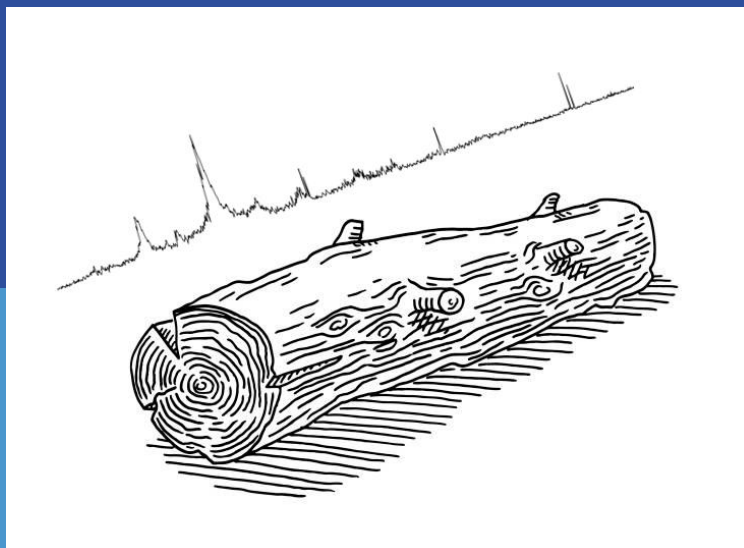


École polytechnique de Louvain

Caractérisation mécanique non destructive des grumes à l'aide du GrindoSonic®



Auteur : **Valentine HOUBEN**

Promoteur : **Pierre LATTEUR**

Lecteurs : **Catherine DONEUX, Justin GOOSSE, Martin STEINMETZ**

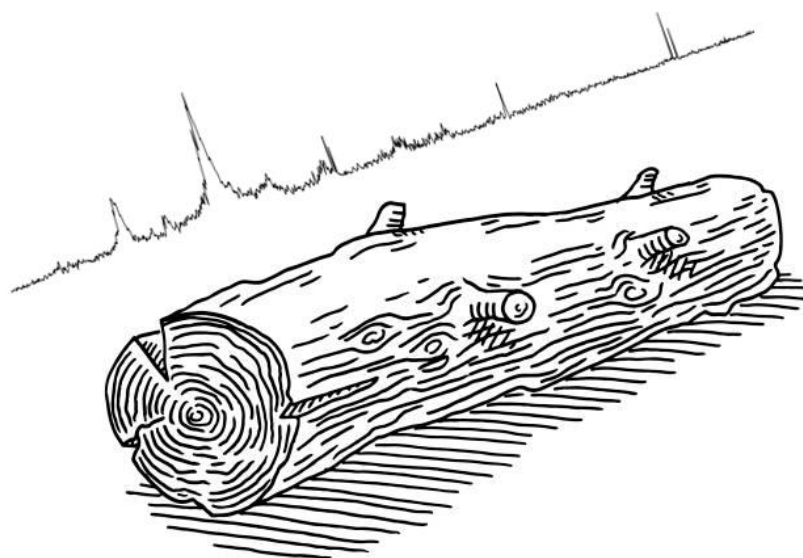
Année académique 2021–2022

Master [120] : ingénieur civil des constructions

École polytechnique de Louvain-la-Neuve

Travail de fin d'études

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE NON DESTRUCTIVE DES GRUMES À L'AIDE DU GRINDOSONIC®



Auteur

Valentine Houben

Promoteur

Pierre Latteur

Lecteurs

Catherine Doneux

Justin Goosse

Martin Steinmetz

Juin 2022

Résumé

Actuellement, le bois de construction ne permet pas de concurrencer les autres matériaux du point de vue économique. Une solution est de limiter les différentes étapes de transformations en utilisant le tronc directement comme élément de structure. L'un des défis majeurs de cette démarche est la détermination, de manière non-destructive, des propriétés mécaniques des grumes entières. Ce mémoire explore la méthode utilisant la technique d'excitation par impulsion (IET) à l'aide du GrindoSonic® à des fins de caractérisation de la rigidité des grumes. De plus, cette technique est utilisée pour détecter un éventuel endommagement mécanique subi par la grume au cours d'un protocole non destructif statique cyclique, réalisé en parallèle.

Avant d'utiliser l'IET sur les grumes, des expériences sur petites éprouvettes équarries, cylindriques et coniques ont été réalisées. Ces expériences ont montré que le module dynamique est différent du module statique et qu'il est moins sensible à l'endommagement. Ensuite, des expériences sur 3 lots de 10 grumes d'essences différentes ont permis d'établir des critères permettant de cibler leurs fréquences propres. De plus, comparée à la résonance flexionnelle, la résonance longitudinale, plus précise, a fait ses preuves sur l'essence d'épicéa. Pour finir, un éventuel endommagement mécanique peut être décelé en comparant des mesures physiques avant et après le protocole statique.

Une application industrielle de la méthode IET pourrait être envisagée en scierie, car elle pourrait s'utiliser afin d'effectuer une présélection rapide, et nécessitant peu de matériel permettant d'exclure les grumes ne présentant pas la raideur attendue.

Mots clefs : Bois, Grume, IET, Module de Young, Dynamique, Endommagement, Amortissement, Flexionnel, Longitudinal.

Abstract

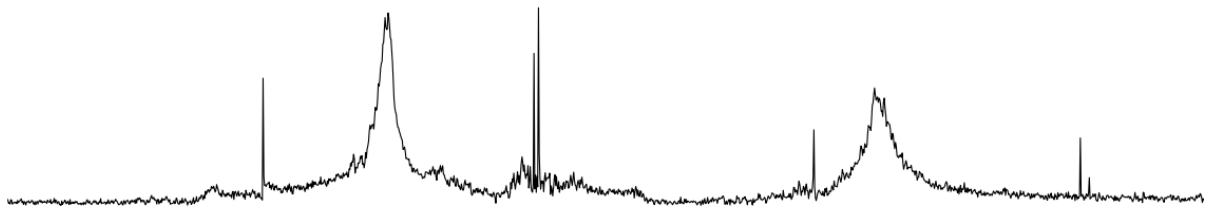
Currently, timber is not economically competitive with other materials. One solution is to limit the various processing stages and to use the log directly as a structural element. One of the major challenges of this approach is the non-destructive determination of the mechanical properties of the full log. This thesis explores the IET method using the GrindoSonic® for characterising the axial stiffness of logs and detecting mechanical damage in a cyclic static non-destructive protocol, carried out in parallel.

Before using the IET on logs, experiments on squared, cylindrical, and conical specimens were performed. These experiments have shown that the dynamic modulus is different from the static modulus and is less sensitive to damage. In the log experiments, criteria were found to target the natural frequency and 3 different wood species batches of 10 logs were tested. Of the methods tested, longitudinal resonance is the most accurate and has proven to be successful with spruce. Furthermore, possible mechanical damage can be detected by comparing physical measurements before and after the protocol.

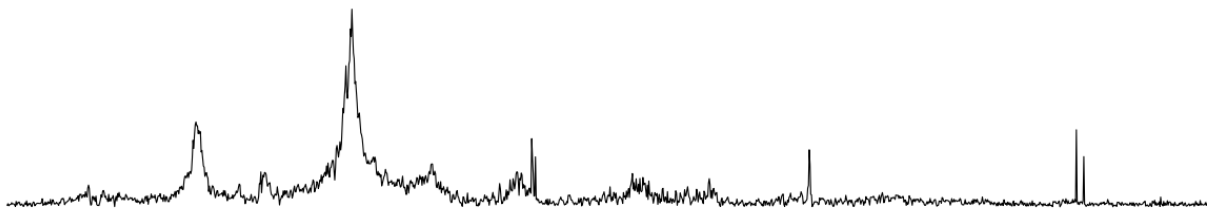
An industrial application of the IET method could be considered in sawmills, as it could be used to perform a quick, low equipment screening to exclude logs that do not have the expected stiffness.

Key words: Wood, Log, IET, Young Modulus, Dynamics, Damage, Damping, Flexural, Longitudinal.

La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre. ~Albert Einstein



Celui qui n'appliquera pas de nouveaux remèdes doit s'attendre à de nouveaux maux ; car le temps est le plus grand des innovateurs. ~Francis Bacon



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, le Professeur Pierre Latteur, qui a su me proposer ce sujet passionnant. Le bois est une intrigue mais il constitue aussi l'avenir. La course au savoir ne doit pas s'arrêter quand il s'agit de bâtir un monde plus durable. Je le remercie pour tout le temps qu'il m'a accordé, il a su me donner les moyens, tant matériels que moraux, de mener à terme ce projet.

Ensuite, je tiens à remercier les deux doctorants, Justin Goosse et Martin Steinmetz, qui m'ont accompagnée du début à la fin de ce mémoire. Ils m'ont accordé un temps inimaginable, que ce soit pour des réunions de plusieurs heures ou pour des relectures de rapports d'expériences. Je n'oublie pas non plus toutes ces heures passées au laboratoire à frapper sur les grumes et à se demander si ça allait un jour fonctionner.

Merci à Justin d'avoir passé des heures à tourner et façonner le bois pour en faire des éprouvettes de formes plus improbables les unes que les autres, je ne peux imaginer la patience dont il a dû faire preuve pour fabriquer des cônes en bois. Et merci à Martin pour les heures passées à relire les versions antérieures de ce mémoire et pour ses critiques constructives.

Je tiens également à remercier toute l'équipe du laboratoire du LEMSC, pour leur aide mais aussi pour leurs sourires, leurs blagues et leur bienveillance quotidienne.

Plus particulièrement, merci à Catherine Doneux, directrice du laboratoire, pour avoir pris les dispositions nécessaires afin que le GrindoSonic® fasse partie du matériel du LEMSC.

Merci à Alex Bertholet, pour son regard critique sur la méthode IET, pour sa présence durant la prise en main et la découverte du GrindoSonic®. Merci à lui de l'avoir gardée bien au chaud dans son bureau et de m'y avoir donné une accessibilité aisée et libre tout au long de l'année.

Merci à Quentin Mestrez, responsable de la machine Zwick®, pour m'avoir permis de l'utiliser des jours durant, et pour l'avoir préparée chaque matin avant que je n'arrive au LEMSC.

Merci à Vincent Forzee, pour avoir passé du temps à découper mes toutes premières éprouvettes en bois.

De plus, je tiens également à remercier le commercial GrindoSonic®, Olivier Burnet, qui nous a donné une formation en début d'année sur la prise en main du GrindoSonic®, mais qui a également répondu présent durant toute l'année, aussi bien lorsque nous avions des questions d'ordre pratique, que pour nos questions plus indiscrètes sur le fonctionnement de la boîte noire GrindoSonic®.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille, mes amis et mes proches qui ont été d'un soutien moral et qui ont eu la patience de lire, de corriger et de commenter mon travail. Ce temps qu'ils m'ont consacré, m'a permis de rendre cet ouvrage pour la date d'échéance.

De manière globale, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à la réalisation de ce travail et qui ont été une source d'inspiration durant la rédaction.

Liste des notations

Notations	Significations
A	Aire
A_m	Amortissement
a	Valeur propre flexion
α	Coefficient thermique
α_r	1 ^{ère} valeur propre flexionnelle d'inertie rotationnelle des sections
α_s	1 ^{ère} valeur propre flexionnelle du cisaillement
b	Largeur de la section rectangulaire
β_r	2 ^{ème} valeur propre flexionnelle d'inertie rotationnelle des sections
β_s	2 ^{ème} valeur propre flexionnelle du cisaillement
c	Coefficient d'amortissement
c	Vitesse du son
c_{crit}	Coefficient d'amortissement critique
c_p	Capacité thermique
d	Diamètre de section
E	Module de Young ou Module d'élasticité
E_a	Module de Young adiabatique
E_i	Module de Young isotherme
E_{Dyn}	Module de Young dynamique (peu importe la méthode)
$E_{Dyn, Flex}$	Module de Young dynamique en résonance flexionnelle
$E_{Dyn, Long}$	Module de Young dynamique en résonance longitudinale
$E_{Dyn, 12\%}$	Module de Young dynamique pour une hygrométrie de 12%
$E_{Dyn, H}$	Module de Young dynamique pour une hygrométrie de H%
E_L	Module de Young dans le sens longitudinal des fibres
ϵ	Déplacement relatif / flèche relative
f	Fréquence propre ou fréquence fondamentale
f_e	Fréquence d'échantillonnage
f_{flex}	Fréquence propre du mode flexionnel
f_{long}	Fréquence propre du mode longitudinal
f_{max}	Fréquence maximale contenue dans un signal
$F_{max, est}$	Force de rupture estimée
F_{rupt}	Force à la rupture
g	Gravité
G	Module de cisaillement
H	Hygrométrie du bois
I	Moment quadratique
J	Moment d'inertie polaire
K_c	Facteur de cisaillement
K	Facteur correctionnel longitudinal pour le parallélogramme rectangle
K'	Facteur correctionnel longitudinal pour le cylindre
K_1	Coefficient dynamique flexionnel de J.Murphy

Notations	Significations
k	Coefficient de rigidité élastique
k_n	Nombre d'onde
L	Longueur
λ	Longueur d'onde
m	Masse
N	Nombre d'échantillons
n	Numéro d'harmonique (1 étant la fréquence propre)
ω	Fréquence
ω_d	Fréquence amortie
ω_n	Fréquence naturelle/ fréquence propre
q	Facteur d'ajustement hygrométrique
r_o	Rayon en pied de grume
r_L	Rayon en tête de grume
r^2	Élancement d'Euler
$R_e(Z)$	Impédance électrique
RMS	Root mean square
R^2	Coefficient de corrélation
ρ	Masse volumique
S	Coefficient des effets de distorsion de cisaillement
σ	Contrainte
T	Température
T	Facteur correctionnel flexionnel pour le parallélépipède rectangle
T'	Facteur correctionnel flexionnel pour le cylindre
t	Hauteur ou épaisseur de section
Θ	Angle de cisaillement
ν	Coefficient de Poisson
$n[n]$	Signal échantillonné
$x(t)$	Signal temporel
ζ	Fraction du coefficient d'amortissement critique
$1/s$	Coefficient de Raleigh
γ/s	Coefficient de cisaillement

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Liste des notations.....	vii
Table des matières	ix
1 Introduction	1
1.1 Construire en bois.....	1
1.2 Construire en grume	2
1.3 Objectif du mémoire	5
État de l'art et théorie	7
2 Théorie	9
2.1 La méthode IET et ses notions de dynamique.....	9
2.2 Mode de résonance flexionnelle	12
2.3 Mode de résonance longitudinale	19
2.4 Mode de résonance en torsion.....	22
2.5 Amortissement.....	23
2.6 Traitement du signal temporel : la transformée de Fourier (FFT)	26
3 État de l'art.....	27
3.1 Propriétés du bois	27
3.2 Techniques non destructives appliquées au bois	30
3.3 Précédentes recherches dynamique IET sur le bois.....	37
3.4 Endommagement.....	44
Partie expérimentale	49
4 Matériels de mesure et traitement des données	51
4.1 Mesures statiques	51
4.2 Mesures dynamiques (IET).....	55
4.3 Précisions et tolérances des appareils de mesure	59
5 Critères de choix de la fréquence propre	62

5.1	Protocole.....	62
5.2	Résultats	63
6	Étude du module d'élasticité et de l'impact d'un endommagement mécanique sur éprouvettes de petites dimensions	64
6.1	Étude préliminaire : conditions de test dynamique sur éprouvettes	65
6.2	Procédure de caractérisation IET d'éprouvettes en bois en parallèle à un endommagement mécanique.....	70
6.3	Résultats statiques.....	71
6.4	Résultats dynamiques : E_{Dyn}	73
6.5	Comparaison entre module statique E_{Stat} et module dynamique $E_{Dyn,flex}$	74
6.6	Résultats dynamiques : Amortissement	78
7	Grumes.....	80
7.1	Étude préliminaire : conditions de test	80
7.2	Protocole autour des tests en flexion 4 points	84
7.3	Résultats : caractérisation mécanique	89
7.4	Résultats : endommagement mécanique	96
7.5	Étude spécifique : résonance flexionnelle	100
7.6	Étude spécifique : Épicéa 08	102
8	Impact de la conicité sur les valeurs expérimentales	104
8.1	Matériel.....	104
8.2	Procédure	106
8.3	Résultats	107
	Conclusion	111
	Annexes	114
9	Liens entre expressions d'amortissement	115
10	Résonance flexionnelle : valeurs du coefficient K_1 pour d'autres supports	116
11	Budget d'incertitude	117
12	Fast Fourier Transform	118
13	Tableaux des valeurs de modules dynamiques obtenues dans la littérature	123
14	Rigidification du module statique au cours des étapes	127
15	Choix des transducteurs et matériaux de frappe	131
16	Conseils d'utilisation du GrindoSonic® : Prise en main rapide.....	133
17	Les paramètres numériques du GrindoSonic®	135

18	Résultats des éprouvettes parallélépipèdes rectangles	139
19	Tsuga : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale	152
20	Épicéa : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale	155
21	Peuplier : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale	158
Glossaire		I
Liste des Figures		III
Liste des Tableaux.....		VIII
Bibliographie.....		IX

1 Introduction

1.1 Construire en bois

Les derniers rapports du GIEC relatifs à l'urgence climatique incitent de nos jours tous les secteurs à faire preuve d'inventivité pour réduire leur impact environnemental. Aujourd'hui, le secteur de la construction représente à lui seul 11% des émissions de gaz à effet de serre dans le monde [1]. En Belgique, c'est le seul secteur, avec le secteur du transport, qui ne voit pas encore sa production de CO₂ diminuer [2].

Le choix des matériaux de construction est en partie la cause de ces émissions, avec comme plus gros producteurs de CO₂, l'acier, le béton et le ciment. L'utilisation du bois pourrait être une alternative durable pour autant que les 3 piliers soient respectés :

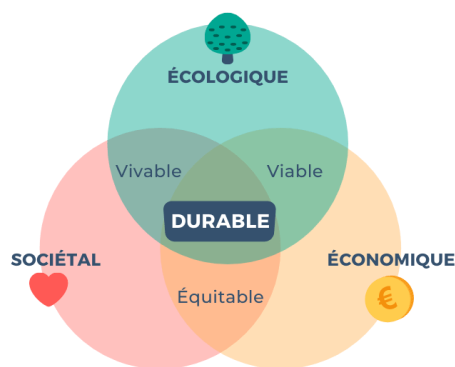


Figure 1: Les 3 piliers du développement durable (Estelle Chambon, 2020)

Premièrement, le bois a des **aspects environnementaux** évidents : il capte le CO₂ pendant sa croissance et le conserve durant la vie du bâtiment. En outre, ces bâtiments peuvent avoir une longue durée de vie pour autant que les assemblages aient été correctement pensés et que l'essence ait été choisie et/ou préservée en fonction des conditions d'humidité et d'exposition. Á titre d'exemples, beaucoup de charpentes de cathédrales encore existantes ont été construites avant le 13^e siècle telle que la cathédrale Saint-Pierre de Montmartre et le plus ancien bâtiment en bois est un temple bouddhiste qui a été érigé en 710, Hōryū-ji, au Japon [3]. En fin de vie du bâtiment, le bois peut encore être revalorisé et recyclé. C'est seulement lorsqu'il est dégradé par combustion ou par dégradation biochimique, que le CO₂ retourne dans le cycle naturel. Enfin, le bois constitue une alternative aux matériaux à haute empreinte énergétique, que ce soit en termes d'émissions de gaz à effet de serre mais aussi en termes de transport. En effet, 46% de la surface de l'Europe étant composée de forêts, il est possible de s'approvisionner localement [4].

Deuxièmement, le bois a **un impact social**, car il est lié aux emplois qui découlent directement de cette activité : le secteur forestier qui gère les forêts, mais aussi les secteurs de la transformation (construction, meubles ...) et de la récupération (biomasse, pellets...). Cependant, le secteur de la transformation est actuellement menacé depuis que la Chine, séduite par le bois belge, a décidé d'en faire son business en subventionnant l'importation tout en stoppant l'abattage sur son territoire. De quoi avoir de jolis meubles en bois belge *made in China*, mais surtout de précariser l'activité des artisans locaux et des scieries de petite production belge [5].

Troisièmement, l'**aspect économique**, qui est l'aspect faisant le plus défaut étant donné que le bois n'est pas concurrentiel sur le plan financier. Certes, sa valeur brute ne dépasse pas les 100€/m³, mais après passage en scierie et transformation, son prix peut être multiplié jusqu'à 10 fois pour les éléments les plus transformés. Ce critère est rédhibitoire face au béton, pour lequel le prix à déboursier du m³, main d'œuvre comprise, se situe aux alentours de 600€ [6]. En outre, le bois est un matériau aux propriétés très variables, car il peut exister une différence de résistance de 20 à 40% au sein d'une même espèce [7]. Cette variation est un désavantage pour le bois car les méthodes de caractérisation des propriétés mécaniques se basent sur des études statistiques d'essais destructifs, ce qui induit une sous-estimation du potentiel des bois en raison de la variabilité des spécimens au sein d'une population. L'amélioration de ces deux points permettrait de rendre le bois économiquement plus attractif.

1.2 Construire en grume

L'enjeu est de rendre la construction en bois plus attrayante financièrement, et c'est dans cette optique que ce mémoire a lieu d'être. Le défi peut en effet être relevé en sautant la case « transformation » et en utilisant l'arbre abattu, écimé et ébranché (appelé grume) comme poteau, pilier de fondation ou comme élément de plancher. De plus, une caractérisation au cas par cas, permettrait d'utiliser chaque grume au maximum de ses performances.

Pour pouvoir utiliser ces éléments de grume à forme irrégulière et unique dans la construction, la **conception** de la structure et le dessin des **assemblages** doivent être réalisés avec minutie. Cela est maintenant possible grâce aux développements de **logiciels de conception paramétrique, l'automatisation et la robotisation**. Le concepteur peut dès lors disposer d'un répertoire contenant toutes les grumes disponibles (en forêt ou en entrepôt) accompagnées de leurs propriétés mécaniques et de leurs dimensions. Une fois le dessin du bâtiment réalisé, il est alors possible de donner les instructions aux automates constructeurs pour les découpes des connexions et la réalisation des assemblages. Cette technologie qui maximise les opérations humaines en entrepôt, et limite les aléas du chantier représente un gain de temps et d'argent pour le futur de la construction¹.

Pour le bon fonctionnement de ces logiciels de conception, il est indispensable de connaître les **caractéristiques mécaniques** de la grume, c'est-à-dire, sa résistance ultime (ou la charge maximale admissible) ainsi que son module de Young (ou le déplacement induit sous charge donnée dans la zone élastique de chargement, représenté par la pente de la droite sur le graphique force-déplacement sur la figure 2).

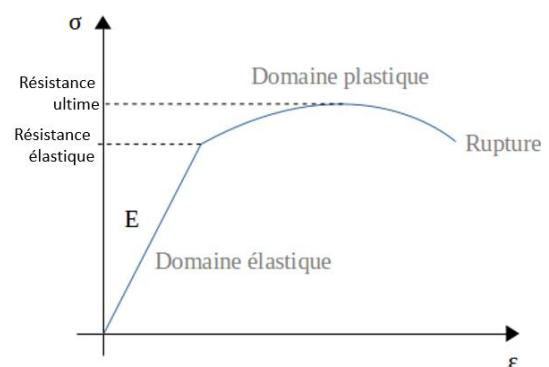


Figure 2: Courbe contrainte-déformation : Réponse d'un matériau subissant une force. Source :

Actuellement, les **méthodes de caractérisation** sont détaillées dans les normes de dimensionnement européennes (appelées Eurocodes) pour caractériser tous types de matériaux comme le béton, l'acier

¹ Cette vision d'avenir s'étend bien évidemment au-delà du matériau bois, ces réflexions me viennent d'une discussion empreinte de passion avec l'expert bois Dominique Maquet, Gérant principal chez ARAUCATECH sàrl, lors de mon stage de Master 1 sur chantier.

et les bois équarris. Le principe consiste à effectuer des essais mécaniques en flexion 4 points sur un échantillon provenant d'une population définie (essence, provenance, dimensions). Cela permet de déterminer les valeurs caractéristiques afin d'estimer les propriétés de la population totale. Cette valeur caractéristique est, dans le cas de la résistance, le fractile à 5%. Cela signifie que 95% des échantillons auront une résistance supérieure ou égale à cette valeur caractéristique. Dans le cas de la rigidité, cette valeur caractéristique n'est autre que la valeur moyenne [8]. La courbe de Gauss (figure 3) de la répartition statistique des propriétés mécaniques du bois étant très aplatie, cela rend la méthode statistique extrêmement punitive.

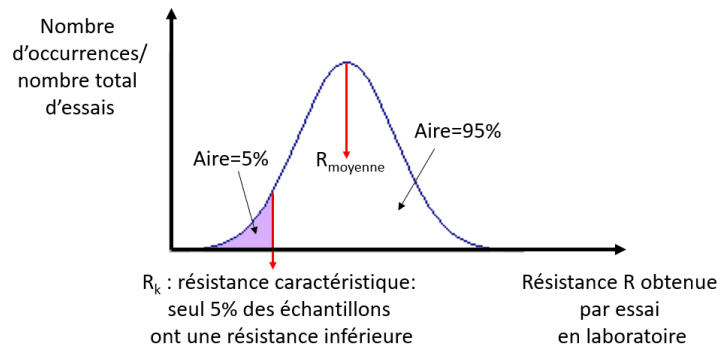


Figure 3 : Courbe de Gauss et valeurs caractéristiques statistiques (Illustration personnelle)²

Toute la difficulté réside dans le fait que chaque grume est unique. Une caractérisation destructive implique une grande campagne d'essais sur de multiples troncs, sans pour autant pouvoir utiliser chaque tronc au maximum de ses performances mécaniques. C'est trop coûteux et donc contraire à l'objectif de rendre le matériau bois plus attractif.

Résoudre ce problème technologique permettrait de concevoir et de construire de plus grands bâtiments tels que des bureaux, des immeubles ou des centres commerciaux [6]. De plus, un client voudra une structure bois pour son **esthétisme**. Même si ce critère est subjectif, le bois produit un sentiment chaleureux et accueillant. A titre d'exemple, voici plusieurs projets utilisant des troncs structurels ayant déjà été réalisés par le passé [9] [10] [11] [12] [13]:

² Reproduit à partir du cours « Structure en bois » dispensé par Pierre Latteur à l'EPL

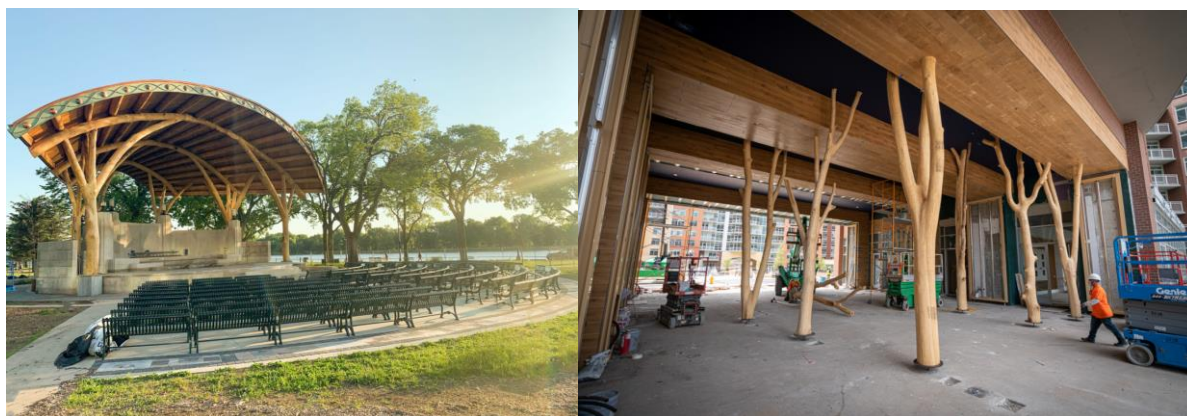


Figure 4: La crosse Riverside Park Bandshell et National Gateway, Etats Unis



Figure 5 Up Straw, bureaux du Cluster Eco-construction wallon, Pairi Daiza et son parking photovoltaïque en grumes, Belgique.



Figure 6 : Charpente en bois rond et la ferme du Mont Charvet, France



Figure 7: Wood ship barn, Hooke Park, Beaminster, Dorset, et Cedar River Logging Trestle, Washington State

1.3 Objectif du mémoire

Ce mémoire a pour but de caractériser les propriétés mécaniques d'un tronc. La méthode statistique ne pouvant pas être retenue, une approche de caractérisation individuelle est alors nécessaire, impliquant la caractérisation de chaque élément avant son utilisation dans un bâtiment. Le processus de caractérisation individuelle doit permettre de déterminer la résistance et le module de Young³ mais se doit aussi d'être non destructif, c'est-à-dire ne causer aucun dommage. Pour être applicable dans les scieries ou en entrepôt, il faut que ce processus soit rapide, peu coûteux, facile à mettre en œuvre et automatisé afin de garantir la production attendue et d'assurer la démocratisation de la méthode.

Un protocole expérimental de mise en charge est en cours de développement à l'UCLouvain, depuis 2020, afin de caractériser les grumes mécaniquement en flexion de manière non destructive. Cette méthode permet de calculer le module de Young et la résistance avant endommagement, elle est détaillée dans la section 4.1.5.

Néanmoins, il subsiste deux grands défis au sujet de ce protocole :

- Au vu de la durée du protocole (1h30), une méthode rapide non destructive doit être mise en place afin d'écarter directement les grumes à faible potentiel avant d'entreprendre les tests. Une évaluation visuelle permet certes d'éliminer certains spécimens sur base de critères extérieurs mais ne permet pas de détecter les défauts intérieurs ni d'estimer les propriétés mécaniques.
- Une fois la mise en charge réalisée, il n'y a actuellement aucune certitude sur l'intégrité, c'est-à-dire l'absence d'endommagement, des grumes après l'essai.

C'est pourquoi, depuis cette année, et au travers de ce mémoire, la recherche s'étend à **une méthode de caractérisation dynamique : l'Impulse Excitation technique (IET)**. L'IET relève d'un principe physique simple : tout matériau dispose d'une fréquence propre qui est la fréquence à laquelle il oscille librement lorsqu'il subit une excitation. Cette fréquence dépend uniquement de certaines propriétés physiques du matériau, à savoir sa densité, ses dimensions, son moment d'inertie et enfin, ce que nous recherchons, sa rigidité dynamique (ou module de Young dynamique). En outre, les ondes de vibration d'un élément peuvent présenter un comportement différent en fonction de l'**endommagement** présent au sein du matériau. Cet endommagement peut avoir la forme de fractures, de fissures, de défauts de croissance, de discontinuités, de pourritures, ou être dus aux effets du temps sur le bois.

Ce mémoire utilise l'un des appareils disponibles sur le marché pour les essais IET ; le GrindoSonic®MK7 [14]. C'est un appareil standard dans l'industrie qui permet de prendre des mesures caractéristiques « élastiques » du matériau ou des mesures de contrôle non destructives (que ce soit en industrie ou in situ afin de réévaluer les pièces qui font déjà partie d'une structure en service [15]). Son fonctionnement est simple, précis et fiable. Il suffit d'induire, par une légère frappe, une petite déformation au matériau qui le fait entrer en vibration. Le GrindoSonic® enregistre les vibrations mécaniques et les traduit en un signal électrique. L'appareil va ensuite traiter ce signal et déterminer

³ Depuis le premier janvier 2009, chaque pièce de bois utilisée dans un cadre structurel doit être labellisée avec sa classe de résistance (Marquage CE)

les fréquences qui le composent. Le GrindoSonic® permet également de quantifier l'amortissement de l'onde, c'est-à-dire son atténuation en amplitude dans le matériau.



Figure 8: Appareil GrindoSonic® et illustration de son fonctionnement (GrindoSonic, 2020)

Afin de pouvoir étudier la méthode IET sur des grumes, ce mémoire se compose deux parties principales :

PARTIE THEORIE :

- Développe les aspects physiques, la théorie et les formules qui se cachent derrière cette méthode de l'excitation par impulsion, c'est-à-dire en abordant le sujet de la détermination du module de rigidité dynamique mais également le sujet de l'amortissement des ondes.
- Retracer l'état de l'art des expériences non destructives (IET et autres) déjà réalisées sur le bois, les grumes et les poteaux électriques en précisant les concepts et les observations et problèmes rencontrés sur le bois.
- Approfondit les expériences déjà réalisées sur le bois avec la méthode IET.

PARTIE EXPERIMENTALE :

- Présente le matériel, les méthodes et les normes utilisées pour la partie expérimentale.
- Présente des expériences inédites élaborées dans le cadre de ce mémoire sur des éprouvettes de petites dimensions (10x30x300 mm³), des éprouvettes cylindriques et coniques à conicités variables de 50 cm de long et sur des grumes pouvant aller jusqu'à 10m de long.
- Énonce les observations au sujet de l'évaluation du module de Young et de l'endommagement.
- Conclut sur la faisabilité et la transposabilité de ces tests dans un cadre industriel.

État de l'art et théorie

2 Théorie

Ce chapitre permet de comprendre les principes de la technique de caractérisation non destructive explorée dans ce mémoire : l'Impulse *Excitation Technique* (IET). Cette méthode consiste à déterminer la rigidité d'un matériau en analysant le spectre des fréquences de vibration libre induit dans le matériau par sa mise en résonance forcée à l'aide d'une impulsion.

Les **atouts** de cette méthode IET sont qu'elle est rapide, simple, non destructive, précise et qu'elle peut s'utiliser sur de petits spécimens fragiles dont la limite d'élasticité est vite atteinte. Ses **désavantages** sont quant à eux la pertinence d'un dit « module dynamique »⁴, son non-fonctionnement sur certains matériaux composites, et enfin sa disponibilité sur le marché [16]. De plus, l'inhomogénéité du bois, inévitable en raison de l'agencement des fibres et des nœuds qui le composent, induit que le module de Young est un module local qui varie sur la longueur du spécimen. Cependant, la technique IET ne fournit qu'un module global [17].

Dans cette partie, les concepts fondamentaux de la résonance sont exprimés pour tous types de matériaux, en apportant, si cela est nécessaire, des précisions concernant l'application au bois ou plus particulièrement aux grumes. Les différents modes de vibrations, les types d'ondes dans un élément et les équations qui les régissent sont également décrits. De plus, les notions liées à l'amortissement des ondes sont détaillées dans un souci de mieux comprendre le phénomène et de le lier à des variations physiques du bois. Enfin, les principes de la transformée de Fourier dans le traitement d'un signal échantillonné sont rappelés afin d'en connaître les limitations et de ne pas considérer les calculs réalisés par le GrindoSonic® comme une boîte noire.

Les équations développées dans ce chapitre le sont uniquement pour les formes rencontrées dans la partie expérimentale de ce mémoire c'est-à-dire les cylindres et les parallélépipèdes rectangles. Il existe aussi, dans la littérature, des développements pour les tubes et pour les disques.

2.1 La méthode IET et ses notions de dynamique

2.1.1 Principe général

Chaque matériau possède des résonances fondamentales mécaniques qui dépendent de leur densité, leurs dimensions et leur module d'élasticité. La technique IET permet de mesurer le module en existant **3 différents types de modes**, figure 9 : **transversal (ou flexionnel) (a)**, **en torsion (b)** et **longitudinal (c)**. Les zones bleues représentent les zones de moindres déplacements des particules, les zones rouges sont celles qui subissent les plus grands déplacements. Le mode excité préférentiellement dépendra alors de la position des appuis et de la frappe.

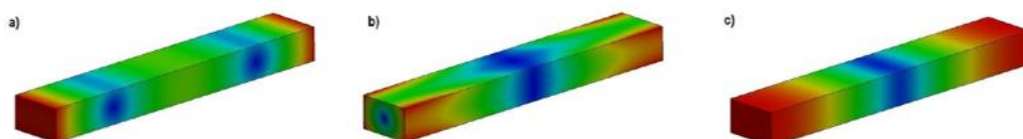


Figure 9: Différents modes de vibration (ResearchGate)

⁴ C'est d'ailleurs un des enjeux de ce mémoire.

Un élément oscille selon plusieurs fréquences fondamentales pour un mode de vibration, la fréquence la plus basse étant la **fréquence propre**, c'est celle-ci qui permet de déterminer le module de Young.

La fréquence propre peut être déterminée à partir de 2 des 3 différents types de modes excitables. Premièrement, les ondes longitudinales, c'est-à-dire dont les vibrations induites sont parallèles à la longueur de l'élément, permettent de déterminer le **module dynamique axial longitudinal** $E_{\text{Dyn,Long}}$. Deuxièmement, il est également possible de déterminer le module d'élasticité en induisant une onde de flexion. Celle-ci est caractérisée par des vibrations qui se produisent quand un élément oscille dans un plan normal à sa longueur ; elle permet de déterminer le **module dynamique axial flexionnel** $E_{\text{Dyn,Flex}}$. Enfin, l'élément peut également osciller en torsion c'est-à-dire que les sections perpendiculaires à l'axe longitudinal effectuent des rotations autour de cet axe, ce qui permet de déterminer le module de cisaillement (G) et le module de Poisson (ν). Ces derniers modules ne seront pas détaillés dans ce mémoire⁵.

L'enjeu est alors de bien différencier à quels modes appartiennent les différentes fréquences enregistrées lors d'un test, afin de distinguer les fréquences propres, cette différenciation se fera au cas par cas dans les chapitres suivants.

Toutes ces constantes (E , G et ν) se calculent dans un domaine de contraintes qui se situe avant la limite élastique, qui correspond à la plus grande contrainte que le matériau peut subir sans être impacté de déformations résiduelles permanentes après relaxation totale de la force appliquée. Utiliser la méthode IET consiste en effet à appliquer des déformations instantanées, ce qui signifie que les déformations induites au matériau restent au niveau du début de la courbe force-déplacement (figure 2) procurant la certitude de se trouver dans la zone élastique.

Lorsqu'un élément vibre à une certaine fréquence, il existe 3 états de matière possibles au long de l'élément : les **zones nodales**, **anti-nodales** et **intermédiaires**. Une zone nodale, aussi appelée nœud, est un endroit ayant un déplacement constant nul, en bleu sur la figure 9. Dans le cas des barres et des cylindres élancés vibrant en flexion à leur fréquence propre (figure 9 (a)), ces zones nodales se trouvent à 22,4% et 77,6% de la longueur de l'élément mis en résonance. En résonance longitudinale, les nœuds se trouvent au milieu (figure 9 (c)). Les anti-nœuds, eux, sont les éléments qui subissent les plus grands déplacements dans la vibration, ils se trouvent aux extrémités et à mi-distance entre 2 zones nodales.

2.1.2 Les ondes dans la matière

Il existe plusieurs types d'ondes mécaniques⁶, les ondes **longitudinales** (ondes de compression ou ondes P) et **transversales** (ondes S), comme citées précédemment, et les **ondes de Rayleigh** qui sont des ondes de surface, c'est-à-dire que les particules se déplacent dans toutes des directions en forme d'ellipses.

Les ondes mécaniques ont besoin d'un milieu rigide pour se propager, tandis que les ondes électromagnétiques, elles, n'en ont pas besoin, mais sont plutôt sensibles à l'humidité. Une onde peut être **élastique**, ce qui signifie que les efforts dans un tel matériau obéissent à la loi de Hook. Mais elles

⁵ Dans un matériau isotopique $\nu = \frac{E}{2G} - 1$

⁶ Phénomène de propagation d'une perturbation des particules de matière induite par un choc brusque.

peuvent également être **plastiques**, ce qui signifie que le matériau subit des déformations permanentes ou bien encore **viscoélastiques**, c'est-à-dire pour lesquelles les efforts internes visqueux ne sont pas négligeables et agissent en addition aux contraintes élastiques [18].

2.1.3 Différence entre module statique et dynamique

Il est démontrable théoriquement qu'il y a une différence entre le module de Young statique et le module de Young dynamique. Le module statique est un processus isotherme (température constante et uniforme), il y a donc un transfert de chaleur entre le système et l'extérieur. Le module dynamique quant à lui est adiabatique (sans transfert de chaleur), ce qui implique que l'énergie augmente.

Le module adiabatique est toujours plus grand que le module isothermique. Cela peut être expliqué simplement sur la base du fait que lorsqu'un corps est soudainement étiré, il se refroidit, une caractéristique qui découle de la première loi de la thermodynamique. La contraction thermique donne lieu à une déformation, dans le sens opposé à la contrainte de traction appliquée, qui est régie par la chaleur spécifique (c_p) et le coefficient de dilatation (α). Ainsi le module adiabatique apparent (E_a) est supérieur à l'isotherme (E_i). Une relation approximative est donnée par

$$\frac{1}{E_i} - \frac{1}{E_a} = \frac{\alpha^2 T}{c_p \rho} \quad (1)$$

ρ étant la masse volumique en kg/m^3 et T la température [15] [16].

En général, une longueur plus importante de spécimen diminue la fréquence de la résonance. De ce fait, la différence entre les modules statique et dynamique devient plus faible. Ce qui est le cas pour les grumes qui sont testées dans le cadre de ce mémoire [19].

2.1.4 Degrés de liberté

Pour la résolution d'un problème dynamique, les équations se construisent en fonction du nombre de degrés de liberté. Un degré de liberté unique correspond à une masse capable de faire un seul mouvement. Un degré de liberté multiple est rencontré en présence de plusieurs masses, et plusieurs déplacements indépendants possibles. Il se résoudra alors par une approche matricielle. Par exemple, s'il existe N masses dans un système et que celles-ci peuvent bouger indépendamment les unes des autres selon 2 directions (X et Y dans un repère cartésien), le degré de liberté du système est $2N$.

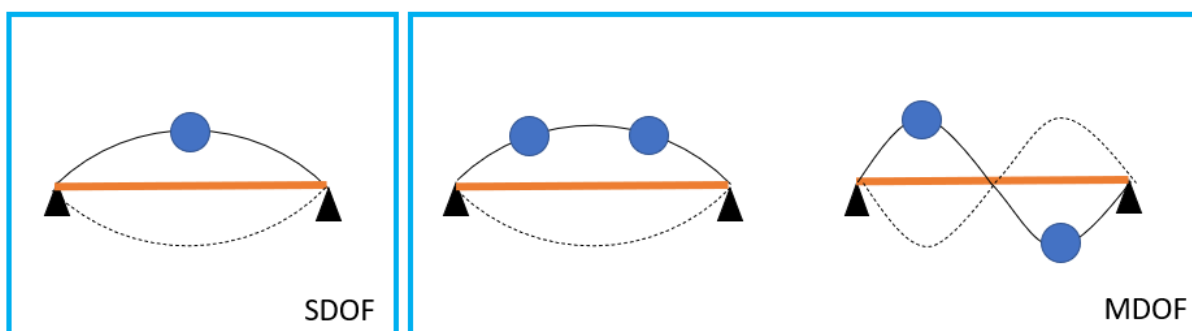


Figure 10 : Oscillations possible d'un système à 1 degré de liberté (SDOF) et à 2 degrés de liberté (MDOF) (Illustration personnelle)

Dans le cas des systèmes avec une masse distribuée, le degré de liberté est infini. Cependant, à partir d'un nombre assez important de degrés de liberté, le système oscille avec une amplitude remarquable selon un seul degré de liberté (=SdoF, single degree of freedom)[20]. Le cas de la poutre de charge uniformément répartie est alors étudié comme un degré de liberté simple et ne nécessite pas une résolution matricielle. Sa configuration dans le temps et l'espace est alors définie par la déflexion de son centre de gravité.

2.2 Mode de résonance flexionnelle

Les différents nœuds dans le cas de la résonance flexionnelle sont représentés sur la figure 11 :



Figure 11 : Nœuds de la flexion selon le NPL (n étant le numéro de l'harmonique) (NPL, 2006)

En frappant sur le coin du spécimen testé, toutes les harmoniques sont excitées, alors qu'en frappant au milieu, seulement une harmonique sur deux est excitée (c'est d'ailleurs cette considération qui justifie de frapper au milieu lors d'expériences). Les harmoniques peuvent être nécessaires afin de vérifier que la fréquence fondamentale a bien été détectée. En effet, pour des éléments élancés, les harmoniques supérieures sont parfois plus facilement excitées (c'est-à-dire ont une plus grande amplitude).

À cause des effets de bords et de l'inertie de rotation, les fréquences harmoniques ne sont pas en rapport constant. Dans le cas d'une poutre rectangulaire élancée, le rapport est de 2,757 : 5,404 : 8,933 : 13,344 : 18,638 :⁷ [21].

Les différentes harmoniques sont représentées par la forme que prendrait l'élément s'il oscillait à cette fréquence seule, figure 12. En réalité, toutes ces harmoniques sont couplées, et seule celle de plus grande amplitude peut être espérée détectable à l'œil nu.

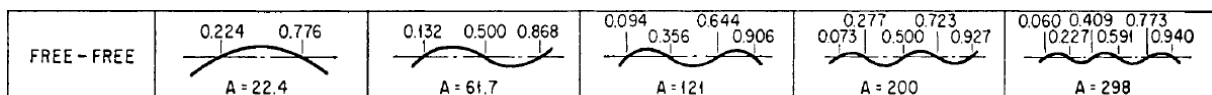


Figure 12: Harmoniques de la vibration de flexion (Handbook, 2002)

Afin de le différencier des autres modes, le mode de flexion présente une fréquence plus petite que la fréquence longitudinale (5 à 10 fois) ainsi que de la fréquence en torsion. De plus, ce mode peut être rendu plus important (en amplitude) que le mode de torsion en diminuant l'épaisseur de la pièce, réduisant de la sorte les efforts de cisaillement.

⁷ Développement dans le NPL : solution numérique de l'équation de mouvement en flexion.

2.2.1 Équations de la norme

Les équations développées dans les normes le sont pour des conditions ou hypothèses de matériau parfait, à savoir la non-conicité, l'isotropie et l'homogénéité. De plus, elles correspondent à des conditions de vibration dites en « free-free », cela signifie que le matériau n'est en aucun point restreint de bouger, cela se réalise en positionnant les appuis au droit des nœuds.

Dans le cas d'une poutre à section rectangulaire, la norme propose :

$$E_{Dyn, Flex} = 0,9465 \left(\frac{mf^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T \quad (2)$$

Avec m la masse, b la plus grande dimension de la section, t la plus petite et L la longueur totale de l'élément. T étant un facteur de correction prenant en compte les effets de bords, de tranchant et de rotation inertielle :

$$T = 1 + 6,858 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \quad (3)$$

Dans le cas d'une barre à section circulaire :

$$E_{Dyn, Flex} = 1,6067 \left(\frac{L^3}{d^4} \right) mf^2 T' \quad (4)$$

Avec d le diamètre de la section et T' étant également le facteur correctionnel.

$$T' = 1 + 4,939 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \quad (5)$$

2.2.2 Équations différentielles, développements et résolutions de la littérature

La théorie classique de la poutre d'Euler Bernoulli fut publiée en 1744 afin d'expliquer le phénomène de résonance flexionnelle. Au 19^e siècle, St Venant fait alors remarquer que les sections planes ne restent pas planes et perpendiculaires si l'épaisseur de la pièce augmente et ajoute que les conditions initiales de la théorie de la poutre doivent être vérifiées. En 1877, Rayleigh analyse le problème en prenant en considération la rotation inertielle des sections sur base du principe de Hamilton. En 1921, Timoshenko réalise qu'il est également nécessaire de prendre en compte le cisaillement. Ensuite, divers chercheurs s'attelèrent à la résolution de ces équations pour différentes conditions frontières (Goens en 1931 pour le « free-free » et Huang en 1961 pour les conditions frontières classiques c'est-à-dire que la pièce analysée est simplement bi-appuyée sur des supports positionnés à ses extrémités). De plus, Cowper en 1966 tenta d'améliorer le modèle de Timoshenko en développant les équations avec un facteur de forme. Ce chapitre développent les différentes équations du mouvement en prenant en compte les phénomènes cités⁸ [21].

Les équations qui gouvernent le mouvement peuvent être déterminées de deux manières différentes. Premièrement, la méthode de Rayleigh qui consiste à considérer le bilan de conservation d'énergie en sachant que le spécimen est régi uniquement par de l'énergie cinétique lorsqu'il passe par sa position d'équilibre, et uniquement par de l'énergie potentielle lorsqu'il passe par sa position maximale. Cette méthode est celle utilisée dans ce mémoire afin de déterminer les équations gouvernant les déplacements de la vibration en flexion [20]. Deuxièmement, la méthode classique qui consiste à

⁸ Les développements d'avantage détaillés sont disponibles dans les documents [21] et [22]

appliquer la deuxième loi de Newton au système considéré, cette méthode est détaillée dans le cadre de la vibration longitudinale à la section 2.3.2.

Les équations qui lient le module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et la fréquence fondamentale dépendent de l'inertie. Nous faisons donc souvent référence à **l'inertie des sections**. Dans le cas de la grume, nous utilisons l'inertie d'un cercle. Cependant, la grume peut présenter un méplat, il peut alors être intéressant, en cas de forte déformation, d'envisager l'inertie correcte de la section ovale, figure 13.

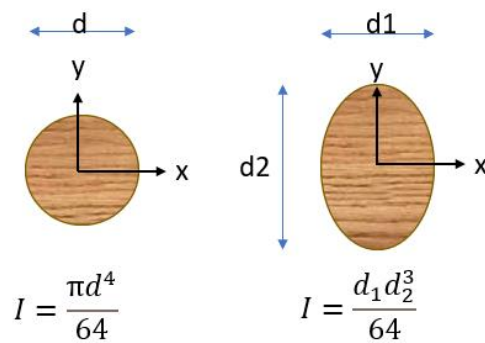


Figure 13 : Formules de l'inertie d'un cercle et d'une section ovale (Illustration personnelle)

A) Modèle classique : Euler-Bernoulli

L'équation développée par Euler-Bernoulli est le cas le plus simple. La littérature précise que ce modèle est valable pour des éléments dont la longueur est au moins 10 fois supérieure aux dimensions transversales.

Hypothèses :

1. Pas de rotation transversale des sections en comparaison à la translation des sections.
2. Pas de distorsion angulaire due au cisaillement en comparaison aux déformations flexionnelles.
3. Le coefficient de Poisson est négligeable.
4. Une dimension est considérablement plus grande que les 2 autres.
5. Les sections planes restent planes.
6. Le matériau est linéaire et élastique.
7. Les sections sont symétriques de sorte que l'axe neutre et le centre des sections coïncident.
8. EI (inertie et rigidité) est constant tout au long de l'élément.
9. La masse est uniformément distribuée.

Développement :

L'équation partielle différentielle gouvernant les déplacements pour une vibration libre provient de l'expression de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique :

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Avec v la déflexion transversale à la position x et au temps t , A l'aire de la section et ρ la masse volumique. Cette relation peut être réécrite en effectuant un changement de variable et en considérant que la poutre est excitée harmoniquement⁹. Le problème devient, une fois adimensionnalisé :

$$\frac{\partial^4 V(\xi)}{\partial \xi^4} + a^2 V(\xi) = 0 \quad (7)$$

Avec $a^2 = \frac{\rho A L^4 (2\pi f)^2}{EI}$ et V une fonction trigonométrique et hyperbolique.

Les valeurs propres " a " sont alors trouvées en résolvant l'équation (7) pour V avec les conditions frontières choisies. Dans le cas de la vibration libre, $a=22,3733$ pour le 1^{er} mode, soit la valeur en pourcent de la position du premier nœud¹⁰. Conduisant alors à la formule liant fréquence et module d'élasticité :

$$E = \frac{\rho L^4 (2\pi f)^2 A}{a^2 I} \quad (8)$$

B) Théorie de Rayleigh : inertie des sections

Rayleigh ajoute aux équations précédemment développées un terme supplémentaire du côté de l'énergie cinétique afin de prendre en compte la rotation des sections transversales.

Développement :

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + \rho I \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (9)$$

En effectuant un changement de variable et en considérant que la poutre est excitée harmoniquement le problème devient, une fois adimensionnalisé :

$$\frac{\partial^4 V(\xi)}{\partial \xi^4} + a^2 r^2 \frac{\partial^2 V(\xi)}{\partial \xi^2} - a^2 V(\xi) = 0 \quad (10)$$

Et la notion d'élancement d'Euler apparaît ($r^2 = \frac{I}{AL^2}$).

Ce nouveau problème induit deux valeurs propres : $\alpha_r = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{-r^2 + \sqrt{r^4 + 4/a^2}}$ et $\beta_r = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 + 4/a^2}}$. Donnant pour équation de la fréquence naturelle :

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\beta_r^2 - \alpha_r^2}}{2\pi r} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (11)$$

C) Modèle incluant le cisaillement

Ce modèle prend en compte la déflexion due au cisaillement, mais pas la rotation inertielle. La littérature a montré que cet effet prédit au mieux, en comparaison à l'inertie rotationnelle seule, le comportement réel en vibration d'un spécimen [21]. L'énergie due au cisaillement dépend d'un facteur de forme ou facteur de cisaillement K_c qui multiplie l'angle θ de cisaillement mesuré au niveau de l'axe

⁹ $v(x, t) = V(x)e^{j2\pi f t}$

¹⁰ Arrondi à 22,4% dans les normes.

neutre afin de donner un angle de rotation moyen pour la section transversale entière. Cowper développe une formule permettant d'obtenir le coefficient K_c pour différentes sections :

$$\text{Circulaire} \quad K_c = \frac{6(1 + \nu)}{7 + 6\nu} \quad (12)$$

$$\text{Rectangulaire} \quad K_c = \frac{10(1 + \nu)}{12 + 11\nu} \quad (13)$$

Ce paramètre vient du fait que le cisaillement n'est pas constant sur toute la section. Il faut donc résoudre un système d'équations couplées de 2 variables dépendantes (la déflexion de flexion et de cisaillement). La fréquence naturelle obtenue dépend à nouveau de 2 valeurs propres :

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\beta_s^2 - \alpha_s^2}}{2\pi S} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (14)$$

S étant le coefficient relié aux effets de distorsion de cisaillement $S = \frac{EI}{K_c G A L^2}$ avec G le module de cisaillement.

Expérimentalement, négliger le cisaillement conduit à mesurer une fréquence inférieure à celle prédite par le modèle. Utiliser une formule ignorant les effets de cisaillements induit le calcul d'une valeur de module élastique plus faible que dans la réalité [23].

D) Modèle de Timoshenko et résultats numériques

Timoshenko couple les 2 effets, inertie rotationnelle des sections et cisaillement. La résolution numérique de ces équations permet de tirer des graphiques qui nous conforteront dans l'idée d'ignorer ou non les effets décrits précédemment et de se contenter ou non du modèle classique de la poutre d'Euler-Bernoulli. Lorsque la théorie classique n'est pas apte à décrire le problème, elle a tendance à sous-estimer la fréquence naturelle et à sous-estimer le module de Young, ce qui est une approche sécuritaire.

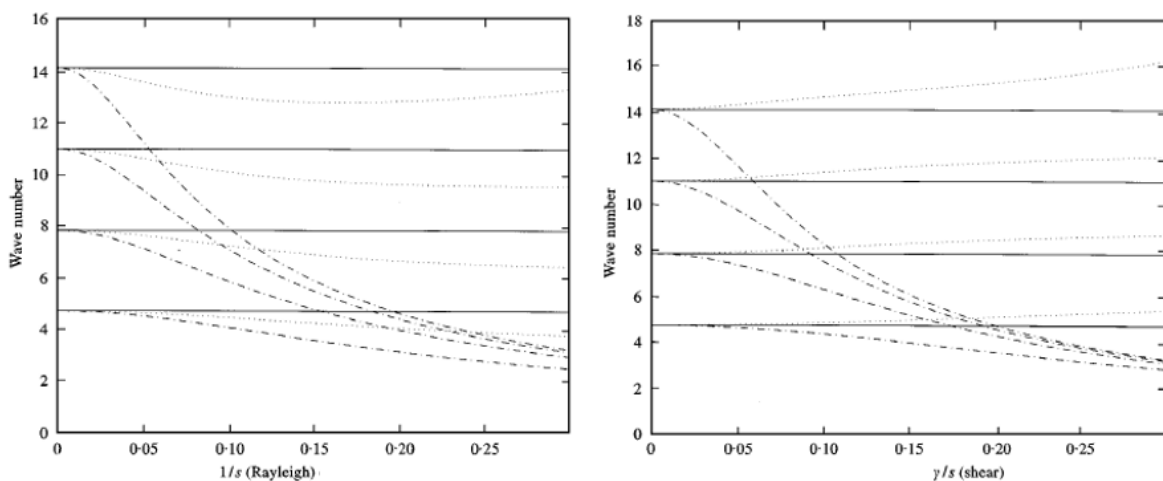


Figure 14 : Valeur des nombres d'onde pour les différentes harmoniques dans le cas du modèle de Rayleigh et du modèle de cisaillement (comparé au modèle d'Euler-Bernoulli en traits pleins) (Han Benaroya, 1999)

La figure 14 présente l'évolution, avec l'élancement, des valeurs propres des équations prenant en compte le cisaillement et la rotation inertielle des sections en comparaison au modèle d'Euler-Bernoulli en traits pleins. Le nombre d'onde étant la racine de la valeur propre ($\alpha_r, \beta_r, \alpha_s, \beta_s$), il est aisé

de voir que jusqu'à un rapport de $\frac{1}{s}$ ou de $\frac{\gamma}{s} < 0,04$, la théorie classique est une bonne estimation de la fréquence propre.

$$\text{Rayleigh} \quad \frac{1}{s} = \sqrt{\frac{I}{AL}} \quad \begin{array}{l} \text{Valeur typique des grumes : } 0,011 \dots 0,012 \\ \text{Valeur typique des éprouvettes en bois : } 0,0009 \dots 0,001 \end{array} \quad (15)$$

$$\text{Cisaillement} \quad \frac{\gamma}{s} = \frac{\sqrt{2(1+\nu)}}{s\sqrt{K_c}} \quad \begin{array}{l} \text{Valeur typique des grumes}^{11}: 0,018 \dots 0,02 \\ \text{Valeur typique des éprouvettes en bois : } 0,019 \dots 0,025 \end{array} \quad (16)$$

L'ouvrage de Seon Han [22] estime que pour $s > 100$ la théorie classique peut être utilisée sans aucun risque. La figure 14 montre également que les harmoniques s'éloignent plus rapidement de la théorie classique.

E) Facteur de correction géométrique

En 1931 Goens et Pickett [24], développent le facteur de correction géométrique. Il dépend cependant du module de Poisson, obligeant de la sorte une approche itérative car ce module se détermine sur base du module de Young et du module de cisaillement. Pour le déterminer à l'aide de la méthode IET, il est nécessaire d'utiliser simultanément la résonance en torsion et en flexion. Le facteur T mentionné dans la norme devient:

$$T = 1 + 6.585(1 + 0.0752\nu + 0.8109\nu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \frac{8.34(1 + 0.2023\nu + 2.173\nu^2)(t/L)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408\nu + 1.536\nu^2)(t/L)^2} \quad (17)$$

$$T' = 1 + 4939(1 + 0.0752\nu + 2.173\nu^2) \left(\frac{d}{L}\right)^2 - 0.4883 \left(\frac{d}{L}\right)^4 - \frac{4.691(1 + 0.2023\nu + 2.173\nu^2)(d/L)^4}{1 + 4754(1 + 0.1408\nu + 1.536\nu^2)(d/L)^2} \quad (18)$$

Néanmoins, pour des éléments très élancés $\frac{L}{t} > 20$, la formule simplifiée, mentionnée dans la norme section 2.2.1, ne dépendant pas du module de Poisson, peut être utilisée.

En 1959, Spinner [25] vérifie les valeurs de ce facteur T pour des cylindres et pour des parallélépipèdes à sections carrées, en réalisant des tests sur 30 spécimens en acier. Il se rend compte que, en flexionnel, la valeur de T varie de 3% par rapport à la formule théorique de Pickett pour les sections circulaires. Cette différence ne porte heureusement pas préjudice dans le cas d'éléments élancés.

2.2.3 Impact de la conicité

Joseph F. Murphy [26], a développé de manière analytique et numérique, à l'aide d'un développement itératif matriciel, l'impact de la conicité sur les équations liant fréquence de résonance transversale et module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ dans la configuration simplement bi-appuyée¹². Pour cela, il considère que le cône tronqué est une série de petits cylindres de diamètres constants. Il applique alors les équations de Euler-Bernoulli¹³ à chaque élément et résout ensuite le problème avec pour conditions

¹¹ Calculé en considérant un module de poisson du bois de 0,4, valeur générale trouvée dans la littérature.

¹² Et donc pas la configuration « free-free » comme pour les grumes.

¹³ Il considère ne pas devoir utiliser Timoshenko (inertie rotationnelle et efforts de cisaillement) sur base du fait que le diamètre est égal à 0,1 fois la longueur du cône tronqué, c'est-à-dire en ne considérant pas un volume infinitésimal de l'élément mais bien à l'élément au complet.

frontières ; le déplacement, la pente, le moment et l'effort tranchant. Il utilise également comme hypothèse que la fréquence de vibration de tous les cylindres est identique, le problème est illustré figure 15. L'équation de la fréquence est donnée par le déterminant de la matrice.

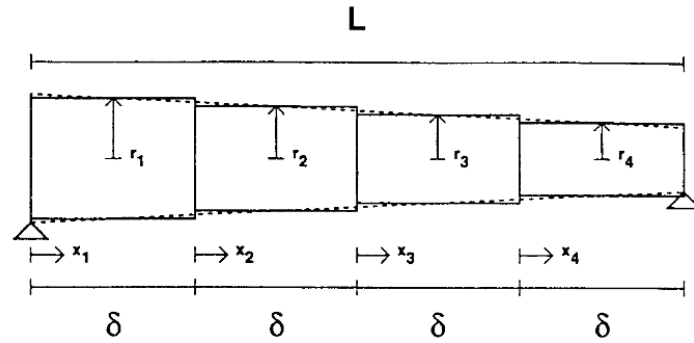


Figure 15 : Supports et subdivisions considérés (J Murphy 2000)

La solution du problème est :

$$f^2 = K_1 \frac{EI_0}{L^4 \rho A_0} \quad (19)$$

L'indice zéro faisant référence à la plus grande section (soit la section en pied de cône tronqué). La valeur de K_1 dépend des appuis considérés voir Annexe 10, mais va également varier, selon lui, en fonction de la conicité comme représenté sur la figure 16. Les conclusions qui ressortent de son étude sont que pour une conicité $\frac{r_L}{r_0} < 0,8$ une solution numérique approximative prenant en compte le rayon obtenu par moyenne géométrique n'est plus satisfaisant (le ratio entre la solution approximée et la solution numérique est alors de 0,993). Ce document, bien que relatif à des conditions d'appuis différentes du « free-free » conseillé par les normes, nous apprend que le meilleur moyen de limiter les impacts de la conicité est d'utiliser la moyenne géométrique des rayons.

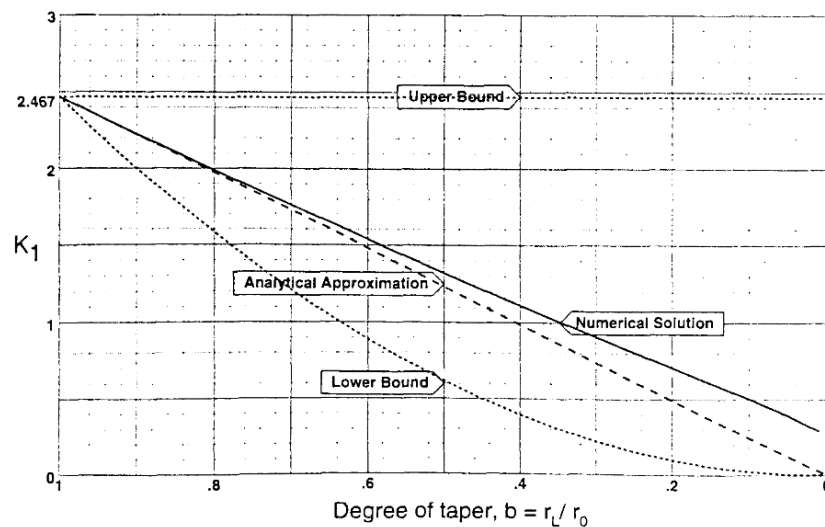


FIG. 4—Transformed fundamental root of the frequency equation as a function of the degree of taper.

Figure 16 : Graphique récapitulatif des développements mathématiques (J.Murphy,2000)

Un autre moyen de prendre en compte la conicité, pourrait-être, dans le cas du degré simple de liberté, de ne pas considérer la masse résultante à mi-travée mais à une certaine distance des appuis rotulés

comme présenté sur la figure 17. Cette distance est le centre de gravité d'un cône soit $\frac{1}{4}$ de la hauteur ou bien en prenant en compte le fait que le cône est tronqué et en utilisant la formule déterminant le centre de masse d'un trapèze soit [20] :

$$Y = \frac{1}{3}h \left(\frac{2a + b}{a + b} \right) \quad (20)$$

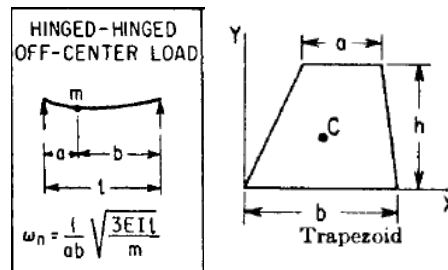


Figure 17: Masse concentrée et décentrée, centre de masse d'un trapèze (Handbook, 2002)

Quoi qu'il en soit, la conicité aura un impact sur la position des nœuds, qui ne seront plus à 22,4%L [27].

2.3 Mode de résonance longitudinale

Ce mode est difficilement excitable sans exciter d'autres modes, il peut donc souvent être confondu avec la torsion ou la flexion. Pour le différencier, il est bon de savoir que les harmoniques se succèdent entre elles sur base d'un rapport entier. Néanmoins, à partir d'un certain rapport épaisseur-longueur d'onde ($\frac{t}{\lambda} > 0,2$), ce n'est plus le cas [16].

Il peut paraître moins aisé de se figurer les harmoniques supérieures, en effet, c'est uniquement un déplacement de particules qui s'étirent et se compriment. Afin de visualiser ces harmoniques, celles-ci peuvent être comparées aux ondes stationnaires, qui sont les ondes qui naissent au sein d'une corde tenue par ses deux bouts. Les resserrements et étirements maximums des particules du solide en résonance longitudinale se font aux mêmes endroits que les nœuds des ondes stationnaires, et ce en 2 temps (en rouge et en vert sur la figure 18) peu importe le numéro de l'harmonique. Les animations, sont disponibles sur internet [28].

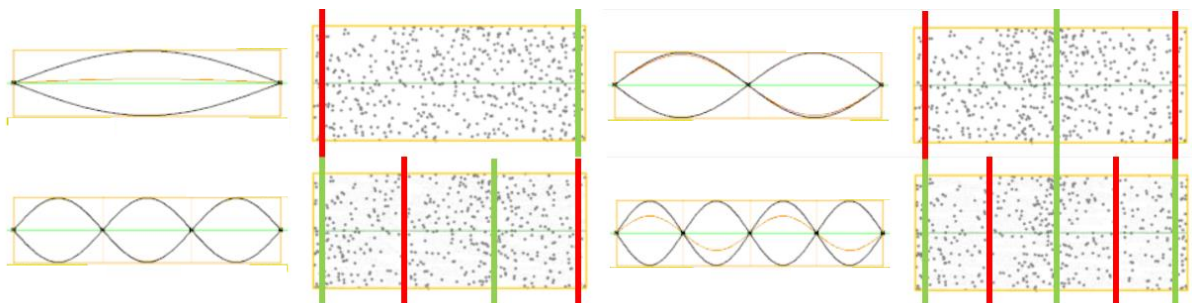


Figure 18: Représentation des 4 premières harmoniques longitudinales, (réalisée à partir de Stringfixer)

2.3.1 Équations de la norme

Dans le cas d'une section carrée :

$$E_{Dyn,Long} = \frac{4L\rho f^2}{n} K \quad (21)$$

$$1/K = 1 - \frac{\pi^2 v^2 (b^2 + t^2)}{12L^2} \quad (22)$$

Où n est le mode ($n=1$ correspondant à la fréquence propre) et ρ la masse linéique.

Dans le cas d'une section circulaire, la formule est identique, à l'exception du facteur géométrique (seulement valable pour les éléments élancés $2r/\lambda \gg 1$, λ étant la longueur d'onde) :

$$1/K = 1 - \frac{\pi^2 n^2 v^2 r^2}{2L^2} \quad (23)$$

2.3.2 Équations différentielles, développements et résolutions de la littérature

A) Vibrations longitudinales isotropes :

Hypothèses :

- $\frac{d}{L}$ ou $\frac{t}{L}$ très petit de sorte que les déformations perpendiculaires à la frappe et le coefficient de Poisson puissent être négligés, il y a donc seulement une contrainte axiale (hypothèse de Euler-Bernoulli).
- 2^e Loi de Newton :

$$\Delta F = ma \quad (24)$$

- Masse et contrainte de compression sont distribuées uniformément.
- Élasticité du matériau.
- Non-conicité et parallélisme des faces.

Développement sur base de la méthode classique :

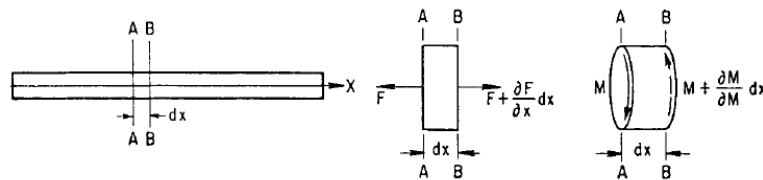


Figure 19 : Schéma du problème (Handbook, 2002)

Pour un élément infinitésimal, l'équilibre (équation (24)) est :

$$F + \frac{\partial F}{\partial x} dx - F = \rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (25)$$

ρ étant la masse volumique en g/mm^3 . Pour un allongement élastique ($\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x}$), en considérant que le module E et la section S ne dépendent pas de la position dans l'élément et en introduisant la vitesse d'onde ($c^2 = \frac{E}{\rho}$) :

$$c^2 u'' = \ddot{u} \quad (26)$$

Avec u'' la dérivée seconde de la position et $\ddot{u}$ la dérivée seconde temporelle. La solution de cette équation différentielle est de la forme $\Phi = X(x)T(t)$

$$T = A \cos(\omega_n t + \theta) \quad (27)$$

$$X = C \sin\left(\omega_n \frac{x}{c}\right) + D \cos\left(\omega_n \frac{x}{c}\right) \quad (28)$$

Les conditions d'appuis dans le cas d'une vibration longitudinale libre sont : $X'(0)=0$ et $X'(L)=0$ conduisant à la formule mentionnée dans la norme et la littérature (pour $n=1$ et sans facteur de forme):

$$E_{Dyn,Long} = 4L^2 f^2 \rho \quad (29)$$

Il est également possible d'exprimer cette relation en termes de nombre d'onde soit $k_n = \frac{\omega_n}{c} = \frac{n\pi}{L}$ nous avons alors :

$$k_n = \omega_n \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (30)$$

B) Théorie de Love

Love prend en compte, quant à lui, les déformations transversales de l'élément en vibration. Il fait intervenir un terme supplémentaire dépendant du moment d'inertie polaire de la section « J » [29]. Il considère de la sorte la contrainte et l'inertie dans la direction perpendiculaire au mouvement.

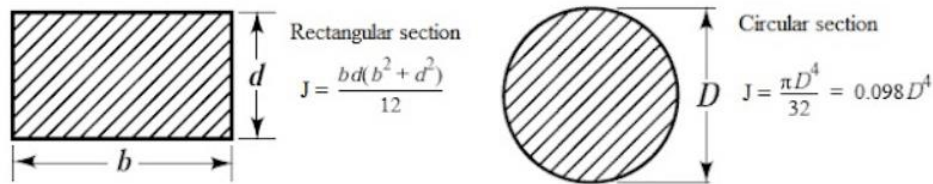


Figure 20: Moment d'inertie polaire des sections d'intérêt (Handbook, 2002)

Cette hypothèse devient non négligeable si les éléments sont peu élancés. Un terme supplémentaire impactant l'énergie cinétique du système apparaît donc dans l'équation[30]. L'application du principe de Hamilton donne :

$$EAu'' + v^2 \rho J \frac{\partial^2}{\partial x^2} \ddot{u} + \rho A \ddot{u} = 0 \quad (31)$$

Cela conduit à :

$$k_n = \omega_n \sqrt{\frac{\rho A}{EA - v^2 \rho J \omega^2}} \quad (32)$$

$$E = 4f^2 \rho L + \frac{v^2 \rho J \omega^2}{AL^2} \quad (33)$$

Le facteur de forme proposé par la norme apparaît. En effet, quand la section est petite par rapport à la longueur ($2L^2 \gg v^2 \pi^2 r^2$) et en mettant en parallèle les équations (21) et (33), le facteur de forme K est, dans le cas du cylindre¹⁴ :

¹⁴ Le cas du parallélogramme rectangle est laissé au lecteur

$$\frac{1}{K} = 1 - \frac{v^2 \pi^2 r^2}{2L^2 + v^2 \pi^2 r^2} \quad (34)$$

C) Pour aller encore plus loin

D'autres modèles plus précis encore ont été développés ces dernières années, ceux-ci se présentent sous la forme d'une résolution matricielle dans les 3 dimensions et sont plus complexes à exprimer. Par exemple, le modèle de Mindlin-Herrmann prend en compte le cisaillement induit par les déplacements transversaux. La théorie des 3 modes quant à elle prend en compte la distribution non uniforme des déplacements axiaux ainsi que les déformations transversales [30].

D) Vibration longitudinale : Lien entre les équations et les expériences.

Les ondes longitudinales sont souvent exprimées en termes de vitesse. L'expression simplifiée donnée dans la norme a également été exprimée et donnée en termes de vitesse par Rayleigh. La version de Love est pour sa part déclinée en vitesse par Bancroft[31]. La vitesse est liée à la fréquence propre dans le cas de matériaux homogènes et isotropes par la simple relation :

$$v = 2fL \quad (35)$$

Dans ses écrits, Spinner [25] compare les différentes expressions de la vitesse pour différents ratio $d/2L$ avec ses résultats expérimentaux réalisés sur 30 spécimens en acier. Il en conclut que pour les plus hauts ratios $d/2L$, c'est la méthode de Bancroft qui est la plus adéquate, mais les deux expressions donnent des valeurs identiques jusqu'à un ratio de 0,05.

E) Cas de la viscoélasticité

Les matériaux viscoélastiques ont des propriétés matérielles qui dépendent du temps, ils nécessitent donc de multiples dérivées temporelles et davantage de paramètres que dans le cas des matériaux purement élastiques. Néanmoins, en théorie, on peut considérer le spécimen testé comme une série de ressorts et d'amortisseurs en parallèle (schéma statique d'un système régit par des lois viscoélastiques). Dans ce cas, pour de faibles amortissements, le module de Young est en réalité le module équivalent des différents ressorts élastiques indépendamment des amortisseurs, il est alors un module purement élastique. Bien qu'elle n'impacte pas le module de Young, cette viscoélasticité garde bien entendu un impact sur l'amortissement de l'onde, ce phénomène est détaillé dans la section 2.5.1 [32] [33].

2.4 Mode de résonance en torsion

Ce mode ne sera pas détaillé en profondeur dans le cadre de ce mémoire. Il est néanmoins nécessaire de connaître les moyens de le différencier des modes précédemment cités et développés.

La fréquence propre de torsion est toujours plus petite que celle du mode longitudinal et plus grande que celle du mode de flexion [34]. Pour faciliter l'enregistrement de la résonance en torsion, la norme conseille d'avoir un rapport largeur-hauteur de 5 au minimum, s'éloigner de cette recommandation limite l'excitation de ce mode de résonance [35].

Ce qu'il faut retenir sur le module de Young dynamique :

Les modules $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$ sont normalement physiquement supérieurs au module E_{stat} , cette différence tend à s'estomper au plus l'élément testé est élastique.

Il existe 3 modes différents de vibration d'un élément cylindrique ou parallélépipède rectangle, ces modes conduisent à des fréquences différentes et il est impératif de ne pas les confondre afin d'utiliser les bonnes relations. Cela s'effectue en portant attention à la position des appuis et de la frappe, et également en analysant les harmoniques ou plus précisément le rapport entre harmoniques consécutives.

La formule pour le module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ est dans le cas d'un cylindre: $1,6067 \left(\frac{L^3}{d^4} \right) m f^2 T'$, les expressions pour le parallélépipède rectangle et pour les facteurs de forme se trouvent aux équations (2) à (5). Les coefficients $\frac{\gamma}{s}$ et $\frac{1}{s}$ s'ils sont inférieurs à 0,04, permettent de vérifier si les effets de cisaillements et de rotations inertielles des sections peuvent être ignorés.

La formule pour le module $E_{\text{Dyn, Long}}$ est dans le cas du cylindre comme du parallélépipède rectangle: $\frac{4L\rho f^2}{n} K$, les expressions des facteurs de forme se trouvent aux équations (21) à (23).

Pour les deux modules, les hypothèses sont strictes en termes d'homogénéité des sections et de masse volumique du matériau. Les équations de la norme sont celles considérant le cisaillement des sections pour le module flexionnel et les déformations transversales pour le module longitudinal.

2.5 Amortissement

2.5.1 Signification physique

Sans sources extérieures, aucun système mécanique ne maintient une amplitude de vibration sans diminuer ou s'amortir. L'amortissement matériel est un nom donné pour les effets physiques complexes qui convertissent, en chaleur, l'énergie cinétique et de contrainte présente dans un système solide continu oscillant. Une bonne interprétation et figuration de l'amortissement est la boucle d'hystérèse formée lors de la charge et décharge d'un matériau. La diminution d'amplitude de vibration d'un corps oscillant librement, est donc décrit par la notion d'amortissement et suit en théorie une règle logarithmique.

Afin de comprendre les significations et implications physiques de l'amortissement, le cas de la vibration libre d'un système élastique régi par un amortissement visqueux linéaire est présenté. L'amortissement visqueux linéaire signifie que la dissipation d'énergie, qui survient quand une particule oscille dans un système, est régie par une force qui a une amplitude proportionnelle à l'amplitude de la vitesse de la particule et une direction opposée au déplacement de cette particule. Le phénomène d'amortissement est ici présenté dans le cas d'un système à un seul degré de liberté. Dans le cas d'un degré multiple de libertés, les équations sont couplées et tous les paramètres se représentent sous une forme matricielle. Les

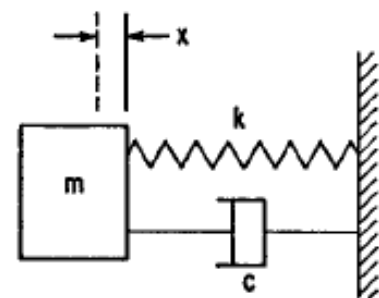


Figure 21: Système viscoélastique (HandBook, 2002)

conclusions sont cependant identiques, c'est donc par souci de clarté que le cas du simple degré de liberté est présenté. La représentation d'un système élastique à amortissement visqueux se présente comme sur la figure 21.

Pour un matériau viscoélastique, la viscosité linéaire (ou newtonienne) est considérée dans la plupart des cas comme la principale forme de dissipation d'énergie. De nombreux polymères ainsi que d'autres types de matériaux peuvent être traités avec cette considération, surtout pour de petites déformations. Le bois est bien un polymère, car il est le mélange de trois polymères, à savoir la cellulose, la lignine et l'hémicellulose, dans des proportions variant certes selon l'espèce, mais aux alentours de respectivement 50%, 25%, 25%.

Il existe deux types d'amortissements ; l'amortissement matériel qui intervient à l'intérieur du volume du solide, et l'amortissement de glissement, qui naît des effets de cisaillement aux limites de surface de contact ou au niveau des joints entre les pièces. Dans le deuxième cas, la dissipation d'énergie peut résulter d'un glissement sec (frottement de Coulomb), d'un glissement lubrifié (forces visqueuses), ou d'une déformation dans un adhésif de séparation (amortissement dans une couche viscoélastique entre surfaces).

L'équation du déplacement qui découle des lois de Newton est, pour un matériau viscoélastique linéaire :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

Avec m la masse, k le coefficient de rigidité du ressort et c le coefficient d'amortissement. Les solutions de cette équation vont dépendre de la valeur du coefficient d'amortissement, plus particulièrement de si celui-ci est plus grand ou plus petit qu'un coefficient critique. La fraction du coefficient critique se définit comme étant :

$$\zeta = \frac{c}{c_{crit}} = \frac{c}{\sqrt{mk}} \quad (2)$$

Si $\zeta > 1$, le système n'oscille pas et est directement amorti. Dans le cas contraire, il y a oscillation et la valeur de ce coefficient ζ va avoir un impact sur la fréquence d'oscillation de l'élément excité. En effet, dans un système subissant des effets considérables d'amortissement, la fréquence fondamentale ω_n est supérieure à la fréquence amortie mesurée ω_d , cette relation est représentée figure 22:

$$\omega_d = \omega_n(1 - \zeta^2)^{0.5} \quad (4)$$

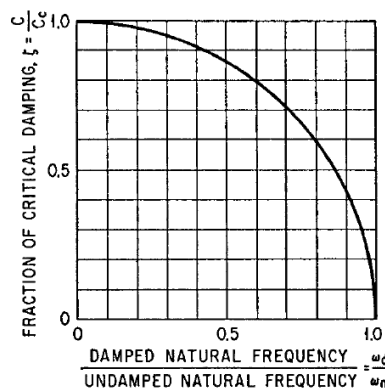


Figure 22 : Évolution de la variation entre la fréquence naturelle et la fréquence amortie en fonction de la fraction d'amortissement critique. (HandBook, 2002)

Dans les manuels de dynamique, les deux fréquences sont considérées comme égales pour des valeurs de $\zeta < 0,1$. Les cas rencontrés dans la partie expérimentale de ce mémoire sont dans la plupart des cas dans ce domaine de sécurité (les valeurs sont à chaque fois précisées).

2.5.2 Différentes expressions de l'amortissement

Il existe plusieurs autres manières d'exprimer l'amortissement que le coefficient ζ , celles-ci sont toutes liées entre-elles pour autant que $\zeta < 0,1$ c'est-à-dire que l'amortissement soit faible. Ces liens sont disponibles dans l'Annexe 1 [20].

Δ Le décrétement logarithmique

Le décrétement logarithmique Δ est le logarithme naturel du ratio entre l'amplitude de deux cycles successifs d'une oscillation amortie, sur la figure 23 (a) : $\Delta = \ln \frac{x_1}{x_2}$.

3 dB Bandwidth at the half-power point

Pour cette nomenclature, un amortissement élevé est associé à un pic large dans le domaine fréquentiel, figure 23 (b). $\Delta\omega$ est désigné comme l'incrément de fréquence mesurée au « point de demi puissance » soit à une valeur égale à l'amplitude divisée par la racine de 2. La fraction de coefficient critique exprimée en dB Bandwidth est alors : $\zeta = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n}$.

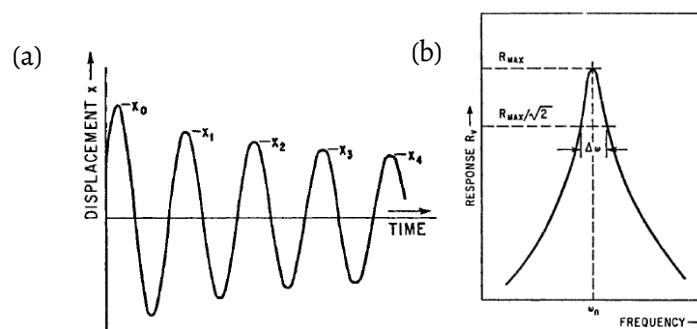


Figure 23: Représentation graphique de l'évolution temporelle d'un signal (a) et du spectre d'une onde de fréquence propre ω_n (b) (HandBook, 2002)

Ce qu'il faut retenir sur l'amortissement dynamique :

L'amortissement est l'atténuation de l'onde oscillatoire qui survient dans un matériau visqueux. Il existe 2 types d'amortissements, l'amortissement matériel (à l'intérieur du matériau) et l'amortissement de glissement (au niveau des appuis et des joints).

Dans le cas de petit déplacement et d'un matériau polymère (comme le bois), il est acceptable de considérer une viscoélasticité newtonienne, c'est-à-dire qui dépend linéairement de la vitesse de l'onde de vibration.

Si l'amortissement est trop important $\zeta = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n} > 0,1$, la fréquence d'oscillation enregistrée expérimentalement est la fréquence amortie qui est inférieure à la fréquence propre. Le module dynamique estimé est alors inférieur au module réel.

2.6 Traitement du signal temporel : la transformée de Fourier (FFT)

La transformée de Fourier est utilisée pour obtenir la représentation fréquentielle d'un signal, passant ainsi du domaine temporel au domaine fréquentiel. En effet, tout signal peut être décomposé en une somme (potentiellement infinie) de sinus et de cosinus à différentes fréquences. Plus largement, en prenant en compte les signaux non réels, tout signal peut être décomposé d'une somme d'exponentielles complexes. L'objectif de la transformée de Fourier est de trouver le « poids » associé à chaque exponentielle. Par exemple, sur la figure 24, le signal temporel est composé de 3 sinusoïdes de fréquences distinctes et d'amplitudes différentes [36].

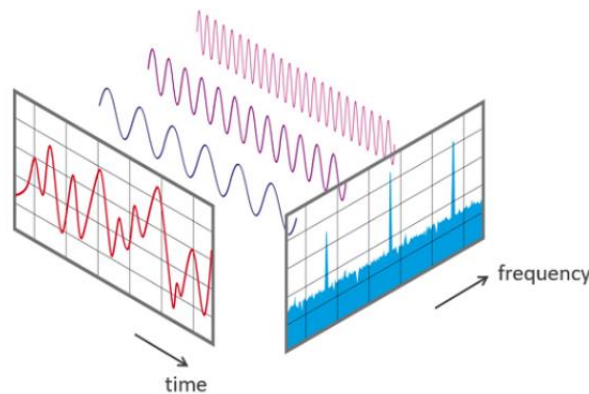


Figure 24: Signal représenté dans un domaine temporel et fréquentiel (Schatzmann, 2022)

Dans le cadre de ce mémoire, le signal continu réel des oscillations du matériau est enregistré à l'aide du GrindoSonic® sous forme d'un signal discret pour lequel est déterminé, avant enregistrement, la fréquence d'échantillonnage f_e (sample frequency, dans les paramètres GrindoSonic®) et le nombre d'échantillons N (number of samples). Cette étape d'échantillonnage est responsable du passage du signal $x(t)$ en temps continu au signal $x[n]$ en temps discret. Dans le cas de signaux discrets échantillonnés, la transformée de Fourier discrète (Discrete Fourier Transform – DFT) est alors utilisée.

Par ailleurs, l'échantillonnage d'un signal conduit à une périodisation de son spectre. Lorsque des fréquences supérieures à la **fréquence de Nyquist** (définie par $\frac{f_e}{2}$) font partie du signal enregistré, il se produit un recouvrement spectral, ce qui induit l'apparition de fréquences inexistantes dans le spectre final. La figure 25 est une représentation schématique du recouvrement dû à une fréquence d'échantillonnage f_e trop petite par rapport à la fréquence maximale $f_{\max}$ présente dans le signal. En (a), l'enveloppe des fréquences d'un spectre dont la fréquence maximale est inférieure à la fréquence de Nyquist. En (b), un spectre dont la fréquence maximale est supérieure à la fréquence de Nyquist. Il y a dans ce cas recouvrement et des fréquences supplémentaires apparaissent dans le spectre final.

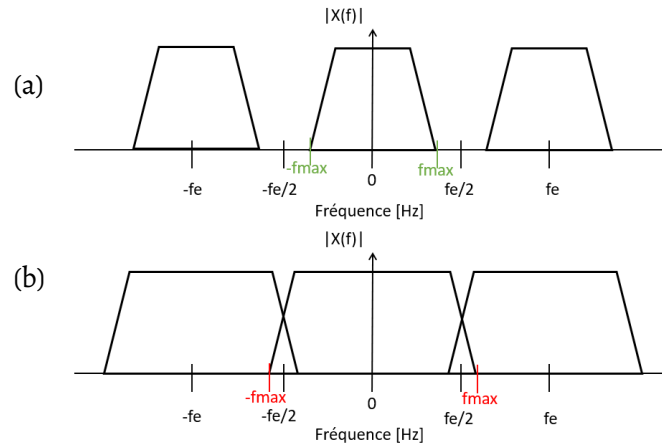


Figure 25: Schéma recouvrement spectral (Illustration personnelle)

Pour éviter tout recouvrement spectral, il faut garantir $f_{max} < \frac{f_e}{2}$. Il est évident qu'un signal réel qui provient de l'enregistrement d'une oscillation contient un large spectre de fréquences, qui dépassent la fréquence de Nyquist, par exemple, le bruit et les harmoniques. Pour pallier ce phénomène, le GrindoSonic® utilise un filtre analogique, lors de son enregistrement dans le domaine temporel continu. L'Annexe 12 détaille avec plus de précision le phénomène de Nyquist et les opérations réalisées par le GrindoSonic® afin d'obtenir le signal fréquentiel sur base du signal temporel enregistré (avec démonstration dans le cas d'une éprouvette en bois).

3 État de l'art

Cet état de l'art reprend l'ensemble des méthodes utilisées pour caractériser le bois. Peut-être une autre méthode que l'IET pourrait-elle être explorée par la suite ou bien éveiller la curiosité du lecteur. Tout d'abord, un balayage des différentes méthodes déjà utilisées dans le domaine du bois est réalisé, expliquant brièvement leur mise en pratique, les paramètres qu'elles mesurent et qu'elles permettent d'estimer, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, un regard plus approfondi sur la technique IET est réalisé et les méthodes effectuées par le passé sur grumes et sur éprouvettes en bois sont présentées.

3.1 Propriétés du bois

Avant toutes choses, cette section décrit les concepts et nomenclatures propres au bois. Loin d'être exhaustive, elle permet au lecteur d'être familier avec les concepts qui seront utilisés par la suite, c'est-à-dire, les propriétés et les facteurs influençant la rigidité du bois [15].

Le bois est un matériau **anisotrope, orthotrope et inhomogène**, c'est-à-dire qu'il est caractérisé dans les 3 directions et qu'il possède 12 propriétés élastiques (3 modules de Young, 3 modules de cisaillement et 6 modules de Poisson¹⁵). Beaucoup d'études s'intéressent uniquement au module de Young

¹⁵ Chaque module de Poisson correspond au couplage de 2 des directions principales du bois (longitudinale, transversale et radiale). Par exemple, ν_{TR} permettra de connaître l'elongation dans la direction radiale lorsqu'une contrainte est appliquée dans la direction transversale.

Pour information $\nu_{RT} > \nu_{LT} > \nu_{LR} \approx \nu_{TR} \gg \nu_{RL} > \nu_{TL}$

longitudinal E_L (c.à.d. dans le sens longitudinal des fibres), qui est le module qui présente le plus d'intérêt en construction. En effet, sa valeur est 10 fois supérieure à la valeur du module de Young radiale et 20 fois supérieure à la valeur de module tangentielle. Lorsque le module dynamique longitudinal $E_{\text{Dyn,Long}}$ et le module dynamique flexionnel $E_{\text{Dyn,Flex}}$ sont cités dans ce mémoire, il s'agit bien des modules excités par résonance longitudinale et par résonance flexionnelle et cela ne fait en aucun cas référence à l'anisotropie du bois. En effet, les deux méthodes d'oscillation sont dédiées à évaluer le même module de rigidité, E_L dans le sens longitudinal des fibres. Néanmoins, aucun matériau ne peut réellement être considéré comme homogène et isotopique, et même les métaux souffrent de l'arrangement des cristaux qui les constituent [37].

L'**essence** (feuillus ou résineux) exerce une influence sur les propriétés mécaniques du bois. En effet, plus la longueur des trachéides, très résistantes en traction, augmente, plus la résistance longitudinale est élevée. Le rapport entre la longueur et la largeur d'une fibre pour un résineux est de 1:100 tandis qu'elle n'est que de 1:50 pour le feuillu. L'essence détermine également la quantité de lignine (un des trois polymères constituant le bois avec la cellulose et l'hémicellulose), c'est celle-ci qui procure la résistance mécanique et participe à la résistance en flexion.

Quand les **cellules** sont **orientées** dans le sens de sollicitation, l'arbre résiste mieux. Dans le cas des résineux 90% des cellules sont agencées axialement, il y a donc une bonne résistance mécanique dans cette direction.

La **couche S2** qui représente 80% du volume des parois des cellules constituant le bois a également un impact sur les propriétés mécaniques. Si son angle microfibrille augmente, le module diminue. Cette orientation d'angle dépend de l'espèce, mais surtout de l'état du bois. C'est pourquoi le bois juvénile a un module plus faible que le bois mature.

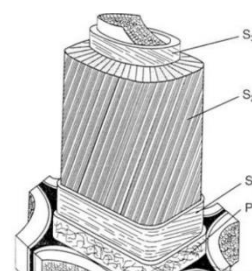


Figure 26: Structure de la paroi cellulaire du bois. (ResearchGate, 2022)

La **masse volumique**, varie au sein d'une espèce et à l'intérieur du tronc lui-même, que ce soit entre le bois juvénile et le bois mature ou entre le bois d'été (final) et de printemps (initial). Au sein d'une espèce, les propriétés mécaniques seront meilleures si la masse volumique est plus importante. Ce critère est uniquement un critère intra spécifique, car entre deux essences différentes, c'est la longueur des fibres qui prime sur les caractéristiques mécaniques.

Au cours de sa formation, l'arbre développe des **contraintes de croissance** en réponse à l'ensoleillement, aux concurrences de croissance, au vent, à la neige... Ces contraintes aident l'arbre à faire face aux charges asymétriques qu'il subit. Cela se traduit généralement extérieurement par une courbure de l'arbre. Les contraintes de croissance sont des contraintes de compression dans le cas des résineux et de traction dans le cas des feuillus. Cela modifie la structure cellulaire du bois et donc ses propriétés. Par exemple, pour les résineux, le bois de réaction présente des trachéides plus courtes, un angle microfibrille (de la couche S2) plus plat et une plus grande densité. Pour les feuillus, le bois de réaction est composé de fibres plus longues, moins de vaisseaux et de moins gros diamètres, il est d'une plus grande densité et devient pelucheux. Suite à ces caractères physiques, le bois ayant subi des contraintes de croissance présente lors du séchage de plus importantes fissures longitudinales (5 fois plus important dans le cas du bois de tension et 10 fois plus important dans le bois de compression)[38] [39].

Dans un bois sans **déviations des fibres**, le repère global [R,T,L] de croissance verticale de l'arbre et le repère local [1,2,3] représentant la direction des fibres coïncident, figure 27. Ils peuvent cependant être décalés et varier jusqu'à 45°. Cela a alors un impact sur les propriétés dans les différentes directions du repère global, étant donné l'impact de l'orientation des fibres sur la résistance mécanique. Par exemple, les trachéides n'étant plus orientées parfaitement axialement, la résistance axiale va alors diminuer. De plus, une augmentation de l'angle du grain va également avoir un impact sur l'amortissement des ondes qui se propagent dans le bois [40].

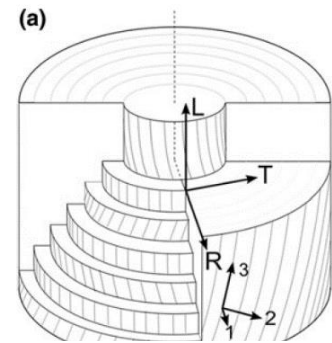


Figure 27: Repère global et local des directions du bois. (Brémaud 2011)

La présence de **nœuds** va quant à elle diminuer le module d'élasticité, mais peut également avoir un impact positif sur le module de cisaillement, car le nœud est un matériau dur et fragile. Les nœuds peuvent être sains ou morts. Les premiers sont toujours adhérents chimiquement au reste de la structure bois et participent encore à la reprise d'efforts, les seconds sont détachés de celle-ci [41].

Quant au **taux d'humidité**, il a plusieurs impacts. Tout d'abord, il induit une diminution du module élastique jusqu'à un taux d'humidité équivalent au PSF soit 30%. La norme européenne (EN384 :2010) propose comme facteur de correction, une diminution de 1% du module d'élasticité statique pour une augmentation de 1% du taux d'humidité [67]. D'autres auteurs proposent une diminution de 1,5%. Une relation a été déterminée pour le module dynamique flexionnel [42]:

$$E_{dyn12\%} = \frac{E_{dynH}}{1 - q(H - 12)} \quad (3)$$

Avec q un facteur d'ajustement hygrométrique qui vaut 0,0106 dans le cas du pin sylvestre. Ensuite, une augmentation du taux d'humidité augmente la densité. Enfin, pendant le séchage, il est possible que des fentes apparaissent et provoquent un effet négatif sur la propagation des ondes ultrasoniques et vibratoires dans la matière.

Concernant la **température**, plusieurs recherches ont déjà été menées : il en ressort que les changements de température n'impactent que très peu le module élastique pour des températures comprises entre -29 et 38°C [39].

Finalement, le **travail du bois** joue également un rôle important. Une grume non modifiée aura une meilleure résistance en flexion (de 5 à 20%). En effet, les bois non sciés conservent la continuité des fibres autour des nœuds ce qui conduit à une rupture favorablement semi-ductile plutôt qu'à une rupture fragile. Il est important de se rendre compte que le roulage mécanique brise la continuité des fibres dans les régions de la section les plus soumises aux efforts, ce qui réduit la résistance à la rupture en flexion, mais n'affecte apparemment pas la résistance en compression et le module d'élasticité [43]. Les bois ronds bénéficient en outre de l'avantage géométrique inertiel de la section circulaire en comparaison avec la section rectangulaire. Il est également à noter que le bois sous sa forme non travaillée de grume est moins sensible aux faiblesses comme les nœuds ou la pente du grain, que le bois débité.

3.2 Techniques non destructives appliquées au bois

Durant les 50 dernières années, l'utilisation de techniques non destructives a suscité un intérêt particulier dans le domaine forestier, que ce soit pour évaluer la qualité de l'arbre sur pied avant la récolte ou pour évaluer le produit fini. Avant de se concentrer sur la méthode IET, cette section présente une série de méthodes de caractérisation (quasi-)non destructives du bois, divisée en trois catégories : manuelles, électriques et dynamiques. Beaucoup d'entre elles sont mises en pratique dans le domaine des poteaux électriques au Canada et aux Etats-Unis [44]. Ces méthodes ont également été testées, pour la plupart sur des arbres sur pied, des grumes ou des éprouvettes en bois. Enfin, certaines sont utilisées dans l'industrie à des fins de validation de pièces de bois manufacturées de dimensions (et donc de propriétés attendues) identiques [45].

Toutes les méthodes ne permettent pas de déterminer l'entière des caractéristiques mécaniques du bois à la fois, à savoir la densité, l'endommagement, la rigidité et la résistance. Il est donc conseillé de coupler les méthodes entre elles. L'endommagement est souvent analysé afin de détecter une quelconque dégradation biologique (pourriture, trou d'insectes...) ou en termes de dégradation mécanique.

Une méfiance particulière doit être accordée aux méthodes s'intéressant uniquement à la densité pour caractériser un élément en bois. En effet, la densité est une valeur locale au sein d'un arbre. Il n'existe dès lors pas une bonne corrélation entre la densité et le module de Young [34]. La densité est néanmoins un critère dans le cas des éprouvettes sans défauts et sans nœuds [46], dans ce cas, une grande densité indique une bonne rigidité [37] [47].

3.2.1 Méthodes manuelles

Inspection visuelle : Cette méthode est la plus ancienne et la plus utilisée. Elle se réalise en analysant le bois - à l'œil nu - afin de détecter les caractéristiques sylvicoles désavantageuses (pente du fil, nœuds, cernes de croissance...) et les zones de faiblesse (attaques d'insectes, fissures, pertes de matière, pourritures...). Un grade de qualité, basé sur une relation statistique entre ces paramètres et la résistance, est alors attribué [48]. Le nombre de critères évaluable dépend de l'état du bois : s'il est encore sur pied ou s'il a été coupé. Il faut également garder en tête que bon nombre de critères déterminants dans la résistance ne sont pas évaluable uniquement sur base d'inspection extérieure : le classement visuel est donc extrêmement conservatif. Il existe, en fonction de la région du monde et de l'état de transformation du tronc, plusieurs normes de classement visuel (ASTMD3957, NBN EN 1927-1, DIN 4074-2). (Poteaux [44], grumes [49], pièces de bois [15]).

Sonde au marteau : Cette méthode est particulièrement utilisée dans l'évaluation des pylônes électriques. Pour celle-ci, l'expert frappe sur toute la zone accessible entre le sol et la hauteur atteinte debout avec un marteau. Il frappe dans les 4 cadrans du pilier électrique et écoute les sons. C'est une technique très utile pour savoir où il faut prélever un échantillon pour une analyse approfondie. Après seulement 24h d'entraînement, l'expert peut détecter des trous, des fissures et des fentes seulement sur base du son entendu. En général, un son grave est lié à la présence d'endommagement et implique une mauvaise résistance mécanique. (Poteaux [44])

Sonde et trous : Une sonde est utilisée pour déterminer l'ampleur de la zone faible préalablement détectée au son du marteau. Le trou sert quant à lui à déterminer la qualité du bois au cœur de

l'élément. Le diagnostic dépend de la vitesse de pénétration de la mèche de la foreuse ou perceuse dans le bois. Il est ensuite possible d'extraire des échantillons et de déterminer la condition du bois en périphérie, la pénétration des agents préservants, et la présence d'endommagement. Les propriétés générales peuvent être extrapolées à partir des échantillons prélevés en les analysant en laboratoire. Il faut bien évidemment refermer le trou avec précaution. (Poteaux [44])

3.2.2 Méthodes mécaniques

Pilodyn® : Un percuteur monté sur un ressort est enfoncé manuellement dans le bois à l'aide d'une charge prédéterminée. La profondeur de pénétration est alors reliée à la densité. Ce dispositif permet de comparer les densités et procure également une indication sur la présence de pourriture molle. Cette méthode est une méthode très peu couteuse (Poteaux [44], arbre sur pied [46])

Résistographe : Cette méthode permet la mesure de la résistance du bois face à une force constante appliquée par une micro-perceuse, au cours de son avancée dans le bois. Cela permet d'identifier les points faibles et les vides jusqu'à l'intérieur du bois. De plus, la résistance est liée au changement de densité sur la profondeur de pénétration détecté par la puissance nécessaire au forage. Ce dispositif peut être utilisé seul (sans autre méthode pour confirmer ou infirmer les résultats) s'il est appliqué à un grand nombre de points sur l'arbre. Néanmoins, il ne permet pas de détecter le stade précoce de l'endommagement biologique. (Poteaux [44], arbres sur pied [46])



Figure 28: Résistographe (Photo d'archives Progrès /Yoann TERRASSE)

Fractomètre : Ce dispositif mesure la résistance à la rupture en flexion de corps extraits de l'élément. Il est alors possible d'évaluer la résistance à la rupture et la rigidité. Il permet particulièrement de détecter la présence de pourriture molle ou brune même à un stade peu avancé. En effet, dans le cas de pourriture molle, l'échantillon subira un plus grand angle de flexion car celle-ci dégrade la lignine. La pourriture brune, quant à elle, décompose la cellulose augmentant la concentration en lignine, c'est alors l'effet inverse, une moins grande flexion, qui est observé. Pour mise en garde, la foreuse doit être aiguisée et propre au risque d'impacter les mesures prises sur l'échantillon. Le trou est bien évidemment à traiter après le test (biocide et remplissage après prélèvement). (Poteaux [44])

POLUX 5® : Ce dispositif développé par CBS-CBT dans le cadre exclusif des poteaux de bois en service peut être utilisé sous la pluie et permet de tester 120 pylônes par jour. Il est fixé à l'aide de vis à la base du poteau. Il enregistre le profil de densité du bois et l'énergie consommée au cours de l'enfoncement de pointes de 3mm de diamètre. L'humidité interne du poteau, liée à dégradation active, est mesurée à 4 cm de profondeur, une fois les pointes de mesure entièrement enfoncées dans le bois. En paramétrant, dans l'ordinateur de terrain équipé du logiciel PICUS qui lui est associé, l'espèce, le nombre de nœuds, la circonférence, la hauteur et l'âge de l'arbre, la résistance est calculée sur base de la densité. Cela permet alors de préconiser la date du prochain contrôle du poteau. Étant donné que Polux® ne pénètre pas plus loin que 4cm, il ne peut détecter des cavités au-delà, son utilisation doit

donc parfois être couplée avec la méthode mécanique du résistographe, afin de prendre en compte la section utile du poteau. (Poteaux)[50] [7].

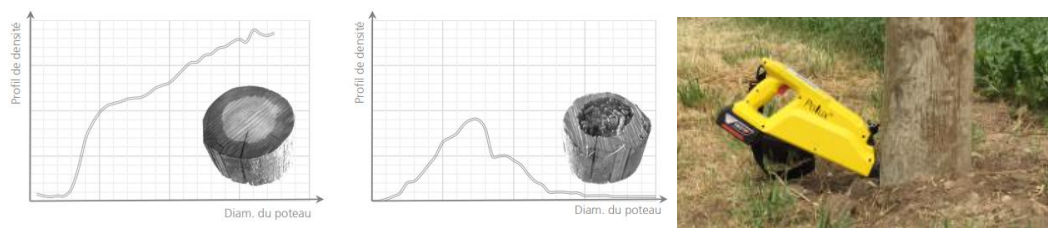


Figure 29: Exemple de prise de mesures par l'appareil Polux et représentation de celui-ci (CBS-CBT, 2022)

3.2.3 Électriques et particules

Shigomètre : Cet appareil permet de mesurer la résistance électrique à l'aide d'une sonde. Un changement de résistance est annonciateur d'endommagement. En effet, des cellules de bois endommagées libèrent des ions métalliques. De plus, les attaques fongiques augmentent le taux d'humidité dans le bois. Ces deux effets ont tous les deux pour conséquence d'augmenter la conductivité électrique du bois. Attention cependant, cette méthode permet de détecter la présence d'endommagement, mais nullement sa position. En effet, les éléments conductifs présents dans le bois en cas d'endommagement cellulaire (biologique ou mécanique) migrent dans toute la structure du bois. (Poteaux [44])



Figure 30: Shigomètre (L.Brancheriau, 2011)

Tomographie ultrasonique : À l'aide de multiples capteurs ultrasoniques (10 à 14 capteurs), on obtient un affichage tomographique qui nous permet de visualiser la section du tronc en 2D ou en 3D. Chacun à leur tour, les capteurs induisent une onde de contrainte, les autres capteurs sont alors des récepteurs, les variations de vitesse sont ensuite associées à des couleurs et il est possible de détecter les creux et les pourritures internes. Cette méthode fournit des résultats jusqu'à un diamètre de 91,44 cm. (Poteaux [44], grumes [51], troncs [15])

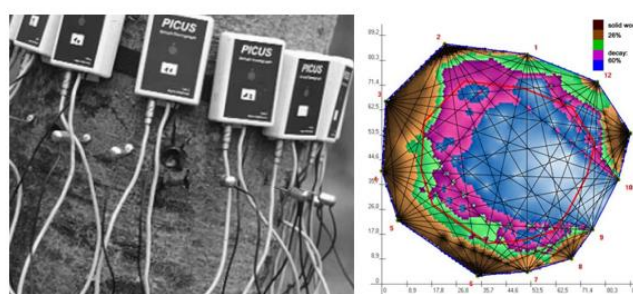


Figure 31: Illustration de la mesure de l'endommagement avec la méthode tomographique

Tomodensitométrie : Sur base de rayons X incidents et transmis et de la densité, il est possible de déterminer la résistance, le module d'élasticité mais aussi la présence de scissions internes, de nœuds, de poches de résines, de pourritures, ...



Figure 32: Dispositif MICROTEC déjà commercialisé en scieries (Microtec 2022)

L'entreprise italienne MICROTEC a commercialisé son dispositif CT Log MICROTEC utilisant la tomodensitométrie dans plusieurs scieries en Europe. Avec une vitesse d'avance de 180m/min, une source de rayons X¹⁶ effectue des rotations autour du bois à plus de 3 tours par secondes et tire une image 3D de la grume. L'appareil peut évaluer les propriétés de grumes pouvant mesurer jusqu'à 18m de long. Le dispositif procure un avantage additionnel au niveau de son utilisation en scierie étant donné le fait qu'il permet aux opérateurs de connaître l'intérieur de la grume au moment des découpes et du sciages, permettant d'augmenter le rendement de 1^{er} débit [52].

Cette méthode souffre de l'augmentation du taux d'humidité [53].

Résonance magnétique nucléaire : Sur base de protons, neutrons et d'un champ magnétique, de la même manière que les radios médicales, il est possible d'obtenir une image 2D de la structure interne de l'arbre. Contrairement à la méthode précédente, cette méthode requiert un taux suffisant d'humidité, il est dès lors possible de discerner le bois initial du bois final¹⁷ ainsi que l'aubier du duramen, mais également la présence de nœuds recouverts ou de trous d'insectes et vers [54].

3.2.4 Techniques dynamiques par les ondes

Les méthodes dynamiques sont basées sur la propagation d'une onde acoustique ou mécanique longitudinale ou transversale générée manuellement ou à l'aide d'un émetteur. Celle-ci est impactée par la densité, la présence de nœuds, l'hygrométrie et la pente du fil¹⁸. Le choix du transducteur a toujours un impact, car le phénomène de propagation de l'onde devient plus évident à fréquence élevée. Cependant, l'atténuation de l'onde¹⁹ dans les matériaux augmente avec la fréquence, et celle du bois est déjà très élevée [20].

Méthode ultrasonique : Cette technique est une des plus utilisées, les valeurs qu'elle renvoie sont d'ailleurs très souvent comparées aux valeurs de la méthode IET (développée dans ce mémoire). Pratiquée depuis 1985, elle permet d'obtenir le module de Young dans le sens longitudinal des fibres et la résistance ultime en flexion. Cela se réalise à l'aide de 2 probes piézoélectriques ; un qui envoie une onde acoustique longitudinale basse fréquence (20kHz [44], 22kHz [56], 25kHz [49], 100kHz [15]) et un

¹⁶ Rayonnement électro-magnétique constitué de photons.

¹⁷ Bois de printemps ou bois d'été, voire Glossaire.

¹⁸ Désigne le sens de l'agencement des fibres dans le bois [55].

¹⁹ Caractérisée par l'amortissement ou « damping ».

transmetteur. La base de cette méthode utilise la vitesse ultrasonique en faisant l'hypothèse d'une densité uniforme²⁰, dans la formule dérivée de la loi de Hook pour les spécimens homogènes :

$$E_{//} = \rho V_L^2 \quad (1)$$

Sur base du temps de propagation de l'onde et de la distance séparant émetteur et récepteur, la vitesse de l'onde de contrainte est calculée [37]. La littérature nous apprend que les ondes traversent mieux les bois solides et que les pourritures vont donc avoir tendance à réduire cette vitesse. Si des cavités sont présentes, la vitesse va également diminuer, car le trajet de l'onde acoustique ne sera plus direct [18].

Néanmoins, même si cette loi simplifiée adaptée des matériaux homogènes (équation (1)) est souvent utilisée dans l'axe longitudinal, elle est peu fiable en raison de la stochastique des singularités locales au niveau macro du bois. Un facteur 1,82 est ajouté dans le cas du bois par Sandoz et Benoit [56].



Figure 33 Illustration du Sylvatest® (gauche) et du Sylvatest® TRIO (droite) (CBS-CBT, 2022)

Plusieurs dispositifs et variantes, dans lesquels il est possible de paramétrer l'espèce et les dimensions de l'élément, sont déjà implémentés sur le marché, tel que *Sylvatest*® par CBS-CBT. La version améliorée, le *Sylvatest duo*®, ajoute comme information le pic d'amplitude (P_{max}) transmis dans le bois. Cette valeur est alors liée aux défauts²¹ ; en effet, l'amortissement de l'onde dépend directement des singularités locales du bois. La relation devient alors :

$$E_{//} = aV_L + bP_{max} + c \quad (2)$$

Les valeurs a, b et c étant des constantes d'étalonnage dépendantes de l'espèce. Cette version nouvelle génération accousto-ultrasonique [58] permet également de travailler dans la direction radiale. Dans ce cas il est possible d'ignorer les faibles variabilités du bois et utiliser l'équation (1).

La dernière version, *Sylvatest trio*®, utilisée et commercialisée par CBS-CBT sous le nom de LUXPOLE® [59] assure la qualité des poteaux de bois neufs (selon 3 catégories : faible, élevé, haute performance mécanique), avant leur mise en service. La mesure peut être effectuée avant ou après imprégnation. L'appareil permet de classer 100 éléments/heure pour des longueurs allant jusqu'à 25m. Le dispositif a également été développé spécifiquement pour les réseaux de lignes aériennes télécoms et électriques.

²⁰ Ce qui peut être une hypothèse raisonnable quand la largeur des cernes, principalement responsables des variations de densité (le bois d'été étant plus dense que le bois de printemps) est relativement mince comparé aux dimensions de l'échantillon [57].

²¹ Nœuds, direction du grain, aires dégradées...

D'autres outils de réalisation de la méthode ultrasonique sont également utilisés en scieries comme le *Sonatest Mastrecam 380*[®] [15] ou en forêt afin de déterminer les meilleurs bois avant sciage avec le *LOGAMATIC* chez *CBS-CBT* [60] et le *HITMAN* commercialisé par *fiber-gen* [61]. A titre indicatif, voici quelques types de probes ultrasoniques [62]:

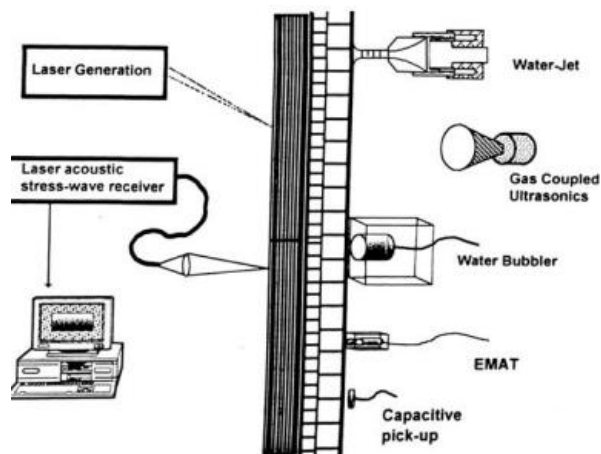


Figure 34: Différents types de probe de contact ou de non-contact (Green, 20004)

Dans le cas des poteaux à haute tension ou d'arbres sur pied, ce dispositif est très chronophage car il demande de répéter la mesure plusieurs fois, et ce, à plusieurs positions sur le bois, car la mesure ne peut être prise d'extrémité en extrémité. On parlera alors de module local.

Si la mesure est prise d'extrémité en extrémité, sur un arbre coupé par exemple, la valeur de module obtenue est en réalité une valeur globale, elle souffre alors de l'impact des zones les moins résistantes et d'un effet de moyenne. Pour les grumes, Sandoz et Benoit [56] estiment que, contrairement aux troncs, les grumes plus courtes représentent la meilleure partie du bois (soit le bois de structure²²) et la mesure n'est dès lors plus impactée par la qualité médiocre des autres parties du tronc.

La mesure peut donc être locale ou globale en fonction du montage comme présenté sur la figure 35. La mesure globale est naturellement impossible pour un arbre sur pied ou un poteau en place mais la mesure locale est impactée par l'angle de mesure et ne peut donc s'effectuer que sur une distance maximale de 2m sinon, celle-ci souffre de pertes d'informations la rendant moins précise.

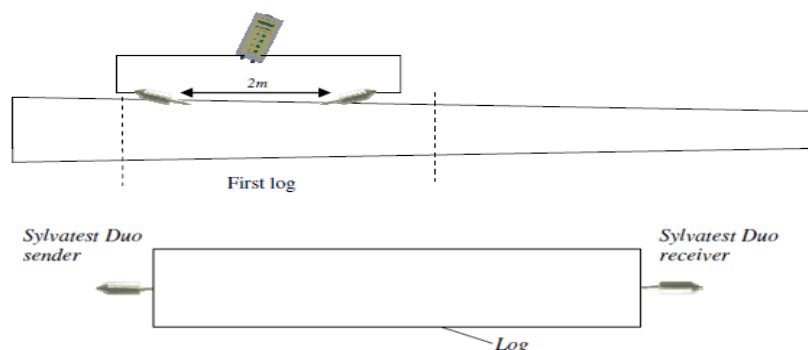


Figure 35 : Utilisation du sylvatest duo (Sandoz et Benoit, 2006)

²² Le reste du tronc étant revalorisé en papeterie ou emballage industriel

Malheureusement, trop de saignées, fissures, poches de résine, et végétations sont une entrave à la bonne utilisation de ce type de mesure, à un tel point que le dispositif n'a jamais été validé en présence de fentes de retrait sur les poteaux. Pour l'anecdote, *Sylvatest®* et *Sylvatest duo®* ont quand même été commercialisés dans le cadre de l'évaluation des poteaux électriques moyennant la mention « aucune garantie de performance » [63]. Dans les années 2000, ce dispositif n'était toujours pas validé pour les bois verts ou les arbres sur pied [46] [64] ni pour les éprouvettes [45]. (poteaux, arbre sur pied[46], du tronc à la planche [56] , grumes [65]).

La méthode ultrasonique peut également se réaliser par immersion dans un liquide ou un agent de couplage (vaseline, gels...) [66]. On parle alors de méthode ultrasonique de contact. Cette technique permet de réduire la perte de signal et de faciliter la pénétration de l'onde dans le bois. Cependant, il faut faire attention à ce que l'agent de couplage ne corrompe pas le bois, problème malheureusement aggravé par la porosité. C'est tout de même cette méthode qui est utilisée en industrie, car dans le cas de la méthode sans contact, une épaisseur d'échantillon trop importante induit des ondes diffractées qui peuvent devenir plus grandes que le signal émis.

Stress wave : Similairement à la méthode ultrasonique, cette méthode est basée sur la mesure du temps nécessaire à une onde pour parcourir l'élément. L'onde provient d'un coup donné par un marteau (c'est donc une basse fréquence). Le marteau heurte le bois (c'est donc une méthode de contact), la vitesse de l'onde est alors mesurée à la même extrémité que la frappe ou à l'opposé. Cette méthode est donc très similaire à la méthode IET longitudinale. La différence réside dans la mesure qui ici est une vitesse et non une fréquence. Dans la littérature, c'est toujours la loi de Hook qui est utilisée, non majorée par un quelconque facteur (équation (1)).

L'avantage de cette technique est que, utilisant une fréquence plus basse que la méthode ultrason, elle dissipe moins vite l'énergie et le signal réceptionné est plus clair.

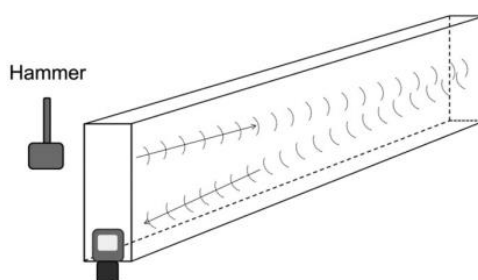


Figure 36: "Stress wave" (Moseley, 2000)

(Poteaux [44], grumes [67], éprouvettes [66])

L'impulse Echo : Le transducteur est alors à la fois émetteur et récepteur. C'est intéressant, car cela n'impose pas d'avoir accès aux deux côtés de la pièce. Cependant, il faut un matériau qui n'atténue pas trop l'onde mécanique, ce qui n'est pas le cas du bois. Cette méthode ne peut donc être utilisée que sur des éléments fins. (Planches [15])

Rappel des propriétés importantes du bois, utiles pour l'analyse des expériences à suivre :

Le bois est anisotrope, orthotrope et inhomogène.

Chez les résineux, les trachéides sont plus longues et permettent une meilleure résistance en traction et donc en termes de module d'élasticité et de module de rupture.

Les grumes souffrent moins de la présence de nœuds que les éléments transformés car la continuité des fibres autour des nœuds est préservée.

L'humidité a un impact négatif sur le module de Young dynamique.

Autres méthodes (que l'IET) d'intérêt pour une utilisation en scierie ou en forêt :

Résistographe : En forêt ou en scierie : détecte les vides avant toute autre investigation.

Shigomètre : Permet de détecter un endommagement global entre 2 étapes (avant et après protocole statique par exemple), son fonctionnement électrique le rend indépendant de la configuration de la grume (forme, appuis...).

Tomodensimétrie : Déjà utilisé dans quelques scieries et permet en plus d'augmenter le rendement de 1^{er} débit.

Ultrason : En forêt ou en scierie : avec le Logamatic® (en forêt) ou le SylvatestTrio® (en scierie). La vitesse de propagation est moins bonne dans un matériau de moins bonne qualité. La technique ne fonctionne malheureusement pas en présence de fentes longitudinales.

Stress wave : En scierie : fréquences plus basses que l'ultrason, l'onde est donc moins amortie.

3.3 Précédentes recherches dynamique IET sur le bois

La méthode non destructive que nous utilisons dans le cadre de ce mémoire est la méthode IET basée sur la mise en vibration forcée par une impulsion. Ce chapitre présente les différentes expériences déjà réalisées sur des petits éléments de bois et sur des grumes. Les méthodes et conditions ne sont pas toujours les mêmes et s'éloignent parfois de la norme qui se prononce pour tous types de matériaux confondus. Il existe donc d'ores et déjà plusieurs conclusions quant à l'utilisation de la technique IET sur le bois. De plus, la méthode de résonance²³ est souvent comparée à la méthode ultrasonique et à la méthode statique.

Pour rappel, l'appareil utilisé, dans le cadre de ce mémoire, est le GrindoSonic MK7®. Certaines expériences ont été réalisées avec les versions antérieures tel que le MK5 et le MK6 [15]. Seul Ilic [45] donne des précisions sur les fréquences d'échantillonnage (50Hz) et sur la résolution fréquentielle (2,9Hz) qu'il paramètre dans l'appareil pour ses expériences sur le bois.

²³ Synonyme de la méthode de l'impulse excitation technique

3.3.1 Comparaisons des valeurs pour différentes techniques

Les différents modules obtenus dépendent de la méthode. Un classement par ordre de grandeur a été établi par J.Wiem [15] sur base de ses expériences et de la littérature :

$$\begin{aligned} E_{flexion\ 3\ points} &< E_{compression\ parrallèle} < E_{vibration\ transversale} \\ &< E_{vibration\ longitudinale} < E_{Ultrason} \end{aligned} \quad (4)$$

Ce classement ne prend malheureusement pas en compte la flexion 4 points, très peu explorée par la littérature pour comparer les résultats de la méthode IET. Il prend en outre en considération les valeurs obtenues par la technique ultrasonique qui fait souvent partie, avec la méthode statique, de point de comparaison pour la méthode IET. Cette différence avait déjà été de nombreuses fois observée auparavant. En 2016, Ilic [47] l'explique à l'aide des recherches de Divos et Tanaka [68], par la différence de fréquence transmise dans les différentes méthodes. Si la fréquence augmente, le module dynamique augmente également. Ilic a en effet, pour ses expériences sur éprouvettes de 20x20x300mm³, une fréquence de 50kHz pour les ultrasons, une fréquence de résonance de 5,7 à 8,8kHz en longitudinal et de 0,78 à 1,11 kHz en flexionnel.

Un ordre de grandeur donné par Cho [23] est que le module dynamique longitudinal est de 11 à 33% supérieur au module statique contre 2 à 15% pour le module dynamique flexionnel.

3.3.2 Améliorer la fiabilité de la mesure IET

De manière générale, les chercheurs ayant réalisé des expériences IET sur des petites éprouvettes en bois témoignent tous de la clarté des pics, excluant toute mauvaise analyse du signal. Certains auteurs ont remarqué quelques détails qui permettent d'obtenir des valeurs plus répétables entre elles (c-à-d. en comparant plusieurs mesures consécutives).

Il a été remarqué que les lectures sont plus stables lorsque la **croissance des cernes** est régulière, et ce, peu importe la taille de celle-ci. La mesure prise sur dosse est également davantage répétable en comparaison avec les mesures sur faux quartier.

De plus, en termes d'amortissement extérieur et de prises de mesures, la faculté de Gembloux [34] a remarqué que pour des fréquences moyennes (200 Hz < f < 10 000Hz), aucune précaution n'était à prendre. Que pour des basses fréquences (f < 200Hz), les appuis ne devaient pas forcément être positionnés aux zones nodales, mais que la frappe devait être réalisée avec un élément métallique et que le piézomètre donnait des moins bonnes mesures. Quant aux hautes fréquences (f > 10 000Hz), il est impératif de diminuer l'amortissement extérieur, les zones nodales doivent donc être impeccablement respectées et le marteau doit être en caoutchouc.

Dans aucun des cas la prise de mesure n'est unique. Certains prennent la moyenne en fréquence de 6 mesures dont la lecture digitale est « valable » [34], d'autres prennent 5 valeurs consécutives identiques [15]. Dans le cas des grumes, Carreira [49] prend la moyenne de 10 coups consécutifs.

3.3.3 Module de rupture

La relation entre le module dynamique longitudinal et le module de rupture (MOR) est très mauvaise ($R^2=0,4$) ce qui fit conclure à Baar et al en 2015 [69] et à Chauhan et Sethy en 2016 [70], que les méthodes non destructives IET ne sont pas aptes à détrôner les méthodes statiques dans l'objectif

de déterminer le module de rupture. Ilic [45] suggère cependant, de coupler le module dynamique et le décretement logarithmique à l'aide d'une relation bivariée afin de déterminer le MOR.

3.3.4 Module $E_{Dyn, Flex}$

Mode opératoire :

Les méthodes de mise en œuvre de la mesure flexionnelle s'accordent toutes pour mettre les appuis à $22,4\%^{24}$ de la longueur de l'élément testé. La position de la frappe et du micro ainsi que le type d'appuis varient néanmoins énormément. J. Wiem [15] suspend l'éprouvette à l'aide de fils de nylon et prend la mesure au micro sur la face transversale au niveau du ventre de l'onde. La faculté de Gembloux [34] prend, pour sa part, la mesure à l'aide d'un piézomètre positionné au même endroit et dispose les appuis avec moins de précision (20% de la longueur) justifiant que la position exacte des appuis n'est pas critique pour autant que les supports ne restreignent pas la vibration. Ilic [45] tente, quant à lui, différents types de supports, à savoir les mousses et câbles en nylons, en prenant sa mesure à l'extrémité de l'éprouvette et remarque que les premières fréquences sont identiques, peu importe le support [47]. Cho [23], lui, dépose l'échantillon sur deux mousses molles à la position des nœuds de la vibration flexionnelle. Wang et al [71] précisent que dans le cadre de l'utilisation d'un accéléromètre, il est préférable de poncer la zone et d'utiliser de la glu afin d'assurer une bonne connexion, et réalisent également la frappe à l'aide d'un caoutchouc. Enfin, Chui [41] suspend le spécimen à l'aide de ressorts et excite le spécimen à l'extrémité opposée au point d'enregistrement du signal.

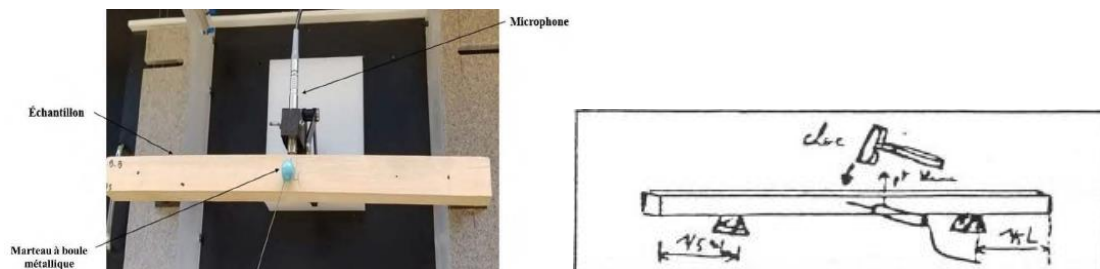


Figure 37: Disposition d'expérience J. Wiem et Faculté forestière de Gembloux

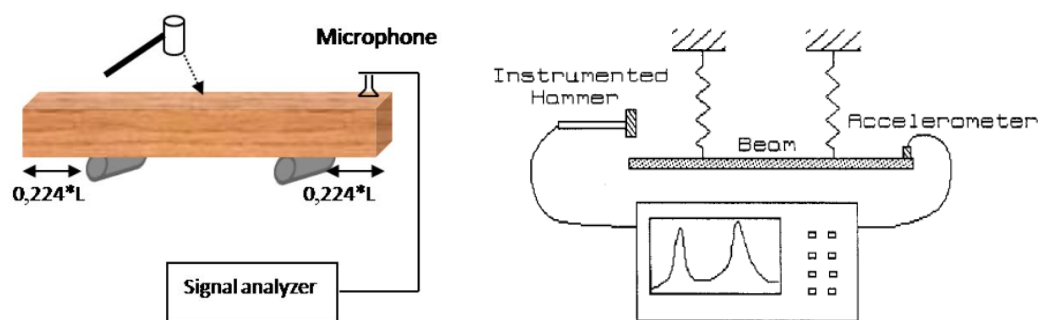


Figure 38: Disposition d'expérience de Cho et Chui

La faculté de Gembloux [34] conseille de mettre la sonde au milieu, entre les deux appuis, afin d'obtenir des valeurs plus précises de fréquence.

²⁴ Correspond aux nœuds, soit les endroits de moindres mouvements, de l'oscillation en flexion. Cette valeur est conseillée par la norme.

Remarques :

Selon Haines [37], la méthode de résonance flexionnelle est plus précise que la méthode longitudinale. Ilic [45] confirme cette remarque en 2001. Ilic remarque également qu'une fois les effets de cisaillement corrigés, le module en flexion se rapproche du module en longitudinal, passant de 13% de différence à 1,1% de différence.

3.3.5 Module $E_{\text{Dyn,Long}}$

Mode opératoire

Les conditions d'appuis sont multiples pour la résonance longitudinale, certains utilisent des élastiques et suspendent l'éprouvette en bois à 22,4% de la longueur totale de l'élément [15], d'autre utilisent des appuis anguleux à une distance approximative de 20% de la longueur comme pour le flexionnel [34] [37]. D'autre encore utilisent un simple support flexible [47] ou un lit de papier bulle pour simuler la vibration presque «free-free » [70]. Enfin, Cho [23] et Haines [37] décident quant à eux de supporter l'élément en son centre, au nœud longitudinal à l'aide simplement de leurs mains. Lorsque c'est le micro qui est utilisé pour enregistrer le signal, il est toujours positionné à l'extrémité de l'échantillon. Le matériau de frappe n'est mentionné que par Cho qui utilise un petit caoutchouc dur.

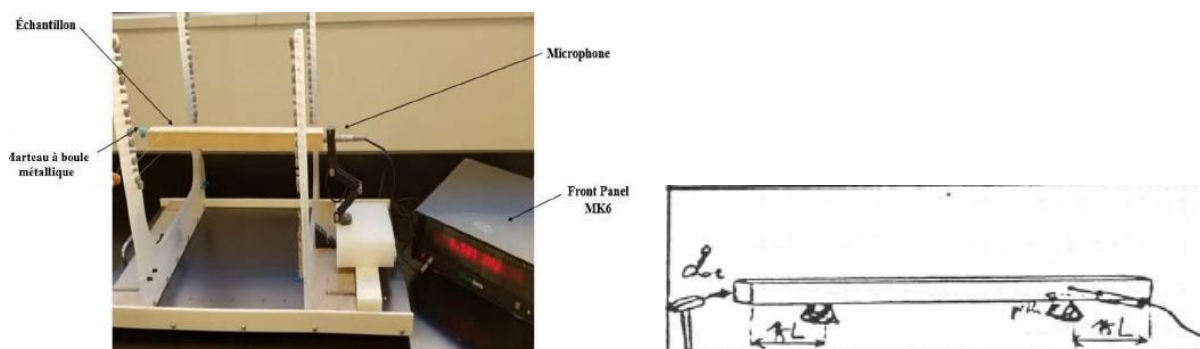


Figure 39: Disposition d'expérience J. Wiem à gauche et de la Faculté forestière de Gembloux à droite

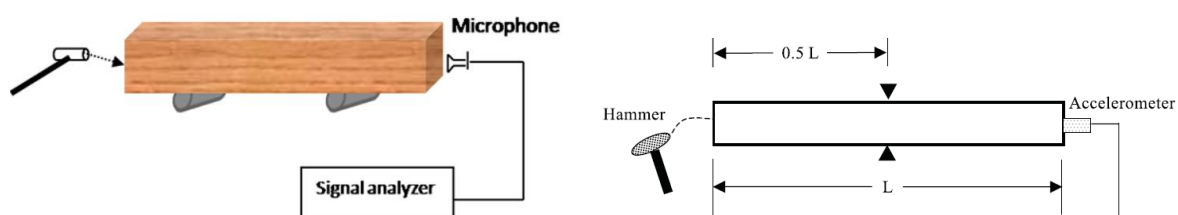


Figure 40: Disposition des expériences de Ilic à gauche et Cho et Haines à droite

Remarques

Ilic [45], précise dans ses recherches que le module dynamique longitudinal est plus intéressant à utiliser, comparé au module dynamique flexionnel, lorsque le cisaillement contribue de manière significative à la flexion. Comprenant l'importance de la hauteur des pièces dans la formule qui lie la fréquence propre à la longueur d'onde, Ilic [47] prend une valeur moyenne de l'épaisseur de ses pièces.

Haines [37] remarque que la flexion est malheureusement également très facilement excitée lorsque la résonance longitudinale est utilisée pour peu que la frappe ne soit pas centrée et parallèle à la longueur.

3.3.6 Rapport $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$

Interespèces :

Ilic [47] remarque, dans le cas de ses expériences sur les feuillus, que pour un module statique augmentant, les valeurs des modules dynamiques (longitudinal, flexionnel mais aussi ultrasonique) divergent.

Intraespèces :

Toutes essences confondues, le module longitudinal est toujours supérieur au module flexionnel d'un ordre de grandeur de 6 à 11% pour Haines [37] de 9 à 16% pour Cho [23].

Remarques :

Dans le cas de matériaux isotropes, les modules élastiques obtenus par les modes longitudinal et flexionnel sont identiques. Cependant, en flexion, la surface est la région soumise aux plus grands efforts. Pour cette raison, si l'échantillon présente une rigidité de surface différente de celle de l'intérieur, s'il présente un gradient de rigidité sur la hauteur de sa section ou s'il présente des cavités, des pores, des fissures... Il y aura une différence entre les valeurs obtenues en mode longitudinal et en mode flexionnel [72].

3.3.7 Rapport E_{Dyn} et E_{Stat}

Intraespèce :

Il semble que le module en flexion statique E_{stat} soit souvent moins élevé que le module IET sauf dans le cas du peuplier dans les expériences de Wiem [15] mais pour qui la différence est très faible. De plus, il remarque que le coefficient de corrélation est toujours moins bon pour les feuillus que pour les résineux.

Pour la faculté de Gembloux [34], les modules statique et dynamique présentent les mêmes écarts-types, ce qui signifie que les deux méthodes représentent bien les mêmes variations naturelles du bois. De plus, ils ont tenté de lier modules statique et dynamique avec la densité conduisant à une corrélation médiocre (de $R^2=0,125$), laissant supposer que l'espèce ligneuse est le seul paramètre gouvernant la relation de corrélation entre E_{stat} et E_{Dyn} .

Chauhan [70], constate que la pente de la droite $E_{\text{stat}} - E_{\text{dyn}}$ est plus importante dans le cas du module dynamique longitudinal que du flexionnel avec pour valeurs respectives 1,49 et 1,39. Cette différence est néanmoins négligeable en comparaison avec le module dynamique ultrasonique pour qui la pente est de 2,74.

Interespèce :

Dans ses expériences sur résineux, la faculté Forestière de Gembloux remarque qu'au sein d'une même espèce, la différence entre module statique et dynamique sont plus grande dans le cas de cernes plus larges [34]. De plus, si des nœuds sont présents dans les échantillons, au plus il y a de nœuds

au plus la corrélation entre le module statique et dynamique est bonne, car les inhomogénéités sont réparties [45].

Remarques :

La corrélation entre le module statique et le module dynamique flexionnel est améliorée si le cisaillement et la rotation inertielle des sections sont prises en compte, la pente de la droite $E_{stat} - E_{dyn}$ se rapproche alors très fortement de 1. Haines [37] se rend aussi compte que lorsque la taille des éléments augmente, réduisant alors l'impact du cisaillement, la différence entre le module statique et dynamique diminue jusqu'à ce que le module statique devienne supérieur au module dynamique.

3.3.8 Exploration de la littérature concernant les grumes

Quelques expériences ont également déjà été réalisées sur des grumes, celle-ci présentant cependant un plus petit diamètre et une plus faible longueur que celles qui seront évaluées dans le cadre de ce mémoire. De plus, seul Carreira [49] précise la conicité de ses grumes. Les grumes sont parfois roulées mécaniquement afin de leur donner des dimensions cylindriques parfaites et parfois non [73]. Plusieurs expériences sur grumes ont également été réalisées à l'aide de la méthode stress wave par Green et al. en 2003 [74] ou Vega et al. en 2017 [75]. La littérature nous informe alors que la méthode IET prédit mieux le module de Young statique que la méthode stress wave.

Flexionnel :

Carreira [49] suspend ses grumes non modifiées mécaniquement aux appuis nodaux, par des fils de nylon et des ressorts. Il positionne sa frappe de manière horizontale et, afin d'être certain que la position de la frappe soit toujours au même endroit, il positionne un boulon à l'endroit désigné de la frappe. Excitant de la sorte la grume en pied et prenant la mesure en tête. Pour les dimensions de ses grumes ($L=4m$, $D=20cm$ avec une conicité de 0,2 à 1,4cm/m) il estime que la formule d'Euler-Bernoulli peut être utilisée. La fréquence propre qu'il obtient est extrêmement faible, autour de 40Hz, il parvient à la mesurer à l'aide d'un accéléromètre LIS3LO2AS4. Le module $E_{Dyn, Flex}$ est alors très proche du module E_{Stat} avec une différence positive ou négative, dépendant du spécimen testé, d'un ordre de valeurs entre 100 et 500MPa. Le module statique n'étant donc pas systématiquement plus petit que le module dynamique. Murphy et Green [74] [76] en 2000 excitent les vibrations quant à eux à l'aide d'un marteau à tête caoutchouteuse au centre de la grume roulée mécaniquement, des cellules de mesures sont posées aux appuis.

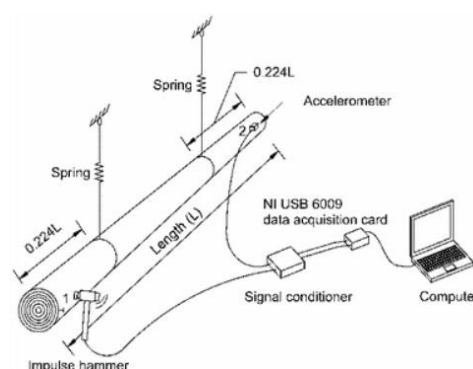


Figure 41 : Disposition expérimentale de Carreira (haut gauche) et Murphy et Green (haut droit) (flexion)

Longitudinal :

De Vries et Gard [48] quant à eux préfèrent explorer la méthode longitudinale, décrétant que les mesures de module de résonance longitudinale à l'aide d'un piézomètre sont plus efficaces que le module statique, car elles souffrent moins des changements de section sur la longueur de la pièce dus à la conicité. Ils ne décrivent pas les appuis utilisés. Ils trouvent une meilleure corrélation entre le module dynamique et le module statique en flexion 4 points lorsqu'ils considèrent la flèche totale (entre les appuis et le milieu de la travée) et non locale (entre les points de chargement et le milieu de la travée centrale).

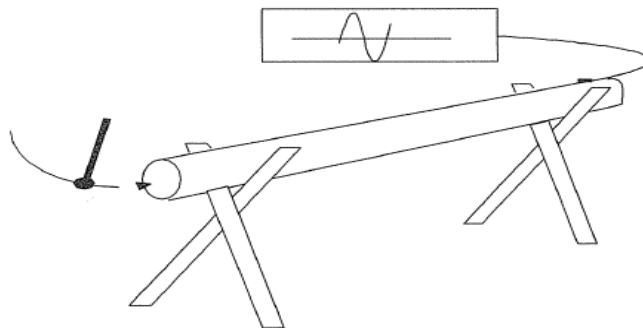


Figure 42: disposition expérimentale de de Vries et Gard

Stress wave :

Cette méthode est très souvent utilisée et comparée à la méthode IET dans le cas de la détermination des caractérisations mécaniques des grumes, mais les résultats ne sont pas aussi bons que la méthode de résonance. En effet, Wolfe et Moseley [77] ont effectué des essais statiques en flexion 3 points, avec la méthode IET flexionnelle et la méthode stress wave sur 21 grumes à l'état vert de douglas, de sapin blanc et de sapin ponderosa avec des diamètres de 102 à 330 mm et de 2,4m de long. Le module dynamique $E_{\text{StressWave}}$ était alors moins bien corrélé au module statique E_{Stat} que la méthode IET avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,4. Wang et al. [71] en 2001, effectuent également des expériences sur des grumes de pins gris et de pins rouges. Ils obtiennent également une mauvaise corrélation entre module statique E_{Stat} et module dynamique $E_{\text{StressWave}}$ ($R^2=0,53$) contre 0,86 dans le cas de la méthode IET en résonance transversale. Green et al. [74] quant à eux essaient pour des grumes de sapin de 4,9m de long et de 230mm de diamètre et arrivent également à la même conclusion, la corrélation pour le module $E_{\text{StressWave}}$ étant de 0,67 contre 0,88 pour la méthode IET flexionnelle $E_{\text{Dyn, Flex}}$. Il est à noter qu'une corrélation de 0,67 peut être considérée comme acceptable, Vega [75] utilise d'ailleurs également cette méthode afin de caractériser 216 grumes de moins de 2m de long et de diamètre de 60 à 100mm, et obtient un coefficient de corrélation de 0,67. Malheureusement, aucun des chercheurs ne mentionne une quelconque conicité ; certains utilisent soit la valeur du diamètre à mi-travée soit la valeur maximale et ce, sans justifications.

3.3.9 Valeurs obtenues dans la littérature

Beaucoup d'expériences ont déjà été réalisées auparavant sur des éprouvettes en bois de diverses tailles et comparent les méthodes de résonance longitudinale et flexionnelle, les méthodes statiques 3 points ou 4 points et la méthode ultrasonique. En Annexe 13, se trouvent des tableaux à titre

comparatif des valeurs obtenues pour différentes essences. Ces recherches nous permettront par la suite de vérifier que nos expériences conduisent aux mêmes ordres de grandeur que ceux obtenus dans la littérature. Ces tableaux permettent également de repérer, au sein d'une même espèce mais expérimentée par différents chercheurs, les tendances (ou non) qui se dégagent tels que la pente de la droite de corrélation, l'ordonnée à l'origine et le coefficient de corrélation. Enfin, ces tableaux permettent au lecteur d'avoir une idée des corrélations possibles et donc des relations liant les différents modules pour une palette d'espèces différentes.

De manière générale, dans le cas des éprouvettes de petites dimensions, les corrélations vont d'un coefficient $R^2=0,76$ à $R^2=0,95$, la pente de la droite liant module statique et dynamique peut être, suivant l'espèce, soit supérieur soit inférieur à l'unité (de 0,67 à 1,035) ; enfin l'ordonnée à l'origine de la droite peut être également positive ou négative allant de -1,9 GPa à 2,2 GPa.

Dans le cas des éléments de dimensions plus importantes (grumes et longs cylindres), la corrélation devient moins bonne (de $R^2=0,67$ à 0,92) et est meilleure dans le cas du flexionnel. Les pentes des droites de corrélations sont à nouveau supérieures ou inférieures à l'unité et le décalage en ordonnée à l'origine varie de -1GPa à 3GPa.

Ce qu'il faut retenir des conditions expérimentales de l'IET :

Éprouvettes

La différence entre $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$ provient de la fréquence de l'onde transmise : $E_{\text{Dyn, Long}} > E_{\text{Dyn, Flex}}$.

Pour un matériau isotrope et homogène, les deux modules sont identiques. Il a néanmoins été observé que le module flexionnel souffre plus des gradients de rigidité, dus à une fissure par exemple, que le module longitudinal.

Contrairement à ce que prévoit la théorie, le module E_{stat} est parfois supérieur au module E_{dyn} .

Grumes

Dans le cas des grumes on rencontre également la possibilité de $E_{\text{stat}} > E_{\text{Dyn}}$, en outre, les corrélations entre modules E_{Stat} et E_{Dyn} sont moins bonnes. Les comparaisons sont meilleures en prenant en compte le module statique global plutôt que local.

Le module $E_{\text{Dyn, Long}}$ est, selon de Vries, plus intéressant que $E_{\text{Dyn, Flex}}$ car il souffre moins de la conicité.

3.4 Endommagement

Plusieurs recherches ont déjà été menées afin de déterminer l'endommagement du bois. L'endommagement est décrit dans les articles par la présence de fissures, de défauts de croissance, de discontinuités, de pourritures, ou des effets du temps sur le bois. Dans les expériences de la littérature, soit l'endommagement est induit mécaniquement à l'aide d'une force, on cherche alors l'impact de cette action sur les propriétés du bois, soit il est supposé, dans le cas de bois inspectés plusieurs années après leur mise en œuvre ou à la suite d'un séjour dans des conditions particulières afin de détecter les dégradations biologiques (champignons, insectes) ou les dégradations physiques (séchage, fissures de contrainte, vides...) survenues au cours du temps. Les appareils utilisés afin de le déterminer sont ceux présentés dans la section 3.2.

3.4.1 Endommagement et vitesse

Utiliser le temps de parcours d'une onde et son amplitude peut permettre de détecter des anomalies dans le bois. La plupart de ces méthodes basées sur la distribution de l'onde dans le bois sont réalisées à l'aide d'ondes de fréquences entre 50 et 2000 kHz [78]. Ces méthodes « stress wave » ou ultrasonique ont montré que la dégradation du bois par des pourritures avait tendance à conduire à une diminution de la vitesse de propagation²⁵ [79].

3.4.2 Endommagement et module d'élasticité

Peu importe le type de méthode utilisée, il est prouvé qu'à partir d'un certain endommagement, le module d'élasticité chute. En effet, dans le cas de la méthode « stress wave », cela a été utilisé pour détecter l'impact d'un écorçage trop brutal sur le module de Young [78].

En 2017, une étude est réalisée dans le but de déterminer si l'IET permet d'évaluer les propriétés élastiques résiduelles des composites endommagés [17]. Des expériences en résonance longitudinale sont réalisées sur de la résine époxy et ensuite comparées à des essais de traction. L'endommagement est introduit en appliquant des forces impulsives jusqu'à ce qu'une fissure visible apparaisse. Ils concluent que l'IET permet de donner uniquement un module élastique global. Cela signifie que le module est impacté par les endommagements induits, mais que cet impact dépend de l'extension et de la sévérité du dommage. Un dommage très local ne changera donc pas significativement le module de Young. C'est d'ailleurs pour cela que l'IET donne des résultats plus répétitifs, car il n'est pas affecté par les inhomogénéités locales.

Can Altunisik [80], investigate les effets de fissures induites à la scie dans des planches CLT de 100x3x5 cm³ sur le signal fréquentiel de résonance dans le cas d'une vibration en condition d'appuis simplement encastré. Il observe qu'un dommage sévère conduit à une diminution de la fréquence jusqu'à 60% par rapport au cas intacte). De plus, le changement est différent pour les différents modes de vibration. En effet, il remarque que la fréquence propre de la résonance latérale diminue moins vite que celle en résonance transversale, mais il remarque également que les secondes harmoniques (transversale comme longitudinale) diminuent plus vite que les fréquences propres qui leurs sont associées.

3.4.3 Endommagement et amortissement

Selon le NPL, Il peut être utile de comparer les valeurs d'amortissements entre elles. Cependant, pour comparer deux amortissements entre eux, il est indispensable de le faire à des mêmes conditions d'appuis, un même taux d'humidité et à une même température. En effet, l'augmentation de l'humidité du bois induit une augmentation de l'amortissement. De plus, dans la plupart des matériaux, l'amortissement des ondes augmente de façon marquée aux conditions de température et d'humidité auxquelles les matériaux commencent à devenir plastiques ou lorsqu'une ou plusieurs des phases commencent à fondre [16].

Pellerin [81] remarque que, pour des conditions de température et d'humidité fixées, le décrétement logarithmique, caractérisant l'amortissement, est lié aux mouvements de friction interne, traduisant

²⁵ Le GrindoSonic® renvoie également la vitesse de l'onde en fonction du temps à l'endroit de la mesure. Cette vitesse est calculée comme la dérivée première de l'amplitude.

la résistance des liaisons chimiques entre les cellules. Il est donc raisonnable de suggérer que le décrétement logarithmique augmente quand les composants structuraux glissent au début d'une fracture, permettant de la sorte de prédire son arrivée.

Pellerin tente alors de voir, sur des matériaux composites en bois, dans le cadre de tests en méthode « stress wave », si le décrétement logarithmique (et donc la dissipation d'énergie) et la vitesse de l'onde dans le bois peuvent détecter la liaison du matériau composite. Il compare deux échantillons composites de type de liaisons différentes et remarque que la vitesse de l'onde ne présente qu'une faible différence. Néanmoins, l'atténuation de l'onde est bien plus importante pour les spécimens moins résistants.

Ilic [45] remarque que le décrétement logarithmique de la fréquence propre augmente avec la diminution de module de Young.

3.4.4 Facteur d'endommagement

Certains chercheurs ont tenté de mettre en place des facteurs évaluant la taille et la position de l'endommagement. Fang Han [82] utilise la méthode de l'impédance électromécanique. Un matériau piézoélectrique est utilisé pour créer des vibrations électriques harmoniques de hautes fréquences conduisant le spécimen à osciller également. La réponse électrique est alors traitée sous forme d'impédance électrique et l'indice d'endommagement est donné par la valeur RMS (root mean square) par rapport à la valeur non endommagée :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,0}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N Re(Z_{i,0})^2}} 100\% \quad (5)$$

Re étant la partie réelle de l'impédance en Oms (Ω), $Z_{i,0}$ l'impédance à l'état initial, $Z_{i,1}$ à l'état supposé endommagé et N le nombre de pics de fréquence. Au plus la valeur RMS est proche de 0, au moins de matériau est endommagé.

Ce qu'il faut retenir au sujet des expériences déjà réalisées sur l'endommagement :

L'endommagement peut être induit (par une force volontaire induisant une fracture visible) ou supposé après une certaine durée d'exposition à des agents biologiques (pourriture, insecte) ou des phénomènes mécaniques (séchage, contraintes, suspicion de fissures internes).

Si le bois est endommagé biologiquement ou mécaniquement, le module de Young diminue. Ce qui signifie une diminution de la vitesse de propagation des ondes générées dans le cadre d'une des méthodes stress wave ou ultrason ou une diminution la fréquence dans le cas de la méthode IET. Les fréquences harmoniques semblent diminuer plus rapidement que les fréquences propres face à l'endommagement.

Des dommages mécaniques locaux n'impactent pas le module dynamique car c'est un module global et non local.

Pour les méthodes dynamiques (IET, stress wave et ultrason), l'amortissement (lié aux frictions internes et aux liaisons chimiques du bois) augmente face à un endommagement mécanique.

Pour comparer des valeurs d'amortissements entre elles, il faut faire attention à être dans les mêmes conditions de température, d'humidité et d'appuis.

Si le module de Young diminue, l'amortissement augmente. Un amortissement élevé est lié à une moins bonne résistance.

L'amortissement augmente avec l'hygrométrie du bois et pour les harmoniques (plus hautes fréquences).

Partie expérimentale

Aucune des précédentes recherches n'effectue de tests sur des grumes de telles dimensions (diamètre et longueur) que les grumes qui sont expérimentées dans ce mémoire. C'est-à-dire des grumes d'un diamètre supérieur à 30cm et d'une longueur de 6,5 à 10m. De même qu'aucune ne tente d'estimer l'ampleur de l'endommagement qui pourrait survenir lors de chargements cycliques en flexion 4 points.

4 Matériels de mesure et traitement des données

Pour les différentes expériences réalisées, des appareils de mesure statique et dynamique sont utilisés. Cette section résume les conseils et protocoles des normes utilisées pour la prise de ces mesures et également la manière de post traiter les données.

4.1 Mesures statiques

4.1.1 Norme utilisée : Flexion 4 points : NBN 408-Bois de structure et lamellé-collé

Cette norme permet de déterminer le module global d'élasticité en flexion. Il y est mentionné que les échantillons équarris doivent avoir une longueur totale supérieure à 19 fois la hauteur de la section afin de pouvoir avoir une portée minimale (entre appuis extérieurs) de 18 fois la hauteur de l'éprouvette, comme le montre la figure 43 [83]. De plus, afin de minimiser les effets de Poisson dans le plan transversal, le guide NPL [16], guide national des bonnes pratiques de mesures, tant statiques que dynamiques et pour tous types de matériaux, conseille de ne pas dépasser une épaisseur de 10mm.

Mode opératoire prescrit par la norme :

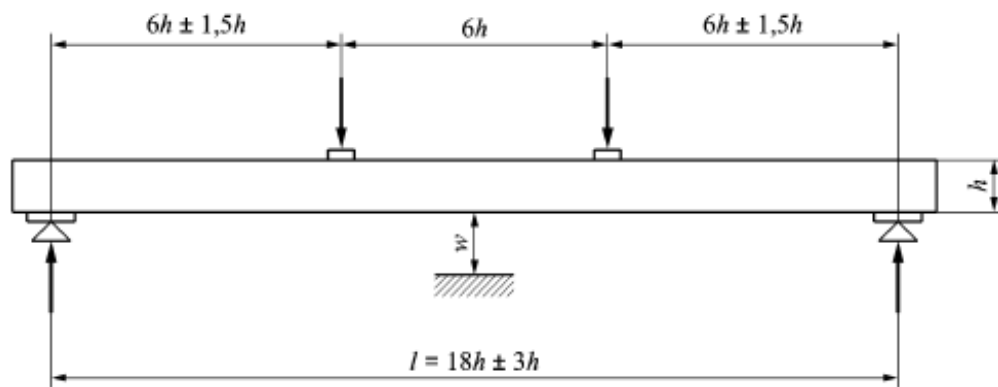


Figure 43: Schéma statique des appuis en flexion 4 points (Norme NBN408)

1. Poser l'éprouvette sur des appuis simples de manière symétrique pour une portée de $18 \cdot h$ en veillant à bien la centrer sur les appuis.
2. Minimiser le poinçonnement local, en interposant des plaques en acier (selon l'Eurocode 5 [84]) : d'une longueur inférieure à la moitié de la hauteur de l'échantillon tout en prenant soin de polir les angles de découpe. Ces plaquettes sont fixées aux appuis à rouleaux de la machine de flexion à l'aide d'un autocollant double face (et non sur l'éprouvette, ce qui altérerait ses propriétés dynamiques).
3. Charger à une vitesse constante de $0,003 \cdot h$ mm/s maximum jusqu'à un déplacement imposé ou une force imposée.
4. Mesurer la flèche au centre de la portée.

Note : Selon la norme, pour laquelle l'objectif est de caractériser des éprouvettes de bois équarris sans les endommager, la force maximale appliquée ne doit pas dépasser $0,4 F_{max,est}$ ²⁶ ou provoquer de l'endommagement conséquent.

Expression des résultats

Le module de Young s'obtient à partir de la section du graphique force-déplacement se trouvant entre $0,1 F_{max,est}$ (désignée comme F_1 dans la formule (1)) et $0,4 F_{max,est}$ (désignée comme F_2). Cette portion du graphique doit être suffisamment linéaire, c'est-à-dire que le coefficient de corrélation passant par ces points doit être supérieur à 0,99. Si cette valeur n'est pas atteinte, il est autorisé de faire varier les bornes jusqu'à $0,2 F_{max,est}$ et $0,3 F_{max,est}$. Le module de Young statique se calcule alors, en prenant en compte le cisaillement, dans le cas d'éprouvettes parallélépipèdes, à l'aide de la formule :

$$E_{stat} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (1)$$

Avec : l'accroissement de force sur la droite de régression $F_2 - F_1$, l'accroissement de flèche correspondant $w_2 - w_1$, la portée L , la distance entre le point de chargement et l'appui a et le module de cisaillement G . Enfin, les dimensions de l'éprouvette : b la plus grande dimension de la section et h la plus petite.

L'impact du cisaillement, traduit par le module G , dans le cas d'éléments élancés comme utilisés dans le cadre de ce mémoire, est faible. Sa valeur peut être prise, selon la norme, à 650 N/mm^2 .

Dans le cas d'éprouvettes cylindriques, coniques ou des grumes, la formule est :

$$E_{stat} = \frac{8(3aL^2 - 4a^3)}{3\pi d^4 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{40a}{9\pi d^2 G} \right)} \quad (6)$$

Avec d le diamètre dans le cas du cylindre et le diamètre à mi-travée dans le cas de la grume et du cône.

Le code utilisé pour post-traiter les résultats est accessible auprès de l'auteur.

4.1.2 Chargement cyclique

Certains détails dans le cas de chargements cycles ne sont pas mentionnés dans la norme, ces détails ont été discutés dans le mémoire parent à ce mémoire-ci, réalisé en 2020 à l'EPL par Christopher MOENS et Jens NICLAES [85] sur des éprouvettes d'épicéa d'origine inconnue de dimensions $300 \times 16,5 \times 16,5 \text{ mm}^3$ et de $200 \times 11 \times 11 \text{ mm}^3$.

Il fut déterminé que le nombre de cycles influe peu sur l'endommagement²⁷ du bois et que, à vitesses de chargement et déchargement identiques ($v=0,003 \text{ h}$), le déplacement résiduel est minimisé. De plus, un temps d'attente de 5 min entre deux essais permet au bois de reprendre ses conditions initiales.

²⁶ Cette valeur de $F_{max,est}$ doit être évaluée sur base de la mise en rupture de 10 éprouvettes ou sur base de valeurs disponibles dans la littérature.

²⁷ Défini dans ce cas comme une diminution de la rigidité et une flèche résiduelle.

Enfin, il est déterminé qu'il est préférable de maintenir une force minimale $F_{\min}=10\text{N}$ entre chaque cycle afin d'empêcher, entre 2 cycles, les soulèvements au niveau des appuis et des points d'application de la force.

Selon le guide NPL [16], il est conseillé d'ignorer le 1^{er} cycle, qui est le cycle de placement²⁸, lors du calcul du module E_{stat} , et ce, peu importe la force ou le déplacement imposé dans le domaine élastique.

4.1.3 Rigidification du module statique

Dans le cadre de ce mémoire, il a été observé que le module statique a tendance à augmenter lors des premiers incréments de déplacements imposés contrairement au module dynamique qui reste quasi constant. Une étude a été menée afin de déterminer les conditions à utiliser pour les expériences afin de minimiser cet effet sur le module statique. Les détails de cette étude se trouvent à l'Annexe 14.

Les décisions finales sont d'utiliser 10% F_{rupt} et le minimum entre 95% F_{max} et 40% F_{rupt} comme bornes inférieures et supérieures de la courbe force déplacement utilisée pour le calcul du module statique, F_{max} étant la force maximale subie au cours du chargement. Ces conditions sont très proches de celles proposées par la norme mais sont adaptées aux faibles déplacements. Il a également été décidé d'utiliser uniquement la deuxième courbe de chargement, ignorant le 1^{er} cycle de chargement qui subit du placement, et de la plastification. De plus, il a été prouvé que le module de cisaillement n'a pas une importance significative sur l'augmentation du module E_{stat} de l'éprouvette au cours des étapes. Pour finir, la corrélation minimale de 0,99 proposée par la norme n'est pas suffisante et les expériences futures seront réalisées avec une corrélation minimale de $R^2=0,999$.

Néanmoins, la rigidification de module statique a également une cause physique ; en effet, lors d'un chargement, les fibres du bois s'orientent dans le sens de la contrainte afin de mieux résister, les fibres étant plus résistantes dans leur sens axial. Elles n'ont ensuite aucun intérêt à reprendre leur position initiale une fois le déchargement opéré, le module se voit donc augmenté. L'alignement des fibres sous contrainte peut se visualiser de la même manière que tirer sur une corde au repos la tend de manière à aligner son axe à l'orientation de la force appliquée. Le fait que ce phénomène n'est pas également visible dans le cas du module dynamique peut être dû au fait que l'onde de vibration ne souffre pas du réarrangement local des fibres dans la zone de plus grande contrainte (générée par la flexion 4 points à mi-travée), elle garde donc la même fréquence.

4.1.4 Appareil Zwick®

Le matériel *Zwick Roell*®, disponible au laboratoire LEMSC, permet un contrôle en force et en déplacement à l'aide d'un extensomètre à boules. Les mesures de force, de déplacement relatif (mesuré par l'extensomètre) et de déplacement total (du vérin montant sur une vis sans fin) sont enregistrées avec une fréquence d'acquisition de 10Hz.

²⁸ Un affaissement des rouleaux des appuis est inévitable, le placement se produit toujours lors de la mise en contact, à faible force.



Figure 44 Photo de La machine Zwick® et de l'extensomètre à boule sa plaquette anti-glissement.

La figure 44 illustre le dispositif Zwick®. Il est indispensable de disposer une plaquette anti-glissement comme présenté à droite pour garantir une bonne mesure en travée centrale de l'extensomètre.

4.1.5 Banc de flexion 4 points du LEMSC

Le laboratoire LEMSC possède un dispositif mis en place afin d'effectuer des tests en flexion 4 points sur des éléments massifs pouvant atteindre 10 m de long. Le dispositif est composé de :

- 1 vérin d'une capacité de 35 tonnes.
- 1 poutre de répartition montée d'une rotule afin de répartir correctement les charges sur des éléments coniques et irréguliers.
- 4 appuis en acier en V, rotulés afin de limiter les glissements de la pièce testée.
- 4 LVDT (capteurs de déplacement) aux appuis pour mesurer le tassement.
- 2 potentiomètres (capteurs de déplacement) à une distance de $L/3$ et $2L/3$ pour mesurer la flèche locale.
- 1 laser (capteurs de déplacement) à une distance de $L/2$ pour mesurer la flèche globale.
- 1 capteur de force (la cellule de force du vérin).

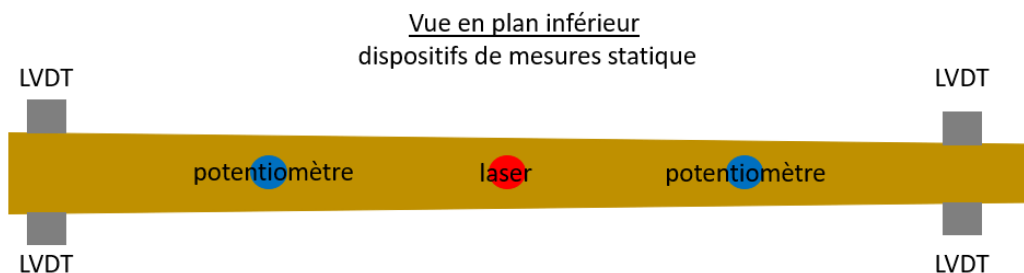


Figure 45: Position des capteurs sur la grume (Illustration personnelle)

Les détails supplémentaires concernant les tolérances, capacités, mise en œuvre, appareils de mesure, etc. sont décrits dans le mémoire réalisé en parallèle par Maxime Dehaen et Pierre-Louis Ponthière [86] au sujet de la flexion statique et le fluage des grumes.

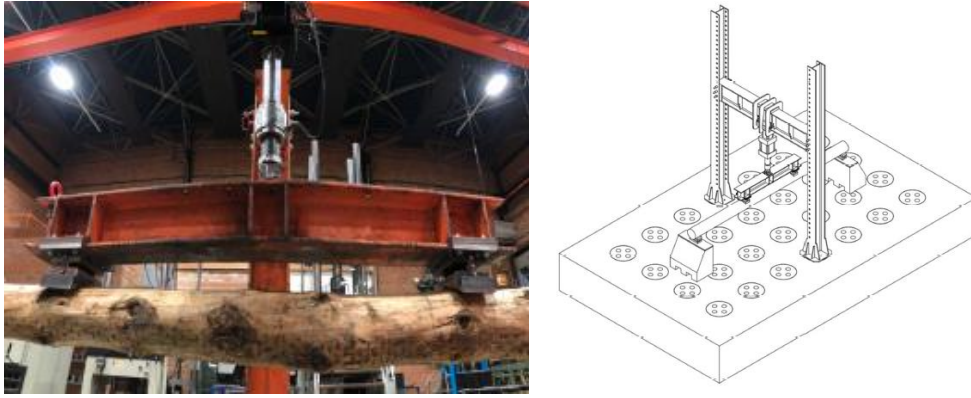


Figure 46 : Dispositif de flexion 4 points sur grume (Montage et image : Christopher Moens et Jens Niclaes, 2021)

4.2 Mesures dynamiques (IET)

4.2.1 Norme utilisée : ASTM 1876_01

Cette norme décrit comment mettre en pratique la méthode d'excitation par impulsion (IET)²⁹. Cette méthode est surtout appropriée pour les matériaux élastiques, homogènes et isotropiques. Son application à des matériaux composites, inhomogènes et anisotropes (comme le bois) est à effectuer avec prudence. En effet, tous ces caractères d'inhomogénéités (la fraction volumique, la taille, la morphologie, la distribution, l'orientation, les propriétés élastiques et les liaisons interfaciales dans le cas des composites) vont agir comme un tout et avoir un impact global sur le module de Young.

Pour pouvoir osciller, un élément doit avoir un élanement minimal $\frac{L}{h}$ de 5. Néanmoins, afin de ne pas devoir tenir compte des effets de cisaillement, de rotation inertielle et de bord, il est conseillé d'augmenter cet élanement entre 20 et 25. Seuls le cylindre, la barre, le tube, le disque et la roue sont examinables à des fins de détermination du module de Young sur base de la norme. Pour des objets plus complexes, cette méthode est utile dans le cadre de contrôles qualité en entreprise c'est-à-dire en permettant de cibler un élément défectueux sur base d'un résultat différent des autres éléments de la chaîne de production ou bien encore afin de déterminer les effets de la température, des conditions et de l'environnement en comparant les mesures d'un même objet à deux moments différents [16] [35].

Mode opératoire prescrit par la norme

1. Vérifier que les dimensions de la pièce font en sorte que la fréquence fondamentale se retrouve dans le domaine de capacité de l'appareil de mesure, en estimant la fréquence à obtenir sur base du module de Young le plus plausible (pour le bois : entre 7 et 15 GPa).
2. Positionner les appuis aux zones nodales de manière à permettre au spécimen d'osciller librement, c'est-à-dire en « free-free ». Dans le cas d'une excitation flexionnelle, ce sera 22,4% et 77,6% de la longueur. Dans le cas d'une excitation longitudinale, la norme propose de mettre un appui unique au centre, obligeant à trouver la position d'équilibre.
3. Prendre la mesure de manière à permettre au spécimen d'osciller en « free-free ». En effet, une mesure de contact pourrait, du fait de son poids, avoir un impact sur la masse dynamique et donc sur la fréquence de vibration et son amortissement. Il faut de ce fait réaliser la mesure

²⁹ Cette norme est une norme américaine, à défaut d'une norme belge ou européenne.

au plus proche des nœuds de la vibration. Pour les mesures sans contact, mieux vaut prendre la mesure au plus proche d'un anti-nœud.

4. Effectuer un coup élastique singulier (frappe douce) à l'aide d'un appareil capable de donner une impulsion.
5. Répéter l'opération et prendre la moyenne de 5 mesures consécutives qui ont au maximum 1% de différence.

Note : Les modes excités dépendent du support, de la position de l'impact et de la prise de signal.

4.2.2 Appareil : Le GrindoSonic®

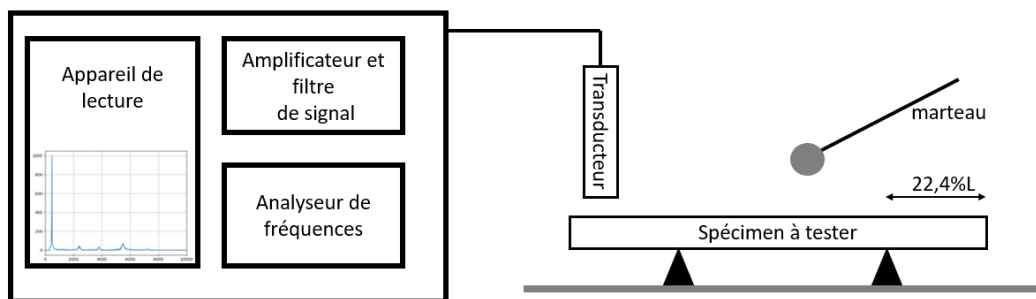


Figure 47 : Schéma du principe de l'appareillage de test (Illustration personnelle)

Dispositif inducteur d'impulsion (marteau) : La plupart de sa masse doit être concentrée au point d'impact, et doit être suffisante que pour induire des vibrations mécaniques mesurables. Mais cette masse ne doit pas non plus être trop importante, risquant alors de déplacer ou d'endommager le spécimen. La norme propose une boule au bout d'une tige flexible, une balle roulant dans un cylindre jusqu'à la position décidée de l'impulsion ou bien encore un pulser. Plus d'informations sur les dispositifs de frappe et la manière de les choisir sont disponibles en Annexe 15.

Transducteur : Celui-ci sert à enregistrer les vibrations mécaniques et les transforme en un signal électrique. Il peut être de contact (accéléromètre utilisant un piézoélectrique ou une jauge de déformation) ou pas (micro, laser, aimant, capacités) avec le spécimen. Chaque transducteur est caractérisé par le domaine de fréquences qu'il perçoit. Dans le cas de l'utilisation d'un micro, au plus l'intensité du son émise par la fréquence est basse, au plus il faut approcher le micro du spécimen. Plus d'informations sur les transducteurs et la manière de les choisir sont disponibles en Annexe 15.

Système électronique : Il est constitué d'un amplificateur de signal, d'un analyseur de signal et d'un calculateur de fréquence.

Système de support : Il sert à isoler le spécimen des vibrations étrangères sans restreindre sa vibration libre. Le matériel doit être stable mais peut être soit mou à surface de contact plane (mousse polyuréthane), soit rigide à surface aiguë ou arrondie. Il est aussi possible d'utiliser des câbles de suspension.

L'appareil utilisé dans le cadre de ce mémoire est le **GrindoSonic®**. Dans ce cas, le signal mécanique est capté par un cristal piézoélectrique ou un micro et transformé en courant. Le **GrindoSonic®** mesure

ensuite la durée des périodes à l'aide d'une horloge à Quartz (dont le cristal de référence oscille à 2Hz) [34]. La gamme de fréquences qu'il peut détecter est de 20Hz à 150kHz [14].

Contenu :

Dans le matériel obtenu avec l'acquisition du *GrindoSonic*[®] et illustré figure 48, sont fournis : un transducteur de type micro et un de type piézomètre, des appuis en plastique pour une configuration flexionnelle et en torsion, une boîte contenant divers marteaux (de tailles et matériaux différents) et enfin un échantillon de céramique qui, accompagné d'une fiche présentant ses valeurs de fréquences et d'amortissements, sert à vérifier le calibrage de la machine.



Figure 48: Matériel *GrindoSonic*[®]

L'utilisation de l'appareil est très bien documentée dans le manuel d'emploi, et l'Annexe 16 explique, en quelques mots, comment le prendre rapidement en main, mais aussi les problèmes rencontrés lors de son utilisation.

Paramètres internes

Plusieurs paramètres internes au *GrindoSonic*[®] peuvent être déterminés. Un bon choix des paramètres permet d'atteindre plus facilement une FFT propre, c'est-à-dire exempte de confusions permettant de reconnaître la fréquence propre. Les principaux paramètres sont :

- Le *Trigger Level* qui permet de choisir le pourcentage du début de signal temporel ignoré pour le calcul de la FFT. En effet, cela permet d'isoler les perturbations dues à l'excitation initiale et de laisser le temps aux harmoniques de s'atténuer.
- Le *Digital filter* qui permet de canaliser la prise de mesure entre deux valeurs afin de cibler la fréquence propre dans la fourchette de valeurs où elle est supposée se trouver. Cela permet d'obtenir une meilleure précision de la mesure de fréquence et d'amortissement.
- Le *Number of samples et sample frequency* qui permettent de déterminer le nombre d'échantillons pris et à quelle fréquence. Cela permettra d'avoir une meilleure résolution de la FFT en post-traitement mais au détriment de l'enregistrement des fréquences de plus grande amplitude (voir Annexe 12 ou section 2.6).
- Le *FFT peak sequence* : Les 4 valeurs ressorties par le *GrindoSonic*[®] à chaque coup (ou mesure) sont soit triées par ordre d'amplitude soit par ordre de fréquence. Ce choix détermine la fréquence propre à partir de laquelle la valeur du module de Young est calculée par le *GrindoSonic*[®]. Ce critère n'est pas indispensable, car le calcul du module de Young se fait également en post-traitement de manière aisée avec les formules de la norme. Cela permet cependant de se rendre compte de la bonne pratique au moment de l'essai.

En Annexe 17, se trouve un tableau reprenant les définitions, conseils du manuel et observations expérimentales obtenues pour chaque paramètre. Une valeur ou gamme de valeurs est proposée pour chaque catégorie d'éléments testés (en différenciant petits éprouvettes ou grumes).

Calculs effectués par le GrindoSonic®

Le GrindoSonic® permet de calculer non seulement la fréquence, et le module qui y est lié, mais également l'amortissement de l'onde qui se propage dans le bois. Les calculs réalisés dans la boîte noire du GrindoSonic® sont connus :

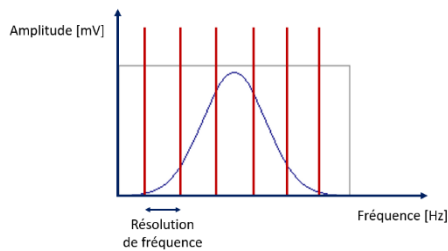


Figure 49: Condition de calcul de l'amortissement (Illustration personnelle)

L'**amortissement**, est calculé sur base de 6 points de valeurs de fréquences (au minimum) au sein d'un pic de la FFT, c'est pourquoi la **fréquence de résolution** (*Number of samples et sample frequency*) a une importance pour la précision de la valeur de l'amortissement et doit dès lors être la plus faible possible³⁰ [27].

La **fréquence**, quant à elle, a une précision remarquable, jusqu'à 4 chiffres après la virgule, indépendamment de la **fréquence de résolution**. Les valeurs sont en effet obtenues à l'aide d'un logiciel interne à l'entreprise GrindoSonic® qui réalise une « curve fitting center of gravity calculation ». Le module de Young est ensuite calculé à l'aide des formules de la norme.

4.2.3 Cas des grumes : le mouton

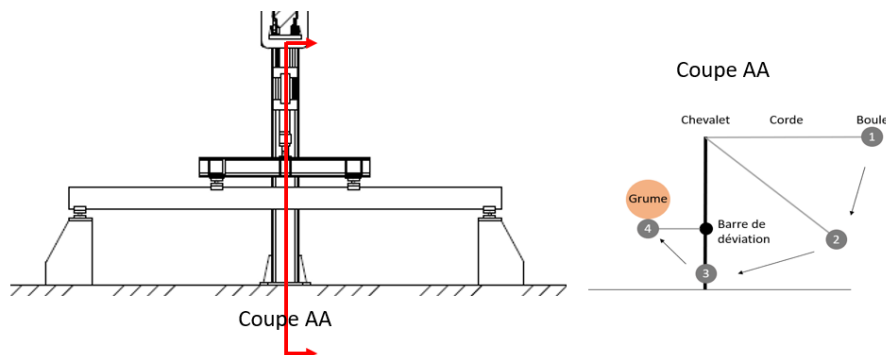


Figure 50: Représentation schématique de l'utilisation du mouton en sollicitation flexionnelle (inspiré de Moens & Jens, 2020)

La frappe est « normalisée » par grume³¹ afin de limiter les incertitudes et de pouvoir comparer les résultats au cours du protocole. Pour cela, un mouton illustré figure 50 a été réalisé à l'aide de :

- Une boule de pétanque attachée à une ficelle.
- Une bande en caoutchouc de 1x5x25 cm³ afin de limiter le possible poinçonnement de la grume induit par la boule de pétanque au moment de la frappe³².

³⁰ Le vendeur GrindoSonic® nous a néanmoins dit que 12,21Hz était suffisant

³¹ En effet toutes les grumes ne nécessitent pas la même énergie pour être excitée et permettre la lecture d'un signal avec le GrindoSonic®.

³² Ceci est une considération plus esthétique que mécanique.

Toutes les grumes n'ont pas été expérimentées avec la bande en caoutchouc, cela dépendait, au moment de l'expérience, de la faisabilité de la pose du caoutchouc. En effet, dans certains cas, avec une hauteur de frappe maximale, induisant une énergie potentielle maximale, il n'était pas possible d'exciter la grume avec suffisamment d'énergie que pour la mettre en vibration libre en utilisant le caoutchouc. Tous les coups pour une même grume ont cependant été réalisés de la même manière.

Pour une même grume, la hauteur d'envoi de la boule est toujours la même. Cette hauteur détermine l'énergie potentielle et donc la force de la frappe. Le mouton permet également de normaliser la frappe en emplacement et en orientation.

4.3 Précisions et tolérances des appareils de mesure

La prise de mesure d'une quantité est toujours impactée d'imprécisions, ces imprécisions se multiplient dans la formule finale (du module de Young dans notre cas). Les imprécisions de mesure sont dues à l'appareil de mesure ou à la géométrie de l'élément, c'est-à-dire le non-parallélisme des faces, ou dans le cas des grumes, à l'état de surface, des nœuds... qui perturberaient la prise de mesure.

L'objectif est alors de déterminer l'importance des tolérances de mesure dans le cas du module dynamique. Pour cela, les équations du cylindre et du parallélépipède rectangle sont utilisées et les facteurs géométriques K et T décrits par la norme sont négligés (dans les sections 2.2.1 et 2.3.1). Ces paramètres sont de toute façon négligeables pour les éléments élancés ($\frac{L}{t} > 20$).

Les erreurs de la prise de mesure statique sont différentes de celles de la méthode dynamique. En effet, les mesures communes sont la longueur et la section et les mesures supplémentaires nécessaires pour le calcul du module dynamique sont la masse et la fréquence. En ce qui concerne le module statique ce sont la charge et la flèche [34].

Les différentes incertitudes liées aux appareils de mesure sont :

-Masse : Dans le cas des petites éprouvettes, la balance à une précision de 0,01g. Concernant les grumes, l'appareil de levage du LEMSC a une précision de 500g.

-Longueur : La longueur des éprouvettes est mesurée avec un mètre industriel dont la précision est de l'ordre du millimètre. Concernant la grume, l'appareil utilisé est le même, mais la précision de la prise de mesure est de l'ordre de 10 mm. En effet, sur un élément d'une telle longueur, avec des extrémités peu nettes et en fonction de la position sur la section, il est dérisoire de tenter de prendre une mesure à la précision du millimètre.

-Dimensions de section : Pour les éprouvettes, un pied à coulisse numérique pour lequel la précision est de 0,01 mm est utilisé. Pour les grumes, le diamètre est obtenu à partir du périmètre l'aide d'un ruban métré avec une précision de l'ordre du centimètre. Cependant, le facteur prépondérant dans le cas des dimensions transversales n'est pas la précision de la mesure, mais la géométrie de l'élément. En effet, les éprouvettes n'ont pas, après sciage et séchage non contrôlé, des faces parallèles, ce qui peut être de l'ordre du millimètre. Dans le cas des grumes, la conicité peut être considérée comme une imprécision qui implique que les mesures prises aux extrémités peuvent représenter jusqu'à 2,5 cm de différence par rapport aux mesures prises au centre géométrique de la grume. En outre, il peut exister une courbure additionnelle naturelle chez les grumes, due aux conditions de croissances.

-Fréquence : Les appareils commercialisés disposant, comme dispositif interne, d'un oscillateur électronique asservi par un résonateur en cristal de quartz (comme le GrindoSonic®), possèdent une précision de l'ordre du 0,1 Hz. C'est donc plutôt la précision expérimentale qui est la valeur limitante. Elle est définie par la répétition de fréquences de plusieurs mesures d'affilée et est liée au caractère du bois et aux dimensions des échantillons. Suivant les expériences, l'imprécision représente 1 ou 2 Hz [27].

Tableau 1: Tableau récapitulatif des imprécisions de mesure induites par les appareils de mesure, par la technique de prise de mesure, la géométrie imparfaite et par les conditions de séchage.

Paramètres	Cas des éléments de petite taille	Cas des grumes
Masse (m)	0,01 g	500g
Longueur (L)	1mm	10mm
Section (b et t ou d)	0,25mm	25mm
Fréquence (f)	2Hz	2Hz

Le NPL [16] propose d'estimer les incertitudes combinées à l'aide de simples dérivées partielles. Tout d'abord, le pourcentage d'incertitude est mesuré par rapport à la quantité mesurée, ensuite une loi de distribution (une distribution normale pour la force et la fréquence et une loi rectangulaire ou loi uniforme pour les mesures de dimensions) est associée à cette incertitude, et enfin, l'impact de cette incertitude est déterminé à partir des dérivées partielles de chaque valeur physique. Ces étapes sont détaillées dans l'Annexe 11.

Le tableau 2 présente les incertitudes calculées dans le cas des grumes et des éprouvettes de dimensions 10x30x300mm³ :

Tableau 2: Tableau récapitulatif des incertitudes combinées avec un taux de confiance de 95%.

Incertitude combinée avec un taux de confiance de 95%			
Direction d'excitation	Élément	Forme parfaite	Faces non parallèles (conicité et séchage)
Longitudinal	Petits éléments (cas de l'éprouvette)	0,4%	3,4%
	Cas des grumes	2,6%	10,3%
Flexionnel	Petits éléments (cas de l'éprouvette)	1,9%	8,9%
	Cas des grumes	5,4%	20,6%

Pour interpréter ces résultats, il est indispensable de garder en tête que ce pourcentage d'incertitude est le pire cas, c'est-à-dire la combinaison négative de toutes les incertitudes possibles. De plus, dans le cas des grumes, la conicité est prise en compte comme une incertitude de mesure, en considérant la grume comme un cylindre approché de même diamètre à mi-travée. Cette hypothèse est l'hypothèse la plus simple pour prendre en compte la conicité de la grume, la moyenne géométrique des sections extrêmes est une meilleure approximation, comme discuté section 2.2.3.

Le pourcentage d'incertitude signifie que pour une valeur de module de Young de 210 GPa obtenue à l'aide des valeurs mesurées et des formules de la norme, la réelle valeur se trouve dans la fourchette $210 \text{ GPa} \pm x\% 210 \text{ GPa}$. Néanmoins, le degré de confiance de 95% (2σ) est une valeur arbitraire décidée par le NPL [16] dans le cas d'échantillons de très petites dimensions. Dans notre cas plutôt expérimental, un degré de confiance de 68,4% (1σ) est suffisant et permet de diviser tous les pourcentages d'incertitude par 2.

De manière générale, le module de Young est moins entaché des incertitudes dans le cas du module dynamique mesuré en excitation longitudinale qu'en flexionnel. Les mesures qui entachent le plus la valeur du module d'élasticité sont : l'épaisseur dans le cas des éprouvettes, et le diamètre dans le cas des grumes. Ces mesures sont donc à prendre avec une attention particulière. Le séchage des grumes n'a en outre pas une importance considérable, étant donné que la masse intervient à moins de 1% dans le budget d'incertitudes. Peser à nouveau la grume chaque jour n'est alors pas indispensable.

Une manière de diminuer les sources d'incertitudes est d'utiliser la densité, la précision dépendant de la sorte d'une valeur unique liée à l'appareil de mesure de cette densité et non de la multiplication des incertitudes sur la masse et les dimensions transversales. Cela se réalise souvent par immersion, ce qui semble inenvisageable pour les grumes, mais acceptable pour les éprouvettes.

Ce qu'il faut retenir du matériel utilisé et du post-traitement des données :

Statique :

Les conditions de tests étant différentes de ce que propose la norme, des décisions sont prises. Face au nombre de cycles réalisés, le choix se porte sur le 2^{ème} cycle afin de calculer le module de Young. Face aux petits déplacements rencontrés, les bornes sont modifiées et deviennent $10\% F_{rupt}$ et $\min(95\% F_{max}; 40\% F_{rupt})$.

Le module E_{Stat} présente une rigidification au cours des incréments de chargement qui n'est pas uniquement due à la manière de calculer le module de Young, mais également à un réarrangement des fibres lors du chargement.

Dynamique :

L'utilisation d'un mouton permet de normaliser les frappes par grume durant les expériences.

Les paramètres les plus importants du GrindoSonic® sont le *trigger level*, le *Number of Samples* et le *digital filter*. Tous les paramètres à déterminer lors de l'utilisation du GrindoSonic® (définition principe physique et valeurs conseillées) sont disponibles en Annexe 17 ainsi que des conseils pratiques d'utilisation en Annexe 16.

Un budget d'incertitude lié aux appareils de mesures a été réalisé ; c'est le mode longitudinal qui souffre le moins des imprécisions de mesures. La masse n'est pas le paramètre le plus pénalisant (il n'est donc pas nécessaire de peser les grumes tous les jours). Ce sont les dimensions transversales qui sont les plus importantes, c'est-à-dire le diamètre et la hauteur des pièces, ces mesures sont donc à prendre avec le plus de précision possible.

5 Critères de choix de la fréquence propre

Lors de tests sur un élément, plusieurs pics de fréquences différentes peuvent être présents, comme observé sur la figure 51. La question du choix de fréquence propre (permettant de déterminer le module de Young) se pose alors.

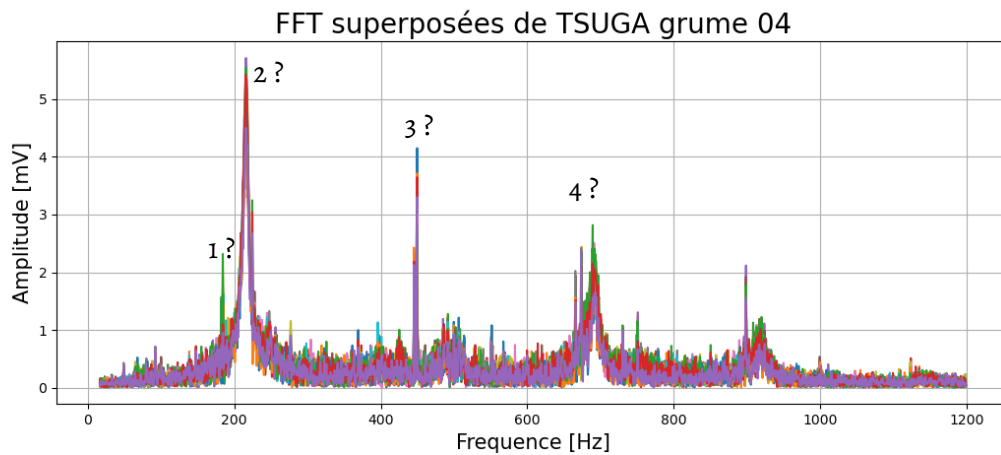


Figure 51: Multiples pics de l'a FFT de tsuga

Différents critères de choix sont comparés. L'objectif final étant de pouvoir utiliser ces critères par la suite lors de l'analyse fréquentielle des grumes. Les différents critères sont :

- L'amplitude de fréquence maximale
- L'amortissement minimal
- L'amortissement maximal
- La fréquence la plus basse

Les critères liés à la fréquence étant des critères utilisés par le GrindoSonic® (à paramétrer lors de l'utilisation) et l'amortissement étant un critère ayant été repéré lors de test préliminaire.

5.1 Protocole

Afin de répondre à cette question, des tests sont effectués sur une barre en acier de module de Young statique connu (± 210 GPa) et sur un élément conique en chêne. Ces critères sont ensuite appliqués à une grume de tsuga.

Tableau 3: Tableau des dimensions et masses des spécimens testés

	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)
Barre en acier	400	21,94	1537
Cône en chêne	729	32	420,4
Grume de tsuga	8500	375	549000



Figure 52: Spécimens testés (cône en bois et barre métallique)

Les mesures sont prises, dans le cas de la barre en acier et de l'élément en bois sur les appuis disponibles, avec le GrindoSonic® et positionnés aux nœuds de la vibration³³ (pour la résonance flexionnelle) ou à l'aide d'un mousse (pour la résonance longitudinale). Les frappes sont réalisées à l'aide du marteau en plastique également disponible avec le GrindoSonic®.

40 mesures sont prises pour chaque spécimen en longitudinal et en flexionnel sauf pour la grume de tsuga où elles sont prises uniquement en longitudinal.

5.2 Résultats

Résonance flexionnelle

Sur l'élément en bois, c'est la fréquence la plus faible qui correspond à la fréquence propre, le critère « amplitude maximale » n'est pas à chaque fois liée à la fréquence propre. De plus, les fréquences les plus basses ont toujours le plus petit amortissement.

Dans le cas de la barre métallique, la fréquence la plus faible et d'amortissement minimal ciblent d'autres fréquences que la fréquence propre. Les deux critères sont à combiner. L'amplitude maximale quant à elle ne cible jamais la fréquence propre.

Le cas du bois et du métal sont donc légèrement différents, ne permettant pas d'énoncer une règle générale.

Résonance longitudinale

Sur l'éprouvette en chêne, l'amortissement minimal ne cible plus uniquement la fréquence propre, il en va de même pour la fréquence minimale. C'est la fréquence d'amplitude maximale qui correspond à chaque fois à la fréquence propre.

Pour la barre métallique, ni l'amortissement minimal, ni maximal, ni la fréquence minimale, ne permettent de cibler la fréquence propre. Seule, l'amplitude maximale le permet.

Dans le cas de la grume, on remarque que la fréquence d'amplitude maximale mène à une unique fréquence pour chaque coup expérimental réalisé. Cette fréquence conduit à un module de Young dynamique de 8,28 GPa, ce qui est très probable pour une grume³⁴. Il existe parfois des fréquences plus faibles que la fréquence propre.

Remarques

Comme énoncé dans la littérature, dans le cas d'un élément homogène et isotrope (barre métallique), le module longitudinal est bien le même que le module transversal, ceci est vérifié sur la barre métallique. De plus, de manière générale, au plus l'amortissement est élevé et au moins il est répétable.

³³ Pour rappel, à 22,4% et 77,6% de la longueur du spécimen

³⁴ La valeur obtenue en protocole statique lors du 1^{er} chargement ELS étant de 8,3GPa

Conclusion

Le choix d'un unique critère n'est pas unanime pour les différents spécimens, certains critères ne ciblent en effet pas uniquement la fréquence propre. Il vaut donc mieux combiner les critères afin de s'assurer du bon choix de la fréquence propre.

Dans le cas de la résonance longitudinale, la fréquence d'amplitude maximale prime et peut être choisie dans les paramètres du GrindoSonic® pour l'affichage des 4 fréquences préférentielles, ensuite la fréquence ayant le plus faible amortissement est également un bon critère.

Dans le cas de la résonance flexionnelle, c'est la fréquence minimale qui prime et qui peut être paramétrisée dans le GrindoSonic®, suivit de l'amplitude maximale et de l'amortissement minimal.

6 Étude du module d'élasticité et de l'impact d'un endommagement mécanique sur éprouvettes de petites dimensions

L'objectif de ce chapitre est, en prévision des recherches sur grumes, de mieux connaître et comprendre le comportement du bois vis-à-vis de l'endommagement mécanique, et de vérifier la mise en pratique et la validité de la méthode IET sur des éprouvettes en bois de 4 essences différentes et de dimensions 10x30x300mm³ (chaque essence étant traitée séparément).

Les mesures sont réalisées par la méthode dynamique (longitudinale et flexionnelle à l'aide du GrindoSonic®) en alternance avec une méthode statique (en flexion 4 points cyclique). Des incréments de déformations sont opérés graduellement dans le but d'induire un endommagement certain, c'est-à-dire en dépassant la contrainte d'élasticité du bois³⁵. Et ce afin de :

- Déterminer le lien entre module statique et dynamique puis de le comparer à la littérature.
- Détecter une variation des propriétés dynamiques en fonction de l'augmentation de l'endommagement mécanique.

Tableau 4: Tableau reprenant les informations des essences testées

Essence	Nom scientifique	Nombre d'échantillons	Humidité moyenne [%]	Écart-type d'humidité	Module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ moyen [GPa]	Module $E_{\text{Dyn, Long}}$ moyen [GPa]
Chêne	quercus rbur	10	14,28	0,69	10,76	11
Sapin	? ³⁶	13	7	0,45	11,03	11,68
Hêtre	fagus sylvatica	6	8,9	0,73	11,04	11,44
Épicéa ³⁷	picea abies	6	11,6	3,5	12,35	12,83

³⁵ Observation claire d'une plastification sur la courbe force-déplacement enregistrée.

³⁶ Essence précise inconnue.

³⁷ Provient d'une des grumes débitées après rupture en test de flexion 4 points statique voir chapitre

Les pièces ont été découpées en laboratoire avec une précision de l'ordre du millimètre. Les éprouvettes de hêtre et de sapin ont été stockées dans le laboratoire (milieu chauffé et aéré), celles de chêne sous vide afin de limiter le retrait et celles d'épicéa dans une cave afin de ralentir le séchage. Un tableau reprenant les dimensions, masses et valeurs de E_{stat} , $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$ pour chaque éprouvette est disponible en Annexe 18.

6.1 Étude préliminaire : conditions de test dynamique sur éprouvettes

Avant de commencer les essais, il est nécessaire, d'une part, de déterminer la réelle importance de la position des appuis, la norme conseillant de respecter scrupuleusement la position des appuis à 22,4% et 77,6% de la longueur totale. D'autre part, plusieurs marteaux sont disponibles dans le matériel GrindoSonic®, il s'agit de choisir celui qui fournit le signal fréquentiel le plus répétable et pour lequel aucun doute ne survient quant au discernement des fréquences enregistrées.

6.1.1 Essais flexionnels

L'excitation en flexionnel présente des pics de fréquences très précis comme représenté sur la figure 53, excluant toute mauvaise interprétation d'analyse fréquentielle. Les harmoniques sont présentes mais leur intensité est très faible. Cependant, comme conseillé par le vendeur GrindoSonic®, il vaut mieux mettre un filtre pour cibler la fréquence propre : rendant les valeurs de mesures de fréquences et d'amortissements plus précises.

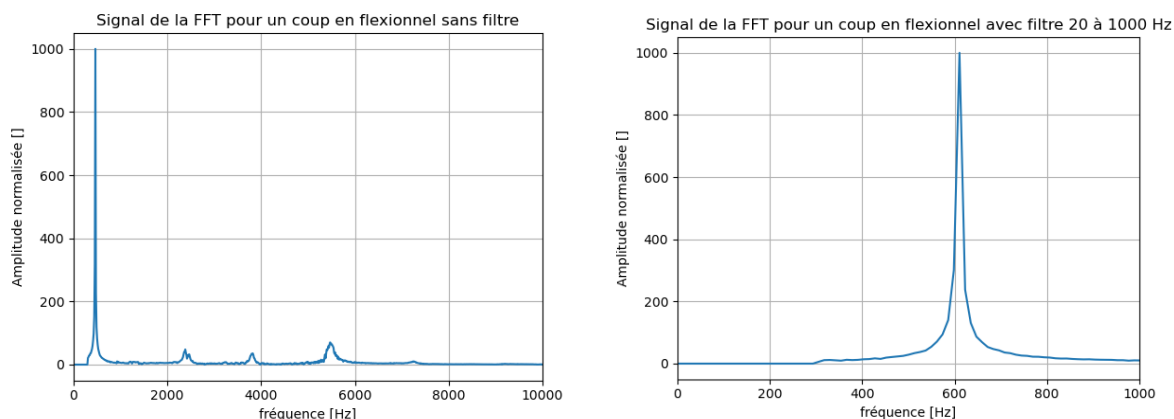


Figure 53: FFT calculée par le GrindoSonic® avec et sans filtre

Concernant le matériau de frappe, 6 configurations différentes sont testées pour un total de 180 mesures : (1) Micro+ marteau en bois, (2) Micro+ marteau en bois avec une frappe énergétique, (3) Micro+ marteau en bois en retournant l'éprouvette (autre sens de flexion des fibres), (4) Piézomètre+ marteau en bois, (5) Micro+ marteau en caoutchouc, (6) Micro+ marteau en plastique.

La figure 53 montre que, pour les différentes configurations testées, la mesure de fréquence obtenue est constante à 1 Hz près, ce qui correspond à la précision de mesure retenue dans le chapitre 4.3 relatif à la précision des mesures. Quant à l'amortissement, il est moins constant entre les différentes configurations. De plus, il est moins répétable dans le cas du marteau en caoutchouc et de la frappe

intense car cela induit un saut de l'éprouvette sur ses appuis conduisant à un amortissement mécanique dit de glissement.

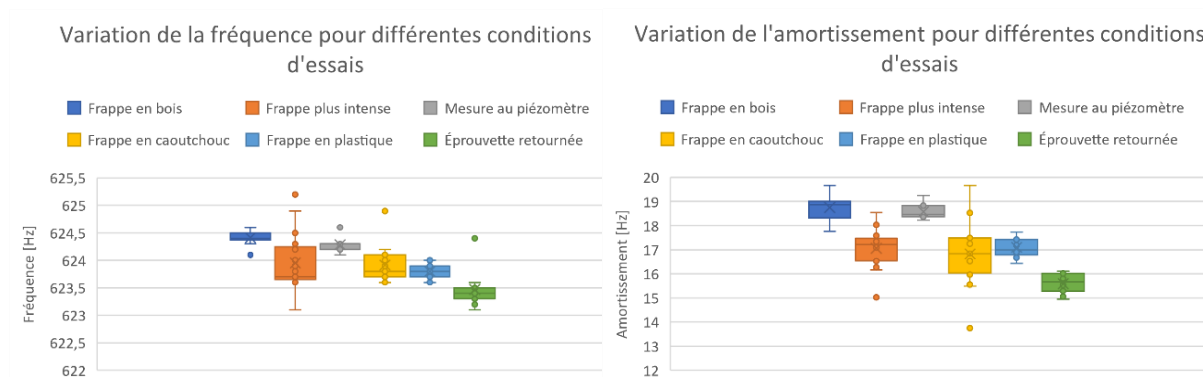


Figure 54: Variation de la fréquence propre et de l'amortissement pour différentes conditions de tests : éprouvettes

Concernant la position des appuis, des mesures sont réalisées en éloignant les appuis des positions nodales de la résonance prescrites par la norme. Un éloignement de 4 cm vers l'extrémité correspond à positionner les appuis à 10% de la longueur de l'échantillon, l'appui est alors à 2,7cm du bord. L'éloignement vers le centre correspond quant à lui à 35% de la longueur, avec l'appui à 10,7cm du bord. La figure 55 montre que la position des appuis³⁸ n'impacte pas la fréquence d'oscillation (à 0,5Hz près) mais impacte l'amortissement de l'onde de vibration animant le bois de plus de 15 Hz de différence entre les configurations extrêmes (l'amortissement rencontré est alors dit « de glissement »).

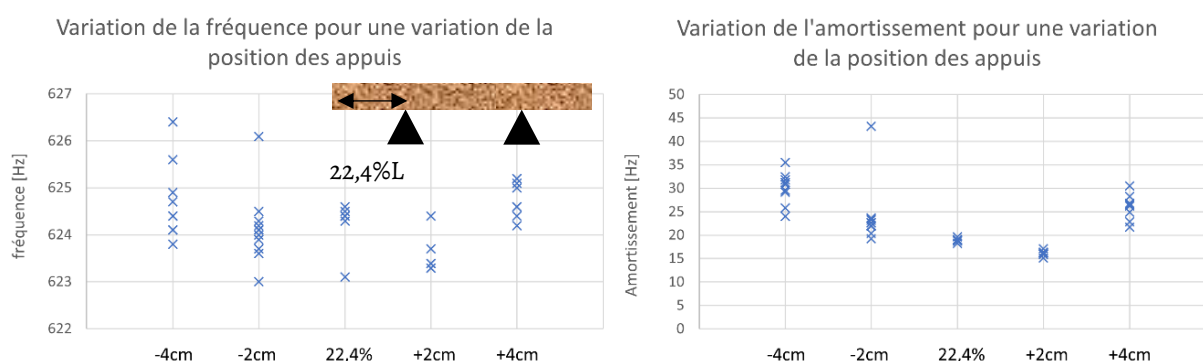


Figure 55: Fréquences et amortissements pour différentes positions des appuis.

Des investigations similaires ont été effectuées concernant le *trigger level* (désignant le pourcentage du signal pris en compte pour le calcul de la FFT). En effet, certains matériaux imposent d'ignorer le début du signal, afin de laisser le temps aux plus hautes harmoniques de s'amortir et de ne pas récupérer le choc de la frappe dans le spectre fréquentiel. De plus, des expériences ont également été réalisées concernant la position du micro et de la frappe. Ces dernières investigations n'ont présenté aucune variation en termes d'amortissement et de fréquence mesurée dans le cas des éprouvettes en bois de dimensions 10x30x300mm³.

³⁸ Une valeur négative indique l'éloignement des appuis par rapport à la valeur de 22,4% de la longueur et une valeur positive indique le rapprochement vers le centre de l'éprouvette

Le choix des conditions d'essais flexionnels :

La prise de mesure se fait avec le micro, plus facile à utiliser que le piézomètre qui nécessite un contact avec l'éprouvette. L'outil de frappe peut être choisi arbitrairement en évitant les frappes qui ont tendance à exciter le matériau dans son « Rigid body mode » à savoir un marteau en caoutchouc de volume imposant (de diamètre égal à l'épaisseur de l'échantillon, dans le cas de la configuration testée) ou une frappe trop énergique.

La position de la frappe et du micro et le *trigger level* n'ont pas d'influence sur la fréquence et l'amortissement. En revanche, la position des appuis est importante pour mesurer une valeur correcte d'amortissement.

6.1.2 Essais longitudinaux

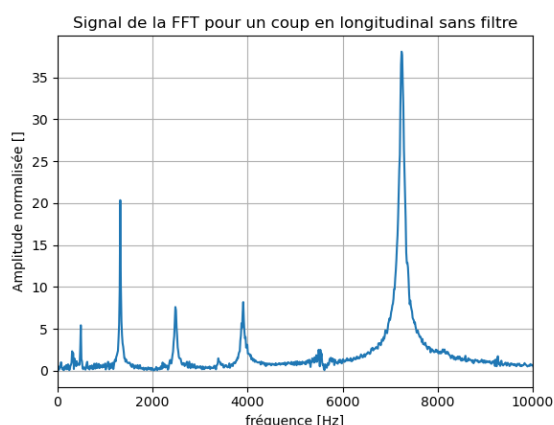
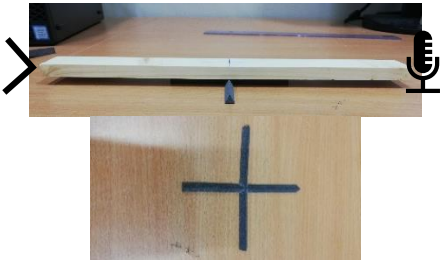


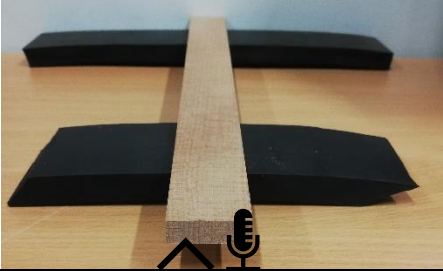
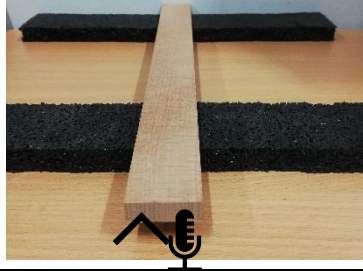
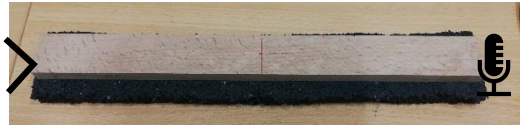
Figure 56: FFT GrindoSonic®: éprouvette : excitation longitudinale

Une inspection plus détaillée a été effectuée dans le cadre de la résonance longitudinale. En effet, nous avons remarqué que, contrairement à la résonance en flexion, plusieurs pics étaient présents et d'amplitudes parfois supérieures à la fréquence propre. L'enjeu était alors de déterminer si ces pics étaient dus à une erreur de manipulation ou à un caractère physique intrinsèque de la résonance longitudinale.

Différentes variations ont été effectuées avec le marteau en plastique, le micro et le piézomètre sur une éprouvette de hêtre et 2 éprouvettes de sapin, l'une des deux contenant des nœuds. Suspectant les appuis d'induire des vibrations supplémentaires, différents types d'appuis ont été testés, à savoir : les appuis fournis dans le GrindoSonic®(1), un mousse (2), un mousse à bulles (3), bloquer les mouvements de glissement de l'éprouvettes lors de la frappe en la bloquant contre un mur (4) ou en la bloquant verticalement sur la table (5) ou bien encore en accrochant le micro sur l'éprouvette (6), utiliser des appuis en néoprène (7) ou en caoutchouc (8), suspendre l'éprouvette à l'aide d'élastiques (9), et enfin en posant simplement l'éprouvette sur la table (10).

Tableau 5: Présentation des différentes conditions de test en longitudinal pour les éprouvettes de petites dimensions

Appuis fournis avec le GrindoSonic® (1) 	Mousse contre le mur (4) 
--	--

Mousse coté plat (2) 	Mousse coté bulles (3) 
Néoprène posé contre un mur (4 et 7) 	Caoutchouc posé contre un mur (4 et 8) 
Éprouvette posée sur un néoprène (7) 	Éprouvette posée sur un caoutchouc (8) 
Suspendu avec des élastiques (9) 	Micro accroché à l'éprouvette (6) 
Éprouvette sur pied (5) 	Éprouvette posée sur une surface dure (10) 

Ces différentes configurations sont comparées en termes de clarté du signal (au niveau du bruit, du nombre de pics enregistrés, et de l'amplitude des harmoniques) et en termes de répétabilité de fréquence et d'amortissement en comparant les écarts-types (un écart-type trop important indiquant une grande dispersion des valeurs mesurées et donc une faible fiabilité). Les observations sont :

Premièrement, **l'appareil de mesure** est important. En effet, le piézomètre ne permet pas d'atteindre les plus hautes fréquences qui sont les fréquences recherchées dans le cadre de l'excitation longitudinale (la mesure s'arrête à 4000Hz environs dans le cas de nos expériences alors que la fréquence propre recherchée se trouve aux alentours de 7000Hz). Cela peut s'expliquer par le fonctionnement même du piézomètre qui enregistre les mouvements sur base de la contrainte ressentie à sa pointe et qui dans le cas d'une haute fréquence n'est peut-être pas suffisante. La prise de mesure avec le micro est alors celle qui convient le mieux.

Deuxièmement, **l'isolation de l'échantillon par rapport à son environnement** en utilisant des appuis peu rigides est également importante pour avoir une bonne répétabilité des valeurs de fréquences et d'amortissements. En effet, ni le néoprène, ni le caoutchouc n'apportent un meilleur résultat en

comparaison avec les expériences sur mousse, certainement car ils restent trop rigides par rapport au gabarit de l'éprouvette. La configuration suspendue quant à elle permet plus de liberté d'oscillations, excitant d'autres modes que le mode longitudinal. Finalement, positionner l'élément sur une surface dure empêche tout autre mode d'entrer en oscillation, mais la fréquence de résonance et l'amortissement dépendent de l'interaction avec la table, cette configuration conduit jusqu'à 20Hz de différence par rapport aux autres configurations pour la fréquence propre comme pour l'amortissement. Il est donc inévitable d'exciter d'autres modes et donc d'avoir d'autres pics de la FFT dans le cas d'une résonance longitudinale.

Troisièmement, vouloir **limiter les déplacements de glissements** engendrés lors de l'excitation ne donne pas de résultats concluants. En effet, le matériau a simplement tendance à rebondir lorsqu'il est contre le mur ou à la verticale sur la table. De plus, l'option d'enregistrer uniquement les mouvements de l'éprouvette en plaçant le micro dans son repère mobile (en accrocher le micro sur l'éprouvette) conduit à enregistrer une plus grande amplitude pour les plus faibles fréquences qui ne correspondent pas aux mouvements longitudinaux car de la sorte le micro est également orienté de manière à mesurer les vibrations de flexion de l'éprouvette.

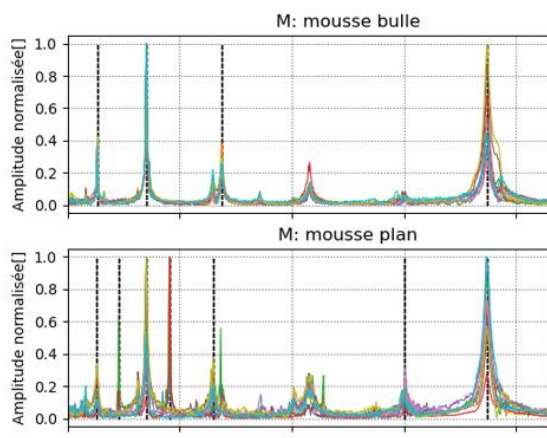


Figure 57: FFT: éprouvette longitudinale : avec micro sur le mousse coté plan et coté bulles

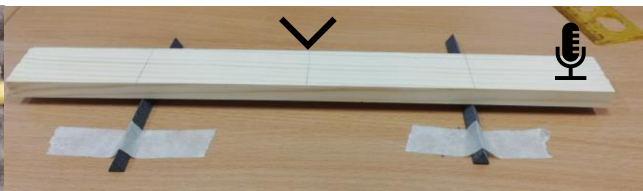
Enfin, la présence de nœuds tend à rendre les mesures moins précises et exploitables si les mauvaises conditions d'essais sont choisies. Les meilleures configurations dans le cas des éprouvettes en bois avec ou sans nœuds, de dimensions 10x30x300 mm³ sont alors la mousse en configuration bulle et en configuration plan. La figure 57 montre le type de FFT à laquelle il faut s'attendre dans le cas d'une mesure longitudinale. La propreté du signal n'étant pour rappel pas le seul critère déterminant l'efficacité ou non des conditions à utiliser pour cibler la fréquence propre et l'amortissement.

Les **conditions de tests choisies** pour la suite des expériences sur petites éprouvettes sont :

En résonance longitudinale :



En résonance flexionnelle :



La frappe est réalisée à l'aide du marteau en plastique.

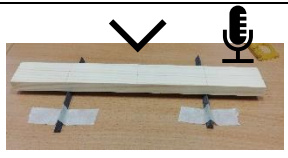
Position et orientation de la frappe : ✓

Position du micro : 

6.2 Procédure de caractérisation IET d'éprouvettes en bois en parallèle à un endommagement mécanique

Le matériel utilisé pour les mesures statiques et dynamiques et son fonctionnement se trouve dans le chapitre 4 dédié à ce sujet. Les formules liants les valeurs mesurées au module d'élasticité sont développées dans la partie théorique chapitre 0. Les choix réalisés dans la section précédente sont respectés.

La distance entre appuis pour la configuration de la Zwick® est 6 :6 :6 :6 cm dans le cas d'éprouvettes mesurant 30cm.

Dispositif Zwick®	Montage GrindoSonic® Long.	Montage GrindoSonic® Flex.
		 Sur les appuis disponibles avec le <i>GrindoSonic</i> ® à 22,4% dans le sens opposé au chargement de la Zwick® (courbure vers le haut)

La procédure consiste en une alternance de mesures statiques cycliques et dynamiques (longitudinales et flexionnelles) pour différents incréments de déplacements imposés à mi-travée. Les vitesses de chargement et de déchargement statique sont identiques comme discuté en section 4.1.2 ($v=0,003h=0,03\text{mm/s}$). L'éprouvette est pour chaque étape, chargée dans un même sens. Chaque mesure dynamique est prise environ 10 fois (certaines mesures étant retirées en post-traitement). Les différentes étapes du protocole sont illustrées figure 58.

1. **Étape 1*** : Mesure au GrindoSonic® L et F³⁹
2. **Étape 1** : Banc de flexion 5 cycles $\delta=L/200=0,9\text{mm}$
3. **Étape 2*** : GrindoSonic® L et F
4. **Étape 2** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=L/100=1,8\text{mm}$
5. **Étape 3*** : GrindoSonic® L et F
6. **Étape 3** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=3L/200=2,7\text{mm}$
7. **Étape 4*** : GrindoSonic® L et F
8. **Étape 4** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=L/50=3,6\text{mm}$
9. **Étape 5*** : GrindoSonic® L et F
10. **Étape 5** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=L/40=4,5\text{mm}$
11. **Étape 6*** : GrindoSonic® L et F
12. **Étape 6** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=3L/100=5,4\text{mm}$
13. **Étape 7*** : GrindoSonic® L et F
14. **Étape 7** : Banc de flexion 3 cycles $\delta=7L/200=6,3\text{mm}$

³⁹ Longitudinale et flexionnelle

15. **Étape 8*** : GrindoSonic® L et F
16. Recherche de la rupture si toujours pas atteinte :
Suite de 1 cycle à $x^*L/200$,
Suivi par des prises de mesures avec le GrindoSonic®,
x+1

La mesure GrindoSonic® après rupture n'étant plus pertinente une fois l'éprouvette pliée (la forme n'étant plus un parallélépipède rectangle), celle-ci n'est pas prise en compte. Le module statique n'est également pas calculé lors de la rupture. En effet, la rupture ayant lieu lors du 1^{er} cycle, nous ne disposons pas du 2^e cycle, considéré à toutes les autres étapes pour le calcul du module de Young. Ce choix du cycle à prendre en compte à chaque étape est résumé section 4.1.3 et expliqué Annexe 14.

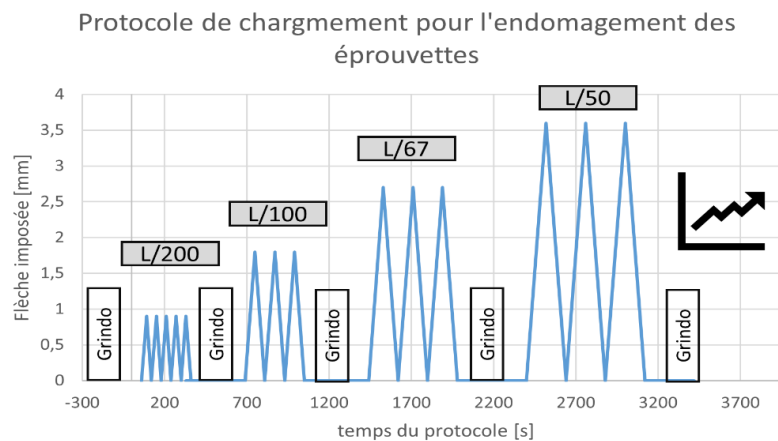


Figure 58: Représentation dans le temps des opérations du protocole de l'expérience sur éprouvettes.

Les résultats obtenus pour chaque éprouvette à chaque étape sont : le module statique, les déplacements résiduels, les modules $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$, les fréquences propres et les amortissements qui y sont liés ainsi que les écarts-types liés à ces valeurs moyennes (dans le cas des modules) ou médianes⁴⁰ (dans le cas des amortissements).

Les résultats sont présentés en 3 parties : une partie présentant les essais statiques, une partie présentant le module de Young dynamique, et enfin, une partie présentant l'amortissement des ondes de vibration du bois. Pour chacun de ces sujets, leurs potentiels à des fins de détermination d'un éventuel endommagement mécanique sont discutés.

Les propos seront illustrés graphiquement à l'aide de l'épicéa, les graphiques exprimés pour les autres essences se trouvent dans l'Annexe 18.

6.3 Résultats statiques

Les courbes « contrainte-déformation⁴¹ » permettent de déterminer visuellement à quelles étapes surviennent un palier de plastification. Par exemple dans le cas de l'éprouvette d'épicéa EPI10-2

⁴⁰ La valeur médiane souffrant moins des outliers

⁴¹ A titre d'information, le graphique contrainte déformation est réalisé sur base de la contrainte en flexion $\sigma = \frac{My}{I}$ et la déformation comme le rapport flèche/portée $\epsilon = \frac{\delta}{L}$.

(2^{ème} éprouvette provenant de la grume 10) sur la figure 59, le pallier plastique survient à partir de l'étape 4, lors du déplacement cyclique imposé de 3,6mm à mi-travée :

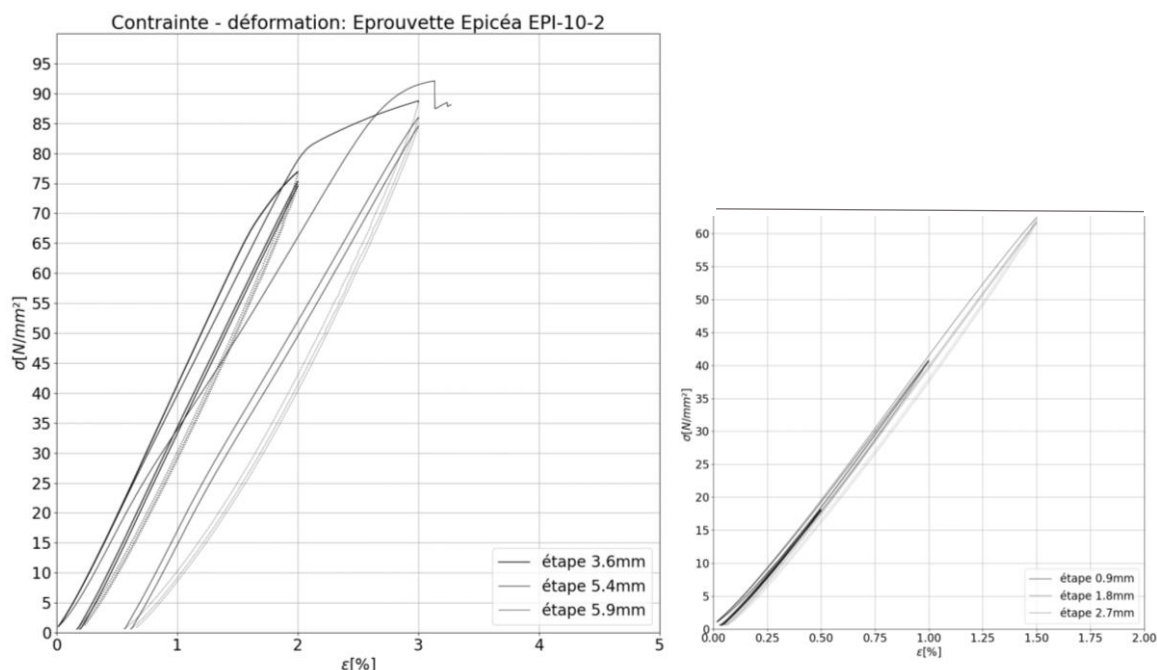


Figure 59: Courbe contrainte-déformation jusqu'à la rupture au cours des étapes de chargement.

En outre, ces courbes permettent également de déterminer la flèche résiduelle instantanée, c'est-à-dire ne tenant pas compte de la recouvrance de l'éprouvette après chargement une fois son retrait de la machine de flexion. La figure 60 montre que le déplacement résiduel instantané suit une tendance à la croissance au cours des étapes de chargement (la croix rouge indique la rupture de l'éprouvette). En effet, le matériau subit des plastifications à partir d'une flèche de $L/50$, et ce, dans le cas de toutes les essences. Ce déplacement correspond à la moitié de la hauteur de l'éprouvette. Malheureusement, cet indicateur d'endommagement ne pourra pas être transposable aux grumes pour lesquelles la déformation imposée ne dépasse pas $L/350$.

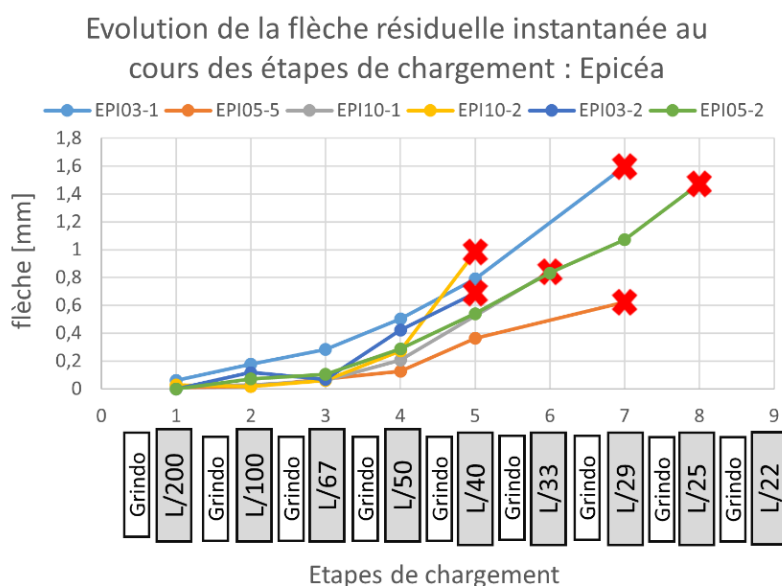


Figure 60: Évolution de la flèche résiduelle au cours des étapes : épicéa

6.4 Résultats dynamiques : E_{Dyn}

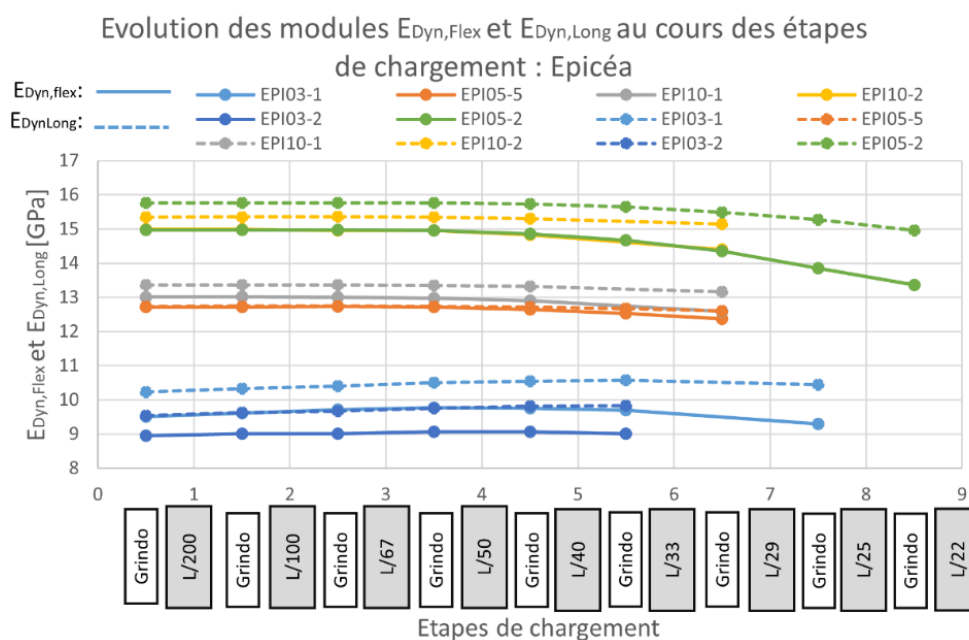


Figure 61: Évolution des modules $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$ au cours des étapes de chargement : épicea

Tout d'abord, les modules $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$ ne présentent pas le même rapport initial pour tous les spécimens : les courbes d'une même éprouvette, figure 61, ne sont en effet pas espacées d'une valeur constante. Toutes essences confondues, toutes les éprouvettes présentent un module longitudinal supérieur au module flexionnel dynamique⁴². Ce qui correspond bien à ce que prévoit la littérature.

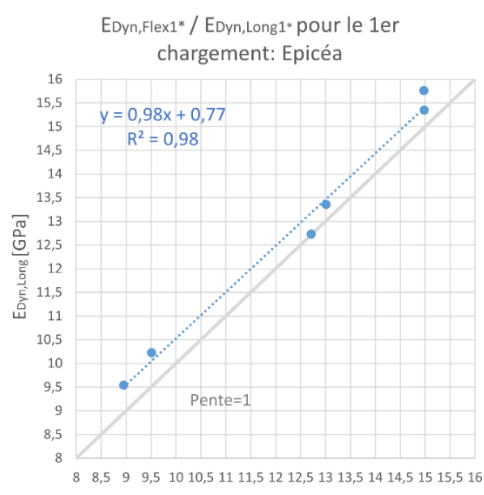


Figure 62: Corrélation entre modules $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ avant le 1er chargement: épicea

Ensuite, les corrélations, à chaque étape du protocole, liant ces deux modules (qui, rappelons-le, correspondent à des oscillations différentes) permettent de voir que ceux-ci sont bien le reflet d'une même propriété physique du matériau, l'un étant directement proportionnel à l'autre (Figure 62).

Enfin, les valeurs de modules de Young sont élevées en flexionnel comme en longitudinal (10-15GPa). Cette observation n'est pas anormale, et ces valeurs correspondent également aux valeurs de la littérature. Cette rigidité importante s'explique par la pureté, c'est-à-dire l'absence de nœuds et de défauts des éprouvettes.

Endommagement mécanique et module dynamique ?

Les modules $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$ diminuent tous les deux au cours des étapes de déplacements croissants imposés annonçant de la sorte un endommagement. Cependant, la vitesse de diminution

⁴² Sauf une éprouvette de chêne

est différente pour les deux modules. Ces mêmes observations se font pour les 4 essences testées dans le cadre de ce mémoire. En réalité, la littérature prévoit, dans le cas des matériaux isotropes et homogènes, qu'un gradient de rigidité (dû à l'endommagement dans ce cas) se ressent plus fortement au niveau du module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ qu'au niveau du module $E_{\text{Dyn, Long}}$ [72]. Il n'est donc pas anormal de rencontrer le même phénomène dans le cas du bois.

En observant les rapports entre modules $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$, figure 63, la croissance au cours des étapes de chargement est bien visible. Ce taux de croissance est détectable à partir du 5^{ème} pallier de chargement (L/50) c'est-à-dire à partir du même taux de contrainte que celui nécessaire à l'apparition d'une flèche résiduelle (comme observé section 6.3.). Cet indicateur d'endommagement survient également trop tard que pour être transposable au cas des grumes. L'augmentation de ce rapport est de 1,08% à 8,34% dans le cas du chêne, de 0% à 2,43% dans le cas du sapin, de 1,63 à 6,64% dans le cas de l'épicéa et de 0% à 0,83% dans le cas du hêtre (essence qui n'a jamais été portée à la rupture). Cette différence de taux de croissance signifie en outre que les corrélations déterminées entre modules E_{Stat} , $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$ sont différentes à chaque étape du protocole.

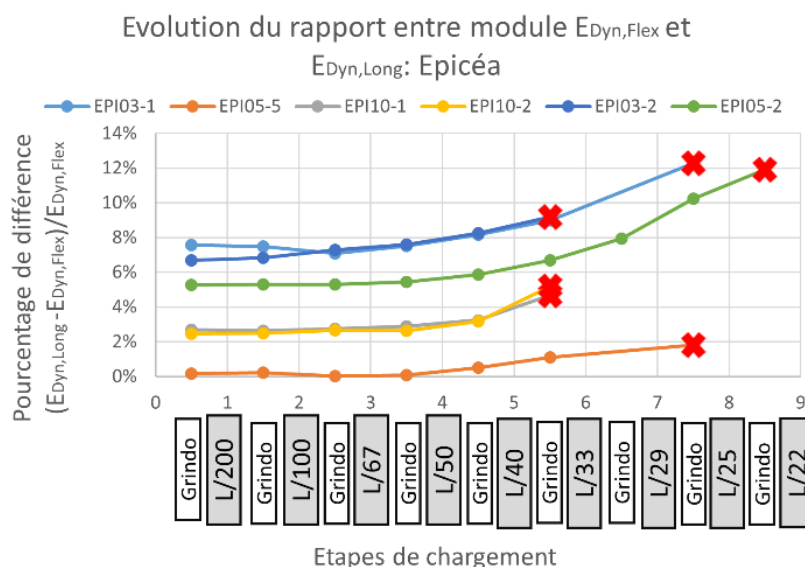


Figure 63: Rapport $E_{\text{Dyn, Long}}$ et $E_{\text{Dyn, Flex}}$, au cours des étapes de chargement : épicéa

6.5 Comparaison entre module statique E_{Stat} et module dynamique $E_{\text{Dyn, flex}}$

Dans cette section, l'évolution du module statique est comparée à l'évolution du module dynamique flexionnel étant donné que celui-ci varie davantage au cours de l'endommagement que le module $E_{\text{Dyn, Long}}$.

Tout d'abord, la figure 64 montre que les variations de $E_{\text{Dyn, flex}}$ sont minimales en comparaison avec les variations présentes pour le module statique. Le module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ est de ce fait moins sensible à l'endommagement que le module E_{Stat} . Le module $E_{\text{Dyn, Long}}$ étant moins sensible que le module $E_{\text{Dyn, Flex}}$, il est possible de conclure que les modules dynamiques en général sont moins sensibles à l'endommagement que le module statique.

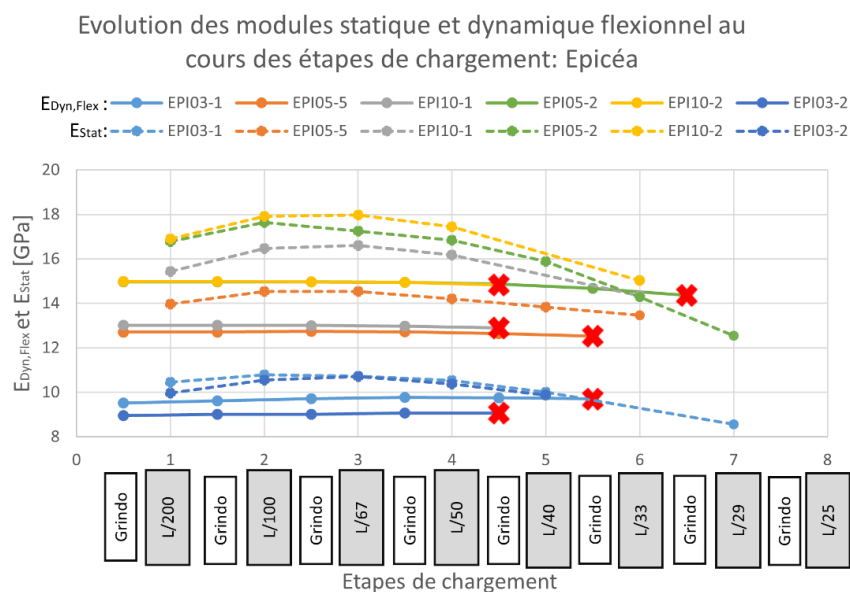


Figure 64: Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$ au cours des étapes : épicea

Ensuite, les essences étudiées présentent, dans la plupart des cas d'éprouvettes, un module E_{Stat} supérieur au module $E_{Dyn, Flex}$ (de 1,8% à 15% de plus). Cette différence, en fonction du spécimen ou de l'essence, est au maximum de 2GPa dans le cas de l'épicéa EPI05-2 visible sur la figure 64 ce qui ne correspond pas à ce qui est attendu. En effet la théorie nous dit que le module statique est toujours inférieur au module dynamique. En réalité, sur les 35 éprouvettes testées, seules 6 éprouvettes présentent bien un module statique inférieur au module dynamique flexionnel, le taux de différence se trouve dans ces cas entre 0,1 et 16%. Cette anomalie vient du choix de prendre le deuxième cycle de chargement pour le calcul du module statique et non le 1^{er}. En effet, si nous avions pris le 1^{er} cycle, la valeur de module correspondant à la première étape de chargement aurait bien été plus petite que la valeur de module dynamique. Cependant, la densification/ rigidification mesurée aux étapes suivantes aurait été plus importante, ce qui ne traduit pas le réel comportement du bois. La tendance à l'augmentation du module statique au cours des étapes est interprétée dans la section 4.1.3. Cette observation n'est donc pas un problème, tout d'abord car la littérature concerne des chargements non cycliques et n'allant pas jusqu'à la rupture, ce qui est très différent de notre cas. Ensuite, car cela ne pose pas un problème en termes de comparaison si la même règle est appliquée à toutes les éprouvettes.

Pour finir, la littérature fournit des corrélations déterminées expérimentalement entre le module E_{Stat} et les modules $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$. Afin de comparer correctement nos valeurs aux valeurs de la littérature, nous analysons dans un premier temps uniquement les résultats obtenus pour la première étape de chargement, les chercheurs effectuant leurs corrélations sur base d'un seul chargement non cyclique. De plus, dans la littérature, la valeur statique est toujours comparée à la mesure réalisée au GrindoSonic® avant l'essai en flexion 3 ou 4 points.

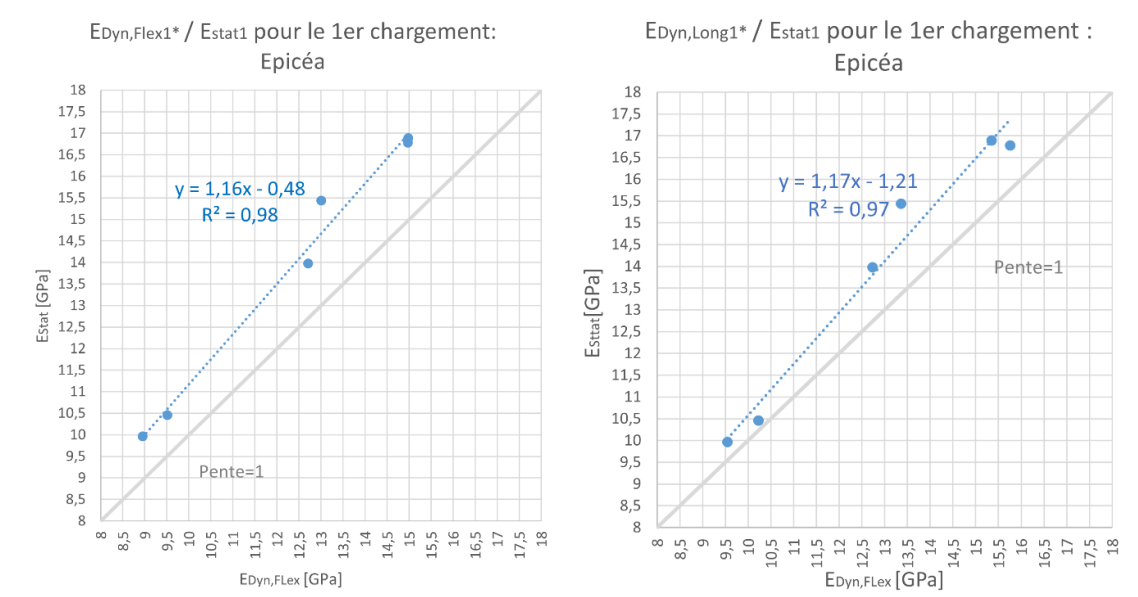


Figure 65: Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 1^{er} chargement: épicéa

Il a été observé précédemment dans la littérature que modules $E_{Dyn,Flex}$ et E_{Stat} ont toujours une corrélation $R^2 > 0,6$ mais que la plupart du temps $R^2 > 0,85$ et une pente de valeur légèrement inférieure à l'unité et décalée en ordonnées positivement, sauf quelques exceptions (Dans le tableau récapitulatif des expériences réalisées durant ces dernières années disponible en Annexe 13, seulement 3 corrélations présentent une pente supérieure à 1 et un décalage négatif de l'origine). De plus, dans la littérature, au plus l'élément est élancé, au plus le coefficient de corrélation est intéressant (limitant de la sorte les effets de cisaillements que ce soit au niveau du calcul statique ou dynamique). Quant aux modules $E_{Dyn,Long}$ et E_{Stat} , ils sont très peu comparés (2 fois seulement dans le tableau récapitulatif Annexe 13). Les corrélations trouvées pour les différentes essences analysées sont comparées avec les valeurs de la littérature dans le tableau 6 et représenté dans le cas de l'épicéa figure 65

Tableau 6: Tableau récapitulatif et comparatif des corrélations obtenues dans le cadre des essences testées

Flexionnel				
	Chêne	Sapin	Hêtre	Épicéa
Expérience :				
Coefficient R^2	0,96	0,95	0,91	0,98
$Ax_{(dynamique)} + b$	$0,96x + 0,97$	$1,06x + 0,97$	$0,89x + 1,33$	$1,16x - 0,48$
Littérature :				
Coefficient R^2	0,6	0,96	0,85	0,94
$Ax_{(dynamique)} + b$	$0,89x + 0,22$	$0,91x + 0,29$	$0,96x + 1,2$ $0,96x + 0,86$	$0,91x + 0,79$ $0,91x + 1,4$
Longitudinal				
	Chêne	Sapin	Hêtre	Épicéa
Expérience :				
Coefficient R^2	0,98	0,98	0,85	0,97
$Ax_{(dynamique)} + b$	$0,99x + 0,33$	$1,11x - 0,95$	$0,93x + 0,46$	$1,17x - 1,21$
Littérature :				
Coefficient R^2			0,96	0,97

Il est à noter que l'hygrométrie ne change pas au cours d'un test pour une éprouvette en particulier ; celle-ci n'a donc pas d'impact. En revanche, toutes les éprouvettes testées n'ont pas la même humidité, ce qui peut exercer une légère influence sur les corrélations déterminées pour un lot d'échantillons présentant des différences d'hygrométries. En effet, comme l'énonce la littérature, modules E_{Stat} et E_{Dyn} augmentent tous deux si l'hygrométrie diminue, mais n'augmentent pas nécessairement dans des proportions identiques.

Les mêmes types de corrélation sont également possibles dans le cas du 2^{ème} chargement (et des suivants), après la stabilisation de densification du module statique, les graphiques de toutes les essences sont disponibles à l'Annexe 18, la figure 66 présente le cas de l'Épicéa.

Par rapport au cas du 1^{er} chargement, les relations changent d'environ 10% au niveau de la pente et de 0,5 GPa au niveau du décalage de l'ordonnée à l'origine restant dans les mêmes gammes de valeurs que celles trouvées dans la littérature.

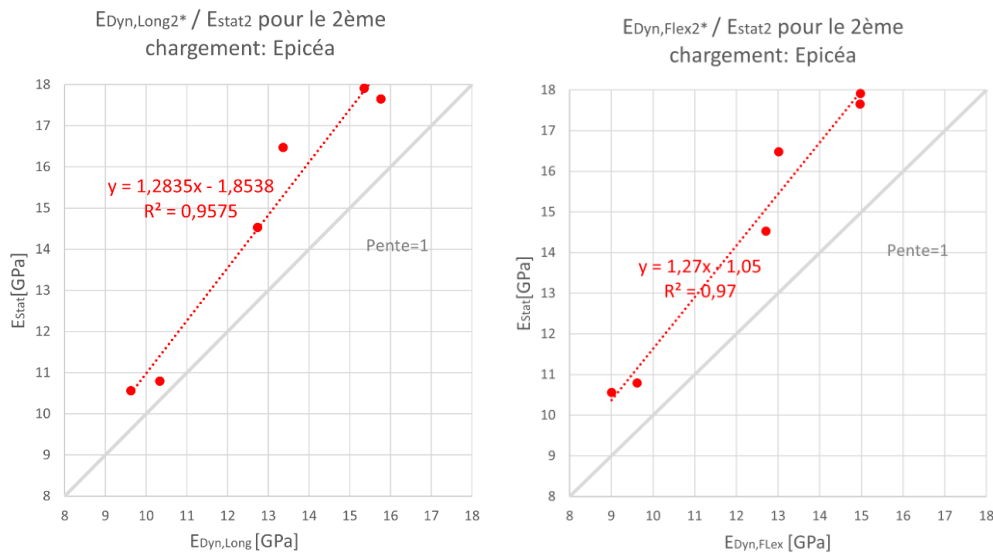


Figure 66: Corrélations $E_{Dyn, Long}/E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex}/E_{Stat}$ pour le 2^e chargement: épicéa

Module de Young et prédiction d'endommagement mécanique :

Tout d'abord, l'analyse à partir d'une flèche imposée de $L/50$ traduit des signes d'endommagement mécanique par l'apparition d'une flèche résiduelle de plus en plus importante.

Ensuite, la méthode dynamique est moins sensible que la méthode statique (en résonance flexionnelle comme longitudinale), mais une augmentation du rapport $E_{Dyn, Long}/E_{Dyn, Flex}$ est cependant remarquable et traduit la présence d'endommagements à partir d'une flèche imposée de $L/50$, cette augmentation peut aller jusqu'à 8,34% avant rupture. En effet, le module $E_{Dyn, Flex}$ souffre plus de l'endommagement que le module $E_{Dyn, Long}$.

Pour finir, les modules $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ permettent tous les deux de déduire le module de Young statique sur base de corrélations, celles-ci ont été déterminées dans le cas des essences de chêne, de sapin, d'Épicéa et de hêtre. De plus, le module $E_{Dyn, Long}$ est toujours supérieur au module $E_{Dyn, Flex}$ comme le prévoit la littérature.

6.6 Résultats dynamiques : Amortissement

Le GrindoSonic® permet également de mesurer l'atténuation de l'onde. Cette atténuation est définie par l'amortissement de l'amplitude de chaque fréquence composant le signal. Le GrindoSonic® détermine l'amortissement d'une fréquence comme la largeur de son pic dans la FFT. Cette valeur est indépendante de la fréquence mesurée.

La figure 67, montre que l'amortissement en résonance longitudinale ne suit pas un pattern de variation logique et répété au travers des étapes de chargement pour toutes les éprouvettes. Cependant la valeur d'amortissement finale est souvent plus élevée qu'à l'initiale (25 cas/33).

Néanmoins, les valeurs sont très étalées en termes de répétabilité (présentant un écart-type de 1 à 10 pour une valeur moyenne de 100Hz ⁽⁴³⁾ contre une valeur de 0,001 à 0,4 pour une valeur moyenne de 10Hz dans le cas de la résonance flexionnelle).

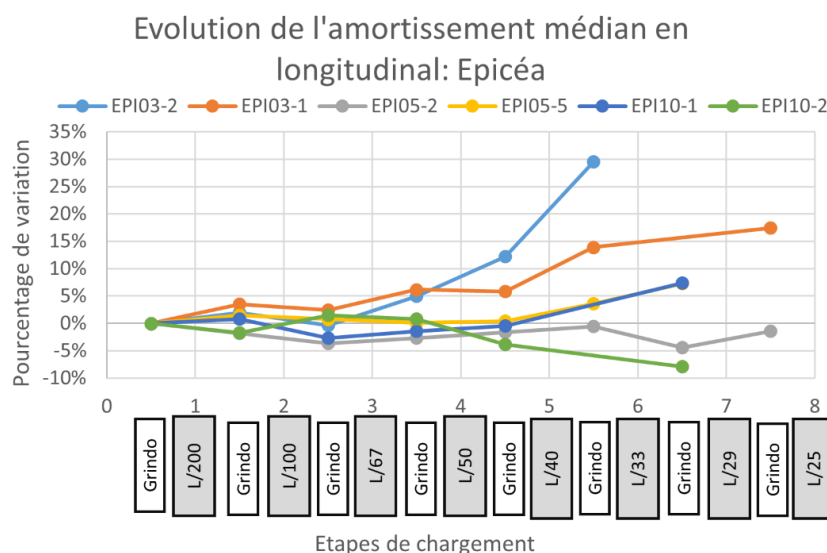


Figure 67: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : épicéa

L'amortissement flexionnel, quant à lui, présente une augmentation plus marquée au cours des étapes et ce dans la plupart des cas (26 cas/33). Cette augmentation se fait ressentir à partir de l'étape 3 soit L/67, c'est-à-dire plus tôt que dans le cas du rapport entre les modules $E_{\text{Dyn, Flex}}$ et $E_{\text{Dyn, Long}}$ et que dans le cas de la flèche résiduelle. Cette variation peut atteindre jusqu'à 37,5% à la rupture dans le cas du chêne et 100% dans le cas du sapin. Néanmoins la tendance n'est pas toujours à l'augmentation (7cas/33) : parfois une augmentation puis une chute est observée, voire parfois juste une diminution.

⁴³ L'amortissement étant exprimé en Hz dans le cas de la nomenclature dB Bandwidth

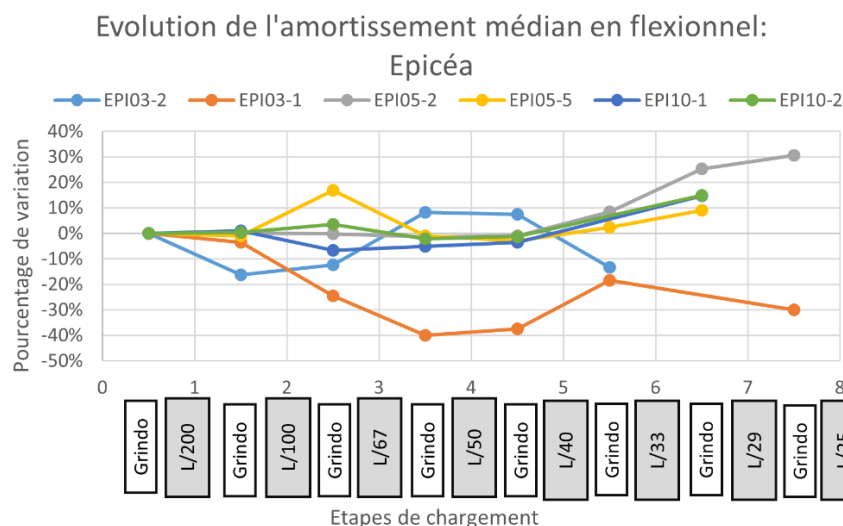


Figure 68: Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : épicéa

Les impacts de l'hygrométrie sur l'amortissement ne sont pas approfondis dans la littérature, le seul élément certain est que l'amortissement augmente si l'hygrométrie est plus élevée. Il serait dès lors intéressant d'approfondir ce sujet dans une étude future.

Utiliser l'amortissement obtenu par la méthode IET pour déterminer l'endommagement mécanique :

L'amortissement a tendance à augmenter avant la rupture (jusqu'à 100% et à partir de L/67), le phénomène est plus marqué dans le cas de la vibration en flexionnel mais, dans tous les cas, la rupture est annoncée au moins une fois soit en vibration flexionnelle soit en vibration longitudinale par une augmentation de l'amortissement.

Le fait que toutes les éprouvettes ne suivent pas la même tendance montre que l'amortissement ne peut être utilisé seul en temps qu'indicateur d'endommagement. Cependant, il peut servir à confirmer un endommagement mécanique au préalable décelé par une chute de module dynamique ou statique.

7 Grumes

L'objectif principal de ce mémoire était de parvenir à caractériser des grumes, c'est-à-dire des troncs d'arbres ébranchés et écimés. Pour cela, 3 essences différentes sont testées afin de déterminer la pertinence et l'utilité du GrindoSonic® à la caractérisation non-destructive des grumes et au suivi de l'endommagement. Pour ce faire, 30 grumes sont testées à l'aide de la méthode IET et du GrindoSonic® en parallèle de tests en flexion 4 points réalisés dans le cadre du travail de recherche de Maxime Dehaen et Pierre-Louis Ponthière [86]. Le but est de comparer les résultats en termes d'élasticité et de suivre le comportement des ondes d'oscillation du bois afin de détecter la présence ou non d'endommagement mécanique.

Les grumes analysées dans le cadre de cette partie expérimentale sont issues de la scierie SCIDUS basée à Etalle, les 3 essences testées sont le tsuga, le peuplier et l'épicéa et proviennent respectivement des régions de Stoumont, Saint-Trond et Manhay. Ces régions sont tempérées et les forêts y sont entretenues par un forestier qui encadre leur croissance à des fins d'utilisation structurelle. Les arbres ont de ce fait une croissance contrôlée (en termes de maintien, de concurrence de croissance...).

Les grumes ont été stockées, durant la période des tests, sur le plancher du laboratoire, milieu chauffé et aéré, et ce durant un mois plus ou moins pour chaque essence. Elles ont été fournies à l'état vert, c'est-à-dire avec une hygrométrie encore importante (>30%), ce qui implique que les premiers jours, les grumes pouvaient perdre jusqu'à 500g d'eau en 24h. Les valeurs moyennes des lots de grumes se trouvent dans le tableau 7 :

Tableau 7: Tableau récapitulatif des essences et de leurs principales caractéristiques

Essence	Masse moy. [kg]	Masse max [kg]	L_{moyen} [m]	$\varnothing_{moy}$ [mm]	%H _{moy}	Conicité max [mm/m]	Conicité moy. [mm/m]	E _{Dyn,L} moy. [GPa]	E _{Dyn,L} max [GPa]
Peuplier	650	850	8	350	26,8	11,9	8,91	10,16	12,73
Tsuga	557,15	635	8,5	370	21,7	11,46	9,115	9,4	12,06
Épicéa	531	662	7,4	385	25,2	23,6	15,46	11,54	13,98

7.1 Étude préliminaire : conditions de test

Avant toute chose, certaines conditions de réalisation des essais IET sont fixées par le protocole de caractérisation mécanique statique afin de pouvoir effectuer les deux méthodes en parallèle sans modifier le protocole statique, à savoir :

- La distance entre appuis (fixée pour avoir un même élanement pour toutes les grumes d'un même lot).
- L'isolement des appuis (la grume est disposée sur des appuis en acier en V pouvant être soit en configuration rotule soit en configuration rouleau).

L'enjeu est alors de faire varier les autres paramètres afin d'avoir le signal de la FFT le plus propre possible en flexionnel et en longitudinal. Beaucoup de paramètres peuvent être sélectionnés dans le GrindoSonic®. Un tableau comprenant les paramètres, leur signification physique et les choix conseillés pour des éléments de petites dimensions et pour les grumes se trouve à l'Annexe 17. Cette

partie détaille uniquement les conditions de tests extérieures aux paramètres sélectionnables dans le GrindoSonic®.

Une estimation de la fréquence à obtenir sur base des caractéristiques moyennes de grumes qui sont traitées dans ce mémoire permet d'orienter les essais et est obtenue à partir des relations développées dans la partie théorique (chapitre 0) :

$$f_{Flex} = \sqrt{\frac{Ed^4}{1,6067L^3mT}} \quad \text{Et} \quad f_{Long} = \sqrt{\frac{E\pi d^2}{16LmK}} \quad (7)$$

Ce qui représente, pour une grume fictive ayant un module de Young dynamique hypothétique de 9GPa et de dimensions $d=375\text{mm}$, $L=8500\text{mm}$, $m=586000\text{g}$, ce qui donne pour valeurs de coefficients correctionnels $T'=1,009$ et $K'=0,9996^{44}$:

- 223,31Hz dans le cas de la résonance en flexion
- 17,5Hz dans le cas de la résonance longitudinale

Par facilité, il est plus aisé d'utiliser le **micro**, en effet, celui-ci peut être tenu par un bras mécanique,

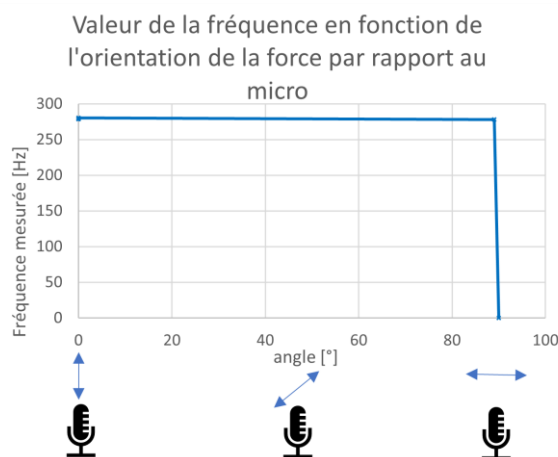


Figure 69: Mesure de la fréquence propre en fonction de l'angle de la frappe pour une position de micro fixe.

limitant les erreurs humaines et permettant une plus grande rapidité du test (un repositionnement n'est pas nécessaire à chaque coup). Il a néanmoins été vérifié que le micro enregistrerait réellement uniquement les vibrations dans son plan, comme illustre la figure 69. Ce qui signifie que, si le micro est positionné sous la grume, il enregistre uniquement les vibrations verticales ou la composante verticale des vibrations induites par tout angle de frappe différente de l'horizontal.

Il est également remarquable sur la figure 69, que l'angle de frappe n'interfère pas sur la fréquence mesurée.

7.1.1 Conditions d'essais en résonance flexionnelle

Dans le cas du flexionnel, la faible fréquence devant être obtenue n'a jamais été atteinte, le GrindoSonic® ne pouvant enregistrer de fréquences plus basses que 70Hz sur une grume. Il est pourtant supposé enregistrer des fréquences jusqu'à 20Hz. Les conseils pour atteindre une fréquence si faible ont été mis en œuvre mais en vain. Ces conseils sont :

- Mettre le filtre préamplificateur de 20Hz
- Utiliser le piézomètre en le tenant fermement
- Utiliser le filtre analogique de 20Hz à 1kHz

⁴⁴ Pour rappel, ces valeurs de K et T sont très proches de 1 en raison de l'élancement des grumes, ces facteurs servent à prendre en compte le cisaillement et la rotation inertielle des sections et sont déterminés sur base des dimensions de la grume

À défaut de pouvoir enregistrer la fréquence propre, il est intéressant de déterminer les conditions les plus favorables pour enregistrer les harmoniques. En effet, même si celles-ci ne peuvent servir à l'obtention du module de Young, elles peuvent servir à évaluer l'endommagement mécanique par comparaison de valeurs entre un état supposé non endommagé et un état supposé endommagé.

Il a donc été remarqué qu'il est préférable de bloquer les deux appuis (en faisant des appuis à rotules). De plus, la position de la frappe peut exercer une influence sur l'amortissement et sur la fréquence de valeurs de l'ordre de 2-3Hz de différence. Pour éviter de multiplier les incertitudes, l'utilisation du mouton décrit en section 4.2.3 est donc indispensable.

7.1.2 Conditions d'essais en résonance longitudinale

Les différentes variations qui ont été opérées se trouvent dans le tableau 8 ci-dessous. Une observation qualitative a permis de sélectionner la configuration la plus adéquate. Ces critères qualitatifs sont basés sur le nombre de pics de fréquences excités (un plus petit nombre étant plus avantageux), l'amplitude des pics parasites liés au bruit et enfin la répétabilité des valeurs obtenues entre différents coups successifs.

Tableau 8: Conditions de test pour la résonance longitudinale sur grume

Critères	Possibilités	Conclusion
Position de la frappe	Sur la section de tête ou de pied	La frappe sur section de pied donne 2x plus de bruit (en amplitude) que la section de tête.
Force de la frappe	Frapper fort ou non	Une force plus intense augmente l'amplitude des fréquences générées par le bruit, si la grume ne parvient pas à être excitée, mieux vaut utiliser un matériau plus rigide quitte à, si nécessaire, poinçonner localement la grume que de frapper plus fort.
Libération des appuis	Appuis en V à rotule ou à rouleau	Réaliser les essais sur un rouleau et une rotule donne une plus grande amplitude pour le pic de fréquence propre ce qui est avantageux lorsque celui-ci est dépassé en amplitude par une de ses harmoniques.

D'autres critères ont été testés mais n'ont conduit à aucune différence notable, à savoir : le tassement de la section de grume avant la frappe, la position du micro du même côté que la frappe ou à l'opposé de la grume et la position de la frappe dans la zone de duramen ou d'aubier.

7.1.3 Des conditions de test parfaites

Des expériences ont également été réalisées dans des conditions différentes de celles imposées par le protocole statique. Ces expériences visaient à déterminer les meilleures conditions de tests qui pourraient être réalisées avant et après le protocole statique. Elles ont été utilisées pour les expériences de la section 7.5.

La grume est suspendue de manière à être la plus isolée possible, c'est-à-dire sur des cordes positionnées aux endroits des nœuds de la vibration flexionnelle. La figure 70 illustre les montages réalisés dans le cadre de ces tests aux conditions parfaites : (a) frappe centrée dans le cas de la

résonance longitudinale, (b) mesure au piézomètre en résonance flexionnelle et longitudinale, (c) système d'appuis en corde pour isoler la grume de ses appuis, (d) une grume en place sur ses appuis nodaux.

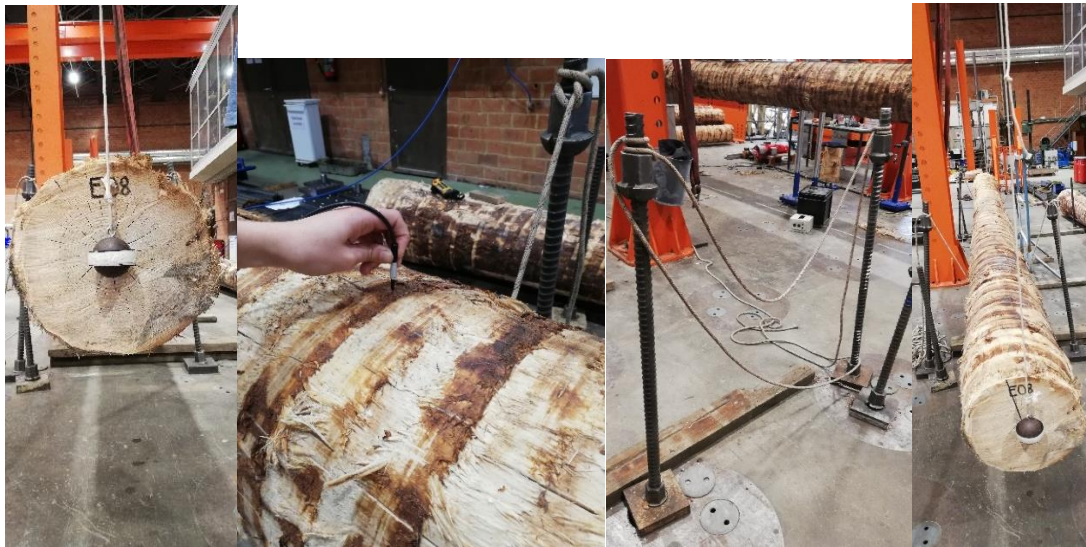


Figure 70: Illustrations conditions parfaites : grume

Les conditions déterminées et leur justification sont :

En flexionnel :

- Le préamplificateur à 20Hz augmente la précision/ répétabilité de fréquence.
- L'amplitude des plus hautes harmoniques est diminuée avec l'utilisation d'un post gain (x40).
- L'utilisation du piézomètre lisse le graphique de la FFT.
- L'utilisation du caoutchouc n'est pas toujours possible en flexionnel, l'excitation nécessite en effet parfois une impulsion plus rigide.
- La résolution fréquentielle à 0,61Hz diminue l'amplitude du bruit et lisse la FFT.

Ces conditions ne permettent pas non plus d'atteindre les faibles fréquences propres attendues pour le calcul du module de Young.

En longitudinal :

- Le préamplificateur à 20Hz augmente la précision/ répétabilité de fréquence.
- La non-utilisation du caoutchouc autour de la boule de pétanque pour la frappe excite davantage les hautes harmoniques.
- Le décentrement de la frappe par rapport au centre géométrique de la section de la grume excite davantage de fréquences différentes (la grume est alors également excitée en flexion).
- Le piézomètre ne donne pas de bons résultats lorsque la mesure est prise sur la section et non à l'endroit des supports (appuis nodaux).
- L'utilisation du piézomètre lisse le graphique de la FFT.
- La résolution fréquentielle à 0,61Hz diminue l'amplitude du bruit et lisse la FFT.

Conclusion :

En résonance flexionnelle : La faible fréquence ($<20\text{Hz}$) correspondant à un module plausible pour une grume n'a jamais pu être obtenue en raison des limites de sensibilités de l'appareil.

En résonance longitudinale : La frappe se réalise préférentiellement du côté de la plus petite section de la grume sur un appui à rouleau (du côté du pied de grume) et un appui à rotule (en tête de grume). La frappe ne doit pas être trop énergique, il vaut mieux utiliser un matériau plus rigide si la grume ne parvient pas à être excitée.

Conditions de tests parfaites : Conditions déterminées indépendamment des conditions imposées par le protocole statique pour une application avant et après positionnement de la grume sur le dispositif de flexion 4 points. Les conditions en résonance flexionnelle sont : le piézomètre sur le nœud de la flexion c'est-à-dire à l'endroit des appuis et le mouton sans la bande de caoutchouc. Les conditions en résonance longitudinale sont : le piézomètre également sur le nœud de la flexion et le mouton avec caoutchouc. Pour les deux types de résonances, il faut utiliser le préamplificateur à 20Hz , un filtre analogique de 20Hz à 1kHz et une résolution fréquentielle de $0,61\text{Hz}$

7.2 Protocole autour des tests en flexion 4 points

Les objectifs des expériences sur grumes sont multiples :

- Évaluer la pertinence d'une mesure dynamique sur grume, par la répétabilité (ou précision) des mesures de fréquences au sein d'une même grume et par la répétabilité des comportements au sein d'un même lot.
- Comparer les résultats de la méthode IET avec ceux fournis par la méthode statique afin de déterminer si la méthode dynamique est pertinente à des fins de vérifications ou d'informations supplémentaires vis-à-vis de la méthode statique.
- Déterminer si le spectre fréquentiel et le comportement des ondes dans les bois permettent de déceler un endommagement au cours des étapes de flexion 4 points.

Le matériel utilisé est décrit dans le chapitre 4, les conditions déterminées préliminairement dans la section précédente sont appliquées scrupuleusement. À titre de rappel, le tableau 9 reprend quelques illustrations de la mise en œuvre du protocole. Pour chaque essence, un tableau reprenant les caractéristiques de chaque grume individuellement est disponible en Annexes 19 pour le tsuga en Annexe 20 pour l'épicéa et en Annexe 21 pour le peuplier (masse, diamètre, conicité, longueur, modules obtenus, fréquence obtenue, amortissement, fraction du coefficient critique ζ (permettant de voir si la viscosité n'est pas trop importante voir section 2.5.1) et le classement visuel.

Tableau 9: Illustrations de la mise en œuvre de la méthode dynamique sur les grumes

Micro positionné sous le ventre de résonance de la grume, décalé vers le pied de la grume pour la mesure en flexionnel	Micro positionné à l'extrémité pour la mesure en longitudinal Coté pied de grume	Boule de pétanque avec ou sans caoutchouc, fixé à une corde afin de former le mouton
		
Libération de l'appui coté pied de grume	Appui rotulé coté tête de grume + LVDT de la flexion statique	Mouton sur son cadre pour une excitation en flexionnel
		

7.2.1 Procédure

Identification visuelle préalable

Avant de commencer les essais statiques, les grumes sont analysées avec la méthode visuelle, elles reçoivent alors une note de A à C (ou D⁴⁵) selon la norme européenne (A étant une la meilleure classe de résistance) et de 1 à 3 selon la norme allemande (1 étant la meilleure classe). Cette note se détermine sur base de la présence de pourriture, roulure, fente de cœur, cœur étoilé, gélivure, coup de foudre ou de soleil, trou d'insecte mais aussi au taux de courbure de la grume et au défilement, au taux de nœuds sains ou morts, à l'importance du méplat, à la largeur des cernes, et l'excentrement du cœur,

⁴⁵ Selon l'essence

ces termes sont détaillés dans le mémoire parent concernant le protocole statique [86]. Le classement se fait sur base de tolérances propres à chaque essence.

Protocole statique

Pour les mesures statiques, la grume est chargée de manière cyclique en lui imposant des déplacements relatifs à sa portée, à l'aide d'un dispositif de flexion 4 points. La distance entre appuis est déterminée de manière à avoir toujours le même élanement pour une même essence soit

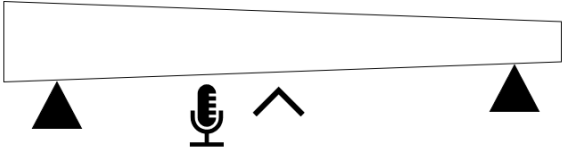
$\lambda = \frac{L_{\text{entre appuis}}}{D_{L/2}}$. Cet élanement est déterminé sur base du diamètre à mi-travée et est de 20 dans le cas des essences de tsuga et de peuplier et de 17 dans le cas de l'essence d'épicéa.

Protocole dynamique

Pour le longitudinal, la position des appuis n'a pas d'importance pour autant que ceux-ci ne restreignent pas la libre oscillation de la grume, c'est-à-dire en libérant les appuis afin d'obtenir des appuis à roulement. La libération des appuis dans le cadre de ce protocole se fait conformément à la norme et comme exploré dans la littérature.

La résonance flexionnelle n'a été réalisée que sur un lot de grume, l'épicéa. La fréquence à obtenir étant trop faible que pour être mesurée par le GrindoSonic® (<20Hz), la position des appuis n'a que peu d'importance pour autant qu'elle reste constante tout au long des étapes afin de pouvoir effectuer une comparaison et déceler un quelconque endommagement.

Tableau 10: Schémas statiques des essais sur grumes

Dynamique longitudinal et configuration statique	 L'excitation est donnée perpendiculairement à la section du petit bout à l'aide du mouton. (La flèche indique la position et le sens de la frappe)
Dynamique flexionnel	 L'excitation est donnée par en dessous, au niveau du ventre d'oscillation soit au milieu de la grume, mais l'impact est légèrement décalé afin de ne pas heurter la pastille de mesure de flèche du laser en flexion statique.

A titre d'exemple, la figure 71 montre les 2 types de signaux FFT (présentant les fréquences composant le signal) que renvoie le GrindoSonic® :

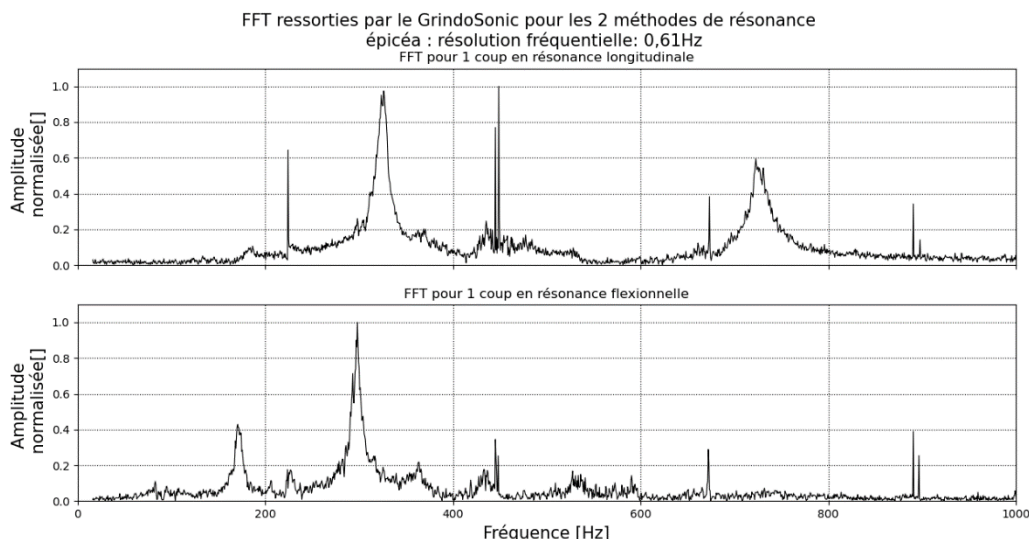


Figure 71: FFT GrindoSonic® pour les 2 types de vibration (Illustration personnelle)

Protocole total

Comme pour les mesures effectuées sur les petites éprouvettes en bois, les mesures GrindoSonic® s'intercalent entre les mesures statiques. La durée totale du protocole est de 1h30, de la pose de la grume sur ses appuis à son retour sur le plancher, le protocole est illustré sur une échelle de temps en figure 72 :

- **Étape Grindo 1*** : Prise de minimum 15 mesures⁴⁶ GrindoSonic® sur la grume posée sur les appuis définis pour le protocole statique. Les mesures sont prises uniquement en longitudinal dans le cas des essences de tsuga et de peuplier et en flexionnel et longitudinal dans le cas de l'épicéa. Dans le cas de la mesure flexionnelle, les appuis sont boulonnés.
- **Étape ELS1** : Réalisation de 5 cycles correspondants à un déplacement de $\frac{L}{350}$, L étant la portée.
- **Étape Grindo 2** : Prise de minimum 15 mesures GrindoSonic®.
- **Étape ELU** : Réalisation d'1 cycle jusqu'à un déplacement de L/350 suivi d'un cycle en force à l'ELU déterminé sur base de la force maximale enregistrée à l'étape 2 soit $F_{ELU} = 3,25 F_{\text{étape ELS1}}$.
- **Étape Grindo 3*** : Prise de minimum 15 mesures GrindoSonic®.
- **Étape ELS2** : Réalisation de 5 cycles jusqu'à L/350.
- **Étape Grindo 4*** : Prise de minimum 15 mesures GrindoSonic®.

⁴⁶ Afin d'avoir toujours un minimum de 10 coups pour l'analyse statistique, dans le but de réaliser une moyenne pertinente, après l'élimination des coups anormaux. (Les coups anormaux se ciblent lors du traitement des données sur base du graphique des FFT).

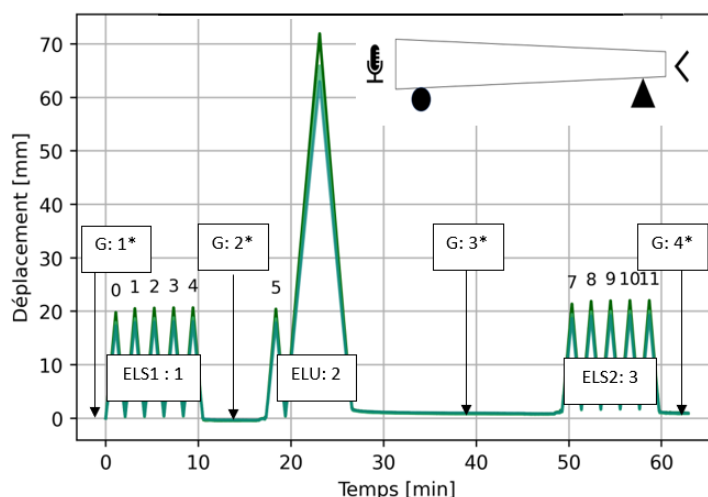


Figure 72: Protocole sur grume en analyse longitudinale (Réalisé à partir des illustrations de Dehaen et Ponthière)

Post-traitement

Le module de Young statique est déterminé comme étant le module moyen au cours des cycles de chargements sans prendre en compte le tassement. (C'est-à-dire le module à l'ELS 1 avec les cycles 1,2, 3 et 4, le module à l'ELU avec le cycle 6 et le module ELS2 avec les cycles 7,8,9 et 10 sur la figure 72 en ayant soustrait les tassements mesurés à l'aide des LVDT). Tous les détails de ce protocole sont énoncés dans le mémoire de Maxime DEHAEN et Pierre-Louis PONTHERIE [86].

Le module de Young dynamique se détermine, après avoir éliminé les mesures anormales, sur base de la fréquence propre moyenne mesurée par le GrindoSonic®. Celui-ci enregistrant 4 valeurs de fréquences par coups, le nombre de fréquences moyennes différentes liées à un essai peut être supérieur à 10, imposant un choix réfléchi de la fréquence propre sur base de différents critères. Ces critères ont été déterminés dans le chapitre 5 traitant des critères de ciblage de la fréquence propre. D'autres critères de sélection de la fréquence propre ont également été décelés au cours du post traitement des grumes. Les 5 critères les plus importants (et le pourcentage de fois qu'ils ont été parmi les critères décisifs pour une espèce) sont dans l'ordre décroissant :

- La fréquence de plus grande occurrence, c'est-à-dire celle enregistrée le plus de fois par le GrindoSonic®. (Dans le cas l'épicéa, ce critère a été utilisé 89% des cas, 87% des cas pour le tsuga et 55% pour le peuplier).
- La fréquence la plus basse, et au moins inférieure à 300Hz, dans le cas des dimensions des grumes testées (72,5% dans le cas du peuplier, 53% pour l'épicéa et 40% pour le tsuga).
- La fréquence d'amplitude maximale (72% dans le cas de l'épicéa, 68% dans le cas du tsuga et 37,5% pour le peuplier).
- La fréquence d'amortissement minimal (50% dans le cas de l'épicéa, 42,5 pour le peuplier et 0% pour le tsuga).
- Parmi les fréquences les plus basses, celle ayant le plus petit écart-type, c'est-à-dire la meilleure répétabilité (37,5% pour le tsuga, 28% pour l'épicéa et 7,5% pour le peuplier).

D'autres critères non relevés dans la précédente étude ont également été déterminés durant l'analyse des grumes, ce sont des cas plus isolés :

- Si le pic est très élargi, plusieurs fréquences sont associées à un même pic, il faut alors choisir la fréquence contenant le plus d'occurrences (10% dans le cas de l'épicéa et du peuplier, 0% pour le tsuga).
- Pour certaines grumes, les harmoniques sont plus excitées que la fréquence propre⁴⁷, dans ce cas, bien que perçue par le GrindoSonic®, ce n'est pas la fréquence propre qui a le plus d'occurrence ou le pic de plus grande amplitude... Les critères mentionnés ci-dessus sont de ce fait parfois à attribuer aux harmoniques de la fréquence propre⁴⁸ (30% des cas pour le peuplier, 12,5% pour le tsuga).
- Si le doute subsiste pour une étape, mais que les 3 autres ont bien été déterminées, il faut choisir la fréquence qui suit la tendance des fréquences des autres étapes (5% pour le peuplier et le tsuga, 3% pour l'épicéa).

Enfin, après le choix de la fréquence, il est bien évidemment pertinent de vérifier que celle-ci conduit à un module plausible (dans le cas des grumes entre 7 et 14 GPa).

À retenir :

Les critères de choix de la fréquence propre sont dans l'ordre décroissant :

- La fréquence de plus grande occurrence.
- La fréquence la plus basse (<300Hz dans le cas de la résonance longitudinale, 20Hz pour la résonance flexionnelle et donc non mesurable à l'aide du GrindoSonic®).
- La fréquence d'amplitude maximale.
- La fréquence d'amortissement minimal.
- Parmi les fréquences les plus basses, celle ayant le plus petit écart-type.
- Parmi les fréquences multiples apparaissant dans un pic élargi, celle contenant le plus d'occurrences.
- Les critères mentionnés ci-dessus sont parfois à attribuer aux harmoniques.
- La fréquence qui conduit à un module de Young dynamique plausible (dans le cas des grumes entre 7 et 14 GPa).

7.3 Résultats : caractérisation mécanique

Les différents résultats présentés dans les sections suivantes sont illustrés avec les graphiques issus des fiches récapitulatives des lots de grumes de chaque essence en Annexes 19 pour le tsuga, en Annexe 20 pour l'épicéa et en Annexe 21 pour le peuplier.

7.3.1 Module statique et le module dynamique

Pour les éprouvettes en bois, une bonne corrélation avait été trouvée entre valeurs de module de Young statiques globaux et les modules de Young dynamiques longitudinaux et flexionnels

⁴⁷ Le rapport entre harmoniques pour la fréquence longitudinale est un nombre entier, pour le flexionnel cela dépend des dimensions de la grume, ce critère est donc moins pertinent.

⁴⁸ On retrouve alors ensuite la fréquence propre par division entière dans le cas de la résonance longitudinale.

(Chapitre 6). Dans le cas des grumes, ce n'est plus le cas pour le tsuga et pour le peuplier et seul l'épicéa montre des résultats concluants. Et ce, que ce soit en comparant le module dynamique avec le module statique local ou avec le module statique global. Les figure 74 et figure 74 présentent les corrélations obtenues dans le cas du module statique global pour la première étape de chargement, les graphiques pour les autres étapes sont disponibles en Annexes 19, 20, 21 :

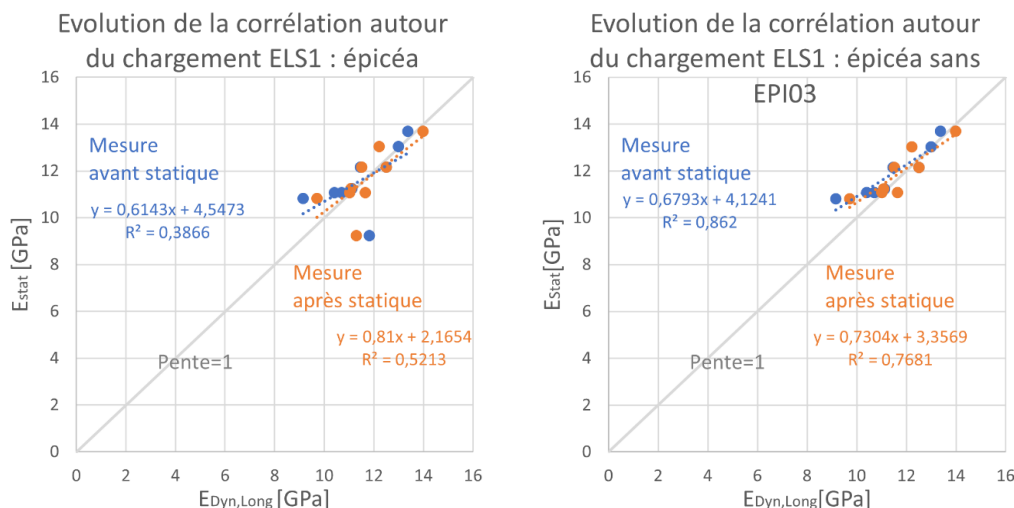


Figure 73: Corrélation entre les mesures statiques ELS1 et les mesures GrindoSonic® : épicéa.

Pour l'épicéa, la corrélation est uniquement faussée par une mesure, celle de la grume EPI03, la corrélation est, après avoir écarté cette mesure, similaire aux valeurs de la littérature rassemblées dans le tableau 16 en Annexe 13 ($R^2=0,86$). Soit le module dynamique, soit le statique de cette grume EPI03 ne sont donc pas corrects. Cependant, le spectre fréquentiel de cette grume ne porte pas à confusion, une seule fréquence se présente en temps que fréquence propre. Si l'erreur de mesure réside dans le module dynamique, cela peut alors être dû au fait que la conicité de cette grume est la conicité la plus importante mesurée, toutes essences confondues (23,4 mm/m). Les causes à écarter sont la courbure (25mm), la fente de cœur (15cm sur le gros bout) et le défilement (1,92cm/m), en raison d'autres grumes du lot possédant ces caractéristiques également. Ce sont pourtant les seuls défauts notés lors de l'inspection visuelle.

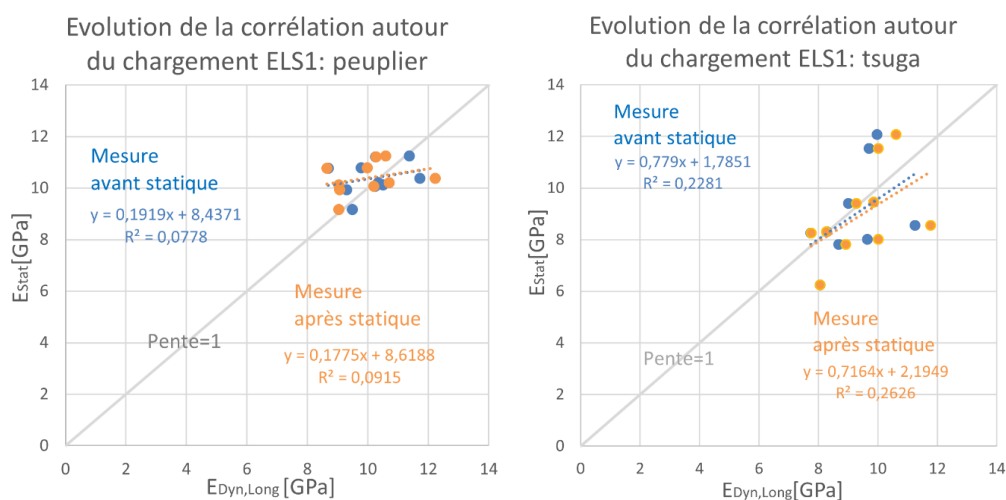


Figure 74: Corrélation entre les mesures statiques ELS1 et les mesures GrindoSonic® : peuplier et tsuga.

Pour le **Tsuga**, la corrélation est très mauvaise, pour ainsi dire inexistante. Cela est très certainement dû à la fente de retrait qui était présente sur toutes les grumes. En effet, la littérature nous apprend que la méthode ultrasonique ne fonctionne pas sur les poteaux fendus [63]. Cette méthode est en fait très similaire à la méthode IET, les différences étant la fréquence de l'onde transmise (plus élevée dans le cas de la méthode ultrasonique dont l'onde est induite à l'aide d'ultrasons et non par une impulsion) et la quantité mesurée qui est dans le cas de la méthode ultrasonique la vitesse, et dans le cas de la méthode IET la fréquence, les 2 valeurs étant liées pour des matériaux homogènes et isotropes (ce qui n'est pas le cas du bois) par la relation $v=2fL$.

Pour le **peuplier**, la corrélation est également mauvaise. Cela n'est pas dû à la conicité car celle-ci est faible ($<12\text{mm/m}$), ni à l'hygrométrie (semblable au lot d'épicéa) ni à la présence de nœuds, qu'ils soient morts ou sains (l'épicéa contenant 4 fois plus de nœuds en moyenne).

Il pourrait y avoir 4 causes à la mauvaise corrélation obtenue pour le peuplier :

Premièrement, les nombreux défauts des grumes qui font qu'elles sont toutes (sauf une) de classe C selon la norme européenne, et toutes de classe 3 selon la norme allemande (sauf 4 spécimens, qui sont de classe 2). Cependant, le lot de grumes d'épicéa est également mal classé selon les normes visuelles. Néanmoins, les tolérances étant différentes pour chaque essence, cela rend la comparaison difficile.

Deuxièmement, les grumes sont plus denses que l'essence d'épicéa. L'essence de peuplier est en outre un feuillu qui contient des vaisseaux et des rayons, ces facteurs peuvent également perturber le trajet des ondes dans le bois.

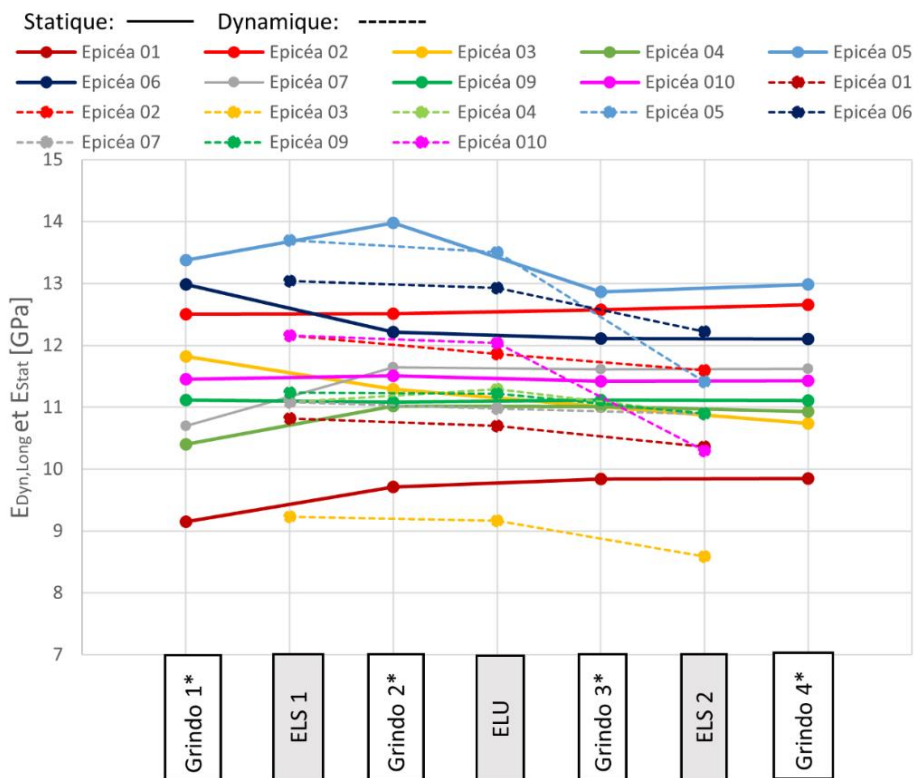
Troisièmement, l'élancement était plus important chez le peuplier et le tsuga, ce qui signifie que les appuis étaient plus éloignés, ce qui a pu exciter des fréquences parasites si la frappe n'était pas bien centrée.

Finalement, l'amortissement de cette essence est trop important. En effet, lorsque l'amortissement est important, il a un effet sur la fréquence d'oscillation (voir section 2.5.1), la fréquence mesurée n'est dès lors plus la fréquence propre et dépend de l'amortissement, or, l'amortissement dépend également du pic de fréquence, rendant le problème complexe. Dans le cas du peuplier, 3 des grumes présentent ce problème ($\xi = 0,19, \xi = 0,14, \xi = 0,22$, pour les peupliers PEU01, PEU03 et PEU05) contre 1 pour l'épicéa (avec un $\xi = 0,11$ pour l'EPI06) et 0 pour le tsuga.

De manière générale, une mauvaise corrélation peut également être due au petit nombre d'échantillons observés. En effet, nous disposons uniquement de 10 grumes par essence, qui plus est, ces grumes ont des modules très proches les uns des autres, il est donc moins aisé de trouver une corrélation sur un nuage de points si localisé.

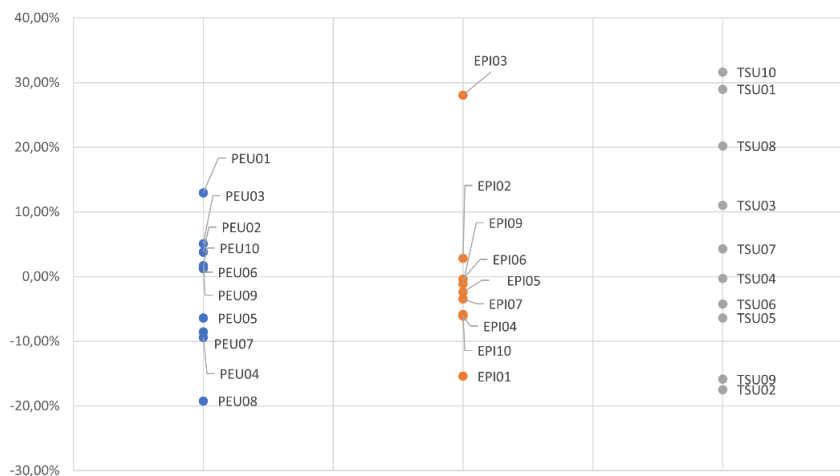
Néanmoins, si les corrélations ne sont pas satisfaisantes, le test présente des résultats tout de même intéressants. En effet, comme illustré sur la figure 75 et la figure 75, les valeurs dynamiques sont proches des valeurs statiques obtenues. La méthode IET peut dès lors être une bonne approximation (rapide et peu coûteuse) qui permettrait d'exclure les grumes de trop mauvaise qualité avant le protocole d'essai mécanique non-destructif statique en scierie.

Evolution des modules au cours des étapes: épicéa

Figure 75: Schéma représentant l'évolution des modules E_{stat} et $E_{dyn,long}$ au cours des étapes

La figure 76 montre que le taux d'erreur entre le module dynamique $E_{Dyn,Long}$ mesuré avec le GrindoSonic® juste après la pause de la grume sur les appuis du protocole statique et le module statique de l'étape ELS1 est aux alentours de $\pm 20\%$ pour les deux essences ne présentant pas de fissures.

Taux d'erreur de la méthode GrindoSonic par rapport à la méthode statique

Figure 76 : Pourcentage de différence entre modules E_{stat} et $E_{Dyn,Long}$: grumes

7.3.2 Le placement

La plupart des grumes d'épicéa testées⁴⁹ (8/9) présentent un effet de placement lors du premier chargement qui tend à diminuer l'amplitude des harmoniques, jusqu'à les éliminer totalement dans certains cas. Ce phénomène est présent indépendamment de la résolution fréquentielle des tests.

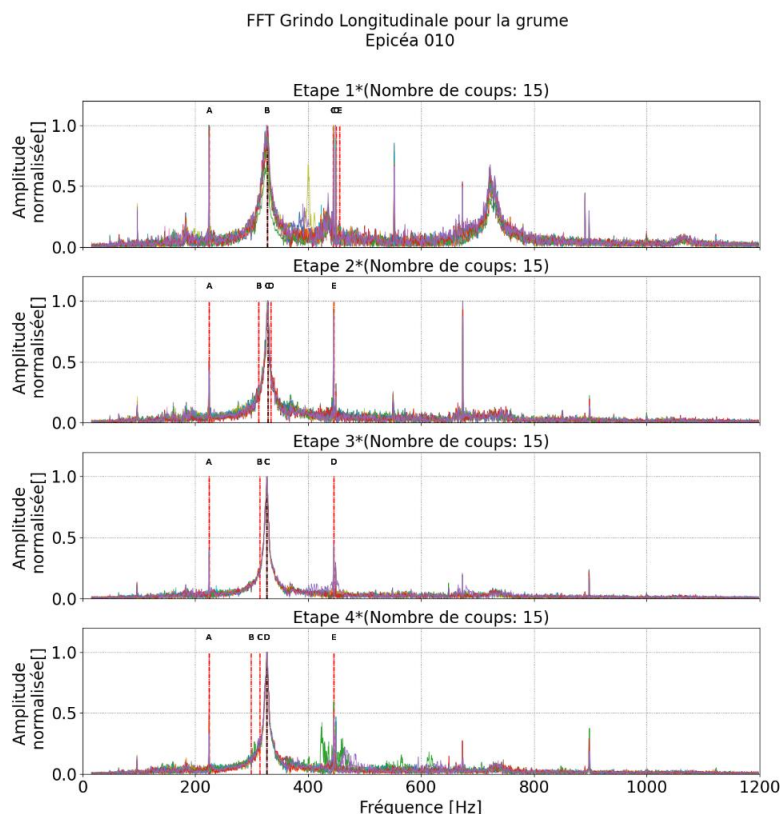


Figure 77: Exemple de FFT présentant les fréquences enregistrées pour la grume d'EPI10

Ce placement a pour effet de rendre la mesure d'amortissement et de fréquence propre plus répétable.

7.3.3 Résolution fréquentielle

Le lot de tsuga a été testé avec une résolution fréquentielle de 0,61Hz, toutes les autres grumes (à part EPI03 et EPI10) ont été testées avec une résolution de 12,21Hz.

Premièrement, pour les grumes testées avec la fréquence de résolution de 0,61Hz, une fréquence récurrente (224Hz) et ses harmoniques (449Hz, 674Hz ...) sont présentes pour chaque grume. Ces fréquences sont des pics très étroits (d'amortissement très faible, comme le pic 1 sur la figure 77). Les pics étant très étroits, ils ne sont pas enregistrés lorsque la fréquence de résolution est de 12,21Hz. Ces fréquences n'étant pas visibles pour les petites éprouvettes en bois ni sur les tests utilisant la configuration parfaite (voir section 7.1.3), mais étant à chaque fois identiques, leur origine est probablement due aux appuis du protocole statique. Il est d'ailleurs aisé de sentir les appuis vibrer lors des frappes. Malheureusement, quelques frappes sur les appuis n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse, les appuis étant trop difficilement mis en vibration.

⁴⁹ La grume EPI08 ayant été testée selon un autre protocole.

Deuxièmement, il est à noter que l'apparence de la FFT enregistrée à une fréquence de 12,21Hz peut être plus difficile à traiter. A titre de comparaison, la figure 78 montre les FFT d'une grume fournies dans le cas de l'épicéa, pour lequel une bonne corrélation a été trouvée et les FFT fournies d'une grume dans le cas du peuplier pour lequel aucune corrélation n'a été trouvée :

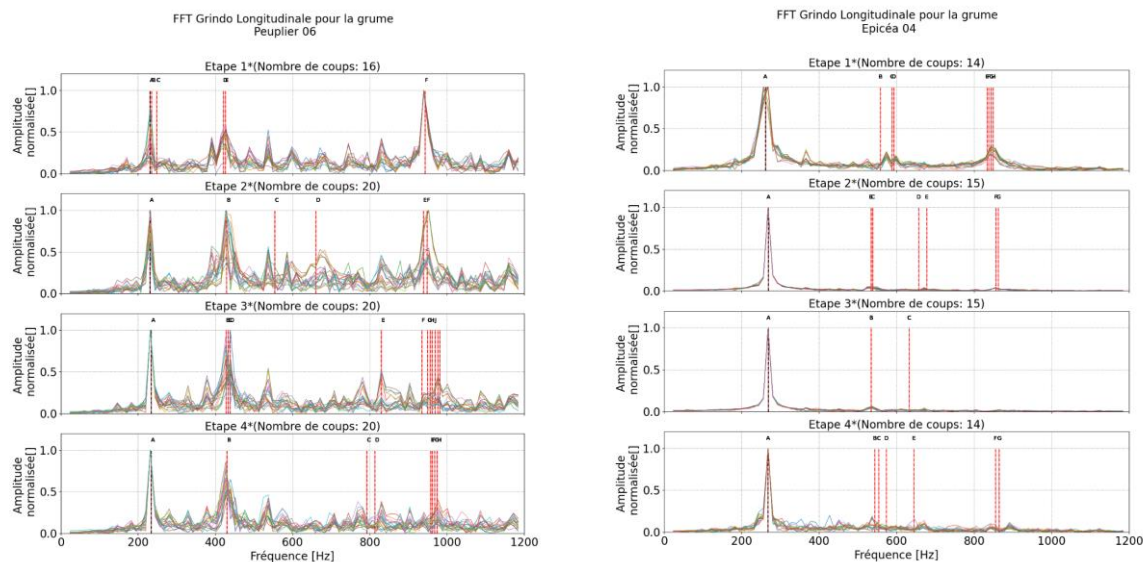


Figure 78: Graphique des FFT pour deux essences enregistrées avec une fréquence de résolution de 12,21Hz

Un signal peu propre (c'est-à-dire présentant de multiples pics parasites d'amplitudes conséquentes, comme le PEU06) peut dès lors être signe de non-performance de la méthode IET sur une essence en particulier. Cela n'est néanmoins pas lié aux défauts car les grumes de tsuga, présentant des fentes de pré-retrait longitudinales et de multiples nœuds, ne présentaient pas ces pics de fond parasites. De plus, le fait que les essences d'épicéa et de peuplier aient tous deux été testés avec une résolution de 12,21Hz, conduit à exclure la résolution comme cause de pics de fonds, la grume d'EPI04 (exemple parmi les autres) présentant un spectre de fréquence très clair.

Troisièmement, la résolution a cependant bien un impact sur la répétabilité des mesures. L'écart-type des valeurs de fréquence est, dans le cas d'une haute résolution, toujours inférieur à l'unité, alors qu'il atteint jusqu'à 2,76 dans le cas de la résolution de 12,21Hz pour l'épicéa. L'effet est d'autant plus important sur l'amortissement pour lequel l'écart-type est inférieur à 5 dans le cas de la haute résolution et supérieur à 10, mais pouvant atteindre des valeurs très élevées (en raison des outliers) dans le cas de la basse résolution (12,21Hz).

Tableau 11: Tableau reprenant les différences d'étalement des mesures dans le cas d'une résolution à 12,21Hz et dans le cas d'une résolution à 0,61Hz

Résolution (essence)	Écart-type moyen f	Écart-type max f	Écart-type amortissement	Écart-type max amortissement
12,21Hz (épicéa)	1,116	2,76	25,86	108,59
0,61 Hz (tsuga)	0,223	0,54	2,276	3,25

Ces valeurs d'étalement de fréquence ne portent pas préjudice dans le cas de la fréquence, et donc du calcul du module de Young; cependant, ils posent questionnement quant à la pertinence des mesures d'amortissement en résolution 12,21Hz.

7.3.4 Influence des paramètres connus

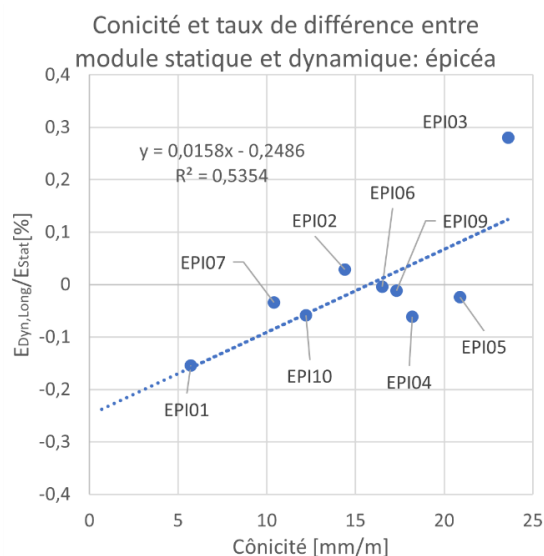


Figure 79: Influence de la conicité sur le rapport des modules E_{Stat} et $E_{Dyn,Long}$

Pour l'essence d'épicéa ayant montré les résultats les plus concluants face à la méthode IET, l'impact de la conicité est analysé. Sur un échantillon de cette taille, il n'est bien évidemment pas possible de tirer de véritables conclusions. Il est néanmoins possible d'envisager une interprétation.

La figure 79 montre que la conicité semble exercer une influence sur le taux de différence entre module statique et dynamique ($\frac{E_{Dyn,Long}}{E_{Stat}}$). Cela semble évident étant donné que module statique et dynamique se basent tous les deux sur l'hypothèse de non-conicité des grumes. La conicité peut dès lors se ressentir plus rapidement sur l'un des modules.

En conclusion

La méthode IET procure une bonne corrélation pour une des essences, celle d'épicéa. La fente longitudinale des spécimens de tsuga est une raison certaine du non-fonctionnement de la méthode [63]. La conicité pourrait également avoir un impact à partir de 23mm/m.

Le fait que le peuplier fasse partie de l'essence des feuillus fait partie des potentielles causes de l'échec de la méthode IET sur ce lot. La méthode doit donc encore être testée sur d'autres essences ou sur les mêmes grumes après séchage afin de la valider entièrement.

La méthode peut néanmoins permettre une bonne estimation du module de Young permettant une pré-sélection rapide et peu coûteuse.

La résolution fréquentielle utilisée n'est pas discriminante pour le calcul du module de Young, néanmoins, réaliser les expériences avec une meilleure résolution (0,61Hz) donne une meilleure répétabilité de la fréquence et surtout de l'amortissement. Lors de la réalisation d'essais avec cette résolution, il faudra alors porter une attention particulière à ne pas choisir la fréquence parasite de 224Hz comme fréquence propre.

Il est possible, dans le cas de grumes de mêmes dimensions que celles testées dans cette campagne de tests, d'avoir un amortissement trop important faussant la valeur de fréquence propre obtenue (effets viscoélastiques trop importants).

Dans le cas de l'épicéa, la conicité pourrait avoir un impact sur la mesure de module de Young statique ou dynamique.

7.4 Résultats : endommagement mécanique

L'objectif de ces expériences est également de déterminer l'endommagement au cours des étapes du protocole statique. À titre de comparaison, plusieurs facteurs non-dynamiques nous permettent de savoir s'il y a eu endommagement ou non :

- Une grume par essence est portée à la rupture.
- 3 grumes de l'essence d'épicéa (EPI03, EPI05 et EPI10) ont subi une flèche plus importante, laissant fortement supposer la présence d'endommagement mécanique.
- Certaines grumes présentent, sur la courbe force-déplacement associée au chargement statique, un palier plastique (changement de pente élastique) ou une hystérèse (surface plus importante couverte par la courbe force-déplacement) ou bien encore une flèche résiduelle importantes, cela laissant également supposer la présence d'un endommagement.

C'est sur base de ces considérations que l'analyse des données à des fins de détection d'endommagement a été réalisée. La courbe force-déplacement de 2 grumes d'épicéa est présentée figure 80 : EPI05 est visiblement endommagé et EPI07 ne l'est probablement pas.

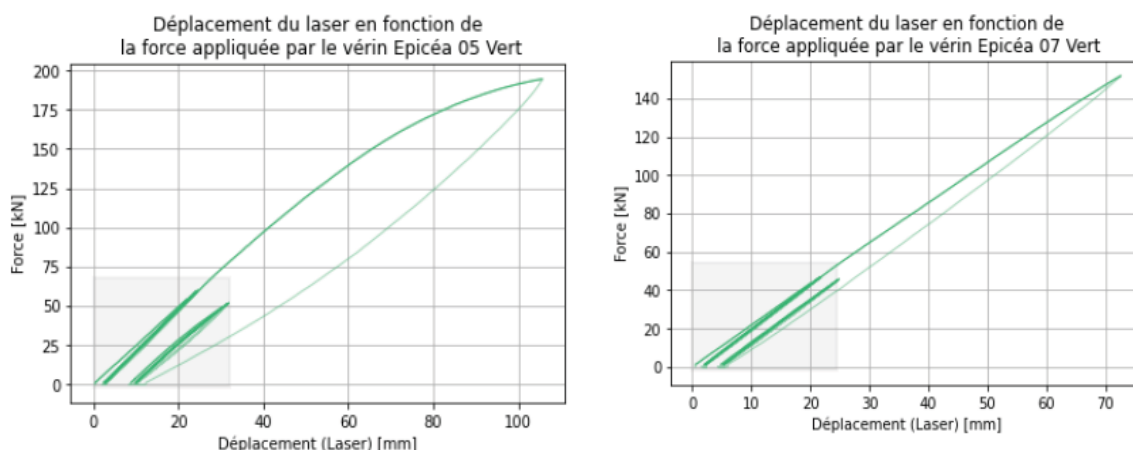


Figure 80: Exemple de courbes force déplacement avec et sans endommagement (Dehaen et Ponthière)

Le lot de grumes de peuplier ne présentant pas une bonne corrélation, ne répond pas non plus, sans surprises, aux observations concernant l'endommagement. Cependant, l'essence de tsuga, pour laquelle nous connaissons l'origine de l'échec de la méthode IET dans la détermination du module de Young, suit les mêmes conclusions que l'essence d'épicéa.

7.4.1 Variation de module dynamique longitudinal au cours du protocole

Il avait été observé sur les éprouvettes en bois, que le module $E_{\text{Dyn,Long}}$ chutait beaucoup moins vite que les modules E_{stat} et $E_{\text{Dyn,Flex}}$. Une diminution du module $E_{\text{Dyn,Long}}$ entre la première et la dernière étape du protocole sur grumes est donc un facteur critique témoignant de l'intégrité ou non de la grume.

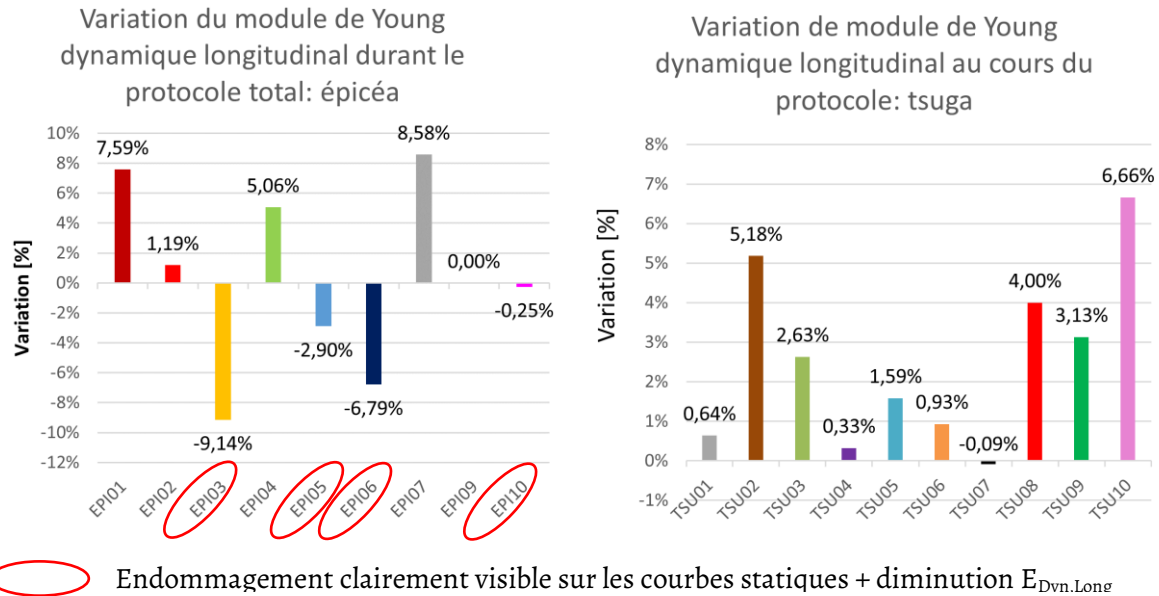


Figure 81: Évolution de $E_{Dvn,Long}$ entre le début et la fin du protocole : épicéa et tsuga

Le cas de l'épicéa, figure 81 montre que ce sont bien les grumes EPI03, EPI05 et EPI10, ayant subi une flèche et une force plus importante lors du protocole, qui présentent une baisse de module dynamique $E_{Dvn,Long}$. Nous remarquons que la grume EPI06 a également subi une baisse de module, cet endommagement peut également être visible sur l'hystérèse de la courbe statique de force-déplacement.

Les grumes de tsuga ne présentent pas d'anomalies sur la courbe force déplacement, elles ne sont donc pas non plus ciblées par une baisse du module $E_{Dvn,Long}$.

7.4.2 Variation de module à l'ELU

Si un endommagement survient, il est plus probable qu'il survienne lors de l'étape à l'ELU, correspondant au chargement le plus important.

La figure 82 montre que certaines grumes présentent une diminution de leur module $E_{Dvn,Long}$ lors de l'étape ELU, mais semblent récupérer en rigidité lors du 2^{ème} chargement ELS étant donné qu'au final le bilan est positif. Il est aussi possible que ce faible pourcentage de perte de module (<0,5%) soit simplement dû à la précision des mesures et aux effets de moyenne sur les 15 essais réalisés pour l'étape.

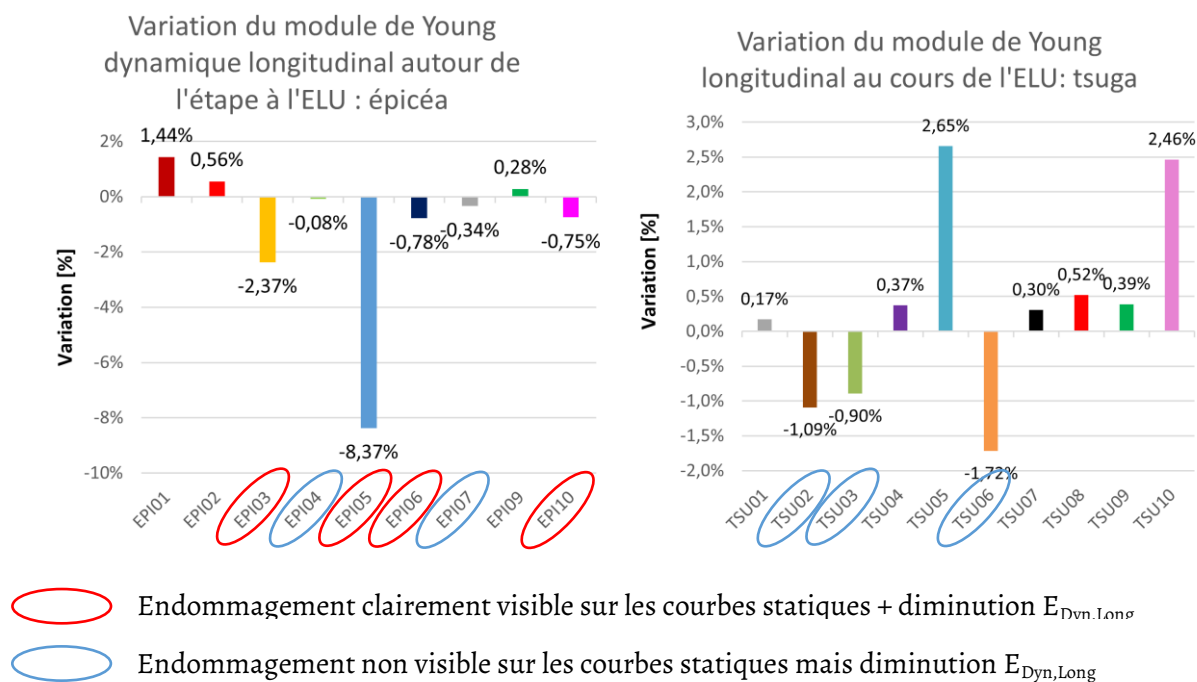


Figure 82: Graphique de la variation de $E_{Dyn,Long}$ autour de l'ELU : grumes épicéa et tsuga

La figure 83 indique que de manière générale, la première mesure, avant le 1^{er} chargement, peut être remise en cause. En effet, une très grande variation de module dynamique se produit autour de l'étape ELS1. En réalité, cette 1^{ère} mesure ne correspond pas aux mêmes conditions d'appuis que les autres mesures, étant donné que le premier chargement enfonce la grume dans ses appuis.

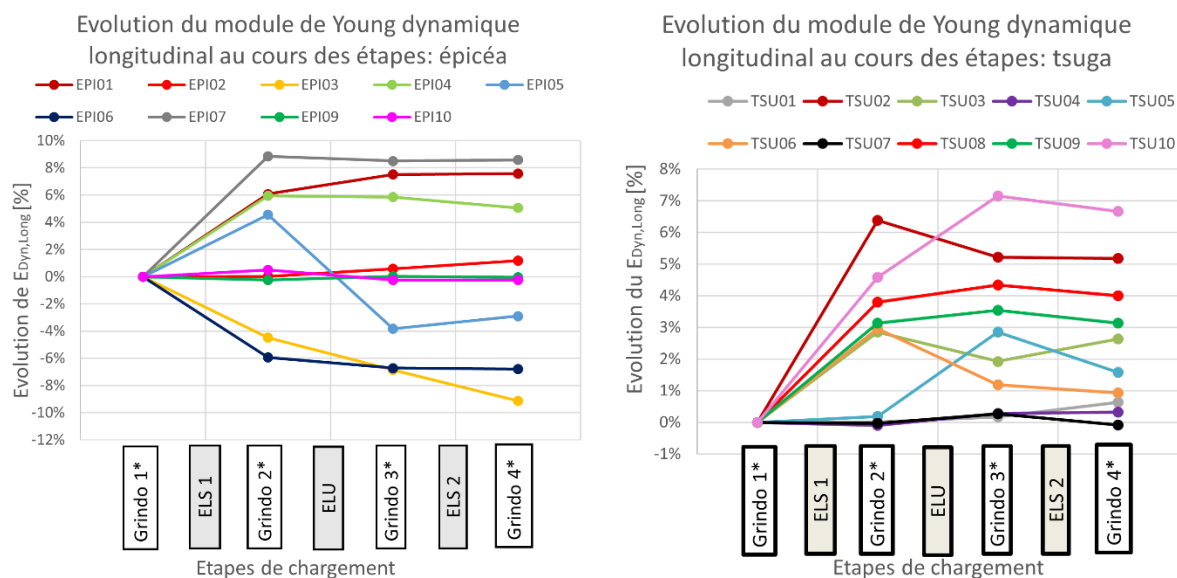


Figure 83: Évolution de $E_{Dyn,Long}$ au cours des étapes : épicéa et tsuga

7.4.3 Variation de l'amortissement longitudinal au cours du protocole

Si des faibles variations de modules peuvent être mises sur le compte des erreurs de précision de mesure et sur l'enfoncement de la grume dans ses appuis, il est alors intéressant de coupler l'indicateur « variation de module » avec un autre indicateur améliorant la certitude des conclusions sur l'endommagement.

Il avait été observé sur les éprouvettes de petites dimensions que l'amortissement augmentait au cours des étapes de chargement, ce phénomène était surtout visible en flexionnel. Le cas des grumes en résonance longitudinale ne semble pas suivre la même tendance.

Sur la figure 84, Dans le cas de l'épicéa, pour lequel l'endommagement est certain pour les grumes EPI03, EPI05, EPI06 et EPI10, non seulement c'est une diminution de l'amortissement qui est enregistrée, sauf dans le cas de la grume EPI05. Mais également d'autres grumes présentent une diminution d'amortissement. Même en ignorant le comportement des grumes EPI04 et EPI07, présentant un écart-type très mauvais (108 et 84), l'interrogation subsiste pour la grume EPI01.

Quant au tsuga, pour qui la fréquence de résonance est adéquate (0,61Hz), 3 diminutions et 2 augmentations conséquentes d'amortissement sont présentes. Ne permettant de tirer aucune conclusion.

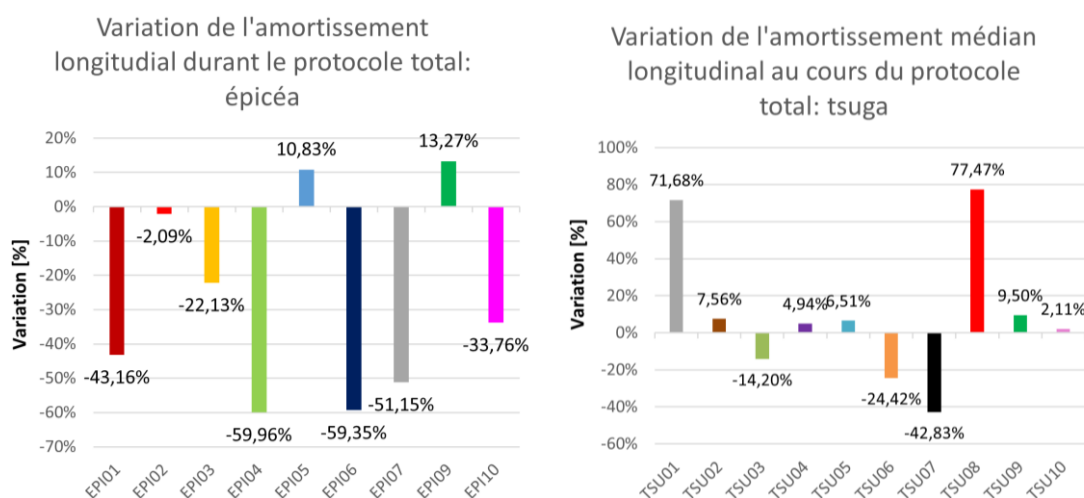


Figure 84: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours du protocole : épicéa et tsuga

La figure 85 montre que la variation d'amortissement ne se fait pas non plus, comme pour le module de Young dynamique, nécessairement autour de l'ELU. Par exemple, la variation de l'amortissement pour la grume d'EPI01 est liée à la première étape de chargement et ne correspond donc pas à de l'endommagement, en effet autour de l'ELU sa variation de module est positive alors que le bilan total est négatif. Pour le tsuga, les grumes TSU03, TSU06 et TSU07 subissent bien cette variation lors de l'ELU.

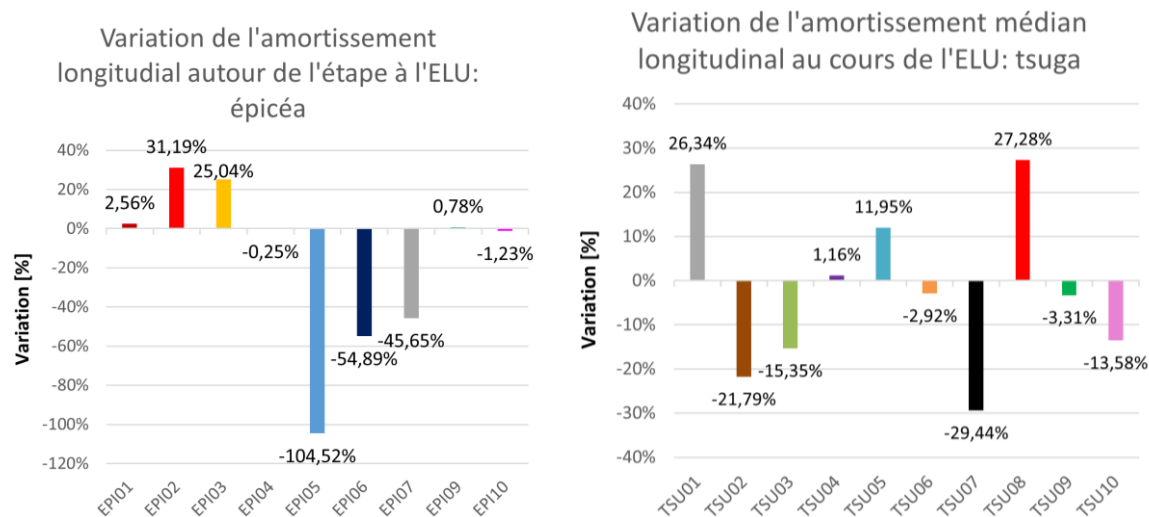


Figure 85: Variation de l'amortissement longitudinal autour de l'étape ELU : épicéa et tsuga

De manière générale, les variations de l'amortissement sont incertaines, et ce, peu importe la résolution fréquentielle (0,61Hz ou 12,21Hz) utilisée. De plus, aucun pattern ne se dégageant au sein des lots de grumes, et les grumes endommagées ne suivant pas une même tendance, aucun critère d'endommagement ne peut être affirmé avec certitude concernant l'amortissement de l'onde.

À retenir sur l'endommagement des grumes :

Les mesures GrindoSonic® n'étant pas réalisables durant le protocole en scieries, seules les mesures avant et après protocole seront examinables.

Le phénomène de placement qui survient lors de la première étape, ajouté aux imprécisions de mesures d'amortissement lors de l'utilisation de la résolution fréquentielle de 12,21Hz comme paramètre de test, rendent très incertaine l'analyse de l'endommagement. L'amortissement n'est donc soit pas un bon indicateur, soit son fonctionnement doit encore être investigué avec une meilleure résolution.

Une baisse de module de Young dynamique indique néanmoins un possible endommagement.

Ces résultats sont à approfondir sur d'autres essences résineuses, ne présentant pas de fente longitudinale et en effectuant les essais avec une résolution de fréquence de 0,61Hz.

7.5 Étude spécifique : résonance flexionnelle

Bien que la fréquence à obtenir pour des éléments de la masse et des dimensions des grumes soit trop faible par rapport à la capacité de l'appareil, des expériences sont également effectuées sur les grumes d'épicéa à des fins de détection de l'endommagement.

La fréquence harmonique est prise comme le pic de plus grande amplitude des FFT.

De manière générale, le signal de la FFT est plus propre (pics bien marqués et peu de fréquences parasites) lorsque la fréquence de résolution est de 0,61Hz (pour les grumes EPI10 et EPI03).

De plus, il n'y a pas de redondance entre les fréquences observées en longitudinal et en flexionnel pour une même grume, ce qui signifie que les deux expériences n'excitent pas de fréquences communes.

Etant donné que toutes les grumes respectent les critères de non-cisaillement et non rotation inertielle des sections (voir section 2.2.2 : $1/s < 0,4$ et $\gamma/s < 0,4$), la formule de Euler-Bernoulli dans le cas de la résonance flexionnelle pour calculer le module $E_{\text{Dyn, Flex}}$ peut être utilisée sans risque.

Les harmoniques de la fréquence propre en résonance flexionnelle ne suivent pas toujours la même tendance que la fréquence propre en longitudinal (croissance, décroissance, constance) au cours des étapes du protocole. Seules 5 grumes sur les 9 grumes d'épicéa testées avec ce protocole présentent la même tendance que la fréquence longitudinale, ce qui ne permet pas de faire des hypothèses à ce sujet.

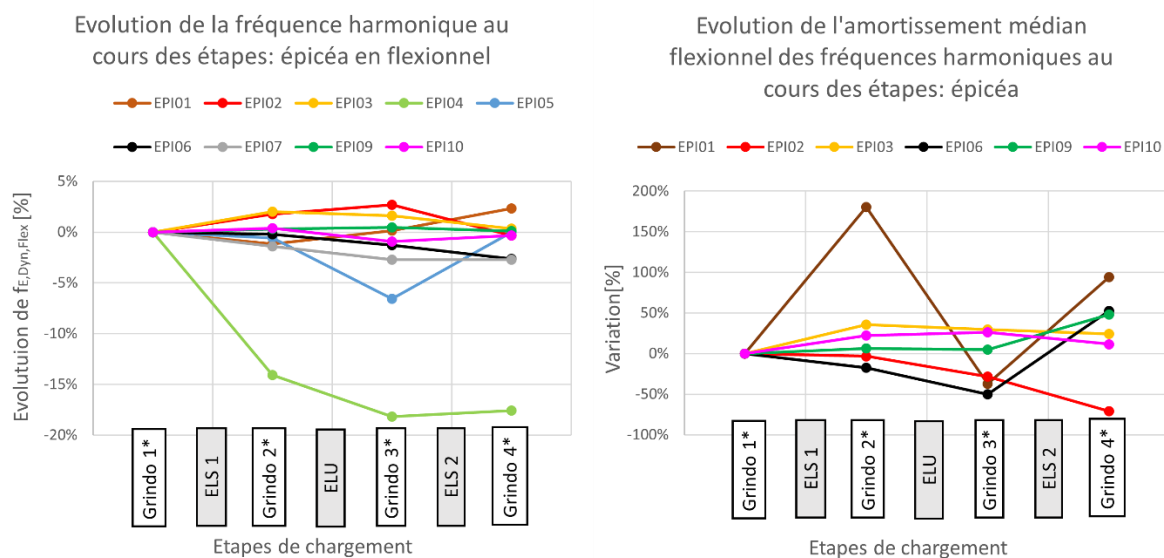


Figure 86 : Evolution de l'amortissement et de la fréquence harmonique au cours des étapes du protocole épicéa en flexionnel

Concernant l'amortissement au cours des étapes du protocole, après avoir éliminé les courbes présentant des valeurs absurdes, toutes les courbes présentent une augmentation finale de la valeur d'amortissement (sauf EPI02) et aucun lien ne semble pouvoir être fait sachant que les grumes EPI03, EPI05, EPI06 et EPI10 sont endommagées.

De plus, afin d'explorer la possibilité d'une diminution d'amplitude des harmoniques au cours des étapes du protocole, les FFT n'ont pas été normées. Cette hypothèse n'est malheureusement pas concluante. Cependant, la répétabilité de l'amplitude confirme l'utilité du système de mouton.

Les harmoniques pour retrouver la fréquence propre

Les différentes harmoniques sont plus faciles à percevoir lorsque les tests ont été réalisés avec une résolution de 0,61Hz. Les rapports entre harmoniques sont nécessaires pour en déduire la fréquence propre. Ces rapports dépendent des dimensions de la grume en question et sont fort différents d'une grume à l'autre. Ils peuvent être déterminés par scan des grumes, mais cela nécessite de faire une hypothèse sur le Module de Young. Cela rend de ce fait l'incertitude sur la fréquence propre plus importante que dans le cas d'une mesure en résonance longitudinale.

Expérimentalement, les rapports entre harmoniques sont très peu constants, et ce parfois même au sein d'une même grume aux différentes étapes du protocole. Toutes grumes confondues, voici les rapports découverts (ils démarrent probablement à la 3^{ème} ou 4^{ème} harmonique):

6~6,3 : 7,45 : 9,2~10,2 : 11,4~12,2 : 13,5~13,7 : 15,9 : 16,83~17,39

À retenir :

L'analyse en résonance flexionnelle n'est pas du tout concluante pour les essais et ce, ni en termes de variation de fréquence, ni de variation de l'amortissement, ni d'amplitude des harmoniques. La résonance longitudinale est donc bien plus intéressante.

Le mouton parvient bien à normaliser l'amplitude de la frappe.

7.6 Étude spécifique : Épicéa 08

Afin de garder des conditions semblables avant et après protocole, un protocole modifié spécifique à la grume d'EPI08 est effectué. Le choix des conditions ne dépendant dès lors plus du protocole statique, les meilleures conditions déterminées lors des tests préliminaires ont été adoptées (voir section 7.1.3).

7.6.1 Procédure

Pour cet essai exploratoire, des mesures avant et après protocole sont prises en positionnant la grume sur des cordes elles-mêmes tenues par des suspentes espacées de 95cm. La grume est disposée aux endroits de ses nœuds d'oscillation libre, c'est-à-dire à une distance de 22,4% de la longueur totale de la grume.

Les essais sont pris en longitudinal et en flexionnel, au piézomètre et avec une résolution de 0,61 Hz.

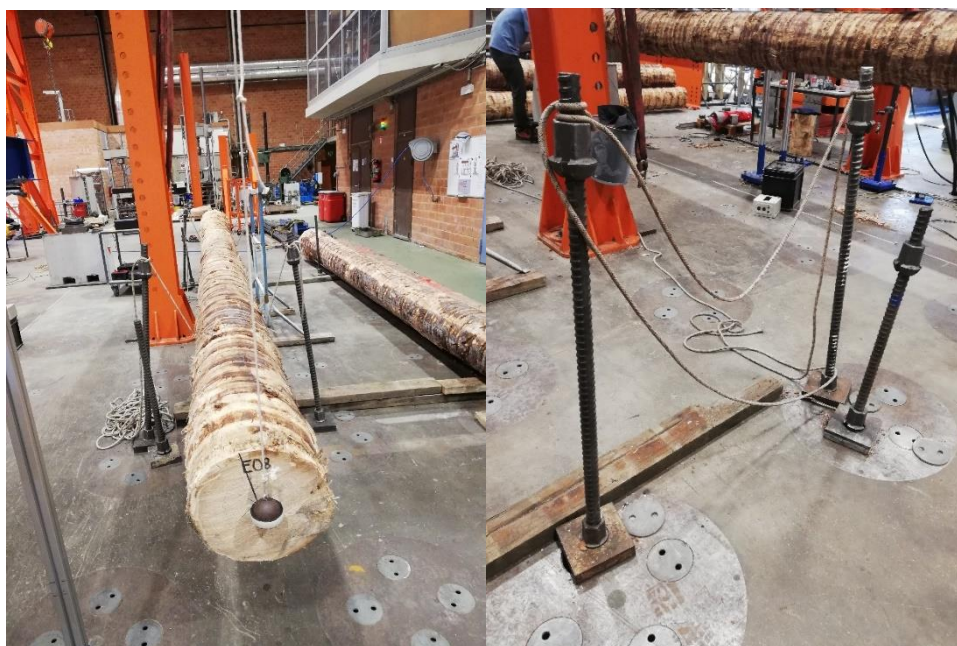


Figure 87: Grume d'épicéa posée sur le support en corde avant sa pose sur le banc d'essai.

Étapes :

- **Étape Grindo 1*** : Prise de minimum 15 mesures longitudinales et 15 mesures flexionnelles au GrindoSonic® sur la grume posée sur les cordes.
- **Précédent protocole** (mesures longitudinales et flexionnelles au piézomètre et non au micro)
- **Étape Grindo 6*** : Prise de minimum 15 mesures GrindoSonic® sur la grume posée sur les cordes.

7.6.2 Résultats

	$E_{\text{Dyn,Long}}$ [GPa]	Amortissement [Hz]	Ecart type amortissement [Hz]	$f_{\text{Dyn,flex}}$ [Hz]	Amortissement [Hz]	Ecart type amortissement [Hz]
Étape 1*	12,2	5,32	0,04	245,1	6,48	0,19
Étape 2*	11,7	8,17	0,3	309,5	9,36	0,41
Étape 3*	12	14,4	12,1	249,3	10,13	0,79
Étape 4*	11,7	7,94	0,12	2481	9,05	0,66
Étape 5*	11,7	7,81	0,19	249,2	10,6	2,4
Étape 6*	12,2	5,45	0,07	244,8	6,61	0,22

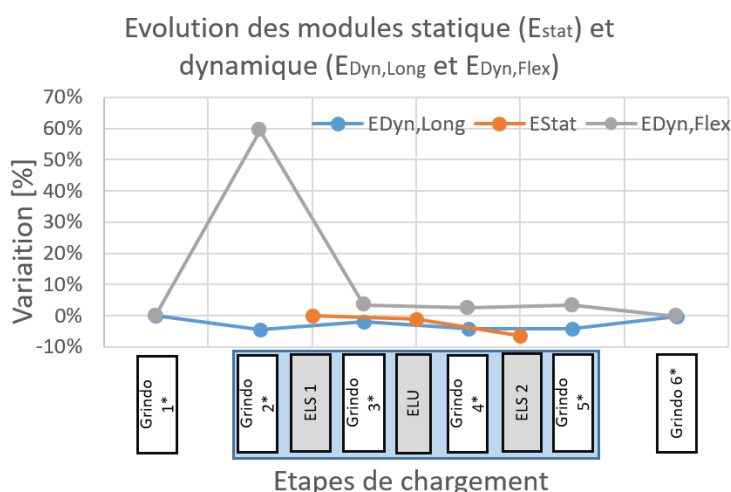


Figure 88: Évolution des modules E_{Stat} , $E_{\text{Dyn,Long}}$ et $E_{\text{Dyn,Flex}}$ au cours des étapes du protocole : piézomètre : l'Épicéa 08

En longitudinal :

Concernant la précision des mesures, même pour la configuration longitudinale, les appuis ont un léger impact sur la fréquence et l'amortissement mesurés, passant de $f=276\text{Hz}$ et $D=5,32\text{Hz}$ sur les appuis à $22,4\%$ à $f=270\text{Hz}$ et $D=8,17\text{Hz}$ sur les appuis du protocole statique. Cette différence de fréquence ne conduit qu'à une différence de module de Young de $0,5\text{Hz}$ ce qui est de l'ordre de l'erreur expérimentale. La répétabilité de l'amortissement est légèrement meilleure (facteur 10) pour le cas sur cordes. Cependant un écart-type de $0,1\text{Hz}$ pour les valeurs d'amortissements sur appuis du banc statique est déjà largement suffisant.

La grume ne semble pas être endommagée avec les informations que nous procure ce test. En effet, que ce soient les mesures sur corde ou sur banc de flexion, les deux gardent, avant et après protocole

expérimentales

(étape 1* vs 6* et étape 2* vs 5*), les mêmes valeurs de module et d'amortissement (toute différence étant de l'ordre de la précision de mesure et de l'impact de la moyenne faites sur 10 coups).

En flexionnel :

Concernant la précision des mesures, elle est similaire entre la prise sur corde et la prise sur le banc d'essai, néanmoins elle est moins bonne que la méthode de résonance longitudinale. En outre les informations sont les mêmes, les fréquences propres et l'amortissements restent constant avant et après le protocole ce n'est plus le cas pour la mesure sur appuis, faisant face à une valeur aberrante.

En longitudinal :

La différence de fréquence entre conditions parfaites et conditions du protocole statique n'interfère pas significativement sur le module de Young dynamique longitudinal. Les valeurs d'amortissement sont meilleures en conditions parfaites, mais sont déjà très bonnes sur les appuis du protocole statique.

En flexionnel :

La résonance flexionnelle est moins précise et ne permet pas d'avoir une idée du module de Young, elle a donc peu d'intérêt.

Cette méthode permet d'être certain d'avoir les mêmes conditions avant et après protocole statique.

8 Impact de la conicité sur les valeurs expérimentales

Afin de mieux comprendre l'impact de la conicité sur des éléments parfaits (c'est-à-dire sans nœud, sans écorce, de mêmes dimensions au sein d'un même lot...) mais de volume cylindrique ou conique, le protocole réalisé sur les grumes est également effectué sur des éprouvettes de plus petites dimensions.

8.1 Matériel

Les éprouvettes sont découpées dans les grumes EPI03, EPI05 et EPI10. Pour chaque grume, 2 éprouvettes parallélépipèdes rectangles sont découpées, 2 cylindres et 4 cônes tronqués de 2 conicités différentes les dimensions moyennes par grume sont reprises dans le tableau 12, les éprouvettes coniques sont présentées figure 89 :

Tableau 12: Tableau reprenant les dimensions et caractéristiques moyennes des 4 différents types d'échantillons par grume débitée

	Poids [g]	Dim L [mm]	Dim b [mm]	Dim h [mm]	Dim d _{L/2} [mm]	Conicité [mm/m]	Hygro [%]
Grume Épicéa 03							
Parallélépipède	39,94	300	29,1	10,27	/	/	13,9
Cylindre	105,92	500	/	/	21,6	/	17,25
Petit cône	105,5	500	/	/	215	27,98	10,7
Gros cône	100,9	500	/	/	21,55	47,98	10,55

Grume Épicéa 05							
Parallélépipède	45,75	300	29,7	10,65	/	/	19,5
Cylindre	103,28	500	/	/	22,25	/	15,95
Petit cône	97,93	500	/	/	20,85	26,62	10,65
Gros cône	95,23	500	/	/	20,84	48,6	10,6
Grume Épicéa 10							
Parallélépipède	40,28	300	29,4	10,27	/	/	14,9
Cylindre	88,27	500	/	/	21,5	/	19,65
Petit cône	87,27	500	/	/	20,66	29,44	10,35
Gros cône	86,75	500	/	/	20,47	50,47	10,65



Figure 89: Cônes en configuration dynamique flexionnelle (Gauche), Différentes conicités : Cylindre, petite conicité, grande conicité (Droite)



Figure 90: Appuis en aluminium pour les tests statiques (Gauche), éprouvette avant son chargement statique (Droite)

Afin de permettre les essais statiques à l'aide de la machine Zwick® sur des éléments cylindriques ou coniques, la configuration utilisée pour les éprouvettes parallélépipèdes rectangles et décrite dans la section 4.1.4 a dû être modifiée :

- Création de nouvelles plaquettes en aluminium de non-poinçonnement de forme arrondie et conique afin de maintenir l'éprouvette en place et prévenir son roulement dans le plan transversal. Celles-ci sont dès lors posées sur l'éprouvette avant le chargement pour les plaquettes supérieures et collées à la machine Zwick® à l'aide de papier double face pour les appuis inférieurs (figure 90).
- Les cylindres et les cônes étant plus longs que les éprouvettes parallélépipèdes rectangles, les distances entre appuis et zones de chargement sur la Zwick® sont différents, passant de 6-6-6-6 cm à 5-13,34-13,34-13,34-5 cm (figure 91).

expérimentales

- Le chargement des cônes tronqués n'étant pas réalisable en flexion 4 points, un des appuis finissant par ne plus être en contact avec la section la plus fine du cône. La flexion 3 points est préférée avec pour espacement entre les appuis de chargement 5-20-20-5 cm.
- La vitesse de chargement pour les sections circulaires change également, passant de $0,003 \cdot h$ pour les éprouvettes parallélépipèdes rectangles, à $0,003 \cdot 0,88 \cdot d$ pour les cylindres et les cônes étant approximés comme tels.

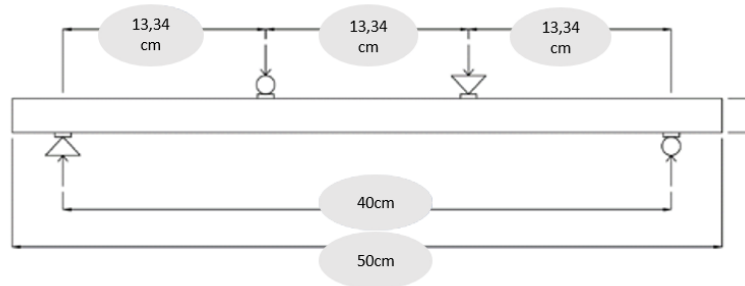


Figure 91: Position des appuis pour les éprouvettes cylindriques en flexion statiques (illustration inspirée de la norme)

8.2 Procédure

Pour la prise de mesures dynamiques, le protocole est le même que précédemment pour les éprouvettes parallélépipède rectangle et les cylindres. Dans le cas des éprouvettes coniques, les mesures longitudinales ont été prises au piézomètre (les mesures au micro ne donnant pas de résultats concluants) à la fois en donnant l'impulsion du côté le plus large et mesurant du côté le plus fin et inversement. En flexion, l'impulsion est toujours donnée au centre et la mesure au micro du côté du plus gros bout, des expériences préliminaires ayant montré que la position de la mesure ne change rien pour la résonance flexionnelle sur un cône tronqué. Les étapes du protocole sont schématisées sur la figure 92 :

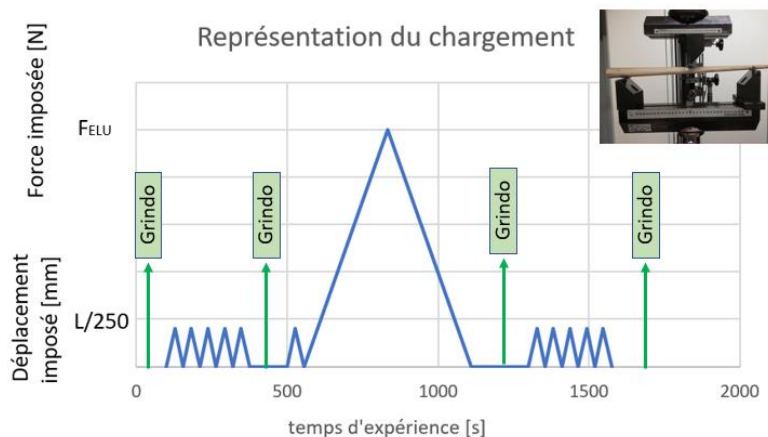


Figure 92: Représentation du protocole pour les éprouvettes coniques et cylindriques

- **Étape Grindo 1 :** Prise de mesures GrindoSonic® sur l'éprouvette posée sur un mousse dans le cas de la méthode de résonance longitudinale (10 mesures sur éprouvette symétrique, 20 sur les cônes) et sur les appuis en plastique GrindoSonic® (comme présenté à la figure 89) pour la méthode de résonance flexionnelle (10 mesures).

- **Étape ELS1** : Pose de l'éprouvette sur la Zwick®, réalisation de 5 cycles correspondants à un déplacement de $\frac{L}{250}$, L étant la portée⁵⁰.
- **Étape Grindo 2** : Prise des 20 ou 30 mesures GrindoSonic® comme en étape 1.
- **Étape ELU** : Pose de l'éprouvette sur la Zwick® et réalisation d'1 cycle jusqu'à un déplacement de $L/250$ suivi d'un cycle en force à l'ELU, déterminé sur base de la force maximale enregistrée à l'étape 2 soit $F_{ELU}=3,25 F_{\text{étape ELS1}}$.
- **Étape Grindo 3** : Prise des 20 ou 30 mesures GrindoSonic® comme en étape 1.
- **Étape ELS2** : Pose de l'éprouvette sur la Zwick® et réalisation de 5 cycles jusqu'à une flèche de $L/250$.
- **Étape Grindo 4** : Prise des 20 ou 30 mesures GrindoSonic® comme en étape 1.

Une attention toute particulière est portée, lors de la pose des éprouvettes cylindriques et coniques, afin qu'elles soient toujours chargées selon le même axe. Pour ce faire, les axes sont tracés sur les éprouvettes. Dans la même logique, les mesures GrindoSonic® sont également prises selon le même axe que l'axe de chargement statique.

8.3 Résultats

Éprouvettes parallélépipèdes :

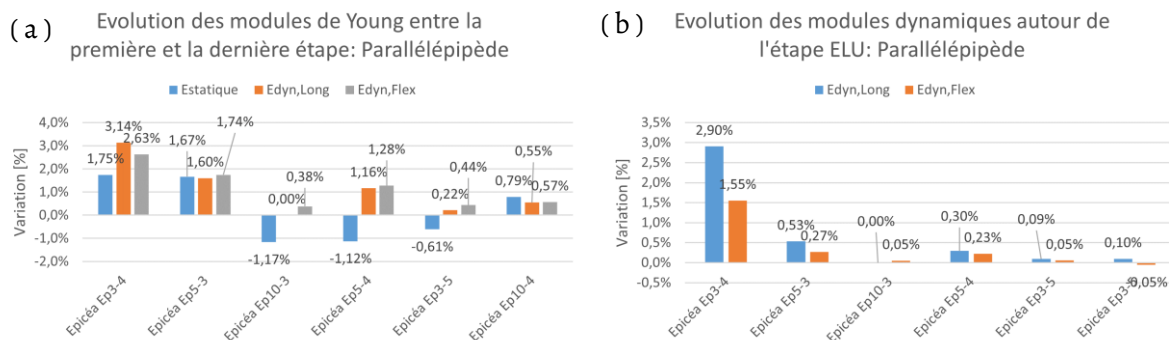


Figure 93: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Parallélépipède rectangle

La figure 93 (a) montre que les deux variantes du module dynamique (longitudinal et flexionnel) présentent tous deux une augmentation entre la première et la dernière étape du protocole, peu importe l'éprouvette testée. Cela indique que les deux méthodes présentent la même sensibilité aux effets du chargement. En outre, cette augmentation est plus importante lorsque le module statique augmente également. Cela rappelle l'observation précédemment faite (section 6.4) : le module dynamique présente moins rapidement de variations de rigidité que le module statique. Un module dynamique diminuant pourrait dès lors suspecter la présence d'endommagement. Cependant, dans ce cas-ci, pour les faibles déplacements imposés, cette augmentation de module n'est pas seulement due au chargement ELU comme observable sur la figure 93 (b), et se déroule également aux chargements ELS. Ce phénomène rappelle la densification du bois opérée lors de faibles chargements (voir section 4.1.3).

⁵⁰ Et non $L/350$ dans le cas des grumes, l'objectif étant d'induire et de déceler un endommagement.

expérimentales

Concernant l'amortissement, pour les faibles déplacements réalisés lors de ce protocole, aucune information ne peut être tirée. Celui-ci fluctue au cours des étapes sans montrer de tendance particulière entre les différentes éprouvettes. L'amortissement se comporte de manière similaire pour les autres volumes d'échantillons (cylindres et cônes), il ne sera donc plus détaillé pour les points suivants.

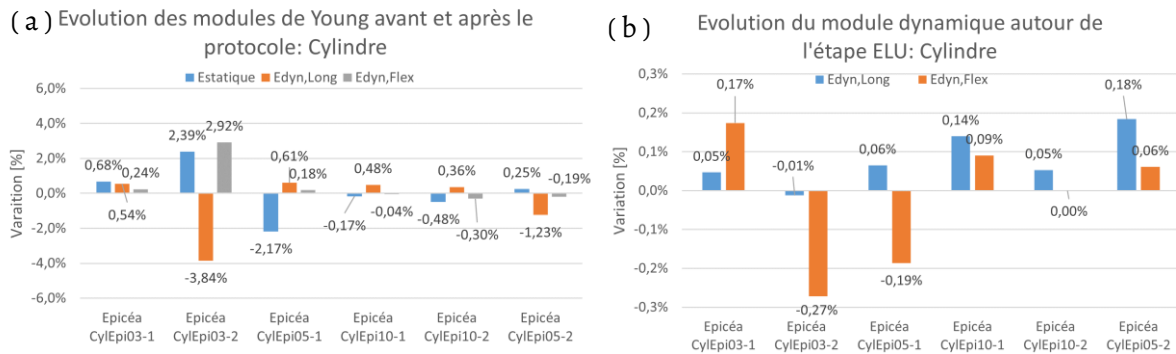
Éprouvettes cylindriques

Figure 94: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cylindre

La figure 94 montre que, dans le cas des éprouvettes cylindriques, les modules dynamiques ne semblent plus suivre la même tendance. Les deux éprouvettes pour lesquelles une différence est bien marquée (EPI03-2 et EPI05-2) sont en fait des éprouvettes pour lesquelles la FFT longitudinale était anormale (présentait un pic dédoublé). Les autres variations de module dynamique sont toutes proches de 0%, sur la figure (a) comme sur la figure (b), ne laissant ni suspecter d'endommagement mécanique ni de rigidification. Cette variation proche de 0% peut se justifier en raison du fait qu'une section circulaire (étant donné son inertie) résiste mieux à la flexion qu'une section rectangulaire. Le module statique quant à lui, comme dans le cas des éprouvettes parallélépipèdes rectangles, varie à nouveau sans suivre la même tendance que les modules dynamiques.

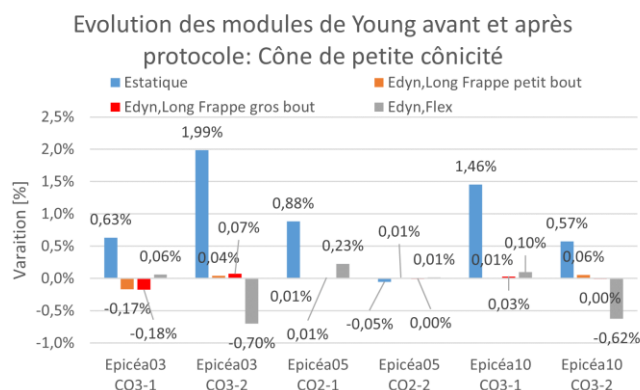
Éprouvettes de petite conicité

Figure 95: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cônes de faible conicité

Pour ce type de volume, le module longitudinal peut se prendre soit en donnant l'impulsion du côté de la plus fine section, soit du côté de la section la plus importante. On remarque que les 2 techniques donnent les mêmes résultats au 10^{ème} de pourcent près. En réalité, les deux méthodes donnent, à toutes les étapes du protocole, la même valeur à 0,1% près soit 0,1 GPa. Les valeurs de module dynamique longitudinal sont à nouveau très proches de 0%. Le module flexionnel ne subit à

nouveau plus les mêmes variations que le module longitudinal. De plus, cette fois c'est le module flexionnel qui présente des valeurs anormales (EPI03-CO3-2, EPI05-CO2-1 et EPI10-CO3-2) ces

expérimentales

éprouvettes ayant à nouveau présenté, dans le cas de l'excitation dynamique considérée, des pics de FFT étalés.

Éprouvettes de grande conicité

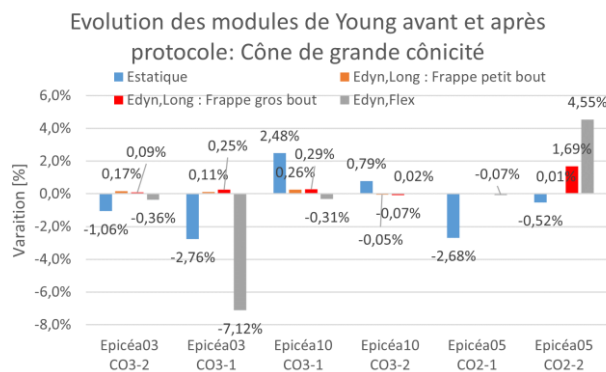


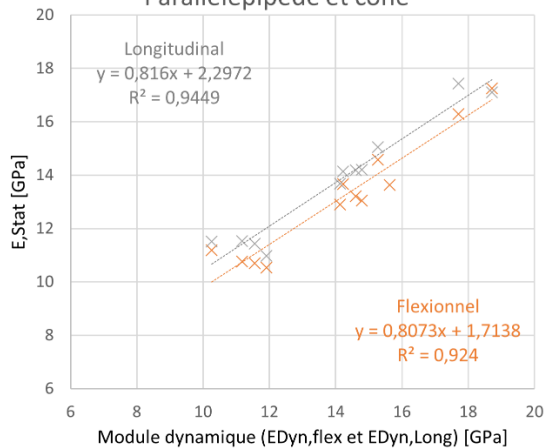
Figure 96: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cônes de grande conicité

La figure 96 montre que les modules dynamiques longitudinaux par excitation du côté de la plus grosse section et de la plus petite section sont à nouveau similaires (de l'ordre du 0,3%) sauf dans le cas de l'épicéa05 CO2-2 qui présente une FFT aux pics étalés. Le module flexionnel suit, comme dans le cas des cylindres et des éprouvettes de petites conicités, une évolution différente du module longitudinal. Il en va de même pour le module statique qui, à l'observation générale, fluctue sans suivre une tendance particulière.

De l'éprouvette cylindrique au cône : variation de la méthode IET :

Toutes les mesures restent répétables peu importe le volume (en termes d'écart-type). Le signal de la FFT devient néanmoins moins clair (étalement ou dédoublement du pic) en flexionnel au plus la conicité augmente.

(a) Relations entre module statique et dynamique: Formes conventionnelles: Parallélépipède et cône



(b) Relations entre module statique et dynamique: Formes coniques

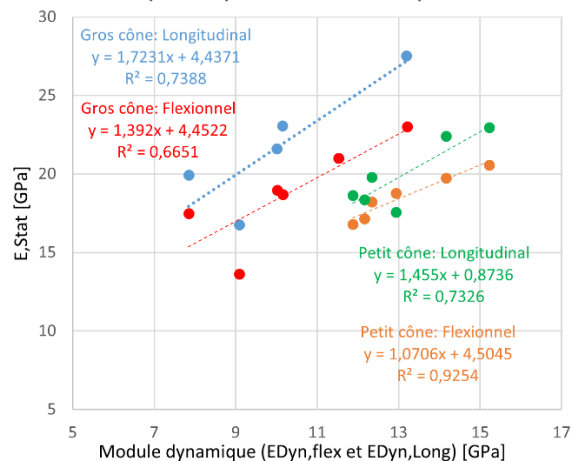


Figure 97: Relations entre modules statique et dynamique pour tous les volumes analysés

La figure 97 (a) montre une corrélation parfaite entre modules $E_{\text{Dyn,Flex}}$ et E_{Stat} et entre $E_{\text{Dyn,Long}}$ et E_{Stat} dans le cas des éprouvettes de formes conventionnelles⁵¹ tous volumes confondus, c'est-à-dire à la fois parallélépipèdes rectangles et cylindres.

⁵¹ C'est-à-dire qui répondent parfaitement aux hypothèses de formes des équations de la norme soit qui ont une section constante.

expérimentales

Ce n'est néanmoins plus le cas pour les éprouvettes coniques. La corrélation entre modules statiques et dynamiques devient moins bonne ($R^2 < 0,9$) et les 2 types de volumes ne peuvent plus être considérés comme répondant à la même corrélation. Cependant, l'augmentation de conicité (20 ou 50 mm/m)⁵², ne rend pas pour autant la corrélation beaucoup moins bonne, passant de $R^2 = 0,94$ à $R^2 = 0,73$, pour rappel, une corrélation de $R^2 = 0,67$ était considérée comme acceptable par de Vries sur grumes [48]. La corrélation devient néanmoins différente pour les deux types de conicité (en termes d'ordonnée à l'origine et de pente).

Il est alors possible de conclure que, pour des faibles différences de modules au sein d'un même échantillon, la variation de section sur la longueur du volume n'empêche pas l'existence d'une corrélation. Néanmoins, celle-ci ne sera plus uniquement le reflet des propriétés de l'espèce, mais dépendra également du volume considéré. Cela signifie que pour chaque volume différent, une corrélation doit être construite.

Il est à noter que la différence de corrélation entre les éprouvettes de formes conventionnelles et les éprouvettes coniques n'est pas due à la différence de protocole (flexion 4 points pour les premières et 3 points pour les secondes). Auquel cas, la relation de corrélation aurait été la même au sein des éprouvettes coniques, ce qui n'est pas vérifié. Néanmoins, cette différence de protocole pourrait justifier la moins bonne corrélation des éprouvettes coniques. En effet, comme énoncé dans la littérature, la flexion 3 points souffre davantage du cisaillement que la flexion 4 points, celui-ci a donc un impact plus important sur le module statique, pouvant alors diminuer la corrélation avec le module dynamique.

À retenir :

Pour de si petits incréments de flèche, l'amortissement ne donne pas d'informations car ses variations ne sont pas assez précises.

Les mesures dynamiques longitudinales prises en enregistrant du petit côté ou du grand côté présentent les mêmes valeurs de fréquences (et donc de modules).

Les écarts-types liés aux fréquences et aux amortissements mesurés sont du même ordre de grandeur pour tous les types de volumes. Concluant que la méthode est également répétable sur des cônes.

Les corrélations entre modules E_{Stat} et E_{Dyn} dépendent bien uniquement de l'espèce (la corrélation étant identique pour des éprouvettes parallélépipèdes rectangles et cylindriques). Néanmoins, face à des volumes coniques, cette règle ne fonctionne plus, et la conicité aura un impact sur la corrélation (en termes de pente et d'origine de la droite de la relation).

⁵² Pour rappel, la conicité des grumes se trouve aux alentours de 15-20mm/m

Conclusion

Le bois de construction, sous sa forme équarrie ou transformée, ne permet pas de concurrencer les autres matériaux du point de vue économique. Une solution est de limiter les différentes étapes de transformations onéreuses et d'utiliser le tronc directement comme élément de structure. Cependant, au vu de l'absence de normes de caractérisation, l'un des défis majeurs de cette démarche est la détermination, de manière non-destructive, des propriétés mécaniques des grumes entières.

Deux méthodes sont proposées pour la caractérisation de la rigidité axiale en flexion des grumes : une méthode d'excitation par impulsion (IET) investiguée dans le cadre de ce mémoire, et un chargement mécanique selon un protocole de mise en charge cyclique détaillé dans le mémoire de Maxime Dehaen et Pierre-Louis Ponthière [86] et réalisé en parallèle.

La méthode IET relève d'un principe physique simple : tout matériau dispose d'une fréquence propre qui est la fréquence à laquelle il oscille librement lorsqu'il subit une excitation. Cette fréquence dépend de propriétés physiques du matériau, dont son module de rigidité dynamique. La méthode se met en œuvre à l'aide d'un appareil capable de filtrer, amplifier et analyser les oscillations mécaniques générés. Dans le cadre de ce mémoire, c'est l'appareil de la marque GrindoSonic® qui est utilisé.

Cette méthode dynamique présente un attrait particulier pour trois raisons. En premier lieu, c'est une méthode de caractérisation rapide nécessitant peu de matériel. Ensuite, elle permet de lier la fréquence de résonance (longitudinale ou flexionnelle) d'un matériau à son module de Young. Enfin, elle permet également de connaître l'amortissement des ondes dans le bois. Ce dernier traduit le phénomène d'atténuation des ondes par suite de dissipations d'énergie qui surviennent au niveau des frottements internes du bois (liaisons chimiques, fissures) et des glissements aux appuis.

Avant d'utiliser l'IET sur les grumes, des expériences sur petites éprouvettes équarries, cylindriques et coniques ont été réalisées. Grâce à leurs formes bien définies et à l'absence de défauts, il est plus aisé d'interpréter la réponse vibratoire. Après avoir pris en main l'appareil et déterminé les conditions expérimentales, ces tests ont permis d'une part d'évaluer le module d'élasticité, et, d'autre part, en parallèle d'essais statiques cycliques, de déceler de l'endommagement mécanique.

Tout d'abord, les expériences réalisées sur éprouvettes équarries ont montré que le module dynamique obtenu sur base de la méthode IET est différent du module de Young statique. Cependant les deux grandeurs physiques peuvent être corrélées de manière très satisfaisante ($R^2 > 0,85$), confirmant les résultats présents dans la littérature.

De plus, concernant l'endommagement mécanique, les essais cycliques sur éprouvettes équarries ont permis de découvrir que les modules dynamiques (flexionnel et longitudinal) sont moins sensibles à l'endommagement que le module statique (le module dynamique flexionnel étant néanmoins plus sensible que le longitudinal). Il a également été observé que l'amortissement augmente face à un endommagement mécanique, mais cette observation n'est pas systématique et nécessiterait de plus amples expériences. Ce phénomène est cependant plus flagrant en résonance flexionnelle qu'en résonance longitudinale.

Enfin, les essais sur éprouvettes coniques ont montré que la résonance flexionnelle réagit moins bien face à une conicité croissante que la résonance longitudinale. De plus, ces expériences ont prouvé que les corrélations entre modules statique et dynamique dépendent uniquement de l'essence lorsque les volumes sont de sections constantes (même corrélation pour les parallélépipèdes rectangles et des cylindres), mais que ce n'est plus le cas pour des cônes de conicités similaires aux grumes.

Dans le cadre des expériences sur grumes, des critères ont dû être mis en place afin de cibler la fréquence propre et de ne pas la confondre avec d'autres modes, harmoniques, ou avec du bruit. Après avoir déterminé les conditions d'essais, 3 lots d'essences différentes de 10 grumes ont été testés.

La résonance flexionnelle sur grume ne donne pas de résultats probants. En effet, la fréquence fondamentale recherchée est trop faible et se situe hors des limites de perception de l'appareil GrindoSonic®. Bien que les harmoniques puissent être perçues, le volume irrégulier des grumes ne permet pas de calculer la fréquence propre sur base des harmoniques avec précision.

La résonance longitudinale est la méthode la plus précise, car elle souffre le moins des conditions d'appuis et des imprécisions de mesures des caractéristiques physiques des grumes. De plus, la fréquence attendue se trouve dans le domaine de sensibilité du GrindoSonic®. La méthode IET longitudinale a fait ses preuves sur l'essence d'épicéa avec un coefficient de corrélation de R^2 égal à 0,86 entre les modules E_{Stat} et $E_{\text{Dyn,Long}}$. Les deux autres essences présentaient un coefficient R^2 inférieur à 0,3 c'est-à-dire une très mauvaise corrélation. Néanmoins, les valeurs de modules $E_{\text{Dyn,Long}}$ ne s'écartent pas de plus de 20% du module statique, laissant entrevoir la possibilité d'utiliser cette méthode à des fins de pré-classement. Il est à noter que, dans le cas du tsuga, le non-fonctionnement provient de la présence de fentes de retrait. Cette hypothèse est appuyée par les recherches de Sandoz et Benoit [63], qui ont réalisé ces mêmes observations dans le cas de la résonance ultrasonique.

Le protocole de caractérisation non-destructive par mise en charge cyclique appliqué aux grumes comporte un cycle de chargement élevé pouvant générer un endommagement mécanique. Cet éventuel endommagement peut être décelé en comparant des mesures physiques avant et après protocole. En première observation, il a été mis en évidence qu'une chute de module dynamique chez les grumes est un indicateur valable mais faible (plus faible que le module statique) d'endommagement mécanique. Malheureusement, les conditions d'appuis changeant au cours du protocole à la suite de l'enfoncement de la grume dans ses appuis lors des chargements, l'interprétation des résultats devient assez délicate. Pour pallier cela, un protocole alternatif dans des conditions parfaites a été mis en place afin de garder les mêmes conditions avant et après protocole. Cette alternative augmente également la précision des mesures d'amortissement et il serait prometteur de réaliser de plus amples tests à l'aide de cette méthode.

Sur base de ces observations, sur grumes comme sur petites éprouvettes, trois perspectives permettraient d'améliorer l'utilisation de l'IET sur des grumes et d'obtenir une meilleure évaluation de l'endommagement :

Premièrement, en théorie, l'amortissement comme indicateur d'endommagement semble être très intéressant. Malheureusement, sa mesure est peu précise et fluctue énormément entre différents impacts consécutifs. De plus, la littérature décrit très peu cette grandeur. Il serait donc utile

d'approfondir ce sujet par observations sur d'autres matériaux et essayer de déceler l'impact de l'humidité du bois sur cette grandeur physique.

Deuxièmement, les tests sur grumes n'ont été réalisés que sur 30 spécimens à l'état vert, c'est trop peu que pour tirer des conclusions avec certitude. Même si des tendances ont pu être dégagées, il serait pertinent de réaliser davantage de tests à différents taux d'humidité, sur les mêmes grumes séchées par exemple, et de multiplier les essences. D'un côté, ces tests permettraient d'écarter ou non l'hypothèse de mauvaise performance de la méthode IET sur feuillus. D'un autre côté, ils permettraient d'observer l'impact de l'humidité sur le comportement vibratoire. En outre, ces tests devraient être réalisés avec une résolution fréquentielle précise afin d'obtenir de meilleurs résultats en termes d'amortissements et pourraient être testés avec la configuration parfaite expérimentée pour une grume dans le cadre de ce mémoire.

Troisièmement, d'autres méthodes ont été découvertes au travers de l'état de l'art de cet ouvrage : l'acquisition d'un résistographe permettrait de détecter les vides dans le bois. Le shigomètre, quant à lui, permettrait d'évaluer l'endommagement pendant le protocole statique sans dépendre des conditions d'appuis. Enfin, la méthode ultrasonique et la méthode stress wave sont souvent comparées à la méthode IET dans la littérature, il pourrait être intéressant d'en faire l'acquisition et de les comparer également sur les volumes conséquents que représentent les grumes.

Pour conclure, une application industrielle de la méthode IET pourrait être envisagée en scierie. Même si la méthode IET ne peut pas remplacer la méthode de caractérisation statique, elle peut néanmoins s'utiliser afin d'effectuer, en scierie ou sur le parc à grumes, une présélection permettant d'exclure les grumes qui ne présenteraient pas la raideur attendue par le client : un gain de temps et d'argent considérable.

Annexes

9 Liens entre expressions d'amortissement

Pour un faible amortissement ($\xi < 0,2$), les différentes expressions de l'amortissement sont liées entre elles. A titre d'information, voici le tableau donné dans le manuel GrindoSonic®[14] :

Tableau 13: Tableau des correspondances d'expressions d'amortissement (Source : GrindoSonic®, 2020)

Natural Frequency $\omega_0 = 2\pi f_0$ ($\approx \omega_d$ for lightly damped resonances)											
Unknown	$\Delta\omega =$	$\Delta f =$	$f_d =$	$\eta =$	$\zeta =$	$Q =$	$\sigma =$	$\tau =$	$T_{60} =$	$D =$	$\delta =$
Known											
3 dB Bandwidth $\Delta\omega$ [Rad/s]	$\Delta\omega$	$\frac{\Delta\omega}{2\pi}$	$\frac{\Delta\omega}{4\pi}$	$\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$	$\frac{\Delta\omega}{2\omega_0}$	$\frac{\omega_0}{\Delta\omega}$	$\frac{\Delta\omega}{2}$	$\frac{2}{\Delta\omega}$	$\frac{13.8}{\Delta\omega}$	$4.34 \Delta\omega$	$\frac{\pi \Delta\omega}{\omega_0}$
3 dB Bandwidth Δf [Hz]	$2\pi \Delta f$	Δf	$\frac{\Delta f}{2}$	$\frac{\Delta f}{f_0}$	$\frac{\Delta f}{2f_0}$	$\frac{f_0}{\Delta f}$	$\pi \Delta f$	$\frac{1}{\pi \Delta f}$	$\frac{6.9}{\pi \Delta f}$	$27.3 \Delta f$	$\frac{\pi \Delta f}{f_0}$
Damping frequency f_d [Hz]	$4\pi f_d$	$2f_d$	f_d	$\frac{2f_d}{f_0}$	$\frac{f_d}{f_0}$	$\frac{f_0}{2f_d}$	$2\pi f_d$	$\frac{1}{2\pi f_d}$	$\frac{1.1}{f_d}$	$54.6 f_d$	$\frac{2\pi f_d}{f_0}$
Loss factor η	$\eta\omega_0$	ηf_0	$\frac{\eta f_0}{2}$	η	$\frac{\eta}{2}$	$\frac{1}{\eta}$	$\eta\pi f_0$	$\frac{1}{\pi f_0 \eta}$	$\frac{2.2}{\eta f_0}$	$4.34 \omega_0 \eta$	$\eta\pi$
Fraction of critical damping ζ	$2\zeta\omega_0$	$2\zeta f_0$	ζf_0	2ζ	ζ	$\frac{1}{2\zeta}$	$2\pi f_0 \zeta$	$\frac{1}{2\pi f_0 \zeta}$	$\frac{1.1}{\zeta f_0}$	$8.69 \omega_0 \zeta$	$2\pi \zeta$
Quality factor Q	$\frac{\omega_0}{Q}$	$\frac{f_0}{Q}$	$\frac{f_0}{2Q}$	$\frac{1}{Q}$	$\frac{1}{2Q}$	Q	$\frac{\omega_0}{2Q}$	$\frac{2Q}{\omega_0}$	$\frac{2.2Q}{f_0}$	$\frac{4.34 \omega_0}{Q}$	$\frac{\pi}{Q}$
Decay constant σ [s ⁻¹]	2σ	$\frac{\sigma}{\pi}$	$\frac{\sigma}{2\pi}$	$\frac{2\sigma}{\omega_0}$	$\frac{\sigma}{\omega_0}$	$\frac{\omega_0}{2\sigma}$	σ	$\frac{1}{\sigma}$	$\frac{6.9}{\sigma}$	8.69σ	$\frac{\sigma}{f_0}$
Time constant τ [s]	$\frac{2}{\tau}$	$\frac{1}{\pi \tau}$	$\frac{1}{2\pi \tau}$	$\frac{1}{\pi f_0 \tau}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \tau}$	$\pi f_0 \tau$	$\frac{1}{\tau}$	τ	6.9τ	$\frac{8.69}{\tau}$	$\frac{1}{f_0 \tau}$
Reverberation time T_{60} [s]	$\frac{13.8}{T_{60}}$	$\frac{2.2}{T_{60}}$	$\frac{1.1}{f_0 T_{60}}$	$\frac{2.2}{f_0 T_{60}}$	$\frac{1.1}{f_0 T_{60}}$	$\frac{f_0 T_{60}}{2.2}$	$\frac{6.9}{T_{60}}$	$\frac{T_{60}}{6.9}$	T_{60}	$\frac{60}{T_{60}}$	$\frac{6.9}{f_0 T_{60}}$
Decay rate D [dB/s]	$\frac{D}{4.34}$	$\frac{D}{27.3}$	$\frac{D}{54.6}$	$\frac{D}{4.34 \omega_0}$	$\frac{D}{8.69 \omega_0}$	$\frac{4.34 \omega_0}{D}$	$\frac{D}{8.69}$	$\frac{8.69}{D}$	$\frac{60}{D}$	D	$\frac{D}{8.69 f_0}$
The logarithmic decrement δ	$\frac{\delta \omega_0}{\pi}$	$\frac{\delta f_0}{\pi}$	$\frac{\delta f_0}{2\pi}$	$\frac{\delta}{\pi}$	$\frac{\delta}{2\pi}$	$\frac{\pi}{\delta}$	δf_0	$\frac{1}{\delta f_0}$	$\frac{6.9}{\delta f_0}$	$8.69 f_0 \delta$	δ

10 Résonance flexionnelle : valeurs du coefficient K_1 pour d'autres supports

BEAMS OF UNIFORM SECTION AND UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD

ANGULAR NATURAL FREQUENCY $\omega_n = A \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}}$ RAD/SEC

WHERE E = YOUNG'S MODULUS, LB/IN.²
 I = AREA MOMENT OF INERTIA OF BEAM CROSS SECTION, IN.⁴
 l = LENGTH OF BEAM, IN.
 μ = MASS PER UNIT LENGTH OF BEAM, LB-SEC²/IN.²
 A = COEFFICIENT FROM TABLE BELOW

NODES ARE INDICATED IN TABLE BELOW AS A PROPORTION OF LENGTH l MEASURED FROM LEFT END

FIXED-FREE (CANTILEVER)	 $A = 3.52$	 $A = 22.0$	 $A = 61.7$	 $A = 121.0$	 $A = 200.0$
HINGED-HINGED (SIMPLE)	 $A = 9.87$	 $A = 39.5$	 $A = 88.9$	 $A = 158$	 $A = 247$
FIXED-FIXED (BUILT-IN)	 $A = 22.4$	 $A = 61.7$	 $A = 121$	 $A = 200$	 $A = 298$
FREE-FREE	 $A = 22.4$	 $A = 61.7$	 $A = 121$	 $A = 200$	 $A = 298$
FIXED-HINGED	 $A = 15.4$	 $A = 50.0$	 $A = 104$	 $A = 178$	 $A = 272$
HINGED-FREE	 $A = 15.4$	 $A = 50.0$	 $A = 104$	 $A = 178$	 $A = 272$

Figure 98: Résonance flexionnelle : valeurs du coefficient K_1 pour d'autres supports (Source : Handbook, 2015)

11 Budget d'incertitude

Voici les étapes établies par le NPL pour procéder à cette étude :

- Déterminer les incertitudes liées à chaque paramètre physique
- Exprimer ces incertitudes comme un pourcentage de la valeur mesurée

$$\%U = \frac{\text{Incertitude}}{\text{Valeur mesurée}} 100$$

- Associer à la valeur d'incertitude une loi de distribution (Force et fréquence : distribution normale, mesure de dimension : loi rectangulaire). Cela permet d'utiliser l'écart type lié à chaque distribution

$$E_{type_{rect}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$E_{type_{normal}} = \frac{a}{1}$$

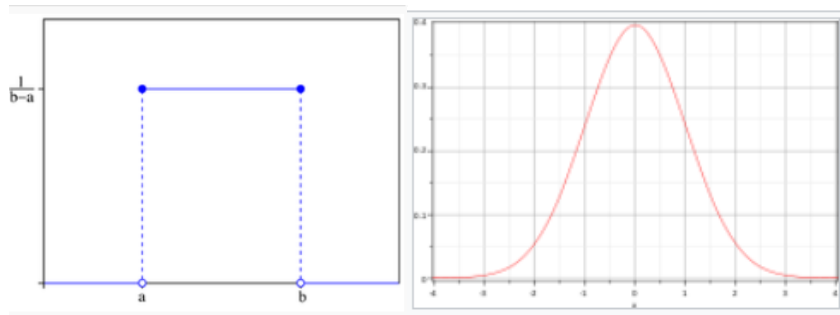


Figure 99: Loi rectangulaire et loi de Gauss (Wikipédia 2022)

- Calcul de l'impact de l'incertitude de chaque variable en calculant les dérivées partielles (coefficient C_i).
- Calcul de l'incertitude standard pour chaque source d'incertitude.

$$\%U_{sdt} = \frac{\%U}{E_{type}} C_i$$

- Calcul de l'incertitude combinée :

$$\%U_{comb} = \sqrt{\sum \%U_{sdt}^2}$$

- Cette valeur est ensuite multipliée par un facteur 2 qui permet d'atteindre un niveau de confiance de 95% soit deux fois la déviation standard.

12 Fast Fourier Transform

La transformée de Fourier :

La transformée de Fourier est utilisée pour obtenir la représentation fréquentielle d'un signal, passant ainsi du domaine temporel au domaine fréquentiel. Dans le cas d'un signal continu $x(t)$, sa transformée de Fourier est définie par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Avec f représentant les fréquences (en Hz). En effet, tout signal peut être décomposé en une somme (potentiellement infinie) de sinus et de cosinus à différentes fréquences. Plus largement, en prenant en compte les signaux non réels, tout signal peut être décomposé d'une somme d'exponentielles complexes. L'objectif de la transformée de Fourier est alors de trouver le « poids » associé à chaque exponentielle.

Le signal continu réel des oscillations du matériau est enregistré à l'aide du GrindoSonic® sous forme d'un signal discret pour lequel on peut déterminer, avant enregistrement, la fréquence d'échantillonnage f_e (*sample frequency*, dans les paramètres GrindoSonic®) et le nombre d'échantillons N (*number of samples*). Cette étape d'échantillonnage est responsable du passage du signal $x(t)$ en temps continu au signal $x[n]$ en temps discret.

Dans le cas de signaux discrets échantillonnés, la transformée de Fourier discrète (Discrete Fourier Transform – DFT) est utilisée. Celle-ci est définie par :

$$X_{DFT}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\Omega_k n}$$

Où N est le nombre d'échantillons dans le signal $x[n]$ et $\Omega_k = 2\pi \frac{k}{N}$ représente les différentes fréquences des exponentielles complexes, avec k un nombre entier allant de 0 à $N - 1$. En outre, la DFT est périodique, de période N (mathématiquement : $X_{DFT}[k + pN] = X_{DFT}[k]$, pour $p \in \mathbb{Z}$).

Implémentation dans le cas d'un signal discret provenant de l'échantillonnage d'un signal continu :

Considérons l'exemple du signal temporel suivant, enregistré par le GrindoSonic® pour une éprouvette 10x30x300mm³ de sapin, et comparons avec la DFT renvoyée par le GrindoSonic®. Au total, $N = 16385$ échantillons sont enregistrés, avec une fréquence d'échantillonnage $f_e = 210$ kHz.

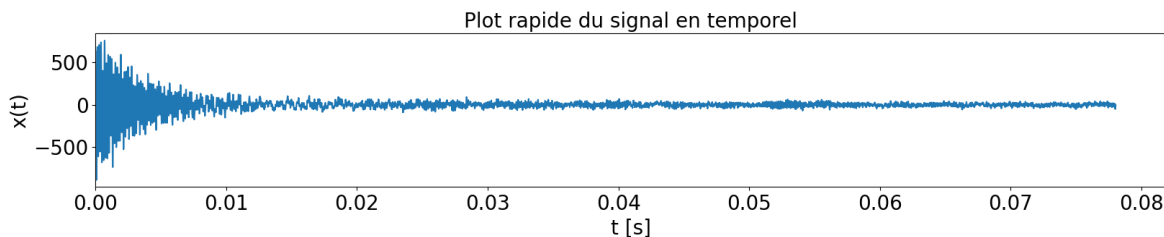


Figure 100: Signal tel qu'il est enregistré par le GrindoSonic® en temporel (Illustration personnelle)

- 1) Les coefficients de Fourier $X_{DFT}[k]$ sont obtenus en utilisant la transformée de Fourier discrète (DFT) définie ci-dessus. Pour cela, l'algorithme FFT (Fast Fourier Transform) est utilisé.
- 2) On obtient ensuite l'énergie associée à chaque fréquence (et donc son importance dans le spectre temporel) en prenant le module de chaque coefficient de Fourier $X_{DFT}[k]$:

$$X_{abs}[k] = |X_{DFT}[k]|$$

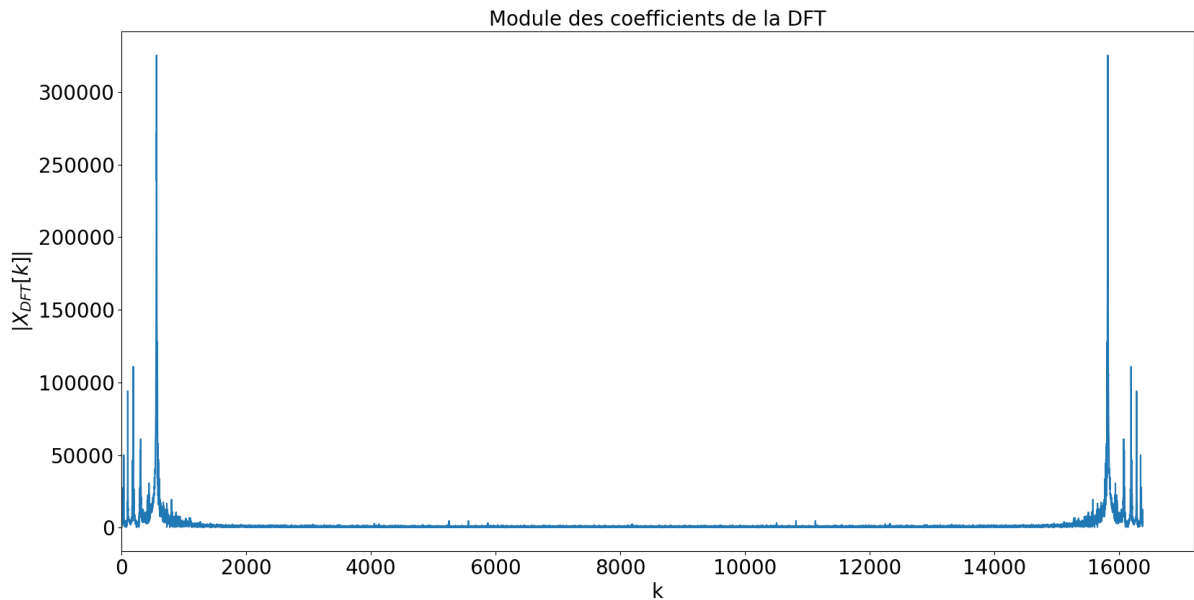


Figure 101 : Module des coefficients de la DFT dans le domaine des entiers k (Illustration personnelle)

- 3) Connaissant la fréquence d'échantillonnage, il est possible d'associer le domaine de k (0 ... N-1) au domaine de fréquence f en Hz (0... f_e) :

$$f_k = k \frac{f_e}{N}$$

L'écart entre deux fréquences (*frequency resolution*, dans les paramètres GrindoSonic®) est alors de $\frac{f_e}{N}$.

- 4) La DFT étant périodique, on peut également décaler le signal fréquentiel pour le centrer autour de la fréquence nulle (en Python, cela correspond à utiliser la fonction `np.fft.fftshift()`) et obtenir ainsi un axe fréquentiel allant de $-\frac{f_e}{2}$ à $\frac{f_e}{2}$.

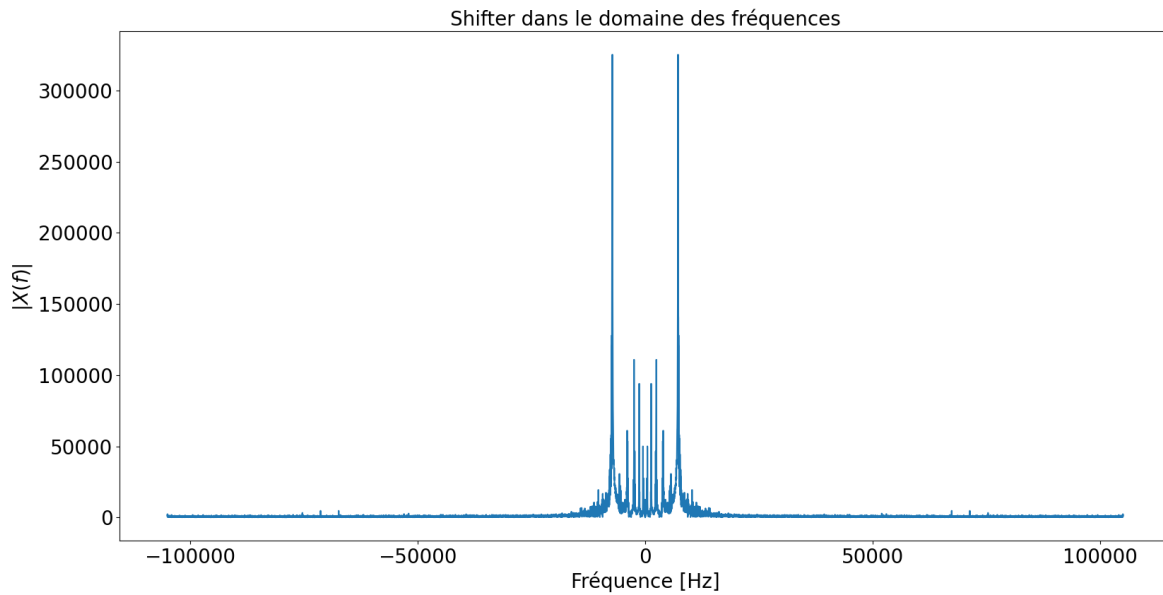


Figure 102: Module des coefficients de la DFT dans le domaine des fréquences (Illustration personnelle)

Remarquons que le module obtenu est une fonction paire, comme attendu pour des signaux réels.

- 5) Finalement, en conservant uniquement la partie de la fonction paire qui est positive, nous obtenons le même résultat que celui fourni par le GrindoSonic®, à un facteur d'amplitude près. Pour permettre la comparaison, on normalise X_{DFT} par sa valeur maximale et on le multiplie ensuite par 40 mV, ce qui correspond à l'amplitude du pic renvoyée par le GrindoSonic®. La Figure 103, montre que la démarche en Python et effectuée avec le GrindoSonic® conduisent à la même solution.

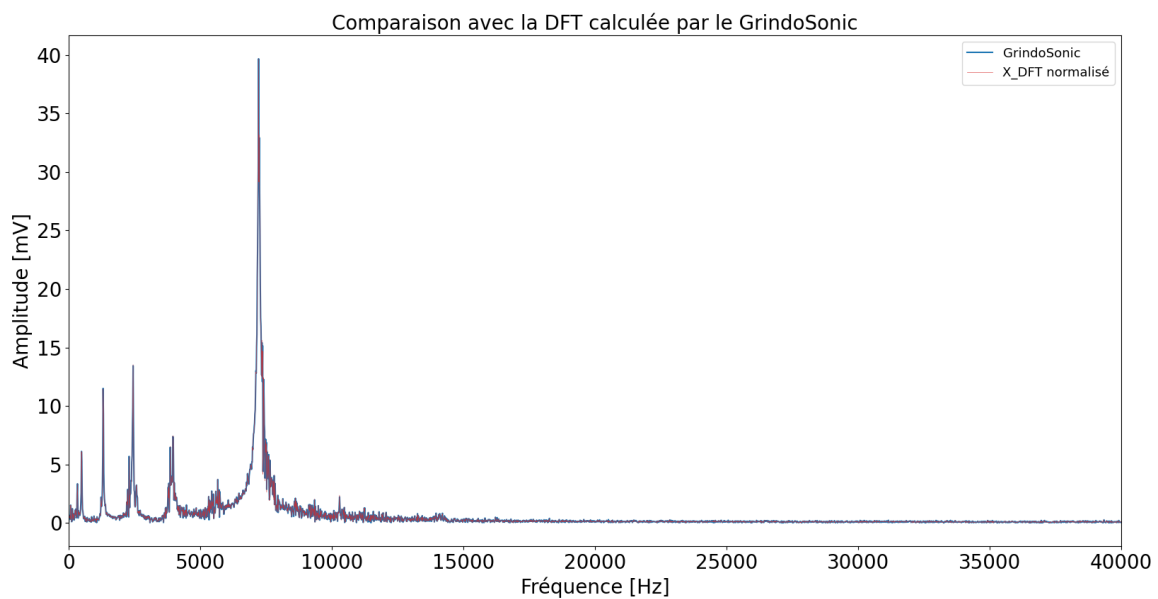


Figure 103: Comparaison des résultats renvoyés par le GrindoSonic® et ceux obtenues en Python. (Illustration personnelle)

Fréquence d'échantillonnage et théorème de Nyquist-Shannon :

Cela signifie qu'augmenter la résolution de la DFT (en diminuant le rapport $\frac{f_e}{N}$ et donc l'écart entre deux fréquences en abscisse de la DFT), peut se faire soit en augmentant le nombre d'échantillons (et donc en conservant la fréquence maximale enregistrée mais en augmentant le temps de prise de mesure), soit en diminuant la fréquence d'échantillonnage mais en concevant un temps de prise identique.

Par ailleurs, l'échantillonnage d'un signal conduit à une périodisation de son spectre. Lorsque des fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist (définie par $\frac{f_e}{2}$) font partie du signal enregistré, il se passe un recouvrement spectral. La figure 104 est une représentation schématisque du recouvrement dû à une fréquence d'échantillonnage f_e trop petite par rapport à la fréquence maximale f_{max} présente dans le signal. En premier, l'enveloppe des fréquences d'un spectre dont la fréquence maximale est inférieure à la fréquence de Nyquist. En second, un spectre dont la fréquence maximale est supérieure à la fréquence de Nyquist, il y a donc recouvrement et donc des fréquences supplémentaires dans le spectre final.

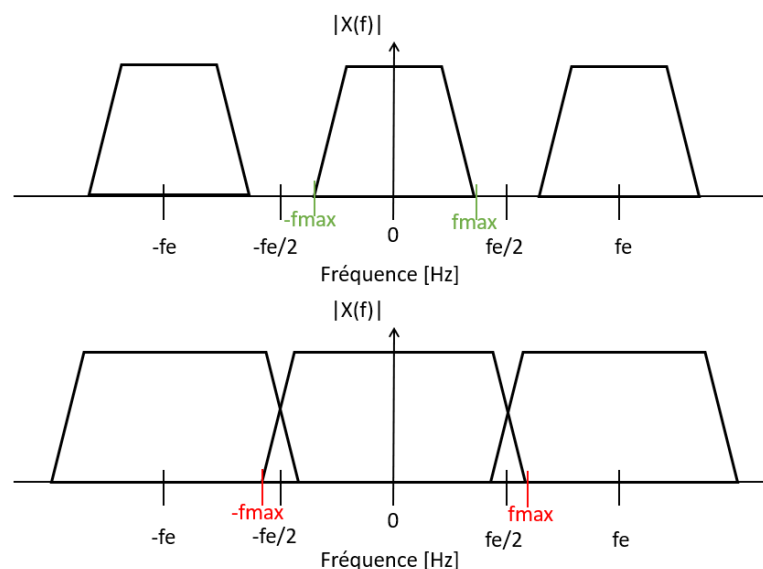


Figure 104: Recouvrement spectral (Illustration personnelle)

C'est pourquoi, pour éviter tout recouvrement spectral, il faut garantir $f_{max} < \frac{f_e}{2}$, soit $f_e > 2 f_{max}$.

Il est évident qu'un signal réel qui provient de l'enregistrement d'une oscillation contient un large spectre de fréquences, qui dépassent, pour les plus hautes fréquences et harmoniques, la fréquence de Nyquist.

Notion de filtres :

Pour pallier ce phénomène, le GrindoSonic® utilise un filtre analogique, lors de son enregistrement dans le domaine temporel continu. Ce filtre a pour but de filtrer le bruit et les fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist. C'est un filtre passe bas, il multiplie toutes les fréquences se situant dans sa fenêtre par 1 et les autres par 0 (filtre passe-bas idéal).

Il est possible, dans les paramètres du GrindoSonic®, d'ajouter un filtre passe bande (désignant une fréquence minimale et maximale). Celui-ci permet de cibler plus facilement la fréquence recherchée durant une expérience lorsque l'on a une idée de sa valeur ou de la gamme de valeur dans laquelle elle doit se trouver.

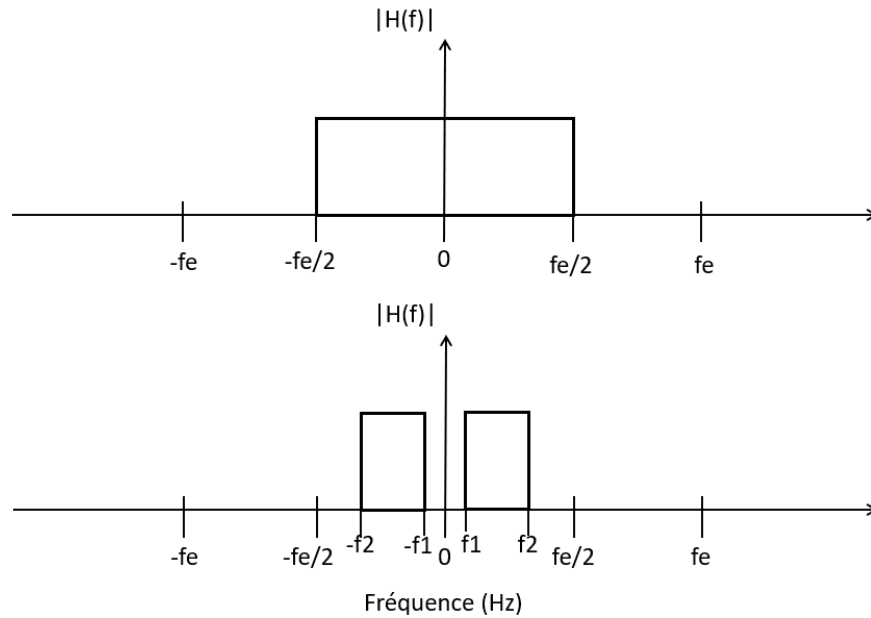


Figure 105: Schéma d'un filtre passe bas et d'un filtre passe bande (Illustration personnelle)

13 Tableaux des valeurs de modules dynamiques obtenues dans la littérature

Tableau 14. Récapitulatif des expériences IET précédemment effectuées dans la littérature sur petites éprouvettes

Espèces Nom commun <i>Nom botanique</i>	Auteur [Source]	Méth. Statique	H%	Dimensions [mm]	Nombre Ech.	E _{dyn,long} [GPa]	E _{dyn,flex} [GPa]	E _{dyn,flex} /E _{stat}
Chêne de Tasmanie <i>Eucalyptus Oblica</i>	Faculté forestière de Gembloux [34]	Flexion 3 points	10 à 13	20X20X340	20		9,31	R ² =0,597 Es= 0,89Ef +0,22
Peuplier <i>Populus sp</i>					16		4,69	R ² =0,96 Es=1,035Ef +0,77
Iroko <i>Chlorophora excelsa</i>					22		12,42	R ² =0,93 Es=0,915Ef -1,9
Hêtre <i>Fagus sylvatica</i>					30 et 30		13,18 – 12,43	R ² =0,85 Es=0,965Ef +1,2 – R ² =0,85 Es=0,96Ef +0,86
Sapin de Vancouver <i>Abies grandis</i>					26		7,55	R ² =0,96 Es=0,91Ef +0,29
Pin sylvestre <i>Pinus sylvestris L</i>					30		7,4	R ² =0,93 Es=0,831Ef +0,62
Épicéa <i>Picea abies</i> ⁵³					30 et 30		9,94 – 10,15	R ² =0,94 Es=0,91Ef +0,79 – R ² =0,94 Es=0,91Ef +1,4
Pin rouge du Nord <i>Pinus sylvestris I</i>					15		14,99	R ² =0,67 Es=0,810Ef +2,2
Bouleau blanc <i>Betula pendula</i>	Wiem(7) ⁵⁴ [15]	/	12	25X25X410	30	16,23	14,94	
Peuplier faux tremble <i>Populus tremuloides</i>					30	13,08	11,99	
Mélèze laricin <i>Larix laricina</i>					30	15,34	13,34	
Pin gris <i>Pinus banksiana</i>					30	13,33	12,52	

⁵³ L'essence a été séparée en 2 lots.⁵⁴ Nombre d'autres essences testées par l'auteur.

Tableau 15: Récapitulatif des expériences IET précédemment effectuées dans la littérature sur petites éprouvettes (suite)

Espèces Nom commun <i>Nom botanique</i>	Auteur [Source]	Méth. Statique	H%	Dimensions [mm]	Nombre échantillons	$E_{dyn, long}$ [GPa]	$E_{Dyn, flex}$ [GPa]	$\frac{E_{Dyn, Flex}}{E_{Dyn, Long}}$	$\frac{E_{Dyn, flex}}{E_{Stat}}$	$\frac{E_{Ultrasonic}}{E_{Stat}}$
Hêtre Commun <i>Fagus sylvatica</i>	Illic [47] (55)	Flexion 3 points	12	20x20x300	1	15,5				
Épicéa de Sitka <i>Picea sitchensis</i>	(2003)				1	13,2				
Chêne Blanc <i>Quercus Alba</i>					1	13,9				
Épicéa Commun	Machek [87]	Flexion 3 points	/	10x5x100	60				$R^2=0,97$	
Hêtre Commun <i>Fagus sylvatica</i>					60				$R^2=0,96$	
China fir <i>Cunninghamia lanceolata</i>	Cho [23]	Flexion 3 points	13,3	35x35x600	90	11,25	9,71		$R^2=0,6923$ $Es=0,71Ef+1,88$	
Cèdre du Japon <i>Cryptomeria</i>			14,2		90	9,84	8,75		($ri+c$) ⁵⁵ : $R^2=0,9999$ $Es=0,98 Ef$	
Cyprès rouge <i>formosana</i>			13,9		90	9,54	8,7			
Cyprès jaune <i>forosensis</i>			12,1		90	8,29	7,6		La corrélation a été réalisée	
Camphrier <i>Cinnamomum camphora</i>			13,1		90	9	8,02		toutes espèces confondues.	

⁵⁵ Prise en compte du cisaillement et la rotation inertielle des sections.

Espèces Nom commun	Auteur [Source]	Méth. Statique	H%	Dimensions [mm]	Nbr. Ech	$E_{Dyn, Long}$ [GPa]	$E_{Dyn, flex}$ [GPa]	$E_{Dyn, Flex}$ $E_{Dyn, Long}$	$E_{Dyn, flex}$ E_{Stat}	$E_{Dyn, Long}$ E_{Stat}	$E_{Ultrasonic}$ E_{Stat}
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	Illic [45] (2001)	Flexion 3 points	12	20x20x280	52	18	15,6	(r+c) : El= 0,97Ef + 1,13	R ² = 0,98 Es=0,29 Ef	R ² =0,9 Es=0,78 El	
Épicéa Commun	Haines [37]	Flexion 4 points	12	20x20x360	25	11,3	10,6				
Sapin Blanc <i>Abies alba</i>					80	14	12,7				
Teck <i>Tectona</i>	Chanhan [70] (8)	Flexion 3 points	12	20x20x300	7x8	14,7	13,6		R ² =0,96 Es=0,72Ef +0,81	R ² =0,97 Es=0,67El +0,69	R ² =0,95 Es=0,36 Eu +1,39
Acacia <i>auriculiformis</i>						16,8	15,3				
Southern pine	Yang et al. [88]	Flexion 4 points	11	38x140 x2450	86				R ² = 0,87 Es=0,99Ef +0,83		
<i>Eucalyptus sp</i>	Otani [72]	3 points	/	25x25x145	4	19,9	15,6		Es= 1,01Ef - 0,87		
Pinus oocarpa				25x25x150	4	10,3	8,8		Es=0,93Ef- 0,29		

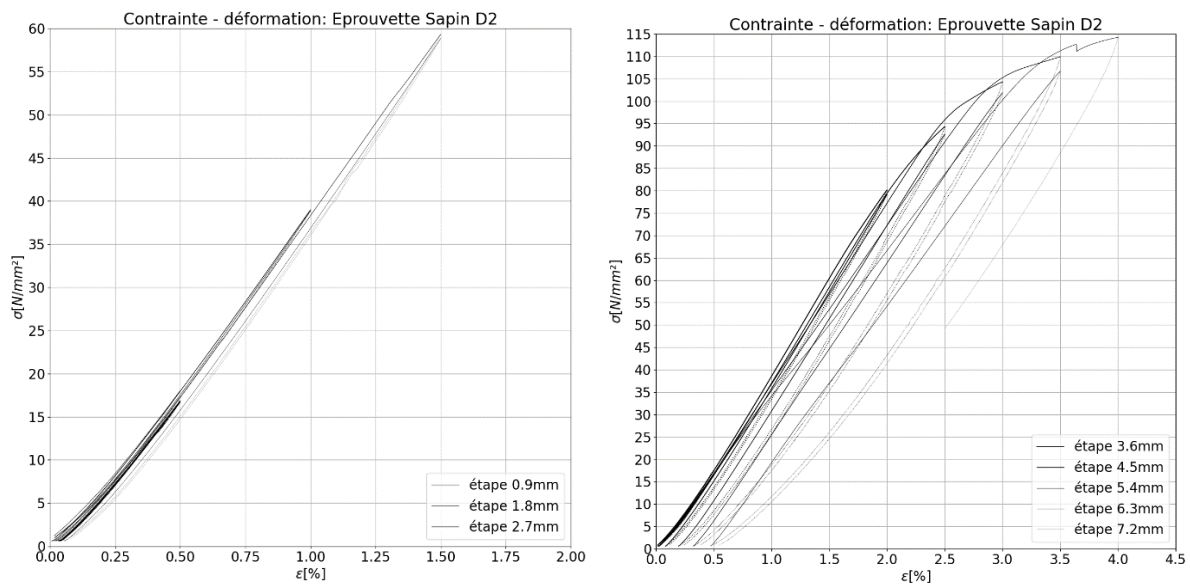
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des valeurs déjà obtenues au paravent sur des grumes ou cylindre en bois long.

Espèces Nom commun <i>Nom botanique</i>	Auteur [Sources]	Méth. Statique	H%	Dimensions (Longueur, diamètre et conicité si précisée)	Nombre échantillons	$E_{Dyn, Long}$ [GPa]	$E_{Dyn, flex}$ [GPa]	$E_{Dyn, flex} / E_{Stat}$	$E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$
Eucalyptus Citronné <i>Corymbia Citriodora</i>	Carreira [45]	4 pts	18	L : 4 à 4,4 m Conicité : 0,2 à 1,4 cm/m D : 13,6 à 20 cm	38		22,5	$R^2=0,92$ $Es=0,94$ Ef+0,58	
Mélèze du Japon <i>Larix Kaempferi</i>	De Vries et Gard [48]	4pts	15	L : 3,5 à 4,5 m D : 8 à 14 cm	220	13,4			$R^2=0,72$
Douglas <i>PseudoTsuga Menziesii</i>			11	L : 4m D : 8 à 14 cm	145	10,9			$R^2=0,76$
Sapin Subaplin <i>Abies lasiocarpa</i> Pin tordu <i>Pinus contorta</i>	Green et al. [76]	3pts	16	L : 5m D : 22,8cm	60 (mix des deux espèces de pin)			$R^2=0,88$ $Es=1,07$ Ef -0,95	$R^2=0,67$ $Es=0,54$ Es +2,71
Pin gris <i>Pinus Banksiana Lamb</i>	Wang et Ross [71]	4pts	> PSF	L : 3,7m Diam pied : 11,9-27,9cm	109		1,72 à 10,14	$R^2=0,85$ $Es=0,87$ Ef +0,043	
Pin rouge <i>Pinus Resinosa</i>				L : 3,7m Diam pied : 11,2-25,2 cm	50		4 à 8,4	$R^2=0,95$ $Es=1,11$ Ef -0,14	

14 Rigidification du module statique au cours des étapes

Durant la réalisation d'expériences, il a été remarqué que le module statique avait tendance à augmenter pour les premières étapes de chargement et puis diminuer et ce contrairement aux modules dynamiques (flexionnel comme longitudinal) qui restent presque constants sur ces mêmes étapes.

Pour déterminer si cette observation était d'ordre expérimental, calculatoire ou physique, plusieurs investigations ont été menées.



Bornes de la courbe force-déplacement :

La norme conseille de calculer le module de Young statique sur base de **la portion de la courbe force-déplacement** comprise entre 10% et 40% de la force à la rupture lors d'un essai monotonique (F_{rupt} , déterminée lors de la dernière étape de chargement de l'éprouvette, lorsque celle-ci se rompt). Ces bornes servent à éliminer d'une part le pied de courbe, qui est en fait lié au placement dans les appuis en début de chargement, et d'autre part la fin de partie élastique linéaire du bois (estimé par la norme à 40% de F_{rupt} dans le cas du bois soit plus ou moins 60-70 N/mm² dans le cas du sapin, du chêne et du hêtre et 40-60 N/mm² dans le cas de l'épicéa).

Néanmoins, sortant du cadre de la norme en décidant d'aller à la rupture par paliers de chargement, nous avons fait varier les bornes prescrites par la norme. Les premiers chargements étant très faibles, la valeur de 40% F_{rupt} n'est en fait pas atteinte. Nous sommes alors arrivés à la conclusion qu'il était préférable de prendre toujours 10% F_{rupt} comme borne inférieure, comme énoncé dans la norme. Mais qu'il valait mieux prendre pour la borne supérieure la valeur minimale entre 40% de la force à la rupture (F_{rupt}) et 95% de la force maximale rencontrée à l'étape de chargement (F_{max}). En effet, prendre 95% pour les faibles chargements ($< 40\% F_{rupt}$) et non 100% permet d'ignorer les potentiels effets de déchargement qui se traduisent par des oscillations anormales en tête de courbe force-déplacement.

Rectitude de la droite de chargement : Corrélation

La norme impose qu'une droite de corrélation puisse être tracée entre les points de cette portion de droite choisie avec une corrélation de 0,99. Nous nous rendons compte lors de nos variations de borne que les meilleurs résultats sont plutôt liés à une corrélation de 0,999.

Module de cisaillement

La question s'est portée sur le choix du **module de cisaillement G**. En effet, La formule de la norme prend en compte le cisaillement. Dans le cas d'éléments élancés, la valeur de G ne devrait pas avoir une importance significative. Pour vérifier cela, nous faisons varier le module de cisaillement sur une large gamme de valeurs. La figure 106 montre qu'au plus le module de cisaillement augmente, au moins son impact sur le module de Young se fait ressentir. De plus, on peut observer que l'impact du cisaillement ne fait pas varier le taux de croissance de la courbe de l'étape 1 (L/200) à l'étape 3 (L/67) (0,4% seulement de 500 à ∞ GPa), ce que nous cherchons à diminuer. Nous prenons donc la valeur par défaut proposée dans la norme soit 650 GPa.

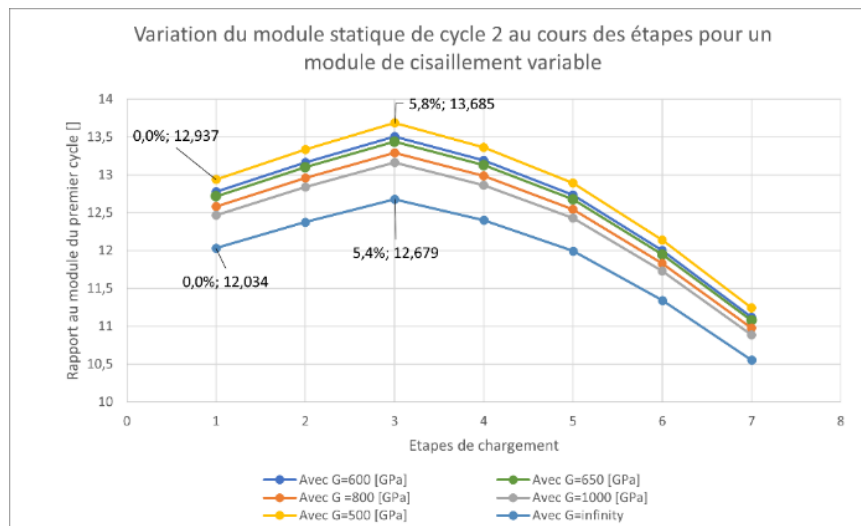


Figure 107: Variation du module statique pour un module de cisaillement variable. (Illustration personnelle)

Choix des cycles de chargement pour le calcul du module de Young

Dans la norme, le module se calcule sur base d'un seul chargement et non une succession de cycle. Une considération particulière a donc été portée sur le **choix du ou des cycles** à prendre en compte pour le calcul du module de Young, concluant qu'il était préférable de prendre le 1^{er} cycle. En effet, la figure 108 présente les croissances obtenues en fonction du cycle considéré pour le calcul du module de Young. Le cycle de placement (cycle 0) n'est définitivement pas fiable (ce qu'énonçait déjà le guide NPL [16]). Bien que le cycle 2 donne un meilleur résultat que le cycle 1, c'est le 1^{er} cycle qui est retenu pour le calcul du module de Young, aucune justification, outre un résultat correspondant d'avantage à nos attentes, ne pouvant être avancée en faveur du cycle 2. Cela traduit néanmoins le fait que des réarrangements et des effets de plastification surviennent également entre les cycles 1 et 2.

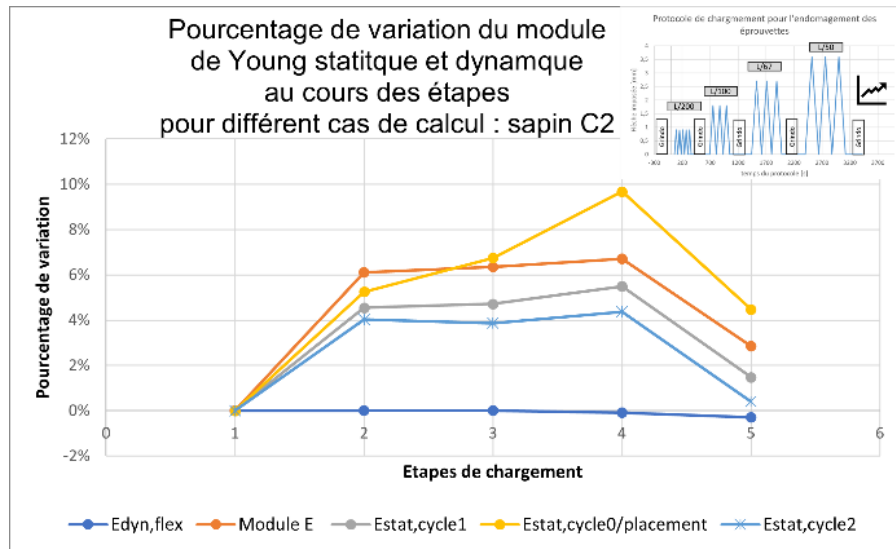


Figure 108: Choix du cycle pour la procédure de calcul du module de Young statique. (Illustration personnelle)

Poinçonnement

Les plaquettes en acier disposées sur les appuis, prescrites par la norme pour éviter le **poinçonnement** ont été élargies au-delà des dimensions données dans la norme pour limiter la perturbation de la flèche globale liée à la compression perpendiculaire aux fibres au niveau des appuis pour les hauts niveaux de contrainte.

Une cause physique

Toutes ces variations n'ont néanmoins pas permis d'abaisser totalement cette tendance à la rigidification qui survient en réalité surtout entre la première et la deuxième étape de chargement. L'augmentation de module de Young peut donc être également liée à **une cause physique**. La figure 109 montre qu'effectuer consécutivement deux fois la même étape de 5 cycles de chargement à $L/200$ donne deux modules de Young statiques différents pouvant aller jusqu'à 3% de variation. Cela pourrait correspondre au réarrangement des fibres ou des trachéïdes lors des premiers chargements. Les fibres s'alignent à la contrainte et permettent donc une meilleure résistance comme mentionné dans la section 3.1 au sujet des propriétés du bois. Le fait que ce phénomène n'est pas également visible dans le cas du module dynamique peut être dû au fait que l'onde ne souffre pas du réarrangement local des fibres dans la zone de plus grande contrainte de la flexion 4 points, elle garde donc la même fréquence.

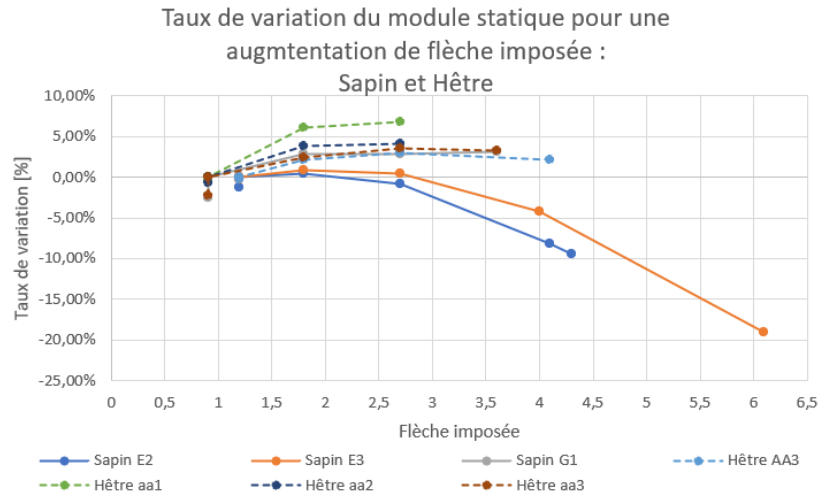


Figure 109: Augmentation du module de Young statique entre deux chargements consécutifs de même déplacement imposé. (Illustration personnelle)

Finalement, nous avons donc décidé d'utiliser $10\%F_{rupt}$ et $\min(95\%F_{max} ; 40\%F_{rupt})$ comme bornes inférieures et supérieures de la courbe force déplacement utilisée dans le calcul du module statique.

Nous avons augmenté la largeur des plaquettes supposées réduire le poinçonnement en prenant soin de bien les polir et nous avons décidé d'utiliser uniquement la deuxième courbe de chargement.

Le module de cisaillement n'a pas d'importance significative sur la rigidification de l'éprouvette au cours des étapes.

Une cause physique liée au réarrangement des fibres est cependant également responsable.

15 Choix des transducteurs et matériaux de frappe

Transducteurs

Dans cette section, nous allons aborder brièvement le principe des transducteurs à référence fixe, c'est-à-dire fixés à un point dans l'espace afin de mesurer un autre point qui lui est en mouvement. Les transducteurs masse-ressort existent aussi, mais sont plutôt d'application dans le domaine sismique. Un **transducteur** est, par sa définition, un appareil qui permet de convertir un choc ou une vibration en un signal optique, mécanique ou le plus souvent électrique, qui est proportionnel à un des paramètres de l'expérience. Ce paramètre peut être la vitesse, le déplacement l'impédance mécanique, la contrainte, la force ou l'accélération.

La performance d'un transducteur est donnée par :

- Sa sensibilité, soit le ratio entre les signaux de sa sortie électrique et l'entrée mécanique.
- Sa résolution c'est-à-dire la plus petite variation du signal mécanique d'entrée qui est perceptible.
- L'axe de sensibilité, c'est-à-dire le sens dans lequel il enregistre les ondes.
- Son domaine de fréquences. La borne haute est gouvernée par la fréquence naturelle du transducteur et la fréquence basse dépendra de l'équipement associé comme les amplificateurs ou les composantes de circuit.

Les types de transducteurs sont le micro et le **piézoélectrique** qui produit une charge électrique proportionnelle à la contrainte qui lui est appliquée dans sa limite élastique. Il existe aussi l'**accéléromètre**, l'**impédancemètre**⁵⁶, le **laser doppler vibromètre (LVD)**, les **transducteurs de type capacitance ou bien encore électrodynamiques**, mais ceux-ci ne seront pas utilisés dans le cadre de ce mémoire [20].

Frappe

Le type de marteau utilisé va dépendre à la fois du matériau analysé, de ses dimensions et du désir ou non de percevoir les harmoniques. Une clé dichotomique est fournie dans le manuel *GrindoSonic*® et reprise. Les conseils étaient d'utiliser dans le cas du bois, un matériau en bois ou en caoutchouc, on se rend compte en pratique que ces conseils ne sont pas forcément adéquats, ils servent cependant de point de départ à la recherche du choix de matériaux de frappe.

Il est également conseillé de prendre un élément de frappe assez grand pour qu'il délivre assez d'énergie que pour exciter la vibration mais assez léger que pour ne pas exciter le « free body mode »[37].

⁵⁶ L'impédance caractérise l'énergie qui entre dans un mode en raison du milieu de propagation

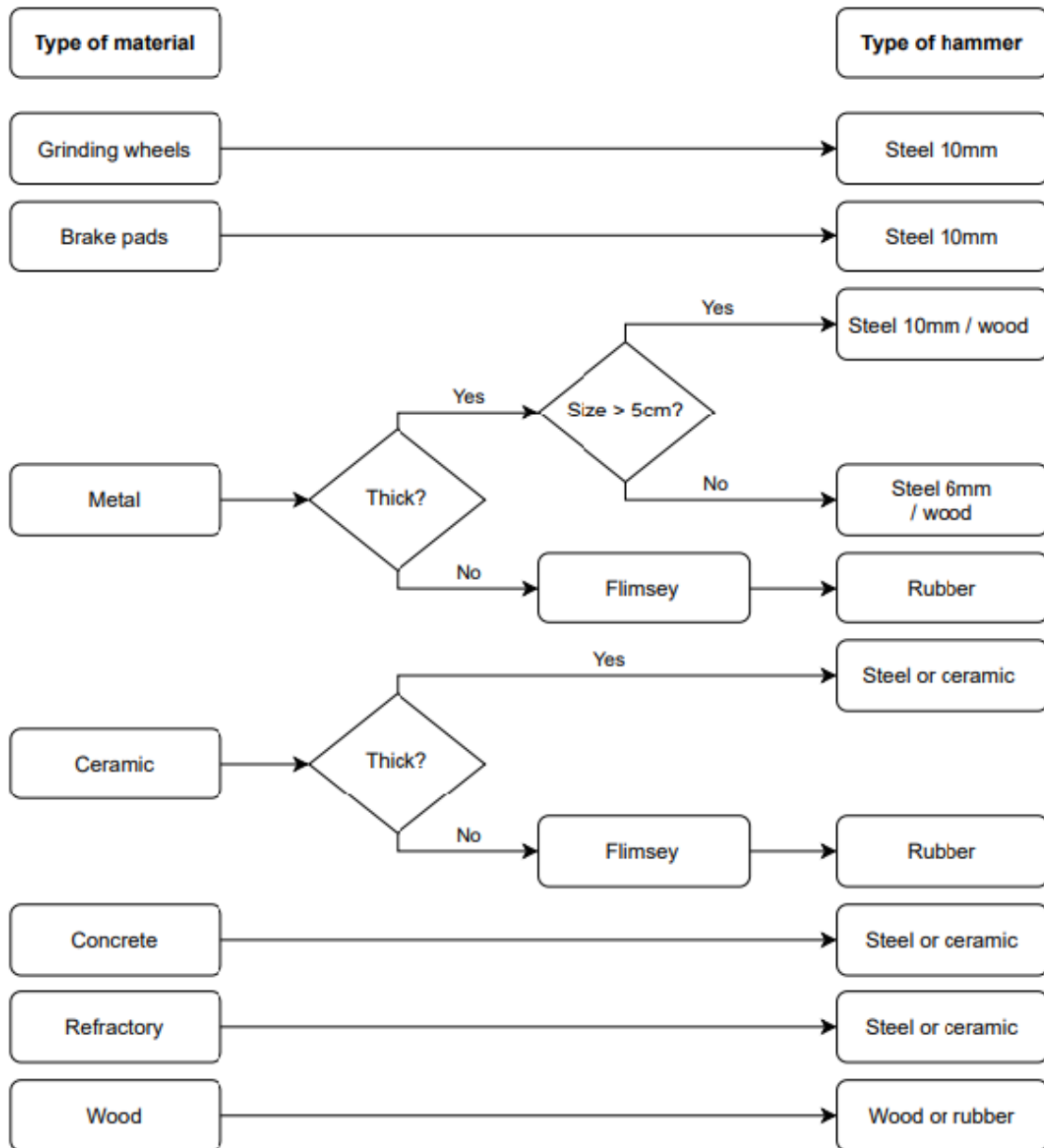


Figure 110: Clef dichotomique du choix de matériau de frappe (Source : GrindoSonic®, 2020)

16 Conseils d'utilisation du GrindoSonic® : Prise en main rapide

Le manuel d'utilisation GrindoSonic® détaille comment utiliser l'appareil, voici un résumé, pour une prise en main rapide.

- Il est soit possible de mesurer des valeurs de fréquences sans les enregistrer via l'écran d'accueil ou de créer un projet dans la section « Measurement Project » qui permet de réaliser et d'enregistrer plusieurs coups, tout en précisant dimensions et masse de l'élément testé. C'est également dans ce mode que le module de Young est donné par le *GrindoSonic*®. Pour cela les formules de la norme présentée au chapitre 0 sont utilisées.
- Il est possible d'assigner un identifiant aux mesures prises via le bouton ID, cette option permet un post-traitement des données plus aisé.
- Lors de chaque coup, il est possible de visualiser la FFT (domaine fréquentiel) et l'oscilloscope (domaine temporel). Il est ensuite possible de zoomer sur chaque graphique par un simple écartement de doigts sur l'écran. Une fois le coup suivant réalisé, les précédents ne seront plus visionnables qu'en post-traitement.
- Les résultats des tests sont donc enregistrés sous la forme de 4 fichiers .cv : Un reprenant les ID, les 4 fréquences retenues par le *GrindoSonic*®, l'amortissement qui y est lié et le module de Young associé à la fréquence propre. Les 3 autres fichiers sont les points de la FFT en termes d'amplitude (mV), de vitesse (m/s) et d'accélération (m/s²).
- L'extinction de l'appareil se fait via un bouton « Shutdown », il faut ensuite attendre 10 sec avant de pouvoir l'éteindre et le débrancher.

Le *GrindoSonic*® MK7 dans sa mise à jour commandée par l'UCL, peut faire survenir quelques problèmes. Certains ont déjà été corrigés et mis à jour dans la nouvelle version.

Durant les expériences :

- Lorsque l'on change de projet et de filtre, en mesure avec le micro, le 1^{er} coup est toujours erroné. Cela se remarque car il est différent des coups suivants mais aussi car la FFT est composée de barres et non de gaussiennes.
- Pour enregistrer les données enregistrées par le *GrindoSonic*®, le transfert sur clef USB n'est pas instantané, il faut attendre quelques secondes, soit plus ou moins le temps nécessaire pour ranger le transducteur, les appuis et les marteaux. (Corrigé dans la nouvelle version)
- Une clef USB est disponible dans le pack *GrindoSonic*®, elle est formatée en FAT32, cependant, aucune clef USB autre n'est reconnue par le *GrindoSonic*® mis à part, pour le moment, un autre modèle également de la marque Kingston®.
- Au changement de projet, surtout si le projet est créé au départ d'un autre, il faut faire très attention aux paramètres de l'échantillon, et les vérifier une fois le projet créé. En effet, il arrive que le nouveau projet créé garde les paramètres de l'ancien. Sur la figure 111, il faut que la fenêtre de droite soit vérifiée.

Figure 111 : Fenêtre de création d'un projet (gauche), la fenêtre du projet (droite). (Illustration GrindoSonic)

- Lors de la création d'un projet, dans le cas des grumes, la masse maximale autorisée dans la fenêtre de création de projets est inférieure à la masse de la grume (100kg). Il faut donc introduire une masse erronée et la changer une fois le projet créé, car le *GrindoSonic*® sait implémenter la formule pour des masses allant jusqu'à 100 tonnes [14].
- Si plusieurs coups d'affilés sont identiques (exactement la même FFT, les mêmes fréquences et les mêmes amortissements), sans délai de mesure et peu importe le matériau testé, le *GrindoSonic*® est certainement figé. La seule solution trouvée est alors de l'éteindre via le bouton ON-OFF et de le rallumer (car il sera impossible de l'éteindre de manière conventionnelle via le bouton *shutdown*). Cela arrive généralement lorsque le *GrindoSonic*® est utilisé durant la journée complète. 4 fois sur les 5 où le problème est survenu, aucune donnée n'a été perdue.
- Il arrive que le *GrindoSonic*® enregistre des fréquences négatives, cela est bien sûr impossible, il faut alors les supprimer manuellement au moment de l'expérience ou en post-traitement.

En post-traitement :

- Il arrive que certains fichiers FFT-Amplitude comportent plus de lignes que de coups. C'est en réalité car les données se sont écrites sur plusieurs lignes (la cause de ce phénomène est inconnue). Une fonction Python⁵⁷ permet de reconnaître sur base des premiers éléments d'une ligne, si les données sont la suite de la ligne précédente ou si elles sont les données d'un nouveau coup.
- Si le souhait est de récupérer les fréquences sur base du graphique de la FFT, il faut augmenter la précision (le nombre d'échantillons pris par seconde). C'est un équilibre qu'il faut alors trouver entre la précision recherchée et le temps de prise de mesure. Il sera alors en outre impossible de récupérer l'amortissement à moins d'utiliser un logiciel comme *VibrationData*. Les valeurs ressorties par le *GrindoSonic*® sont quant à elles au nombre de 4 au maximum⁵⁸, avec leur amortissement associé. Le choix se fait donc en fonction du but recherché par l'expérience (se concentrer sur l'amortissement ou sur les harmoniques).

⁵⁷ Accessible sur demande auprès de l'auteur

⁵⁸ Comme mentionné plus tôt, leur précision ne dépend pas de la précision de la FFT.

17 Les paramètres numériques du GrindoSonic®

Plusieurs paramètres peuvent être sélectionnés dans la boîte de discussion GrindoSonic®, voici leur signification et les valeurs conseillées dans le cas des grumes et des petites éprouvettes en bois sur base de la théorie et de nos observations expérimentales. Ce tableau fait référence à beaucoup de concepts théoriques mentionnés précédemment.

Tableau 17 : Tableau détaillant les paramètres internes du GrindoSonic®

Nom du paramètre	Définition / Conseils du manuel	Valeurs conseillées dans le cas de petits éléments (éprouvettes)	Valeurs conseillées dans le cas des grands éléments (grumes)
Préamplificateur	Filtre passe-haut supplémentaire de 1 ^{er} ordre. Usuellement la valeur de 200Hz est utilisée, cela permet d'éliminer les mouvements du corps libre sur ses appuis. La valeur de 20Hz peut être utilisée pour des objets à très faible fréquence de résonance ou pour des éléments longs.	200Hz	Malgré les conseils du manuel, nous avons remarqué que l'utilisation du préamplificateur de 20Hz donnait des valeurs de fréquences moins répétables et ne permettait pas d'obtenir des fréquences sous 100 Hz.
Timeout	Durée après laquelle l'appareil envoie un message d'erreur si aucune valeur n'a été renvoyée. Cela dépend donc du temps de traitement du signal pour trouver les fréquences propres)	Par défaut, cette valeur est mise à 3 s, nous n'avons jusqu'à présent jamais été obligés de changer cette valeur. L'augmenter n'est pas forcément la solution après de multiples affichages timeout en expérience, car un temps de calcul trop long est plutôt lié à un signal trop complexe, duquel il est probablement impossible de tirer des informations pertinentes.	
Peak detection sensitivity	Détermination d'un pic sur base du nombre de points d'amplitude inférieure de part et d'autre du de la valeur de pic.	La valeur par défaut est 10 et peut varier de 2 à 28, ce paramètre prend de l'importance seulement si peu de pics sont présents, il servira alors à différencier une réelle fréquence du « bruit », dans le cas d'un matériau comme le bois il n'est donc pas important.	

Ignoring peaks less than x% of highest	Permet d'ignorer les pics plus bas qu'un pourcentage donné de l'amplitude du pic maximal, lors du choix par le <i>GrindoSonic</i> ® des fréquences qu'il renverra (maximum 4)	Cette fonction est utile pour le choix des 4 valeurs pour lesquelles le <i>GrindoSonic</i>® renverra une fréquence exacte (voir section 4.2.2) et une valeur d'amortissement qui y correspond. Si l'objectif est uniquement de récupérer les fréquences à la précision de la FFT, alors ce paramètre est inutile et s'implémente en post-traitement, retournant alors tous les pics supérieurs à une certaine valeur et non 4 uniquement. En règle générale, 10% est une valeur acceptable afin d'éliminer le « bruit ». En cas de nombreux pics, ce paramètre prend bien évidemment le pas sur le paramètre précédent.
Trigger level	Détermine l'attente (pourcentage en diminution d'amplitude dans le domaine temporel) avant que le traitement du signal ne commence. Les données du graphique de l'oscillation (dans le domaine temporel) restent quant à elles toujours complètes (du temps initial au temps final du test) Cela permet donc d'isoler les perturbations dues à l'excitation initiale et de permettre aux harmoniques (liées théoriquement à un amortissement plus élevé) de s'atténuer rendant le signal plus propre. Pour des matériaux dont les oscillations s'atténuent vite, il est donc intéressant d'augmenter le trigger level.	Dans le cas du bois, des valeurs de 50,60,70% fonctionnent bien. Si la fréquence propre n'est pas la fréquence de plus grande amplitude, il est utile d'augmenter le trigger level.
FFT normalisation	Cela normalise le pic à une amplitude de 1000 dans les fichiers enregistrés, cela permet de comparer différents échantillons et différentes frappes entre elles sans être impacté par la force de la frappe.	La normalisation se fait également en post-traitement. Pour ne pas perdre d'information il est dès lors préférable de ne pas la mettre.
Digital filter	Permettent de canaliser la prise de mesures entre 2 valeurs. Cela permet donc de cibler la fréquence propre	Si le test présente beaucoup de pics, cette fonction est intéressante pour forcer le <i>GrindoSonic</i> ® à choisir ses 4

	quand on sait dans quelle fourchette elle doit se trouver. Pour avoir plus de précision en termes de fréquence, il est préférable de cibler la fréquence attendue [27].	fréquences et amortissements dans le domaine qui nous intéresse. Cependant, une fois le filtre appliqué, l'enregistrement des données se fait également avec ce filtre et le signal pur n'est donc pas récupérable.
<i>Number of sample et sample frequency</i> Ces deux paramètres déterminent la résolution fréquentielle	Cela permet de régler le nombre d'échantillons pris par secondes et la fréquence de prise. Augmenter indépendamment la fréquence d'échantillonnage va augmenter la fréquence maximale mesurable (Théorème de Niquist-Shannon, voir section 2.6) mais va diminuer la résolution de la fréquence de la FFT. Augmenter indépendamment le nombre d'échantillons va augmenter le temps de mesure mais améliorer la résolution de la fréquence de la FFT. L'enjeu est alors de trouver un équilibre en fonction de l'objectif recherché.	En post traitement, il est intéressant d'avoir une meilleure résolution de fréquence de la FFT, mais cette résolution est dépendante de la valeur de la fréquence recherchée / correspondant à la fréquence propre ou aux harmoniques (au plus celle-ci est élevée, au moins la résolution de fréquence peut être bonne). Ce paramètre n'a aucun impact sur les valeurs de fréquence ressorties par le <i>GrindoSonic®</i> mais améliore la répétabilité des valeurs d'amortissements. La résolution fréquentielle est par défaut dans le <i>GrindoSonic®</i> à 12,21Hz, nous avons fini par l'abaisser à 0,61Hz pour plus de précision au niveau de l'amortissement et un post-traitement sur base de la FFT plus aisé.
Gain settings	Permet d'amplifier l'amplitude des fréquences recherchées qui sont parfois dépassées par d'autres fréquences et sont alors ignorées dans les 4 valeurs ressorties par le <i>GrindoSonic®</i> .	A été utilisé sans succès pour tenter d'obtenir la faible fréquence propre attendue dans le cas de l'oscillation en flexion d'une grume. Voir section 7.6.
FFT peak Sequence : frequency high-low ou amplitude high-low	Les 4 valeurs retirées par le <i>GrindoSonic®</i> seront soit triées par ordre d'amplitude ou par ordre de fréquence. Cela détermine alors quel sera le critère pour le choix de la fréquence propre, et donc déterminant la valeur du module de Young.	Pour des éprouvettes, en longitudinal il est préférable de choisir l'amplitude et en flexionnel la fréquence. Bien que dans le cas du flexionnel, l'utilisation d'un <i>digital filter</i> retire toute confusion. Les grumes comportant beaucoup plus de pics, il est préférable de les trier par amplitude, afin d'éliminer les pics de moindre importance.

FFT amplitude/ velocity/ acceleration	Détermine l'ordonnée de la FFT pour l'affichage sur écran durant le test	L'option couramment utilisée est l'amplitude (mV), néanmoins, les 3 fichiers sont fournis et enregistrés.
Fitting damping	Il existe plusieurs manières d'exprimer l'amortissement, voir section 2.5.2, la valeur par défaut de <i>GrindoSonic</i> ® est le « 3dB Bandwidth Hz »	Pour comparer plus facilement les valeurs entre elles, il est conseillé de garder toujours la même expression de l'amortissement.

Un **clipping** peut se produire quand on utilise la fonctionnalité « gain setting », en effet, cela survient lorsqu'un amplificateur ou un circuit analogique est saturé et que la tension de sortie est limitée par sa valeur maximale[89].

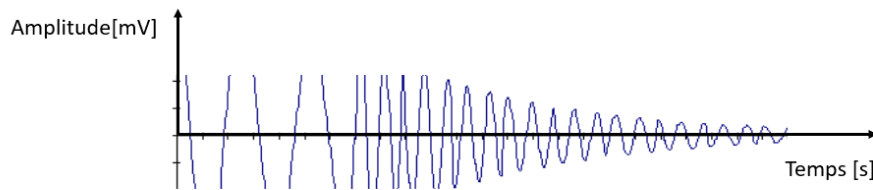


Figure 112 Exemple de clipping (Illustration personnelle)

Le clipping survient lorsque le gain de préamplification est trop élevé. La solution est de mettre un **post gain** ou de taper moins fort.

La fonctionnalité de **gain setting** sert en réalité à obtenir les harmoniques supérieures, ce que nous ne recherchons pas dans le cas de la détermination du module de Young. En effet, dans le spectre total, lors d'une mesure, l'énergie de l'onde de fond (en amplitude) est environ 100x supérieure à l'énergie de la 5^e harmonique. Il faut alors éliminer l'onde de fond (en modifiant le préamplificateur *soit gain setting*). C'est à ce moment-là qu'il faut alors vérifier qu'il n'y a pas de clipping. Il faut alors par la suite amplifier les harmoniques (en ajustant le post-filtre de la gamme de fréquences recherchées) afin d'obtenir les harmoniques supérieures (si cela est le but recherché).

Il existe d'**autres fonctionnalités** que propose le *GrindoSonic*® mais qui ne sont pas comprises dans la version achetée par l'EPL à savoir les graphiques 3D et les tests sous température et de dilatation qui ne peuvent être réalisés que couplés avec un autre dispositif de la gamme *GrindoSonic*®, le « système haute température ».

18 Résultats des éprouvettes parallélépipèdes rectangles

Épicéa

Nomenclature : EPIXX-Y : XX étant le numéro de la grume dans laquelle l'éprouvette a été débitée et Y le numéro de l'éprouvette.

Tableau 18: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : épicéa

Nom	L	b	t	m	H%	Es	Edyn,flex	Edyn,Long	test	résolution	etat final
EPI03.2	300	29,8	10,25	38,85	16,3	9,962	8,9467	9,5445	Zwick delta	12,21	rupture
EPI03.1	301	29,9	10,2	41,38	17	10,456	9,5086	10,228		12,21	rupture
EPI05.2	300	28,9	10,5	41,87	9,5	16,78	14,974	15,762		0,61 flex et 4,89 long	rupture
EPI05.5	300	29	10,4	40,53	9,2	13,977	12,71	12,732		0,61 flex et 4,89 long	rupture
EPI10.1	301	29	10,6	39,79	8,8	15,439	13,01	13,359		0,61 flex et 4,89 long	rupture
EPI10.2	301	29	10,5	40,34	8,8	16,892	14,98	15,348		0,61 flex et 4,89 long	rupture

Les graphiques liés à cette essence se trouvent et sont commentés en parallèle avec les essences de sapin, hêtre et chêne dans le texte principal.

Chêne

Nomenclature : ChXY : X étant la planche Y le numéro de l'éprouvette.

Tableau 19: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : chêne

Nom	L	b	t	m	H%	Es	Edyn,flex	Edyn,Long	test	résolution	état final
Ch31	229	30,5	10,2	57,1	13,8	12,008	11,11	11,22	Zwick delta	0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch32	300	30,6	10,15	57,4	14	12,085	11,2	11,297		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch33	301	30,5	10,2	58,22	12,8	11,5	11,13	11,57		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch43	301	30,7	10,1	61,34	14	8,36	7,99	8,24		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch21	301	30,5	10,07	59,88	14,7	13,48	12,83	13		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch22	301	30,5	10,1	59,03	14,6	12,52	11,64	12,33		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch41	301	30,7	10,1	63	14,3	9,06	8,7	8,948		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch42	301	30,8	10,1	61,38	14,4	8,58	8,17	8,33		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch11	300	30	10	59,41	14,8	11,254	10,14	10,67		0,61 flex 12,21 long	rupture
Ch12	300	30	10	63,05	15,4	14,43	14,691	14,491		0,61 flex 12,21 long	rupture

Evolution des modules statique et dynamique flexionnel au cours des étapes de chargement : Chêne

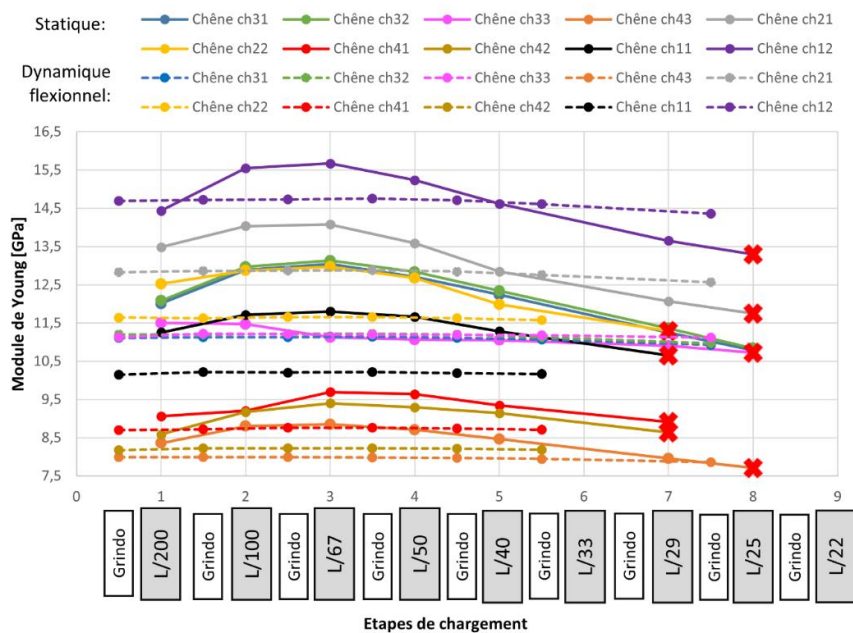


Figure 113 : Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$: chêne

Evolution du déplacement résiduel instantané au cours des étapes de chargement: Chêne

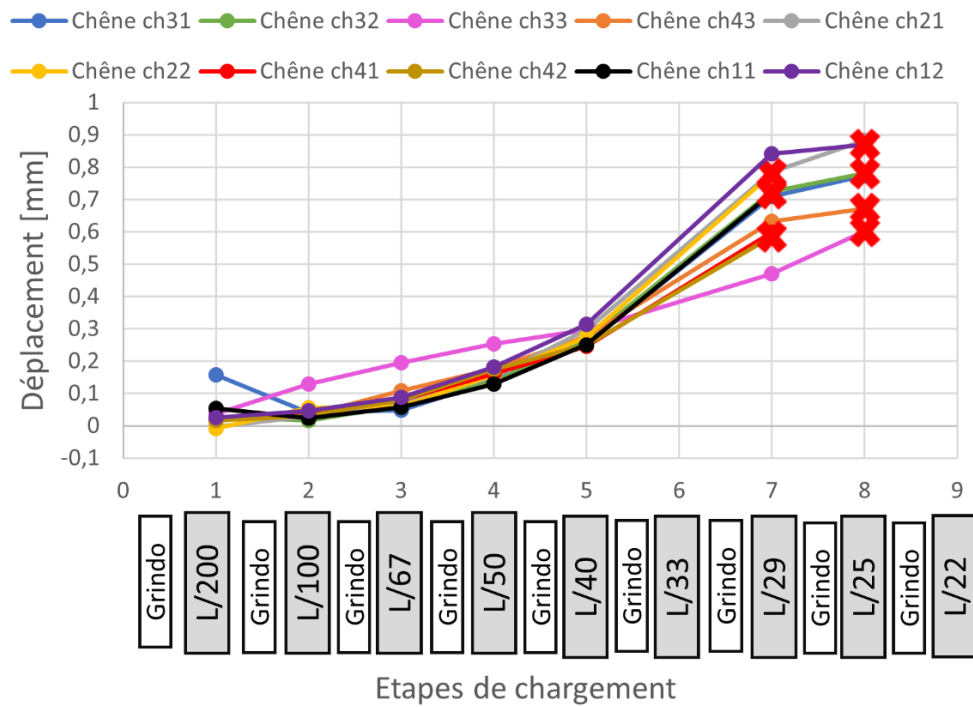


Figure 114: Déplacement résiduel instantané lors du 1^{er} cycle au cours des étapes : chêne

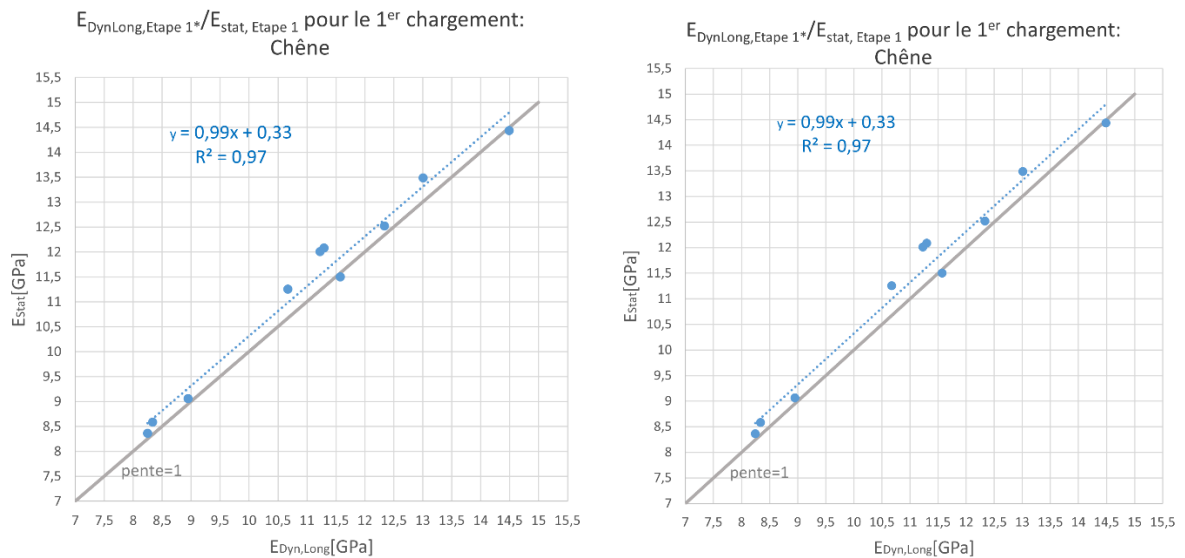
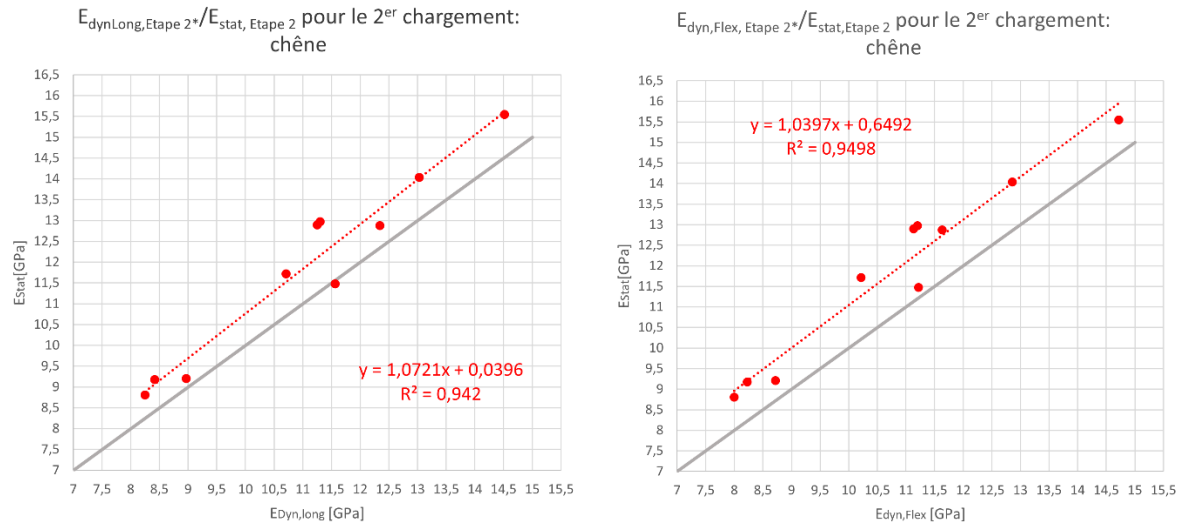
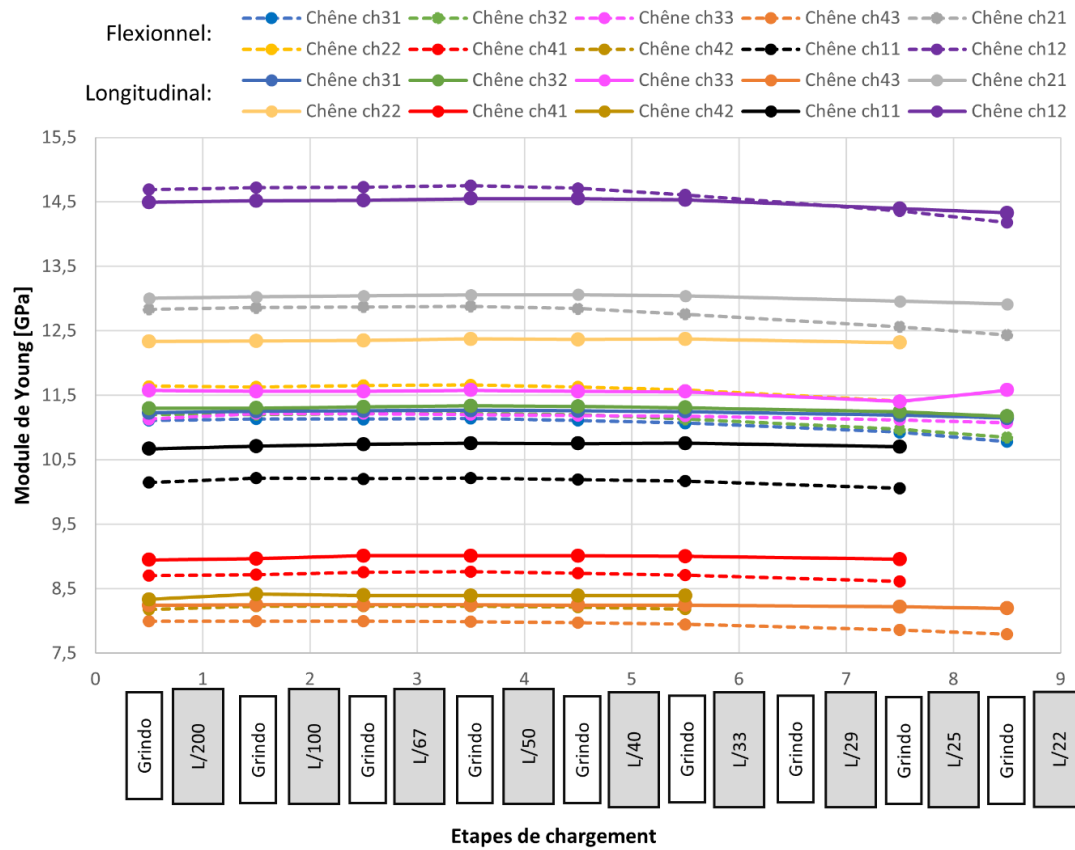
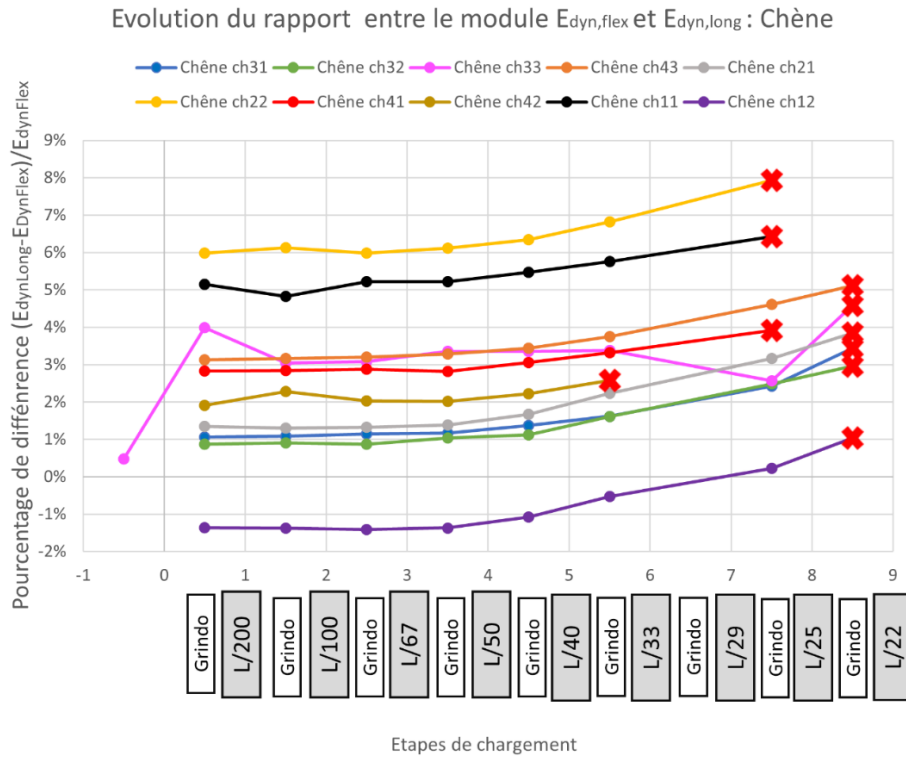
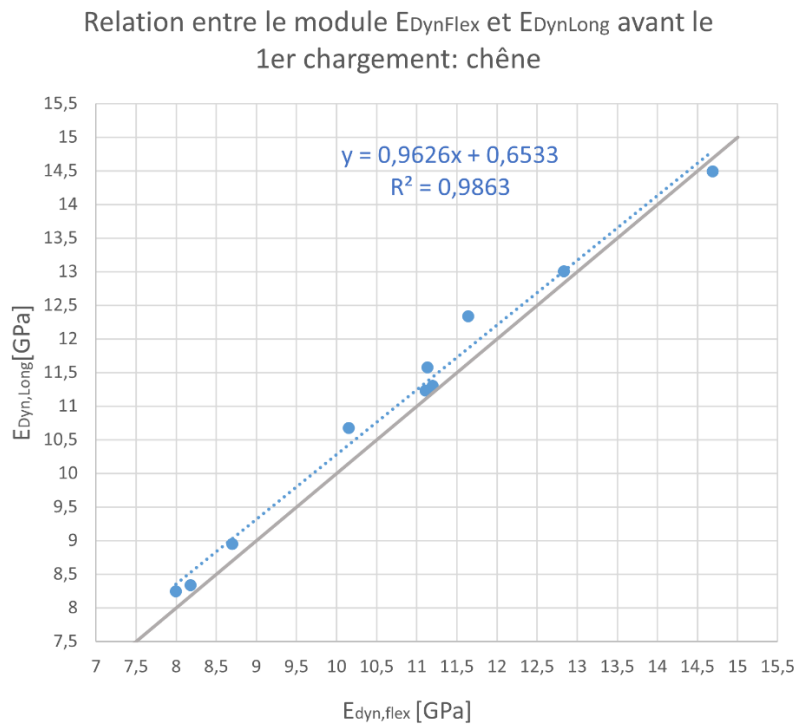


Figure 115: Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{stat}$ pour le 1^{er} chargement: chêne


 Figure 116 : Corrélations $E_{Dyn,Long}/E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex}/E_{Stat}$ pour le 2^e chargement: chêne

 Evolution des modules $E_{dyn,flex}$ et $E_{dyn,long}$ au cours des étapes: Chêne

 Figure 117 : Évolution des modules $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ au cours des étapes de chargement : chêne


 Figure 118 : Rapport $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,flex}$ au cours des étapes de chargement : chêne

 Figure 119: Corrélation entre module $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,flex}$ avant le 1er chargement: chêne

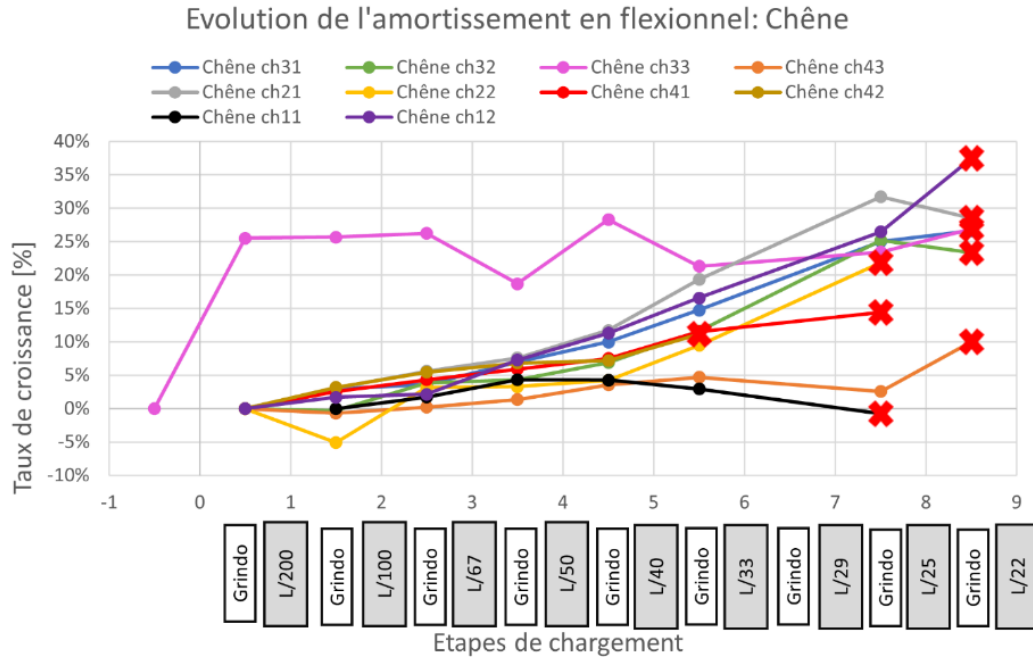


Figure 120 : Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : chêne

Sur la figure ci-dessus, la courbe rose représentant le chêne ch33, a subi avant le début du protocole, un chargement de haute contrainte qui a eu un effet de plastification.

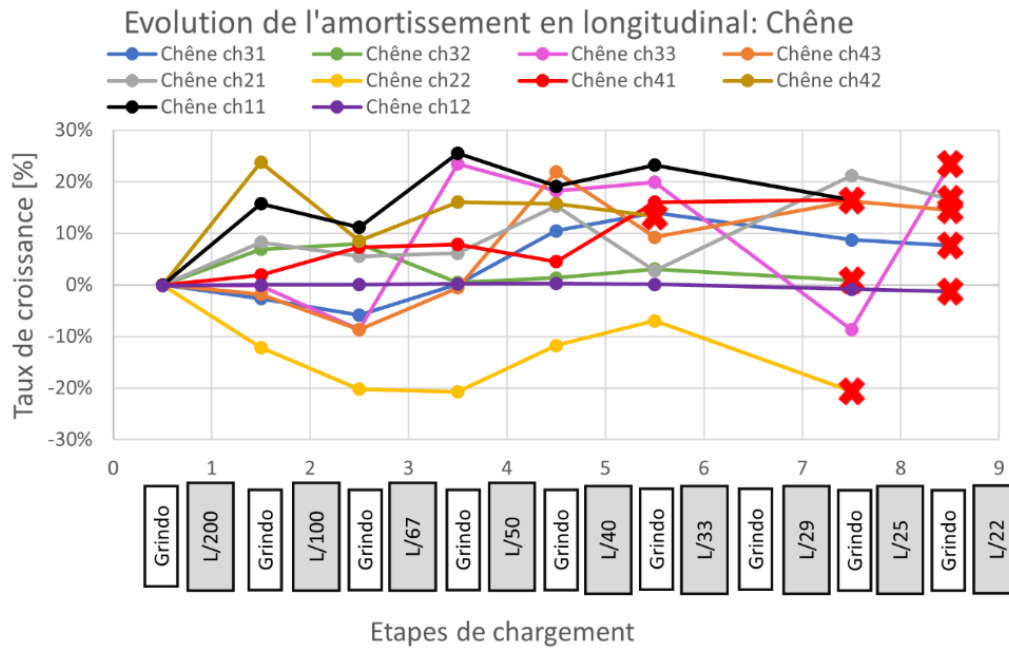


Figure 121: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : chêne

Sapin

Nomenclature : XY : X étant la planche et Y le numéro de l'éprouvette.

Tableau 20: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : sapin

Nom	b	t	L	m	H%	Es	Edyn,flex	Edyn,Long	test	Résolution	etat final
C4	30	10	300	41,12	7,2	12,717	12,111	12,732	Zwick Delta	12,21	Rupture
C2	30	10	300	41,79	7,9	13,049	13,099	14,026		12,21	Rupture
F5	30	10	300	33,56	6,6	9,902	9,49275	10,082		12,21	Rupture
F1	30	10	300	33,04	6,3	8,916	8,6518	8,787		12,21	Rupture
A1	30	10	300	32,69	7,1	9,883	9,5236	9,696		12,21	Rupture
A2	30	10	300	31,91	6,6	9,918	9,4289	9,699		12,21	Rupture
D2	30	10	300	45,98	6,6	16,171	15,704	16,542		4,27	Rupture
D1	30	10	300	44,1	7,2	15,677	14,063	15,046		4,27	Rupture
D3	30	10	300	43,02	6,7	14,473	13,638	14,32		4,27	Rupture
G4	30	10	300	39,19	7,8	11,349	11,35	11,47		4,27	Rupture
B1	30	10	300	33,17	6,8	9,288	9,7274	10,754		0,61 flex 12,82 long	Pas rupt
B2	30	10	300	32,97	6,6	8,389	8,03	8,29		0,61 flex 12,82 long	Rupture
B3	30	10	300	35,99	6,4	4,916	5,585	6,6666		0,61 flex 12,82 long	Rupture
E2	30	10	300	39,71	7	15,808	13,978	14,387		12,21	pas rupt
E3	30	10	300	42,93	7	14,555	12,426	12,285		12,21	pas rupt
G1	30	10	300	38,03	6,4	11,68	11,61	12,105		0,61 flex 12,82 long	pas rupt
G2	30	10	300	37,13	6,4	11,28	11,129	11,685		0,61 flex 12,82 long	pas rupt

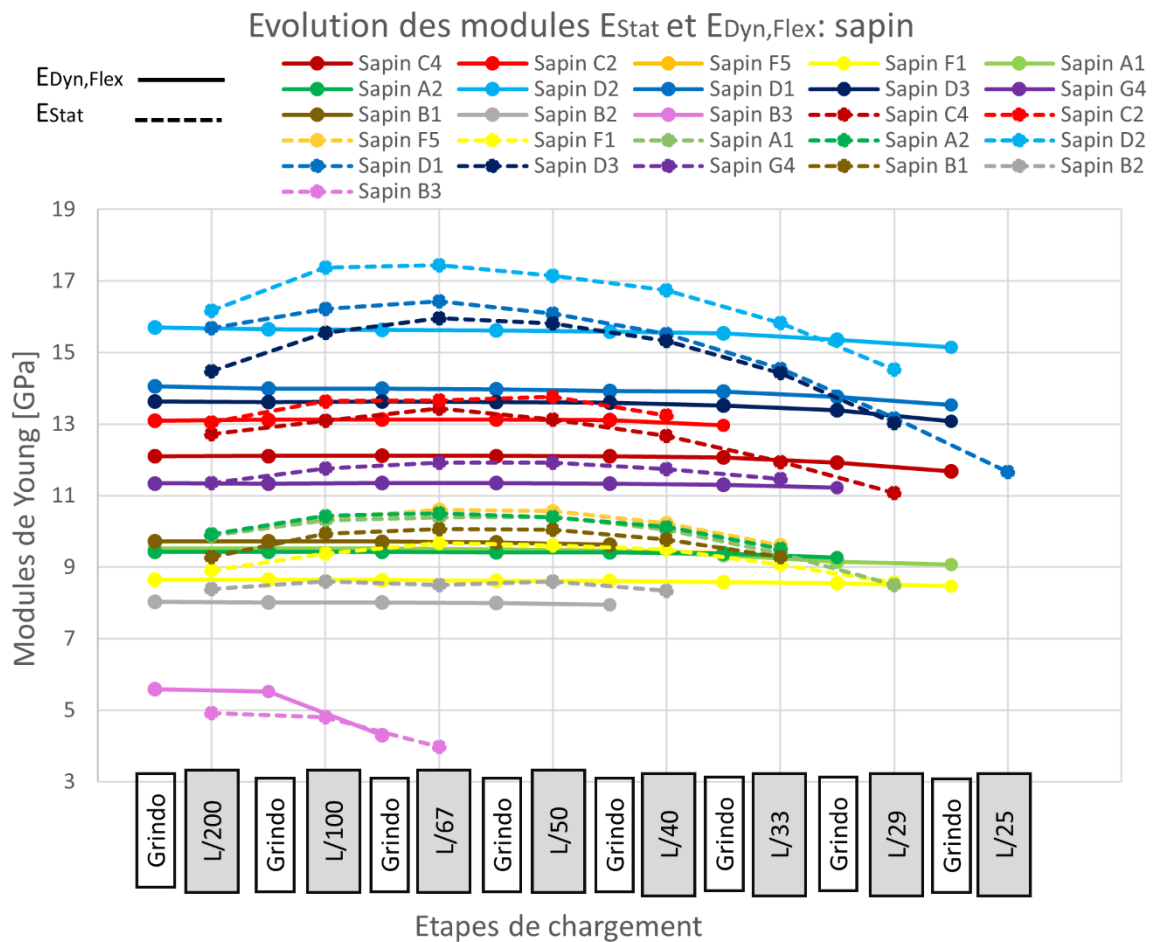


Figure 122: Évolution des modules E_{Stat} et E_{Dyn, Flex}: sapin

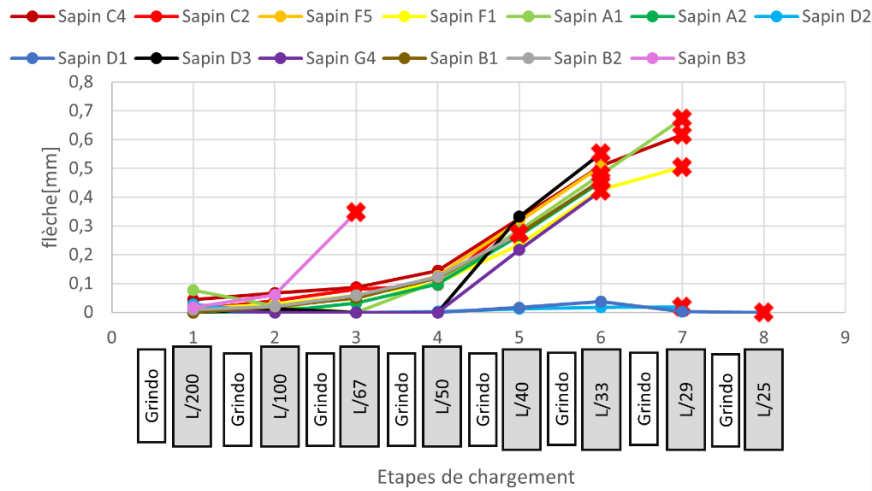
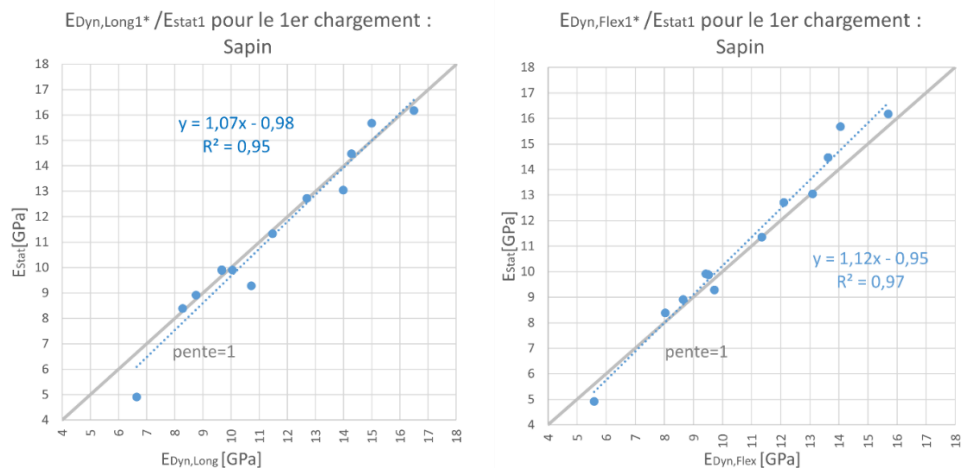
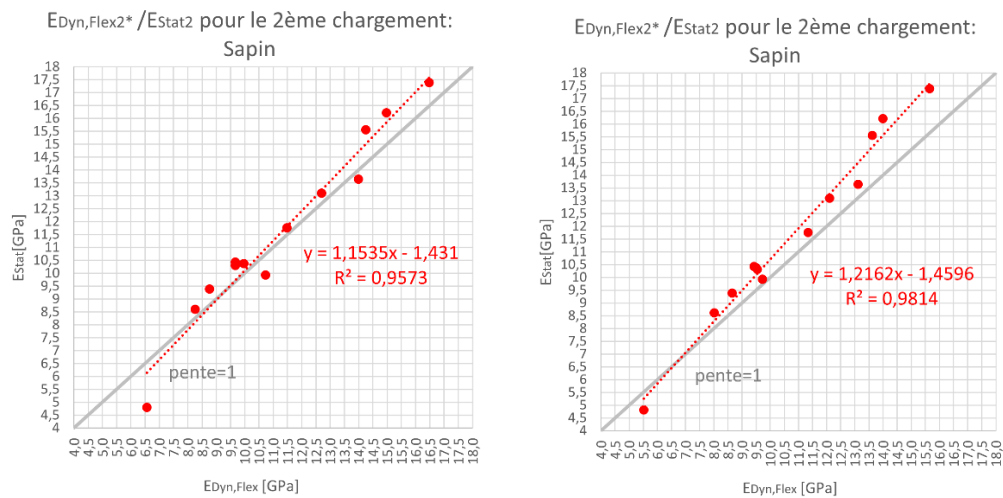
Evolution de la flèche résiduelle instantanée au cours
des étapes de chargement: sapin


Figure 123: Évolution de la flèche résiduelle instantanée au cours des étapes : sapin


 Figure 124: Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 1^{er} chargement: sapin

 Figure 125: Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 2^e chargement: sapin

Evolution du rapport entre le module $E_{Dyn,flex}$ et $E_{Dyn,long}$:
Sapin

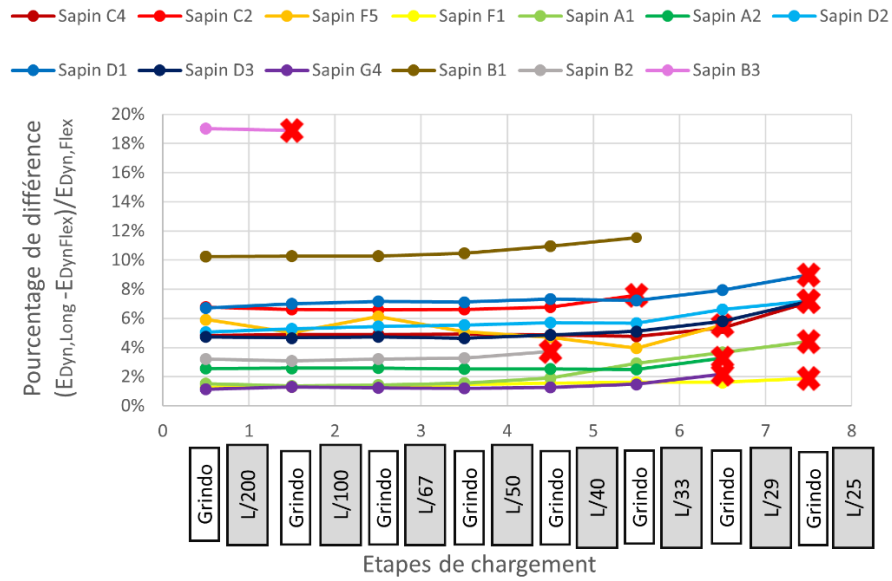


Figure 126: Rapport $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ au cours des étapes de chargement : sapin

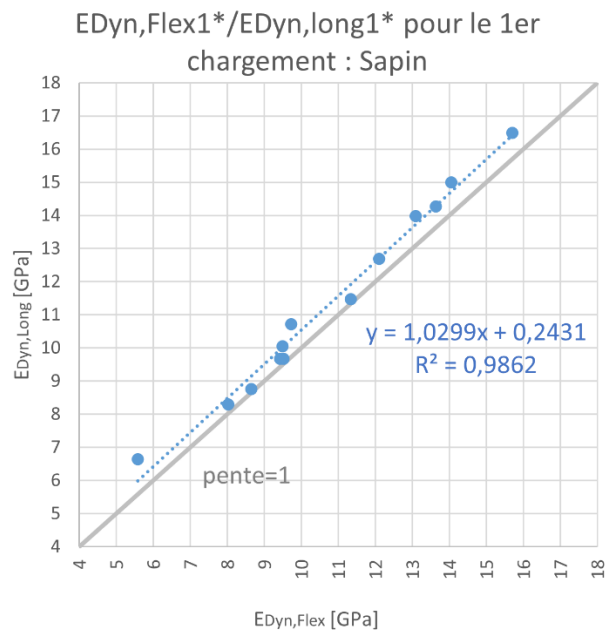


Figure 127: Corrélation entre module $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ avant le 1er chargement: sapin

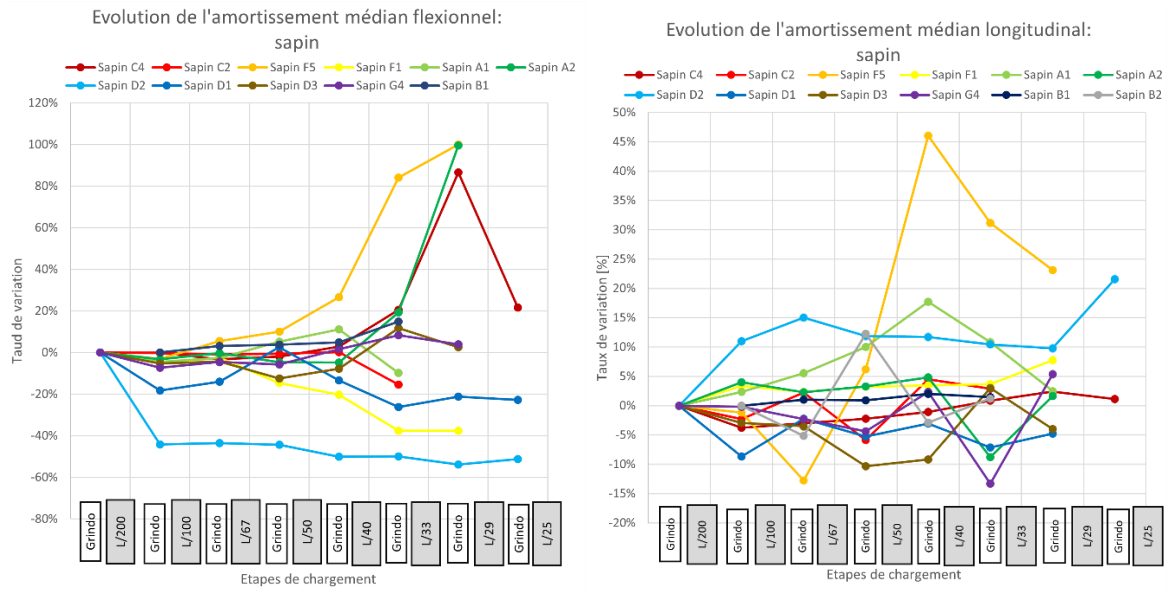


Figure 128: Évolution de l'amortissement flexionnel et longitudinal au cours des étapes : sapin

Hêtre

Nomenclature : AXY : X étant la planche et Y le numéro de l'éprouvette.

Tableau 21: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : hêtre

Nom	b	t	L	m	H%	Es	Edyn,Flex	Edyn,Long	test	Résolution	etat final
AB1	30	10	300	55,37	8,5	9,706	10,02	10,53	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt
AB2	30	10	300	56,36	8,6	10,229	9,61	10,03	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt
AB3	30	10	300	58	8,8	10,121	9,663	10,26	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt
AA4	30	10	300	59,62	8	11,5	10,7654	11,18	Zwick depl	12,21	pas rupt
AA1	30	10	300	60,01	9	11,61	12,2045	12,72	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt
AA2	30	10	300	61,73	9	13,98	12,7808	12,87	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt
AA3	30	10	300	60,46	10,6	12,44	10,7897	11,12	Zwick depl	0,61 flex 12,82 long	pas rupt

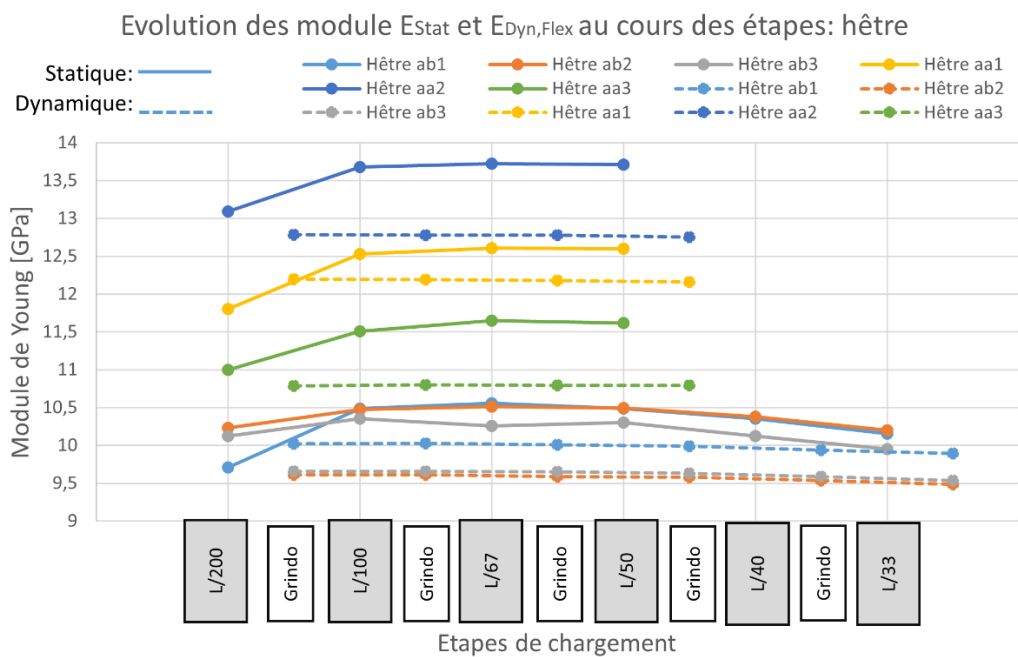


Figure 129: Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn,Flex}$ au cours des étapes : hêtre

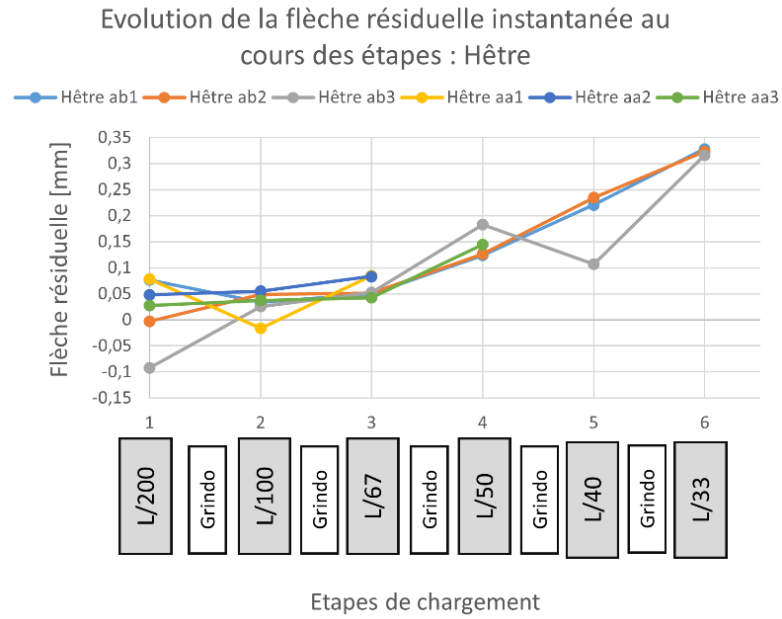
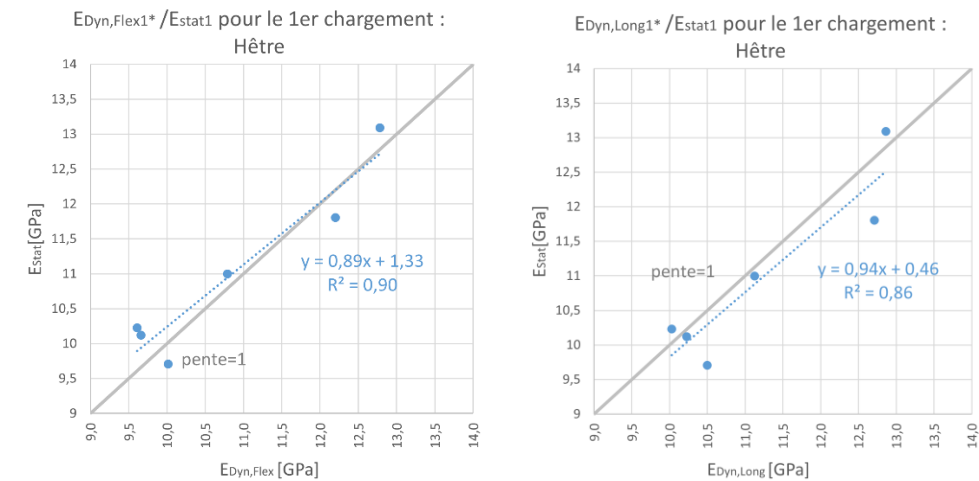
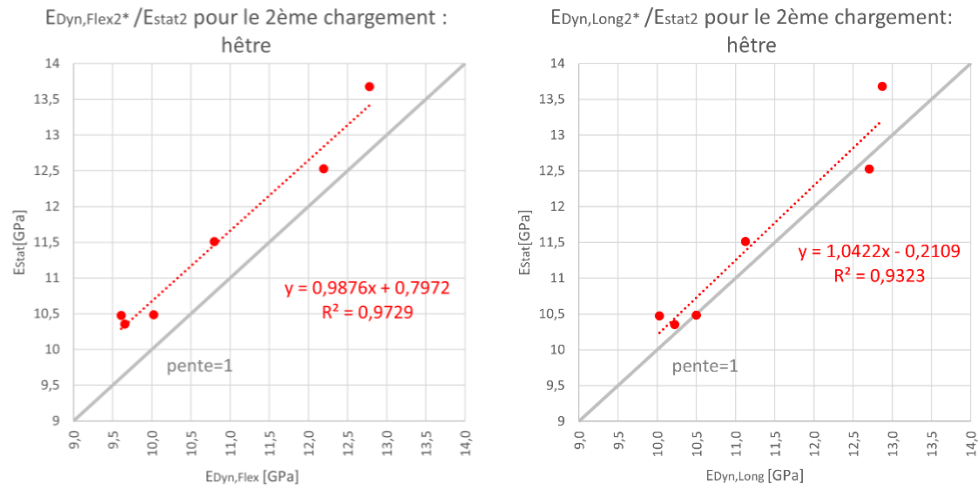
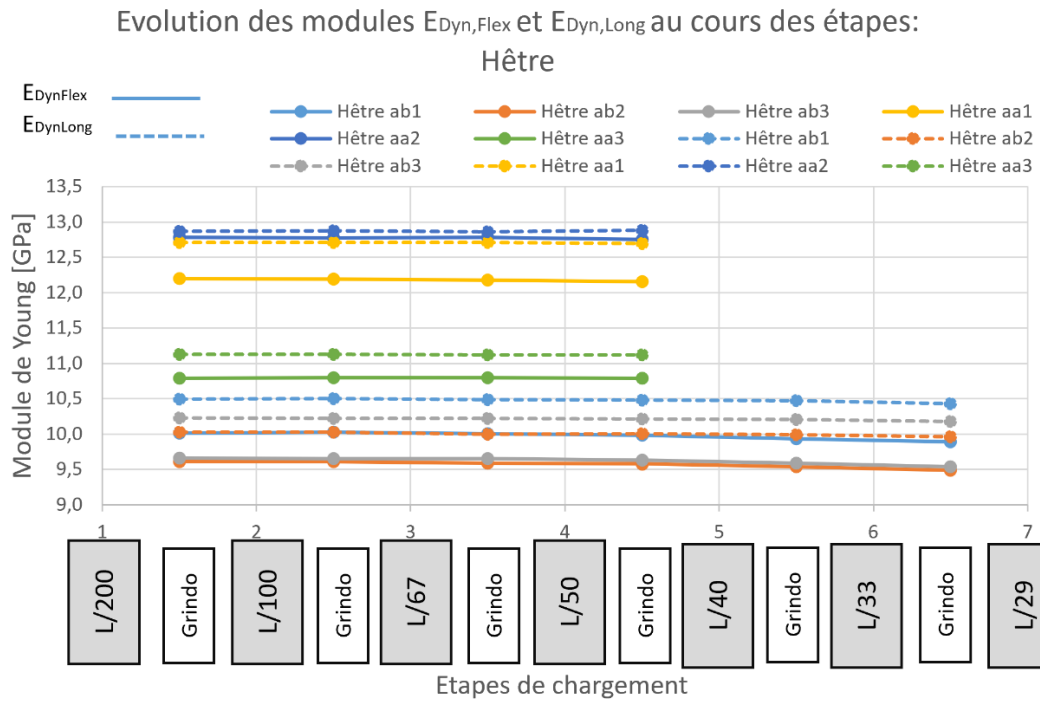


Figure 130: Évolution de la flèche résiduelle au cours des étapes : hêtre


 Figure 131: Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 1^{er} chargement: hêtre


 Figure 132 : Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 2^e chargement: hêtre

 Figure 133: Évolution des modules $E_{Dyn,Flex}$ et $E_{Dyn,Long}$ au cours des étapes de chargement : hêtre

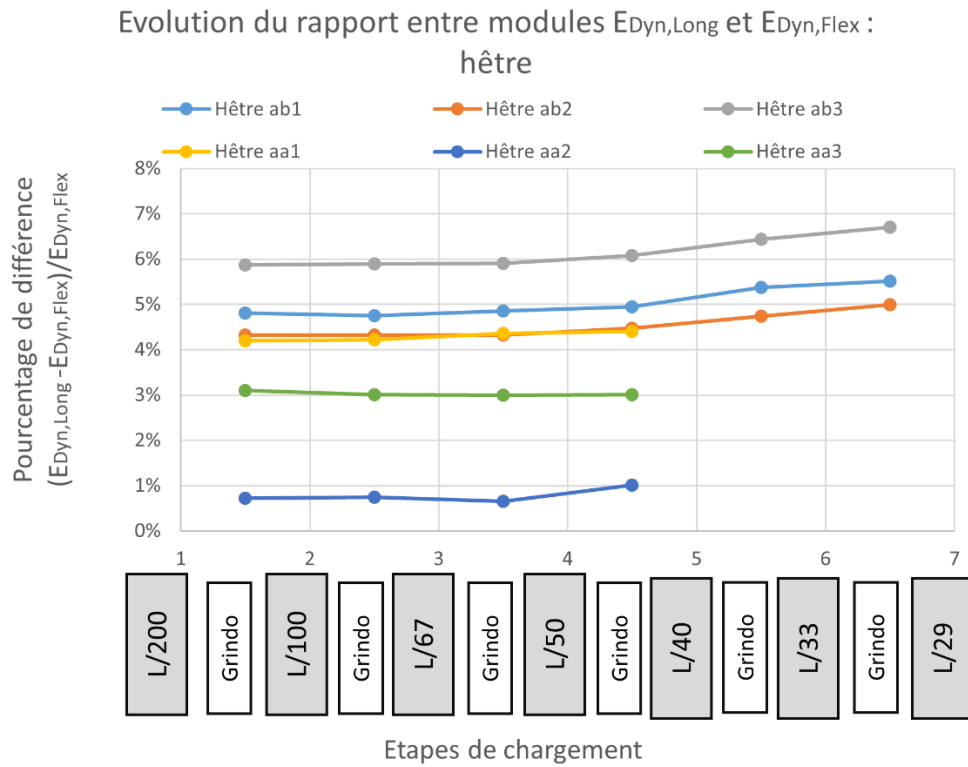


Figure 134: Rapport $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ au cours des étapes de chargement : hêtre

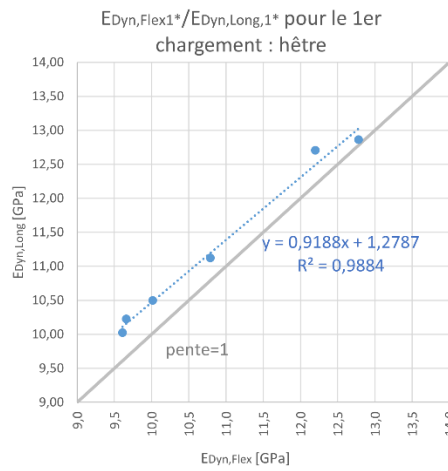


Figure 135 : Corrélation entre module $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ avant le 1er chargement: hêtre

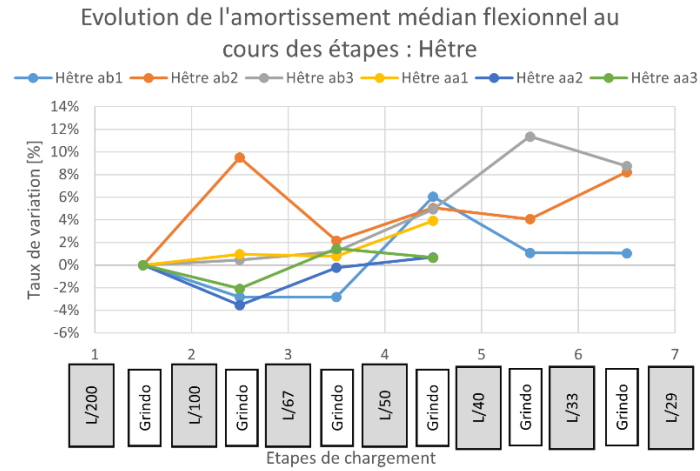


Figure 136 : Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : hêtre

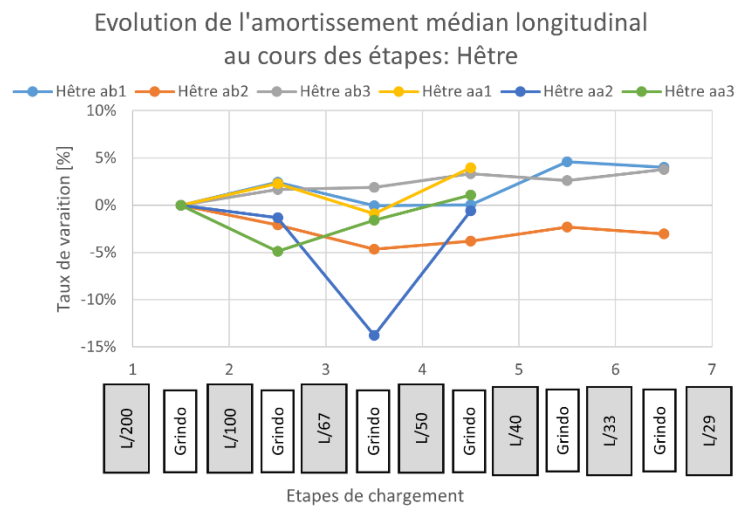


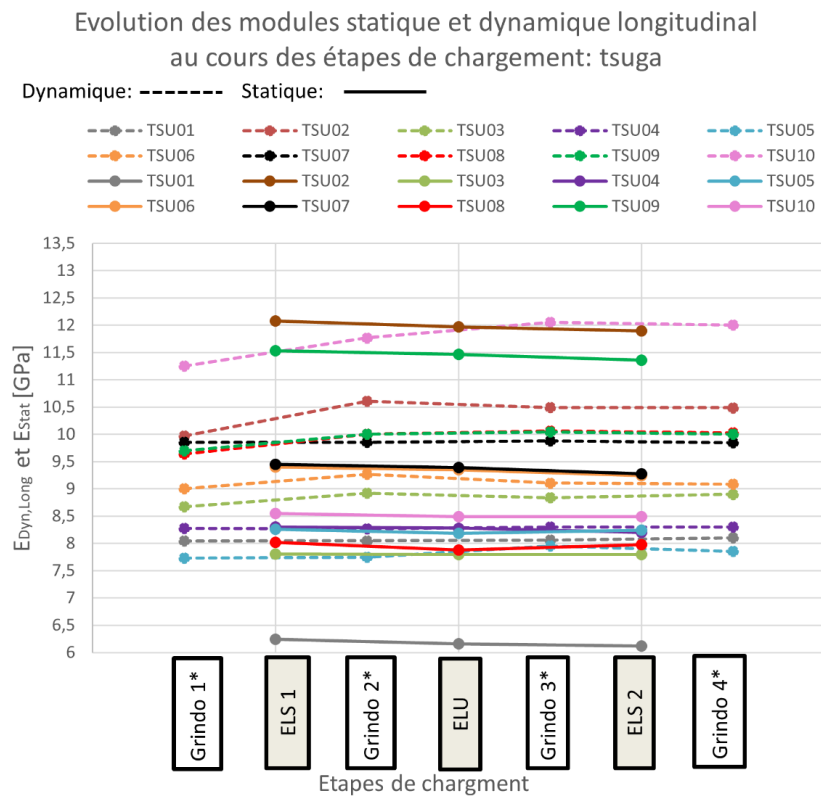
Figure 137: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : hêtre

19 Tsuga : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale

Tableau 22 : Tableau des caractéristiques et résultats des grumes d'épicéa.

Spécimen	m [g]	d [mm]	L [mm]	Conicité [mm/m]	H%	$E_{Dyn,Long}$ [GPa]	F [Hz]	A_m [Hz]	ΔE	ΔA_m	Classe Eu	Classe AI	E_{Dyn}/E_{Stat} -1	ξ
Tsuga 01	448000	350	8500	8,2	26,3	8,05	225,47	5,58	0,64%	71,68%	C	2	28,98%	0,01
Tsuga 02	531500	363	8475	8,2	17,8	9,97	239,31	7,94	5,18%	7,56%	C	2	-17,46%	0,02
Tsuga 03	510500	375	8500	8,4	20,0	8,67	234,91	9,51	2,63%	-14,20%	B	2	11,03%	0,02
Tsuga 04	549000	375	8495	10,7	16,1	8,28	221,37	9,51	0,33%	4,94%	B	2	-0,27%	0,02
Tsuga 05	629500	375	8470	11,46	23,8	7,73	200,13	12,13	1,59%	6,51%	C	1	-6,37%	0,03
Tsuga 06	558500	363	8500	10,48	27,0	9,00	221,48	10,28	0,93%	-24,42%	C	2	-4,25%	0,02
Tsuga 07	594500	363	8500	6,74	20,6	9,86	224,63	9,41	-0,09%	-42,83%	B	2	4,29%	0,02
Tsuga 08	586000	375	8495	8,99	20,1	9,64	231,24	8,21	4,00%	77,47%	B	2	20,21%	0,02
Tsuga 09	529000	375	8500	9,74	21,7	9,70	244,07	6,95	3,13%	9,50%	C	2	-15,87%	0,01
Tsuga 10	635000	375	8510	8,64	23,4	11,25	239,79	11,86	6,66%	2,11%	B	2	31,61%	0,02

Avec m la masse, d le diamètre, l la longueur, la conicité, l'hygrométrie, le module $E_{Dyn,Long}$, l'amortissement, la variation de module dynamique et d'amortissement entre la première et la dernière étape du protocole, les résultats du classement visuel (Norme Européenne et Allemande), le pourcentage de différence par rapport au module statique, valeur de l'amortissement en terme de fraction de l'amortissement critique ξ (qui doit être inférieur à 0,1 pour que la fréquence d'oscillation corresponde bien la fréquence propre et non la fréquence amortie).

Figure 138: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn Long}$ au cours des étapes de chargement : tsuga (Illustration personnelle)

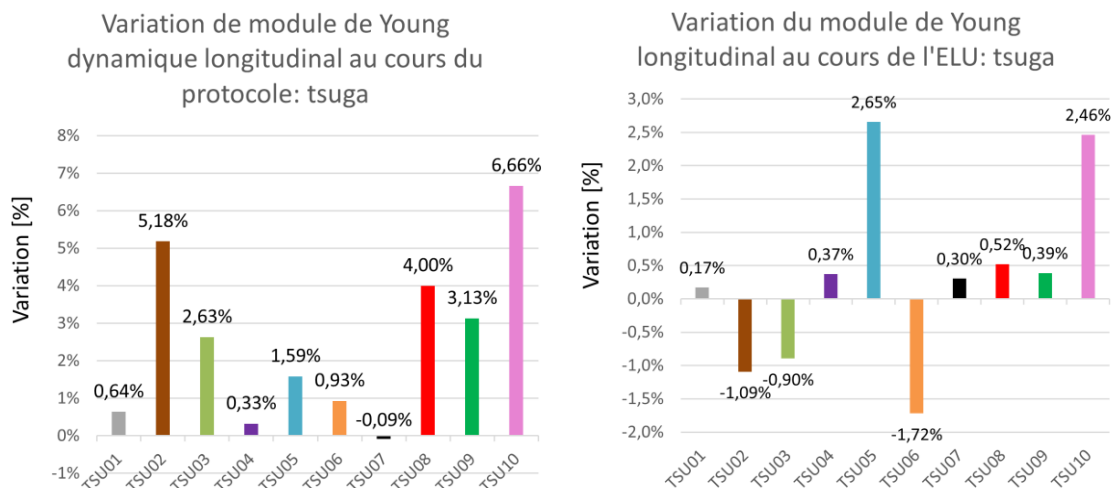
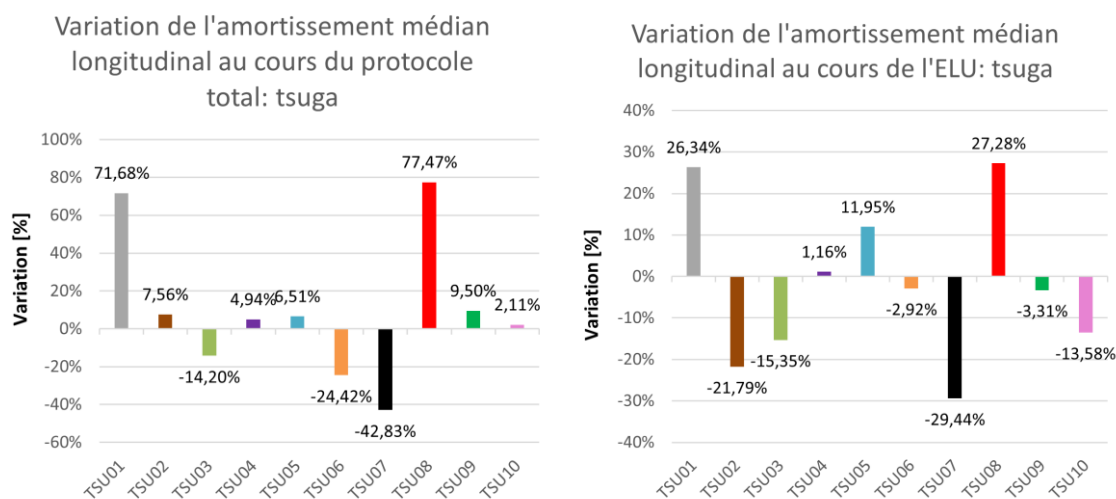
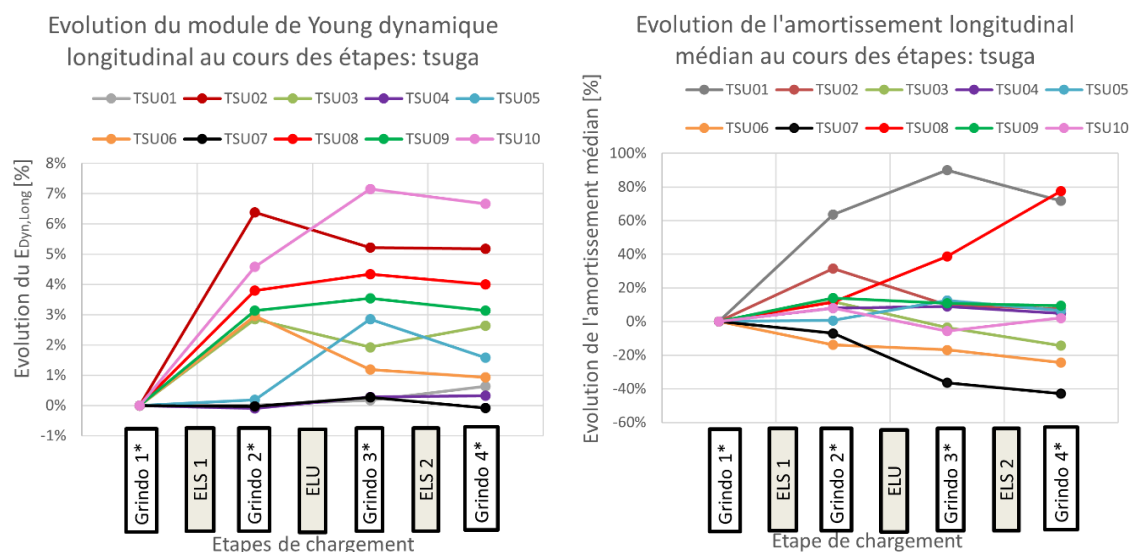
Figure 139: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : tsuga

Figure 140: Variation de l'amortissement médian longitudinal autour du protocole et autour de l'ELU : tsuga

Figure 141: Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement médian longitudinal au cours du protocole statique : tsuga

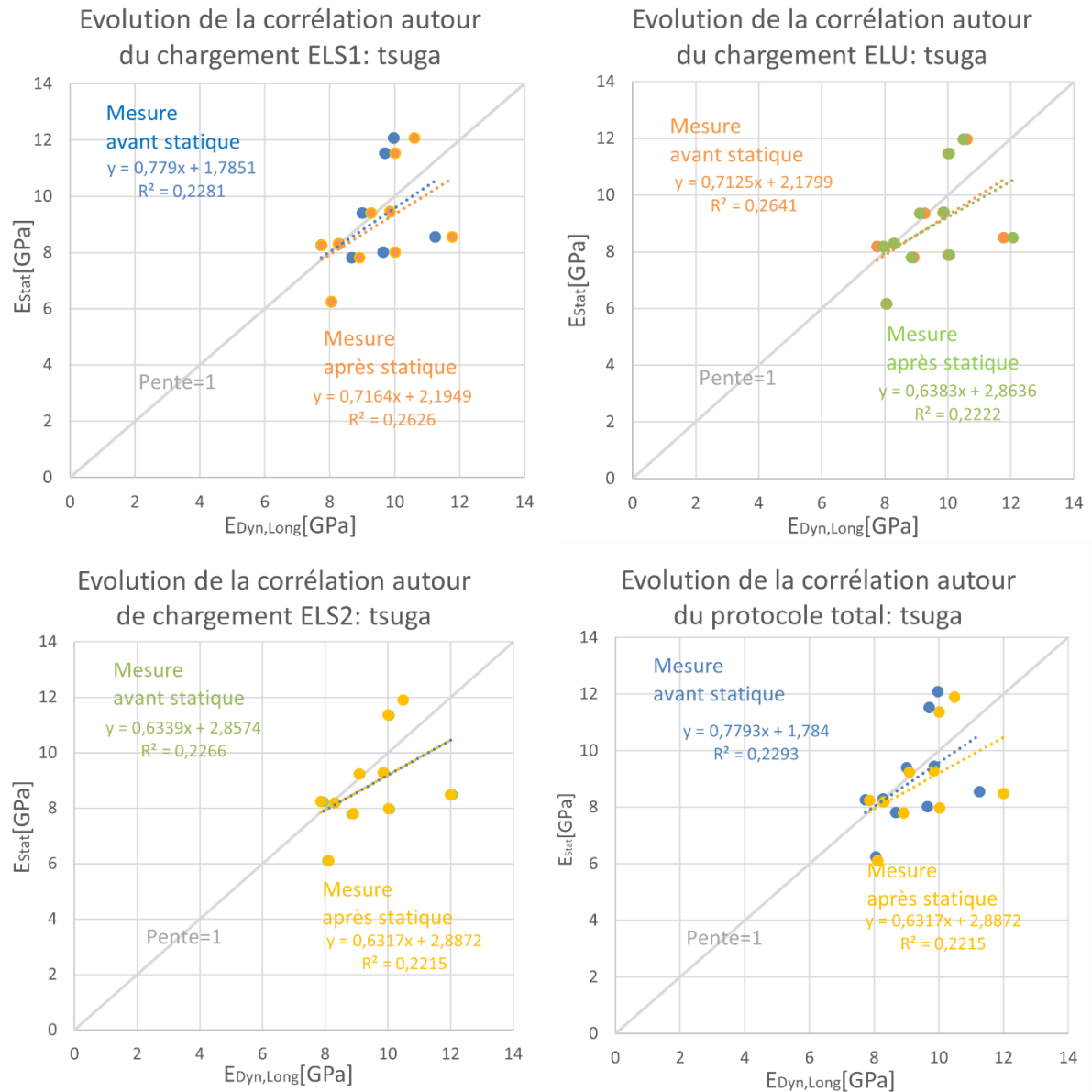


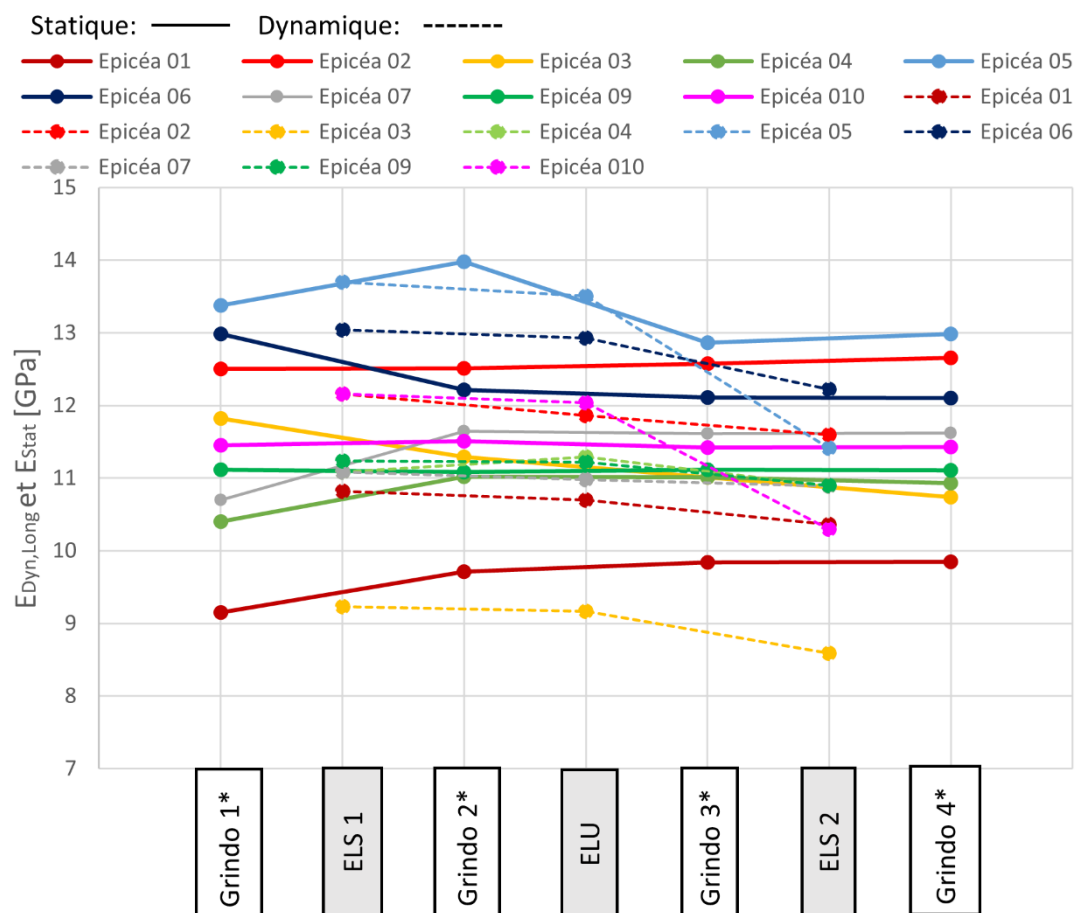
Figure 142: Evolution de la corrélation autour de toutes les étapes du protocole statique : tsuga

20 Épicéa : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale

Tableau 23: Tableau des caractéristiques et résultats des grumes d'épicéa.

	m[g]	D[mm]	L[mm]	Conicité [mm/m]	hygro%	$E_{Dyn,Long}$ [GPa]	F [Hz]	A_m [Hz]	ΔE	ΔA_m	classe Eu	classe Al	Ed/Es -1	ξ
Épicéa 1	393500	382	7060	5,7	25,8	9,15	307,23	35,96	7,59%	-43,16%	C	3	-15,41%	0,06
Épicéa 2	497500	382	7010	14,4	25,1	12,51	320,53	32,13	1,19%	-2,09%	B	3	2,84%	0,05
Épicéa 3	456000	363	6770	23,6	27,1	11,82	314,74	17,53	-9,14%	-22,13%	C	3	28,06%	0,03
Épicéa 4	648000	417	8010	18,2	20,8	10,40	261,58	31,79	5,06%	-59,96%	B	3	-6,12%	0,06
Épicéa 5	546500	382	7120	20,9	32,8	13,37	313,82	22,34	-2,90%	10,83%	C	3	-2,38%	0,04
Épicéa 6	575500	382	7470	16,5	22,8	12,99	294,20	66,62	-6,79%	-59,35%	C	3	-0,41%	0,11
Épicéa 7	584000	401	8060	10,4	21,0	10,70	267,90	39,3	8,58%	-51,15%	D	3	-3,43%	0,07
Épicéa 8					22,3									
Épicéa 9	662000	401	8110	17,3	27,5	11,11	255,65	14,09	0,00%	13,27%	D	3	-1,13%	0,03
Épicéa 10	416000	363	6640	12,2	27,0	11,45	327,54	15,46	-0,25%	-33,76%	C	3	-5,81%	0,02

Evolution des modules au cours des étapes: épicéa

Figure 143: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn,Long}$ au cours des étapes de chargement : épicéa (Illustration personnelle)

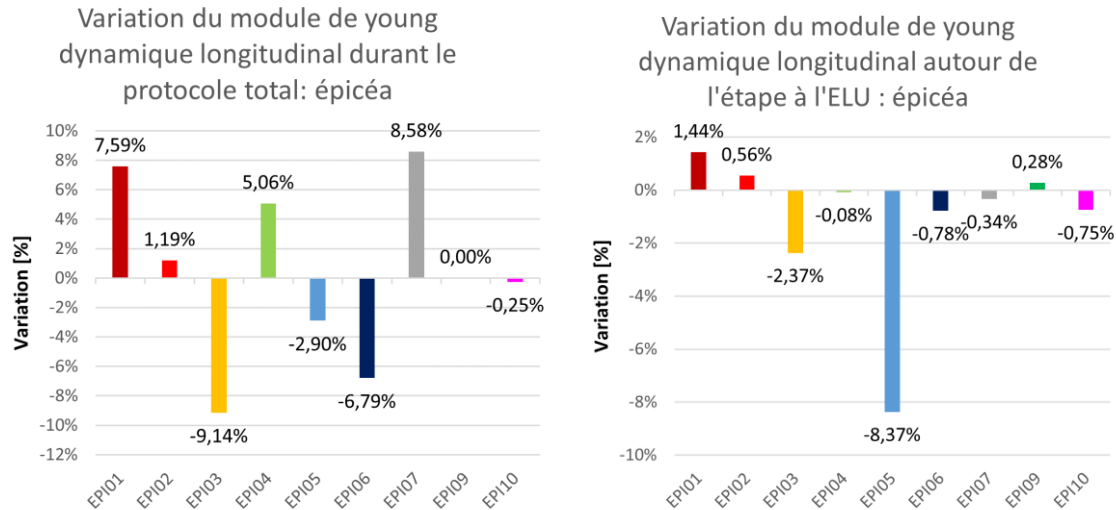


Figure 144: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : épicéa

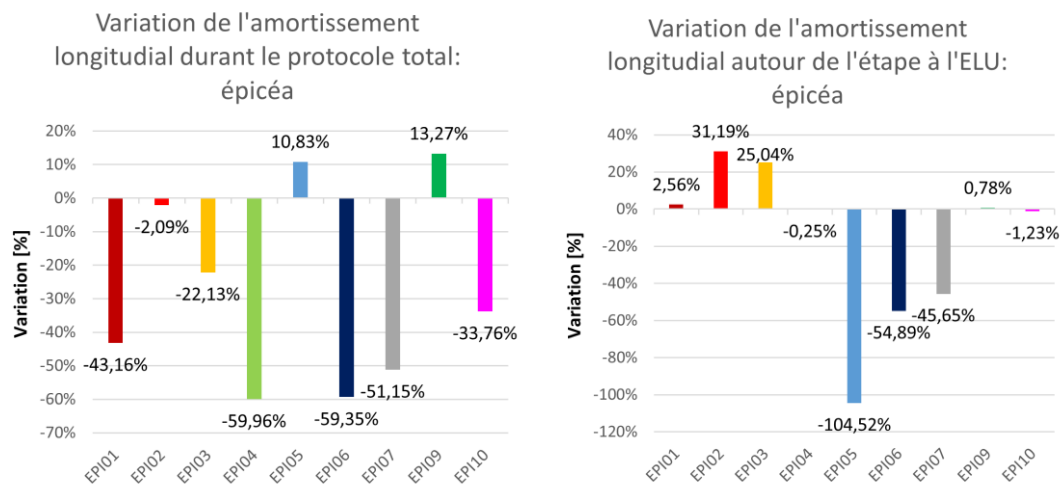


Figure 145: Variation de l'amortissement médian longitudinal autour du protocole et autour de l'ELU : épicéa

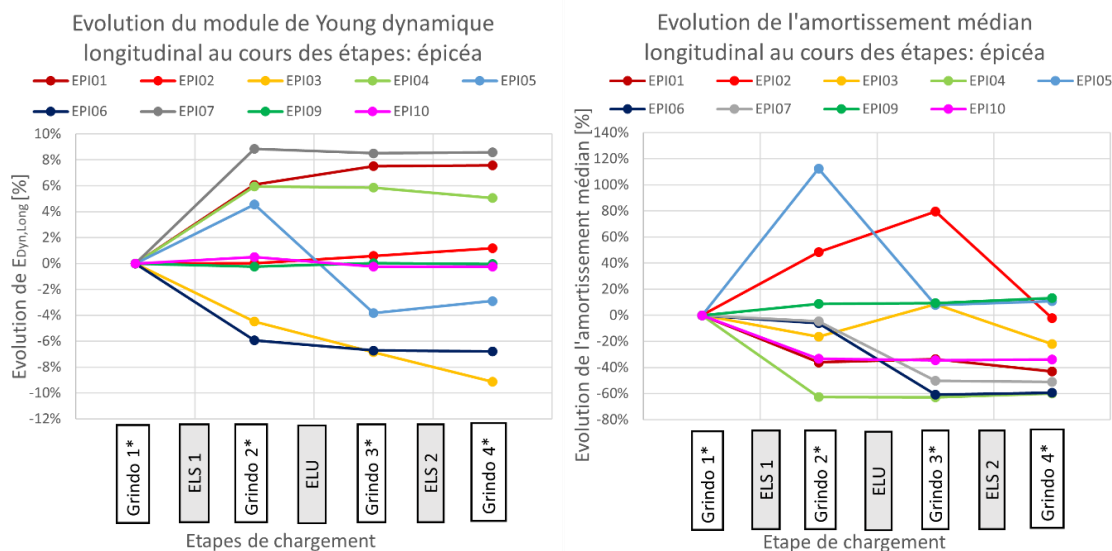


Figure 146 : Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement au cours des étapes du protocole statique : épicéa

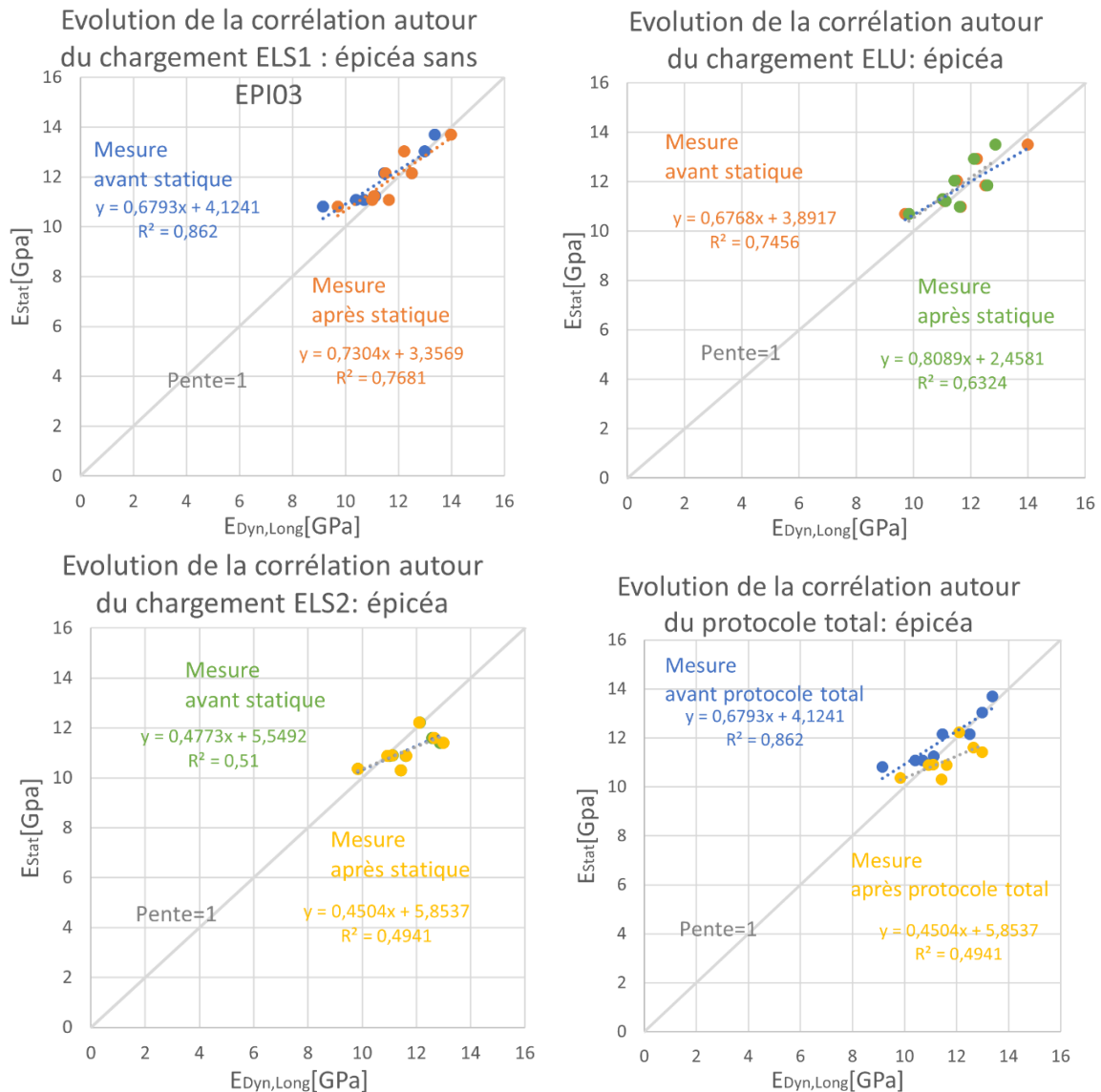


Figure 147: Evolution de la corrélation autour de toutes les étapes du protocole statique : épicéa

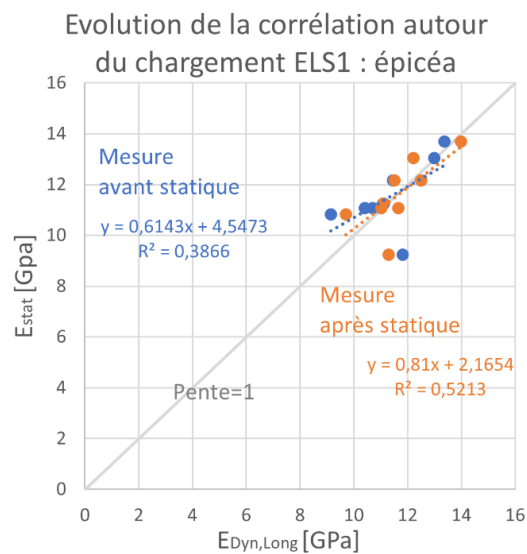


Figure 148: Corrélation autour de l'étape ELS1 de chargement statique sans la grume EPI03: épicéa

21 Peuplier : Fiche récapitulative du lot en résonance longitudinale

Tableau 24 : Tableau des caractéristiques et résultats des grumes de peuplier.

Spécimen	m [g]	D[mm]	L[mm]	Conicité [mm/m]	Hygro%	$E_{Dyn,Long}$ [GPa]	F [Hz]	A_m [Hz]	ΔE	ΔA_m	Classe Eu	Classe Al	Edyn/Stat -1	ξ
Peuplier 01	850000	350	10000	10,6	26,9	11,72	182,13	68,96	2,34%	-69,82%	C	3	12,94%	0,19
Peuplier 02	569500	350	8000	10,3	29,0	10,51	235,52	20,35	-15,90%	45,41%	C	3	3,81%	0,04
Peuplier 03	607000	373	8000	9,6	27,5	9,48	230,99	63,1	-6,25%	-40,32%	C	3	3,41%	0,14
Peuplier 04	595500	350	8000	11,5	30,0	9,78	222,194	19,63	11,35%	111,00%	C	3	-9,38%	0,04
Peuplier 05	535000	350	8000	9,1	25,0	9,30	228,99	101,3	-3,56%	-18,70%	C	2	-6,41%	0,22
Peuplier 06	578000	350	8000	3,6	22,0	10,24	230,81	16,85	2,73%	-27,72%	C	3	1,70%	0,04
Peuplier 07	563000	350	8000	7,56	25,4	10,25	233,96	24,48	-0,64%	-24,63%	C	2	-8,56%	0,05
Peuplier 08	549000	350	8000	11,9	27,5	8,69	218,19	34,24	5,15%	15,68%	C	2	-19,21%	0,08
Peuplier 09	601500	350	8000	7,6	26,8	11,38	238,47	17,99	-6,45%	104,45%	B	3	1,22%	0,04
Peuplier 10	571500	350	8000	7,4	28,0	10,35	233,31	21,79	5,40%	16,29%	C	2	1,34%	0,05

Evolution des modules de Young statique et dynamique longitudinal au cours du protocole: peuplier

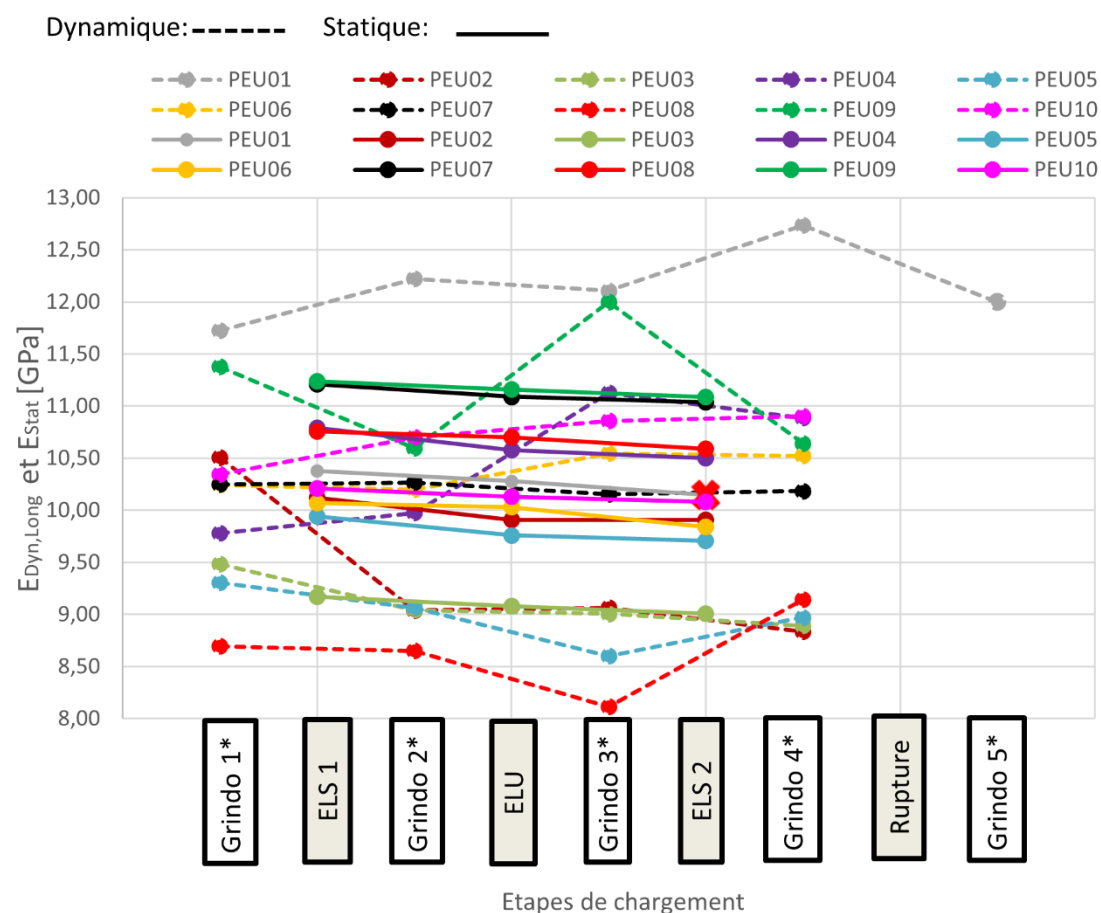


Figure 149: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn Long}$ au cours des étapes de chargement : peuplier (Illustration personnelle)

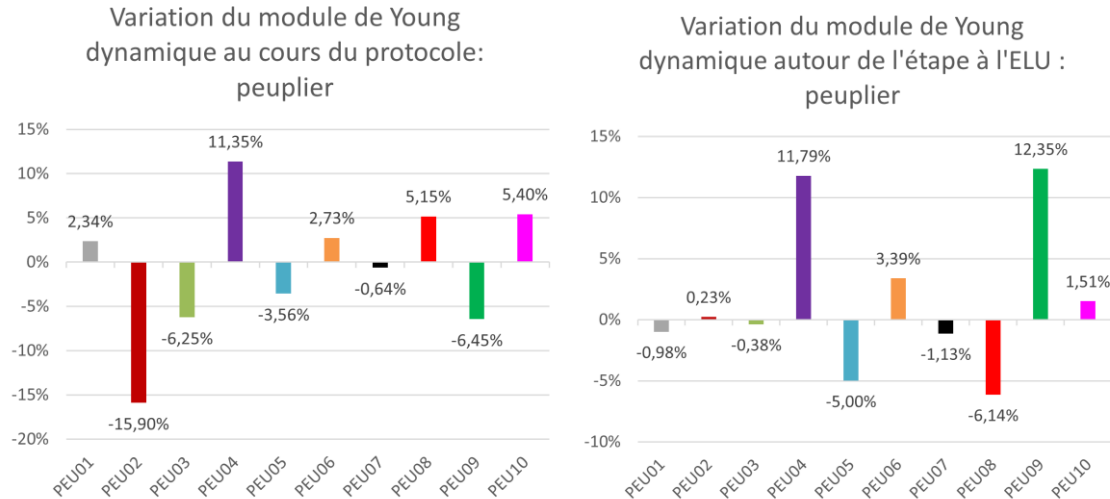


Figure 150: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : peuplier

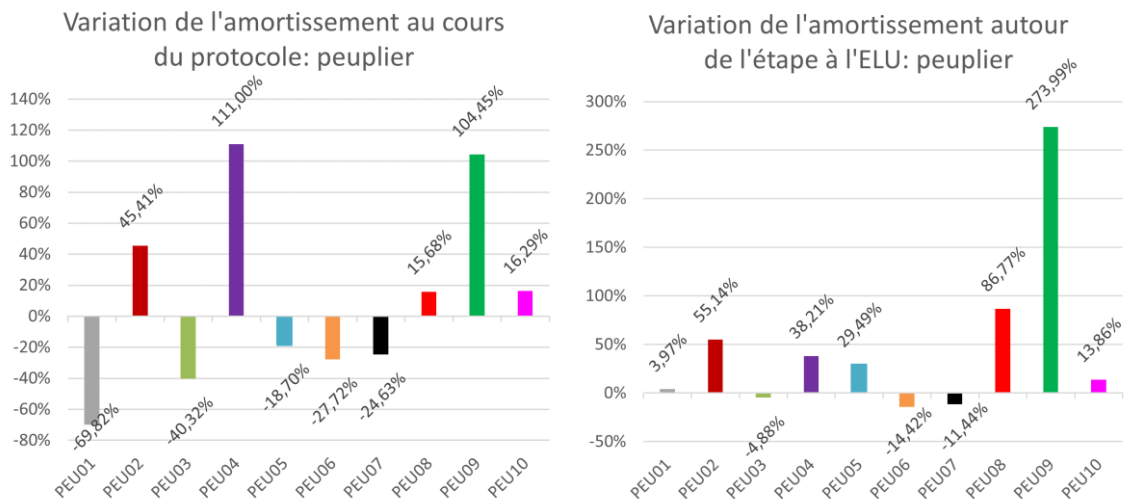


Figure 151: Variation de l'amortissement autour du protocole et autour de l'ELU : peuplier

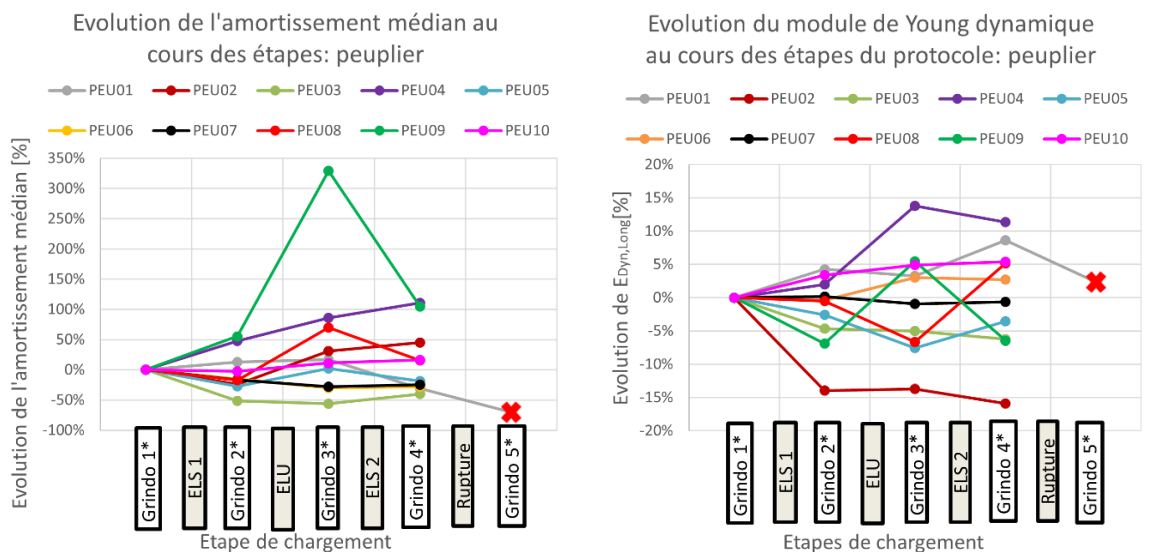
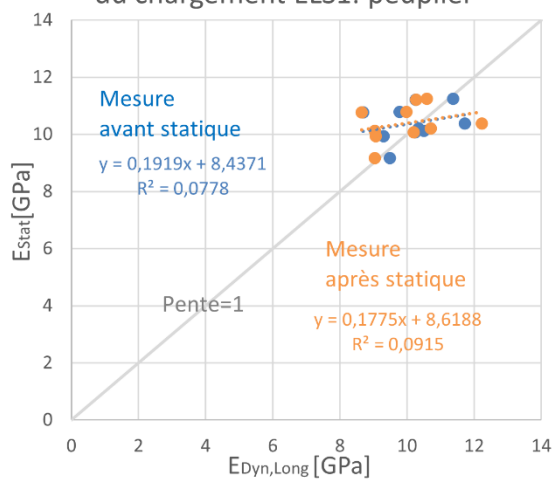
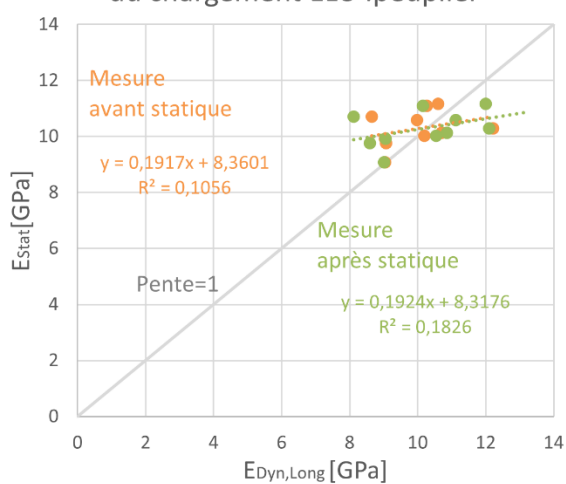


Figure 152: Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement au cours des étapes du protocole statique : peuplier

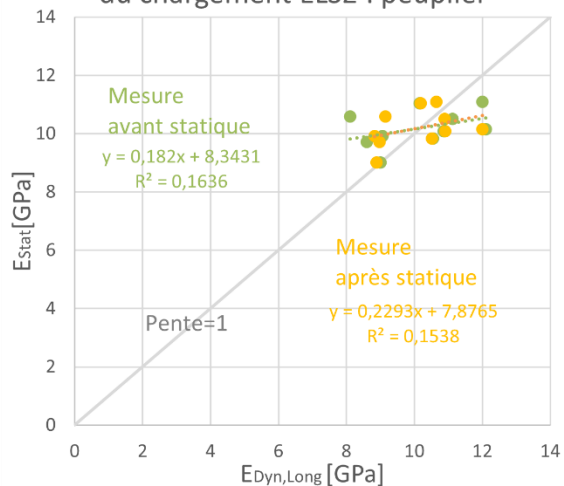
Evolution de la corrélation autour du chargement ELS1: peuplier



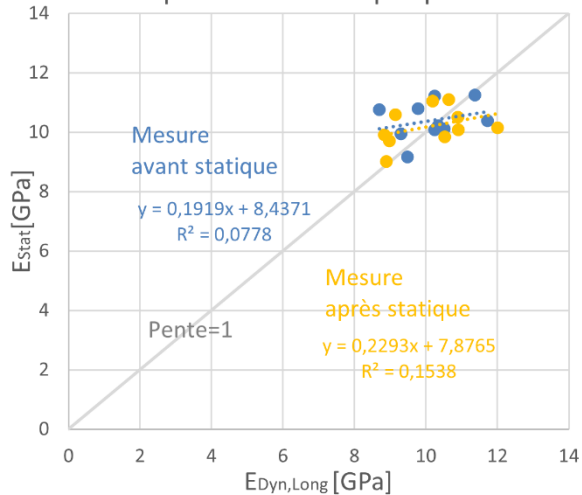
Evolution de la corrélation autour du chargement ELU :peuplier



Evolution de la corrélation autour du chargement ELS2 : peuplier



Evolution de la corrélation autour du protocole total: peuplier



Glossaire

A

amortissement

Caractérise l'amortissement de l'onde en amplitude. Est lié aux dissipations d'énergies aux appuis et au sein du matériau vii, viii, 6, 9, 22, 23, 24, 25, 29, 33, 34, 38, 45, 47, 55, 57, 58, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 71, 78, 79, 82, 84, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 108, 110, 115, 133, 134, 136, 137, 138, 143, 147, 151, 152, 153, 156, 159

anisotrope

Matériau dont certaines propriétés physiques sont différentes en fonction de la direction 28, 37

B

bois d'été

Partie du cerne dont la croissance s'est déroulée en fin d'année, avant le retour en végétation 28, 33, 34

Bois de printemps

Partie du cerne qui s'est formée lors de la sortie de végétation de l'arbre 33

bruit

Somme des sources d'interférences provenant de la production, de la détection de la mesure ou de l'enregistrement du signal, indépendamment de la présence du signal 27, 68, 82, 83, 121, 135, 136

C

CLT

Bois lamellé croisé 45

composite

Assemblage de deux composants ou plus, via une interface, dont les propriétés se complètent 46

corrélation

En probabilité et statistique, valeur qui contredit l'indépendance entre plusieurs variables aléatoires viii, 30, 41, 42, 43, 44, 52, 53, 76, 77, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 109, 110, 124, 128, 154, 157

D

damping

Nom anglais pour désigner l'amortissement . 138

déplacement résiduel

Déplacement maintenu lorsque toutes les contraintes sont relâchées (il peut être instantané ou permanent) 52, 72

E

écart-type

Dispersion des valeurs d'un échantillon.
Moyenne quadratique des écarts des valeurs mesurées par rapport à la moyenne de toutes les valeurs mesurées 68, 78, 88, 89, 94, 99, 103, 109

écimé

Dont on a retiré la cime 2

équarris

Bois rond qui a été taillé afin d'avoir des dimensions rectangulaires (élimination des dosses) 3, 51, 52

F

facteur correctionnel

Facteur permettant de prendre en compte les effets de cisaillement et de translation des sections pour le calcul du module dynamique 13

filtre analogique

Permet de transformer un signal électrique (ici de borner les fréquences enregistrées) 27, 81, 84, 121

fréquence de Nyquist

Fréquence seuil avant le recouvrement spectral fréquentiel 26, 27, 121

fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale d'un système oscillant est la plus petite fréquence naturelle vii, 12, 14, 24, 55

fréquence naturelle

Fréquence à laquelle oscille naturellement un matériau lorsqu'il est excité (comprend la fréquence propre et les harmoniques) .15, 16, 24, 131

frottement de Coulomb

Dissipation d'énergie qui survient lorsqu'une particule dans un système oscillant est contrainte par une force d'amplitude constante (indépendante du déplacement et de la vitesse) et dans une direction opposée à la vitesse de la particule 24

G

grume

tronc d'arbre qui a été abbatu, écimé et ébranché en vue de son exploitation en scierie ..viii, 2, 3, 14, 29, 33, 37, 42, 52, 54, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 72, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 134, 137, 139, 157

H

Hook

Loi établie pour les systèmes purement élastiques. La force générée par un ressort est égale à son déplacement multiplié par une constante dite de rappel 10, 34, 36

hystérèse

Propriété selon laquelle un système dépend de son histoire antérieure. Représenté par l'air entre les courbes de chargement et de déchargement sur le graphique force-déplacement ou contrainte-déformation .. 23, 96, 97

J

juvénile

Bois à croissance rapide en début de formation de l'arbre, ses propriétés mécaniques sont peu intéressantes 28

M

mature

Bois de croissance qui succède le bois juvénile (à partir de 20 à 50 ans de croissance) 28

méthode statique

Fait référence à la méthode non destructive de caractérisation mécanique en flexion 4 points réalisée à l'UCLouvain depuis 2020 .. 37, 38, 64, 77, 84

module de Poisson

Défini les déplacement de matière qui surviennent dans la direction perpendiculaire à la force appliquée 10, 17, 27

module de Young

Grandeur permettant de caractériser la rigidité d'un matériau dans son domaine de

déformations élastiques.. 2, 5, 6, 9, 10, 11, 16, 17, 22, 23, 27, 28, 30, 33, 34, 37, 42, 45, 46, 47, 52, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 71, 77, 81, 82, 88, 89, 94, 95, 96, 100, 103, 104, 111, 127, 128, 129, 130, 133, 137, 138

O

orthotrope

Désigne un matériau dont les propriétés sont symétriques selon un ou plusieurs axes 27, 37

outliers

Valeurs abérantes en statistique, valeurs éloignées et différentes des autres valeurs mesurées sur un même phénomène 71, 94

P

palier plastique

Changement de pente sur la courbe contrainte-déformation, lorsque le matériau commence à subir des déformations plastiques, c'est à dire irréversibles..... 96

R

rigid body mode

Translation ou rotation libre d'un corps sans qu'il ne subisse de déformations internes .. 67

T

transducteur

Sert à enregistrer les vibrations mécaniques et les transformer en signal électrique. Il peut être de contact (accéléromètre utilisant un piézoélectrique ou une jauge de déformation) ou pas (micro, laser, aimant, capacités) avec le spécimen33, 36, 56, 57, 131, 133

V

vibration libre

Se dit d'une vibration qui n'est pas restreinte par une force ou des frottements9, 14, 15, 21, 23, 56, 59

viscoélastique

Se dit d'un matériau qui réagit de manière élastique et visqueuse face à une contrainte 24

Liste des Figures

Figure 1: Les 3 piliers du développement durable (Estelle Chambon, 2020)	1
Figure 2: Courbe contrainte-déformation : Réponse d'un matériau subissant une force. Source : Wikiversity	2
Figure 3 : Courbe de Gauss et valeurs caractéristiques statistiques (Illustration personnelle)	3
Figure 4: La crosse Riverside Park Bandshell et National Gateway, Etats Unis	4
Figure 5 Up Straw, bureaux du Cluster Eco-construction wallon, Pairi Daiza et son parking photovoltaïque en grumes, Belgique.	4
Figure 6 : Charpente en bois rond et la ferme du Mont Charvet, France	4
Figure 7: Wood ship barn, Hooke Park, Beaminster, Dorset, et Cedar River Logging Trestle, Washington State	4
Figure 8: Appareil GrindoSonic® et illustration de son fonctionnement (GrindoSonic,2020)	6
Figure 9: Différents modes de vibration (ResearchGate)	9
Figure 10 : Oscillations possible d'un système à 1 degré de liberté (SDOF) et à 2 degrés de liberté (MDOF) (Illustration personnelle)	11
Figure 11 : Nœuds de la flexion selon le NPL (n étant le numéro de l'harmonique) (NPL, 2006)	12
Figure 12: Harmoniques de la vibration de flexion (Handbook,2002)	12
Figure 13 : Formules de l'inertie d'un cercle et d'une section ovale (Illustration personnelle)	14
Figure 14 : Valeur des nombres d'onde pour les différentes harmoniques dans le cas du modèle de Rayleigh et du modèle de cisaillement (comparé au modèle d'Euler-Bernoulli en traits pleins) (Han Benaroya,1999)	16
Figure 15 : Supports et subdivisions considérés (J Murphy 2000)	18
Figure 16 : Graphique récapitulatif des développements mathématiques (J.Murphy,2000).....	18
Figure 17 : Masse concentrée et décentrée, centre de masse d'un trapèze (Handbook, 2002)	19
Figure 18: Représentation des 4 premières harmoniques longitudinales, (réalisée à partir de Stringfixer).....	19
Figure 19 : Schéma du problème (Handbook, 2002)	20
Figure 20: Moment d'inertie polaire des sections d'intérêt (Handbook, 2002).....	21
Figure 21: Système viscoélastique (HandBook, 2002)	23
Figure 22 : Évolution de la variation entre la fréquence naturelle et la fréquence amortie en fonction de la fraction d'amortissement critique. (HandBook,2002)	24
Figure 23: Représentation graphique de l'évolution temporelle d'un signal (a) et du spectre d'une onde de fréquence propre ω_n (b) (HandBook, 2002)	25
Figure 24: Signal représenté dans un domaine temporel et fréquentiel (Schatzmann, 2022).....	26
Figure 25: Schéma recouvrement spectral (Illustration personnelle)	27
Figure 26: Structure de la paroi cellulaire du bois. (ResearchGate, 2022).....	28
Figure 27: Repère global et local des directions du bois. (Brémaud 2011)	29
Figure 28: Résistographe (Photo d'archives Progrès /Yoann TERRASSE)	31
Figure 29: Exemple de prise de mesures par l'appareil Polux et représentation de celui-ci (CBS-CBT, 2022)	32
Figure 30: Shigomètre (L.Brancheriau, 2011)	32
Figure 31: Illustration de la mesure de l'endommagement avec la méthode tomographique.....	32

Figure 32: Dispositif MICROTEC déjà commercialisé en scieries (Microtec 2022)	33
Figure 33 Illustration du Sylvatest® (gauche) et du Sylvatest® TRIO (droite) (CBS-CBT, 2022).....	34
Figure 34: Différents types de probe de contact ou de non-contact (Green, 20004)	35
Figure 35 : Utilisation du sylvatest duo (Sandoz et Benoit, 2006).....	35
Figure 36: "Stress wave" (Moseley, 2000)	36
Figure 37 : Disposition d'expérience J. Wiem et Faculté forestière de Gembloux	39
Figure 38: Disposition d'expérience de Cho et Chui	39
Figure 39: Disposition d'expérience J. Wiem à gauche et de la Faculté forestière de Gembloux à droite	40
Figure 40: Disposition des expériences de Ilic à gauche et Cho et Haines à droite	40
Figure 41 : Disposition expérimentale de Carreira (haut gauche) et Murphy et Green (haut droit) (flexion)	42
Figure 42: disposition expérimentale de de Vries et Gard	43
Figure 43: Schéma statique des appuis en flexion 4 points (Norme NBN408)	51
Figure 44 Photo de La machine Zwick® et de l'extensomètre à boule sa plaquette anti-glissement.....	54
Figure 45: Position des capteurs sur la grume (Illustration personnelle)	54
Figure 46 : Dispositif de flexion 4 points sur grume (Montage et image : Christopher Moens et Jens Niclaes, 2021)	55
Figure 47 : Schéma du principe de l'appareillage de test (Illustration personnelle)	56
Figure 48: Matériel GrindoSonic®	57
Figure 49: Condition de calcul de l'amortissement (Illustration personnelle)	58
Figure 50: Représentation schématique de l'utilisation du mouton en sollicitation flexionnelle (inspiré de Moens & Jens, 2020).....	58
Figure 51: Multiples pics de l'a FFT de tsuga.....	62
Figure 52: Spécimens testés (cône en bois et barre métallique)	62
Figure 53: FFT calculée par le GrindoSonic® avec et sans filtre.....	65
Figure 54: Variation de la fréquence propre et de l'amortissement pour différentes conditions de tests : éprouvettes.....	66
Figure 55: Fréquences et amortissements pour différentes positions des appuis.	66
Figure 56: FFT GrindoSonic® : éprouvette : excitation longitudinale.....	67
Figure 57: FFT : éprouvette longitudinale : avec micro sur le mousse coté plan et coté bulles	69
Figure 58: Représentation dans le temps des opérations du protocole de l'expérience sur éprouvettes.	71
Figure 59: Courbe contrainte-déformation jusqu'à la rupture au cours des étapes de chargement. ...	72
Figure 60: Évolution de la flèche résiduelle au cours des étapes : épicéa	72
Figure 61: Évolution des modules $E_{Dyn, Flex}$ et $E_{Dyn, Long}$ au cours des étapes de chargement : épicéa	73
Figure 62: Corrélation entre modules $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ avant le 1er chargement: épicéa	73
Figure 63: Rapport $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ au cours des étapes de chargement : épicéa	74
Figure 64: Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$ au cours des étapes : épicéa.....	75
Figure 65: Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 1 ^{er} chargement: épicéa	76
Figure 66: Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 2 ^e chargement: épicéa.....	77
Figure 67: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : épicéa	78
Figure 68: Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : épicéa	79

Figure 69: Mesure de la fréquence propre en fonction de l'angle de la frappe pour une position de micro fixe.	81
Figure 70: Illustrations conditions parfaites : grume.....	83
Figure 71: FFT GrindoSonic® pour les 2 types de vibration (Illustration personnelle).....	87
Figure 72: Protocole sur grume en analyse longitudinale (Réalisé à partir des illustrations de Dehaen et Ponthière).....	88
Figure 73: Corrélation entre les mesures statiques ELS1 et les mesures GrindoSonic® : épicéa.	90
Figure 74: Corrélation entre les mesures statiques ELS1 et les mesures GrindoSonic® : peuplier et tsuga.	90
Figure 75: Schéma représentant l'évolution des modules E_{stat} et $E_{dyn,long}$ au cours des étapes	92
Figure 76 : Pourcentage de différence entre modules E_{stat} et $E_{Dyn,Long}$: grumes	92
Figure 77: Exemple de FFT présentant les fréquences enregistrées pour la grume d'EPI10	93
Figure 78: Graphique des FFT pour deux essences enregistrées avec une fréquence de résolution de 12,21Hz.....	94
Figure 79: Influence de la conicité sur le rapport des modules E_{Stat} et $E_{Dyn,Long}$	95
Figure 80: Exemple de courbes force déplacement avec et sans endommagement (Dehaen et Ponthière).....	96
Figure 81: Évolution de $E_{Dyn,long}$ entre le début et la fin du protocole : épicéa et tsuga.....	97
Figure 82: Graphique de la variation de $E_{Dyn,Long}$ autour de l'ELU : grumes épicéa et tsuga.....	98
Figure 83: Évolution de $E_{Dyn,Long}$ au cours des étapes : épicéa et tsuga	98
Figure 84: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours du protocole : épicéa et tsuga.....	99
Figure 85: Variation de l'amortissement longitudinal autour de l'étape ELU : épicéa et tsuga	100
Figure 86 : Evolution de l'amortissement et de la fréquence harmonique au cours des étapes du protocole épicéa en flexionnel.....	101
Figure 87: Grume d'épicéa posée sur le support en corde avant sa pose sur le banc d'essai.....	102
Figure 88: Évolution des modules E_{Stat} $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ au cours des étapes du protocole : piézomètre : l'Épicéa 08	103
Figure 89: Cônes en configuration dynamique flexionnelle (Gauche), Différentes conicités : Cylindre, petite conicité, grande conicité (Droite).....	105
Figure 90: Appuis en aluminium pour les tests statiques (Gauche), éprouvette avant son chargement statique (Droite)	105
Figure 91: Position des appuis pour les éprouvettes cylindriques en flexion statiques (illustration inspirée de la norme).....	106
Figure 92: Représentation du protocole pour les éprouvettes coniques et cylindriques	106
Figure 93: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Parallélépipède rectangle.....	107
Figure 94: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cylindre.....	108
Figure 95: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cônes de faible conicité	108
Figure 96: Variation des modules statiques et dynamiques au cours du protocole : Cônes de grande conicité	109
Figure 97: Relations entre modules statique et dynamique pour tous les volumes analysés	109

Figure 98: Résonance flexionnelle : valeurs du coefficient K_1 pour d'autres supports (Source : Handbook, 2015)	116
Figure 99: Loi rectangulaire et loi de Gauss (Wikipédia 2022).....	117
Figure 100: Signal tel qu'il est enregistré par le GrindoSonic® en temporel (Illustration personnelle)	118
Figure 101 : Module des coefficients de la DFT dans le domaine des entiers k (Illustration personnelle)	119
Figure 102: Module des coefficients de le DFT dans le domaine des fréquences (Illustration personnelle).....	120
Figure 103: Comparaison des résultats renvoyés par le GrindoSonic® et ceux obtenues en Python. (Illustration personnelle)	120
Figure 104: Recouvrement spectral (Illustration personnelle).....	121
Figure 105: Schéma d'un filtre passe bas et d'un filtre passe bande (Illustration personnelle).....	122
Figure 106: Exemple de courbe contrainte-déformation obtenues sur base de la courbe force-déplacement dans le cas du sapin. (Illustration personnelle).....	127
Figure 107: Variation du module statique pour un module de cisaillement variable. (Illustration personnelle).....	128
Figure 108: Choix du cycle pour la procédure de calcul du module de Young statique. (Illustration personnelle).....	129
Figure 109: Augmentation du module de Young statique entre deux chargements consécutifs de même déplacement imposé. (Illustration personnelle)	130
Figure 110: Clef dichotomique du choix de matériau de frappe (Source : GrindoSonic®, 2020).....	132
Figure 111 : Fenêtre de création d'un projet (gauche), la fenêtre du projet (droite). (Illustration GrindoSonic).....	134
Figure 112 Exemple de clipping (Illustration personnelle)	138
Figure 113 : Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$: chêne	139
Figure 114: Déplacement résiduel instantané lors du 1 ^{er} cycle au cours des étapes : chêne	140
Figure 115: Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 1 ^{er} chargement: chêne	140
Figure 116 : Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 2 ^e chargement: chêne	141
Figure 117 : Évolution des modules $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$, au cours des étapes de chargement : chêne ...	141
Figure 118 : Rapport $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$, au cours des étapes de chargement : chêne.....	142
Figure 119: Corrélations entre module $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ avant le 1 ^{er} chargement: chêne	142
Figure 120 : Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : chêne	143
Figure 121: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : chêne.....	143
Figure 122: Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$: sapin.....	144
Figure 123: Évolution de la flèche résiduelle instantanée au cours des étapes : sapin	145
Figure 124: Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 1 ^{er} chargement: sapin.....	145
Figure 125 : Corrélations $E_{Dyn, Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn, Flex} / E_{Stat}$ pour le 2 ^e chargement: sapin	145
Figure 126: Rapport $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$, au cours des étapes de chargement : sapin	146
Figure 127: Corrélations entre module $E_{Dyn, Long}$ et $E_{Dyn, Flex}$ avant le 1 ^{er} chargement: sapin	146
Figure 128: Évolution de l'amortissement flexionnel et longitudinal au cours des étapes : sapin	147
Figure 129: Évolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn, Flex}$ au cours des étapes : hêtre.....	147
Figure 130: Évolution de la flèche résiduelle au cours des étapes : hêtre	148

Figure 131: Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 1 ^{er} chargement: hêtre	148
Figure 132 : Corrélations $E_{Dyn,Long} / E_{Stat}$ et $E_{Dyn,Flex} / E_{Stat}$ pour le 2 ^e chargement: hêtre.....	149
Figure 133: Évolution des modules $E_{Dyn,Flex}$ et $E_{Dyn,Long}$ au cours des étapes de chargement : hêtre	149
Figure 134: Rapport $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$, au cours des étapes de chargement : hêtre.....	150
Figure 135 : Corrélation entre module $E_{Dyn,Long}$ et $E_{Dyn,Flex}$ avant le 1 ^{er} chargement: hêtre.....	150
Figure 136 : Évolution de l'amortissement flexionnel au cours des étapes : hêtre.....	151
Figure 137: Évolution de l'amortissement longitudinal au cours des étapes : hêtre.....	151
Figure 138: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn Long}$ au cours des étapes de chargement : tsuga (Illustration personnelle)	152
Figure 139: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : tsuga.....	153
Figure 140: Variation de l'amortissement médian longitudinal autour du protocole et autour de l'ELU : tsuga.....	153
Figure 141: Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement longitudinal au cours du protocole statique : tsuga.....	153
Figure 142: Evolution de la corrélation autour de toutes les étapes du protocole statique : tsuga.....	154
Figure 143: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn Long}$ au cours des étapes de chargement : épicéa (Illustration personnelle)	155
Figure 144: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : épicéa	156
Figure 145: Variation de l'amortissement médian longitudinal autour du protocole et autour de l'ELU : épicéa.....	156
Figure 146 : Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement au cours des étapes du protocole statique : épicéa	156
Figure 147: Evolution de la corrélation autour de toutes les étapes du protocole statique : épicéa	157
Figure 148: Corrélation autours de l'étape ELS1 de chargement statique sans la grume EPIO3: épicéa	157
Figure 149: Evolution des modules E_{Stat} et $E_{Dyn Long}$ au cours des étapes de chargement : peuplier (Illustration personnelle)	158
Figure 150: Variation du module $E_{Dyn,Long}$ autour du protocole et autour de l'ELU : peuplier	159
Figure 151 : Variation de l'amortissement autour du protocole et autour de l'ELU : peuplier	159
Figure 152: Evolution du module $E_{Dyn,Long}$ et de l'amortissement au cours des étapes du protocole statique : peuplier.....	159

Liste des Tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des imprécisions de mesure induites par les appareils de mesure, par la technique de prise de mesure, la géométrie imparfaite et par les conditions de séchage.....	60
Tableau 2: Tableau récapitulatif des incertitudes combinées avec un taux de confiance de 95%.	60
Tableau 3: Tableau des dimensions et masses des spécimens testés.....	62
Tableau 4: Tableau reprenant les informations des essences testées.....	64
Tableau 5: Présentation des différentes conditions de test en longitudinal pour les éprouvettes de petites dimensions	67
Tableau 6: Tableau récapitulatif et comparatif des corrélations obtenues dans le cadre des essences testées	76
Tableau 7: Tableau récapitulatif des essences et de leurs principales caractéristiques	80
Tableau 8: Conditions de test pour la résonance longitudinale sur grume	82
Tableau 9: Illustrations de la mise en œuvre de la méthode dynamique sur les grumes.....	85
Tableau 10: Schémas statiques des essais sur grumes.....	86
Tableau 11: Tableau reprenant les différences d'étalement des mesures dans le cas d'une résolution à 12,21Hz et dans le cas d'une résolution à 0,61Hz.....	94
Tableau 12: Tableau reprenant les dimensions et caractéristiques moyennes des 4 différents types d'échantillons par grume débitée.....	104
Tableau 13: Tableau des correspondances d'expressions d'amortissement (Source : GrindoSonic®, 2020)	115
Tableau 14. Récapitulatif des expériences IET précédemment effectuées dans la littérature sur petites éprouvettes.....	123
Tableau 15: Récapitulatif des expériences IET précédemment effectuées dans la littérature sur petites éprouvettes (suite)	124
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des valeurs déjà obtenues au paravent sur des grumes ou cylindre en bois long.	126
Tableau 17 : Tableau détaillant les paramètres internes du GrindoSonic®	135
Tableau 18: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : épicéa	139
Tableau 19: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : chêne	139
Tableau 20: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : sapin	144
Tableau 21: Récapitulatif des caractéristiques et résultats sur éprouvettes : hêtre	147
Tableau 22 : Tableau des caractéristiques et résultats des grumes d'épicéa.	152
Tableau 23: Tableau des caractéristiques et résultats des grumes d'épicéa.	155
Tableau 24 : Tableau des caractéristiques et résultats des grumes de peuplier.....	158

Bibliographie

- [1] « COP26, quel est l'impact du secteur de la construction sur les émissions de gaz à effet de serre ? », *RTBF*. <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 6 avril 2022).
- [2] « L'empreinte écologique des bâtiments ». Consulté le: 6 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.confederationconstruction.be/files/annual_report/Pages_31_to_52_from_132309-jaarverslag-FR.pdf
- [3] « Hōryū-ji », *Wikipédia*. 26 décembre 2021. Consulté le: 6 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=H%C5%8Dry%C5%AB-ji&oldid=189249474>
- [4] « Forêt en Europe », *Wikipédia*. 27 décembre 2021. Consulté le: 6 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=For%C3%AAt_en_Europe&oldid=189281967
- [5] « Du bois wallon acheté par la Chine et revendu en Belgique : la filière bois s'inquiète pour ses emplois », *RTBF*. <https://www.rtbef.be/article/du-bois-wallon-achete-par-la-chine-et-revendu-en-belgique-la-filiere-bois-sinquiete-pour-ses-emplois-10861249> (consulté le 6 avril 2022).
- [6] « Les robots bâtisseurs », *UCLouvain*. <https://uclouvain.be/fr/sciencetoday/actualites/les-robots-batisseurs.html> (consulté le 6 avril 2022).
- [7] L. A. Renforth, « Pole Testing Ensures High Reliability and Long Life », p. 5, 2002.
- [8] Bureau de Normalisation, « Norme: Structures en bois- Détermination et vérification des valeurs caractéristiques », EN14358 :2016, 2016.
- [9] « autoconstruction_tronco_def.pdf ». Consulté le: 7 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.latelierpaysan.org/IMG/pdf/autoconstruction_tronco_def.pdf
- [10] « WholeTrees Structures | National Gateway », *WholeTrees Structures*. <https://wholetrees.com/portfolio-item/national-gateway/> (consulté le 6 avril 2022).
- [11] F. Marot, « Un bâtiment de grume et de paille », *lavenir.net*. <https://www.lavenir.net/regions/namur/namur/2021/09/30/un-batiment-de-grume-et-de-paille-OJVEN5CJGFDX5MNAX3KVOOJUZE/> (consulté le 7 avril 2022).
- [12] L. Rowan, « The Cedar River Logging Trestle, 203ft High and 843ft Long, Washington State, ca. 1917 », *History Daily*. <https://historydaily.org/cedar-river-logging-trestle> (consulté le 15 mai 2022).
- [13] « Inspirational timber case studies ». <https://www.trada.co.uk/case-studies/wood-chip-barn/> (consulté le 15 mai 2022).
- [14] « Non Destructive Testing - GrindoSonic ». <https://www.grindosonic.com/> (consulté le 7 avril 2022).
- [15] W. Jarboui, « Évaluation triaxiale des propriétés mécaniques du bois par les méthodes non-destructives », Mémoire de maîtrise, Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, 2017. Consulté le: 18 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/830>
- [16] J. Lord et R. Morrell, « Measurement Good Practice Guide No.98 », NPL (National Physical Laboratory), Elastic Modulus Measurement 98, 2006.
- [17] D. S. Paolino, H. Geng, A. Scattina, A. Tridello, M. P. Cavatorta, et G. Belingardi, « Damaged composite laminates: Assessment of residual Young's modulus through the Impulse Excitation Technique », *Compos. Part B Eng.*, vol. 128, p. 76-82, nov. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.07.008.
- [18] Y. M. Haddad, *Dynamic loading and intelligent material systems.*, Springer Science&Business Media., vol. 2. 2013.

- [19] P. J. da S. Cruz, Éd., *Structures and architecture: proceedings of the First International Conference on Structures and Architecture*, ICSA 2010. Boca Raton, Fla. Guimarães, Portugal: CRC Press, 2010.
- [20] C. M. Harris et A. G. Piersol, Éd., *Harris' shock and vibration handbook*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [21] Anderson Soares et Simone dos Santos Hoefel, « Analysis of Rotatory Inertia and Shear Deformation on Transverse Vibration of Beams », présenté à IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2016. doi: 10.20906/CPS/CON-2016-1101.
- [22] Seon M. Hans, Hayam Benaroya, et Timothy Wei, « Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories », *Article No. jsvi.1999.2257*, p. 935-988, 1999.
- [23] C.-L. Cho, « Comparison of Three Methods for Determining Young's Modulus of Wood », *Taiwan J for Sci*, p. 297-306, 2007.
- [24] E. Goens, « Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegungsschwingungen », *Ann. Phys.*, vol. 403, n° 6, p. 649-678, 1931, doi: 10.1002/andp.19314030602.
- [25] S. Spinner, T. W. Reichard, et W. E. Tefft, « A comparison of Experimental and Théoretical Relations Between Young's Modulus and the Flexural and Longitudinal Resonance Frequencies of Uniform Bars », *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 64.A, n° 2, p. 147-155, avr. 1960.
- [26] D. Petersen, R. Link, et J. Murphy, « Transverse Vibration of a Simply Supported Frustum of a Right Circular Cone », *J. Test. Eval.*, vol. 28, n° 5, p. 415, 2000, doi: 10.1520/JTE12130J.
- [27] O. Burnet et A. Van den Bosh, « Réunion avec le responsable des ventes (Olivier Burnet) et le patron (Alex Van den Bosh) de GrindoSonic », 7 mars 2022.
- [28] « Harmonique ». <http://stringfixer.com/fr/Harmonic> (consulté le 18 avril 2022).
- [29] « Polar moment of inertia for various sections », *Understanding business analysis and engineering principles*. <https://www.hkdivedi.com/2017/09/polar-moment-of-inertia-for-various.html> (consulté le 21 avril 2022).
- [30] M. Krawczuk, J. Grabowska, et M. Palacz, « Longitudinal wave propagation. Part I—Comparison of rod theories », *J. Sound Vib.*, vol. 295, n° 3-5, p. 461-478, août 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.12.048.
- [31] D. Bancroft, « The Velocity of Longitudinal Waves in Cylindrical Bars », *Phys. Rev.*, vol. 59, n° 7, p. 588-593, avr. 1941, doi: 10.1103/PhysRev.59.588.
- [32] J. F. Doyle, *Wave Propagation in Structures*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-59679-8.
- [33] H. Kolsky, *Stress Waves in Solids*. Courier Corporation, 1963.
- [34] G. Croiset, A. Leclercq, H. Lecomte, et P. Questienne, « Étude comparative de deux méthodes de détermination du module d'élasticité du bois et de ses dérivés », Station de technologie forestière, Gembloux, Rapport interne, 1980.
- [35] ASTM, « Norme ASTM : Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration ». 2005.
- [36] « FFT ». <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft> (consulté le 11 mai 2022).
- [37] Daniel W. Haines, J.-M. Leban, et C. Herbé, « Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods », *Wood Sci. Technol.*, vol. 30, n° 4, août 1996, doi: 10.1007/BF00229348.
- [38] A. Groover, « Gravitropisms and reaction woods of forest trees – evolution, functions and mechanisms », *New Phytol.*, vol. 211, n° 3, p. 790-802, août 2016, doi: 10.1111/nph.13968.

- [39] R. Ross, *Wood handbook: Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 2010.
- [40] I. Brémaud, J. Gril, et B. Thibaut, « Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data », *Wood Sci. Technol.*, vol. 45, n° 4, p. 735-754, nov. 2011, doi: 10.1007/s00226-010-0393-8.
- [41] Y. H. Chui, « Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters », *Wood Sci. Technol.*, vol. 25, n° 2, févr. 1991, doi: 10.1007/BF00226812.
- [42] D. F. Llana, « influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in scots pine wood », *Wood Research*, p. 769-780, 2014.
- [43] A. Villasante, A. Fernandez-Serrano, L. Puigdomenech, J. Lampurlanes, et D. Moliner, « Effect of a Longitudinal Cut on the Mechanical Properties of Small-Diameter Roundwood of *Pinus nigra* Arnold », *BioResources*, vol. 11, n° 2, p. 3587-3597, févr. 2016, doi: 10.15376/biores.11.2.3587-3597.
- [44] M. H. Freeman et K. W. Ragon, « A Review of Wood Pole Testing Equipment Compared to Visual and Excavation Techniques Used in Test and Treat Programs », p. 11, 2010.
- [45] J. Ilic, « Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker », *Holz Als Roh- Werkst.*, vol. 59, n° 3, p. 169-175, juin 2001, doi: 10.1007/s001070100198.
- [46] J. Launay, P. Rozenberg, L. Paques, et J.-M. Dewitte, « A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees », *Ann. For. Sci.*, vol. 57, n° 4, p. 361-359, mai 2000, doi: 10.1051/forest:2000126.
- [47] J. Ilic, « Dynamic MOE of 55 species using small wood beams », *Holz Als Roh- Werkst.*, vol. 61, n° 3, p. 167-172, juin 2003, doi: 10.1007/s00107-003-0367-8.
- [48] P. de Vries et W. F. Gard, « The development of a strength grading system for small diameter roundwood », n° Journal Article, 1998, [En ligne]. Disponible sur: <https://go.exlibris.link/ZZz7CnW8>
- [49] M. R. Carreira, A. A. Dias, et P. G. de Alcântara Segundinho, « Nondestructive Evaluation of *Corymbia citriodora* Logs by Means of the Free Transverse Vibration Test », *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, n° 2, p. 26, juin 2017, doi: 10.1007/s10921-017-0401-0.
- [50] « www.polux-technology.com ». Consulté le: 26 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.polux-technology.com/>
- [51] G. Deflorio, S. Fink, et F. W. M. R. Schwarze, « Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation », *Wood Sci. Technol.*, vol. 42, n° 2, p. 117-132, févr. 2008, doi: 10.1007/s00226-007-0159-0.
- [52] M. Chalayer, « Caractérisation du bois rond: un enjeu d'avenir », n° 353, p. 39-46, févr. 2017.
- [53] O. Lindgren, J. Davis, P. Wells, et P. Shadbolt, « Non-destructive wood density distribution measurements using computed tomography », *Holz Als Roh- Werkst.*, vol. 50, n° 7-8, p. 295-299, août 1992, doi: 10.1007/BF02615356.
- [54] P. C. Wang et S. J. Chang, « Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Wood », *Wood Fiber Sci.*, p. 308-314, 1986.
- [55] « Fil du bois », *Wikipédia*. 10 mai 2020. Consulté le: 8 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fil_du_bois&oldid=170665484
- [56] J.-L. Sandoz et Y. Benoit, « NDE from the Log to the Sawing », France, 2006.
- [57] F. Pantelić, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, D. Ridley-Ellis, et D. Dudeš, « Analysis of a wooden specimen's mechanical properties through acoustic measurements in the very near field », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 147, n° 4, p. EL320-EL325, avr. 2020, doi: 10.1121/10.0001030.

- [58] J. L. Sandoz, Y. Benoit, et L. Demay, « Wood testing using Acousto-ultrasonic », Lausanne et CBT (Concept Bois Technologie).
- [59] « Luxpole : Wood engineers and builders ». <https://cbs-cbt.com/en/technology/luxpole-5-114-9> (consulté le 8 avril 2022).
- [60] « Logamatic- Concepteur-constructeur bois ». <https://cbs-cbt.com/fr/technologie/Logamatic-5-116-13> (consulté le 31 mai 2022).
- [61] « HITMAN ST300 | Our twin probe tool | fibre-gen Ltd », *fibre-gen*. <https://www.fibre-gen.com/hitman-st300> (consulté le 31 mai 2022).
- [62] R. E. Green, « Non-contact ultrasonic techniques », *Ultrasonics*, vol. 42, n° 1-9, p. 9-16, avr. 2004, doi: 10.1016/j.ultras.2004.01.101.
- [63] Sandoz Jean-Luc, « Le bois dans la construction: innovations et perspectives », *Httpwww-Period.*, vol. Tracés, n° 12, p. 7-15, 2002, doi: 10.5169/seals-80287.
- [64] P. Rozenberg, A. Franc, C. Mamdy, J. Launay, N. Schermann, et J. C. Bastien, « Genetic control of stiffness of standing Douglas fir; from the standing stem to the standardised wood sample, relationships between modulus of elasticity and wood density parameters. Part II », *Ann. For. Sci.*, vol. 56, n° 2, p. 145-154, 1999, doi: 10.1051/forest:19990206.
- [65] R. Gonçalves et P. S. G. Magalhães, « Using Ultrasonic Wave Propagation to Grading New Wooden and Concret Poles ».
- [66] V. Bucur, *Acoustics of Wood, Acoustic methods as a nondestructive tool for wood quality assessment*. 2006.
- [67] A. Rais, H. Pretzsch, et J.-W. G. van de Kuilen, « Roundwood pre-grading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards », *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 72, n° 1, p. 87-98, janv. 2014, doi: 10.1007/s00107-013-0757-5.
- [68] F. Divos et T. Tanaka, « Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood=Kapsolat a faanyag statikus és dinamikus rugalmassági modulusza között. », *no 1*, p. 105-110, 2005.
- [69] J. Baar, J. Tippner, et P. Rademacher, « Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods », *Maderas Cienc. Tecnol.*, 2015, doi: 10.4067/S0718-221X2015005000023.
- [70] S. Chauhan et A. Sethy, « Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity », *Maderas Cienc. Tecnol.*, n° ahead, 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000034.
- [71] X. Wang *et al.*, « Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs », United States Department of Agriculture, Forest Service, 2001.
- [72] L. B. Otani, « Elastic moduli characterization of wood and wood products using the Impulse Excitation Technique », ATCP Physical Engineering, Federal University of Espírito Santo, São Paulo State University, White paper Tecnical-scientific informative 1.3, févr. 2015.
- [73] A. Bukauskas *et al.*, « Whole timber construction: A state of the art review », *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, p. 748-769, juill. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043.
- [74] D. W. Green, J. F. Murphy, T. W. Gorman, et J. W. Evans, « Improved grading system for structural logs for log homes », *Forest Products Journal*, p. 52-62, mars 2003.
- [75] A. Vega, L. González, I. Fernández, et P. González, « Grading and mechanical characterization of small-diameter round chestnut (*Castanea sativa* Mill.) timber from thinning operations », *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 14, n° 2, p. 81-87, mars 2019, doi: 10.1080/17480272.2017.1387174.

- [76] D. W. Green, T. M. Gorman, J. W. Evans, et J. F. Murphy, « Mechanical Grading of Round Timber Beams », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, n° 1, p. 1-10, févr. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(1).
- [77] R. Wolfe et C. Moseley, « Small-diameter log evaluation for value-added structural applications », *Forest Prod. Lab*, p. 48-58, octobre 2000.
- [78] M. Grabianowski, B. Manley, et J. C. F. Walker, « Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber », *Wood Sci. Technol.*, vol. 40, n° 3, p. 205-216, mars 2006, doi: 10.1007/s00226-005-0038-5.
- [79] W.-J. Hwang, H.-M. Lee, Y.-R. Park, et D.-H. Lee, « The Change of Ultrasonic Transmission Velocity by Wood Decay », *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 42, n° 2, p. 214-221, mars 2014, doi: 10.5658/WOOD.2014.42.2.214.
- [80] A. F. Genç, V. Kahya, A. C. Altunışık, M. Günaydın, et C. Demirkır, « Assessment of modal characteristics of cross-laminated timber beams subject to successive damages », *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 21, n° 3, p. 128, août 2021, doi: 10.1007/s43452-021-00288-2.
- [81] R. J. Ross et R. F. Pellerin, « NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves », *Forest Products Journal*, p. 39-45, 1988.
- [82] F. Han, Q. Zhang, C. Wang, G. Lu, et J. Jiang, « Structural Health Monitoring of Timber Using Electromechanical Impedance (EMI) Technique », *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, p. 1-9, juill. 2020, doi: 10.1155/2020/1906289.
- [83] Bureau de Normalisation, *norme belge NBN EN 408+A1*. Belgique, 2012.
- [84] « Eurocode 5 «Calcul des structures en bois» », France, p. 143, Aout 1995.
- [85] Christopher Moens et Jens Niclaes, « Caractérisation mécanique des grumes », Mémoire expérimental, Université Catholique de Louvain la Neuve, Belgique, Année académique 20-21.
- [86] M. Dehaen et P.-L. Ponthière, « Recherche d'un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes », Catholique de Louvain-la-Neuve UCL EPL, Belgique, Louvain-la-Neuve, 2022.
- [87] L. Machek, « A dynamic approach to assess the modulus of elasticity in wood decay testing », *The international reasearch group on wood preservation*, Netherlands, p. 9, 1998.
- [88] B. Yang, R. D. Seale, J. Dahlen, et R. Shmulsky, « Comparison of nondestructive testing methods for evaluating no. 2 southern pine lumber: Part a modulus of elasticity », p. 376-384, 2015.
- [89] « Clipping (audio) », *Wikipédia*. 7 juin 2021. Consulté le: 14 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Clipping_\(audio\)&oldid=183640104](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Clipping_(audio)&oldid=183640104)

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl