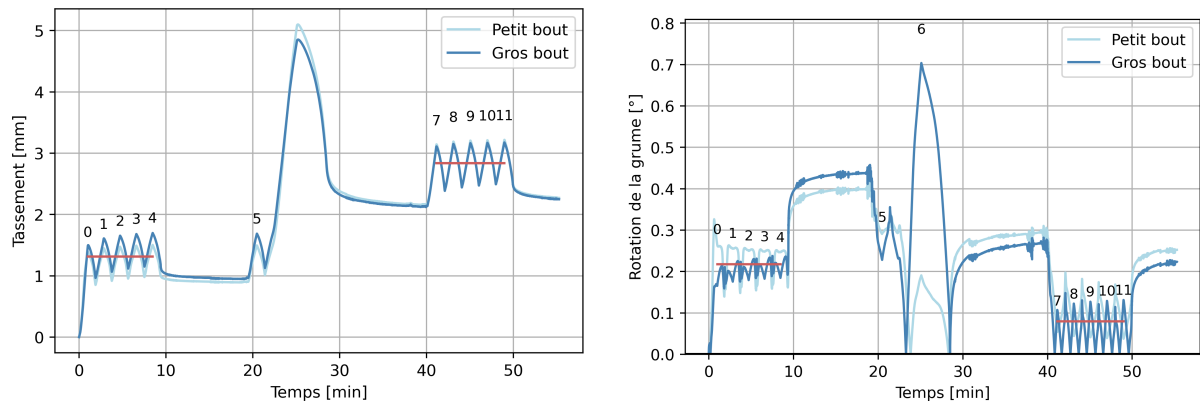
Analyse du tassement

Pour rappel, 4 LVDT's sont placés sur la grume : deux au petit bout (A et B) et deux au gros bout (C et D). Cela va nous permettre de vérifier que la grume n'a pas subi de tassement ou de rotation trop élevé.

Pour le tassement, il nous suffit de calculer la moyenne des LVDT's pour chaque bout. Pour le petit bout, nous ferons la moyenne entre les LVDT's A et B et pour le gros bout, nous ferons la moyenne entre les LVDT's C et D. Le graphique 3.31a nous montre alors l'évolution de ces moyennes dans le temps. Nous remarquons qu'il y a une différence marquante avant et après le cycle ELU. Le trait rouge symbolise donc la moyenne des tassements des cycles ELS. Pour la grume d'épicéa 06, les moyennes valent 1.31 et 2.84 [mm] respectivement avant et après ELU.

Pour la rotation, il nous faut calculer la différence entre les LVDT's d'un même bout. Afin de comparer les rotations entre elles, nous devons les exprimer selon un angle. Nous avons alors considéré que : angle de rotation = $\arctan(2 * \Delta d_{LVDT} / D)$ avec D le diamètre

de la section et Δd_{LVDT} la différence de déplacement des LVDT. La figure 3.31b nous montre l'évolution de cette différence au cours du temps.



(a) Analyse du tassement entre gros et petit bout (b) Analyse de la rotation enregistrée pendant l'essai.

FIGURE 3.31 – Graphiques d'analyse des tassements

Module de Young

Le module de Young est intéressant car il nous fournit une valeur que l'on sait comparer avec les caractéristiques mécaniques fournies par les normes. De plus, il nous permettra de faire un lien avec les modules dynamiques calculés par V. HOUBEN[10].

Le module représente, dans son essence, une valeur de pente (du graphique force-déplacement) durant la phase élastique d'un chargement. Cependant, on le détermine à l'aide d'un artifice de calcul et sa valeur risque donc d'être moins précise que celle de la pente présentée plus haut. Nous allons donc le calculer pour avoir une idée de la valeur qu'il peut avoir mais il ne pourra pas être utilisé tel quel dans des calculs de dimensionnement. Pour rappel, les valeurs moyenne et caractéristique du module de Young d'un résineux C22 sont respectivement de 10 et 6.7 [GPa] selon la NBN EN338[8].

De manière générale, la norme utilisée pour la détermination du module de Young en flexion 4 points est la NBN EN 408[21]. Celle-ci propose une évaluation de la pente par une régression linéaire sur les points compris entre 10% et 40% de F_{max} , la force à la rupture. Or, à part dans certains cas, nous n'allons jamais à la rupture. Nous devons donc adapter la norme à notre situation et pour ce faire, nous allons considérer la force exercée lors du cycle ELU comme F_{max} et non la force à la rupture. Ce choix nous permet de considérer un module de Young sur la même proportion de pente, et ce, en utilisant une valeur connue.

Cependant, un problème se pose alors. Pour un μ de 3.25, les cycles ELS n'atteignent pas 40% de F_{ELU}^{labo} . Il nous faut alors poser l'exception que si la valeur de 40% de F_{ELU}^{labo} n'est pas atteinte lors des cycles ELS, nous considérons la valeur du pic (100%) comme la borne supérieure (figure 3.32a).

La norme indique ensuite que si la régression linéaire n'a pas un coefficient de corrélation de 99% (ce qui peut arriver si l'on entre en plasticité), il faut diminuer la borne supérieure et augmenter la borne inférieure, jusqu'à arriver à un coefficient de corrélation

suffisant. Cependant, les bornes inférieure et supérieure ont chacune une borne limite respectivement de 20% et 30%. Si le coefficient de corrélation n'est pas acceptable une fois ces limites atteintes, aucun module de Young ne peut être calculé.

Ainsi, pour le module de Young global, la norme[21] nous fournit l'équation du module de Young pour une section carrée¹⁹. Il faut donc l'adapter pour une section circulaire en considérant $I = \pi D^4/64$ et $A_v = 9/10\pi D^2/4$ (équation 3.21).

$$E_{m,g} = \frac{8(3ao^2 - 4a^3)}{3\pi D^4(2\frac{w_2-w_1}{F_2-F_1} - \frac{40a}{9\pi D^2 G})} \quad (3.21)$$

avec

- $F_2 - F_1$ = l'accroissement de la force [N]
- $w_2 - w_1$ = l'accroissement de la flèche en mm correspondant à la différence $F_2 - F_1$
- G = le module de cisaillement (= 650 [MPa] tel que discuté en section 2.4.2)
- a = distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche [mm]
- b = largeur de la section transversale [mm]
- h = hauteur de la section transversale [mm]
- o = distance entre appuis [mm]

La norme fournit également la formule de la flèche locale²⁰ :

$$E_{m,l} = \frac{ao_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (3.22)$$

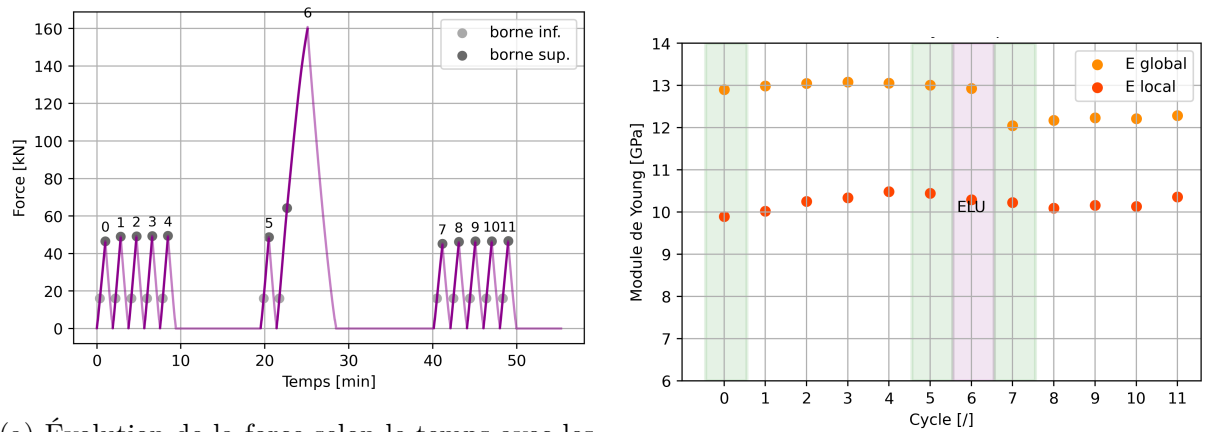
avec

- $F_2 - F_1$ = l'accroissement de la force [N]
- $w_2 - w_1$ = différence de flèche entre les potentiomètres et le laser en [mm]
correspondant à la différence $F_2 - F_1$
- a = distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche en [mm]
- o_1 = la distance entre les appuis centraux en [mm]
- I = l'inertie de la section [mm⁴]

Toutes les valeurs de déplacement utilisées prennent en compte une correction du tassement. Pour la grume 06 d'épicéa, cette évolution est représentée à la figure 3.32b.

19. Dérivé de la flèche issue du calcul de la flexion 4 points démontré en annexe A

20. Nous considérons uniquement la travée centrale de la grume qui subit une flexion pure.



(a) Évolution de la force selon le temps avec les bornes utilisées pour la régression linéaire du calcul du module de Young (b) Valeurs du module d'élasticité local et global pour chaque cycle.

FIGURE 3.32 – Graphique en lien avec la régression linéaire pour l'obtention des modules de Young

Forces

Comme expliqué à la section 3.3.3, un des éléments qui nous permet de décrire une grume est $F_{ELS,CT}^{labo}$. C'est-à-dire la force nécessaire pour atteindre une flèche ($L/350$) imposée. Il est alors intéressant pour chaque cycle d'avoir une idée de ces valeurs (figure 3.33). Nous remarquons que les cycles de placement, en vert sur le graphique, présentent une légère baisse par rapport aux cycles ELS. Ceci donne donc l'information qu'une série de deux cycles au minimum est essentielle.

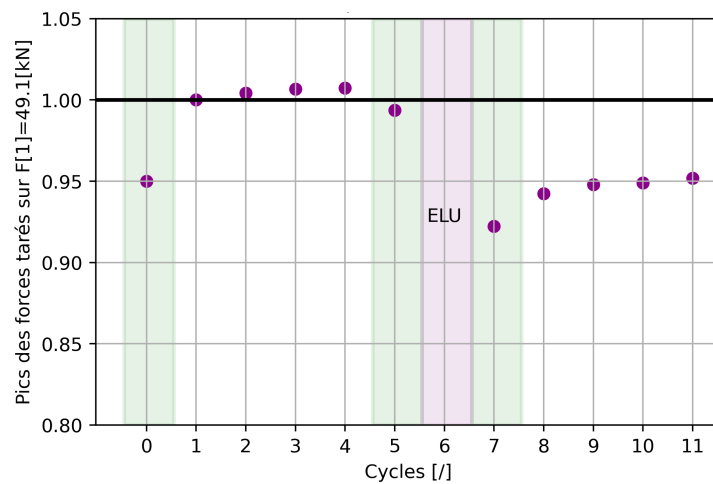


FIGURE 3.33 – Graphique des forces au sommet de chaque cycle ELS

Nous avons ici présenté uniquement les résultats pour la grume 06 d'épicéa, mais l'ensemble des graphiques important pour chaque grume se trouve en annexe E.

3.5.2 Analyse des données par groupe

Maintenant que nous avons déterminé les données analysables pour chaque grume, il nous faut définir les indices qui nous indiqueraient que l'essai peut être fonctionnel à

l'échelle industrielle. Pour ce faire, nous allons tenter de répondre à 3 questions.

- Comment estimer une rentrée en plasticité trop importante ?
- Le tassement est-il un facteur clé ou négligeable de l'essai ?
- Après le cycle ELU, avons-nous une dégradation ou une stabilisation de E_g ?

Après avoir répondu à ces questions, nous comparerons nos résultats avec ceux du mémoire de V. HOUBEN[10] et avec celles fournies par l'Eurocode.

Estimation d'une entrée en plasticité trop importante

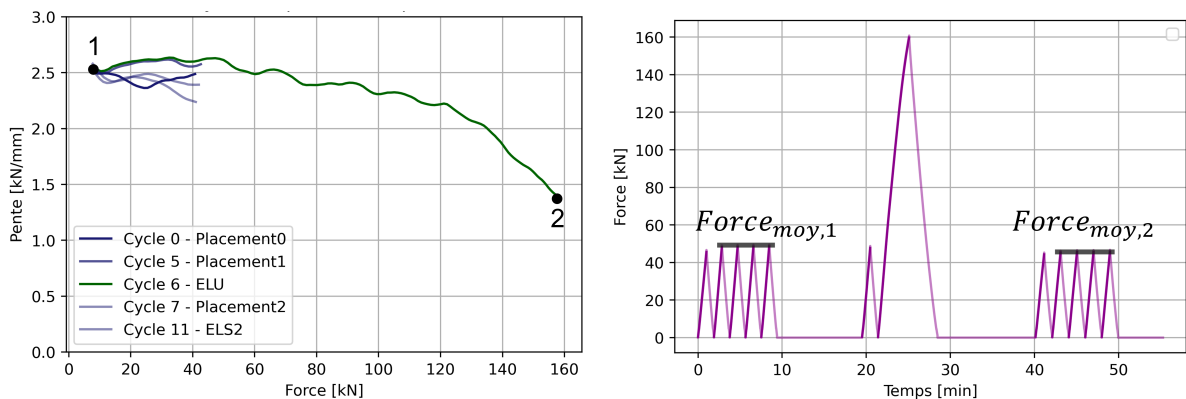
En réalité, ce n'est pas tant la rentrée en plasticité qui est importante, mais plutôt la dégradation irréversible que subit la grume. En effet, si lors de l'essai, la grume rentre légèrement en plasticité mais que cela n'a aucun effet important sur le long terme, cela est acceptable. Il est par contre moins acceptable que l'on aille "trop loin" lors de l'essai et que la grume testée soit trop abimée pour envisager une autre valorisation. Il est essentiel pour la scierie de pouvoir valoriser chaque grume achetée même si celle-ci ne passe pas l'essai en flexion.

Afin de répondre à cette question, il nous faut définir deux facteurs :

- un facteur représentant l'entrée en plasticité ;
- un facteur représentant une dégradation de la grume.

Le facteur représentant l'entrée en plasticité sera le rapport entre la valeur de la pente au début du cycle ELU et à la fin du cycle ELU. Nous analysons uniquement le cycle ELU car c'est celui qui est le plus susceptible de dégrader la grume. Les points considérés sont alors les points 1 et 2 du graphique 3.34a. Le ratio est donc $pente_1/pente_2$.

Le facteur représentant une dégradation sera dans notre cas exprimé comme le rapport entre les forces moyennes des cycles ELS avant et après ELU. Ces deux valeurs sont représentées sur le graphique 3.34b et le rapport peut être exprimé comme $Force_{moy,1}/Force_{moy,2}$. Comme indiqué, les cycles de placement ne sont pas pris en compte.



(a) Position des éléments considérés pour le ratio d'entrée en plasticité (b) Position des éléments considérés pour le ratio de dégradation

FIGURE 3.34 – Représentation des facteurs d'entrée en plasticité (06 Epicéa)

Nous pouvons alors représenter ces deux valeurs pour l'ensemble des 30 grumes testées et obtenir le graphique 3.35. La plupart des grumes ont été testées avec une flèche court

terme de $L/350$ (points bleus), mais certaines ont été testées avec $L/300$ (points oranges). Cette différence induit directement une entrée en plasticité plus importante et donc une dégradation de la grume, elle aussi, plus élevée. Même si les grumes sont d'essences différentes et d'élancement variés, une tendance linéaire globale peut s'observer.

Cela peut sembler intuitif qu'une dégradation soit linéairement liée à une entrée en plasticité, mais l'avantage ici est que nous pouvons chiffrer cette relation. Ce graphique nous sera alors très utile pour décrire un critère d'exclusion dans la section 3.6.

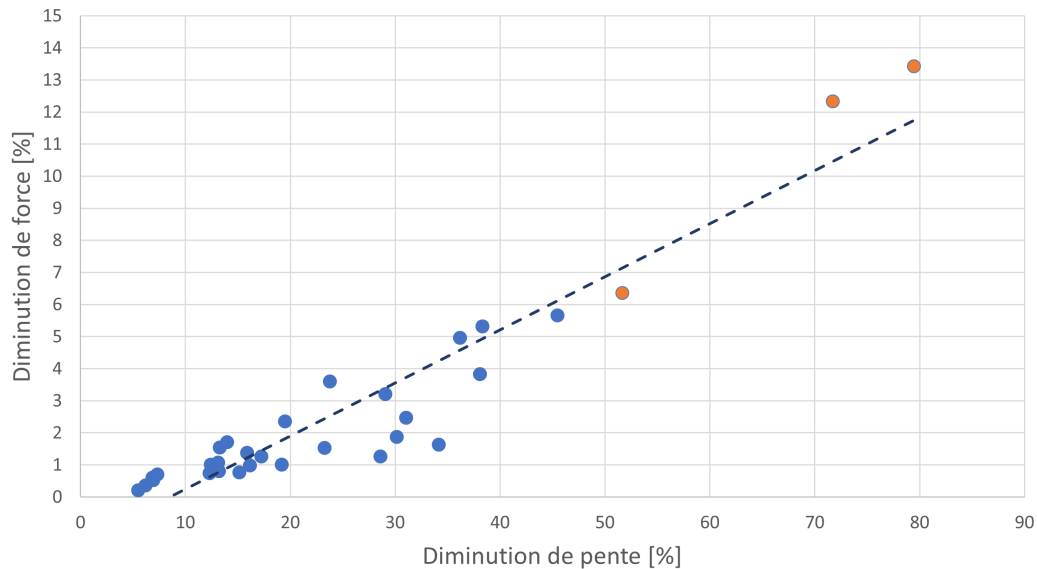


FIGURE 3.35 – Analyse de la diminution de résistance suite à une entrée en plastification.

Impact du tassement et de la rotation sur les essais

Pour rappel, le tassement et la rotation de la grume sont mesurés par 4 LVDT's placés en bout de grume. Il nous faut vérifier maintenant si ces mesures restent utiles dans une approche de protocole industriel.

Premièrement, nous allons analyser le tassement moyen et la rotation moyenne en fonction de la force moyenne appliquée avant et après ELU. Comme pour le point précédent, les moyennes ne prennent pas en compte les cycles de placement. De plus, la valeur "0" de tassement est tarée sur le début du premier cycle. En considérant l'ensemble des grumes, nous pouvons réaliser les deux graphiques de la figure 3.36.

On observe qu'il y a globalement une tendance linéaire pour le tassement que l'on soit avant ou après le cycle ELU. Ceci n'est pas du tout vrai pour la rotation. Dans certains cas, le cycle ELU va empirer la rotation, et dans d'autres cas, cela va même la diminuer. Il est intéressant de remarquer que pour le tassement, l'influence du cycle ELU s'exprime comme une diminution de la pente de la tendance linéaire.

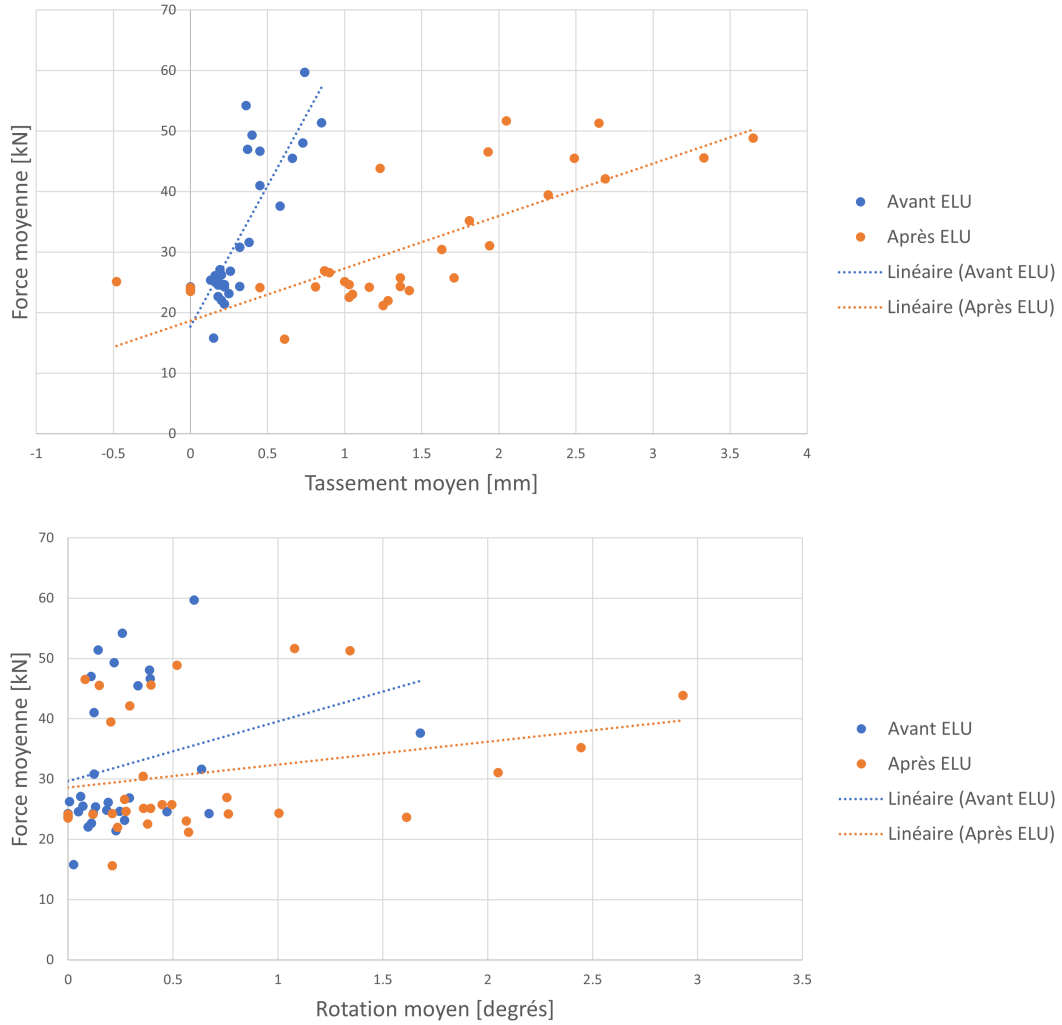


FIGURE 3.36 – Analyse de l’impact du cycle ELU sur le tassement et la rotation des grumes

Deuxièmement, nous allons considérer la proportion de la flèche qui est due au tassement. En effet, lors de l’application de la force du vérin sur la grume, une partie de la flèche mesurée provient du tassement. Nous exprimons alors cette proportion de tassement comme le ratio : $Tassement_{moy,2}/\delta_{ELS,CT}$ ²¹. La moyenne de ce ratio peut alors être représentée pour chaque essence à la figure 3.37.

Évidemment, cette valeur dépend de l’élancement et comme l’épicéa a un élancement plus faible, son tassement sera globalement plus important. Nous observons que les proportions de tassement du peuplier et du tsuga sont par contre très proches.

Il y a donc un lien direct entre le tassement et l’élancement. Ceci sera alors important à prendre en compte dans la description du protocole final.

21. Le "2" indique que nous prenons uniquement la valeur après ELU car c’est la plus élevée.

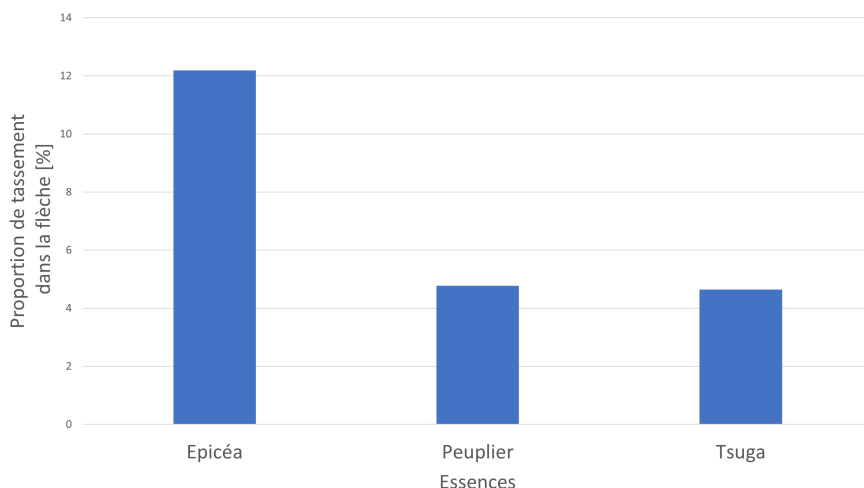


FIGURE 3.37 – Analyse de la proportion de tassement par rapport à la flèche

Évolution de E_g après le chargement ELU

Le cycle ELU va avoir un réel impact sur la résistance de notre matériau bois. La question à laquelle nous devons alors répondre est : *lors des cycles ELS après ELU, le bois va-t-il continuer à se dégrader ou bien va-t-il se stabiliser vers un nouvel état ?*

Cette question est essentielle car il faut s'assurer que la grume aura un comportement stable dans le temps une fois mise en œuvre. Une manière de répondre à cette question est d'analyser l'évolution et la variation des cycles de E_g après ELU. La figure 3.38a représente l'évolution de E_g au cours des cycles avec comme référence le cycle 1.

On remarque rapidement que pour les cycles avant ELU, il y a une stabilisation autour de l'unité. Cela semble logique au vu du faible chargement que nous appliquons. Après ELU, il semble que nous soyons plus dans une augmentation lente et progressive de E_g . Une autre manière de représenter cela est de considérer chaque point par rapport à la moyenne du point précédent (figure 3.38b). Les deux cycles ELS (avant et après ELU) sont évidemment indépendants l'un de l'autre pour ces moyennes. Ainsi pour un cycle i , nous appliquons la moyenne suivante²² :

$$\left(\frac{E_i}{\sum_{k \leq j < i} E_j / (i - k)} - 1 \right) \cdot 100 \quad (3.23)$$

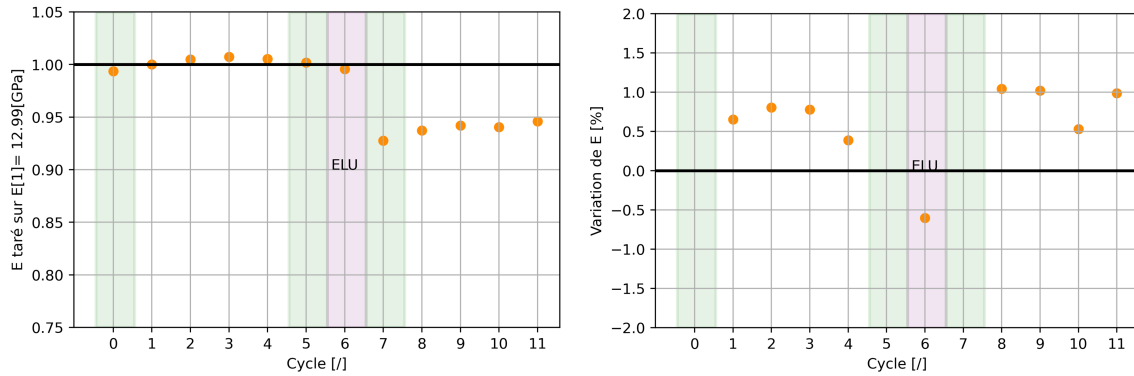
Avec :

i = l'indice du cycle à déterminer.

k = l'indice du cycle de placement, avant ou après ELU, considéré (0 ou 7 dans l'essai type)

Ainsi, dans le cas de la grume 06 (figure 3.38b), l'ensemble des points (à l'exception du cycle ELU), sont supérieurs à 0. Cela signifie que les valeurs de E_g sont globalement en constante évolution.

22. La soustraction de 1 et la multiplication par 100 nous permet simplement d'obtenir un pourcentage commençant à 0.



(a) Variation de E au cours des cycles tarés sur le cycle numéro 1 (b) Variation de E par rapport à la moyenne des précédents cycles

FIGURE 3.38 – Graphiques représentant l'évolution et la variation de E_g au cours des cycles (06 Épicéa)

À cette étape, nous nous sommes alors posé une question : *L'augmentation globale est vraie pour 5 cycles mais est-elle vraie pour 50 cycles ?*

Pour répondre à cette question, nous avons décidé de réaliser un essai avec 50 cycles avant et après l'ELU. Les résultats sont représentés aux figures 3.39a et 3.39b. Pour l'évolution de E_g (figure 3.39a), les constatations sont globalement similaires aux essais à 5 cycles : avant ELU il y a une stabilisation de E_g aux alentours de l'unité et après ELU, nous observons une augmentation continue qui ne semble pas s'arrêter. La variation 3.39b quant à elle va apporter des informations supplémentaires.

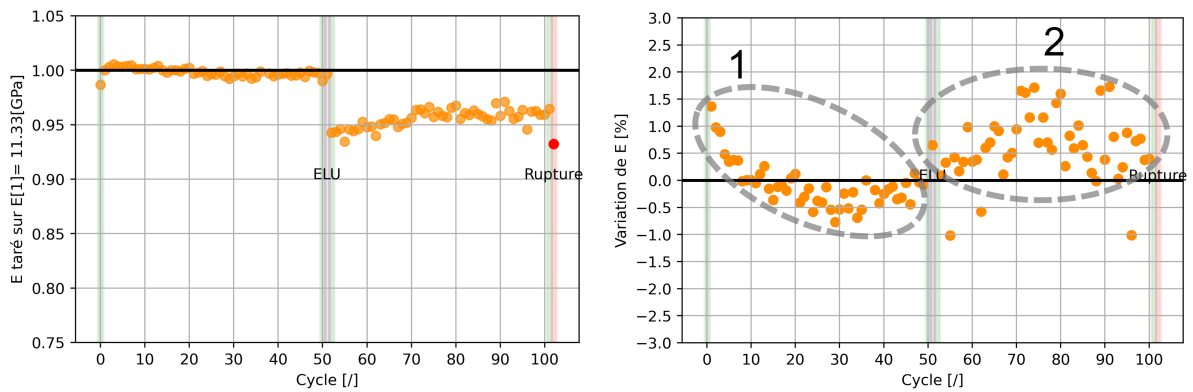
Deux zones semblent se dégager de ce graphique :

1. Avant ELU, les points sont très regroupés, cela semble indiquer une certaine homogénéité dans le matériau. Les 10 premiers cycles semblent montrer une évolution de E_g par rapport à la moyenne mais à partir du 20^{ième} cycles, l'ensemble des points sont inférieurs à 0. Cela indique donc une diminution globale de E_g par rapport à sa moyenne. Cette diminution est en réalité tellement faible, que nous pouvons la considérer comme une stabilisation.
2. Cette zone, après l'ELU, est celle qui va le plus nous intéresser. Comme attendu, la grande majorité des points sont supérieurs à 0 et caractérise donc une évolution constante. Il est intéressant de remarquer que, par rapport à la zone 1, les points sont plus disparates. Cela indique d'une certaine manière la dégradation du matériau suite au cycle ELU. Comme précisé précédemment, nous avons l'impression que cette évolution de E_g semble ne pas finir, il serait alors intéressant de réaliser de nouveau essais avec plus de 50 cycles afin d'observer si une stabilisation peut se remarquer après un grand nombre de cycles²³.

Notons que même si les variations sont de l'ordre du pourcent, ceci nous aide à comprendre l'impact du cycle ELU sur le comportement global de la grume.

En plus de cette analyse sur 50 cycles, nous pouvons vérifier si cette tendance d'augmentation est observable pour l'ensemble des grumes.

23. Il est important de se rendre compte que des essais de cette envergure prennent du temps. À titre d'exemple, l'essai de 50 cycles nous a demandé 4h pour la mise en place, les préparations et l'essai.



(a) Evolution de E_g au cours des cycles tarés (b) Variation de E_g par rapport à la moyenne des précédents cycles

FIGURE 3.39 – Graphiques représentant l'évolution et la variation de E_g au cours des cycles pour la grume 04 d'épicéa

Pour ce faire, nous reprenons les 4 valeurs de variation de E_g des cycles après l'ELU sans prendre en compte le cycle de placement. Par exemple, pour un essai type comme représenté sur la figure 3.38b, nous reprenons les résultats des cycles 8, 9, 10 et 11. Nous représentons alors graphiquement pour chaque essence, sur la figure 3.40, l'évolution de la moyenne de E_g lorsque l'on ajoute les données apportées par le cycles suivant.

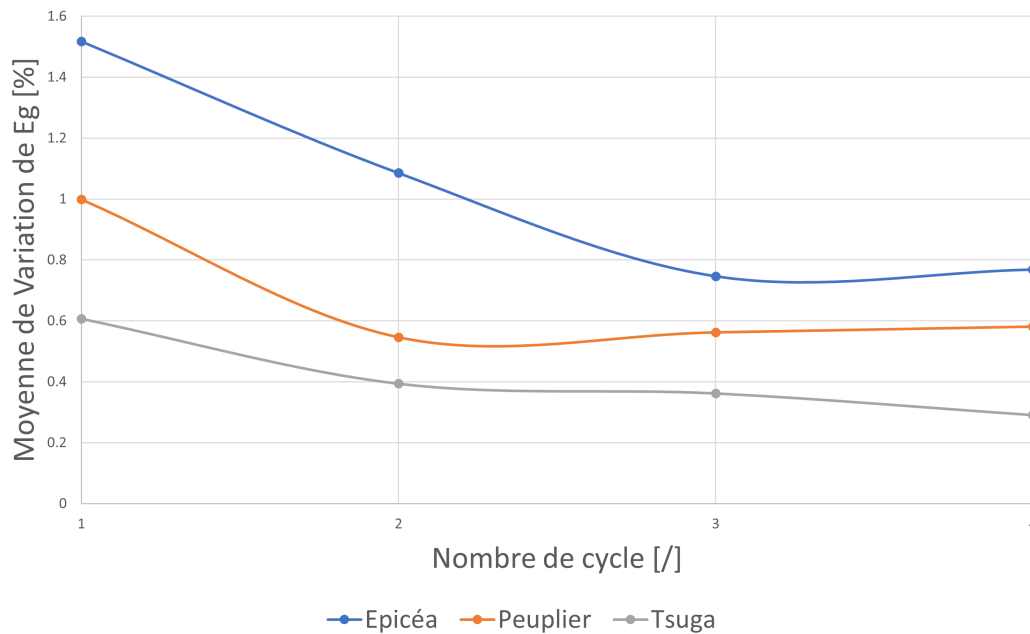


FIGURE 3.40 – Moyenne des variations de E_g pour l'ensemble des grumes

On observe que cette tendance est globalement présente car les valeurs sont supérieures à 0 et semblent se stabiliser au fur et à mesure. Il est intéressant de noter qu'il paraît y avoir une certaine différence entre les essences.

3.5.3 Analyse supplémentaire et comparaison

Comparaison des modules de Young

En plus de ces analyses sur le comportement des grumes, il peut être intéressant de faire la comparaison entre les valeurs du module de Young global que nous obtenons avec celles fournies par l'Eurocode en fonction du classement visuel et les valeurs obtenues par V. HOUBEN[10] dans son mémoire.

Après avoir calculé le module de Young global pour tous les individus d'une essence, il est possible de les comparer entre eux au moyen d'une loi normale. Cela nous permettra aussi de déterminer les valeurs caractéristiques des modules. Même si le but de notre travail est de pouvoir caractériser les grumes par individu, il peut être utile d'établir le caractère global des résultats et de vérifier si ceux-ci concordent avec les valeurs usuelles. De plus, cela nous permettra de réaliser un lien avec les classements visuels. L'utilisation d'une loi normale n'a pas beaucoup d'intérêt scientifique mais elle permet d'obtenir une représentation visuelle des résultats.

Pour créer ce graphique, il nous faut déterminer deux valeurs importantes en statistique : l'écart type et la moyenne. Les recommandations de la norme NBN EN 14358[57], nous proposent d'utiliser une distribution "log-normal" décrite ci-dessous :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (3.24)$$

$$s_y = \max \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}; \quad 0.05 \cdot \bar{y} \right) \quad (3.25)$$

À partir de là, il ne nous reste plus qu'à utiliser la formule de densité exprimée comme suit :

$$f(y, \bar{y}, s_y) = \frac{1}{y \sqrt{2\pi s_y^2}} \exp \left(- \frac{(\log(y) - \bar{y})^2}{2s_y^2} \right) \quad (3.26)$$

avec :

m_i = Valeur d'essai individuelle i de la variable aléatoire m

$\bar{y}$ = La valeur moyenne du paramètre

y = Une valeur d'abscisse de la distribution

s_y = L'écart type de la distribution

Il suffit alors de faire varier la valeur de y entre 4 et 14²⁴ [GPa], pour voir se dessiner la courbe normale (figure 3.41). Les valeurs du module de Young ont été séparées en trois catégories : celles obtenues pour la première série de cycles ELS, pour les cycles ELU et pour la seconde série de cycles ELS.

Pour les épicéas, nous obtenons alors les résultats présentés dans la table 3.5. Il est évident qu'avec seulement 10 grumes, une réelle étude statistique ne peut pas être menée. Ceci n'est donc qu'une première indication quant aux valeurs possibles. Les courbes normales pour les peupliers et tsugas se trouvent en annexe F.

24. Écart possible des valeurs du module de Young. Identique à toutes les grumes afin d'avoir le même effet d'échelle.

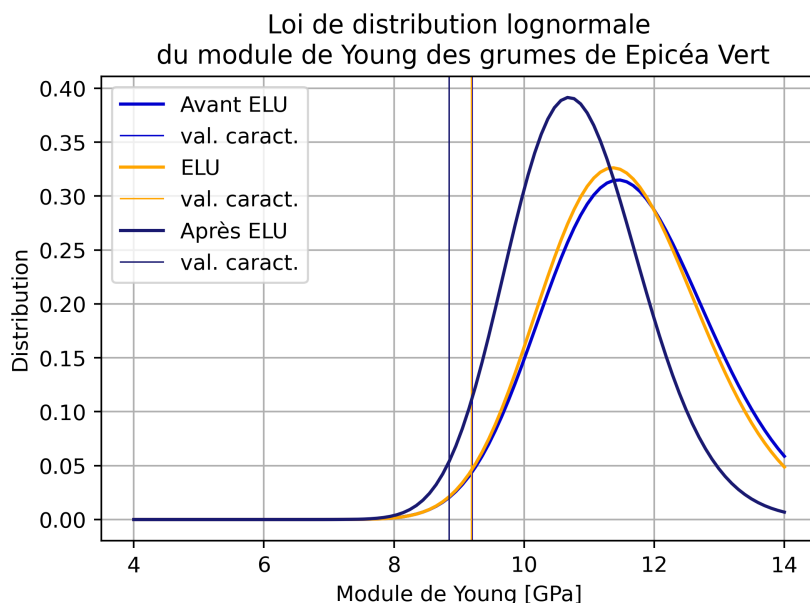


FIGURE 3.41 – Distribution normale du module de Young en flexion pour les épicéas à l'état vert

	Avant ELU	ELU	Après ELU
Valeurs moyennes de E [GPa]	11.64	11.55	10.82
Valeurs caractéristiques de E [GPa]	9.2	9.19	8.84

TABLE 3.5 – Valeurs moyennes et caractéristiques du module E obtenues sur les grumes d'épicéa

Si nous nous intéressons uniquement à la valeur moyenne, nous pouvons créer le tableau 3.6 afin de comparer les modules de Young globaux moyens obtenu par différentes méthodes. Les modules statiques sont ceux obtenus lors des essais en flexion présentés dans ce mémoire. Les modules dynamiques, quant à eux, sont calculés par V. HOUBEN à l'aide du Grindosonic dans son mémoire[10]. Les modules statiques et dynamiques ont été calculés avant et après les cycles ELU. L'avant dernière colonne nous donne l'estimation du module moyen qui a été déterminé en utilisant la norme de classement visuel allemande[38], la norme liant les classes visuelles allemandes et les classes de résistance européennes[40], et la norme européenne faisant le lien entre classe de résistance et module de Young[8]. Enfin, nous comparons également nos valeurs expérimentales avec celles fournies dans la littérature (section 2, tableau 2.3)

Notons que la norme allemande faisant le lien avec les résistances européennes ne considère que de résineux ; nous ne pouvons donc pas faire le lien avec le peuplier. De plus, nous utilisons le module de Young comme référence au lieu de la résistance tel que fait par les normes. Celle-ci est difficilement quantifiable pour nous suite à la conicité des grumes.

Globalement, on observe que les modules de Young dynamiques et statiques sont relativement semblables et ceci, peu importe l'essence. Cela nous conforte quant à nos résultats et notre approche du calcul du module. Les valeurs issues des normes sont quant à elles beaucoup moins proches de nos valeurs expérimentales. Cela signifie clairement

que l'utilisation d'un classement visuel seul n'est pas une approche suffisante pour la caractérisation précise d'une grume.

Hormis pour le tsuga, les valeurs expérimentales sont toujours supérieures aux modules caractéristiques. Cela nous paraît logique car les valeurs caractéristiques sont des données statistiques avec une grande marge de sécurité. Pour comparer les valeurs du tsuga, nous avons utilisé les données du douglas qui est une essence proche de ce dernier. Cette différence peut provenir de là.

	Modules avant ELU [GPa]		Modules après ELU [GPa]		Modules normes visuelles [GPa]	Modules caractéristiques (tableau 2.3) [GPa]
	Dynamique	Statique	Dynamique	Statique		
Epicéa	11,50	11,61	11,49	10,80	8	9,5 - 11
Tsuga	9,21	8,9	9,46	8,86	11,1	10,4 - 12
Peuplier	10,17	10,39	10,17	10,19	/	7 - 9

TABLE 3.6 – Tableau récapitulatif des modules de Young globaux obtenus lors des essais statiques, dynamiques et estimés par les normes.

Une comparaison avec les tableaux utilisés par la société TTTProducts (figure 3.10) aurait pu être réalisée mais elle n'a pas beaucoup de sens. En effet, comparer différentes essences venant de différents pays n'est pas très utile. Il est par contre intéressant d'observer que presque la totalité de nos modules se situe entre les valeurs de densité normale ($8.7[GPa]$) et haute ($12.1[GPa]$) qu'ils utilisent.

Analyse des essais à la rupture

Sur les 30 grumes testées, une grume de chaque essence a été menée à la rupture (grume 04 d'épicéa, 01 de peuplier et 10 de tsuga). Il est assez complexe de tirer une conclusion avec seulement trois essais, mais par contre il est intéressant d'analyser les valeurs de ruptures que nous obtenons et de les comparer à la valeur ELU à laquelle nous les soumettons.

En analysant ces trois essais, nous pouvons créer le tableau 3.7.

Essences	Epicéa	Tsuga	Peuplier
$F_{ELU}[kN]$	167.76	82.48	79.12
$F_{rupt}[kN]$	213.29	128.02	145.09
Rapport $F_{ELU}/F_{rupt}[\%]$	79	64	54
$f_{m,rupt}[MPa]$	54.81	35.48	40.21
$f_{m,k}[MPa]$ (tableau 2.3)	42 - 71	53 - 85	37 - 65

TABLE 3.7 – Analyse des forces ELU et de rupture pour les grumes d'épicéa 04, de tsuga 10 et de peuplier 01.

On remarque que l'épicéa est le plus proche de la force à la rupture contrairement au tsuga qui lui est relativement loin. On a un facteur de sécurité qui varie de 1.25 à 1.85. Étant donné que le bois est un matériau qui présente une grande diversité, il est important de se

demander si de telles valeurs de coefficient de sécurité sont suffisantes. Il serait alors intéressant de mener d'autres grumes à la rupture afin d'amener plus de poids à ces conclusions.

Dans ce tableau, nous avons également placé les contraintes de résistance caractéristique de chaque essence que nous avons introduites dans le chapitre 2. En les comparant avec nos valeurs de contrainte, nous observons que pour la grume d'épicéa et celle de peuplier, leur résistance maximale est bien dans l'intervalle fourni par la littérature. Ces valeurs semblent plus proches de l'état vert de l'essence que de l'état sec. Mais concernant le tsuga, la valeur résistante déduite est inférieure à l'intervalle apporté par la littérature. Au vu de nos observations sur les tableaux 3.6 et 3.7 nous pouvons penser que le lot de tsuga, que nous avons testé, était de mauvaise qualité.

3.6 Proposition d'un protocole industriel

À la suite de nos recherches, nous sommes en mesure de proposer un **protocole industriel** pour caractériser mécaniquement et de manière non-destructive des grumes.

L'idée de ce protocole serait alors la suivante (figure 3.42) :

- tout d'abord, un pré-classement visuel. Celui-ci serait basé sur les normes existantes mais de façon beaucoup moins sévère. Il permettrait surtout d'éliminer les grumes qui possèdent des défauts très graves ;
- ensuite, un second classement utilisant les méthodes IET. Comme expliqué plus haut, les résultats du mémoire de V. HOUBEN[10] sont relativement proches des résultats obtenus lors des essais en laboratoire. Ceci permettrait de détecter directement les grumes de mauvaise qualité et ainsi d'éviter de les usiner, de les sécher et de les tester pour rien ;
- les grumes qui ont passé ces pré-classements seront alors séchées et usinées en fonction de leur utilisation prévue ;
- après cela, viendra le protocole mécanique. Sa description complète est présentée à la section suivante ;
- enfin, les grumes pourront être envoyées sur chantier et mises en œuvre.

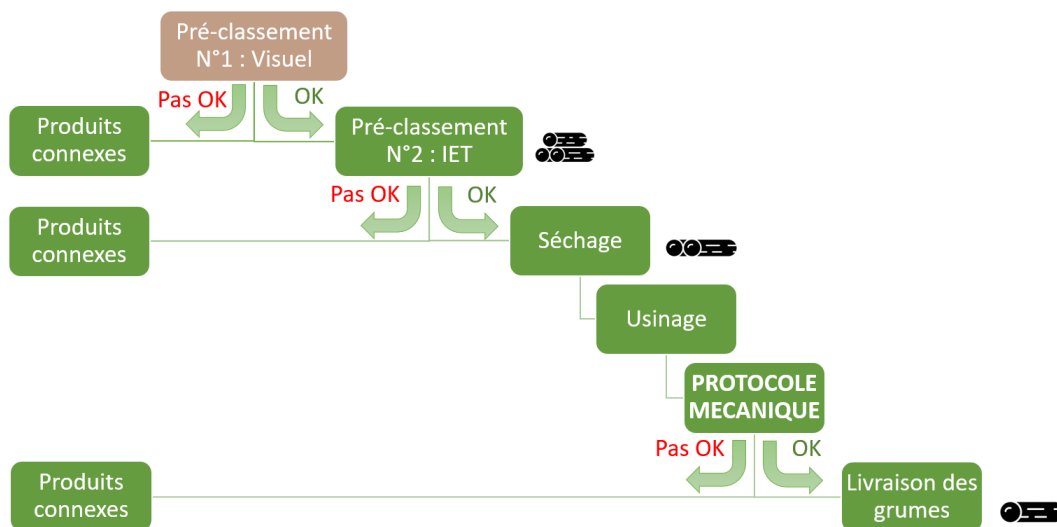


FIGURE 3.42 – Déroulement du protocole de classement d'une grume

3.6.1 Protocole mécanique

Afin de définir le protocole, il faut déterminer d'une part le banc d'essai et d'autre part le déroulement de l'essai.

Le banc proposé est le suivant :

- un banc en flexion 4 points avec les appuis centraux en $L/3$;
- l'utilisation unique d'un laser afin d'observer la flèche centrale. En effet, en mesurant les tassements, nous avons remarqué que selon l'élancement, le tassement pouvait être négligeable. Ainsi, des LVDT's et des potentiomètres ne seront pas nécessaires ;
- tel que les essais en flexion réalisés par TTTProducts présentés plus haut (section 3.2.4), nous proposons que l'application des forces sur la travée centrale soit effectuée de bas en haut. Cela évitera des manœuvres complexes à cause du portique qui maintient le vérin.

Le déroulement proposé est globalement identique à celui réalisé en laboratoire mais deux modifications ont été apportées.

- **Limiter le nombre de cycles ELS en observant la stabilisation de E_g .** Nous avons remarqué que les valeurs de E_g des cycles ELS, avant et après ELU, avaient tendance à augmenter et ensuite à se stabiliser.

L'idée serait alors d'arrêter les cycles ELS une fois que la valeur de E_g calculée se soit stabilisée. La stabilisation que nous proposons serait représentée par une variation inférieure à 0.8% du nouveau E_g par rapport à la moyenne de ses précédents. Cette valeur de 0.8% est issue de l'observation du graphique 3.40 et assure qu'en moyenne E_g est stable après le troisième cycle (hors placement).

Notons qu'une limite de cycle inférieur et de cycle supérieur sont posés respectivement à 2 (1 Placement + 1 ELS) et 7. Ces valeurs sont pour l'instant arbitraires et mériteraient d'être mieux déterminées.

- **Arrêter le cycle ELU si une entrée en plasticité est observée.** Comme discuté dans la section 3.5.2, plus une diminution de la pente est observée lors du cycle ELU, plus nous avons un risque de dégradation de la grume. Celle-ci est déterminée par la diminution de la résistance avant et après ELU.

Il est évident qu'une légère diminution de la résistance est acceptable ; il est par contre inacceptable pour la scierie de trop dégrader la grume et de ne plus savoir la valoriser si elle est déclassée. Ainsi, en suivant le comportement global représenté à la figure 3.43, si nous considérons qu'une diminution de la résistance de 10% est le maximum acceptable, nous pouvons limiter la diminution de la pente à 70%. Autrement dit, si la pente diminue de plus de 70%, le protocole est stoppé à ce moment-là afin de ne pas trop dégrader la grume. Pour rappel, les points orange représentent les grumes qui ont été menées à $L/300$ où une entrée en plasticité forte avait été observée.

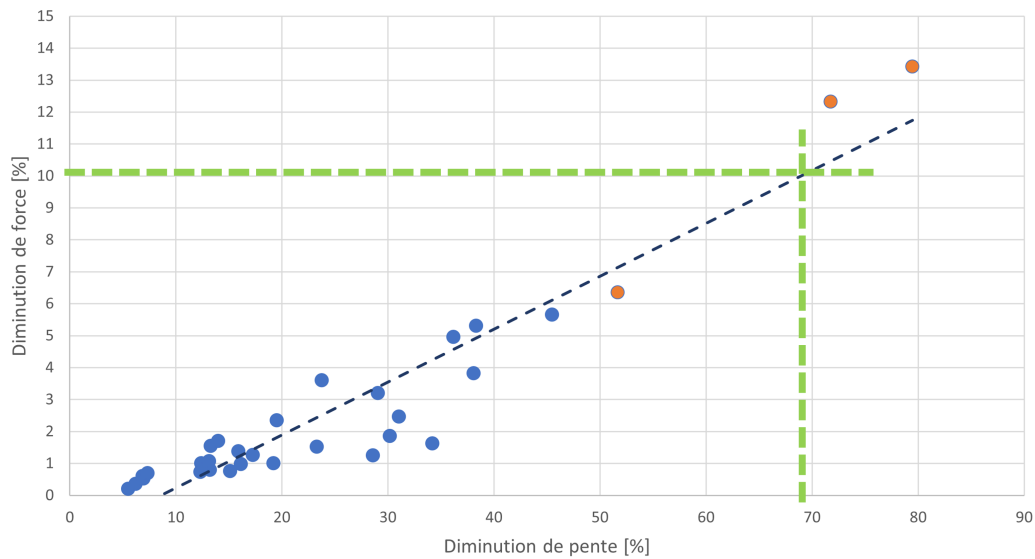


FIGURE 3.43 – Analyse de l'entrée en plasticité en imposant un critère d'exclusion

Diagramme décisionnel du protocole mécanique

Afin de représenter le cheminement complet, voici un diagramme décisionnel reprenant l'ensemble des prises de décisions et des choix possibles lors de l'essai. À l'instar des certificats délivrés par TTTProducts, nous proposons de délivrer un document pour chaque grume testée. Une première ébauche utilisée pour les essais en laboratoire se trouve à l'annexe D.

Ainsi dans cet essai, nous retrouvons :

- les 4 paramètres d'entrées nécessaires à définir l'essai ($\mu, \omega, \delta_{ELS,CT}, \delta_{ELS,LT}$) ;
- les cycles de placements permettant de bien positionner la grume sur ses appuis ;
- les cycles ELS avec les conditions d'exclusion si la grume n'est pas assez stable ;
- la mesure de F_{ELU}^{prot} et $F_{ELS,LT}^{prot}$ lors de la montée à l'ELU ;
- le calcul de $F_{ELS,CT}^{prot}$ et $F_{ELS,CT(LT)}^{prot}$ à la fin de l'essai ;
- la vérification de la concordance entre les valeurs définies dans le projet et les valeurs obtenues lors de l'essai ;
- si la grume est acceptée, ces valeurs seront ajoutées dans un abaque de prédimensionnement afin de l'affiner.

Sur les grumes que nous avons testées, toutes auraient été acceptées à l'exception des grumes 05 et 10 d'épicéa qui ont trop plastifiés.

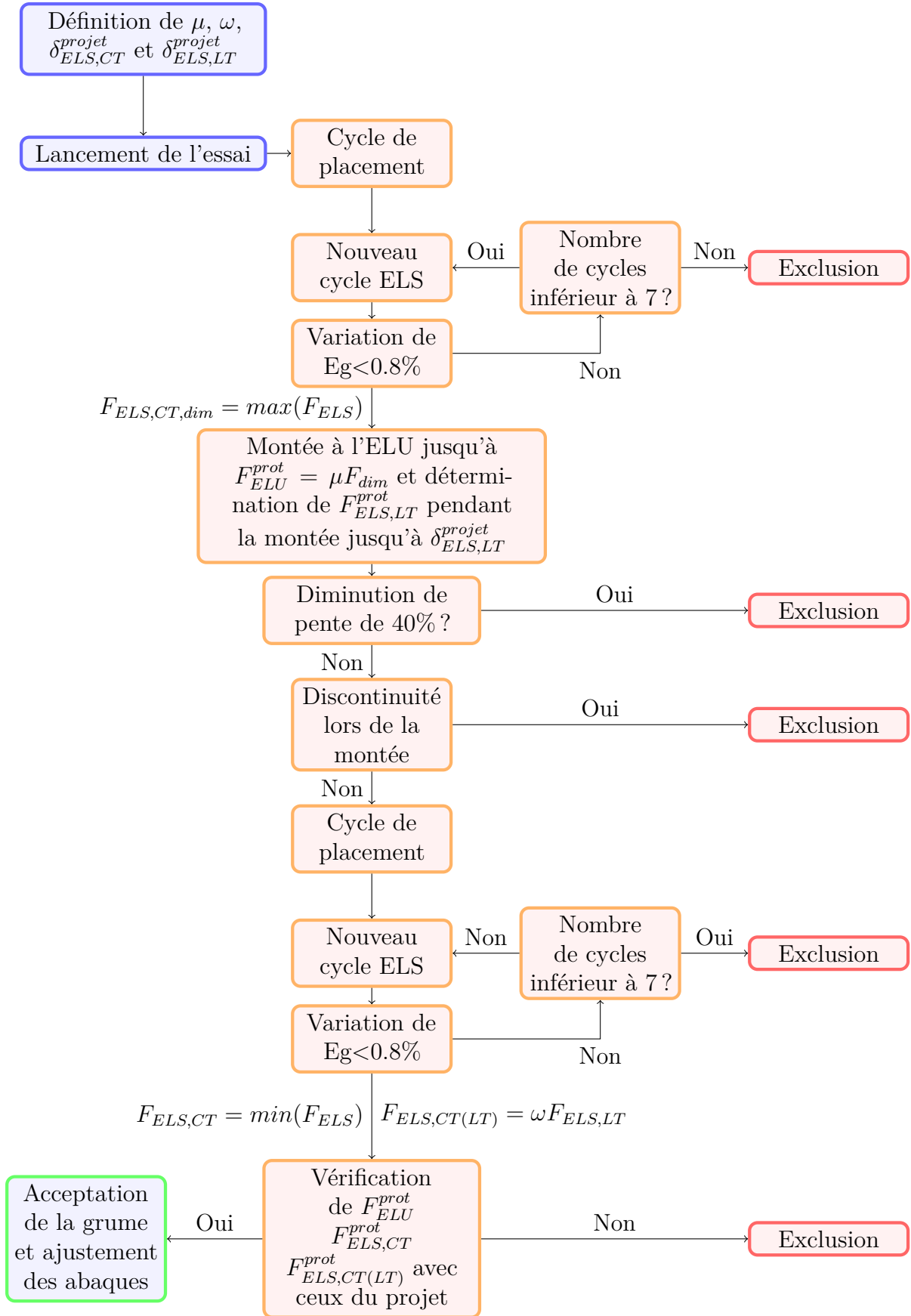


FIGURE 3.44 – Diagramme décisionnel proposé pour les essais en flexion

3.6.2 Améliorations possibles

Nombreuses sont les améliorations possibles à ce protocole. En voici une liste non-exhaustive :

- augmentation de la vitesse de chargement afin de diminuer le temps total ;
- maintien des charges maximales durant une durée de quelques secondes ;
- modifier les bornes inférieures et supérieures du nombre de cycles ELS ;
- créer un réel abaque de prédimensionnement ;
- réaliser des essais de flexion à l'état sec ou avec plus de cycles afin de mieux déterminer le comportement des grumes.

De plus, il sera important dans le futur de tester et d'utiliser d'autres essences afin d'en choisir les meilleurs. Nous avons vu qu'en général, les épiceas se comportent très bien et donnent de bons résultats. Malheureusement, ils constituaient déjà 82% de l'approvisionnement en résineux en 2020 [7].

Dans l'optique de diversifier les essences utilisées, il serait intéressant d'analyser d'autres essences moins employées et de préférence des feuillus afin de diminuer la pression actuelle sur les forêts de résineux [[7][5]].

3.7 Exemple de dimensionnement pour un projet

À titre d'exemple, nous allons réaliser un dimensionnement simple qui pourrait être réalisé par un bureau d'étude afin de valider notre travail.

Imaginons qu'un bureau d'étude désire réaliser un système poteau-poutre utilisant des grumes. Il souhaite utiliser des grumes d'épicéa et à l'aide d'un abaque de prédimensionnement, ils déterminent que les données du projet sont les suivantes :

- longueur de grume de 6.5m ;
- distance entre grume de 2.4m ;
- chape en béton de 10cm d'épaisseur avec $25[kN/m^3]$;
- charge d'exploitation de $2,5[kN/m^2]$;
- estimation du poids de la grume de $1[kN/m]$;
- utilisation de $k_{def} = 1.6$ et $\psi_2 = 0.3$;
- flèche court terme et long terme respectivement de $L/350$ et $L/250$.

Les combinaisons ELU et ELS court-terme peuvent alors être calculées :

- Combinaison ELU = $13.2[kN/m]$
- Combinaison ELS court-terme = $9.5[kN/m]$
- Combinaison ELS long-terme = $21.9[kN/m]$

Ces valeurs représentent respectivement $F_{ELS,CT}^{proj}$, $F_{ELS,LT}^{proj}$, F_{ELU}^{proj} . Les autres impositions sont alors la flèche court terme et long terme $\delta_{ELS,CT}^{proj} = 18.5mm$ et $\delta_{ELS,LT}^{proj} = 13mm$.

Le bureau d'étude envoie donc ces 5 valeurs à la scierie. Il doit également communiquer les valeurs de μ et ω selon son projet. Nous utilisons alors les abaques de μ et ω et

en considérant $l = 26\%$,²⁵, nous déterminons $\omega = 0.43$ et $\mu = 2.25$.

Ces informations sont alors envoyées à la scierie. La scierie passe commande à l'exploitant forestier qui livre les grumes d'épicéas.

Après séchage et usinage, la scierie teste la grume. Nous prenons alors comme exemple la grume d'épicéa 06²⁶ :

Pour une flèche de $L/350$, la grume développe une résistance maximale de $10.38[kN/m]$ avant ELU. Grâce à la valeur de μ , nous déterminons alors $F_{ELU}^{prot} = 10.38 \cdot \mu = 23.35[kN/m]$. Nous amenons alors la grume à cette contrainte et nous vérifions si elle résiste. Si c'est le cas et qu'il n'y a aucune rentrée en plasticité qui est observée, alors nous continuons l'essai. Lors de cette montée, nous mesurons la valeur de $F_{ELS,LT}^{prot} = 14.66[kN/m]$ lorsque la flèche atteint δ_{LT}^{roj} .

On soumet à nouveau la grume à une flèche de $L/350$. La valeur de la résistance a diminué et vaut à présent $F_{ELS,CT}^{Prot} = 9.77[kN/m]$.

On a alors obtenu toutes les infos qu'il nous fallait et le tableau 3.8 les résume.

Données	Projet	Protocole	Valable
$F_{ELU}[kN/m]$	13.2	22.08	✓
$F_{ELS,CT}[kN/m]$	9.5	9.77	✓
$F_{ELS,LT}[kN/m]$	21.9	14.66	✗

TABLE 3.8 – Synthétisation des résultats du protocole

Nous observons que la grume est validée pour le chargement court terme et la charge ultime. Cependant, elle fait défaut en ce qui concerne le chargement long terme. C'est en partie dû à la valeur importante de $k_{def} = 1.6$. Si nous avions considéré une valeur plus faible comme $k_{def} = 0.6$, nous aurions obtenu $F_{ELS,LT} = 14.15[kN/m]$ et la grume aurait été validée. Il est donc important de considérer correctement le comportement long-terme des grumes.

Notons que la valeur de $F_{ELS,CT(LT)}$ n'a pas été utilisée ici afin d'être totalement en concordance avec un dimensionnement type comme décrit dans l'Eurocode5 [1].

25. Le facteur l représente la proportion de chargement variable dans $F_{ELS,CT}^{Proj}$

26. Son PDF se trouve en annexe D

CHAPITRE 4

ESSAIS DE FLUAGE SUR ÉPROUVETTES ÉQUARRIES

Ce chapitre est dédié à l'étude du comportement du bois soumis à une charge constante pendant une longue durée. Nous allons parcourir la littérature existante à ce sujet afin de comprendre quels sont les paramètres importants lors de tels essais. Cela va nous permettre d'établir un protocole efficace pour étudier le comportement du matériau sur des éprouvettes de bois. Ces expériences sont les premières ébauches d'une approche au long terme que nous voulons étudier sur les grumes.

Le premier objectif de ce chapitre est de réaliser une comparaison entre les valeurs théoriques de k_{def} fournies dans l'Eurocode 5 [1] et celles que nous allons déduire expérimentalement. Ce coefficient est une valeur clé pour notre protocole mécanique sur grume, car grâce à lui, nous en déduisons le comportement dit "long terme" du bois.

Pour réaliser une première approche expérimentale sur le comportement au fluage du bois, nous réalisons des essais sur des petites éprouvettes en flexion 4 points. Nous réfléchissons également à adapter facilement le banc expérimental afin de réaliser des essais de compression. Cette seconde étude est capitale pour comprendre comment agira une grume au niveau de ses appuis lorsqu'elle sera utilisée dans un ouvrage réel poteau-poutre.

4.1 Objectif et contexte des essais de fluage

Notre mémoire s'inscrit dans l'optique des constructions composées de grumes de bois de dimensions et résistances diverses. Dans le chapitre précédent, nous nous sommes principalement intéressés au comportement instantané des grumes via des essais de chargement en flexion. Nous avons proposé également un coefficient ω qui fait une liaison directe entre une charge court terme et long terme. Dans son équation (3.11), nous observons la présence d'un facteur k_{def} . Il est fourni par l'Eurocode et permet de caractériser le comportement au long terme du bois. L'objectif de ce chapitre est de déterminer ce coefficient de façon expérimentale et d'en déterminer les facteurs qui peuvent le faire fluctuer.

Le secteur de la construction vise à créer des projets durables. Voilà pourquoi nous nous devons de comprendre le comportement du bois et en particulierité celui des grumes qui vont subir des charges constantes et variées tout au long de leur vie. Quelle sera l'influence d'une modification de l'humidité de l'air ? Est-ce qu'une grume conserve ses caractéristiques mécaniques établies juste après son abattage si la température fluctue ?

L'objectif général des essais de fluage est donc d'apporter une extension au protocole non destructif de détermination des caractéristiques mécaniques des grumes en tenant compte du long terme. Notre travail est à considérer comme une première approche du phénomène du fluage. En effet, en une année universitaire, il est peu envisageable de réaliser tous les tests de fluage possibles afin d'établir totalement le protocole de caractérisation. Notre travail sert donc de base dans l'optique d'être poursuivis plus tard.

Des essais de fluage sur grumes peuvent poser différents problèmes d'un point de vue pratique et organisationnel. Tester des éléments de 8 mètres de long et de 35 centimètres de diamètre pendant plusieurs mois, sous de lourdes charges constantes, semble très complexe. Cette combinaison de besoin d'espace et de temps rend le protocole compliqué et difficile à mettre en place au LEMSC. C'est la raison principale pour laquelle nous allons d'abord réaliser des essais sur des éprouvettes de petites dimensions qui ont été prélevées sur les grumes. Cela nous permettra de déterminer les éléments à contrôler.

Via la littérature existante et nos essais, nous allons essayer de comprendre le comportement des éprouvettes et l'influence des différents paramètres variables. Nous nous intéressons particulièrement à l'influence de la charge appliquée ainsi qu'aux variations de température et d'humidité des éprouvettes. Ici, nous pouvons noter l'avantage considérable d'utiliser des éprouvettes à la place des grumes. Il sera évidemment plus simple et plus rapide de modifier et d'analyser le taux d'humidité ou la température d'un petit échantillon plutôt que ceux d'une grume de plusieurs mètres.

4.2 État de l'art

Le fluage est un phénomène qui se traduit par une augmentation de la déformée d'un élément dans le temps en fonction de son environnement sous un chargement continu. Il est induit par deux comportements caractéristiques du bois : la viscoélasticité et la mécanosorption. Pour les analyser, nous réalisons par le biais de ce chapitre une revue de la littérature qui explique et démontre en détails tous les facteurs qui participent au fluage du bois. Celui-ci peut être calculé via la complaisance du bois et nous verrons comment la déduire de nos essais. Enfin, nous analysons la façon dont l'Eurocode 5 dimensionne les éléments pour contrecarrer le phénomène de fluage. Cela nous permettra de nous référer à une base solide pour comparer et comprendre nos résultats.

4.2.1 Le phénomène du fluage

Définition

Le fluage est un comportement observable pour de nombreux matériaux lorsqu'une contrainte est appliquée de manière constante dans le temps. Nous avons compris, après discussion dans le chapitre 2, que le bois est un matériau anisotrope avec une structure moléculaire [58]. Cette caractéristique le rend dépendant du temps lorsqu'une contrainte lui est appliquée.

Dans le cas du bois, le fluage peut être décomposé selon 3 phases principales (figure 4.1) [19] [58] :

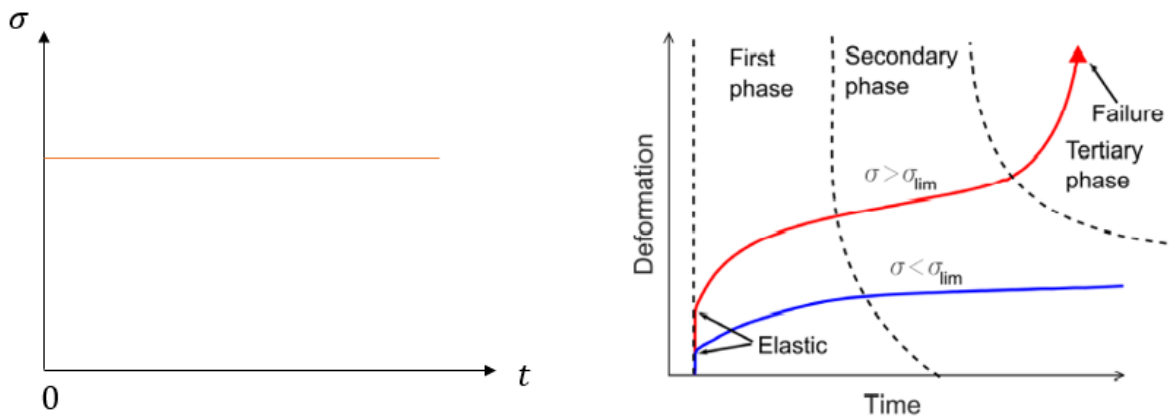


FIGURE 4.1 – Décomposition du fluage en 3 stades

1. La première phase représente la déformation élastique instantanée et les premiers instants de déformation du bois. La vitesse de déformation diminue au cours du temps.
2. La deuxième phase du fluage est un palier où la déformation semble se stabiliser. En effet, la vitesse de déformation devient constante dans le temps.
3. Dans certains cas, il y a une troisième phase. Elle représente une augmentation rapide de la fonction de fluage et donc également de la déformation au cours du temps. Cette déformation peut amener le matériau jusqu'à la rupture.

Orientation de la force

L'anisotropie du bois se reflète également dans la réponse du matériau au fluage en fonction de l'orientation de la force par rapport aux cernes du bois [58]. Sur la figure 4.2, nous observons que la sensibilité du matériau au fluage est fortement différente en fonction de l'orientation de la force. Notons un rapport de presque 4 entre les deux fonctions de fluage pour les directions proposées.

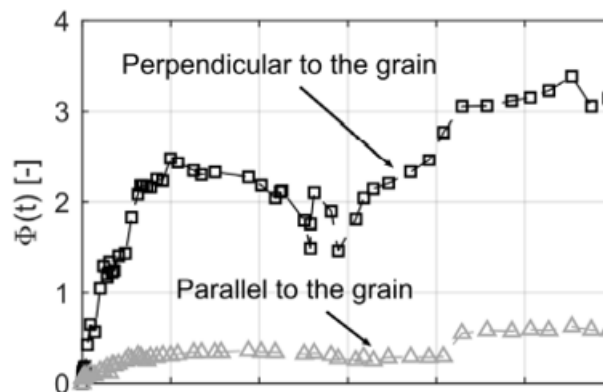


FIGURE 4.2 – Fluage en fonction de l'orientation de la force appliquée [58]

Le fluage est également influencé par la direction ligneuse dans laquelle la contrainte est appliquée. O. SAIFOUNI [59] a regroupé plusieurs documents dans sa thèse, affirmant que *"le fluage est proportionnellement plus important selon la direction transversale que dans la direction longitudinale"*.

La recouvrance

Lorsqu'un essai de fluage arrive à son terme, il est intéressant de laisser l'échantillon se décharger sur le banc d'essai afin d'observer sa capacité à reprendre sa forme initiale. Ce phénomène est appelé la recouvrance. Une déformation dite "élastique" signifie que lorsque le matériau n'est plus sous contrainte, celui-ci retrouvera ses dimensions et son allure initiale. À l'inverse, une déformation "plastique" induit une déformation résiduelle irréversible.

V. PITTET [60] a réalisé plusieurs essais de fluage/recouvrance pour comprendre l'influence de la charge sur ce phénomène (figure 4.3).

Après plusieurs batteries de tests, l'auteur conclut que, pour une force d'intensité inférieure à 12% de la contrainte à la rupture, la recouvrance est quasi totale après un certain temps. Cependant, lorsqu'on dépasse ce palier de 12%, la recouvrance observée après le même laps de temps est partielle. C'est-à-dire que nous retrouvons une déformation permanente irréversible ϵ_p . Sous certaines conditions, ce ϵ_p peut atteindre une amplitude de l'ordre de 30% de la déformation instantanée.

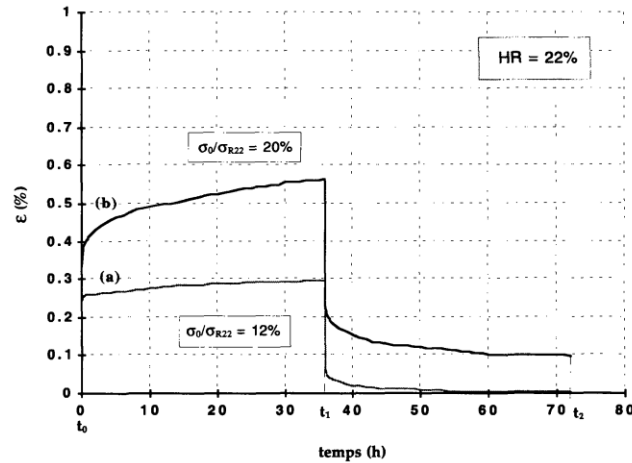


FIGURE 4.3 – Essais de fluage/recouvrance pour un niveau de charge d'environ 12% et 20% de la contrainte à la rupture sous humidité constante [60]

Le type de chargement

Lorsqu'un élément en bois est utilisé dans une structure, nous attendons de lui qu'il ne cède pas avec le temps. Le graphique de la figure 4.1 nous montre bien les deux réactions au fluage qui sont possibles en fonction de la contrainte appliquée. Il faut donc bien vérifier de ne pas trop charger la structure afin de ne pas passer par cette troisième phase.

De plus, pour qu'un fluage soit dit "linéaire", il faut qu'il ait une recouvrance totale observée une fois la charge supprimée. Cette limite de linéarité va dépendre du type de sollicitation (traction, flexion, compression) illustré sur la figure 4.4, de l'amplitude du chargement et de l'humidité ambiante. H. RANDRIAMBOLOLONA [61] et O. SAIFOUNI [59] présentent dans leurs documents qu'une contrainte maximum de 20% à 30% ne peut être dépassée en flexion afin de rester dans le domaine d'un comportement linéaire. D'autres auteurs ont montré que cette limite de linéarité se situerait à 40% de la contrainte à la rupture [62]. Ces valeurs dépendent évidemment de l'humidité et de la température ambiante ainsi que du type et de la taille des échantillons.

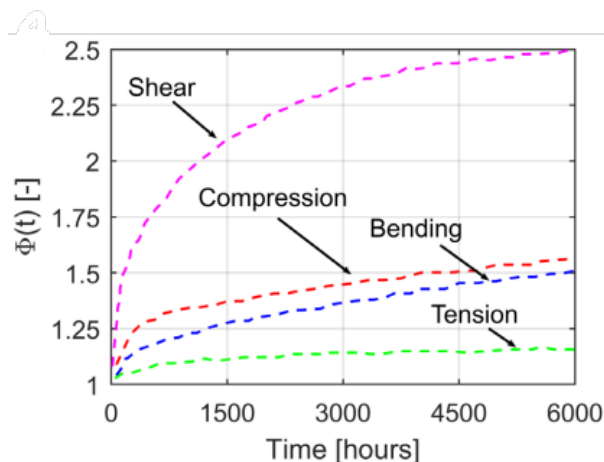


FIGURE 4.4 – Influence du type d'effort sur le comportement au fluage du bois [58]

Durée du chargement

La durée de chargement a une influence directe sur la flèche mais également sur la résistance du matériau. La charge admissible d'une pièce de bois diminue avec le temps [6]¹. Nous pouvons observer ce phénomène à la figure 4.1 via une augmentation de déformation dans le temps. C'est pourquoi le fluage présente des risques de mener le matériau bois à la rupture. A. MATAR [63] propose la représentation ci-dessous (figure 4.5). Il fait également référence aux classes de service définies dans l'Eurocode 5 [1].

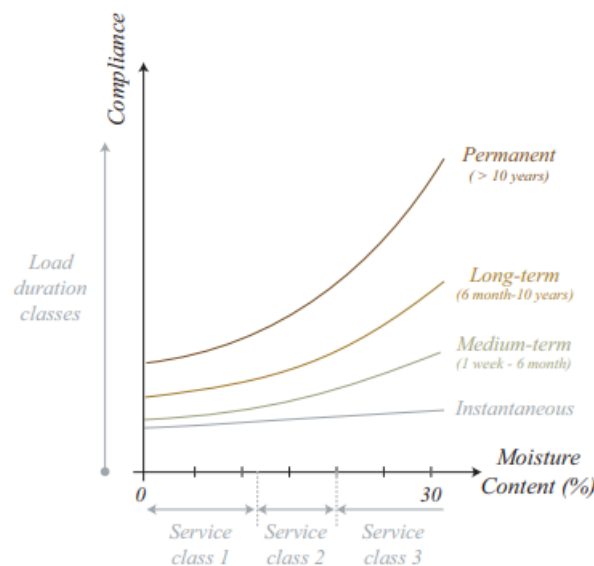


FIGURE 4.5 – Évolution de la fonction de fluage selon le type de chargement

4.2.2 Comportement viscoélastique du bois

Nous allons nous intéresser au phénomène de viscoélasticité linéaire du bois. Dans nos futurs projets de construction, nous ne voulons évidemment pas de rupture par fluage. Cela signifie que nous souhaitons que le matériau reste dans cette zone linéaire que nous allons essayer de comprendre.

Commençons par définir l'élasticité et la viscosité linéaire [6].

- **Élasticité linéaire** : réaction à l'application d'une force de manière instantanée, par une déformation proportionnelle à cette force. Cette élasticité du matériau peut être modélisée par un ressort qui stocke l'énergie mécanique sans dissipation. Dans le bois, on dira généralement que c'est la cellulose qui tient ce rôle.
- **Viscosité linéaire** : réaction à l'application d'une force par un flux de vitesse constant, proportionnel à la force. La viscosité est modélisée par un amortisseur qui va dissiper l'énergie mécanique de déformation et étendre la déformation dans le temps. Dans le bois, ce sont la lignine et l'hémicellulose qui jouent ce rôle.

Un comportement dit "viscoélastique" est donc, par définition, une combinaison d'un comportement élastique et visqueux tel qu'illustré à la figure 4.6.

1. Ce phénomène a bien été observé lors des calculs de $F_{ELS,CT}$ et $F_{ELS,LT}$ dans le post-traitement des essais sur grumes.

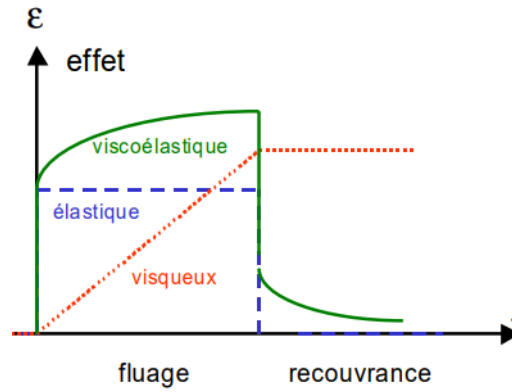


FIGURE 4.6 – Comportement viscoélastique sous une contrainte constante [64]

Principe de superposition de Boltzmann

Selon L. BOLTZMANN, chaque contrainte qui intervient dans la vie d'un matériau viscoélastique linéaire va venir apporter une contribution indépendante à la déformation finale de celui-ci (figure 4.7). Autrement dit, "*la superposition des sollicitations implique la superposition homologues des réponses*" [62].

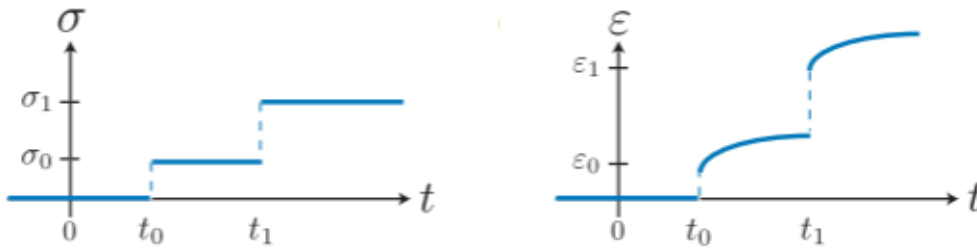


FIGURE 4.7 – Principe de superposition de Boltzmann [62]

4.2.3 Le comportement mécanosorptif du bois

Comme expliqué dans la section 2.2, le bois réagit avec son environnement extérieur. Lorsqu'il est soumis à des variations hydriques, il est défini comme ayant "un comportement mécanosorptif qui traduit un couplage entre les effets du chargement mécanique et les variations de son état hydrique" [59] (figure 4.8). Nous allons voir, dans cette section, l'influence des variations d'humidité et de température sur le comportement au long terme des échantillons de bois.

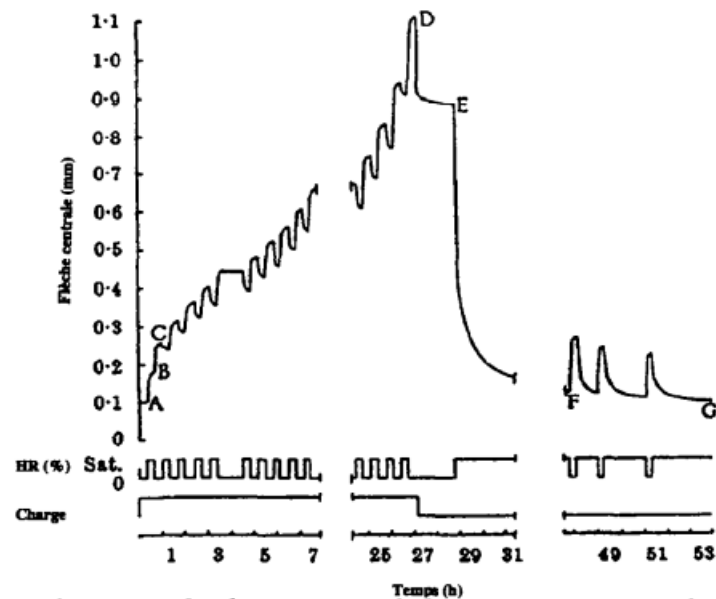


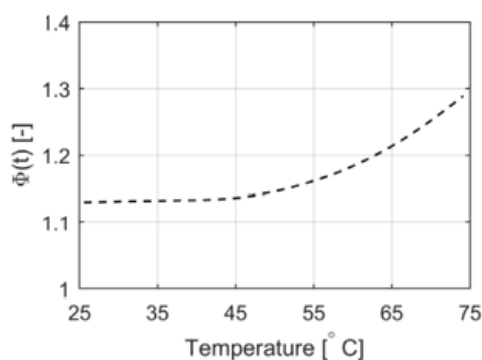
FIGURE 4.8 – Comportement mécanosorptif en flexion sous charge constante [60]

Influence de la température

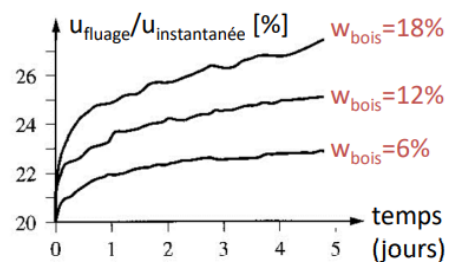
L'influence de la température sur le bois a déjà été évoquée dans la section 2.4. Penchons-nous maintenant sur les effets spécifiques au fluage.

Selon G. GRANELLO et A. PALERMO [58], le matériau va perdre en rigidité et le fluage va augmenter, suite à une augmentation de température (figure 4.9a).

Cependant, nous remarquons que pour une utilisation classique du bois de construction, l'impact de la température ne sera pas important. En effet, il faut dépasser une température de 45°C pour voir de réels effets néfastes sur le comportement du bois au long terme. Il ne faut cependant pas oublier que l'humidité peut influencer une perte de rigidité supplémentaire (figure 4.9b).



(a) Influence de la température sur le fluage du bois [58]



(b) Évolution au cours du temps du rapport de flèche pour différentes humidités [3]

FIGURE 4.9 – Influence de la température et de l'humidité sur la fonction de fluage du bois

Lorsque la température du bois augmente de plus en plus, le bois passe par différents états. Initialement, il est visqueux (bois dur et possiblement cassant), mais lorsqu'il chauffe, il devient caoutchouteux ("état dans lequel le polymère peut s'écouler en réponse à une

sollicitation" [64]). Ce changement d'état est caractérisé par la température de transition vitreuse. Chaque constituant du bois possède sa propre température de transition. Celle-ci est également influencée par l'humidité du bois comme démontré dans le tableau 4.1.

	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine
Saturé		0-60 °C	60-100 °C
Anhydre	220 °C	150-220 °C	130-195 °C

TABLE 4.1 – Température de transition des constituants du bois à l'état anhydre et à l'état saturé [64]

Isotherme de sorption

Lorsque le bois sèche ou s'humidifie, il n'a pas le même comportement. Cela est dû à l'anatomie moléculaire du bois qui est brièvement présentée dans la section 2.1.1 [6]. Ce comportement est représenté par une isotherme de sorption (figure 4.10). Nous pouvons observer sur cette figure que sous le PSF, la perte d'humidité est plus rapide que lors de l'absorption. Cela se justifie par le fait que lors d'une humidification, le bois va créer de nouveaux liens anatomiques pour fixer cette eau, cela prend du temps et de l'énergie [6].

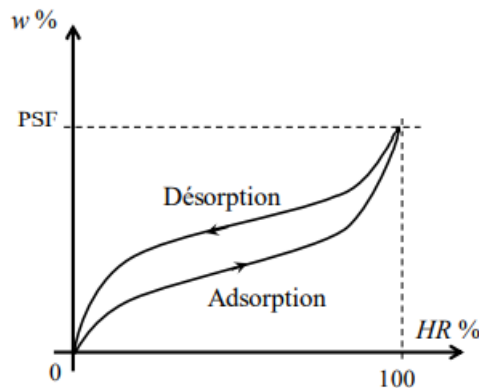


FIGURE 4.10 – Isotherme de sorption du bois [59]

Ce graphique nous permet également d'observer que pour une même humidité relative de l'air, le bois ne sera pas au même état d'équilibre s'il est dans un état de désorption ou d'absorption.

Influence d'une humidité constante dans le bois

Plusieurs recherches [[60] [61] [64] [65] [66]] ont été menées pour définir l'influence de l'humidité sur une pièce de bois soumise à une certaine charge. Cet élément est comparé à une même pièce de bois à l'état sec et sous la même contrainte. Les conclusions sont unanimes : l'humidité possède un effet plastifiant sur le bois.

Afin d'en dire un peu plus sur ce phénomène, V. PLACET [64] nous indique 2 effets particulièrement intéressants qu'apporte la plastification du bois :

- une augmentation d'humidité diminue la valeur de la température de la transition vitreuse tel que présenté dans le tabelau 4.1 ;
- une augmentation d'humidité augmente les frottements internes dans le bois et par conséquent diminue le module de Young.

En conclusion, nous pouvons affirmer que lorsque l'humidité d'une pièce augmente, son comportement sera grandement impacté. Son module de Young se verra diminué, tel que représenté à la figure 2.3. Le comportement au long terme du bois se verra impacté de la même façon et on s'attend donc à un fluage plus important lorsqu'un échantillon de bois possède une humidité supérieure. Ce phénomène est présenté par la figure 4.11 qui est issue d'une batterie de tests réalisés par S. MERAKEB [66].

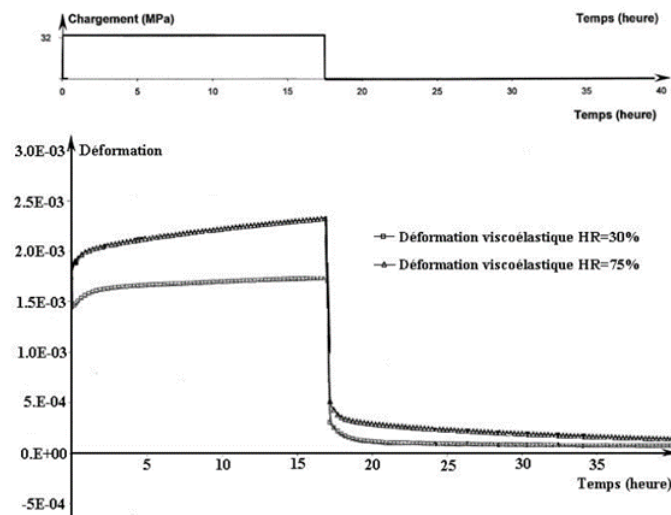


FIGURE 4.11 – Plastification du bois due aux changements d'humidité [66]

Influence d'une humidité variable dans le bois

Le comportement mécanosorptif du bois est connu comme étant une augmentation de la fonction de fluage, alors que celui-ci est soumis à des variations hydriques [67]. Pour représenter cela de façon plus visuelle, G. GRANELLO et A. PALERMO [58] nous proposent la figure 4.12.

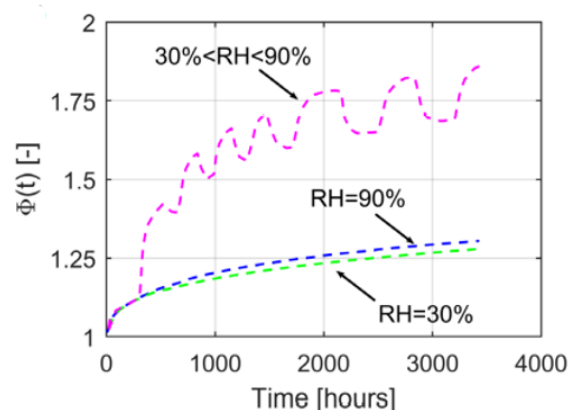


FIGURE 4.12 – Comparaison de la fonction de fluage pour une humidité variable ou constante [58]

On y observe effectivement ce que, entre autres, J. COLMARS a établi dans sa thèse. Lorsque l'humidité est constante au cours de l'essai de fluage, la fonction de fluage est

proportionnelle à l'humidité. Cependant, si nous réalisons des cycles d'humidité, la fonction de fluage se voit largement augmentée.

Ce phénomène a été observé depuis maintenant de nombreuses années. Cela a permis à beaucoup de chercheurs de réaliser des expériences pour mieux comprendre la mécano-sorption. Dans la littérature scientifique, beaucoup font référence au travail de G. HUNT [68]. Ils en retirent tous des graphiques prenant la forme de la figure 4.13 ainsi que les mêmes hypothèses [59] [60].

- Lorsque le bois est en **désorption**, la déformation due au fluage tend à augmenter au cours du temps.
- Lorsque le bois est en **absorption**, la déformation due au fluage tend à légèrement diminuer au cours du temps. Cependant, la première absorption se verra, quant à elle, s'accompagner d'une augmentation de déformation.

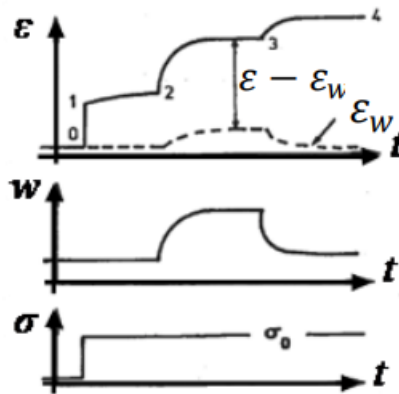


FIGURE 4.13 – Évolution du fluage avec une variation d'humidité [69]

L'effet du chargement combiné à des variations hydriques doit aussi être pris en compte lors de l'étude du fluage. Sur la figure 4.14, nous illustrons les résultats d'une expérience menée sur des échantillons de hêtres. En prenant comme référence un essai à humidité constante, nous observons que pour une faible charge, le fluage est supérieur, mais semble se stabiliser après un certain temps. Cependant, lorsque la charge imposée devient trop importante, la fonction de fluage ne semble pas se stabiliser et amène la pièce à la rupture [19] [59] [61].

La figure 4.14 nous permet également de confirmer les hypothèses évoquées sur le comportement du fluage en absorption et en désorption.

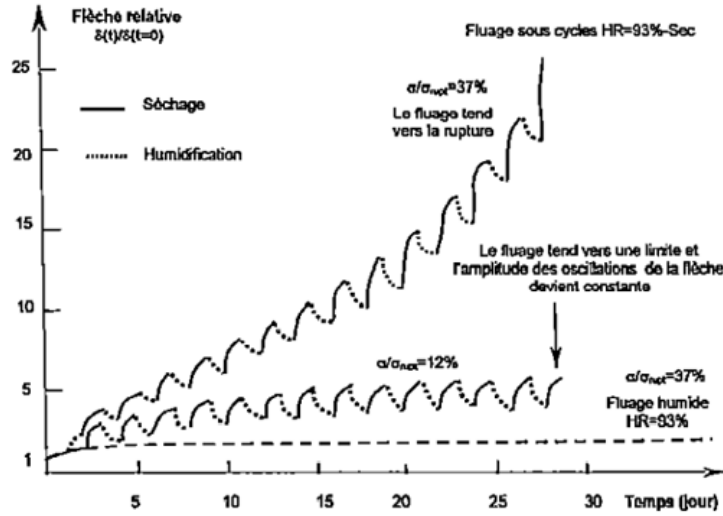


FIGURE 4.14 – Essais de fluage sur du hêtre sous différentes conditions [70]

4.2.4 La complaisance du bois

Description théorique du phénomène

La complaisance " J " d'un matériau est définie comme l'inverse de la rigidité élastique de celui-ci [64].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4.1)$$

$$J = \frac{1}{E} = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad [MPa^{-1}] \quad (4.2)$$

Sur la figure 4.13, nous avons déjà pu remarquer que la fonction de fluage était un rapport entre l'évolution d'une déformation dans le temps et d'une contrainte constante.

$$\phi(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (4.3)$$

On remarque directement que la fonction de fluage et la complaisance parlent de la même chose. Voilà pourquoi la complaisance est essentielle pour bien comprendre le fluage du bois.

Pour écrire la fonction de fluage sous forme mathématique, il faut respecter les différents comportements que le bois peut avoir. Nous avons déjà illustré ces comportements au travers de la figure 4.6. V. PITTET [60], T. TORATTI et P. MORLIER [71] ont proposé une mise en équation de la transformation du bois subissant du fluage au cours du temps :

$$\epsilon_{tot}(t) = \epsilon_E + \epsilon_C + \epsilon_{MS} + \epsilon_U \quad (4.4)$$

Cette équation signifie simplement que la déformation totale de l'échantillon sera respectivement égale à l'addition d'une déformation élastique, d'un fluage sans variation d'humidité, d'une déformation mécanosorptive et d'un retrait/gonflement libre. Pour notre

étude, nous pouvons retenir des différentes batteries de tests réalisées par V. PITTET [60] et P. MORLIER [71], qu'il y a un lien évident entre la teneur en eau et la déformation élastique ϵ_E que subit le bois. De plus, la déformation ϵ_C est directement proportionnelle à la déformation élastique et donc, dans un sens, elle dépend également de la teneur en eau.

Nous commençons à comprendre que lorsque l'on parle de teneur d'eau, il y a risque d'une modification de la taille de l'échantillon si on est sous le PSF. Afin d'adapter les mesures lors des essais, C. MONTERO et J. GRIL proposent l'équation 4.5 [62] [72]. Nous avons alors l'évolution de la contrainte en fonction de la variation d'humidité à l'instant t .

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0(t)}{1 + \alpha_T \cdot \Delta W} \quad (4.5)$$

α_T = le coefficient d'expansion d'humidité

ΔW = la variation d'humidité

La complaisance est alors :

$$J(t) = \frac{\Delta\epsilon(t) - \Delta\epsilon(t_0)}{\sigma(t)} \quad (4.6)$$

Si plusieurs essais ont été réalisés, nous pouvons calculer la complaisance relative au cours du temps avec :

$$\bar{J} = \frac{1}{n} \sum \frac{J_i(t)}{J_i(t_0)} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{J_i(t, w)}{J_i(t = 0s, w = 12\%)} \quad (4.7)$$

Pour cette dernière égalité, MONTERO [62] a considéré un état de référence avec une teneur en eau équivalente à 12%.

Calcul de la complaisance expérimentale

La complaisance peut s'exprimer pour la compression, l'effort tranchant et le fluage. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement à la complaisance de fluage et celle-ci évolue dans le temps :

$$J_T(t) = J_i(t) + J_m(t) \quad (4.8)$$

Autrement dit, la complaisance totale est la somme d'une complaisance instantanée et d'une complaisance mécanosorptive comme illustrée précédemment [73]. Ici, l'effet long terme du fluage n'est pas pris en compte. L'étude réalisée par Y. ZHOU et al. [73] s'intéresse uniquement à l'évolution de la complaisance en fonction des cycles d'humidité. Dans notre cas, il est évidemment important de prendre en compte l'effet long terme de la complaisance. J_i va être mesurée lors de l'application de la charge. La complaisance mécanosorptive J_m va être calculée comme :

$$J_m(t) = K_m \cdot M(t) \quad (4.9)$$

K_m = un paramètre du matériau

$M(t)$ = la variation relative d'humidité (en %)

Cependant, les études se sont limitées à certaines essences (principalement des essences chinoises) pour la détermination des facteurs K_m . Il en est ressorti trois paramètres K_m

par espèce : un coefficient pour la première absorption, un second pour les absorptions suivantes et un dernier lorsque le matériau est en désorption.

ZHOU et al. [73] nous fournissent, quant à eux, une formule pour calculer la complaisance sous une contrainte de flexion 4 points :

$$J_i(t) = \frac{4 \cdot 10^{-9} \cdot b \cdot h^3 \cdot y(t)}{a \cdot P \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)} \quad (4.10)$$

Ainsi, la complaisance de fluage instantanée pour une section équarrée peut être simplement calculée grâce à $y(t)$, la flèche de l'échantillon et aux caractéristiques de l'échantillon a , b , h , t et P qui sont respectivement la longueur de chargement, la largeur et la hauteur de l'échantillon, le temps et les charges appliquées. Cette expression provient de la flèche d'une flexion 4 points avec $a = \frac{L}{3}$ sans prendre en compte le poids propre de l'échantillon². Finalement, les auteurs obtiennent la relation triviale suivante :

$$J_i(t) = \frac{1}{E} = \frac{y(t) \cdot 648 \cdot I}{23 \cdot Q \cdot L^3} \quad (4.11)$$

4.2.5 Définition de k_{def} dans l'Eurocode 5

Afin de prendre en compte des charges qui vont agir sur le long terme, l'Eurocode 5 [1] propose d'utiliser un coefficient " k_{def} ". En fonction de la classe de service dans laquelle le bois sera utilisé³, ce coefficient va varier. Les valeurs proposées sont présentées dans le tableau 4.2. Il est également notifié que si on utilise un bois dans sa configuration proche de son PSF, il faut augmenter de 1 les coefficients présents dans le tableau.

Matériau	Norme	Classes de services		
		1	2	3
Bois massif	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Bois massif proche du PSF	EN 14081-1	1,6	1,8	3

TABLE 4.2 – Tableau de valeur k_{def} fournit par l'Eurocode 5 [1]

La norme européenne a introduit ce coefficient dans l'idée de limiter la conception des éléments structurels mis en œuvre, à leur comportement élastique instantané [62]. D'après la réflexion de G. GRANELLO et A. PALERMO[58], l'Eurocode 5 suppose que le matériau va subir une charge qui sera bornée grâce au coefficient k_{mod} (voir section 3.2.3). Si l'élément est resté dans les limites fixées par la norme, cela signifie que le fluage

2. Vous retrouverez la démonstration de ce calcul dans l'annexe A

3.

- Classe de service 1 : ouvrages protégés des intempéries. Caractérisé par une humidité contenu dans le matériau correspondant à une température de 20 [°C] et une humidité relative de l'air n'excédant pas 65 % quelques semaines par an. [1]
- Classe de service 2 : ouvrages partiellement protégés des intempéries. Caractérisé par une humidité contenu dans le matériau correspondant à une température de 20 [°C] et une humidité relative de l'air n'excédant pas 85 % quelques semaines par an. [1]
- Classe de service 3 : ouvrages exposés aux intempéries. Caractérisé par des conditions climatiques menant à un plus haut taux d'humidité que la classe de service 2. [1]

peut être considéré comme ayant un comportement viscoélastique linéaire. C'est à dire que, suivant le principe de Boltzmann (voir section 4.2.2), la déformation de l'échantillon est vue comme une addition de plusieurs déformations élastiques sous une contrainte permanente. Grâce à k_{def} , la norme considère le matériau comme plus flexible afin de prendre en compte le supplément de déformation dû au fluage. Le coefficient est alors utilisé de la manière suivante [1] [58] :

$$E_{eff} = \frac{E}{1 + k_{def}} \quad (4.12)$$

Pour calculer ce coefficient, il a été établi une relation qui dépend simplement de la complaisance relative du matériau [72][74] :

$$\bar{J} = 1 + k_{def} \quad (4.13)$$

$$k_{def} = \frac{\epsilon(t)}{\epsilon_0} - 1 \quad (4.14)$$

ϵ_0 = la valeur de la déformation de l'échantillon

Plusieurs études ont été menées afin de vérifier et critiquer k_{def} . F. DUBOIS [74] a notamment ressorti les figures 4.15 et 4.16 de son étude.

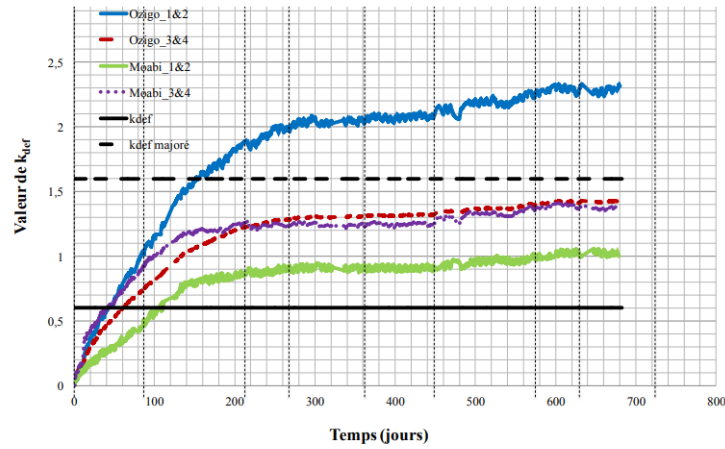
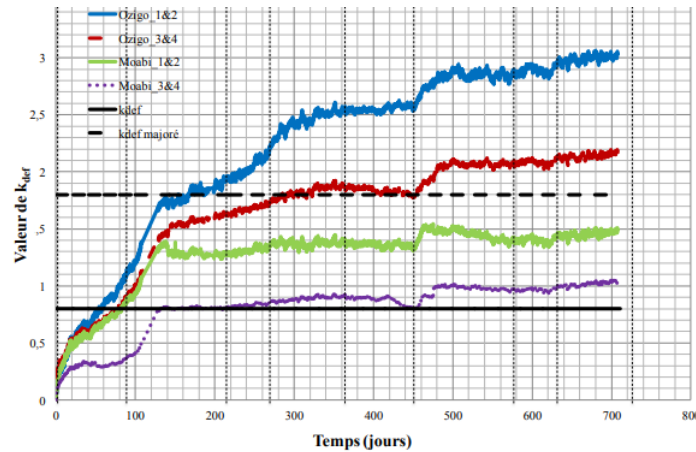


FIGURE 4.15 – k_{def} en ambiance intérieur climatisé

FIGURE 4.16 – k_{def} en ambiance extérieur sous abri

Il conclut son analyse en signalant que le coefficient est heureusement toujours du côté de la sécurité pour des éprouvettes équarries. Cependant, comme nous pouvons le voir sur les deux graphiques, il y a une grande variation en fonction de l'essence et surtout du climat. Le coefficient devrait être adapté en fonction de ces deux paramètres [74].

C. MONTERO et J. GRIL [72] ont aussi mené plusieurs batteries d'essais et en ont conclu que pour améliorer k_{def} , il faudrait prendre en compte un facteur de déformation différent en fonction du paramètre mécanique étudié. Comme nous avons pu l'observer sur la figure 4.4, la fonction de fluage du bois n'est pas la même si on applique de la flexion, de la compression ou encore de l'effort tranchant. Il propose également de tenir compte d'un facteur de profondeur de l'échantillon pour améliorer la précision du coefficient. Finalement, ils nous font remarquer judicieusement que tant que l'on reste avec des petits échantillons, la norme est très sécuritaire. Cependant, pour des grumes, nous allons diminuer en sécurité car la largeur de la section a un réel rôle sur le transfert d'eau dans le bois.

4.3 Essais sur éprouvettes équarries

Par le biais de cette section, nous présentons tout le chemin de recherche et de développement que nous avons parcouru pour mener à bien des essais de fluage en flexion quatre points sur des éprouvettes d'épicéa équarries⁴. Cela passe par l'explication du banc d'essai que nous avons créé, de l'échantillonnage réalisé sur les grumes testées en flexion et enfin des différents tests que nous avons exécutés pour établir un protocole judicieux.

4.3.1 Généralités

Pour rappel, les objectifs de ces expériences sont les suivants :

- comparer le k_{def} théorique et expérimental ;
- réaliser un dispositif adaptable aux essais en flexion et à la compression ;
- obtenir un protocole efficace qui pourra être utilisé dans les prochains travaux sur ce sujet.

4. Section de bois initialement ronde et transformé en parallélépipède rectangle.

4.3.2 Dispositif des essais de fluage

Situation au LEMSC

Afin de réaliser cette campagne expérimentale, nous utilisons des œdomètres à chargement frontal déjà disponibles au laboratoire (figure 4.17).



FIGURE 4.17 – Œdomètre à chargement frontal disponible au LEMSC

Le principal avantage de cet outil est qu'il possède un bras de levier délivrant une force axiale. Chacun d'entre eux est capable d'appliquer trois ratios théoriques : $[9 : 1]$, $[10 : 1]$ ou $[11 : 1]$ qui permet de fournir une masse appliquée de maximum 1848 [kg] avec une course du point d'appui ne dépassant pas 20 [mm]⁵.

Principe

Pour réaliser des essais de flexion en quatre points, nous nous sommes basés sur les directives de la norme européenne NBN EN 408+A1(2012) [21] et sur celles de la norme internationale ISO 13061-3 :2014(F) [75].

La norme européenne (figure 4.18) se rapporte à du bois de structure et nous énonce les règles suivantes quant au dispositif [21] [2] :

- longueur totale : $L \geq 19 \cdot h$;
- longueur entre les appuis : $l = 18 \cdot h \pm 3 \cdot h$;
- distance entre les points d'application de la charge : $6 \cdot h$;
- distance entre un point d'application de la charge et un appui : $6 \cdot h \pm 1,5 \cdot h$;
- la symétrie autour du centre de l'élément doit toujours être vérifiée ;
- les appuis sont simples : l'un à rotule, l'autre à rouleau disposé à l'opposé de leur analogue au niveau des points d'application de la charge ;

5. La fiche technique d'un œdomètre est disponible dans notre drive.

- afin d'éviter le poinçonnement du bois, il est permis de placer des plaquettes entre le bois et les appuis avec une longueur : $l \leq \frac{h}{2}$.

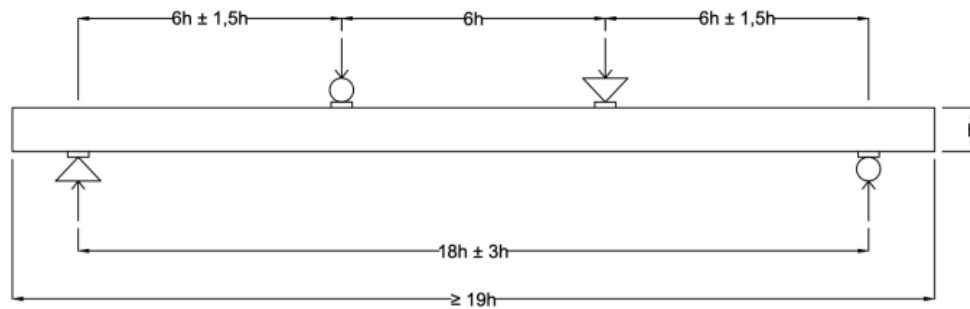


FIGURE 4.18 – Dispositif d'essai en flexion 4 points selon la NBN EN 408+A1(2012) [21]

La norme internationale normalise des méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois. Leurs exigences sont les suivantes [75] :

- longueur entre les appuis : $l = 12 \cdot h + 4 \cdot h$;
- appui de chargement présentant un rayon de courbure d'au moins 30 mm pour appliquer la charge sur l'éprouvette ;
- afin d'éviter le poinçonnement du bois, il est permis de placer des plaquettes entre le bois et les appuis avec une longueur : $l = 2 \cdot h$.

Notons que le LEMSC suit principalement la norme européenne (NBN EN 408+A) lorsqu'il réalise des essais sur des éprouvettes en bois. Nous nous référons donc principalement à elle et la compléterons avec quelques détails provenant de la norme internationale (ISO 13061-3 :2014)).

Capteur présent sur le banc d'essai

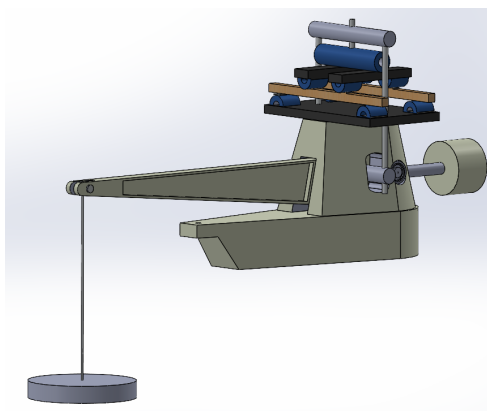
Pour nos essais, nous souhaitons uniquement, dans un premier temps, mesurer la flèche centrale que vont subir les échantillons au cours du temps. Pour cela, nous utilisons des comparateurs numériques de la marque Mitutoyo (figure 4.19) dont la fiche technique se trouve en annexe H.2. La course maximale de ces outils de mesure est de 12 [mm]. Cette condition est donc la plus limitante. C'est avec elle et les impositions des normes choisies que nous allons déterminer la taille de nos échantillons.



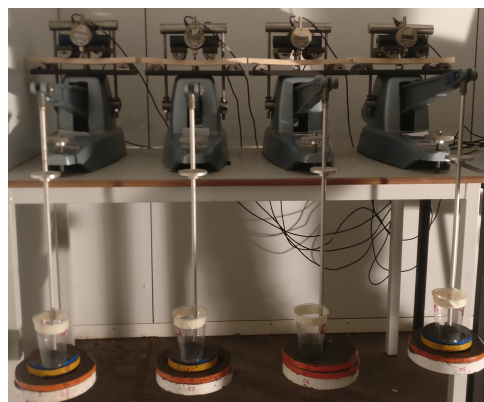
FIGURE 4.19 – Comparateur mécanique Mitutoyo

Le banc d'essai

Pour chaque banc d'essai, nous testons deux échantillons de bois en flexion quatre points comme présenté à la figure 4.20. L'objectif du montage est de rendre les deux essais indépendants. Pour plus de détails, les plans de montage des œdomètres sont fournis en annexe G.1. Le montage que nous avons réalisé a l'avantage d'être facilement adaptable.



Modélisation du banc d'essai



Banc d'essai en cours de test

FIGURE 4.20 – Dispositif pour les essais de fluage en flexion 4 points d'échantillons équarris

Hormis la structure de l'œdomètre, tout est démontable et modifiable. Les essais de fluage en compression pourront sans trop de peine se réaliser sur les mêmes bancs d'essai.

4.3.3 Échantillonnage

Afin de déterminer la taille de nos échantillons, nous devons respecter les conditions suivantes :

- les dimensions prescrites par la NBN EN 408+A [21] ;
- la course maximale de 12 [mm] des comparateurs ;
- la taille des œdomètres et la charge maximale applicable.

Via une étude théorique d'essais-erreurs, nous avons déterminé quelle section de bois ne dépassera pas une flèche long terme maximale de 12 [mm] pour une charge de 60% de sa contrainte de rupture. Le tableau 4.3 donne les caractéristiques finales de nos échantillons.

Essences	Longueur totale[mm]	Longueur entre appuis [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]
Epicéa	300	225	15	15

TABLE 4.3 – Dimensions des éprouvettes équarries

Pour garder un lien avec les grumes testées en flexion dans le chapitre précédent, nous avons choisi de prélever nos échantillons équarris sur ces mêmes grumes d'épicéa qui ont été débitées puis rabotées. Cela nous permet d'avoir une bonne connaissance du bois grâce à leur provenance et leur pente de fil.

L'approche de ces batteries d'essai est principalement comparative. Pour cela, nous allons prendre l'hypothèse que des bois du même fil et de la même grume auront théoriquement le même comportement. Il y a cependant un désavantage à ce choix de prélèvement sur les chutes des grumes. Les extrémités du tronc ont séché lorsqu'ils étaient entreposés dans le laboratoire. Cela signifie que beaucoup de fissures sont apparues aux extrémités des grumes. Il faut garder en tête que nos échantillons seront certes "parfaits"⁶ mais moins résistants que le bois en travée centrale de la grume.

Nos éprouvettes ont été prélevées dans les grumes d'épicéa numéro 3, 5 et 10. Pour chacune d'entre elles, nous avons divisé les troncs en quartiers numérotés avec, en plus, un quadrillage de 15 [mm] par 15 [mm] comme présenté à la figure 4.21. De cette façon, nous savons exactement d'où provient chaque échantillon testé. Les parties colorées sur la section sont celles qui nous intéressent dans ce cas-ci.

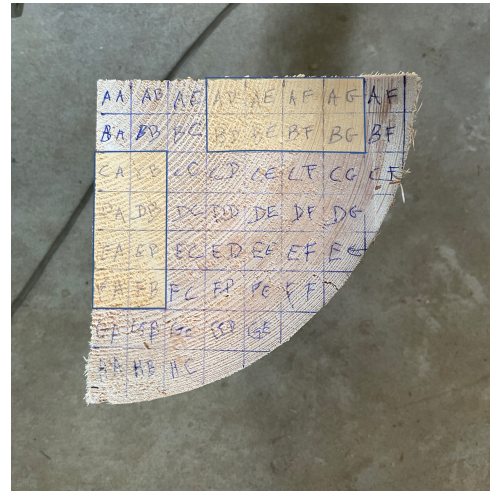
Puisque nous réalisons les premiers essais sur des œdomètres, nous avons choisi, dans un premier temps, de prendre les sections avec les meilleures caractéristiques mécaniques possibles. C'est pourquoi nous avons prélevé des sections qui contiennent le moins possible d'aubier et de bois juvénile. Dans le chapitre 2.5, nous avons démontré que ces deux types de bois peuvent dégrader fortement le comportement mécanique du matériau. Enfin, pour comparer les échantillons entre eux, chaque section du quadrillage représentera deux échantillons distinctifs. Ces deux éprouvettes sont découpées l'une derrière l'autre et suivent donc le même fil.

L'éprouvette **E10-04-AD-1** est définie comme un échantillon provenant de la grume d'épicéa numéro **10** et du quartier numéro **4**. C'est le premier échantillon de la section **AD** et le second sera nommé **E10-04-AD-2** tel qu'illustré sur la figure 4.22.

6. Échantillon théorique sans défilement, sans courbure ni défaut et dont ses fibres seraient totalement verticales [6]. Également discuté dans le chapitre 2.5.



Découpe en quartier de la grume 10



Quadrillage du quartier 04

FIGURE 4.21 – Échantillonnage de la grume numéro 10

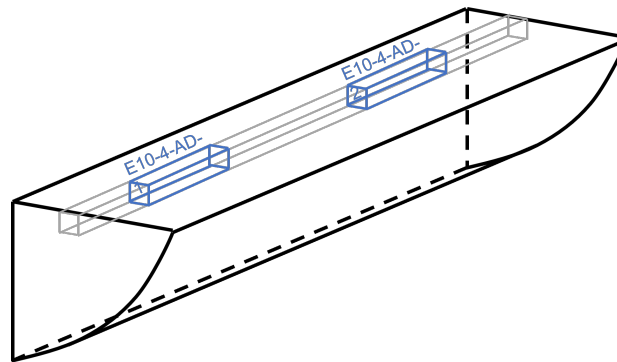


FIGURE 4.22 – Exemple de l'échantillonnage de l'élément E10-4-AD

4.3.4 Protocole d'essai

Paramètres étudiés

L'état de l'art que nous avons réalisé à la section 4.2 nous a permis de mettre en évidence les paramètres importants qui ont une influence sur le fluage du bois. Ceux-ci sont :

- Le niveau de chargement ;
- La direction de la force ;
- La variation de la température de bois ;
- La variation de l'humidité du bois.

Cette année au LEMSC, nous n'avions malheureusement pas les infrastructures suffisantes pour accueillir des essais où l'humidité et la température peuvent être contrôlées. Nous nous sommes donc principalement penchés sur le niveau de chargement et sur la direction d'application de la force. Pour rappel, nos essais de fluage s'inscrivent au début d'une succession de batteries de tests. Il est intéressant pour nous de trouver un protocole fiable sur ces deux paramètres essentiels afin de permettre la poursuite des recherches.

C'est dans cette optique que nous avons décidé de mener deux tests différents. Une partie des œdomètres imposera une contrainte équivalente à 60% de la contrainte à la rupture des échantillons et l'autre partie imposera une contrainte à 30%. Avec ces deux cas de charges, l'objectif est de retrouver les deux courbes possibles que nous avons pu observer à la figure 4.1. La contrainte la plus faible amènera les échantillons à un palier de déformation alors que pour la contrainte la plus forte, nous espérons obtenir la troisième phase de fluage.

Nous allons profiter de la présence d'éprouvettes qui sont composées du même fil et nous pourrons comparer leur comportement mécanique en fonction de la charge appliquée. Afin de prendre en compte l'implication du sens de la force, nous avons testé pour chaque cas de charge, quatre échantillons dont la force est appliquée parallèlement aux cernes et quatre échantillons dont la force est appliquée perpendiculairement aux cernes.

Les grumes sur lesquelles ont été prélevés les échantillons étaient à l'état vert. Nous avons conservé cet état sur les éprouvettes. De cette façon, le bois va sécher avec l'ambiance de la pièce et nous pourrons peut-être observer une différence entre le comportement initial et final. Il est à noter cependant que l'humidité moyenne est sous les 29 % d'humidité relative qui est la valeur moyenne du PSF de l'épicéa. Les échantillons sont proches de cette valeur mais ont déjà séché par rapport à leur état initial.

Caractérisation mécanique des échantillons

Afin de déterminer la force que l'on doit appliquer aux échantillons, nous avons réalisé 62 essais de rupture en flexion quatre points selon la norme NBN EN 408+A1(2012) [21] que nous avons présentés précédemment. Durant leurs recherches, C. MOENS et J. NICLAES[2] ont également réalisé des essais de ce type et ont précisé : "Pour réaliser (...) les essais, la machine Zwick Roell 50 [kN] a été utilisée. Cette machine a une capacité maximale de 50 [kN] et une précision en force de 0,23 %. Quant au déplacement, mesuré à l'aide d'un extensomètre directement placé sur la machine, il a une précision de 0,17 %." [2]. Le montage est présenté sur la figure 4.23. Une explication plus précise de la démarche suivie, ainsi qu'une fiche technique de la Zwick Roell et de l'extensomètre sont disponibles en annexe H.3.

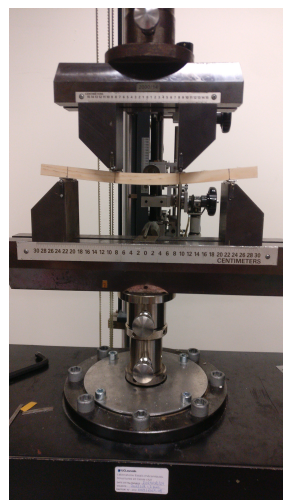


FIGURE 4.23 – Essais de flexion quatre points sur la Zwick Roell

Nous avons extrait des grumes, au total 82 échantillons de dimensions 300 x 15 x 15 [mm]. Pour réaliser une étude statistique correcte, nous avons mené à la rupture 62 échantillons et conservés 20 éléments pour les essais de fluage. Ces essais nous ont permis d'obtenir le module de Young moyen de l'épicéa à l'état vert et la force à la rupture moyenne. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.4. Une fiche complète est disponible en annexe G.2 afin de présenter l'ensemble du protocole que nous avons suivi.

		E03	E05	E10	Globalité
Nombre d'éprouvettes		18	20	24	62
Module de Young [Mpa]	Moyenne	8217,86	10433,79	10654,14	9875,76
	Ecart type	2055,11	1039	1349,25	1830,64
Force à la rupture [N]	Moyenne	767,26	915,07	814,67	833,27
	Ecart type	91,3	116	77,96	111,44

TABLE 4.4 – Résultats des essais de rupture en flexion quatre points sur des échantillons d'épicéa

Les valeurs moyennes obtenues nous semblent tout à fait dans les normes. En effet, nous pouvons observer que le tableau 2.3 nous donne une valeur théorique du module de Young de l'épicéa à l'état vert de 9500 [MPa]. Nous prendrons dès lors la valeur expérimentale obtenue. La contrainte à la rupture est évaluée selon la formule [21] :

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{rupt} \cdot a}{b \cdot h^2} = 50[MPa]$$

Avec a la distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche en millimètres (65 [mm]), b et h les dimensions de l'éprouvette (15 x 15 [mm]).

Le tableau 2.3 nous indique une contrainte de 42 [MPa], ce qui reste dans la même gamme de valeur. Nous prendrons 50 [MPa] comme valeur théorique.

Étalonnage des œdomètres

Afin de déterminer précisément le bras de levier que chaque œdomètre peut délivrer, nous avons réalisé une campagne d'étalonnage. Lorsque nous avons obtenu la disposition finale des bancs d'essai, nous avons placé une cellule force pour mesurer précisément la force appliquée quand une masse (mesurée au centième de gramme) y est suspendue (figure 4.24). Le protocole complet que nous avons suivi se trouve en annexe H.4 et les résultats finaux dans le tableau 4.5.

	Edo. 01	Edo. 02	Edo. 03	Edo. 04	Edo. 05	Edom. 06	Edo. 07	Edo. 08
N° de série	1870	1867	1029	1889	1891	1895	1860	1890
Rapport du levier [kg/kN]	9,2482	9,2466	9,2679	9,2564	9,2638	9,2805	9,2206	9,2478

TABLE 4.5 – Résultats des étalonnages des œdomètres

Durée du protocole

Pour observer de manière complète un comportement de fluage, un essai de ce type doit durer le plus longtemps possible afin de déterminer toutes les phases de déformation.

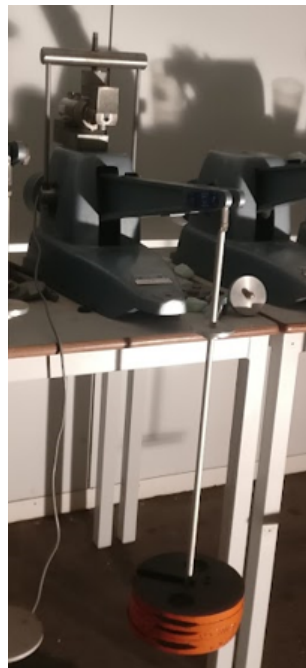


FIGURE 4.24 – Étalonnage d'un œdomètre

La norme ISO 899-2;1993 [76] nous propose de prendre des mesures de la flèche centrale dans les temps suivants : 1 min, 3 min, 6 min, 12 min, 30 min, 1h, 2h, 5h, 10h, 20h, 50h, 100h...

Pour nos essais, nous avons adapté la norme à nos besoins. La première mesure est faite en $t=0$ lorsqu'il n'y a pas encore de chargement. Ensuite, nous laissons un laps de temps de 20 secondes pour nous donner un temps suffisant pour mettre en charge l'œdomètre. Afin de correctement observer la phase de déformation instantanée, nous prendrons par la suite une mesure dès la première seconde. Par après, nous utiliserons la même méthodologie que la norme ISO 899-2;1993 nous propose. Au total, nos essais ont duré 41 jours. Ce n'est pas idéal pour observer le fluage dans sa totalité, mais c'est suffisant pour valider notre protocole expérimental.

Les comparateurs numériques que nous utilisons fonctionnent sur secteur ; une panne de courant au LEMSC entraînerait une perte de donnée non négligeable, en particulier avec l'augmentation quasi exponentielle du temps d'intervalle de mesure. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé, après 10 jours de test, de prendre une mesure de la flèche quotidienne pour éviter trop de perte de données en cas de panne de courant. De plus, pour observer correctement une potentielle "troisième phase" de fluage, il est également intéressant de prendre des mesures régulières compte tenu que nous n'avons pas plusieurs mois pour réaliser ces essais. Finalement, voici les temps auxquels sont prises nos mesures : 0s, 20s, 21s, 22s, 24s, 28s, 36s, 52s, 84s, ..., 10 jours, 11 jours, 12 jours...

Pré-mesures avant le lancement des essais

Les charges imposées à chaque banc d'essai dépendent de la contrainte à la rupture que nous imposons mais aussi du bras de levier qui est unique pour chaque œdomètre. Il est utile de mesurer au centième de gramme près tous les poids utilisés pour renforcer la

pertinence des résultats.

Avant chaque lancement de protocole, nous prenons la mesure de l'humidité, avec un humidimètre fonctionnant avec une résistance diélectrique, de chaque éprouvette pour vérifier l'état vert du bois et observer son comportement hygroscopique tout au long de l'essai.

4.3.5 Tableau récapitulatif

Le tableau 4.6 récapitule les essais de fluage en flexion quatre points. Nous pouvons y observer l'ensemble des échantillons testés. Les œdomètres ayant un indice "bis" signifient qu'une rupture a été observée sur le banc d'essai original. Un nouvel essai avec deux échantillons neufs a été lancé sur ce banc d'essai. C'est la raison pour laquelle les humidités observées sont inférieures aux autres, car ces échantillons neufs ont eu le temps de s'équilibrer avec les conditions extérieures.

œdomètre	Bras de levier [kg/kN]	Comparateur	Echantillon	Sens de la fibre	Contrainte à la rupture [%]	Masse suspendue [kg]	Humidité [%]
1	9,2482	01	E03-4-DA-2	Vertical	30	3,19351	25,3
		02	E10-4-BD-2				25,9
2	9,2466	03	E05-4-BE-2	Vertical	30	3,19296	25,9
		04	E05-4-AE-2				24,1
3	9,2679	05	E03-4-BD-2	Horizontal	30	3,20032	23
		06	E03-4-DB-2				24,2
4	9,2564	07	E10-4-AD-2	Horizontal	30	3,19635	22,8
		08	E05-4-DB-2				24,7
5	9,2638	09	E03-4-DA-1	Vertical	60	7,83004	23,5
		10	E10-4-BD-1				25,5
5bis	9,2638	09	E10-4-DA-1	Vertical	60	7,83004	12,8
		10	E05-4-DA-2				12,3
6	9,2805	11	E05-4-BE-1	Vertical	60	7,84415	25,2
		12	E05-4-AE-1				25,3
7	9,2206	13	E03-4-BD-1	Horizontal	60	7,79352	23,3
		14	E03-4-DB-1				21,8
8	9,2478	15	E10-4-AD-1	Horizontal	60	7,81651	19,9
		16	E05-4-DB-1				19,3
8bis	9,2478	15	E10-4-EA-1	Horizontal	60	7,81651	10,7
		16	E05-4-FB-1				12,3

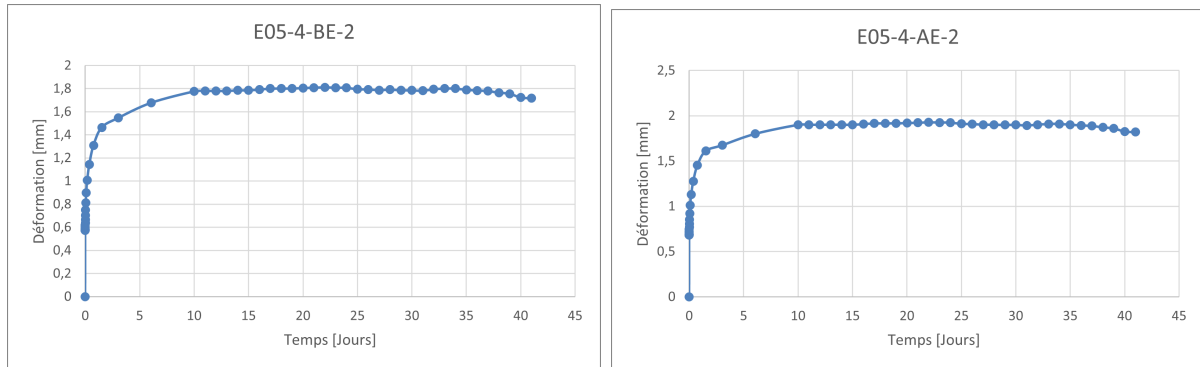
TABLE 4.6 – Récapitulatif des essais de fluage en flexion quatre points sur des éprouvettes équarries en épicea

4.4 Analyse des résultats

Au bout de 41 jours de mise en fluage, nous récupérons les données fournies par les capteurs de déplacement afin de les analyser. Tout d'abord, nous présenterons les résultats bruts obtenus, ensuite nous indiquerons les données importantes que nous pouvons déduire des essais et pour terminer, nous discuterons des pistes d'amélioration pour de futurs essais.

4.4.1 Résultats types

Les capteurs nous donnent l'évolution de la déformation pour chaque échantillon en fonction du temps. Si nous prenons comme exemple l'œdomètre 2, les déformations de ses éprouvettes sont les suivantes (figure 4.25).



(a) Déformation mesurée pour l'éprouvette A de l'œdomètre 2 (b) Déformation mesurée pour l'éprouvette B de l'œdomètre 2

FIGURE 4.25 – Déformations mesurées pour l'œdomètre 2

Le premier point sera toujours placé à l'origine car il nous permet d'avoir une référence au cas où un œdomètre ne serait pas correctement taré lors du lancement de l'essai. Le second point représente alors la déformée initiale. Nous remarquons notamment que nous sommes bien rentrés dans la seconde phase de fluage et qu'il n'y a pas d'apparition de troisième phase telle qu'illustrée sur la figure 4.1.

Comme discuté dans l'état de l'art, la variation de l'humidité relative de l'air et la variation d'humidité au sein du bois sont des éléments qui ont un grand impact sur le fluage. Dans notre cas, nous n'avons pas la possibilité de faire varier l'humidité relative de la pièce. C'est pourquoi nous avons placé les éprouvettes à une humidité relativement élevée (Tableau 4.6). Nous estimons que cette humidité s'est libérée car après cinq jours l'échantillon de référence s'était déjà stabilisé aux alentours de 10% d'humidité.

Certaines éprouvettes ont été jusqu'à la rupture. Les questions qui se posent alors sont de vérifier si la rupture est une conséquence du fluage, si la charge était trop importante ou simplement si cela est dû à un défaut de l'échantillon.

4.4.2 Valeurs résultantes

Deux valeurs sont intéressantes à analyser lors de l'essai :

- la valeur de la déformée initiale par rapport à l'estimation réalisée par les normes ;
- la valeur de k_{def} qui en résulterait en utilisant la méthode des normes ou la complaisance relative.

En plus de ces valeurs, nous discuterons de la manière dont certaines éprouvettes ont été menées à la rupture.

Grâce à la réalisation d'une étude théorique sur le comportement des échantillons au cours de l'essai (section 4.3.3), il est possible de comparer les flèches initiales théoriques et

expérimentales mais aussi les flèches longs termes influencés par différents k_{def} .

Afin de calculer la flèche théorique des éprouvettes, nous prendrons également en compte l'influence de l'effort tranchant, même si avec un élancement L/h de 15, l'influence de cet effort est censée être négligeable [3]. Nous utilisons les valeurs que nous avons trouvées grâce à nos batteries d'essai sur la ZwickRoel présentées dans le tableau 4.4 et en annexe G.2. Voici les équations que nous utilisons pour calculer les flèches théoriques⁷ instantanées et sur le long terme :

$$\delta_{CT} = \delta_M + \delta_V = \frac{aP}{2EI} \left(\frac{a^2}{3} + \frac{b^2}{8} + \frac{ab}{2} \right) + \frac{aP}{2GA_v} \quad (4.15)$$

$$\delta_{LT} = \delta_{CT} + \delta_{M,LT} + \delta_{V,LT} = \delta_{CT} + \frac{a(1 + k_{def})P}{2EI} \left(\frac{a^2}{3} + \frac{b^2}{8} + \frac{ab}{2} \right) + \frac{a(1 + k_{def})P}{2GA_v} \quad (4.16)$$

a = distance entre le point d'appui de la force et un appui de l'éprouvette = 67,5[mm]

b = longueur de la travée centrale entre les 2 points de force = 90[mm]

P = force totale appliquée sur l'éprouvette [N]

E = module de Young = 9876[MPa]

I = inertie de flexion = $\frac{h^4}{12} = 4218,75[mm^4]$

G = module de cisaillement = 650[MPa]

A_v = aire de cisaillement = $\frac{5h^2}{6} = 187,5[mm^2]$

Le tableau 4.7 montre la flèche attendue pour les deux cas de charge appliqués. En ce qui concerne la flèche long terme résultant du fluage de l'échantillon, nous avons calculé les différents cas possibles en fonction de la classe de service choisie. Pour nos essais, nous n'imposons aucun changement d'humidité à nos éprouvettes, nous sommes donc en classe de service 1 ou 2. Nous avons estimé que l'humidité relative de l'air était d'environ 70% grâce à la prise de mesure de l'humidité d'un échantillon modèle présent dans la même pièce que les essais. Nous considérons de ce fait que nos échantillons sont utilisés selon la classe de service 1. Mais, lorsqu'un élément de bois est mis en place dans des conditions proches de son état vert, l'Eurocode 5 propose d'augmenter la valeur du k_{def} de 1 [62]. Nous analysons également ce cas-là car nos éprouvettes sont proches de leur PSF en début d'essai.

Contrainte à la rupture [%]	Flèche initiale δ_i^{th} [mm]	Flèche LT [mm] $k_{def} = 0,6$	Flèche LT [mm] $k_{def} = 1,6$
30	1,20	3,11	4,31
60	2,39	6,22	8,62

TABLE 4.7 – Flèches théoriques des échantillons

Lorsqu'un échantillon est rompu, nous avons fait le choix de remplacer le banc complet même si l'autre échantillon n'est pas rentré en rupture. Cela nous paraît judicieux de

7. La démonstration de celles-ci se trouvent en annexe A

prendre deux échantillons neufs afin de partir sur le même pied d'égalité. Au total, nous avons testé vingt échantillons dont trois sont arrivés à la rupture. Il est important de signaler qu'ici nous n'avons pas suffisamment d'échantillons pour réaliser une étude statistique concrète. Nous essayons d'en ressortir des tendances, mais nous ne pouvons en aucun cas en tirer des conclusions générales.

Déformée initiale

La déformée initiale théorique δ_i^{th} est obtenue via l'équation 4.15. La déformée initiale expérimentale δ_i^{exp} est, quant à elle, obtenue simplement en observant le graphique de la déformation dans le temps de l'éprouvette et en prenant sa première valeur obtenue après vingt secondes de chargement.

Sur les figures 4.26 et 4.27, nous présentons la flèche initiale pour chaque œdomètre. Le premier représente les échantillons ayant supporté une charge de 30% de leur force à la rupture et le second, une charge de 60%. Sur chaque histogramme, nous avons tracé en vert la flèche théorique d'une flexion quatre points fournie dans le tableau 4.7. Ces deux illustrations semblent montrer que c'est le second cas de charge qui se rapproche le plus de δ_i^{th} . Si nous faisons une moyenne de chaque graphique, la flèche initiale observée pour un cas de charge de 30% équivaut à **70%** de la flèche théorique. La flèche observée pour un cas de charge de 60% est de **89%** de la flèche théorique.

Nous pouvons observer également l'influence des éprouvettes choisies. Pour rappel, les œdomètre numéro 01 et 05, 02 et 06, 03 et 07, 04 et 08 sont liés car ce sont des couples d'éprouvettes provenant de la même grume et des mêmes fibres (voir le tableau 4.6). Seuls les bancs d'essai "bis" ne seront pas analysés ici puisque le parallèle n'est plus possible. La tendance semble montrer que les œdomètres du couple "03 et 07" sont à chaque fois les plus proches de la valeur théorique. Ces essais accueillent les éprouvettes extraites de la grume d'épicéa numéro 3. À l'opposé, si l'on doit déterminer le couple offrant la plus faible flèche, nous choisissons les œdomètres 02 et 06 qui accueillent des éléments provenant de la grume d'épicéa numéro 5.

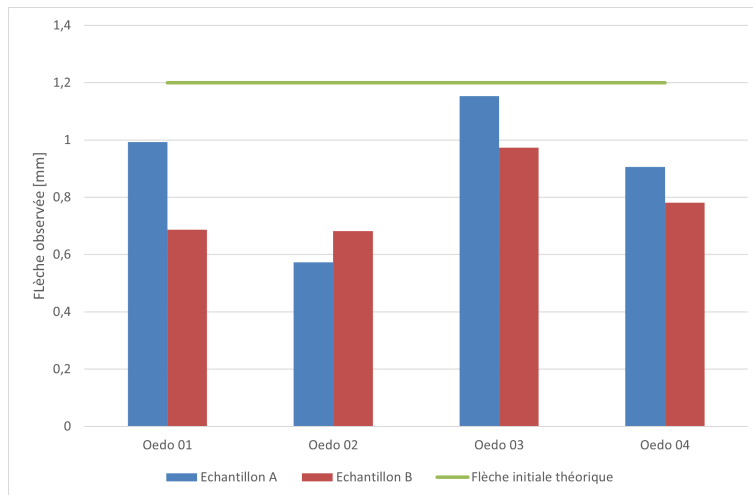


FIGURE 4.26 – Échantillons soumis à une charge de 30% de la force à la rupture

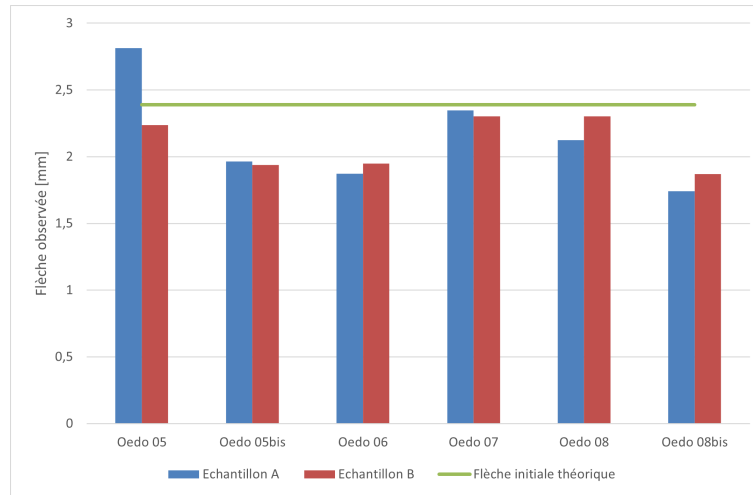


FIGURE 4.27 – Échantillons soumis à une charge de 60% de la force à la rupture

Sur la figure 4.28, nous essayons de comparer l'influence de la direction de la force appliquée. Il est très difficile d'en ressortir une réelle tendance avec si peu d'informations. Nous y observons encore une fois que lorsque l'on applique une force équivalente à 60% de la force à la rupture, on se rapproche plus de la flèche théorique que dans l'autre cas.

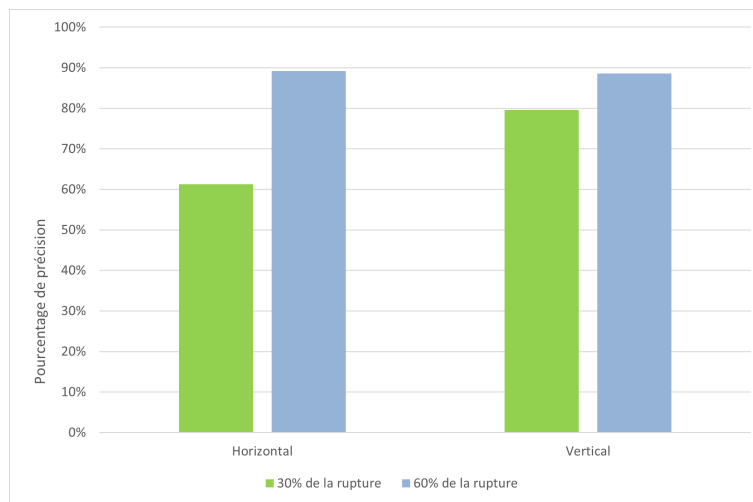


FIGURE 4.28 – Précision de la flèche initiale par rapport à la flèche initiale théorique en fonction de la direction d'application de la force

L'influence de l'état vert des échantillons est, quant à elle, difficile à analyser. Sur la figure 4.27, les œdomètres "bis" ne semblent pas montrer une flèche plus proche de la flèche théorique. La déformée paraît plus faible pour ces échantillons, ce qui peut s'expliquer par le gain de propriété mécanique vu que les échantillons ont séché. Mais cette observation est lacunaire et nécessite d'autres essais pour pousser la réflexion sur ce sujet.

Déformée long terme

La déformée long-terme que nous avons expérimentée sur les éprouvettes est en quelque sorte le point clé de cette expérience. Cependant, que signifie le "long terme"? Nos essais

ont duré seulement 41 jours. Est-ce suffisant pour affirmer que nous avons observé un comportement long terme du bois ? Dans la littérature que nous avons présentée, les auteurs tiraient leurs conclusions sur des expériences qui ont duré parfois des centaines de jours. Nous ne pouvons donc pas encore estimer réellement l'impact de nos choix sur le comportement des éprouvettes. Le coefficient k_{def} proposé dans l'Eurocode est applicable pour des charges qui ont une durée de service de 50 ans. Nous sommes donc ici loin du compte.

Les figures 4.29 et 4.30⁸ illustrent l'évolution de chaque éprouvette non rompue au cours du temps. Nous y avons ajouté les flèches théoriques calculées à l'aide de différents k_{def} fournis dans le tableau 4.7. L'allure de ces courbes est tout à fait caractéristique du fluage. Nous y observons la première phase de déformation initiale et la seconde qui s'illustre par un plateau constant tel que discuté à la section 4.2.1.

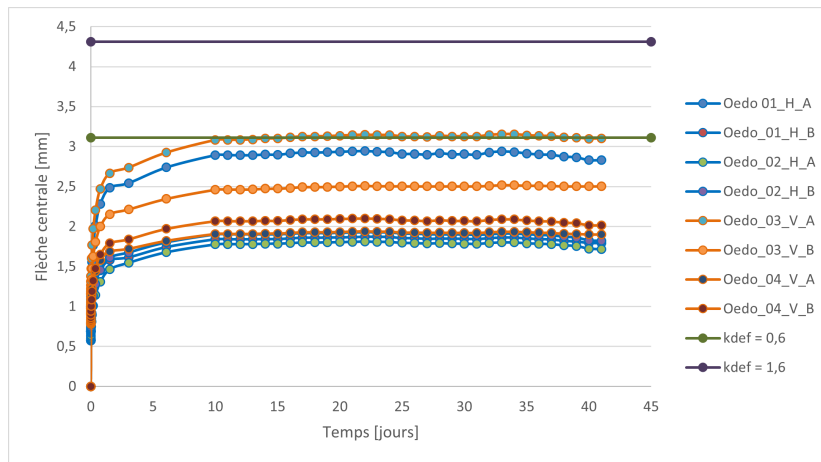


FIGURE 4.29 – Évolution de la flèche centrale pour une charge de 30% de la force à la rupture

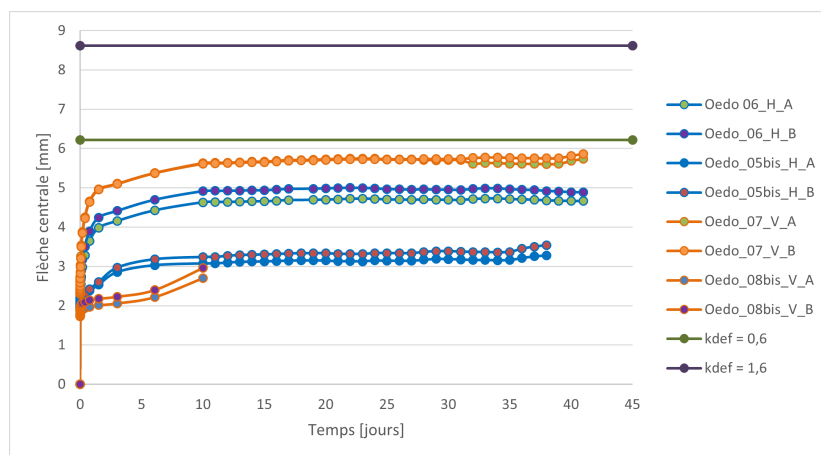


FIGURE 4.30 – Évolution de la flèche centrale pour une charge de 60% de la force à la rupture

8. Le nom des éprouvettes exprime successivement le numéro de l'œdomètre, la direction de la force (V pour vertical ; H pour horizontal) et sa position sur le banc d'essai (A ou B)

Nous avons tracé les valeurs théoriques que nous devrions obtenir selon l'Eurocode 5 pour un usage en classe de service 1, si les échantillons sont proches de leur PSF lors de leur mise en place ou non. Nous observons ici que la déformée, après 41 jours, semble correspondre à un k_{def} de 0,6. Cela peut être dû au fait que les échantillons ont séché trop vite ou tout simplement qu'ils n'avaient pas une humidité proche de leur PSF au début de l'essai.

Nous devons aussi rappeler que nous avons choisi un module de Young moyen pour calculer la flèche théorique des échantillons. L'annexe G.2 explique en détail le résultat de chaque grume et met en évidence la différence qu'il peut y avoir entre les échantillons.

De façon générale, nous observons sur les figures précédentes qu'à nouveau, la flèche théorique "long terme" est supérieure aux flèches expérimentales. Ici, l'influence du niveau de chargement ne semble pas avoir un impact bien distinct. La moyenne du chargement le plus faible montre une précision de **71%** par rapport à la flèche théorique au bout de 41 jours d'essai. Le chargement le plus élevé a, quant à lui, une précision de **75%** si l'on considère uniquement les échantillons testés pendant au moins 35 jours.

Il est plus compliqué d'analyser le comportement des couples d'échantillons sur le long terme car les bancs numéro 5 et 8 ont dû être remplacés. Nous remarquons toutefois que le couple "03 et 07" est à nouveau celui qui est le plus proche de la flèche théorique.

L'influence de la direction de l'application de la force est un nouvel élément que nous pouvons évaluer. Nous avons montré dans la section 4.2.1 que la fonction de fluage est plus importante lorsqu'on applique une force verticale aux cernes du bois plutôt que de façon horizontale (voir la figure 4.2). Cette observation, nous pouvons la voir sur les figures 4.29 et 4.30. Pour un chargement de 30%, les résultats des orientations horizontales sont tous inférieurs aux résultats des orientations verticales. Seul l'échantillon E03-4-DA-2 ne se comporte pas de la même façon. Cet échantillon provient de la même grume que les couples "03 et 07".

Pour un chargement de 60%, les échantillons de l'œdomètre 8bis n'ont pas un comportement habituel. Ces échantillons proviennent des grumes 10 et 5. Si nous écartons cet essai, la tendance observée suit également la théorie avec une flèche, provoquée par un chargement vertical, supérieure.

Calcul du k_{def} expérimental

Afin de déduire le coefficient k_{def} de nos expériences, nous avons utilisé la formule 4.7 fournie par MONTERO [62]. Nous faisons le calcul pour toutes les éprouvettes ayant subi le même chargement comme suggéré. Pour rappel, la formule s'écrit de la sorte :

$$\bar{J} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{J_i(t)}{J_i(t_0)} \quad (4.17)$$

Pour calculer la complaisance des éprouvettes, nous utilisons la même méthode que ZHOU et al. [73] (voir page 98). Nous prenons la formule d'une flexion quatre points, et nous isolons simplement l'inverse du module de Young.

$$J_i(t) = \frac{1}{E} = \frac{24 \cdot 2I \cdot \delta(t)}{aP(8a^2 + 3b^2 + 12ab)} \quad (4.18)$$

Cette formule a l'avantage de recalculer le module de Young réel de chaque échantillon. En effet, la complaisance initiale est calculée grâce à la déformation instantanée et nous pouvons en déduire le module correspondant. La figure 4.31 montre bien que le fluage du bois provoque une diminution du module de Young. Celle-ci est anticipée par l'Eurocode 5 à l'aide de l'équation 4.12. De plus, l'approche de l'équation 4.18 nous permet de ne pas devoir déduire les contraintes et les déformations à chaque instant de l'essai comme le suggère l'équation 4.6.

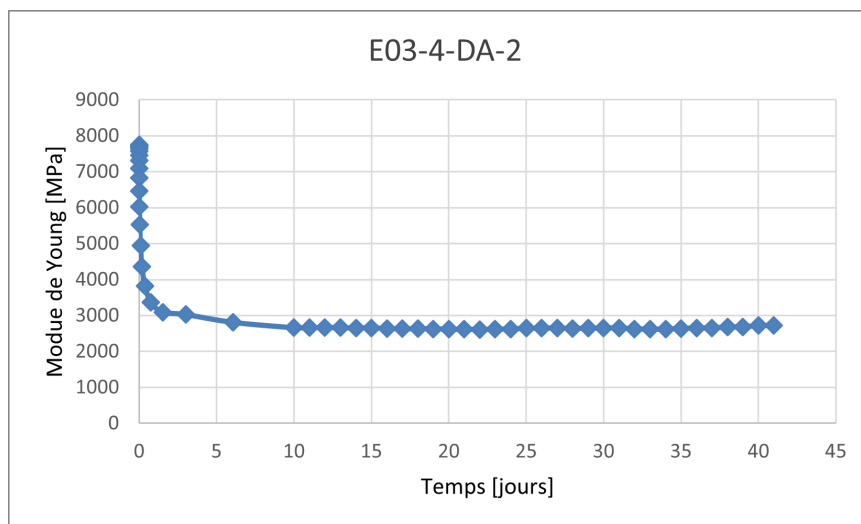


FIGURE 4.31 – Évolution du module de Young au cours de l'essai

La figure 4.32 présente l'évolution du coefficient obtenu grâce aux équations 4.17 et 4.18, en sachant que k_{def} vaut $\bar{J} - 1$. Contrairement au point précédent, la tendance semble montrer que le coefficient correspondant à nos essais de fluage est de 1,6. Cela signifie que l'état "semi-vert" des échantillons a une influence sur leur comportement dans le temps.

Cette différence de conclusion vient probablement de l'utilisation précise du module de Young de chaque éprouvette. En effet, via l'équation 4.18 nous déterminons l'inverse du module de Young initial de tous les éléments. Nous ne devons plus faire appel aux valeurs obtenues grâce aux batteries d'essai sur la ZwickRoell.

Il était par contre prévisible que le coefficient provenant du cas de charge le plus faible soit finalement le plus élevé. En effet, la complaisance $J_i(t)$ est inversement proportionnelle à la charge P (équation 4.18) et donc le k_{def} l'est aussi. La déformée est trop faible entre les deux cas de charge pour apporter une réelle influence par rapport au poids appliqué.

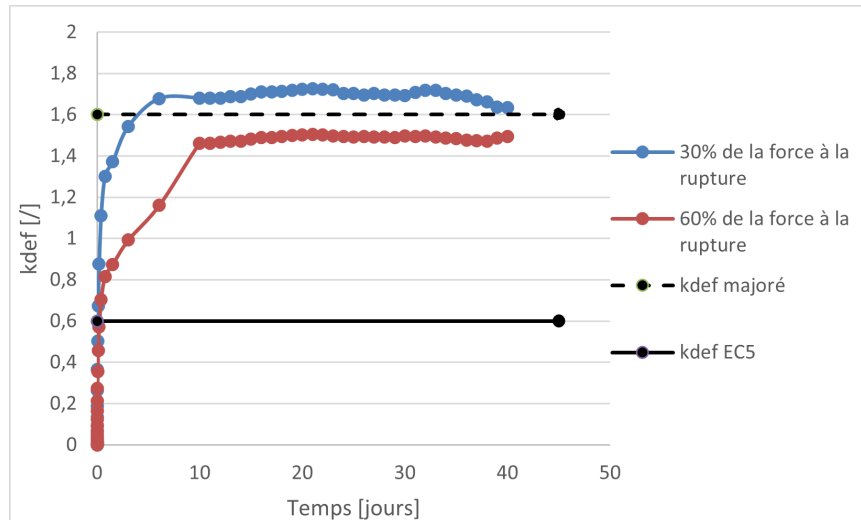


FIGURE 4.32 – Évolution de k_{def} au cours du temps pour tous les échantillons d'un même chargement

Échantillons rompus

Comme signalé précédemment, deux bancs d'essai ont vu leurs échantillons se rompre. Sur l'œdomètre 05, l'éprouvette E03-4-DA-1 s'est rompue après seulement 18 heures (figure 4.33). Cette rupture rapide ne peut pas provenir du fluage. Une hypothèse est que cette éprouvette comportait des défauts que nous n'avions pas vus. Il faut rappeler que ces éprouvettes proviennent des extrémités des grumes qui ont eu le temps de sécher dans le laboratoire à l'air libre. Il est fort probable que quelques micro-fissures se sont propagées tout au long de l'élément. Le problème ne semble pas provenir de la fibre car l'éprouvette E03-4-DA-2 se comporte normalement pour une charge de 30%.

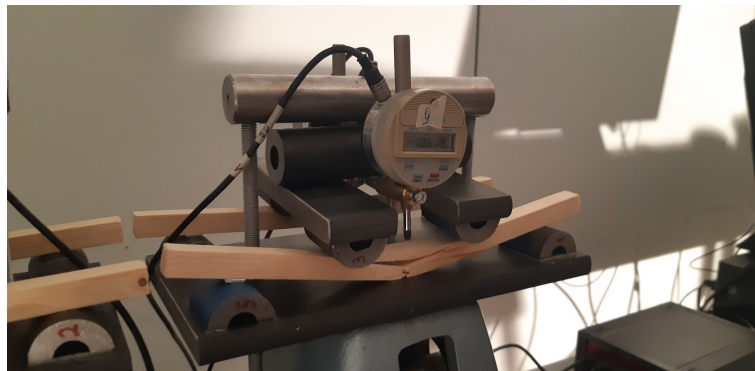


FIGURE 4.33 – Rupture de l'échantillon E03-4-DA-1

Sur l'œdomètre 08, les deux échantillons, E10-4-AD-1 et E05-4-DB-1, se sont rompus en même temps selon les données récupérées. La rupture s'est produite après 28 jours alors que la flèche constatée à ce moment-là était de 6 [mm] pour le premier et 8 [mm] pour le second (figure 4.34). Ces valeurs sont élevées au vu des autres que nous pouvons observer sur la figure 4.30. L'échantillon E05-4-DB-1 semble être rentré au début de la phase trois du fluage avec une augmentation non linéaire de sa déformation. Sa rupture a certainement entraîné celle de la seconde éprouvette du banc d'essai.

Nous ne pouvons pas vraiment considérer ces évènements comme des ruptures de fluage. Notre but n'était pas de rompre les échantillons si vite. Il serait peut-être judicieux de tester d'autres forces appliquées aux éprouvettes afin d'éviter ces ruptures prématurées.

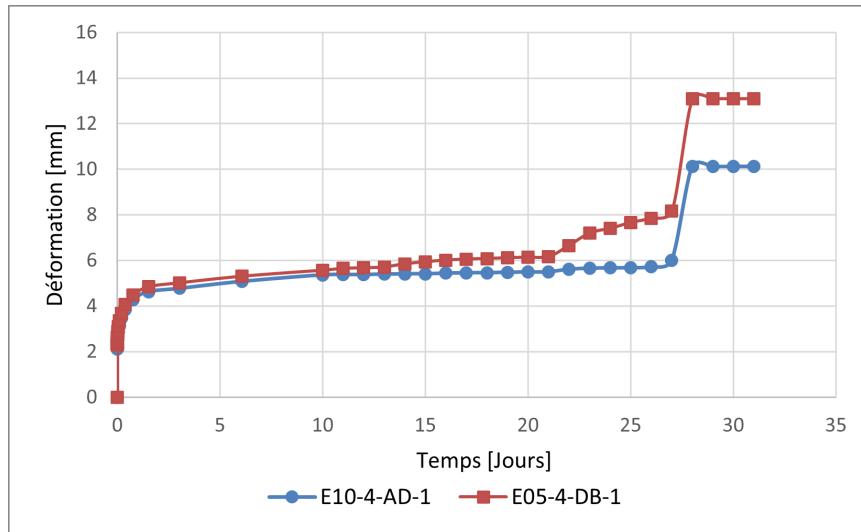


FIGURE 4.34 – Déformation dans le temps des éprouvettes de l'œdomètre 08

4.4.3 Réflexion supplémentaire

À l'issue de la présentation de nos résultats, nous ne pouvons pas encore déterminer avec certitude quel k_{def} nous préconisons pour les éprouvettes d'épicéa testées.

Le problème principal de notre réflexion provient, selon nous, du module de Young moyen que nous avons pris pour calculer les flèches théoriques long terme avec un k_{def} de 0,6 ou de 1,6. Nous sommes alors repartis des données brutes de nos expériences pour en déduire, pour chaque éprouvette, le module de Young effectif E_{eff} à l'instant $t = 20$ [s]. Pour ce faire nous avons simplement calculé l'inverse de la complaisance initiale $J_i(t)$ tel que présenté dans l'équation 4.18. Grâce à cela, nous pouvons maintenant déterminer selon l'Eurocode les flèches prévisionnelles pour chaque éprouvette en utilisant leur propre module de Young.

Pour chaque éprouvette, nous avons rassemblé ces données dans un graphique. Nous vous présentons ici les graphiques déduits des œdomètres 02, 03, 06 et 07 sur successivement les figures 4.35, 4.36, 4.37, 4.38.

Que ce soit pour un chargement imposé de 30% (figure 4.35 et 4.36) ou un chargement de 60% (figure 4.37 et 4.38), les allures théoriques et expérimentales de la déformation montrent toutes les deux qu'un k_{def} de 0,6 se rapproche le plus de la situation réelle. Cependant, bien qu'il corresponde mieux aux données expérimentales, ce coefficient offre dans tous les cas une certaine marge de sécurité. En effet, la courbe bleue est tout le temps inférieure aux prévisions de l'Eurocode (ligne verte). Ceci est évidemment une très bonne chose et c'est ce à quoi nous nous attendions au début de nos recherches. Si nous prenons le k_{def} majoré, nous serons de surcroît encore plus du côté de la sécurité.

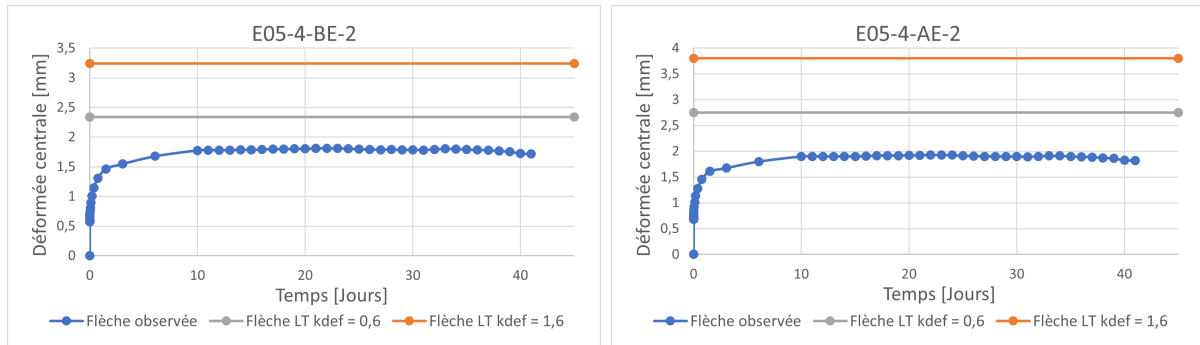


FIGURE 4.35 – Evolution des éprouvettes de l'œdomètre 02

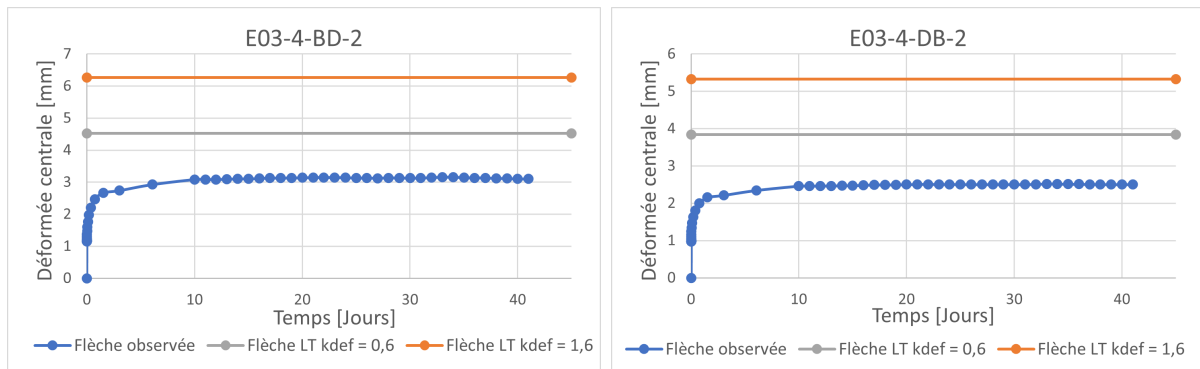


FIGURE 4.36 – Evolution des éprouvettes de l'œdomètre 03

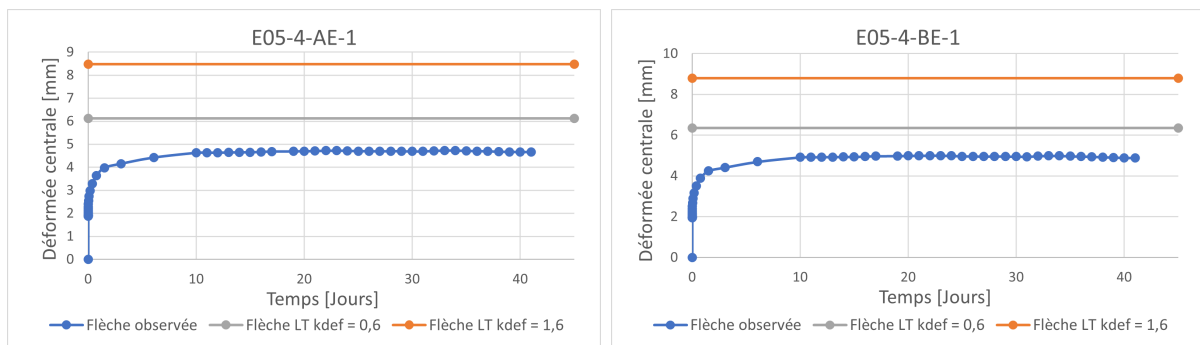


FIGURE 4.37 – Evolution des éprouvettes de l'œdomètre 06

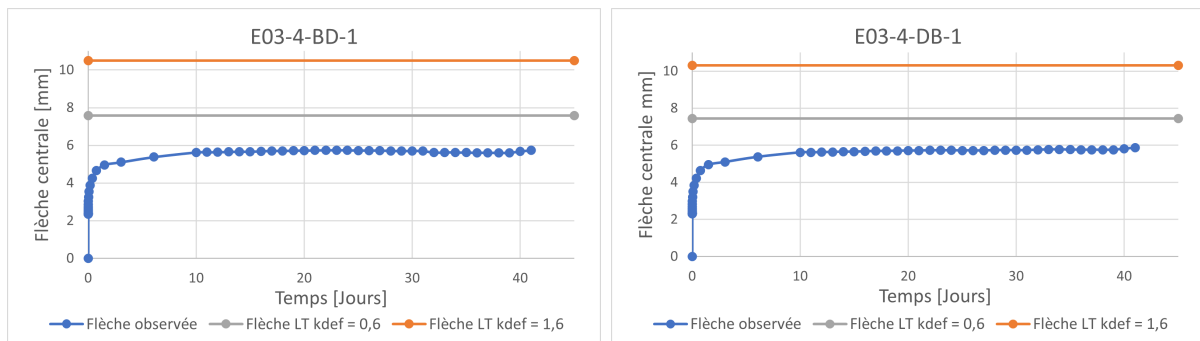


FIGURE 4.38 – Evolution des éprouvettes de l'œdomètre 07

4.4.4 Pistes d'améliorations

Nos expériences nous ont apporté des premières indications sur les facteurs qui entrent en jeux dans la détermination du k_{def} afin de prévoir la déformée des échantillons. Dans cette section, notre objectif est de présenter nos différentes idées dans le but de poursuivre cette étude de façon plus complète.

Le banc d'essai

Nos bancs d'essai se sont avérés fonctionnels et pratiques afin d'appliquer une flexion quatre points à des éprouvettes de bois. Puisque nous avons utilisé du double-face pour fixer les appuis, il sera très facile pour les essais futurs de les déplacer si d'autres dimensions d'éprouvettes doivent être testées. L'arceau pourra lui être facilement abaissé ou remonté car il est fixé à l'aide de tiges filetées et d'écrous.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est la rotule qui est placée entre les deux éprouvettes d'un même banc. Le tube de répartition (voir annexe G.1) joue le rôle de rotule à la fois en ayant la possibilité de rouler sur les plaques de répartition et de pivoter grâce à son contact avec l'arceau via une vis pénétrante. Ce système fonctionne jusqu'à une certaine différence de comportement entre les deux éprouvettes. L'œdomètre 8 a notamment vu ses deux échantillons rompre en même temps, ce n'est pas un hasard. Le banc d'essai numéro 5 n'a vu lui qu'un échantillon se rompre. Cependant, puisque les plaques de répartition sont toutes les deux penchées du côté de l'éprouvette rompue, il n'est plus possible d'estimer la force appliquée sur l'élément restant.

Cela signifie que les deux échantillons d'un même banc d'essai ne sont pas complètement indépendants. Il faut améliorer ce point-là afin de rendre entièrement libre la déformation des deux éléments. Une solution pourrait être de lier l'ensemble arceau - tube de répartition - plaque de répartition dans le but de conserver une position plane dans l'axe de l'œdomètre. Il faudra évidemment faire attention à laisser un certain degré de liberté pour permettre une inclinaison minimale de la plaque de répartition.

Les conditions d'essai

Nous avons fait varier différents paramètres au cours de nos essais :

- le niveau de charge ;
- le sens d'application de la force ;
- différentes grumes d'épicéa.

Dans notre état de l'art, nous avons mis en évidence de nombreux paramètres qui peuvent influencer le comportement du bois sur le long terme et que nous n'avons pas testé. Les futurs rôles des grumes dans le secteur de la construction seront très variés. Le prochain objectif de ce travail sera d'évaluer l'influence de chaque paramètre que pourra subir une grume quand elle sera mise en place.

Humidité du bois Afin de comprendre le réel comportement du bois en service, il serait intéressant de le tester dans les conditions des classes de service 2 et 3 de l'Eurocode. Nos éprouvettes étaient initialement humides, mais elles se sont trop rapidement équilibrées avec l'ambiance extérieure. Pour observer un fluage mécanosorptif, il faut faire varier

l'ambiance de l'expérience en imposant une humidité élevée constante et/ou en créant des variations d'humidité telle qu'une poutre de charpente pourrait subir. Nous pouvons également imaginer de sécher les échantillons et puis de les humidifier à nouveau afin de tester un bois qui serait sorti séché et prêt à l'emploi d'une scierie et qui est mis en place dans des conditions rudes.

Le chargement imposé Nous ne sommes pas convaincus que les chargements de 30% et de 60% soient les meilleurs choix. En effet, le premier chargement semble stable et en 40 jours de test, la fonction de fluage n'a pas quitté la seconde phase. Nous nous attendions à ce comportement mais nous ne savons pas pendant combien de temps cela va encore durer. Ce chargement peut cependant s'avérer pratique si nous faisons varier des paramètres tels que l'humidité ou l'essence utilisée qui risquent d'augmenter le fluage du bois et de rendre le second chargement trop sévère.

Le second chargement a, quant à lui, rompu trois éprouvettes. Comme déjà précisé, les ruptures ne sont pas dues uniquement à la charge mais celle-ci a certainement un impact. Néanmoins, certaines éprouvettes ont résisté à plus de quarante jours d'essai et ne paraissent pas plastifiées. Ce chargement est intéressant, mais il faut prévoir qu'il y aura probablement des ruptures prématurées dans le lot.

Une idée intéressante serait de prendre des exemples concrets de dimensionnement d'ouvrages avec des charges qui leur seraient imposées. Cela nous permettrait de savoir à quel chargement, par rapport à sa contrainte ultime, un élément structural doit être capable de résister durant toute sa vie. Nous pourrions alors tester le fluage sur des éprouvettes pour simuler le comportement d'une structure avec des charges réellement appliquées.

Variation des essences Pour l'instant, nous avons testé des éprouvettes d'épicéa provenant de trois grumes. L'influence de la provenance de chaque échantillon n'est maintenant plus à démontrer. Réaliser des tests sur l'épicéa et sur d'autres essences en quantité pourrait permettre de caractériser le comportement de chaque bois. Pour valoriser ce matériau, nous nous devons de sortir des statistiques grossières dans le but de valoriser au mieux chaque essence. Dans le futur, il nous paraît envisageable d'obtenir un k_{def} différent pour chaque essence.

Temps d'essai Une structure, aujourd'hui, doit au minimum être fonctionnelle pendant cinquante ans. Il n'est évidemment pas envisageable de réaliser des essais d'une telle durée. Par contre, il est primordial d'augmenter la durée de nos essais pour obtenir plus d'informations sur le comportement du bois et augmenter la précision du coefficient k_{def} . Certains articles scientifiques ([72]) se sont intéressés à créer des modèles mathématiques pour extrapoler les résultats d'un essai de fluage de quelques semaines à un fluage de cinquante ans. Il serait bon de se pencher sur ces études pour améliorer nos critères de recherches.

Échantillonnage Dans le monde de la construction, l'effet d'échelle est un phénomène important à prendre en compte. Celui-ci stipule que "les efforts internes, la sensibilité au flambement et les déformations grandissent plus que proportionnellement à la taille" [77]. Les grumes ne se comportent pas de la même façon que les éprouvettes. Les poids propres ne sont plus du tout les mêmes et l'hypothèse de ne pas considérer ceux-ci n'est

plus correcte. Nous avons d'ailleurs mentionné l'observation de MONTERO et GRIL [72] dans la section 4.2.5 qui pointait le risque de la perte de sécurité si l'on utilise le même coefficient correcteur pour des éprouvettes ou des plus gros éléments. Pour les essais futurs, il faudra s'attacher à tester différentes tailles d'éléments.

Type d'effort Le fluage du bois n'est pas le même lorsque l'on lui applique un effort de flexion ou de compression. Dans le cadre de recherche du projet Robotronc, il sera dès lors important de réaliser des essais de fluage en compression pour caractériser les efforts que subiront les grumes à leurs points d'appuis.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

À l'issue d'un an de travail, il est temps de faire un bilan de notre étude. Après 30 grumes testées, 8 oedomètres montés et plusieurs dizaines d'heures passées en laboratoire, avons-nous atteint nos objectifs ?

Pour rappel, nos objectifs étaient les suivants :

- valider un protocole non-destructif expérimental permettant de caractériser mécaniquement une grume ;
- définir des critères d'exclusions dans le protocole ;
- se libérer de l'Eurocode de façon à optimiser la caractérisation de chaque grume ;
- ajouter une interprétation du comportement long-terme de la grume ;
- proposer un protocole industriel réalisable pour la flexion.

5.1 Les essais de flexion sur grumes

Des essais en flexion quatre points ont été menés afin de déterminer quel banc expérimental était le plus indiqué pour effectuer des essais de caractérisation de grume. Nous avons démontré que l'utilisation d'un laser positionné sous le point central de la grume est suffisante pour déduire l'entièreté des informations nécessaires. Pour des grumes dont l'élancement est élevé, la rotation et le tassement aux appuis peuvent être négligés. Un vérin et un laser sont donc suffisants pour constituer le banc d'essai.

Les essais que nous avons menés en laboratoire consistaient en deux séries de cinq cycles de chargement faible (ELS), séparés par un cycle de chargement élevé (ELU). Les séries de cycles ELS nous permettent de vérifier l'impact du cycle ELU sur la grume.

Après avoir analysé plusieurs possibilités, nous en sommes arrivés à la conclusion que la meilleure approche était la suivante.

- Pour le comportement court-terme, en imposant une flèche δ_{CT} nécessaire au projet, on mesure, grâce à l'essai proposé, la force $F_{ELS,CT}$ qui correspond à un chargement de service. À l'aide de cette force et à un coefficient μ , on peut déduire la force ultime F_{ELU} à laquelle la grume devrait résister.
- Afin d'anticiper le comportement long-terme, lors de l'application d'une flèche δ_{LT} , nous mesurons une force $F_{ELS,LT}$ qui, à l'aide d'un coefficient ω , nous permet de déterminer la force $F_{ELS,CT(LT)}$.

Nous avons évalué les coefficients μ et ω uniquement sur base des équations de combinaisons de charge définies dans l'Eurocode.

Nos essais mécaniques imposent une force que les grumes ne seront pas censées atteindre dans leur vie : F_{ELU} . Un de nos objectifs était d'évaluer si la grume en essai a correctement résisté et n'a pas été endommagée. Nous avons déterminé trois éléments observables pendant l'essai qui pourraient indiquer une dégradation de la grume, à savoir une diminution importante de la pente du graphique force-déplacement lors du cycle ELU ou une mauvaise stabilisation du module de Young après le cycle ELU ou des signes de faiblesse intense comme des fissures.

L'observation de ces éléments durant l'essai permet de l'interrompre si nécessaire et donc de conserver l'intégrité de la grume pour une autre valorisation.

Il existe aujourd'hui d'autres méthodes pour caractériser mécaniquement le matériau bois. Nous avons montré dans ce travail que le classement visuel proposé par l'Eurocode est trop sévère pour du bois rond. Ce type de classement peut apporter une première indication sur la qualité de la grume.

Nous avons également comparé nos résultats expérimentaux à ceux réalisés par V. HOU-BEN qui a utilisé le Grindosonic pour caractériser les grumes et nous obtenons des résultats très similaires.

Finalement, nous proposons un protocole industriel de caractérisation mécanique non-destructif des grumes. Celui-ci est composé d'un classement visuel adapté à chaque essence, ainsi que d'essais Grindosonic pour offrir une première idée des capacités de la grume.

Ensuite, les éléments de bois sont testés en flexion quatre points et soumis à différents cycles. Nous proposons au minimum deux cycles ELS pour déterminer $F_{ELS,CT}$, un cycle ELU et enfin plusieurs cycles ELS pour vérifier la conservation de l'intégrité de la grume. Ce protocole à l'avantage de pouvoir être automatisé et de caractériser chaque grume selon ses réelles capacités.

De nombreuses pistes d'améliorations sont envisageables pour l'avenir.

Concernant les essais de flexion en laboratoire, il serait utile de les compléter de façon à affiner nos résultats. Pour ce faire, nous proposons de :

- varier la vitesse de chargement de façon à réduire le temps total d'essai ;
- maintenir des efforts de chargement durant une courte durée ;
- tester de nouvelles essences ;
- modifier l'éclatement ;
- réaliser des essais à l'état sec ;
- réitérer des essais avec 50 cycles ou plus ;
- mener davantage de grumes à la rupture afin d'observer le rapport entre F_{rupt} et F_{ELU} .

Pour le protocole industriel, il serait intéressant de :

- mieux définir les critères d'exclusions comme le nombre minimum et maximum de cycles ELS, la variation limite de la pente ou la limite de variation de E_g ;
- créer un réel abaque de prédimensionnement avec l'ensemble des données acquises ;
- définir quelles sont les essences les mieux adaptées compte tenu des problématiques d'approvisionnement en résineux et feuillus en Wallonie.

5.2 Les essais de fluage sur éprouvettes équarrées

Malgré le peu d'échantillons testés et un nombre réduit de jours d'essai, nous sommes parvenus à obtenir certaines observations intéressantes dans le cadre de ce mémoire. Cependant, il reste encore beaucoup d'éléments à tester afin de proposer un coefficient ω plus juste pour alimenter notre protocole sur les grumes.

Les bancs d'essais que nous avons conçus sont fonctionnels et permettent d'accueillir des essais de flexion quatre points sur des éprouvettes. Ils peuvent être aussi facilement adaptés pour réaliser des essais de fluage en compression. L'amélioration la plus importante à apporter pour les futures recherches est l'augmentation de l'indépendance des échantillons testés sur un même œdomètre. Cela garantira plus de résultats et une meilleure précision dans les résultats expérimentaux.

Nous validons également le protocole que nous avons établi. Celui-ci devait être une première approche afin de fournir une base solide pour expérimenter d'autres éprouvettes dans le futur. Nous nous sommes intéressés à l'influence du taux de force appliqué, à l'orientation la force par rapport aux fibres du bois et à la caractérisation du coefficient k_{def} proposé dans l'Eurocode.

Les taux de forces que nous avons appliqués ont été choisis de manière arbitraire afin de ne pas dépasser les limites de course des œdomètres et des capteurs. Le premier chargement à 30% de la force à la rupture est intéressant par le fait qu'il impose au bois une contrainte

faible. Grâce à cela, on peut observer l'évolution lente de la fonction de fluage. Nous ne pouvons pas déterminer si les éprouvettes vont passer en phase trois de fluage avec les conditions que nous leur avons imposées. Mais ce chargement peut être instructif si des paramètres expérimentaux, tels que l'humidité du bois, sont modifiés.

Le second chargement à 60% de la force à la rupture a quant à lui mené trois éprouvettes à la rupture. Ce chargement risque d'être trop sévère pour de futures études si les paramètres initiaux de l'expérience (humidité initiale, échantillonnage, essence...) sont modifiés.

Les essais ont confirmé que le fluage en flexion appliqué de façon verticale aux cernes est plus sévère qu'une flexion horizontale aux cernes. Cette information sera intéressante pour anticiper, de la bonne façon, le comportement long terme des grumes.

Enfin, nous avons calculé expérimentalement le coefficient k_{def} qui est utilisé dans le protocole pour faire un lien entre $F_{ELS,LT}$ et $F_{ELS,CT(LT)}$. Pour nos éprouvettes initialement à l'état vert, le coefficient non majoré proposé par l'Eurocode semble le plus adapté. Cependant, nos éprouvettes se sont équilibrées avec l'ambiance extérieure après seulement deux jours. L'état vert initial des éprouvettes n'a pas eu d'effet significatif sur nos essais.

Les k_{def} que propose l'Eurocode paraissent sécuritaires car tous les calculs théoriques de flèches qui les intègrent, ont montré une prédiction trop importante de flèche. Afin de caractériser le matériau bois sur le long terme, il faudrait déduire des coefficients qui sont propres à chaque essence et aussi ceux qui dépendent de la taille des éléments testés.

Les essais de fluage que nous avons dirigés sont une première ébauche d'un long travail à venir. Maintenant que nous avons tous les outils pour réaliser des essais de fluage, il sera primordial de tester le bois dans des conditions plus difficiles que la classe 1 de l'Eurocode. Nous proposons les pistes d'améliorations suivantes pour **les essais de fluage sur éprouvettes** :

- apporter plus de degré de liberté aux éprouvettes placées sur un même banc ;
- faire varier l'humidité du bois pour analyser le comportement mécanosorptif du bois ;
- varier les chargements imposés aux éprouvettes en fonction des informations que l'on veut en retirer ;
- tester d'autres essences que l'épicéa ;
- réaliser des essais sur des éprouvettes de différentes tailles pour observer le comportement de la fonction de fluage avec l'effet d'échelle ;
- tester des éprouvettes en compression pour caractériser les efforts que subiront les grumes à leurs points d'appuis.

Enfin, il sera évidemment indispensable, une fois que le comportement sur éprouvette sera parfaitement compris, de tester une grume entière sous l'effet d'une flexion constante dans le temps.

ANNEXE A

CALCUL DE LA FLÈCHE D'UNE FLEXION QUATRE POINTS

A.1 Cas général quelconque

Nous souhaitons calculer la flèche à mi-travée de ce cas de flexion dit en "quatre points". Afin de calculer le déplacement instantané à mi-travée, nous allons utiliser le théorème de la force unité qui s'énonce comme suit [77] :

$$\delta_A = \int_{x=0}^{x=L} \frac{Nn}{E \cdot A} dx + \int_{x=0}^{x=L} \frac{Mm}{EI} dx$$

Voici l'analyse des moments fléchissants que nous prenons en compte pour utiliser le théorème de la force unité :

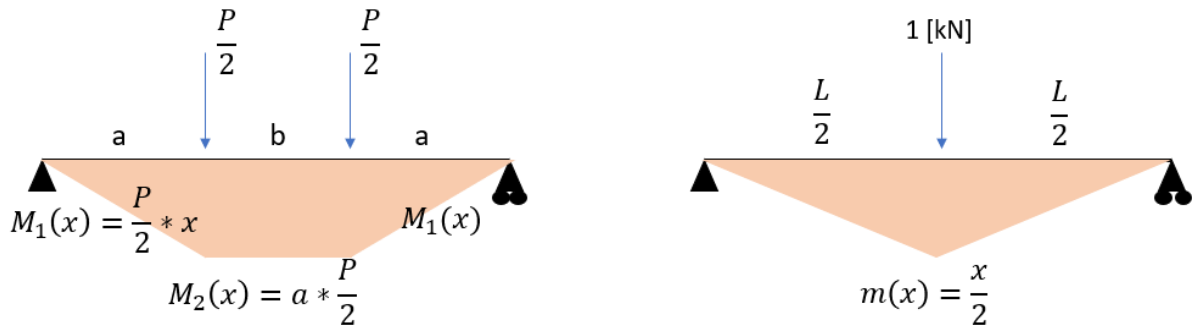


FIGURE A.1 – Moments fléchissants

La flèche des moments est donnée par :

$$\begin{aligned} \delta_M &= \frac{2}{E \cdot I} \cdot \left(\int_0^a \frac{P \cdot x}{2} \cdot \frac{x}{2} dx + \int_a^{\frac{b}{2}+a} \frac{a \cdot P}{2} \cdot \frac{x}{2} dx \right) \\ &= \frac{P}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{a^3}{3} + a \cdot \left(\frac{(\frac{b}{2} + a)^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right) \right) \\ &= \frac{a \cdot P}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{a^2}{3} + \frac{b^2}{8} + \frac{a \cdot b}{2} \right) \end{aligned}$$

Maintenant, nous devons analyser également l'effort tranchant dans la section :

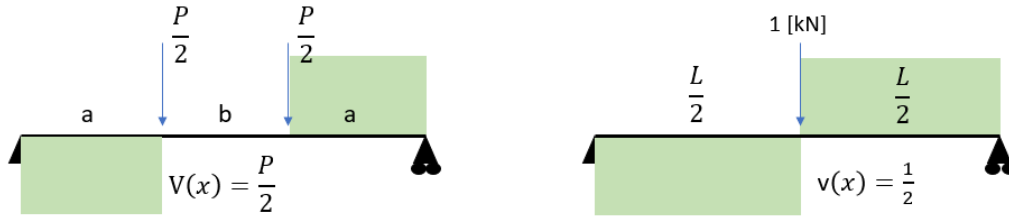


FIGURE A.2 – Effort tranchant

$$\begin{aligned}\delta_V &= \frac{2}{G \cdot A_v} \cdot \left(\int_0^a \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{2} dx \right) \\ &= \frac{a \cdot P}{2 \cdot G \cdot A_v}\end{aligned}$$

A.2 Comparaison avec la formule obtenue par ZHOU et al.

Afin de comparer la formule de flèche fournie par [73], nous reprenons simplement la flèche due aux moments fléchissants avec $a = b = \frac{L}{3}$:

$$\begin{aligned}\delta_M &= \frac{2}{E \cdot I} \cdot \left(\int_0^a \frac{P \cdot x}{2} \cdot \frac{x}{2} dx + \int_a^{\frac{L}{2}} \frac{a \cdot P}{2} \cdot \frac{x}{2} dx \right) \\ &= \frac{P}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{a^3}{3} + a \cdot \left(\frac{L^2}{8} - \frac{a^2}{2} \right) \right) \\ &= \frac{a \cdot P}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{L^2}{4} - \frac{a^2}{3} \right)\end{aligned}$$

Pour obtenir la complaisance, il faut isoler le module de Young :

$$\begin{aligned}\frac{1}{E} &= \frac{4 \cdot I}{a \cdot P} \cdot \frac{12 \cdot \delta_M}{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2} \\ &= \frac{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta_M}{a \cdot P \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}\end{aligned}$$

ANNEXE B

TABLEAU DE CLASSEMENT VISUEL DES NORMES EN1927, EN1316, DIN1052 ET DIN4074

Tabelle F.6 — Zuordnung von Nadelholzarten und Sortierklassen nach DIN 4074-1 und Güteklassen nach DIN 4074-2 zu den Festigkeitsklassen der Tabelle F.5

	1	2	3	4	5
1	Holzart (Handelsname) <i>Type de bois</i>	Herkunft <i>Origine</i>	Botanische Bezeichnung nach DIN EN 1912:1998-08, Tabelle 3 <i>Nom botanique selon la DIN...</i>	Sortierklasse ^{a,b,c} nach DIN 4074-1 bzw. Güteklasse nach DIN 4074-2 <i>Classement selon la DIN...</i>	Festigkeits- klasse <i>Classe de résistance</i>
2	Fichte <i>épicéa</i> Tanne <i>sapin</i>	CNE — Europa ^d CNE — Europa ^d	22 1	S7/C16M III	C16
3	Kiefer <i>pin</i> Lärche <i>mélèze</i>	CNE — Europa ^d CNE — Europa ^d	47 15	S10/C24M II	C24
4	Douglasie <i>Douglas</i> Southern Pine <i>Pin du sud</i>	Deutschland USA	54 35, 36, 43, 48	S13/C30M I	C30
5	Western Hemlock <i>Cigué de l'ouest</i>	USA & Kanada	62	C35M	C35
6	Yellow Cedar <i>cèdre jaune</i>	USA & Kanada	^e	C40M	C40

^a Diese Zuordnung gilt für trocken sortiertes Holz (TS).
^b Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren und entsprechend zu kennzeichnen (K).
^c Grundsätzlich kann Nadelholz maschinell in jede gewünschte Festigkeitsklasse sortiert werden.
^d CNE – Europa ist eine Abkürzung für Mittel-, Nord- und Osteuropa.
^e Botanische Bezeichnung: *Chamaecyparis nootkatensis*.

FIGURE B.1 – Tableau de la DIN1052 faisant le lien entre classement esthétique et classement mécanique

	A	B	C	D
Bois sur pied et abattus				
Longueur minimale (m)	3	3	3	3
Nœud (cm)				
Sain et adhérent	exclu	<4	<8	admis
mort	exclu	<3	<6	admis
pourri	exclu	exclu	<3	admis
Défilement (cm/m)				
$\phi < 20\text{cm}$	sans exigence	<1	<1.5	<3
$\phi 20\text{--}35\text{cm}$	<1	<1	<1.5	<3.5
$\phi > 35\text{cm}$	<1	<1.5	<2	<4.5
Fil tors (cm/m)	<3	<7	<10	admis
Trous d'insecte				
<2mm	exclu	exclu	exclu	admis
>2mm	exclu	exclu	exclu	ok si limité
Bois abattus uniquement				
Fente de cœur				
$\phi < 35\text{cm}$	exclu	exclu	<demi ϕ	admis
$\phi > 35$	<quart ϕ	<quart ϕ	<demi ϕ	admis
Roulure				
$\phi < 35\text{cm}$	exclu	exclu	exclu	<demi ϕ
$\phi > 35\text{cm}$	exclu	<quart ϕ	<tier ϕ	<demi ϕ
Poche de résine	exclu	1 par section	admis	admis
Bois de compression (%)	exclu	<10	<33	admis
Cœur excentré (%)	<10	<15	admis	admis
Taux de croissance(mm)	<4	<7	sans limite	sans limites
Pourriture	exclu	exclu	exclu	admis
Décoloration	exclu	exclu	ok dans l'aubier	admis
Échauffure (%)				
$\phi < 35\text{cm}$	exclu	exclu	<10	admis
$\phi > 35\text{cm}$	exclu	exclu	<20	admis

TABLE B.1 – Table de la EN1927 pour les épicéas et sapins

	A	B	C	D
Bois sur pied et abattus				
Longueur minimale (m)	3	3	3	3
Noeud (cm)				
Sain et adhérent	exclu	<5	<8	admis
mort	exclu	<4	<7	admis
pourri	exclu	exclu	<4	admis
Défilement (cm/m)				
$\phi < 35\text{cm}$	admis	<1.5	<2.5	admis
$\phi > 35\text{cm}$	admis	<2	<4	admis
Fil tors (cm/m)	<3	<7	<10	admis
Trous d'insecte				
<2mm	exclu	exclu	exclu	admis
>2mm	exclu	exclu	exclu	admis si limité
Bois abattus uniquement				
Fente de coeur				
$\phi < 35\text{cm}$	exclu	exclu	<demi ϕ	admis
$\phi > 35$	<quart ϕ	<tier ϕ	<demi ϕ	admis
Roulure				
$\phi < 35\text{cm}$	exclu	exclu	exclu	<demi ϕ
$\phi > 35\text{cm}$	exclu	<quart ϕ	<tier ϕ	<demi ϕ
Poche de résine	exclu	1 par section	admis	admis
Coeur excentré (%)	<10	<20	admis	admis
Taux de croissance (mm)	<8	<8	sans limite	sans limite
Pourriture	exclu	exclu	exclu	admis
Décoloration	exclu	exclu	ok dans l'aubier	admis

TABLE B.2 – Tableau du classement visuel de la EN1927 pour le Douglas

	A	B	C
Bois sur pied et abattus			
Longueur minimale			
Longueur (m)	2.5	2	2
Diamètre médian sur (et sous) écorce (cm)	35 (30)	30 (25)	25 (20)
Noeud (nbre/m)			
Sain	1/2.5 (<6cm)	1/1 (<12cm) ou 1 couronne/2 (chaque noeud seul <8cm)	<12cm
Pourri	exclu	exclu	1/1(<12cm)
Courbure (cm/m)	<2	<5	admis
Méplat (%)	<10	admis	admis
Gélivure	exclu	exclu	admis
Trous d'insecte	exclu	exclu	admis
Bois abattus uniquement			
Fente de coeur	admise si non traversante	longueur <moitié de ϕ	admis
Roulure	exclu	15% du ϕ central	15% du ϕ central
Pourriture	exclu	exclu	exclu

TABLE B.3 – Tableau pour le classement visuel de la EN 1316 pour le peuplier

Classe	1			2			3		
Caractéristiques	1			2			3		
Bois avec traitement de préservation	Admissible			Admissible			Admissible		
	bleuissement queu de vache			bleuissement queu de vache attaque d'insecte			bleuissement coup de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queu de vache		
	Non-admissible			Non-admissible			Non-admissible		
	coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche			coup de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche			larve vivante et œufs pourriture brune pourriture blanche		
Densité minimale	0.45 kg/dcm ³ avec nœuds								
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cernes supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section								
Nœuds (D_noeud/D_grume)	jusque 1/4			jusque 1/4			jusque 3/5		
Nœuds (somme du diamètre des nœuds sur une surface de 150mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume)*	jusque 1/2			jusque 1/2			jusque 3/5		
Courbure	10mm			15mm			20mm		
Courbure pour des éléments en flexion	1/200			1/100			/		
Classement final	1			2			3		

TABLE B.4 – Tableau de la norme DIN1052

ANNEXE C

UTILISATION DU PROGRAMME *APTOL*

Dans cette annexe, nous parlerons brièvement de l'utilisation du programme de post-traitement *APTOL* et de son installation.

Afin de faire fonctionner le programme, il faut tout d'abord installer les packages utilisés. Pour se faire, il est soit possible d'exécuter le fichier *Autorun.py* qui se trouve dans la partie *Post traitement* dans les fichiers de sauvegardes du mémoire, soit en utilisant la commande *pip install -u* suivit du nom du package à installer. Le lancement de la commande *pip* peut soit se faire à partir de l'*anaconda prompt* si vous possédez anaconda ou depuis la console de *spyder*¹/*miniconda*² si vous avez *spyder*.

Les packages à installer sont :

- **wxPython** : Afin d'avoir une interface utilisateur ;
- **numpy** : Afin de pouvoir créer des tableaux et des matrices ;
- **matplotlib** : Afin de créer des graphiques depuis python ;
- **openpyxl** : Afin de créer et modifier des Excels ;
- **reportlab** : Afin de créer des PDF ;
- **scipy** : Afin de réaliser des régressions linéaire et polynomiale.

Si une erreur venait à arriver, n'hésitez pas à consulter la documentation de *spyder*³ ou le forum *Stackoverflow*.

Avant de lancer le programme pour la première fois, veillez à vous assurer que les dossiers et fichiers suivant soit bien présent :

- La dernière version de *APTOL.py* et le fichier *SVG.txt* ;
- un dossier *TXT* comprenant tous les fichiers textes issus des essais ;
- un dossier *PDF* qui accueillera les PDF créé ;
- un dossier *Fig* qui accueillera les figures créées ;
- un dossier *Excel* qui accueillera les PDF créés ;
- un dossier *Resultat* possédant le fichier *Resultat.XLSX* ;

Une extension *Create_A3.py* existe et permet de créer des A3 reprenant l'ensemble des graphiques créés par *APTOL*. Pour l'utiliser, il suffit de le mettre dans le dossier courant et de créer un dossier *A3* où seront déposés les PDF.

1. <https://www.spyder-ide.org/>

2. <https://docs.conda.io/en/latest/miniconda.html>

3. <https://docs.spyder-ide.org/current/faq.html>

ANNEXE D

PDF TYPE EN SORTIE EN
POST-TRAITEMENT

Grume Epicéa 06 à l'état Vert

Essai effectué le 09-03-22
 Diamètre médian 382 [mm]
 Longueur entre appuis 6490 [mm]
 Critère flèche CT : L/350
 Critère flèche LT : L/250
 Masse de la grume : 575.50 [kg]

Cycle	E global[GPa]	Type de charg.	F_max [kN]
0	12.9	Placement	46.65
1	12.99	ELS	49.1
2	13.05	ELS	49.31
3	13.08	ELS	49.44
4	13.05	ELS	49.46
5	13.01	Placement	48.79
6	12.93	ELU	160.81
7	12.04	Placement	45.29
8	12.17	ELS	46.27
9	12.23	ELS	46.55
10	12.21	ELS	46.6
11	12.28	ELS	46.74

Hypothèses :

- borne inf. de la régression linéaire à 10% de F_ELU
- borne sup. de la régression linéaire à $\min(0.4 \cdot F_{ELU}, 1.0 \cdot F_{ELS})$
- borne inf. de la régression linéaire à 10% de F_max si cycle de rupture
- borne sup. de la régression linéaire à 40% de F_max si cycle de rupture
- $q_{eq} = F / (0.7337 \cdot \text{Dist}_{app}) \cdot 1000$ [kN/m]
- $\mu = 3.25$ et $\omega = 0.52$
- $G = 650$ [MPa] selon la NBN408

Résultats :

- Moyenne de E global sans placement : avant ELU : **13.04[GPa]**
après ELU : **12.22[GPa]**
- Moyenne des tassements sans placement : avant ELU : **0.40[mm]**
après ELU : **1.93[mm]**
- Moyenne des chargements durant l'essai : avant ELU : **49.33[kN]** ou **10.36[kN/m]**
après ELU : **46.54[kN]** ou **9.77[kN/m]**
- Chargements finaux : CT : **46.27[kN]** ou **9.72[kN/m]**
CT(LT) : **36.30[kN]** ou **7.62[kN/m]**
ELU : **160.81[kN]** ou **33.77[kN/m]**

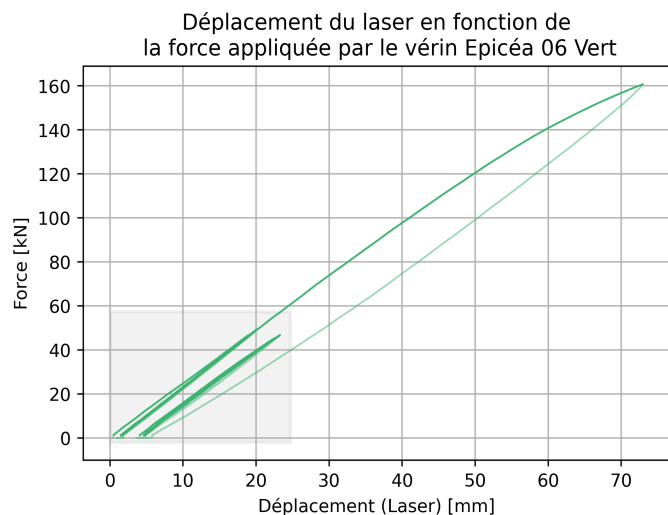


Figure 1

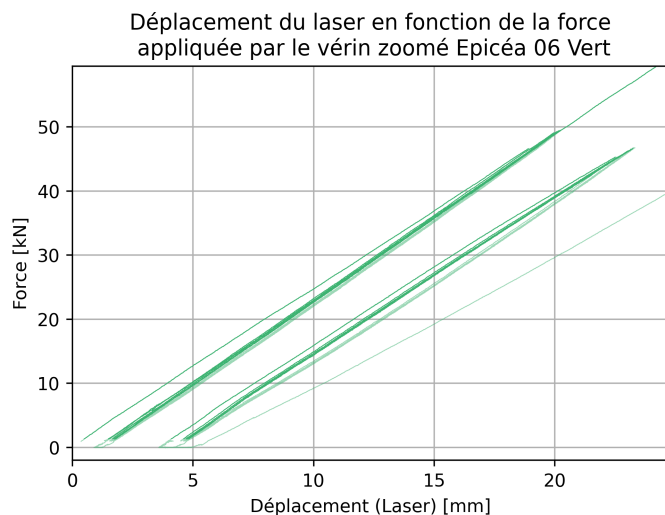


Figure 2

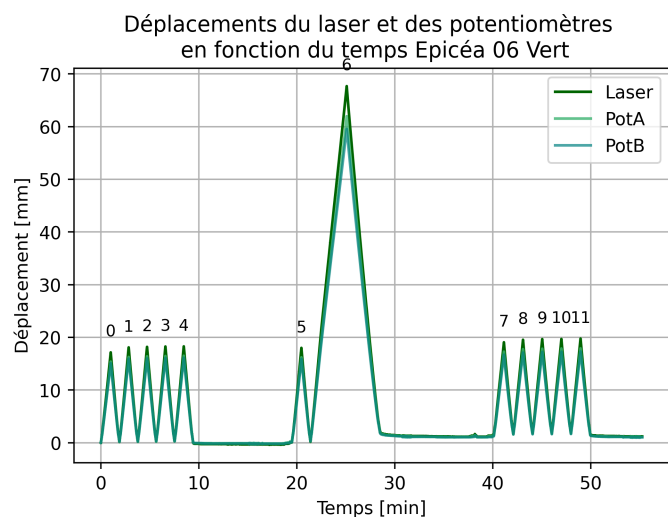


Figure 3

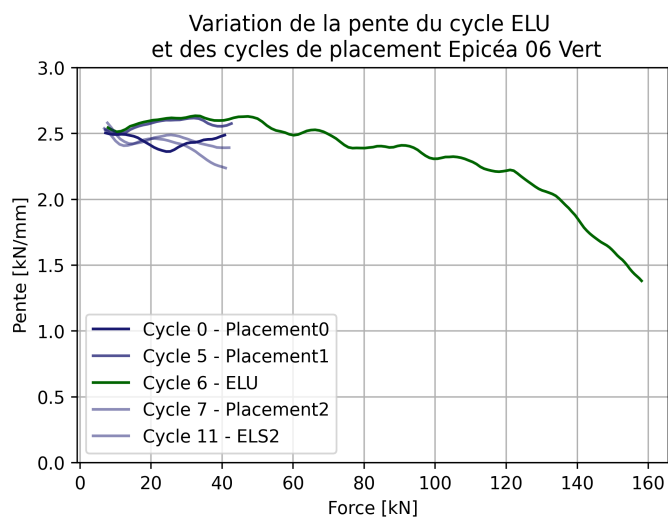


Figure 4

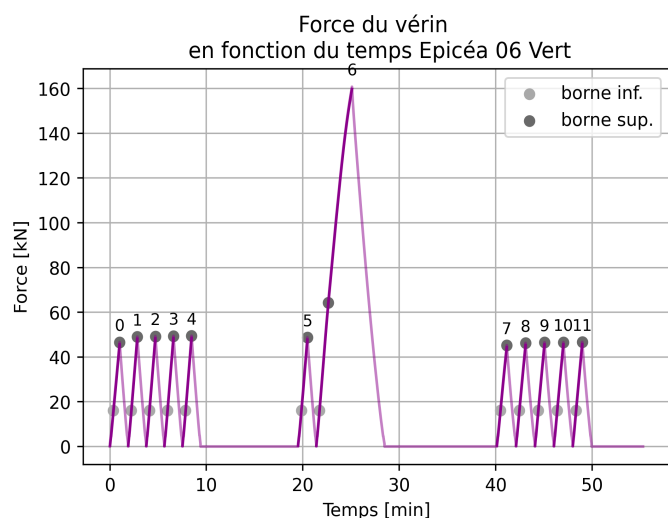


Figure 5

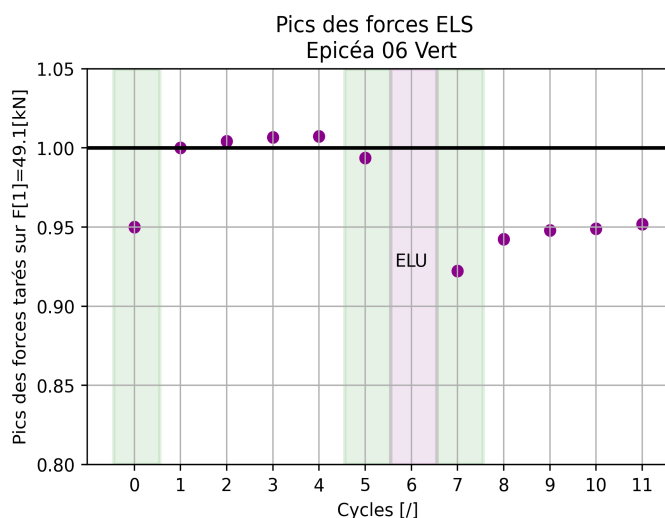


Figure 6

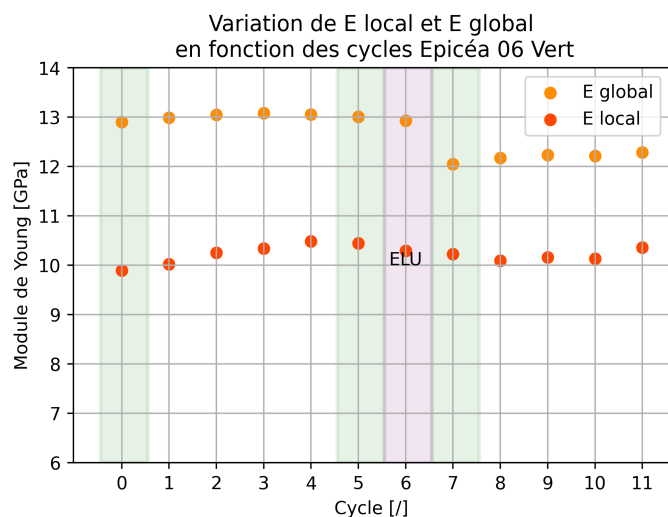


Figure 7

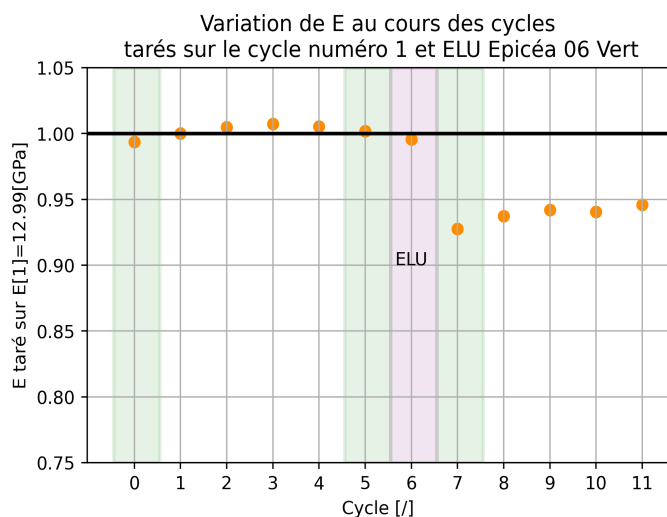


Figure 8

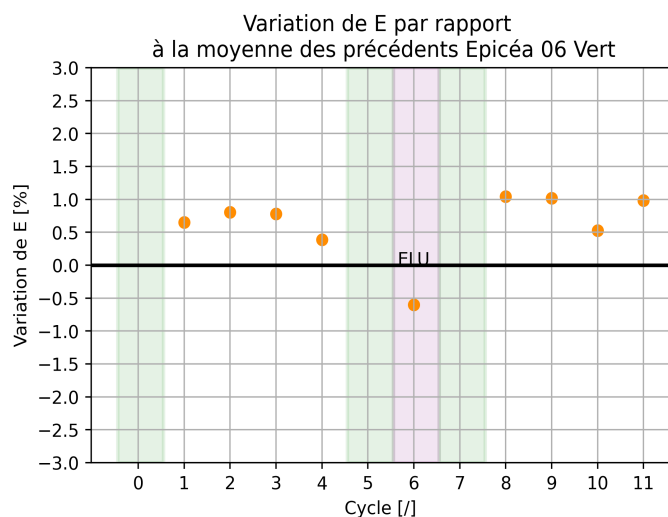


Figure 9

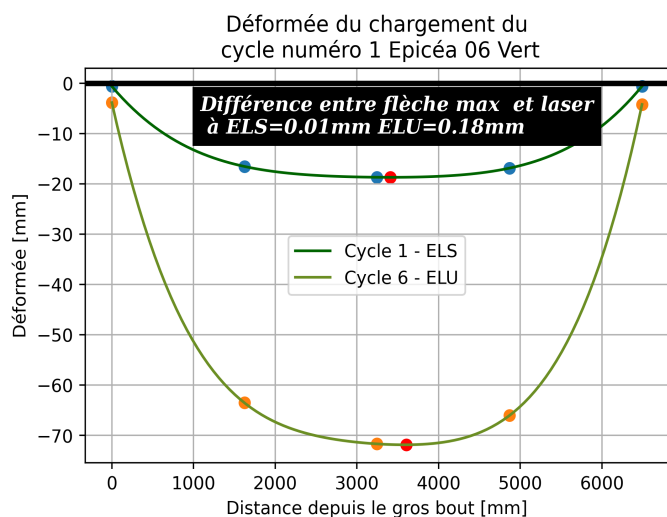


Figure 10

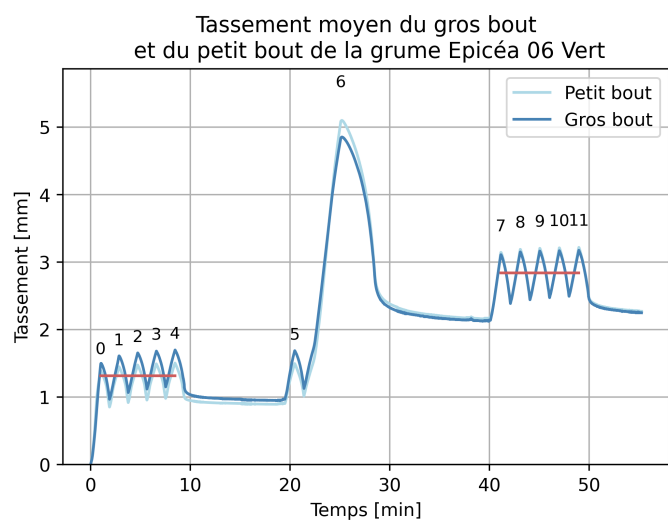


Figure 11

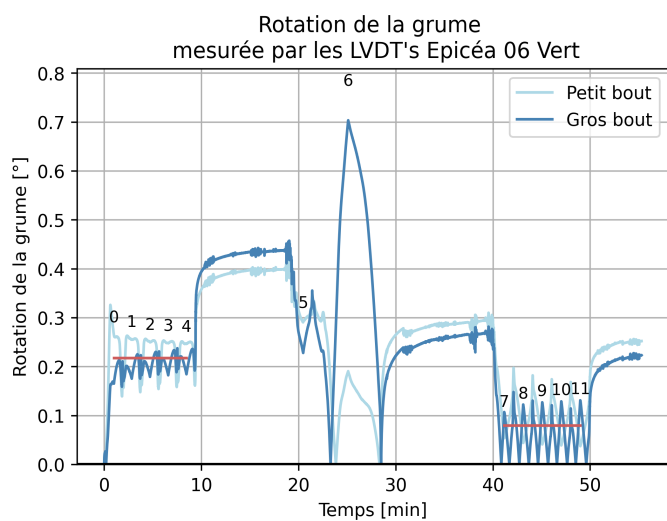
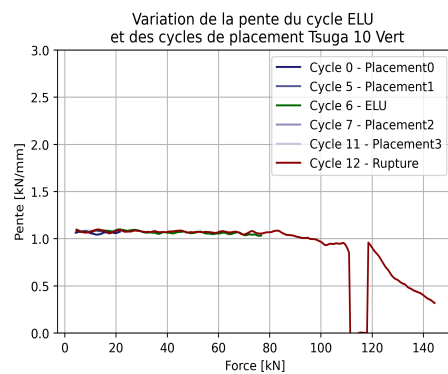
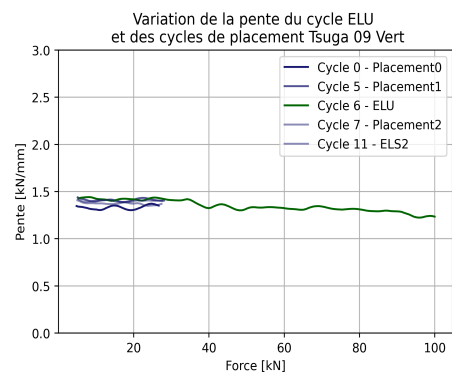
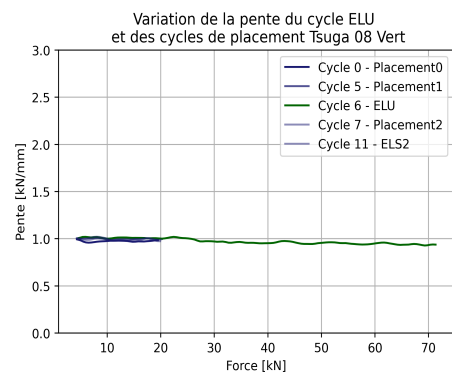
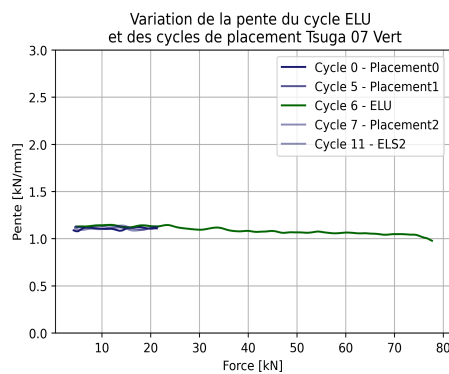
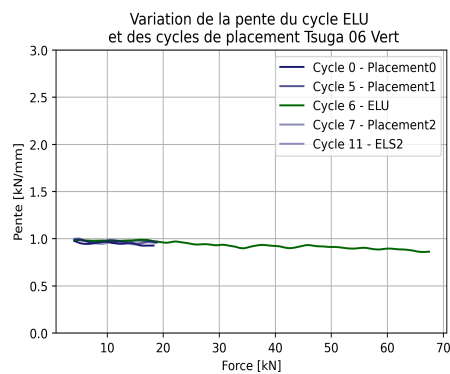
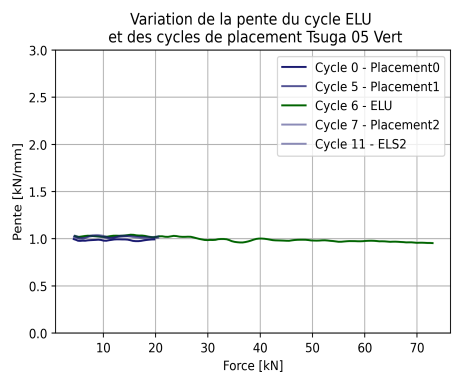
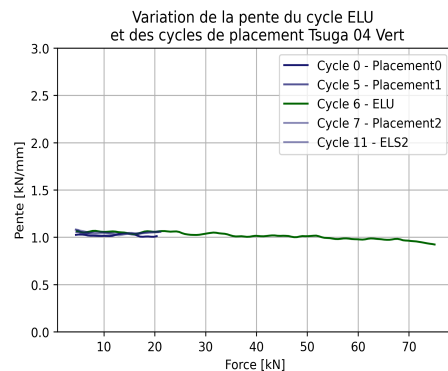
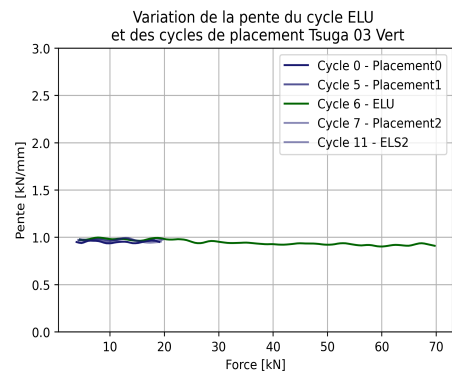
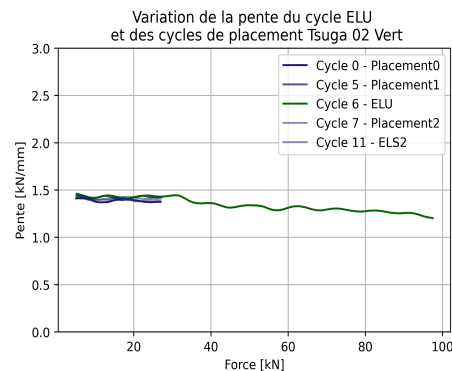
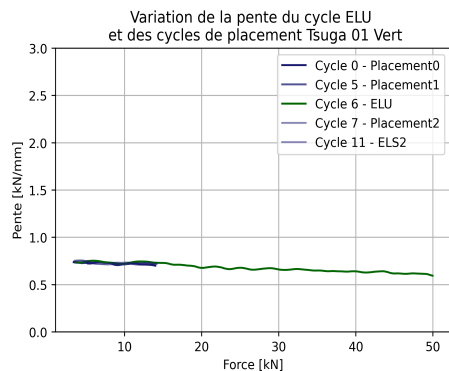
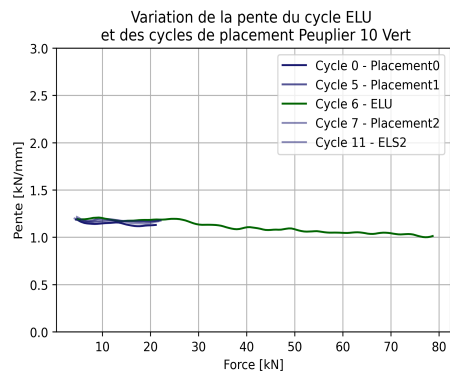
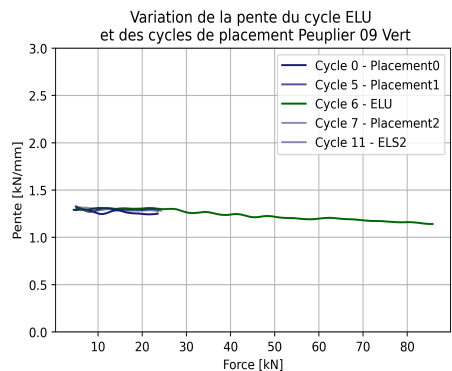
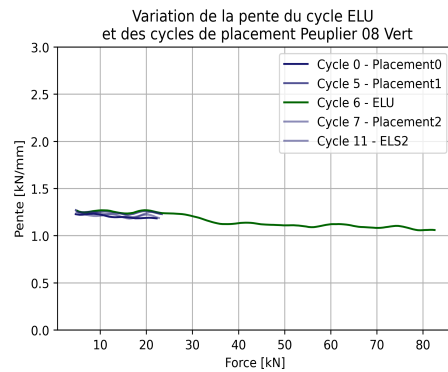
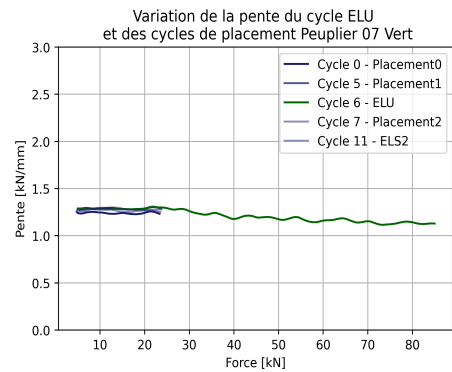
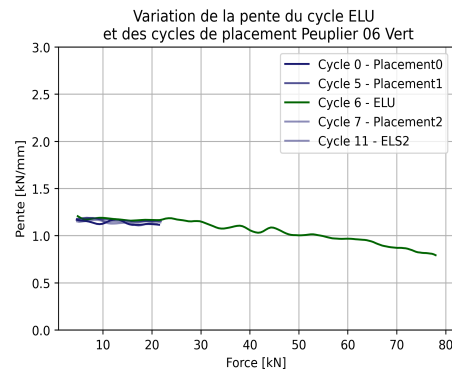
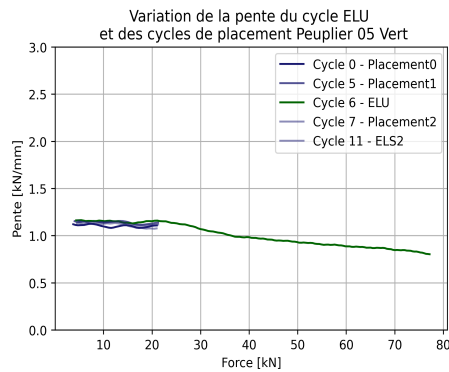
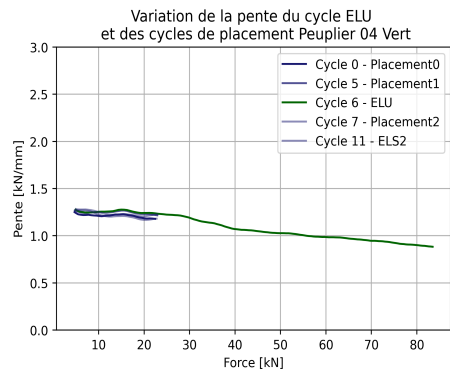
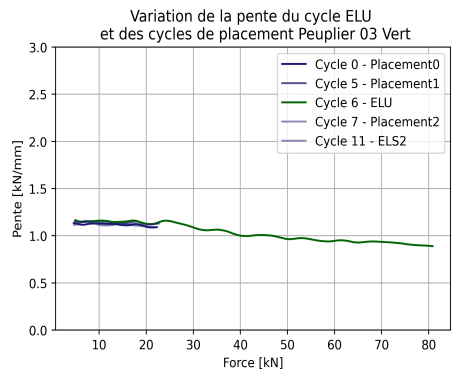
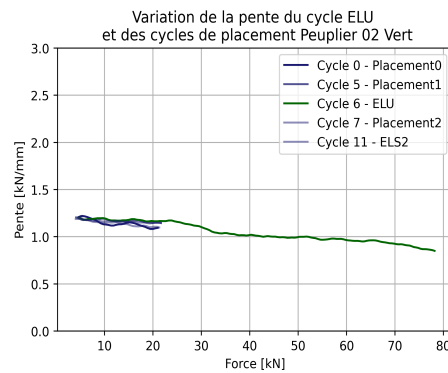
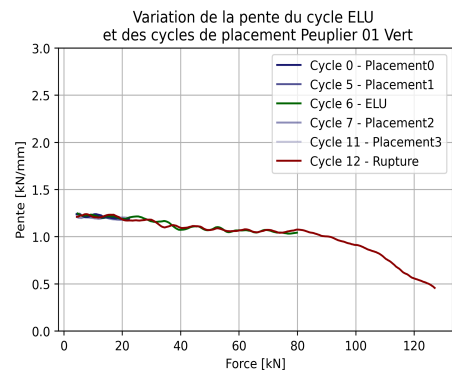
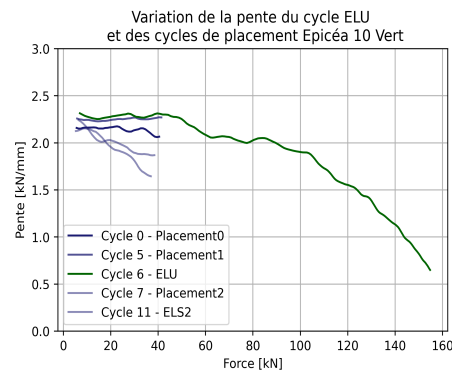
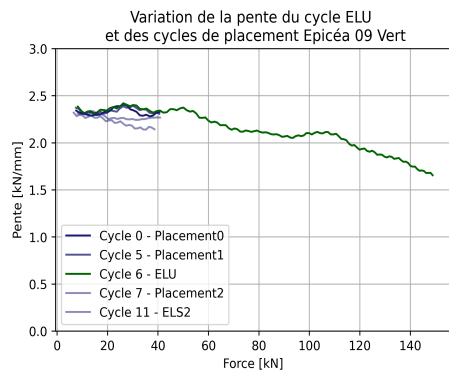
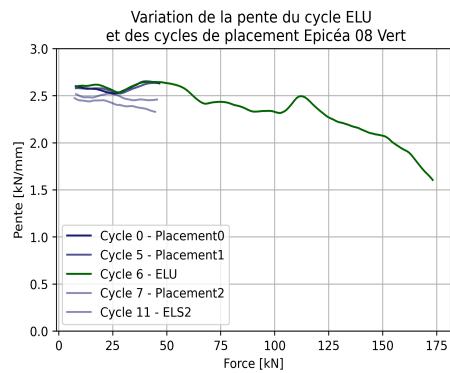
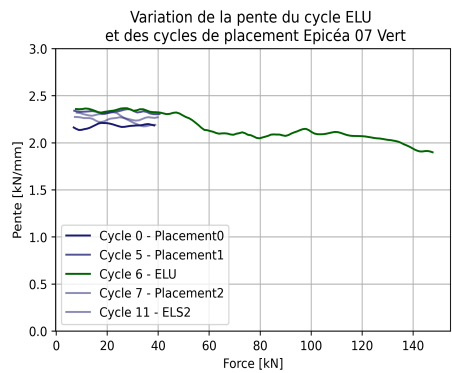
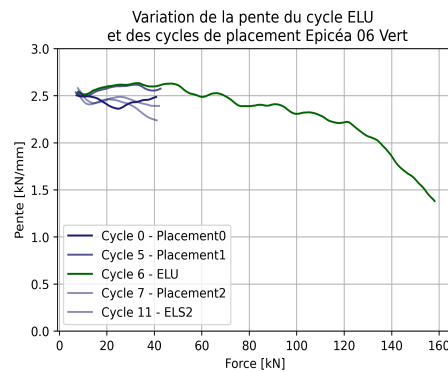
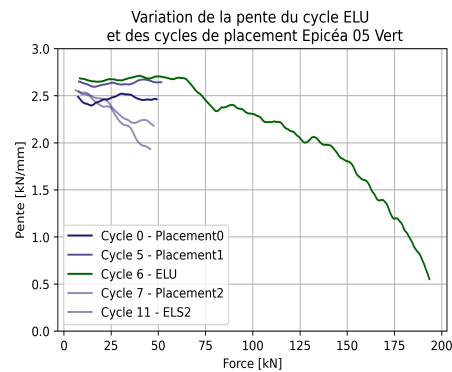
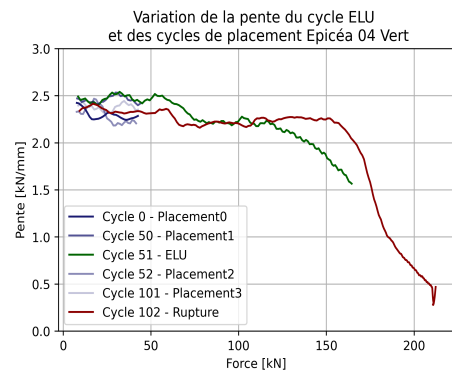
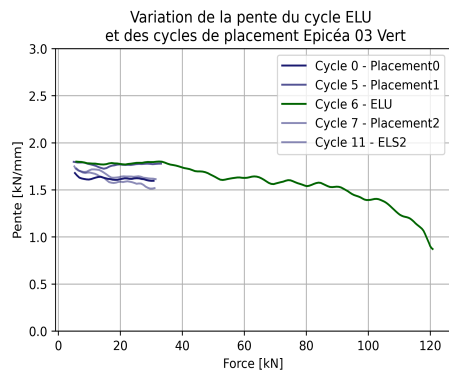
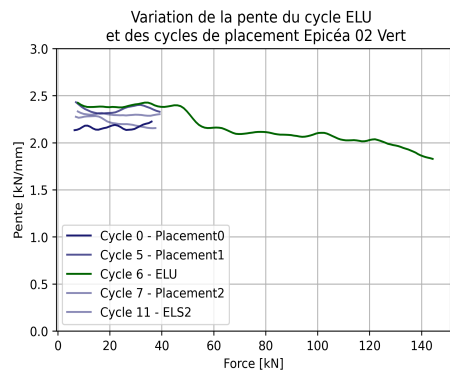
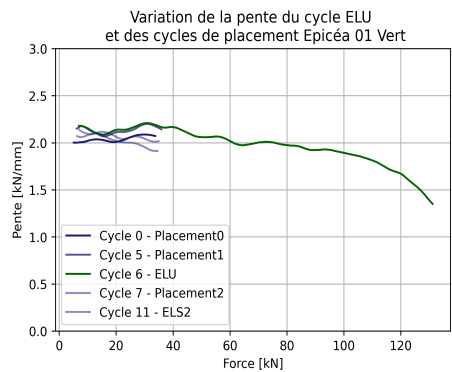
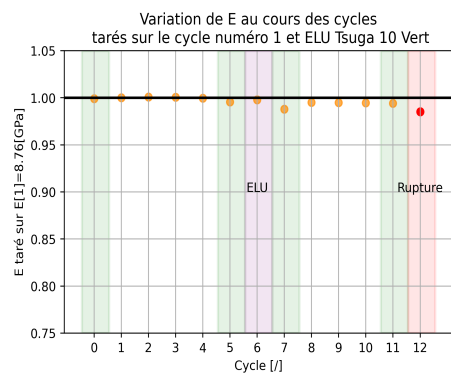
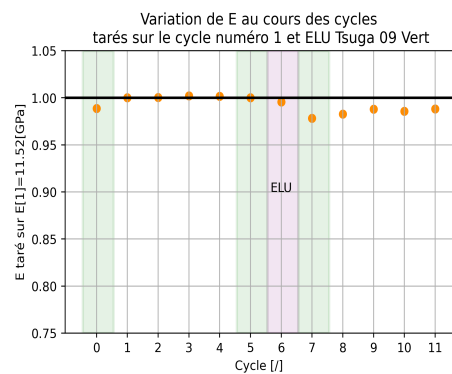
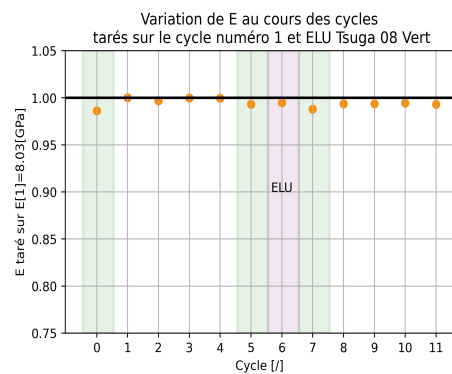
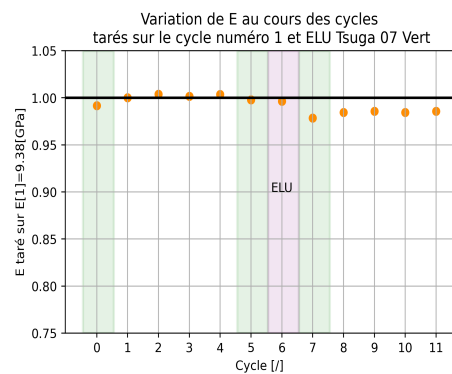
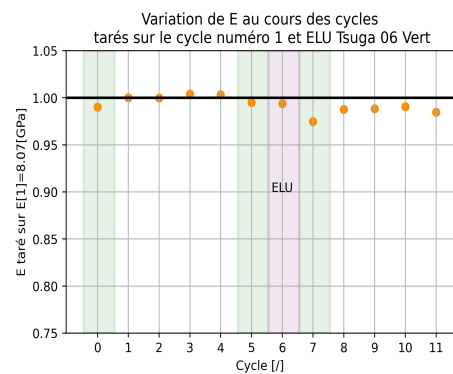
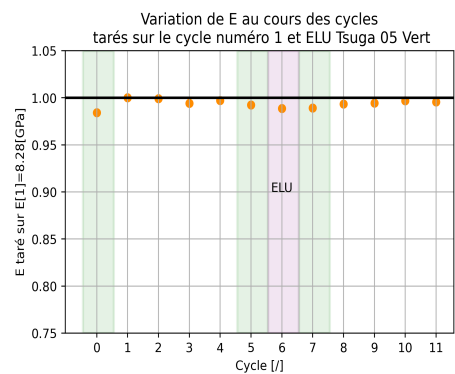
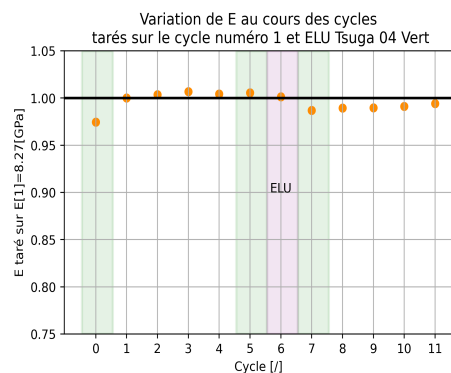
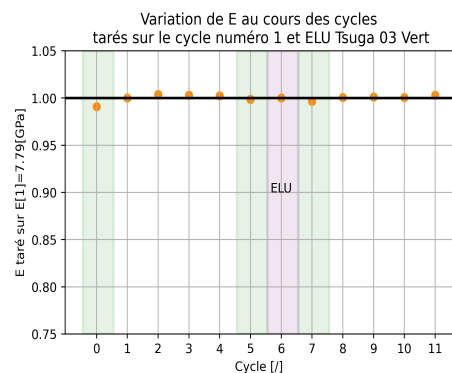
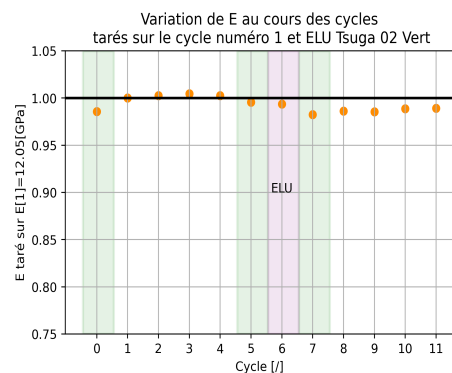
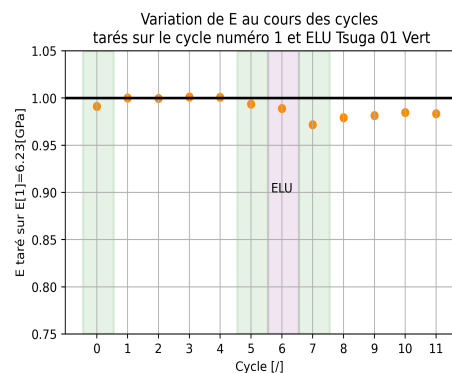
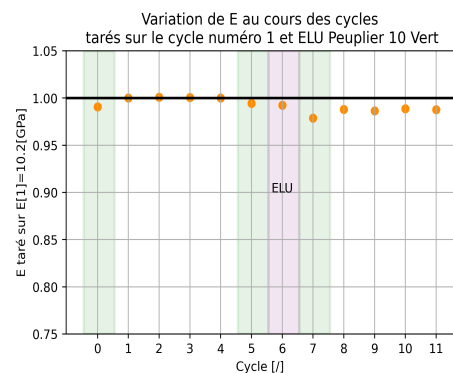
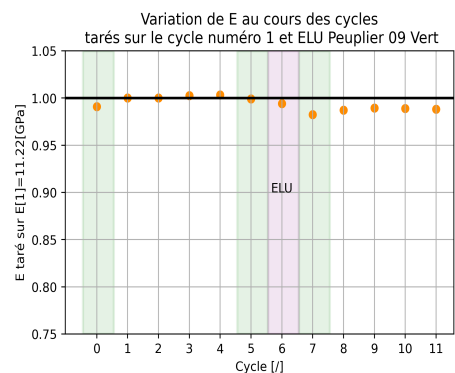
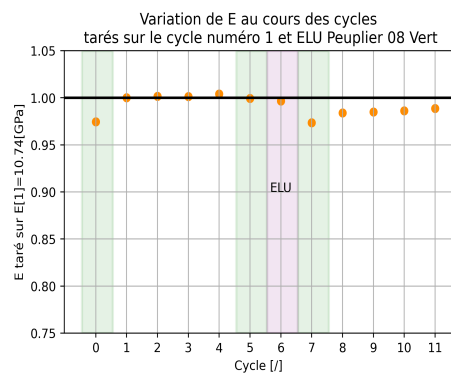
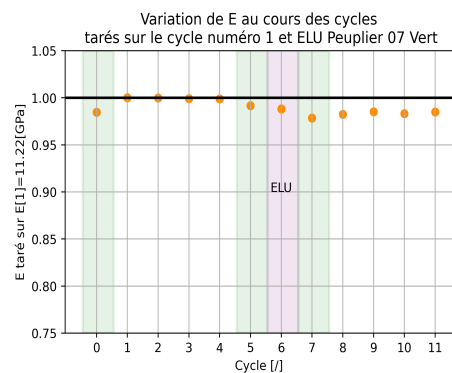
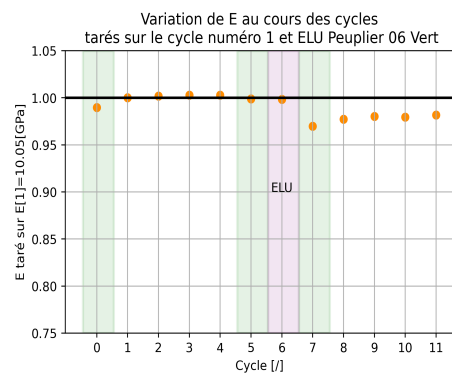
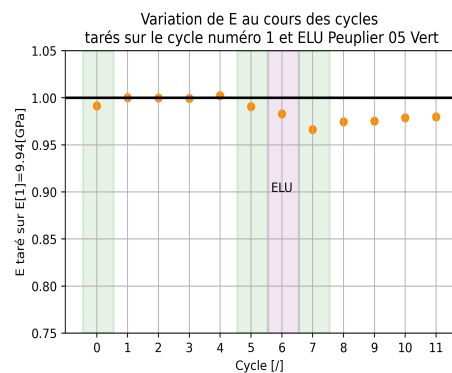
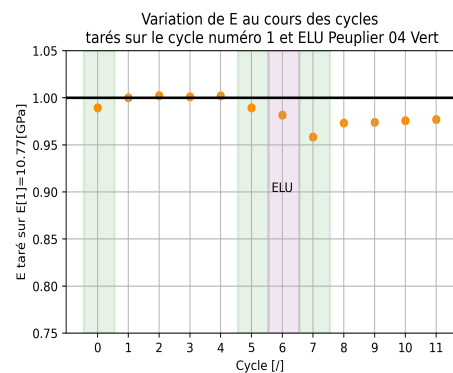
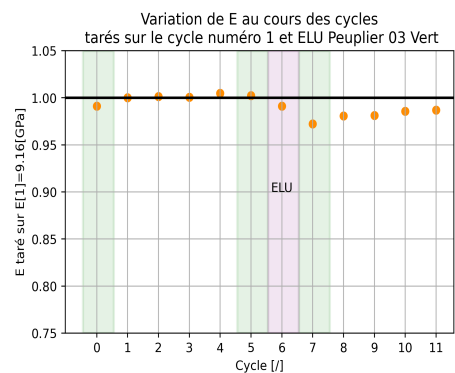
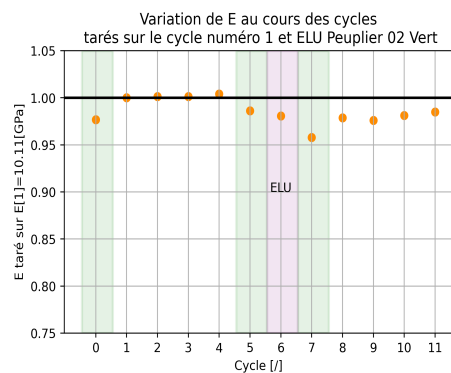
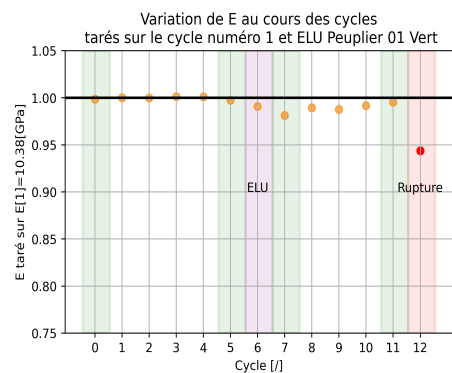
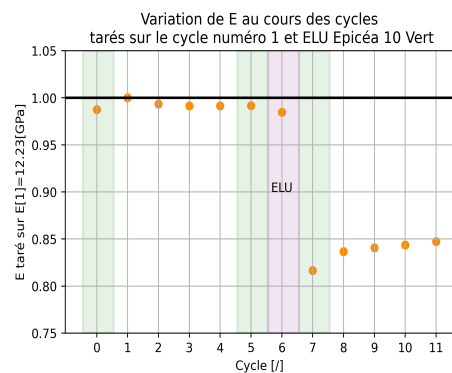
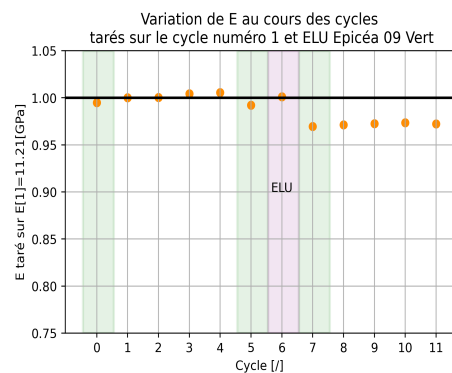
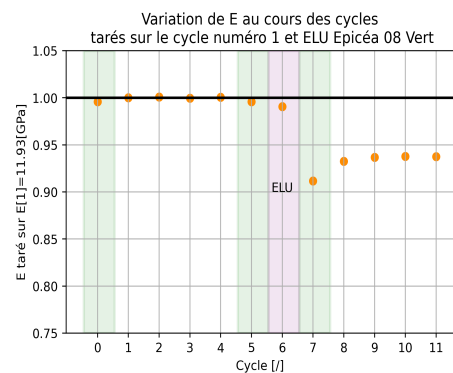
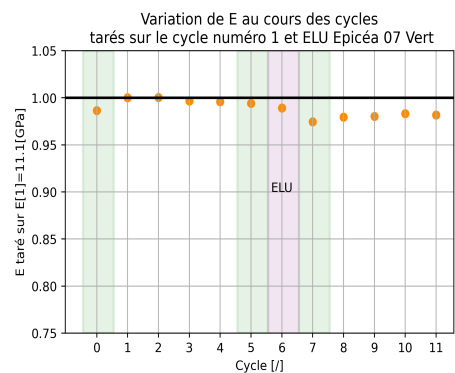
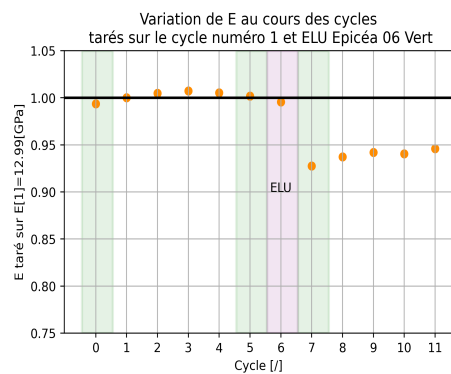
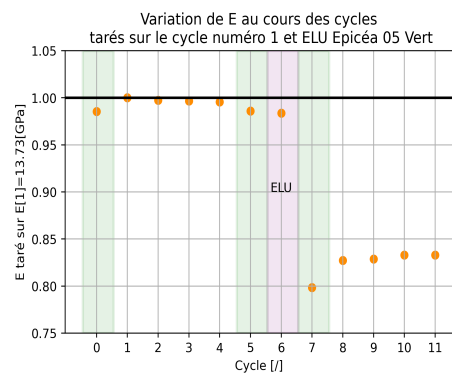
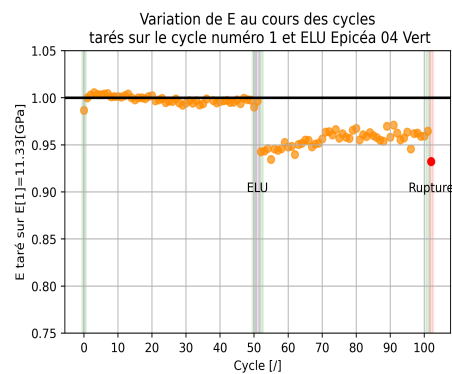
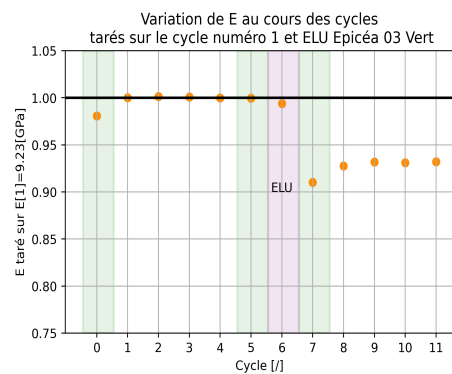
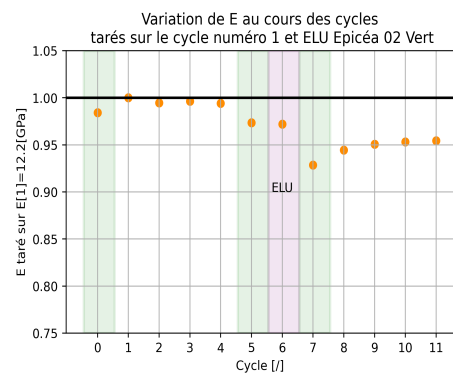
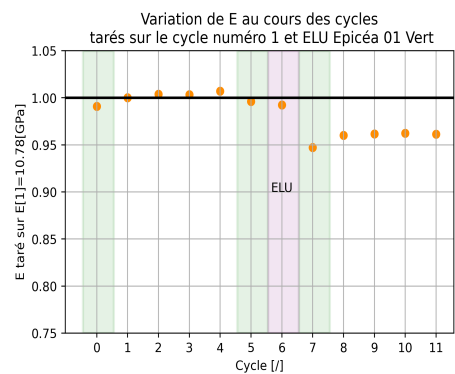


Figure 12

ANNEXE E

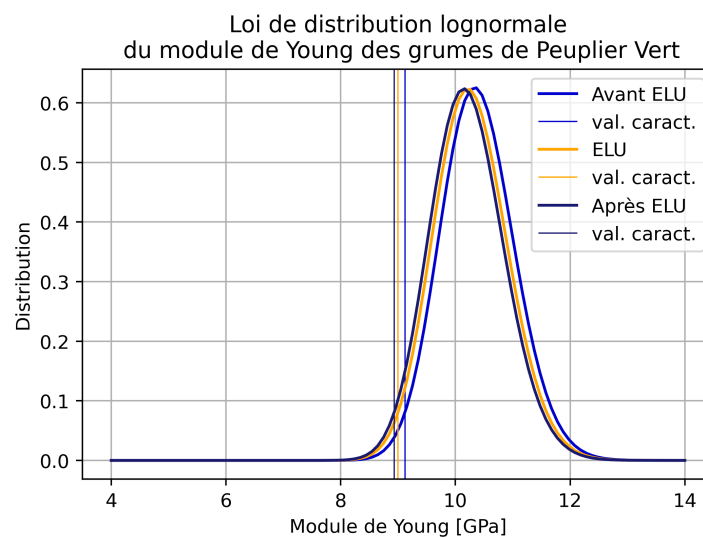
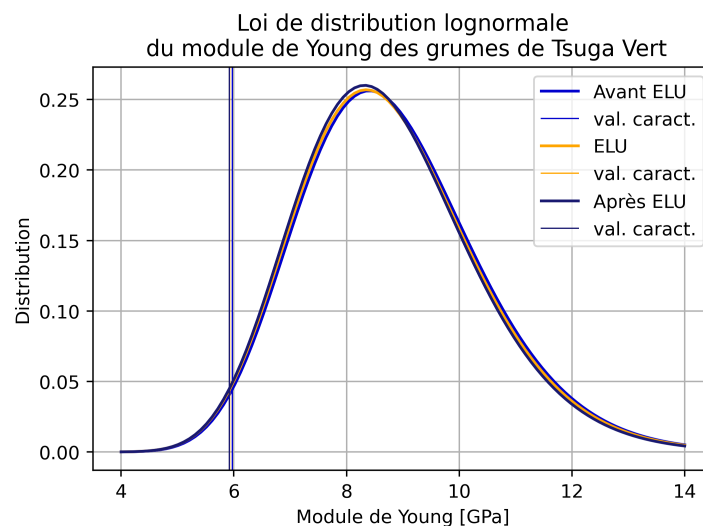
A3 DES GRAPHIQUES DE VARIATION DE E_G ET DE PENTE





ANNEXE F

COURBE NORMALE POUR LES MODULES DE YOUNG DES PEUPLIERS ET TSUGAS



ANNEXE G

ESSAI DE FLUAGE SUR DES ÉPROUVETTES ÉQUARRIES

G.1 Plan de montage des bancs d'essai

Le banc expérimental a été réalisé sur d'anciens œdomètres à chargement frontal (figure G.1, G.2 et G.3). Nous les avons adaptés afin qu'ils puissent accueillir chacun deux éprouvettes de $300 \times 15 \times 15$ [mm] dans une disposition de flexion quatre points. L'objectif de cette section est de présenter tous les éléments usinés qui ont été ajoutés.

L'avantage de ce montage est que tout a été réalisé par nous même au LEMSC. Le banc est donc démontable et surtout il peut s'adapter à différentes configurations. Toutes les pièces de supports et les plaquettes ont été collées avec du double face. C'est une solution rapide et qui offre une épaisseur de collage constante pour conserver un banc d'essai plat.

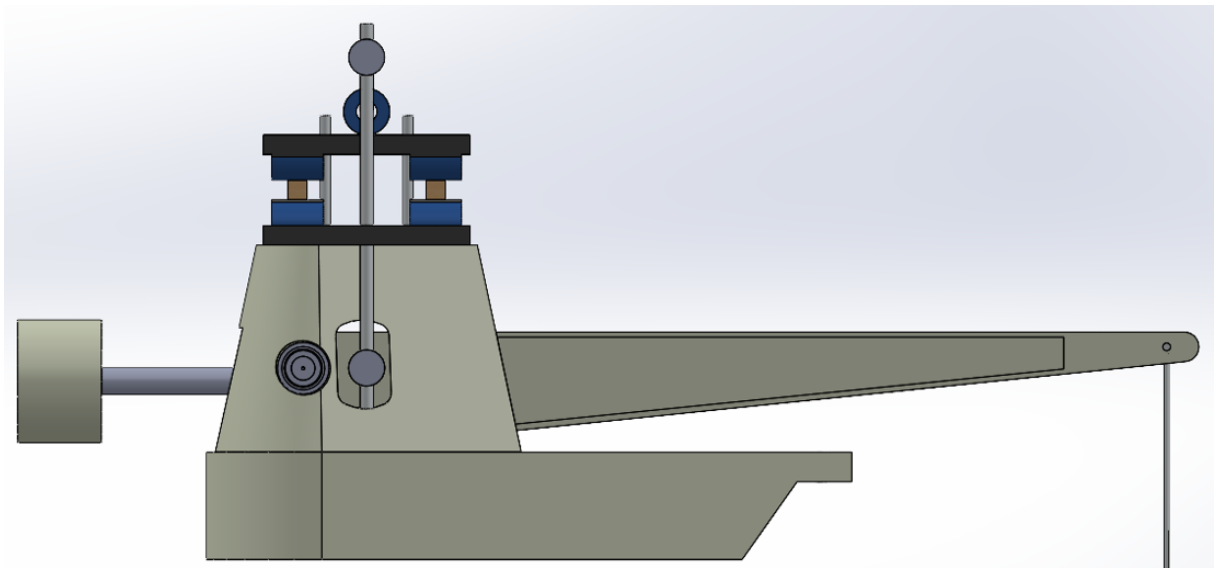


FIGURE G.1 – Nomination de chaque pièce du montage

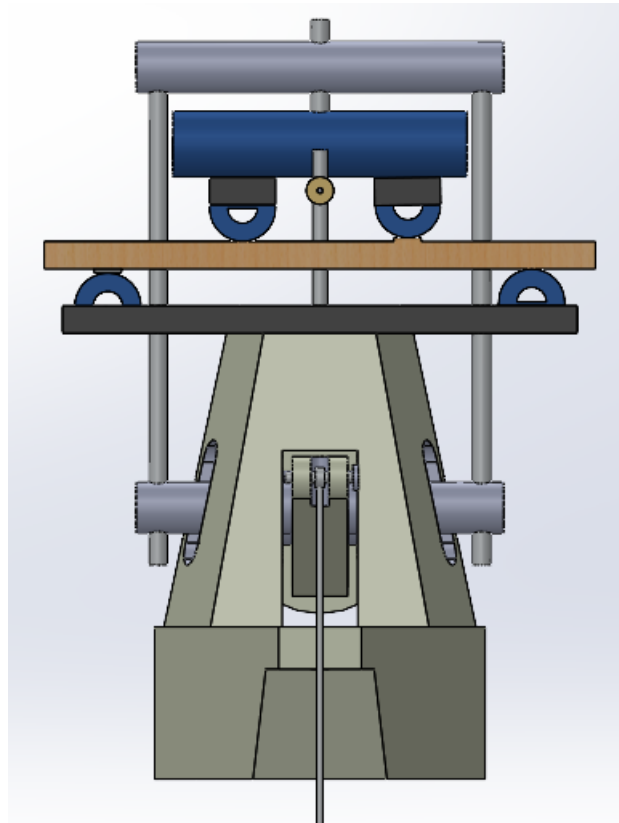


FIGURE G.2 – Nomination de chaque pièce du montage

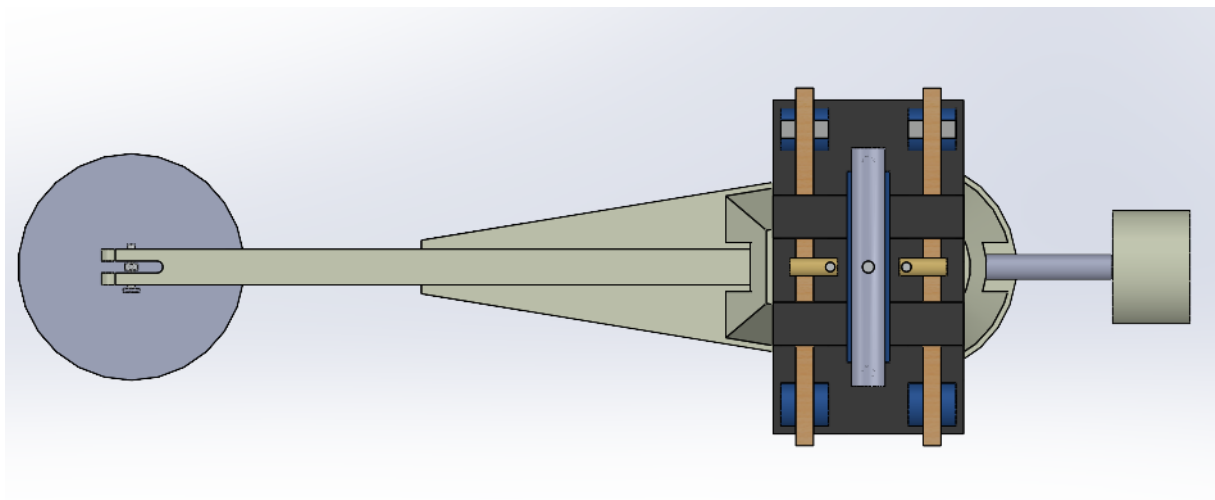


FIGURE G.3 – Nomination de chaque pièce du montage

G.1.1 Plans côtés

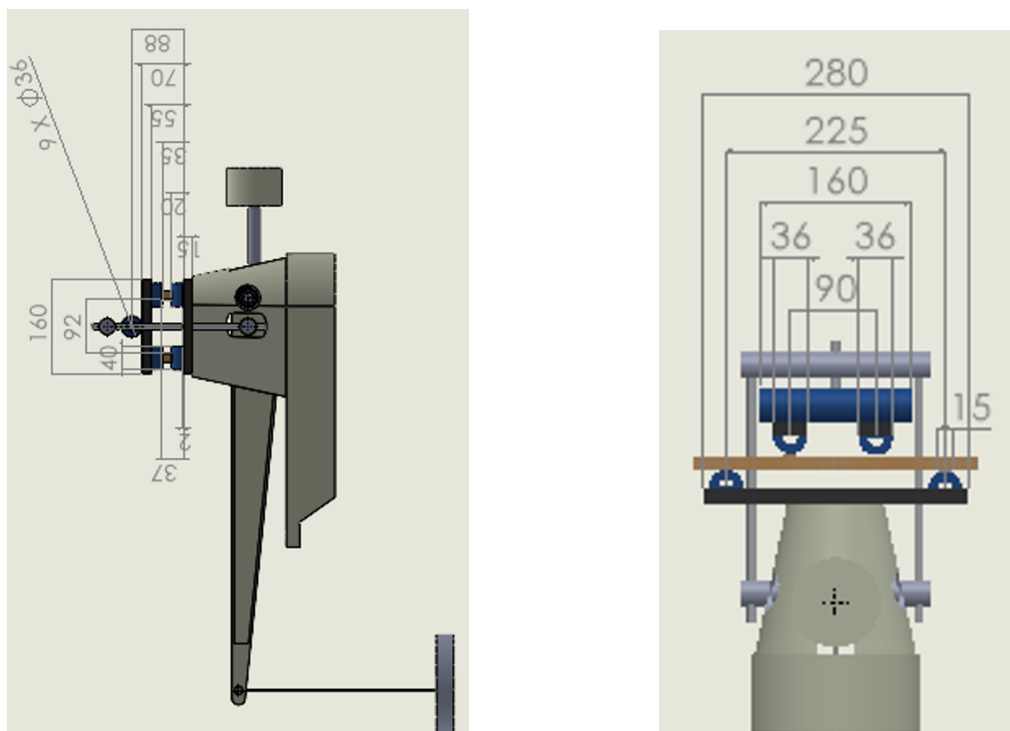


FIGURE G.4 – Plans côté du banc d'essai

G.1.2 Description de chaque pièce

Afin de bien comprendre le tableau récapitulatif G.1, la figure G.5 exprime le nom de chaque élément qui a été rajouté sur les œdomètres.

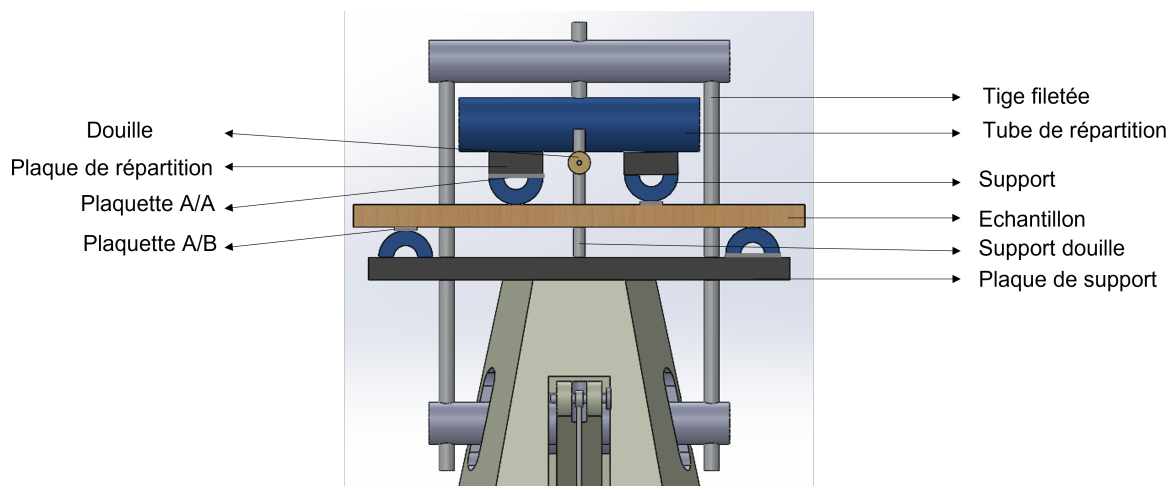


FIGURE G.5 – Nomination de chaque pièce du montage

Élément	Matériau	Dimension [mm]	Quantité	Commentaire
Plaque de support	Acier	280 x 160 x 15	1	Réalisation d'un percement central avec une mèche de 12.5 Réalisation de deux percements pour le passage des tiges filetées avec une mèche de 26 Réalisation de deux filets M8 pour accueillir les supports de douille
Plaque de répartition	Acier	36 x 160 x 15	2	
Tube de répartition	Acier	$\phi_{ext} = 36$ $\phi_{int} = 20$ Longueur : 160	1	Réalisation d'un percement central non traversant avec une mèche de 12
Support	Acier	$\phi_{ext} = 36$ $\phi_{int} = 20$ Longueur : 40	8	Demi cylindres creux
Plaquette A/B	Aluminium	Longueur 160	4	Plaquette entre Acier/Bois - Collé par du double face sur l'échantillon de bois
Plaquette A/A	Aluminium	Longueur 160	4	Plaquette entre Acier/Acier - Collé par du double face sur les supports (demi-cylindre)
Support douille	Acier zingué	M8 = 85 de long	2	Réalisation d'un filet
Douille	Laiton	?	2	Dimension à demander à Quentin
Tige filetée	Acier zingué	M10 - 330 de long	2	
Echantillon	Épicéa	300 x 15 x 15	2	
Vis/écrou/boulon	?	M12	1	Permet de fixer la plaque du support sur l'oe{domètre

TABLE G.1 – Récapitulatif des éléments formant le banc d'essai de fluage

G.2 Essais à la rupture sur des éprouvettes équarries

Nous avons réalisé une batterie de 62 essais de flexion quatre points à l'aide de la machine ZwickRoell. Ces essais ont tous été menés à la rupture afin d'en déterminer le module de Young et la force à la rupture de chacun d'entre eux. Nous avons conservé les mêmes dimensions d'échantillons que les éprouvettes qui sont utilisées sur les bancs de fluage tel qu'illustré sur la figure G.6.

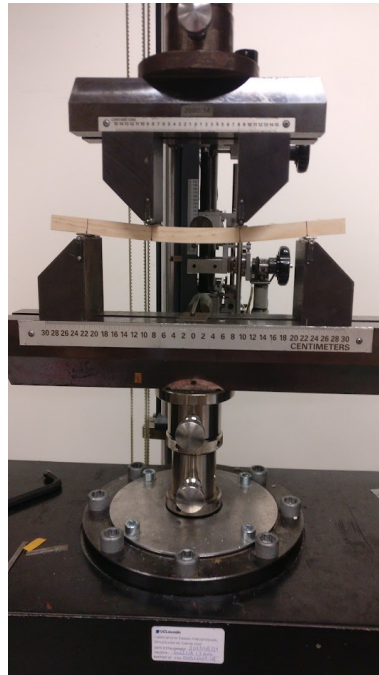


FIGURE G.6 – Montage d'essai sur la ZwickRoell

Pour ce faire, nous avons suivi la norme NBN EN 408 [21] avec les exigences suivantes :

- flexion quatre points avec une distance entre appuis de 225 [mm] et une travée centrale (entre points de force) de 90 [mm] ;
- couple d'appuis à rouleau et simplement rotulé placés sous l'échantillon (cela sert de support) et sur l'échantillon (pour appliquer la force). Les deux couples d'appuis sont placés de manière opposée ;

- utilisation de plaquette entre le bois et les appuis pour éviter le poinçonnement. Nous avons dû adapter leur dimension car on a observé un endommagement dû aux appuis sur les éprouvettes. Une largeur de 1 [cm] est suffisante pour éviter trop de dégâts ;
- rupture des échantillons menée en 300 ± 120 secondes.

Protocole

En plus de déterminer les caractéristiques mécaniques des échantillons, on s'est également intéressé à déterminer l'influence de l'orientation des cernes sur la résistance du matériau. Cette influence sera évidemment testée aussi sur les bancs de fluage. Pour ce faire, tous les échantillons "numéro 1" seront testés horizontalement aux cernes et les échantillons "numéro 2" dans une direction perpendiculaire aux cernes.

Le protocole suivant a été suivi tout au long de la réalisation de ces essais :

1. Tracer la position des appuis sur l'échantillon.
2. Prendre son humidité relative à l'aide d'un humidimètre. Placer les pointes de l'appareil sur des fibres différentes.
3. Mise en place de l'échantillon et des plaquettes en fonction des marquages réalisés à l'étape 1.
4. Effectuer un préchargement de 1 [N] pour placer correctement l'échantillon sur le banc d'essai.
5. Début de l'essai. Pour atteindre un temps d'essai de 300 ± 120 secondes, nous avons imposé une vitesse de rampe de 2,3 millimètres par minute.
6. Rupture de l'échantillon.
7. Observation de l'échantillon afin d'observer une influence possible d'un nœud ou un poinçonnement trop important des appuis.

Résultats

Lors des essais, l'ordinateur a enregistré pour chaque éprouvette un graphique Force-Déplacement. Nous avons interprété ces graphiques selon la norme NBN EN 408 [21] tel que l'équation 3.21 expliqué à la section 3.5.1 pour des sections ronde. L'équation suivante est utilisée pour trouver le module de Young global d'une éprouvette équarrie de section carré :

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot o^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)} \quad (G.1)$$

$F_2 - F_1$ = un accroissement de force en newtons sur la ligne de régression

$w_2 - w_1$ = l'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ en millimètres

a = distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche = 67,5[mm]

o = distance entre les appuis centraux = 225[mm]

b et h = base et hauteur de l'éprouvette tous les deux égaux à 15 [mm]

Numéro de grume	Numéro échantillon	Quantité	Moyenne de E [MPa]	Moyenne de $F_{rupture}$ [N]
E03	1	9	8966	807
	2	9	7469	727
E05	1	10	10446	863
	2	10	10421	967
E10	1	10	10412	777
	2	14	10827	841
Total		62	9876	833

TABLE G.2 – Résultats des essais de rupture d'échantillons équarris d'épicéa

Pour déterminer la force à la rupture, on a simplement pris la force observée sur le graphique fourni par l'ordinateur de la ZickRoell. La table G.2 résume les résultats déduit de ces expériences.

On observe sur le tableau G.2 qu'il ne sera pas possible de réaliser une étude statistique précise pour chaque grume. En effet, il y a trop peu d'éprouvette pour correctement caractériser le lot. Mais nous pouvons cependant observer certaines généralités sur les 62 échantillons.

La figure G.7 représente simplement la distribution normale du module de Young pour l'ensemble des échantillons testés. Pour nos essais de fluage, nous prenons la valeur à 50% de cette loi de normale afin de prendre la réelle résistance des échantillons. Nous n'avons pas besoin ici de prendre de sécurité comme le propose l'Eurocode 5 en déterminant une résistance caractéristique. La figure G.8 nous permet d'avoir une comparaison entre les différents modules de Young de chaque grume. La grume 03 est la moins bonne à ce niveau-là.

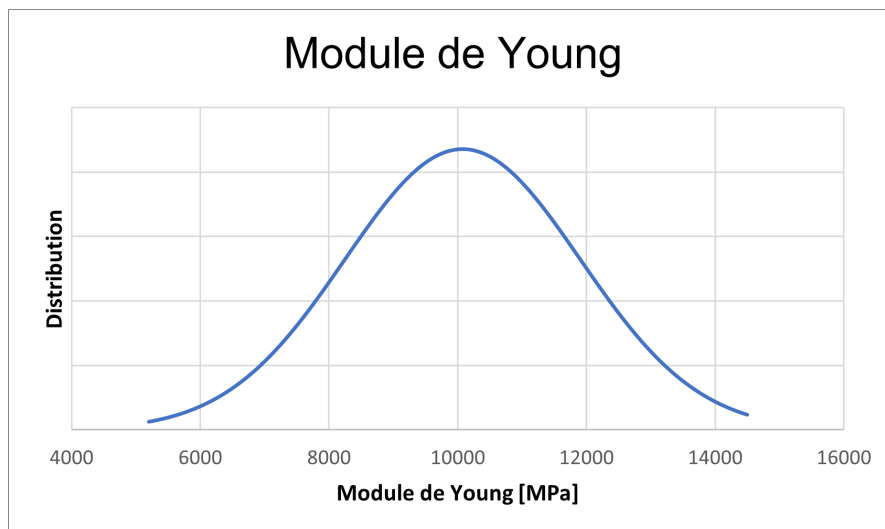


FIGURE G.7 – Loi normale du module de Young des 62 échantillons

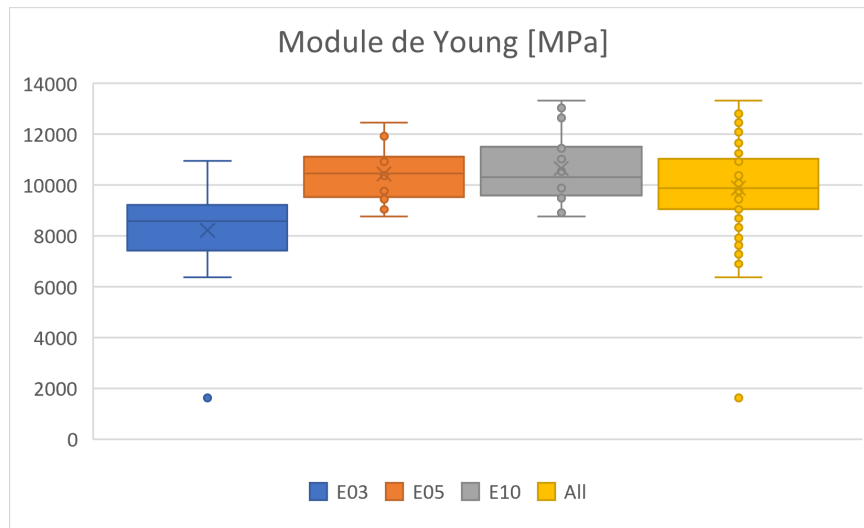


FIGURE G.8 – Tendance des modules de Young par grume

Nous avons réalisé la même étude pour la force maximale des échantillons en flexion quatre points. Les figures G.9 et G.10 semblent avoir la même tendance que les graphiques précédant. La grume 3 possède les échantillons les plus faibles au niveau des caractéristiques mécaniques. Ici, la grume la plus résistante, point de vue de la force à la rupture, semble être la grume 05.

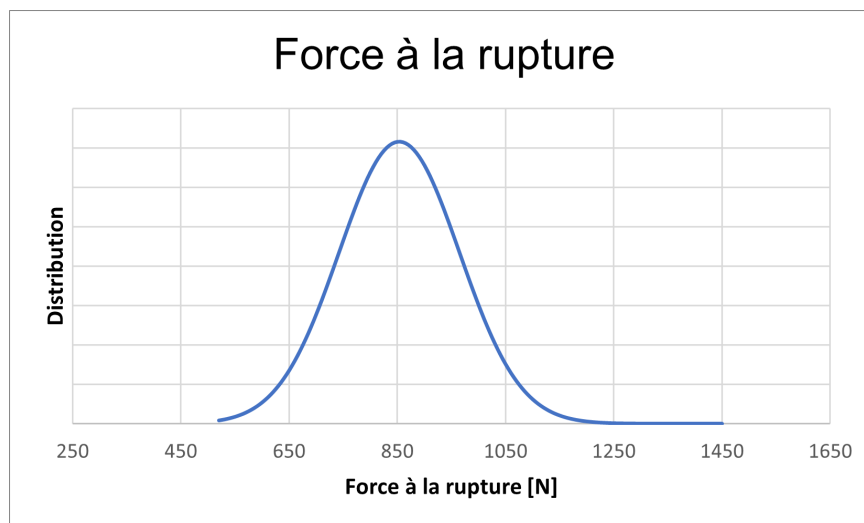


FIGURE G.9 – Loi normale de la force à la rupture des 62 échantillons

Finalement, nous avons aussi réalisé une comparaison de l'humidité des échantillons car nous savons maintenant l'effet néfaste que cela peut avoir sur le bois. Les échantillons étaient stockés dans des sachets sous vide triés par grume. Les échantillons d'une même grume sont censés avoir une humidité assez proche au vu de ces conditions. La figure G.11 nous montre plusieurs choses. D'abord, la grume E03 semble celle qui a fourni le lot le plus humide. Mais la différence avec les autres lots est très petite et il est difficile d'en conclure avec certitude que c'est dû à cela que nous avons observé des plus faibles caractéristiques sur les figures G.8 et G.10. Deuxièmement, nous avons indiqué sur ce graphique la valeur du PSF de l'épicéa qui équivaut à 29%. On observe que les éprouvettes

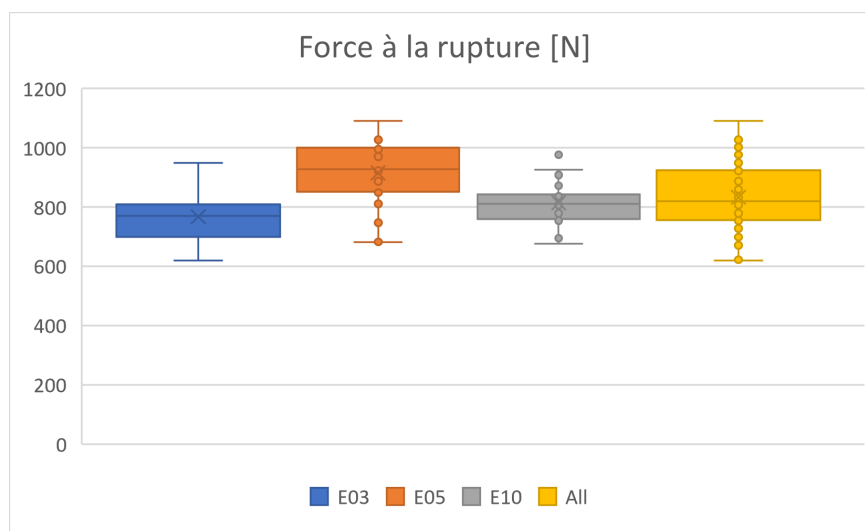


FIGURE G.10 – Tendance des forces à la rupture par grume

sont fortes humides, mais on ne peut plus vraiment les considérer comme étant à l'état vert puisque leur humidité ne dépasse pas le PSF moyen de leur essence.

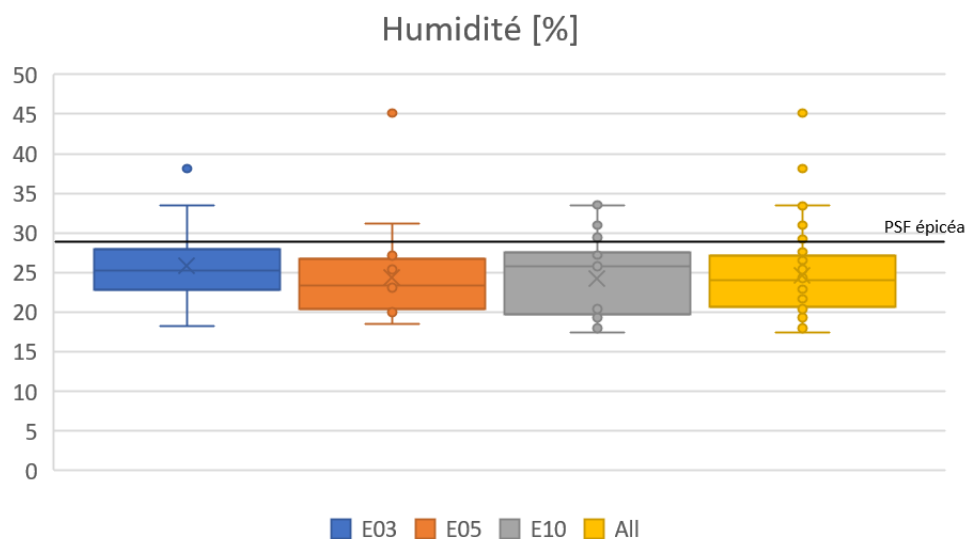


FIGURE G.11 – Tendance de l'humidité des échantillons par grume

ANNEXE H

RÉFÉRENCE DU MATÉRIEL EMPLOYÉ

Plusieurs fiches techniques complètes du matériel utilisé pendant nos recherches sont disponibles sur notre Drive dans la section *Fiche technique*

Beaucoup des informations ci-dessous ont été reprises du travail de C. MOENS et J. NICLAES [2].

H.1 Essai mécanique en flexion sur les grumes

Cellule force relative au vérin

- Fabricant, modèle et numéro de série : Lebow, 3156-100k, 114
- Capacité maximale : 340 [kN]
- Précision : 0,02 %
- Classe 0,5 suivant la norme EN ISO 7500-1 : 2018

Capteur de déplacement relatif au vérin

- Fabricant, modèle et numéro de série : MTS, 244.72, 109
- Course maximale : ± 125 [mm]
- Précision : 0,89 %
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (A) - mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AD1801
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,34 %
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (B) - mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AL1001
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,22 %

- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (C) - mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AD1802
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,23 %
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (D) - mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,23 %
- Résolution : 0,001 [mm]

Laser - mesure de la flèche centrale

- Fabricant, modèle et numéro de série : - , Laser Keyence LK-G502, -
- Étendue de mesure : 250 [mm]
- Précision : 0,52 %
- Résolution : -

Potentiomètre 1 - mesure de la flèche proche du point d'application côté petit bout

- Fabricant, modèle et numéro de série :- , PT1A-20-UP-5K-MC4, -
- Étendue de mesure : 500 [mm]
- Précision : 0,1 %
- Résolution : 0,01 [mm]

Potentiomètre 2 - mesure de la flèche proche du point d'application côté gros bout

- Fabricant, modèle et numéro de série : TE , PT1A-20-UP-5K-MC4, J2860558
- Étendue de mesure : 500 [mm]
- Précision : 0,1 %
- Résolution : 0,01 [mm]

H.2 Essais de fluage sur des éprouvettes équarries

Comparateur mécanique

- Fabricant, modèle et numéro de série : Mitutoyo, 543-37-IDC-112D, 900030
- Course maximale : 25 [mm]
- Incertitude : $\pm 0,0028$ [mm]
- Résolution : 0,001 [mm]

H.3 Essais de rupture sur des éprouvettes équarries

Machine d'essai ZwickRoell

- Fabricant, modèle et numéro de série : ZwickRoell GmbH & Co, BZ2-MM14740.ZW03, 67921
- Capacité maximale : 50 [kN]
- Précision : 0,23 %
- Résolution : -

Extensomètre relatif à la machine d'essai ZwickRoell

- Fabricant, modèle et numéro de série : Zwick, BZ2-EXC51000D.2AMX, 103421
- Course maximale : 50 [mm]
- Précision : 0,17 %
- Résolution : -

H.4 Étalonnage des œdomètres

Cellule force

- Fabricant, modèle et numéro de série : Sensy, 2000L, 90233000
- Capacité maximal : 10 kN Compression
- Précision : -
- Résolution : $0,01 \mu \text{ V/V}$ ($\approx 0,00005[\text{kN}]$)

ANNEXE I

PHASAGE SIMPLIFIÉ D'UN PROJET AVEC DES GRUMES

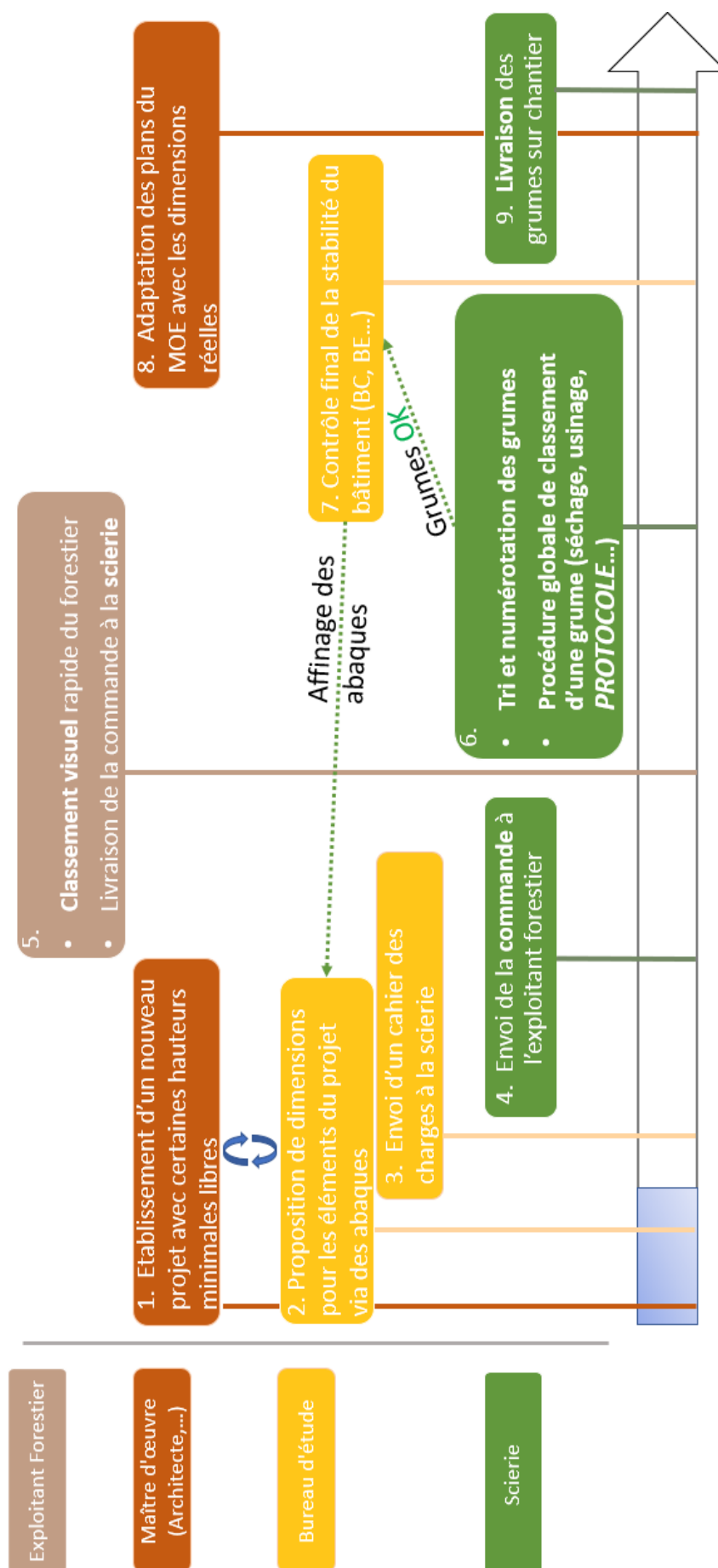


FIGURE I.1 – Phasage simplifié d'un projet

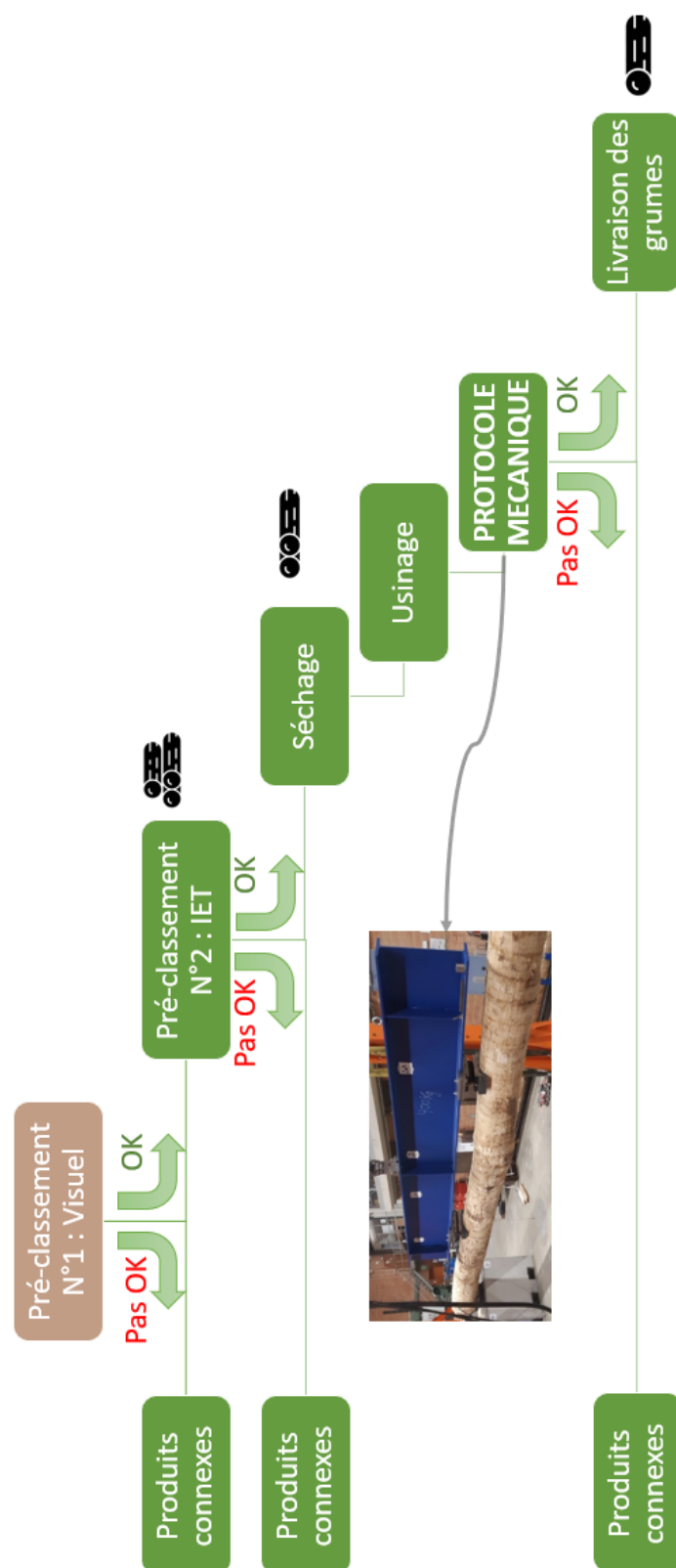


FIGURE I.2 – Procédure globale de classement d'une grume

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NBN EN 1995-1-1-2005. *Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments (+AC :2006*. Rapp. tech. Bureau de Normalisation, 2005.
- [2] C. MOENS et J. NICLAES. « Caractérisation mécanique des grumes ». Mém. de mast. Université Catholique de Louvain, 2021.
- [3] P. LATTEUR. *LG CIV2043 : Cours de structure en bois*. 2021.
- [4] C. DESCHAMPS. *COP26 : quel est l'impact du secteur de la construction sur les émissions de gaz à effet de serre ?* <https://www.rtbef.be/article/cop26-quel-est-limpact-du-secteur-de-la-construction-sur-les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-10868512>. Consulté le 11/05/2022.
- [5] OFFICE ECONOMIQUE WALLON DU BOIS. *Panorabois Wallonie*. https://www.oewb.be/sites/default/files/media-documents/OEWB-PanoraBois_2021_0.pdf. Consulté le 17/05/2022. 2021.
- [6] C. VINCKE ET H. FRÈRE. *LBIRF2103 : Anatomie et propriétés des bois*. 2021.
- [7] C. VINCKE, H. FRÈRE. *LBIRF2102 : Transformation et Industries du bois*. 2022.
- [8] NBN EN 338/2016. *Bois de structure - Classes de résistance*. Rapp. tech. Bureau de normalisation, 2016.
- [9] J. GOOSSE. « Validation expérimentale d'assemblages de structures réciproques composées de troncs d'arbres ». Mém. de mast. Université Catholique de Louvain, 2020.
- [10] V. HOUBEN. « Caractérisation mécanique non destructive des grumes à l'aide du GrindoSonic ». Mém. de mast. Université Catholique de Louvain, 2022.
- [11] ANKAWÜ. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=146181910>. Consulté le 14/05/2022.
- [12] KRISTIN MY. *Le hogan, la maison sacrée des Navajos*. <https://www.bienchezsoi.net/articles/le-hogan-la-maison-sacree-des-navajos-1189.php>. Consulté le 14/05/2022.

- [13] S. DONI. *TECHNIQUES DE L'AUTOCONSTRUCTION À LA TRONÇONNEUSE : Outils et techniques pour construire une charpente en bois rond*. https://www.latelierpaysan.org/IMG/pdf/autoconstruction_tronco_def.pdf. Consulté le 14/05/2022.
- [14] <http://www.northwestlogworks.net/Pole-Buildings.html>. Consulté le 14/05/2022.
- [15] *Parking photovoltaïque de Pairi Daiza*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Parking_photovoltaïque_de_Pairi_Daiza. Consulté le 04/06/2022.
- [16] A. BUKAUSKAS, P. MAYENCOURT, PAUL SHEPHERD, B. SHARMA, C. MUELLER, P. WALKER, J. BREGULLA. « Whole timber construction : A state of the art review ». In : *Construction and Building Materials 213* (2019), pp. 748-769.
- [17] HOUT INFO BOIS. *Bois - guide pour le bon usage*. 2012.
- [18] *Les polysaccharides, que sont-ils et à quoi servent-ils*. <https://www.agrovin.com/fr/les-polysaccharides-que-sont-ils-et-a-quoi-servent-ils>. Consulté le 08/02/2022.
- [19] F. KIRSCH. « Fatigue-Fluage du bois ». Thèse de doct. Université de Metz, 1998.
- [20] *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Centennial Edition, 2010.
- [21] NBN EN 408+A1. *Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. Rapp. tech. Bureau de Normalisation, 2012.
- [22] *Les propriétés naturelles du bois*. <https://www.laparqueteriedubrabant.be/fr/content/les-proprietes-naturelles-du-bois>. Consulté le 05/04/2022.
- [23] H. POLGE. « Le bois juvénile des conifères ». In : *Revue Forestière Française*, 86 (1964), pp. 473-505.
- [24] S. CHARRON, B. JOUREZ, M. MARCHAL, J. HEBERT. « Étude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (*Larix x eurolepis* Henry) ». In : *Biotechno. Agron. Soc. Environ.*, 7(1) (2003), pp. 5-16.
- [25] ΠΟΡΦΥΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ. *Tree growth and juvenile wood formation*. <https://slideplayer.com/slide/16355300/>. Consulté le 05/04/2022.
- [26] M. C. TROUY-TRIBOULOT, P. TRIBOULOT. « Matériau bois Structure et caractéristiques. Techniques de l'Ingénieur ». In : *Traité Construction*, c925 (2001), pp. 1-26.
- [27] J. DLOUHA, T. ALMERAS, B. CLAIR. *Representativeness of wood biomechanical properties measured after storage in different conditions*. 2011.
- [28] U. MULLER, T. JOSCAK, A. TEISCHINGER. « Strength of dried and re-moistened spruce wood compared to native wood ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), pp. 439-443.
- [29] M. DEFO, G. BRUNETTE. *APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL TO THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LENGTH AND DIAMETER ON LOG DRYING RATE*. Rapp. tech. Wood and fiber science : journal of the Society of Wood Science and Technology, 2007.

- [30] B. GUERINEAU. *Séchage des bois ronds à basse température*. Rapp. tech. fh-al-01836077. Sciences de l'environnement, 2014.
- [31] *Kiln Dried - Air dried - Green Standing : Which Lumber For a Cabin ?* <https://www.logcabinhub.com/kiln-dried-or-air-dried/>. Consulté le 09/04/2022. 2018.
- [32] A. LAGHDIR, P. DALLAIN. *Étude du potentiel d'utilisation des bois ronds de faible diamètre dans des systèmes de construction en bois*. Rapp. tech. SEREX, 2013.
- [33] P. MARTIN. *Quelques éclaircissements s'imposent ! RETRAITS, DÉFORMATIONS ET FENTES DE SÉCHAGE*. <https://www.atibt.org/files/upload/technical-publications/publications-bois-tropical/3-DEFORMATIONS-RETRAITS-ET-FENTES.pdf>. Consulté le 09/04/2022.
- [34] G. HELSING, R. D. GRAHAM. « Saw Kerfs Reduce Checking and Prevent Internal Decay in Pressure-treated Douglas-fir Poles ». In : *Paper 1,079, Forest Research Laboratory* (), pp. 184-186.
- [35] M. F. L. MALLO, O. ESPINOZA, R. ERICKSON. *Green Kerfing Treatment for Improving Softwood Lumber Drying : A Review*. Rapp. tech. 32 :5, 606-613, DOI : 10.1080/07373937.2013.852107. Drying Technology, 2014.
- [36] C. PREVOT, S. PETIT, C. HEYNINCK, E. BRUNIN, D. ARNAL. *Carnet d'assistance pour l'évaluation qualitative des bois sur pied et abattus*. Forêt Wallonne asbl, 2018.
- [37] EN 1927. *Bois ronds résineux - Classement qualitatif*. Rapp. tech. Bureau de normalisation, 2008.
- [38] DIN 1474. *Classement des bois en fonction de leur capacité de charge*. Rapp. tech. Deutschen Normenausschusses, 2021.
- [39] ASSOCIATION OUVRIÈRE DES COMPAGNONS DU DEVOIR DU TOUR DE FRANCE. *Connaître les défauts du bois*. <http://lapins.menuisier.free.fr/Stage%204/Cours%20/Connaitre%20les%20defauts%20du%20bois.pdf>. Consulté le 07/04/2022. 2012.
- [40] DIN 1052. *Conception et calcul des structures en bois*. Rapp. tech. Deutschen Normenausschusses, 2012.
- [41] EN 1316. *Bois ronds feuillus - Classement qualitatif*. Rapp. tech. Bureau de normalisation, 2012.
- [42] TTTTESTED. *PROOF-TESTED NEW ZEALAND RADIATA PINE POLES*. 2019.
- [43] NZS3603-1993. *Timber piles and poles for use in building*. Rapp. tech. Standards New Zealand, 2001.
- [44] R.J. ROBERT, B. K. BRASHAW, R. F. PELLEERIN. « Nondestructive evaluation of wood ». In : *Forest Products Journal, 48, 1 - ABI/INFORM Collection* (1998), pp. 14-19.
- [45] B. A. BENDTSEN, R. L. YOUNGS. « Machine stress rating of wood : an overview ». In : *XVII IUFRO World congress, Division 5* (1981), pp. 21-34.
- [46] D. W. GREEN, R. J. ROSS, K. A. McDONALD. « Production of hardwood machine stress rated lumbeer ». In : *Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (1994), pp. 141-150.

- [47] F. E. WOESTE, D. W. GREEN, K. A. TARBELL, L. A. MARIN. « Proof loading to assure lumber strength ». In : *Wood and Fiber Science*, 19(3) (1987), pp. 283-297.
- [48] L. A. MARIN, F. E. WOESTE. « Reverse Proof Loading as a Means of Quality Control in Lumber Manufacturing ». In : *American Society of Agricultural Engineers* (1981), pp. 1273-1277.
- [49] B. MADSEN. « Degree of damage due to proof loading of lumber in bending ». In : *Struct. Res. Ser., Rep. No. 17. Univ. of British Columbia*, (1976).
- [50] D. W. GREEN, J. W. EVANS, J. F. MURPHY, C. A. HATFIELD, T. M. GORMAN. « Mechanical grading of 6-inch-diameter lodgepole pine logs for the traveler's rest and Rattlesnake Creek Bridges ». In : *United States Department of Agriculture* (2005). Research Note FPL-RN-0297.
- [51] D. W. GREEN, J. W. EVANS, J. F. MURPHY, T. M. GORMAN. « Mechanical Grading of Round Timber Beams ». In : *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No 1 (2006). DOI : 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18 :1(1).
- [52] NZS3605-2001. *Timber Structures Standard*. Rapp. tech. Standards New Zealand, 2006.
- [53] I POPOV et M V SHITIKOVA. « IOP ». In : *Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* **962** 022025. 2020.
- [54] *Brochure du GrindoSonic MK7*. https://gf-ceramique.fr/wp-content/uploads/2021/05/GrindoSonic_Product-Brochure-MK7_French.pdf. Consulté le 07/05/2022.
- [55] A. ASSELIN, B. BODNAR, M. BRIAT, C. CHAMBREUIL, X. JOURDAIN, H. HORSIN MOLINARO. « Etude théorique d'une poutre en flexion 4 points ». Thèse de doct. Ecole normale supérieure Paris-Saclay, 2020.
- [56] NBN EN 14251 (2014). *Bois de structure rond - Méthodes d'essai*. Rapp. tech. Bureau de Normalisation, 2014.
- [57] NBN EN 14358. *Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques*. Rapp. tech. Bureau de Normalisation, 2016.
- [58] G. GRANELLO ET A. PALERMO. « Creep in timber : Research overview and comparison between code provisions ». Thèse de doct. University of Canterbury, 2019.
- [59] O. SAIFOUNI. « Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux : application au comportement mécanosorptif du bois ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont II, 2014.
- [60] V. PITTE. « Étude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée ». Thèse de doct. École polytechnique fédérale de Lausanne, 1996.
- [61] H. RANDRIAMBOLOLONA. « Modélisation du comportement diffère du bois en environnement variable ». Thèse de doct. Université de Limoge, 2003.
- [62] C. MONTERO. « Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois ». Thèse de doct. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2010.

-
- [63] A. MATAR. « The mechano-sorptive creep of softwood in bending ». Thèse de doct. Faculty of Engineering, Science et Technology, South Bank University, London, 2003.
- [64] V. PLACET. « Conception et exploitation d'un dispositif expérimental innovant pour la caractérisation du comportement viscoélastique et de la dégradation thermique du bois dans des conditions sévères ». Thèse de doct. Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [65] D. A. DILLARD S. M. HOLZER J. R. LOFERSKI. *A review of creep in wood : concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures*. 1988.
- [66] S. MERAKEB. « Modélisation des structures en bois en environnement variable ». Thèse de doct. Université de Limoges, 2006.
- [67] J. COLMARS. « Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patrimoine culturel : étude sur la courbure des panneaux peints ». Thèse de doct. Université Montpellier 2, 2011.
- [68] D. G. HUNT. « Creep trajectories for beech during moisture changes under load ». In : *Journal of Materials Science* Vol. 19 (1984), pp. 1456-1467.
- [69] J. GRIL. « Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure ». Thèse de doct. Université Paris 6, 1988.
- [70] R.F.S. HEARMON, J.M. PATON. « Moisture content changes and creep of wood ». In : *Forest Products Journal* Vol. 14 (1964), pp. 357-359.
- [71] T. TORATTI, P. MORLIER. « Fluage à long terme du bois fléchi en grandeur structurale ». In : *Materials and Structures*, 28 (1995), pp. 284-292.
- [72] C. MONTERO, J. GRIL. « Comparison between wood hygromechanical description and deformation modification factors of Eurocode 5 ». In : *World Congress of Timber Engineering (WCTE 2016)* (2016). Vienne, Austria. hal-01352723.
- [73] Y. ZHOU, M. FUSHITANI, T. KUBO, M. OZAWA. « Bending creep behavior of wood under cyclic moisture changes ». In : *The Japan Wood Research Society, 48th edition* (1999), pp. 113-119.
- [74] F. DUBOIS. *Comportement thermo-hygro-mecanique, relations structure / propriétés et densité des bois*. https://www.mecamat.asso.fr/Aussois/2014/res/Dubois_com.pdf. Consulté le 08/03/2022. 2014.
- [75] ISO-13061-3 :2014(F). *Propriétés physiques et mécaniques du bois — Méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois sans défauts – Détermination de la résistance à la rupture en flexion statique*. Rapp. tech. ISO - Organisation international de normalisation, 2014.
- [76] ISO-899-2 :1993(F). *Plastiques - Détermination du comportement au fluage – Fluage en flexion par mise en charge en trois points*. Rapp. tech. ISO - Organisation international de normalisation, 1993.
- [77] P. LATTEUR. *LG CIV1022 : Mécanique des structures*. 2017.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl