

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
RÉSUMÉ.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1.....	5
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1 Définition, historique et application des méthodes d'évaluation non destructives du bois	5
1.2 Propagation des ondes dans le bois	9
1.2.1 Propagation des ondes mécaniques dans le bois	9
1.2.1.1 Technique de résonance	13
1.2.1.1.1 Vibration longitudinale	16
1.2.1.1.2 Vibration de flexion.....	17
1.2.1.1.3 Vibration de torsion.....	19
1.2.1.2 Technique d'ultrason.....	21
1.2.1.2.1 Inspection par ultrason.....	23
1.2.1.2.1.1 Technique impulsion-écho.....	23
1.2.1.2.1.2 Technique par transmission	24
1.2.1.2.1.3 Imagerie ultrasonore.....	26
1.2.1.2.2 Évaluation des propriétés mécaniques par ultrason	28
1.2.2 Propagation des ondes électromagnétiques dans le bois	31
1.3 Relations entre les propriétés mécaniques statiques et dynamiques du bois.....	33
1.3.1 Généralités sur les propriétés mécaniques du bois	33

1.3.2 Modules d'élasticité	35
1.3.3 Modules de cisaillement.....	41
1.3.4 Coefficients de Poisson.....	43
1.4 Principaux facteurs affectant le comportement mécanique du bois.....	46
1.4.1 Structure anatomique	46
1.4.2 La masse volumique	50
1.4.3 La teneur en humidité et la température.....	51
Chapitre 2	53
MATÉRIELS ET MÉTHODES	53
2.1 Choix du matériel.....	53
2.2 Préparation des échantillons	53
2.3 Mesure des propriétés mécaniques de bois.....	56
2.3.1 Méthodes destructives : essais de compression et de flexion.....	56
2.3.1.1 Essai de compression :	56
2.3.1.2 Essai de flexion.....	58
2.3.2 Méthodes non destructives	61
2.3.2.1 Mesures ultrasoniques	61
2.3.2.2 Mesures acoustiques par résonance	65
2.3.2.2.1 Méthode de résonance : mode de vibration longitudinale ..	72
2.3.2.2.2 Méthode de résonance : mode de vibration de flexion	72
2.3.2.2.3 Méthode de résonance : mode de vibration de torsion.....	73
2.4 Analyse statistique	74
CHAPITRE 3.....	76
RÉSULTATS ET DISCUSSION	76
3.1 Modules d'élasticité	76
3.1.1 Étude du comportement statique du bois en compression selon trois axes par des méthodes non destructives (ultrason et résonance)	76
3.1.1.1 Analyse de variance	76

3.1.1.2	Variation triaxiale des modules élastiques statiques et dynamiques	77
3.1.1.3	Prédiction triaxiale des modules d'élasticité statiques en compression par les modules dynamiques mesurés par les méthodes d'ultrason et de résonance	87
3.1.2	Étude du comportement statique du bois en flexion par les méthodes non destructives (ultrason et résonance)	96
3.1.2.1	Analyse de variance	96
3.1.2.2	Étude comparative entre les propriétés mécaniques du bois déterminées par les essais non destructifs (modules d'élasticité dynamiques) et l'essai de flexion (module d'élasticité en flexion et le module de rupture)	96
3.1.2.3	Prédiction des modules d'élasticité statiques en flexion par les modules dynamiques	101
3.1.2.4	Prédiction du module de rupture (MOR) en flexion par le module statique en flexion et les modules dynamiques	106
3.2	Modules de cisaillement	108
3.2.1	Analyse de variance	108
3.2.2	Étude comparative entre les modules de cisaillement du bois déterminés par les méthodes destructives et non destructives ..	109
3.2.3	Prédiction des modules de cisaillement statiques du bois par les méthodes non destructives	118
3.2.4	Prédiction des modules du cisaillement du bois à partir des modules d'élasticité	124
3.3	Évaluation des coefficients de Poisson par les méthodes destructives et non destructives	135
3.3.1	Validation des méthodes de mesure appliquées	135
3.3.2	Vérification des six coefficients de Poisson trouvés par les deux méthodes non destructives (la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotrope et la méthode de résonance)	141
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		150

RÉFÉRENCES	154
------------------	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Les différents types d'ondes mécaniques dans un milieu élastique semi-infini.....	9
Figure 1.2: Réponse exponentielle durant la propagation d'une onde longitudinale dans une barre viscoélastique	11
Figure 1.3: Exemple de (a) vibrations de flexion, (b) longitudinales et (c) de torsion	14
Figure 1.4: (a) Système de masse-ressort-amortisseur et (b) poutre en vibration transversale	15
Figure 1.5: Illustration du mode de vibration longitudinale d'une barre rectangulaire	17
Figure 1.6: (a) Illustration de mode de vibration de flexion d'une barre rectangulaire et (b) lignes nodales possibles pour réaliser le mode de vibration de flexion	18
Figure 1.7: (a) Illustration de mode de vibration de torsion d'une barre rectangulaire et (b) lignes nodales possibles pour réaliser le mode de vibration de torsion.....	19
Figure 1.8: Technique impulsion-écho (a) en utilisant un seul transducteur en contact avec l'échantillon testé et (b) illustration de l'écho reçu dans une zone avec ou sans défaut	24
Figure 1.9: Technique par transmission : (a) en mettant les transducteurs face à face ou bien sur la même surface de l'échantillon testé et (b) illustration de l'écho reçu dans une zone avec ou sans défaut	25
Figure 1.10: Exemple d'un test de diagnostic d'un tronc d'arbre en utilisant la tomographie acoustique	27
Figure 1.11: Dispositif de mesure du temps de propagation d'une onde ultrasonore dans un matériau	28
Figure 1.12: Exemple d'une configuration typique pour un balayage laser (a) d'une bille et (b) d'un bois d'œuvre	33
Figure 1.13: Directions principales du bois: longitudinale (L) radiale (R) tangentielle (T), et ses trois plans de symétrie : longitudinal-radial (LR), longitudinal- tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT).....	34
Figure 1.14: Structure tridimensionnelle de la paroi cellulaire d'une fibre	47

Figure 1.15: (a) Variation des modules d'élasticité et (b) de cisaillement du bois en fonction de l'angle de microfibrilles (AMF).....	49
Figure 1.16: Variation du module d'élasticité relatif dans la direction longitudinale du bois en fonction de la teneur en humidité et de la température	52
Figure 2.1: Diagramme montrant le protocole d'échantillonnage réalisé et les différents types d'échantillons préparés	54
Figure 2.2: Dispositif expérimental de l'essai de compression (a) longitudinale, (b) radiale et (c) tangentielle	57
Figure 2.3: Dispositif expérimental d'essais statiques de flexion à trois points pour déterminer (a) le module d'élasticité en flexion ($E_{s, f}$) et (b) le module de rupture MOR	59
Figure 2.4: Banc d'essai aux ultrasons	61
Figure 2.5: Dispositifs utilisés pour la fixation de l'échantillon et des capteurs..	63
Figure 2.6: Équipement de l'appareil GrindoSonic MK6 (Leuven, Belgique)	66
Figure 2.7: Exemple d'un mouvement oscillatoire libre en régime sous amorti .	67
Figure 2.8: Spectre fréquentiel d'un échantillon déterminé par le logiciel Audacity	68
Figure 2.9: Support de fixation de l'échantillon et des capteurs utilisés	69
Figure 2.10: Processus itératif pour déterminer les coefficients de Poisson d'un matériau par la méthode de résonance	71
Figure 2.11: Illustration d'un mode de vibration longitudinale	72
Figure 2.12: Illustration de mode de vibration de flexion dans le cas de la méthode de résonance	73
Figure 2.13: Illustration de mode de vibration de torsion dans le cas de la méthode de résonance	73
Figure 3.1: Corrélation entre le module statique en compression ($E_{c, L}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r, L}$) et d'ultrason ($E_{u, L}$) pour la direction longitudinale.....	87
Figure 3.2: Relation entre le module d'élasticité statique en compression ($E_{c, R}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r, R}$) et d'ultrason ($E_{u, R}$) pour la direction radiale.....	91
Figure 3.3: Relation entre le module d'élasticité statique en compression ($E_{c, T}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r, T}$) et d'ultrason ($E_{u, T}$) pour la direction tangentielle	94
Figure 3.4: Relation entre le module d'élasticité radial obtenu par l'ultrason ($E_{u, R}$) et celui obtenu par la résonance ($E_{r, R}$).....	95

Figure 3.5: Relation entre le module d'élasticité tangentiel obtenu par l'ultrason ($E_{u,T}$) et celui obtenu par la résonance ($E_{r,T}$)	95
Figure 3.6: Corrélation entre le module statique de flexion ($E_{s,f}$) et le module d'élasticité longitudinal obtenu par ultrason ($E_{u,L}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration longitudinale ($E_{r,L}$) ou bien la vibration de flexion ($E_{rf,L}$) pour les sept essences étudiées	104
Figure 3.7: Corrélation entre le module d'élasticité obtenu par ultrason ($E_{u,L}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration longitudinale ($E_{r,L}$) ou bien la vibration de flexion ($E_{rf,L}$) pour les sept essences étudiées.....	105
Figure 3.8: Relation entre le module de rupture MOR et les modules obtenus par l'essai de flexion statique ($E_{s,f}$), la méthode d'ultrason ($E_{u,L}$) et la méthode de résonance ($E_{r,L}$ et $E_{rf,L}$)	107
Figure 3.9: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c,LR}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r,LR}$), la méthode d'ultrason ($G_{u,LR}$) et l'essai de flexion	118
Figure 3.10: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c,LT}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r,LT}$), la méthode d'ultrason ($G_{u,LT}$) et l'essai de flexion	119
Figure 3.11: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c,RT}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r,RT}$), la méthode d'ultrason ($G_{u,RT}$) et l'essai de flexion	119
Figure 3.12: Relation entre le module dynamique de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,LT}$) et celui obtenu par l'ultrason ($G_{u,LT}$) toutes essences confondues.....	120
Figure 3.13: Relation entre le module dynamique de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,RT}$) et celui obtenu par l'ultrason ($G_{u,RT}$) toutes essences confondues.....	121
Figure 3.14: Relation entre le module de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,LR}$) et celui obtenu par l'ultrason ($G_{u,LR}$) toutes essences confondues	122
Figure 3.15: Corrélation entre le module obtenu par la vibration longitudinale ($E_{r,L}$) et celui obtenu par la vibration de flexion ($E_{rf,L}$) et la vibration de torsion ($G_{r,LR}$) toutes essences confondues	126
Figure 3.16: Corrélation entre le module d'élasticité radial obtenu par la vibration longitudinale ($E_{r,R}$) et le module de cisaillement obtenu par la vibration de torsion ($G_{r,LT}$) toutes essences confondues	126

Figure 3.17: Corrélation entre le module d'élasticité tangentiel obtenu par la méthode de résonance ($E_{r,T}$) et le module de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,RT}$) toutes essences confondues	127
Figure 3.18: Relation entre le module d'élasticité longitudinal ($E_{u,L}$) et le module de cisaillement ($G_{u,LR}$) déterminés par la méthode d'ultrason.....	131
Figure 3.19: Relation entre le module d'élasticité radial d'ultrason ($E_{u,R}$) et le module de cisaillement ($G_{u,LT}$) déterminés par la méthode d'ultrason	132
Figure 3.20: Relation entre le module d'élasticité tangentiel ($E_{u,T}$) et le module de cisaillement ($G_{u,RT}$) déterminés par la méthode d'ultrason	132
Figure 3.21: Relation entre le module d'élasticité radial ($E_{c,R}$) et le module de cisaillement ($G_{c,LR}$) déterminés par la méthode de compression.....	133
Figure 3.22: Relation entre le module d'élasticité tangentiel ($E_{c,T}$) et les modules de cisaillement ($G_{c,LT}$ et $G_{c,RT}$) déterminés par la méthode de compression.....	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Classification des méthodes non destructives pour le bois en fonction de ses propriétés physiques	8
Tableau 1.2 : Propriétés élastiques mesurables par la technique de résonance selon la symétrie matérielle du matériau testé et ses orientations	20
Tableau 1.3 : Les valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m^3) et les modules d'élasticité (MPa) pour les feuillus et les résineux.....	37
Tableau 1.4 : Relation entre E_L statique et E_L d'ultrason pour divers produits de bois.....	38
Tableau 1.5 : Valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m^3), du module d'élasticité longitudinale (MPa) et des modules de cisaillement (MPa) pour les feuillus et les résineux.....	44
Tableau 1.6 : Les valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m^3) et les coefficients de Poisson pour les feuillus et les résineux	45
Tableau 2.1: Nombre et dimensions des échantillons préparés pour les différentes propriétés mesurées.....	55
Tableau 2.2: Les différentes propriétés mesurées par l'ultrason en fonction de type d'onde pénétrée dans le bois	62
Tableau 2.3: Propriétés élastiques déterminées par la méthode de résonance selon le type de l'échantillon et le mode de vibration utilisée	70
Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F (Z pour l'erreur) et P pour chaque source de variation du module d'élasticité selon la direction du bois (longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)).....	76
Tableau 3.2 : Variation triaxiale (longitudinale, radiale et tangentielle) des moyennes de modules d'élasticité statiques et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'espèce.....	79
Tableau 3.3 : Les ratios d'anisotropie calculés (E_L/E_R , E_L/E_T et E_R/E_T) en fonction de l'essence et de la méthode de mesure.....	86
Tableau 3.4 : Coefficients de détermination (R^2) calculés entre ($E_{c,L}$ et $E_{u,L}$) et ($E_{c,L}$ et $E_{r,L}$) pour chaque essence individuelle et pour l'ensemble des résineux et des feuillus.....	88
Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F et P pour chaque source de variation du module d'élasticité et celui de rupture MOR	96

Tableau 3.6 : Variation des moyennes des modules d'élasticité statiques (essais de flexion) et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'essence	99
Tableau 3.7 : Coefficient de détermination (R^2) pour l'ensemble des feuillus, des résineux et toutes les essences confondues	102
Tableau 3.8 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F (Z pour l'erreur) et P pour chaque source de variation du module de cisaillement selon les différents plans du bois (longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT))	109
Tableau 3.9 : Variation triaxiale des moyennes de modules de cisaillement statiques et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'espèce	110
Tableau 3.10 : Valeurs moyennes de la vitesse transversale d'ultrason (m/s) selon les trois plans principaux du bois (longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT))	113
Tableau 3.11 : Variation des différents ratios de modules de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}) en fonction de l'essence et de méthode de mesure	117
Tableau 3.12 : Coefficient de détermination (R^2) des modules d'élasticité et de cisaillement pour toutes les essences confondues	125
Tableau 3.13 : Les six coefficients de Poisson calculés pour les différentes essences selon l'essai de compression, la méthode d'ultrason (en appliquant la théorie isotropique et orthotropique) et la méthode de résonance.	136
Tableau 3.14 : Les valeurs moyennes des six coefficients de Poisson trouvées pour l'ensemble des feuillus et des résineux en utilisant les deux méthodes non destructives (la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotrope et la méthode de résonance)	148

RÉSUMÉ

Les essais non destructifs sont considérés comme la meilleure approche pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques d'un matériau donné sans modifier sa capacité d'application finale. L'objectif de cette étude était de prédire les propriétés élastiques du bois dans ses trois directions principales, longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T), en utilisant soit la méthode d'ultrason, soit la méthode de résonance longitudinale, de flexion et de torsion. Les propriétés mécaniques étudiées étaient les modules d'élasticité (longitudinal (E_L), radial (E_R), tangential (E_T)), les modules de cisaillement (longitudinal-radial (G_{LR}), longitudinal-tangential (G_{LT}) et radial-tangential (G_{RT})) et les six coefficients de Poisson. En comparaison, des essais destructifs de flexion et de compression ont également été réalisés. Sept espèces de bois ont été sélectionnées: épinette blanche, bouleau blanc, peuplier hybride, peuplier faux-tremble, pin gris, mélèze et thuya occidental. Les résultats montrent que E_L était très élevé par rapport aux E_R ($> \times 10$) et celui E_T ($> \times 20$), ceci en raison de l'anisotropie du bois. Les modules d'élasticité obtenus par la méthode de résonance furent comparables à ceux obtenus avec des essais statiques de flexion et de compression. La corrélation entre les modules d'élasticité dynamiques et statiques était très élevée dans la direction longitudinale ($R^2=0,80-0,99$), mais faible dans les directions tangentielle ($R^2=0,26-0,55$) et radiale ($R^2=0,23-0,34$). La corrélation entre les modules statiques et dynamiques la plus élevée a été obtenue en utilisant la technique de vibration de flexion ($R^2=0,99$), comparée à la vibration longitudinale ($R^2=0,92$) et la technique d'ultrasons ($R^2=0,80$). Les coefficients de corrélation entre les modules dynamiques et le module de flexion statique étaient plus élevés ($R^2=0,99$) que ceux entre les modules dynamiques et le MOR ($R^2=0,70$). Pour les modules de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}), la corrélation entre les modules dynamiques et statiques était modérée à faible ($R^2=0,02-0,42$). Cependant, les modules de cisaillement présentaient une forte corrélation avec les modules d'élasticité dynamiques ($R^2=0,68-0,95$). La corrélation la plus élevée a été obtenue pour le G_{LR} dans le cas de la méthode de résonance longitudinale ($R^2=0,95$). Pour le G_{LT} et le G_{RT} , les résultats de corrélation étaient comparables aux méthodes par résonance ($R^2=0,86$ et $0,68$) et par ultrasons ($R^2=0,72$ et $0,77$) respectivement. Cependant, les méthodes analytiques appliquées aux méthodes destructives et non destructives, ne sont pas aptes à estimer les coefficients de Poisson. En définitive, les méthodes d'ultrason et de résonance se sont révélées être plus simples et tout aussi utiles, pour déterminer le module d'élasticité et de cisaillement du bois que les tests statiques..

Mots clés : Propriétés élastiques, modules d'élasticité et de cisaillement, coefficients de Poisson, méthodes non destructives, ultrason, méthode de résonance.

ABSTRACT

Non-destructive testing is among the best approaches for evaluating the physical and mechanical properties of a given material without altering its final application capacity. The objective of this study was to predict the elastic properties of wood in the longitudinal (L), radial (R) and tangential (T) directions, using an ultrasound method as well as longitudinal, flexural and torsional resonance methods. The studied properties were the moduli of elasticity (E_L , E_R , E_T), the shear moduli (G_{LR} , G_{LT} , and G_{RT}), and Poisson ratios. For comparison, bending and compression tests were also realised. Seven wood species were selected for this study: white spruce, white birch, hybrid poplar, trembling aspen, jack pine, larch tamarack and eastern white cedar. The longitudinal moduli of elasticity were very high compared to the radial ($\times 10$) and the tangential ($\times 20$) moduli respectively. The resonance method produced values of moduli of elasticity comparable to those obtained with static bending and compression tests. Correlation between the dynamic moduli and the static moduli were very high in the longitudinal direction ($R^2=0.80-0.99$) but weak in the tangential ($R^2=0.26-0.55$) and radial ($R^2=0.23-0.34$) directions. The highest correlation between the static moduli and the dynamic moduli was obtained using the flexural vibration technique ($R^2=0.99$) compared to the longitudinal vibration ($R^2=0.92$) and ultrasonic techniques ($R^2=0.80$). The correlation coefficients between the dynamic moduli and static bending moduli were higher ($R^2=0.99$) than those between the dynamic moduli and MOR ($R^2=0.70$). For shear moduli, the correlation between the dynamic and the static moduli (G_{LR} , G_{LT} , and G_{RT}) was moderate to very low ($R^2=0.02-0.42$). However, shear moduli correlated strongly with dynamic moduli of elasticity ($R^2=0.68-0.95$). The highest correlation was obtained for G_{LR} based on the longitudinal ($R^2=0.95$) resonance methods. For G_{LT} and G_{RT} , correlation results were comparable for resonance ($R^2=0.86$ and 0.68) and ultrasound ($R^2=0.72$ and 0.77) methods respectively. However, analytical methods applied to non-destructive and destructive methods are not able to estimate Poisson's ratios. In conclusion, the ultrasonic and resonance methods for determining the moduli of elasticity and shear moduli of wood were found to be simpler and equally useful than the static tests.

Keywords Elastic properties, moduli of elasticity, shear moduli, Poisson ratios, non-destructive methods, ultrasound, resonance method.

INTRODUCTION

La qualité du bois est une notion dont la définition est liée au domaine de son application. Pour les forestiers, la qualité du bois est définie selon la taille et la forme de l'arbre, alors que pour l'industrie du bois d'œuvre, elle dépend de la qualité des billes, à savoir le diamètre, la présence des nœuds, le défilement, etc. (Mitchell, 1961; Zhang, 2003). Pour l'industrie de la construction, la qualité du bois est principalement liée à sa rigidité. La rigidité spécifique du bois est très élevée comparée aux autres matériaux, tels que les métaux. Grâce à la rigidité spécifique du bois, il est souvent utilisé dans plusieurs applications de construction (poutrelles de bois en I) et dans le domaine de l'ingénierie (panneaux à lamelles stratifiées LVL), d'où l'augmentation rapide de sa consommation à l'échelle internationale et provinciale, qui est principalement associée à l'augmentation de la population mondiale (Wang et al., 2017). À titre d'exemple, de 2005 à 2030, la population mondiale est estimée d'augmenter de 6,4 à 8,2 milliards (FAO, 2009). Par ailleurs, la diminution des ressources disponibles en bois et l'augmentation des coûts de transport et de transformation du bois, combinées avec les multiples et divers usages du bois, sollicitent une bonne connaissance du matériau, notamment ses propriétés mécaniques. Ainsi, pour éviter les mauvaises utilisations du matériau bois, et afin d'assurer les normes de sécurité du bois en service, l'industrie forestière doit trouver des solutions rapides et efficaces pour contrôler le bois avant sa récolte, au cours de sa transformation ainsi qu'en service (Zhang, 2003). Ceci explique l'intérêt des industriels et des chercheurs à développer des outils fiables et précis de mesure de la qualité du bois, ce qui permettra d'obtenir une meilleure évaluation des propriétés du bois, en particulier ses propriétés mécaniques. Cette évaluation permettra d'utiliser le bois disponible de manière plus efficace selon ses propriétés et le domaine d'application. En effet, cette évaluation peut être réalisée à l'aide des outils destructifs, mais elle s'avère très difficile, limitant ainsi la portée des applications des outils destructifs. De plus, ces outils destructifs font que la préparation des échantillons et la mesure des propriétés du bois sont très longues. En contrepartie, dans certains cas, il est important d'évaluer périodiquement l'état du bois utilisé

sans affecter ses propriétés fonctionnelles (Nowak et al., 2015; Wang et al., 2017). Par exemple, au cours ces dernières années, l'évaluation des bâtiments historiques en bois est devenue plus importante en raison de l'importance du patrimoine des vieilles villes qui doit être préservé (Nowak et al., 2015; Wang et al., 2017). Dans ce contexte, l'évaluation des structures historiques ne peut pas être effectuée par les méthodes destructives, qui peuvent causer une perte de l'intégrité structurelle (Nowak et al., 2015). Pour ces raisons, l'utilisation de méthodes non destructives d'évaluation du bois est fortement recommandée afin de satisfaire aux exigences de l'évaluation de la qualité du bois selon le domaine de son application. En outre, l'évaluation des propriétés mécaniques du bois en utilisant des outils non destructifs apporte plusieurs avantages, notamment l'économie de temps, la mobilité, l'application dans diverses conditions de terrain et atmosphériques et la réduction des coûts par rapport aux méthodes destructives traditionnelles (De Oliveira et al., 2005; Wang et al., 2017).

Dans ce contexte, plusieurs outils furent développés pour mesurer principalement les propriétés élastiques du bois, un paramètre très important qui décrit le comportement mécanique du matériau. Par ailleurs, étant donné son origine biologique, le bois est hétérogène et anisotrope (c'est-à-dire que ses propriétés varient selon la direction considérée) (Wang et al., 2017). En effet, le bois est caractérisé par trois directions principales : direction longitudinale, radiale et tangentielle. Ainsi, son comportement élastique est défini par douze propriétés élastiques (trois modules d'élasticité, trois modules du cisaillement et six coefficients de Poisson). Bien que le bois soit un des matériaux les plus utilisés depuis longtemps, les données relatives à ces propriétés élastiques ne permettent pas d'acquérir une connaissance précise et adéquate du comportement mécanique du bois, notamment dans sa direction radiale et tangentielle.

Toutefois, la majorité des outils non destructifs mesurent seulement les propriétés élastiques du bois dans le sens longitudinal alors que les caractéristiques mécaniques du bois varient selon la direction considérée (Wang et al., 2017). De façon plus spécifique, plusieurs études n'ont démontré que le potentiel de ces

méthodes dans la mesure du module d'élasticité longitudinal (Bucur, 2006, De Oliveira et al., 2005; Wang et al., 2017).

En contrepartie, et dans certaines applications comme les fermes de toit légères en bois, une évaluation triaxiale du comportement mécanique du bois est essentielle où il est possible de tirer parti de l'anisotropie structurelle du bois (Wang et al., 2017). Plus particulièrement, cette évaluation triaxiale est nécessaire pour utiliser les logiciels d'analyse structurelle et de simulation requis aujourd'hui dans le domaine de construction. Étant donné la complexité et la nature anisotrope du bois, peu d'études ont examiné la variation triaxiale des propriétés mécaniques du bois par les méthodes non destructives. Ainsi, parmi les nombreux outils de caractérisation non destructive, ceux se basant sur la transmission des ondes sonores (la méthode de résonance) ou celle des ondes ultrasoniques (la méthode d'ultrason) sont relativement développés et offrent une meilleure prédiction du comportement mécanique triaxial du bois.

Toutefois, l'efficacité de ces méthodes dépend beaucoup de plusieurs variables, notamment les dimensions des échantillons, la définition avec précision de la fréquence fondamentale de l'échantillon pour la technique de résonance et le choix de la fréquence des transducteurs pour la technique d'ultrason (Bucur, 2006). La littérature sur l'évaluation du potentiel des méthodes non destructives dans la mesure triaxiale des propriétés élastiques du bois est pratiquement absente.

Dans ce contexte, l'objectif principal de la présente étude est d'évaluer le potentiel de l'ultrason et de la méthode de résonance pour l'étude triaxiale des propriétés élastiques du bois de diverses essences du Canada. Plus spécifiquement, ce projet vise à déterminer la variation triaxiale des modules d'élasticité, des modules du cisaillement et des coefficients de Poisson pour différentes essences du bois de la forêt boréale. Ces propriétés sont déterminées par le biais des méthodes non destructives, telles que la méthode de résonance et la méthode ultrasonique, ainsi que par des méthodes destructives, telles que l'essai de compression statique (compression parallèle et compression perpendiculaire) et l'essai de flexion de trois

points. Ces mesures permettent d'une part d'établir les relations entre les propriétés mécaniques dynamiques et statiques du bois, et d'autre part, de développer des modèles de prédiction des propriétés statiques. Par ailleurs, ce projet permet d'évaluer la fiabilité des deux méthodes non destructives (ultrason et résonance) pour la prédiction du comportement statique du matériau bois. La détermination des propriétés mécaniques statiques permet de vérifier la fiabilité des outils non destructifs, notamment la méthode de résonance, car peu d'études ont examiné le potentiel de cette méthode pour la mesure des différentes propriétés mécaniques du bois.

Afin de répondre aux objectifs ci-dessus, nous faisons appel aux hypothèses suivantes :

- Les méthodes non destructives permettent de prédire de façon fiable le module d'élasticité dans la direction longitudinale du bois en raison de la présence des fibres qui fournissent un passage régulier pour l'onde ;
- La prédiction des modules d'élasticité statiques du bois est plus précise que la prédiction des modules du cisaillement et des coefficients de Poisson. Ceci est dû au fait que l'évaluation triaxiale des propriétés élastiques du bois en utilisant les méthodes non destructives dépend considérablement de l'anisotropie structurale du bois ainsi que de l'essence étudiée ;
- Les méthodes non destructives appliquées (ultrason et résonance) permettent de prévoir avec précision le module d'élasticité statique de flexion et le module de rupture.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Définition, historique et application des méthodes d'évaluation non destructives du bois

L'évaluation non destructive (END) est une méthode permettant de déterminer les propriétés physiques et mécaniques spécifiques d'un matériau étudié. Contrairement aux autres méthodes destructives qui provoquent un changement interne altérant les propriétés du matériau, l'END ne cause aucun dommage au matériau en question. Par conséquent, ce type d'évaluation n'a aucun impact sur l'utilisation finale du matériau (Ross, 1992). En général, le principal intérêt des méthodes non destructives est de détecter les défauts internes de matériaux à critères homogènes et isotropes, comme les discontinuités ou les inclusions. Dans le cas du bois, ces différents défauts se présentent généralement sous forme d'irrégularités naturelles (Ross, 1992). Ainsi, l'utilisation des méthodes non destructives dans des applications d'évaluation des propriétés des matériaux à base de bois, notamment le comportement mécanique, a suscité beaucoup d'attention (Bucur, 2006, De Oliveira et al., 2005; Wang et al., 2017). Pour cette raison, dans le cas du bois, le terme d'évaluation non destructive est souvent utilisé au lieu de contrôle non destructif (Brashaw et al., 2009; Ross et Pellerin, 1994).

Étant donné les différents avantages offerts par les méthodes d'END, notamment au niveau du gain de temps et de l'économie des coûts, l'industrie forestière s'intéresse de plus en plus au développement et à l'amélioration des méthodes non destructives. Il en résulte donc une évolution constante de ces méthodes (Dündar et Divos, 2014).

L'évaluation des caractéristiques visuelles du bois constitue la première et la plus ancienne méthode non destructrice. Cette inspection visuelle est possiblement l'une des méthodes non destructives les plus utilisées. En effet, elle est considérée comme l'une des méthodes potentielles de classement du bois d'œuvre. Suite à une

inspection visuelle, le bois est classé en différentes catégories (Bucur, 2013; Ross, 2015). Ce classement se base principalement sur les défauts externes observés sur la surface du bois, comme la présence de nœuds, leur taille, leur nombre et leur emplacement (Bucur, 2013; Ross, 2015).

Depuis le début du 20^e siècle, des chercheurs du monde entier se sont intéressés au développement des techniques non destructives. L'utilisation de l'acoustique dans le secteur forestier a gagné en intérêt, particulièrement dans les 50 dernières années. En vue de caractériser les propriétés mécaniques du bois de façon plus rapide, les chercheurs européens furent les premiers à commencer à développer les outils d'évaluation de la qualité du bois, notamment les outils de propagation des ondes, de vibration du son et de rayons X. Au début, ils ont principalement utilisé pour des applications industrielles (évaluation des produits du bois) ou également en forêt (évaluation de l'état de l'arbre avant la récolte) (Brashaw et al., 2009; Bucur, 2013).

Dans ce contexte, les premières recherches en Amérique du Nord sont divisées en deux principaux volets. L'un porte sur la détection de la carie au niveau des arbres urbains en y introduisant une onde sonore. Cette méthode permet aussi de localiser les défauts internes dans la tige, en utilisant la tomographie acoustique. L'autre volet consiste à évaluer la qualité du bois en effectuant une mesure acoustique simple dans les arbres debout (Brashaw et al., 2009).

De même, en Amérique centrale et du Sud, les chercheurs ont réussi à localiser les défauts de croissance des arbres par l'utilisation des technologies de micro-ondes, laser, rayons X et rayons gamma (Brashaw et al., 2009). Ces travaux ont montré aussi le potentiel de ces technologies pour étudier l'impact des pratiques sylvicoles sur la qualité du bois (Brashaw et al., 2009).

De l'autre côté de la planète, plusieurs pays asiatiques comme la Chine, qui compte la plus grande superficie de forêts de plantations à croissance rapide dans le monde, ont utilisé les méthodes d'END pour déterminer l'impact des caractéristiques de croissance sur les propriétés du bois, telles que la résistance et la stabilité dimensionnelle. Depuis 2003, suite à l'utilisation du bois comme matériau de

construction (ex. les structures à ossature en bois dans l'architecture traditionnelle chinoise), la Chine identifie de plus en plus de corrélations utiles entre la mesure basée sur l'acoustique du module d'élasticité des arbres et des bûches et les propriétés de flexion statique de bois d'œuvre (Brashaw et al., 2009).

De même au Japon, les chercheurs ont commencé à évaluer la qualité de la performance structurelle des billes et des arbres debout et à comprendre les propriétés dynamiques du bois sous l'effet de l'humidité (Brashaw et al., 2009; Proto et al., 2017). Ils ont également développé des modèles utilisables dans l'ajustement des valeurs dynamiques du module d'élasticité obtenues à partir des mesures de l'onde acoustique sur du bois ayant des teneurs en humidité au-dessus du point de saturation des fibres (Brashaw et al., 2009; Proto et al., 2017). La Nouvelle- Zélande, l'Australie ainsi que le Brésil, commencent aussi à consacrer des efforts considérables pour explorer les méthodes acoustiques en vue d'évaluer la qualité du bois (Brashaw et al., 2009).

Ces différentes recherches ont été menées de façon à obtenir une grande panoplie d'outils non destructifs (ex. les outils de terrain robustes) pour l'évaluation des arbres et aussi des systèmes automatisés de contrôle pour la surveillance de la qualité des produits finaux. Ceci est dans le but de déterminer plusieurs propriétés du bois, qu'elles soient physiques, mécaniques ou chimiques, tout en utilisant la technique non destructive convenable, telles que montrées dans le tableau 1.1 (Bucur, 2013).

Tableau 1.1 : Classification des méthodes non destructives pour le bois en fonction de ses propriétés physiques, adapté par Bucur (2013)

Paramètres du bois	Propriétés mesurées	Techniques
Teneur en humidité	Propriétés diélectriques	Impédance DC et haute fréquence, micro-ondes, infrarouge, NMR
	Propriétés thermiques	Infrarouge
	Absorption des rayons ionisants	Rayons X, Rayons gamma
	Propriétés élastiques	Méthode de résonance de fréquence, méthode par ultrasons
Masse volumique	Poids	Méthode gravimétrique
	Rayons ionisants	Micro-densitomètre à rayons X, atténuation des rayons X, bêta et gamma
	Propriétés diélectriques	Technique de micro-ondes
	Propriétés mécaniques	Pilodyne/ résistographe
Direction de la fibre	Propriétés élastiques	Vitesse ultrasonore
	Propriétés diélectriques	Technique de micro-ondes
	Diffusion de la lumière	Laser, lumière visible
	Propriétés thermiques	Infrarouge
Détection des nœuds	Propriétés optiques	Caméra CCD, colorimétrie
	Propriétés élastiques	Tomodensitométrie CT
	Rayonnement ionisant	Rayon X/CT, rayon gamma/CT
	Propriétés thermiques	Thermographie infrarouge, thermographie laser
	Propriétés électriques	Micro-ondes, NMR
Détection de pourriture	Propriétés élastiques	Vibration, ultrasons
	Propriétés mécaniques	Pénétration de pilodyne/ résistographe
	Propriétés diélectriques	Micro-ondes
	Rayons ionisants	Rayon X/CT
Capacité mécanique	Propriétés statiques	Contrainte de flexion, etc.
	Propriétés dynamiques	Méthodes de vibration et ultrasons
	Propriétés acoustiques	Émission acoustique

1.2 Propagation des ondes dans le bois

1.2.1 Propagation des ondes mécaniques dans le bois

Par définition, une onde mécanique est le phénomène de propagation d'une perturbation des particules de la matière (Blackstock, 2000). Cette perturbation est le résultat d'un impact mécanique brusque transformant l'énergie sans transporter la matière (Blackstock, 2000). En se basant sur la direction de déplacement des particules oscillantes par rapport à la direction de propagation de l'onde, on peut définir généralement trois types d'ondes mécaniques : une onde longitudinale, une onde transversale et une onde de surface (Figure 1.1). Dans le cas d'une onde longitudinale (onde de compression ou onde P), le mouvement des particules oscillantes du milieu se fait parallèlement à la direction de propagation de l'onde (Ross, 2015; Ross et al., 1998). Cependant, dans le cas d'une onde transversale (onde S), le mouvement des particules transportant l'onde est perpendiculaire à la direction de la propagation de l'onde elle-même (Ross, 2015; Ross et al., 1998). Dans le cas de l'onde de surface (onde de Rayleigh), habituellement limitée à la région adjacente à la surface, les particules se déplacent dans toutes les directions traçant ainsi des trajectoires elliptiques (Ross, 2015; Ross et al., 1998).

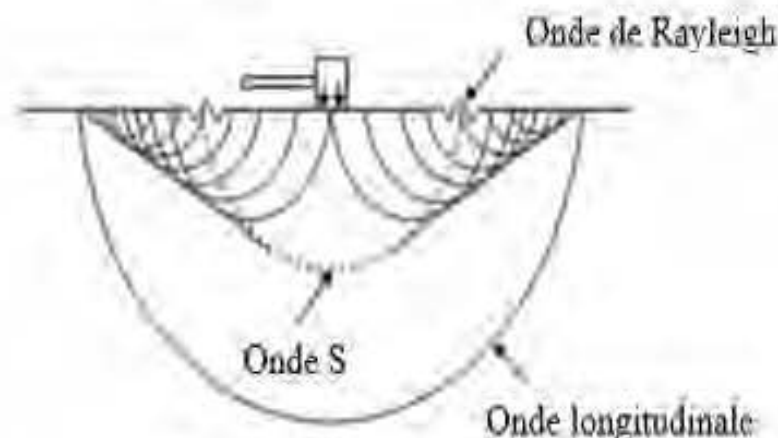


Figure 1.1: Les différents types d'ondes mécaniques dans un milieu élastique semi-infini (Ross, 2015; Ross et al., 1998)

Toutefois, l'anisotropie du bois et son hétérogénéité complexifient la propagation des ondes précédemment décrites. En effet, ces deux caractéristiques structurales du bois, de même que l'orientation, la microstructure de la fibre et la forme géométrique du matériau bois perturbent et influencent la direction de déplacement des particules ainsi que la direction de propagation des ondes (Wang et al., 2007a). Pour ces raisons et en se basant sur les caractéristiques intrinsèques de ces ondes, on peut déterminer les défauts du bois et aussi quelques propriétés, telles que le module d'élasticité, la masse volumique et la teneur en humidité (Wang et al., 2007a). Ainsi, il est possible d'évaluer la qualité du bois par le biais de l'application des techniques de propagation d'une onde mécanique, et ce en se basant principalement sur l'application de la théorie fondamentale de l'onde unidimensionnelle pour les matériaux homogènes et isotropes, ou encore de la théorie de l'onde tridimensionnelle (Wang et Carter, 2015).

La théorie des ondes unidimensionnelles stipule que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale induite à la suite d'un impact mécanique sur l'un des côtés d'une barre homogène et isotrope peut être mesurée en se basant sur la réponse exponentielle durant la propagation de cette onde (Ross, 2015; Wang et al., 2001). Comme le montre la figure 1.2, cette réponse exponentielle est formée d'une série d'impulsions espacées de façon égale (Δt) et dont l'onde diminue exponentiellement avec le temps (Ross, 2015; Wang et al., 2001). Cette réponse est expliquée par le fait que l'énergie stockée et produite par cette onde longitudinale qui engendre des mouvements au niveau des particules, se dissipe à chaque réflexion de l'onde lorsqu'elle atteint l'une des extrémités de la barre (Ross, 2015; Wang et al., 2001). Cela induit, par conséquent, une diminution au niveau des mouvements des particules (Ross, 2015; Wang et al., 2001).

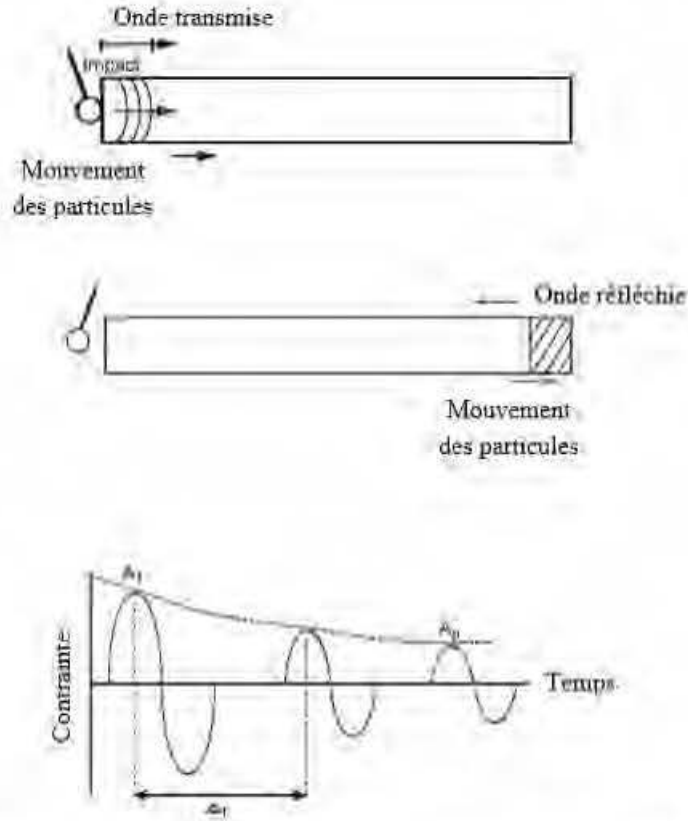


Figure 1.2: Réponse exponentielle durant la propagation d'une onde longitudinale dans une barre viscoélastique (Ross, 2015; Ross et al., 1998)

Ici, on néglige la contrainte et l'inertie dans la direction transversale de la barre. Cette omission rend la vitesse de l'onde indépendante du coefficient de Poisson du matériau. La vitesse reste constante et indépendante de l'intensité de l'impact. Ceci revient à dire qu'elle dépend principalement du temps entre les impulsions (Δt , s) et de la longueur de la barre (L , m), qui sont deux mesures constantes. Par conséquent, la vitesse (C , m/s) est exprimée en fonction du module d'élasticité dynamique de la barre (E_{dyn} , Pa) et de la masse volumique de la barre (ρ , kg/m³) selon l'équation 1.1 (Wang et Carter, 2015; Wang et al., 2007a).

$$C = \frac{2L}{\Delta t} = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho}} \quad (1.1)$$

Cependant, la théorie d'une onde unidimensionnelle est non applicable dans un milieu élastique infini et illimité. Dans ce type de milieu, on y appliquera plutôt la

théorie d'une onde tridimensionnelle, car dans ce milieu, on ne peut pas supposer que l'onde longitudinale est une onde plane. En effet, l'onde longitudinale tridimensionnelle se propage dans le milieu avec la vitesse (C , m/s), qui dépend de deux paramètres élastiques, soit le module d'élasticité (E_{dyn} , Pa) et le coefficient de Poisson (ν), mais aussi de la masse volumique (ρ , kg/m³) (Équation 1.2) (Wang et Carter, 2015).

$$C = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \frac{E_{dyn}}{\rho}} \quad (1.2)$$

Au cours des dernières décennies, d'importants travaux de recherche ont été menés pour valider la théorie à être appliquée dans le cas du bois (théorie unidimensionnelle ou tridimensionnelle). Cette tâche est complexe, car le bois est anisotrope et hétérogène. Par exemple, pour évaluer le comportement mécanique des arbres debout, l'application de la théorie de l'onde unidimensionnelle entraîne un état de contrainte non uniaxe dans la tige. Par conséquent, le coefficient de Poisson est nécessaire pour décrire la relation entre la vitesse de l'onde et le module d'élasticité (Wang et Carter, 2015; Wang et al, 2007a). Selon ces études, le coefficient de Poisson a un effet non négligeable. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont démontré que la théorie de l'onde unidimensionnelle pourrait être utilisée pour prédire avec précision le comportement mécanique du bois, comme dans le cas du bois d'œuvre et des produits à base de bois (Wang et Carter, 2015; Wang et al., 2007a). C'est dans ce contexte que, suite à l'hypothèse proposée par Jayne (1959), les propriétés de stockage d'énergie des matériaux à base de bois qui caractérisent l'élasticité et la résistance du bois sont observables sous forme de fréquence d'oscillation dans les vibrations ou de vitesse de transmission du son (Ross et Pellerin, 1994). Parmi plusieurs techniques d'END qui sont basées sur la propagation d'une onde mécanique, la technique de résonance et la technique d'ultrason sont les plus couramment utilisées pour étudier le comportement du bois.

1.2.1.1 Technique de résonance

La technique de résonance consiste à déterminer la fréquence de résonance d'un matériau vibrant. Cette fréquence de résonance est également importante dans l'évaluation de la qualité du matériau. De ce fait, il existe deux types de mouvements vibratoires : les vibrations libres, ou naturelles, basées sur le principe selon lequel des corps élastiques, comme un arbre, exécutent un mouvement vibratoire lorsqu'ils sont déplacés de la position d'équilibre par l'application de forces extérieures, comme le vent, puis relâchés, et les vibrations forcées lorsque le corps vibre sous l'influence d'une force perturbatrice périodique (Damodarasamy, 2009). Pellerin (1965) a appliqué ces deux types de vibrations au bois de construction de tailles et de catégories typiques en vue de déterminer, d'une part, s'il y avait un lien entre les paramètres de stockage et de dissipation d'énergie et les propriétés mécaniques, principalement, le module d'élasticité et le module de rupture, et d'autre part, pour démontrer laquelle de ces deux vibrations est applicable pour le matériau bois. Cette étude a également permis de développer la méthode vibratoire ainsi que l'instrument approprié pour mesurer ces paramètres de façon précise et adéquate. Pellerin (1965) a constaté que l'utilisation des vibrations forcées était plus facile à gérer expérimentalement que les vibrations libres, car les vibrations forcées permettent d'utiliser des fréquences plus élevées. Ces hautes fréquences pourraient être facilement séparées électroniquement des fréquences des bruits de fond (Pellerin, 1965).

Cependant, les méthodes basées sur les vibrations forcées ont révélé l'existence de certains problèmes, notamment au niveau de décrétement logarithmique (Pellerin, 1965). Il s'avère qu'il existe une importante marge d'erreur pour mesurer ce décrétement logarithmique, et donc pour mesurer le module d'élasticité du matériau testé. Pour cette raison, il est conseillé d'appliquer des essais de vibrations libres dans le cas du bois. Le principe consiste à déterminer la quantité d'énergie de dissipation représentant le décrétement logarithmique pour déterminer la quantité d'énergie de stockage représentant le module d'élasticité dynamique (Pellerin, 1965). En se basant sur le phénomène fondamental de résonance, une gamme de

techniques et d'équipements non destructifs basés sur le domaine des fréquences audibles a été développée. En effet, on mesure la fréquence naturelle de la vibration libre appliquée pour déterminer les différentes propriétés mécaniques du matériau étudié. Tel qu'illustré dans la figure 1.3, trois modes de vibrations libres sont possibles : la vibration longitudinale, la vibration de flexion et la vibration de torsion, lesquelles permettent de déterminer dynamiquement le module d'élasticité longitudinale, le module d'élasticité de flexion et le module de cisaillement du bois, respectivement (Bucur, 2003).

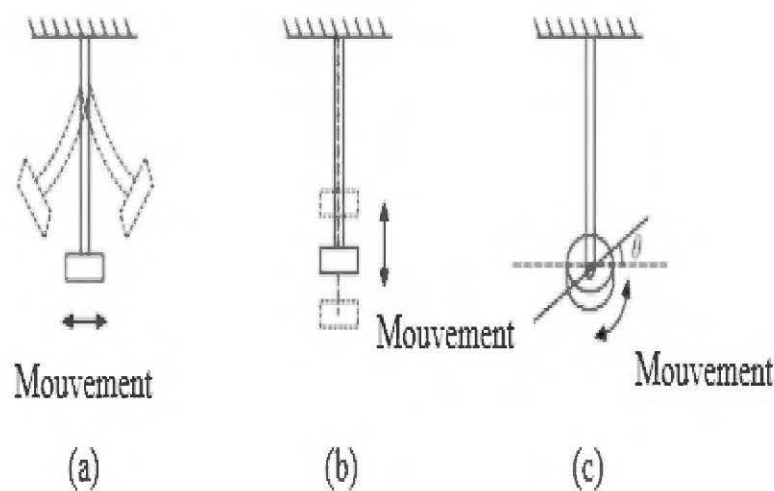


Figure 1.3: Exemple de (a) vibrations de flexion, (b) longitudinales et (c) de torsion (Damodarasamy, 2009)

Ces différentes propriétés sont déterminées en effectuant à chaque fois une analogie classique entre un corps sous une telle vibration libre et chacun de ces systèmes correspondants à la vibration appliquée (Ross, 2015; Ross et Pellerin, 1994). À titre d'exemple, le système mécanique équivalent à une vibration de flexion (vibration transversale) est représenté schématiquement dans la figure 1.4 (Ross, 2015; Ross et Pellerin, 1994).

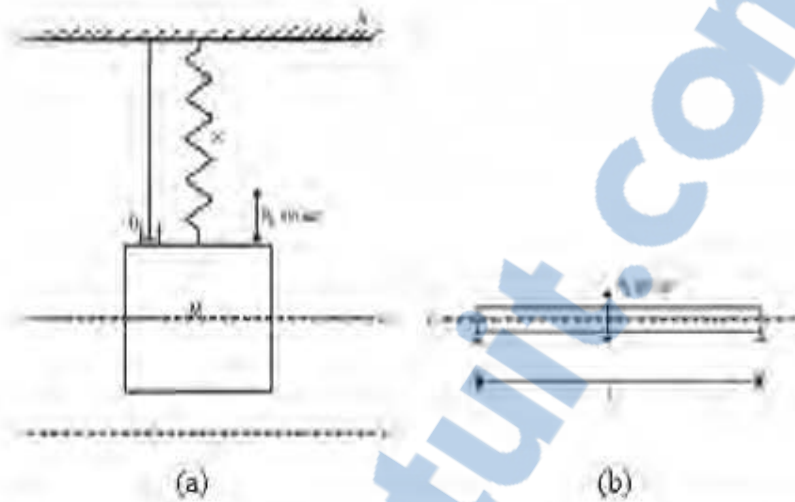


Figure 1.4: (a) Système de masse-ressort-amortisseur et (b) poutre en vibration transversale (Ross et Pellerin, 1994)

L'équation généralisée du mouvement de ce système mécanique de masse (M) relié par un ressort de constante élastique (k) et un amortisseur de coefficient d'amortissement visqueux (r) en parallèle, est égal à la fonction de forçage ($P_0 \sin \omega t$), pour le cas des vibrations forcées, ou à zéro dans le cas de vibration libre (Bouhajja, 2015; Ross et Pellerin, 1994). Cette équation s'écrit comme suit (Bouhajja, 2015; Ross et Pellerin, 1994) :

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = P_0 \sin \omega t \quad (1.3)$$

La solution de l'équation 1.3 pour la constante élastique (k) conduit à l'expression suivante pour le module dynamique d'élasticité obtenu dans le cas des vibrations libres comme pour les vibrations forcées (Bouhajja, 2015; Ross et Pellerin, 1994).

$$E_d = \frac{f_r^2 w L^3}{K^2 l g} \quad (1.4)$$

Avec :

- E_d : Le module d'élasticité dynamique, Pa ;
- f_r : La fréquence de résonance ou la fréquence naturelle, Hz ;
- W : Le poids de la poutre, kg ;
- L : La longueur de la poutre, m ;

- K : La constante dépend de la position des appuis aux extrémités de la poutre telle que K^2 est égal à 12,65 pour une poutre posée librement sur deux points nodaux et à 2,46 pour une poutre supportée à une de ses extrémités ;
- I : Le moment d'inertie est calculé en fonction de la largeur (b , m) et de l'épaisseur (h , m) de la section transversale de l'échantillon où $I = \frac{bh^3}{12}$, m^4 ;
- g : L'accélération de pesanteur, m/s^2 ;
- l : Largeur de la section transversale de l'échantillon, m ;
- h : Hauteur de la section transversale de l'échantillon, m.

En pratique, le principe de ce type de méthodes dynamiques consiste à exciter impulsionnellement les échantillons d'essai selon un certain mode de vibration, par l'utilisation d'un marteau, afin que l'équipement récupère et reprenne la vibration en question (Cossolino et Pereira, 2010; Haines et al., 1996). En utilisant un capteur piézoélectrique ou un microphone, la réponse acoustique obtenue se transforme en un signal électrique et informe l'utilisateur de la fréquence de résonance respective (Cossolino et Pereira, 2010; Haines et al., 1996). Cette fréquence a été évaluée à l'aide d'une transformation de Fourier rapide (TFR), à partir de laquelle les modules sont calculés. Tout ceci, se fait selon les conditions de positionnement imposées par l'échantillon pour effectuer un tel essai (Cossolino et Pereira, 2010; Haines et al., 1996).

1.2.1.1.1 Vibration longitudinale

La vibration longitudinale des barres de section transversale carrée ou circulaire est recommandée comme étant la méthode la plus précise pour la détermination du module d'élasticité. Pour des considérations pratiques, il est nécessaire que la pièce d'essai soit toujours prise en charge au niveau des nœuds, là où l'amplitude de vibration est nulle, permettant ainsi de provoquer une vibration fondamentale à l'un des anti-nœuds, là où l'amplitude de vibration est maximale (Figure 1.5) (Cossolino et Pereira, 2010).

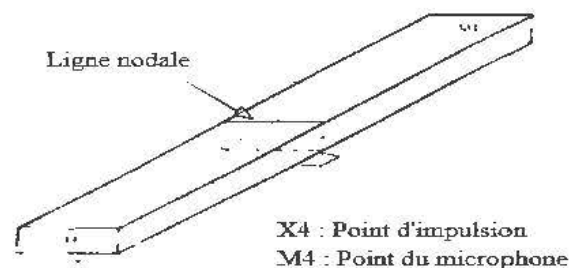


Figure 1.5: Illustration du mode de vibration longitudinale d'une barre rectangulaire (Otani et al., 2015)

En se basant sur la fréquence de résonance trouvée, le module d'élasticité est déterminé selon l'équation suivante (Haines et al., 1996; Kharraz, 2016)

$$E_L = \rho V^2 = 4 \rho f_l^2 L^2 \quad (1.5)$$

Avec :

- E_L : Le module élastique dynamique par vibration longitudinale, Pa ;
- ρ : La masse volumique, kg/m^3 ;
- f_l : La fréquence de résonance correspondant aux vibrations longitudinales, Hz ;
- L : La longueur totale de la barre, m ;
- V : La vitesse de l'onde de contrainte, m/s.

Cependant, si la section s'écarte trop de la géométrie carrée, l'erreur dans le calcul des propriétés élastiques peut être importante. Dans ce cas, l'utilisation de vibrations longitudinales n'est pas recommandée et le module d'élasticité peut être obtenu plus précisément par les vibrations flexionnelles (Cossolino et Pereira, 2010).

1.2.1.1.2 Vibration de flexion

Contrairement à la vibration longitudinale, il existe un certain nombre de nœuds et d'anti-nœuds sur une barre librement supportée en appliquant le mode de vibration de flexion, comme le montre la figure 1.6 (Cossolino et Pereira, 2010).

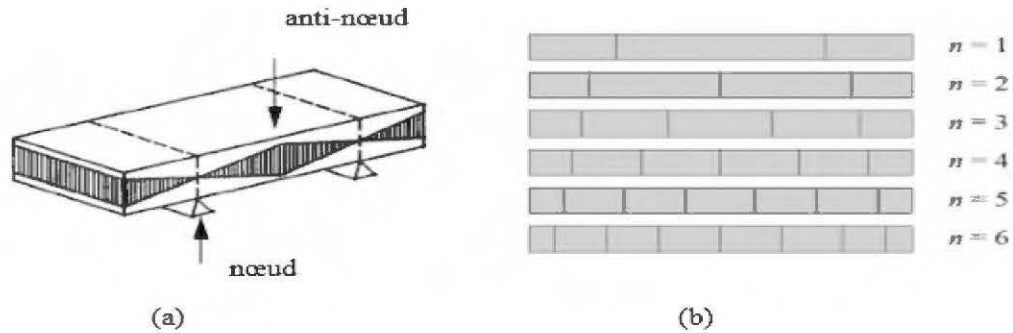


Figure 1.6: (a) Illustration de mode de vibration de flexion d'une barre rectangulaire (Roebben et al., 1997) et (b) lignes nodales possibles pour réaliser le mode de vibration de flexion (Cossolino et Pereira, 2010)

Il est vrai que cette technique de résonance de flexion est capable de déterminer simultanément le module d'élasticité ainsi que le module de cisaillement. La mesure simultanée de ces propriétés se base principalement sur la détermination d'une fréquence fondamentale ($n=1$) et l'une des fréquences harmoniques ($n \neq 1$) du matériau étudié (Divos et al., 1998). Dans ce cas d'application, il est nécessaire d'identifier correctement laquelle des fréquences harmoniques sera utilisée (Divos et al., 1998). De façon générale, on utilise cette technique (la vibration de flexion) pour mesurer le module d'élasticité, qui consiste à appliquer le premier mode fondamental de vibration de flexion ($n=1$) en utilisant l'équation 1.6 (ASTM, 2001).

$$E_f = 0.9465 \frac{m f_f^2 L^3}{b t^3} T_1 \quad (1.6)$$

Avec :

- E_f : Le module élastique dynamique par vibration de flexion, Pa ;
- f_f : La fréquence de résonance correspondant aux vibrations de flexion, Hz ;
- m : La masse de la barre, kg ;
- L : La longueur totale de la barre, m ;
- b : La largeur de la barre, m ;
- t : L'épaisseur de la barre, m ;
- T_1 : Le facteur de correction pour le mode de flexion.

1.2.1.1.3 Vibration de torsion

En se basant sur le même principe que les autres vibrations, ce mode de vibration de torsion est appliqué comme l'indique la figure 1.7.

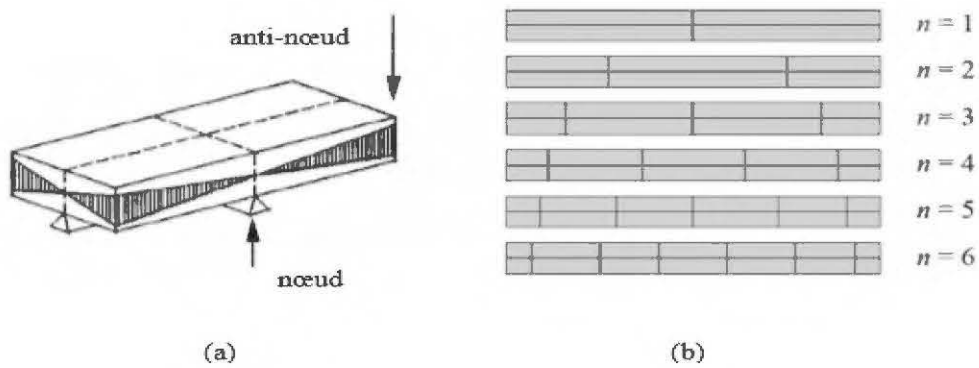


Figure 1.7: (a) Illustration de mode de vibration de torsion d'une barre rectangulaire (Roebben et al., 1997) et (b) lignes nodales possibles pour réaliser le mode de vibration de torsion (Cossolino et Pereira, 2010)

Cette résonance de torsion permet de mesurer le module du cisaillement d'un échantillon selon l'équation suivante (ASTM 2001).

$$G_t = \frac{4Lm f_t^2}{bt} \frac{B}{1 + A} \quad (1.7)$$

Avec

- G_t : Le module de rigidité dynamique ou le module de Coulomb, Pa ;
- f_t : La fréquence de résonance correspondant aux vibrations de torsion, Hz ;
- m : La masse de la barre, kg ;
- L : La longueur totale de la barre, m ;
- b : La largeur de la barre, m ;
- t : L'épaisseur de la barre, m ;
- B, A : Deux facteurs de correction pour le mode de torsion dépendent de l'épaisseur et de la largeur de la barre.

Ce test de vibration permet d'obtenir le module de cisaillement d'un matériau isotrope. Cependant, dans le cas du bois, plusieurs chercheurs ont démontré que la

résonance de torsion permet réellement de mettre en lumière la caractérisation d'un module effectif de torsion (G_{eff}) (Otani et al., 2015; Roohnia et Kohantorabi, 2015). Ce module effectif de torsion (G_{eff}) est en fonction de deux modules de cisaillement orthotropes (exemple G_{LR} et G_{LT}), tel qu'exprimé par l'équation 1.8 (Otani et al., 2015; Roohnia et Kohantorabi, 2015).

$$G_{eff} = \frac{2G_{LR}G_{LT}}{G_{LR} + G_{LT}} \quad (1.8)$$

En général, on constate que cette méthode de résonance (appelée aussi la technique d'excitation impulsionnelle) est actuellement reconnue comme l'une des méthodes non destructrices les plus utilisées pour la caractérisation du comportement élastique d'un matériau. Cependant, cette méthode dépend principalement de la nature du matériau testé, particulièrement sa symétrie matérielle, soit si c'est un matériau isotrope, un matériau transversalement isotrope, un matériau orthotrope ou bien un matériau stratifié (Tableau 1.2) (Otani et al., 2014a).

Tableau 1.2 : Propriétés élastiques mesurables par la technique de résonance selon la symétrie matérielle du matériau testé et ses orientations, adaptées par Otani *et al.*, (2014a)

Symétrie matérielle du matériau testé	Propriétés élastiques du matériau testé	Propriétés élastiques mesurables par la technique de résonance	Orientation du matériau testé
Isotrope	E, G, ν	E, G, ν	1, 2, 3
Transversalement isotrope	E_1, E_2	$E_1, G_{12} = G_{13}$	1
	$G_{12}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{23}$	$E_2, G_{ef}(G_{12}, G_{23})$	2, 3
Orthotrope	$E_1, E_2, E_3,$	$E_1, G_{ef}(G_{12}, G_{13})$	1
	G_{12}, G_{13}, G_{23}	$E_2, G_{ef}(G_{12}, G_{23})$	2
	$\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}, \nu_{32}$	$E_3, G_{ef}(G_{13}, G_{23})$	3
Stratifié	$E_1, E_2, G_{12},$	E_1, G_{12}	1
	ν_{12}, ν_{21}	E_2, G_{12}	2

1.2.1.2 Technique d'ultrason

L'onde ultrasonique est une onde mécanique avec une fréquence ultrasonique entre 20 kHz et 100 kHz (Brancheriau, 2013). Initialement, l'utilisation des techniques d'ultrason ne se pratiquait que sur les matériaux isotropes et homogènes. Toutefois, plusieurs avantages sont offerts par ce type de techniques, comparativement aux autres techniques END, principalement leur grande précision et leur rapidité. Ces avantages rendent ce type de méthodes END parmi les plus utilisées, non seulement pour les matériaux isotropes, mais aussi pour d'autres matériaux comme les matériaux anisotropes, orthotropes, etc. (Beall, 2002; Bouhajja, 2015). Dans ce contexte, les méthodes d'ultrason ont reçu une attention considérable par les chercheurs en génie du bois. Ces méthodes d'ultrason ont été utilisées dans de nombreuses applications, depuis l'évaluation de la qualité des arbres dans les forêts jusqu'à l'évaluation des structures en bois en service (De Oliveira et Sales, 2006). Parmi les applications les plus importantes, on cite la détermination de la qualité du bois dans les bâtiments historiques et aussi le classement du bois dans les scieries afin d'assurer une résistance appropriée du bois classé pour un usage structurel spécifique (Yaitskova et Van de Kuilen, 2014).

Mise à part la nature structurale du bois, l'une des choses les plus importantes à considérer dès le début d'un diagnostic ultrasonique, particulièrement au niveau du choix d'un outil ultrasonique convenable, est de pouvoir obtenir une bonne résolution, ce qui rend complexe l'utilisation de l'ultrason pour le bois. Cette résolution dépend principalement de la fréquence de transducteur utilisée. En effet, le phénomène de propagation des ondes d'ultrason devient plus évident à des fréquences plus élevées (Bucur, 2006; Senalik et al., 2014). Néanmoins, étant donné que l'atténuation des matériaux augmente exponentiellement avec la fréquence et, plus spécifiquement, étant donné que l'atténuation des matériaux à base de bois est très élevée (il est d'environ un ordre de grandeur supérieur aux matériaux géologiques et de deux ordres de grandeur supérieurs aux métaux), la perte d'énergie des ondes devient importante au fur et à mesure de l'augmentation de l'atténuation (Beall, 2002; Senalik et al., 2014). C'est pour cette raison qu'il faut

atteindre un équilibre entre l'obtention de la meilleure résolution possible et le maintien d'un niveau observable d'énergie du signal. Pour cela, des transducteurs de fréquence 100 à 200 kHz peuvent être utilisés pour les matériaux à base de bois (Beall, 2002; Senalik et al., 2014).

Par ailleurs, il existe deux types de méthodes d'ultrason : i) la méthode d'ultrason sans contact, qui se base sur la transmission d'ultrasons à travers l'air sans besoin d'un milieu de couplage comme le gel ou l'eau, mais utilisant plutôt le milieu entourant l'éprouvette comme agent de couplage (Senalik et al., 2014; Vun et al., 2006). Depuis les quarante dernières années, cette méthode est considérée comme étant la méthode optimale pour certaines applications dans l'industrie du bois (Ensminger et Bond, 2011; Green, 2004). Ce mode sans contact a également été utilisé pour des applications plus exotiques, comme par exemple, la détection de défauts dans les œuvres d'art historiques peintes sur des panneaux de bois et aussi la surveillance continue au cours de traitements, c.-à-d. la méthode laser-ultrason considérée parmi les méthodes les plus développées (Ensminger et Bond, 2011; Vun et al., 2006; Zani, 2001).

ii) Le deuxième mode est la méthode d'ultrason avec contact par laquelle la transmission d'ultrason se fait en contact avec l'échantillon testé. Ce contact nécessaire entre l'échantillon et le transducteur est fait en utilisant un agent de couplage adéquat qui ne corrompt pas l'état de l'échantillon. Il existe plusieurs agents de couplage, tels que la vaseline, les gels de glycérine et la graisse (Senalik et al., 2014). Le choix entre ces différents agents dépend de plusieurs facteurs, y compris les transducteurs utilisés et le matériau testé (Senalik et al., 2014). En effet, l'utilisation de l'agent de couplage réduit la perte du signal et facilite principalement la pénétration des ondes ultrasoniques dans le bois, surtout celles des ondes transversales. Ainsi, il est nécessaire d'exercer une pression constante entre les transducteurs et l'échantillon, ceci afin d'éviter la production d'énergie supplémentaire (Bucur, 2006; Senalik et al., 2014). Toutefois, la porosité et la rugosité de la surface du bois peuvent réduire cette zone de contact et également entraîner une pénétration de l'agent de couplage à l'intérieur du bois (Beall, 2002).

Malgré cela, la majorité des techniques d'ultrason du bois appliquent ce deuxième mode. Comparée au deuxième mode d'ultrason (avec contact), la limitation du premier mode d'ultrason (sans contact) revient au fait qu'une fréquence généralement très élevée des transducteurs est nécessaire d'une part, et d'autre part la taille de l'épaisseur doit être contrôlée. En effet, plus l'épaisseur contrôlée est élevée plus les ondes parasites, comme les ondes diffractées par l'air et par le support de transducteur, deviennent plus grandes que le signal transmis (Martin et al. 2012). Par conséquent, ceci rend l'acquisition du signal et son analyse très complexe (Martin et al., 2012). Ainsi, la méthode d'ultrason avec contact consiste principalement à mesurer le temps de propagation d'une onde ultrasonique dans un échantillon, ce qui permet de fournir des informations précieuses, surtout pour l'inspection et l'évaluation de comportement mécanique de matériau (Bucur, 2006).

1.2.1.2.1 Inspection par ultrason

1.2.1.2.1.1 *Technique impulsion-écho*

La méthode de l'impulsion-écho consiste à utiliser un seul transducteur jouant le rôle à la fois d'émetteur et de récepteur d'impulsions, telle qu'illustré dans la figure 1.8 (Tanasoiu et al., 2002). Le signal réfléchi est capté par le récepteur puis il est affiché sur l'écran de l'oscilloscope à partir duquel un traitement sophistiqué du signal donnera des informations sur la présence, l'emplacement, la taille et les autres caractéristiques du défaut. Ce défaut est généralement identifié lorsqu'on obtient un écho avec un temps de vol d'onde plus court que l'écho le plus fort au fond de l'échantillon testé avec une longue durée de vol (Bucur, 2010). L'utilisation d'un seul transducteur d'ultrason est avantageuse dans le cas de matériaux à base de bois, car un seul côté de l'échantillon doit être accessible pour l'inspection de ces matériaux (ex. le cas des panneaux) (Bucur, 2010; Hasenstab et al., 2005). Cependant, l'utilisation d'un seul transducteur d'ultrason présente également des inconvénients. Ce type de transducteur doit fournir une énergie suffisante dans l'échantillon pour avoir un signal réfléchi observable et mesurable. Ainsi, il devrait générer des impulsions de haute fréquence (Bucur, 2010). Pour cette raison, cette

technique présente certaines limites pour les matériaux ayant un coefficient d'atténuation ultrasonore très élevé tel que le bois (Bucur, 2006; Senalik et al., 2014).

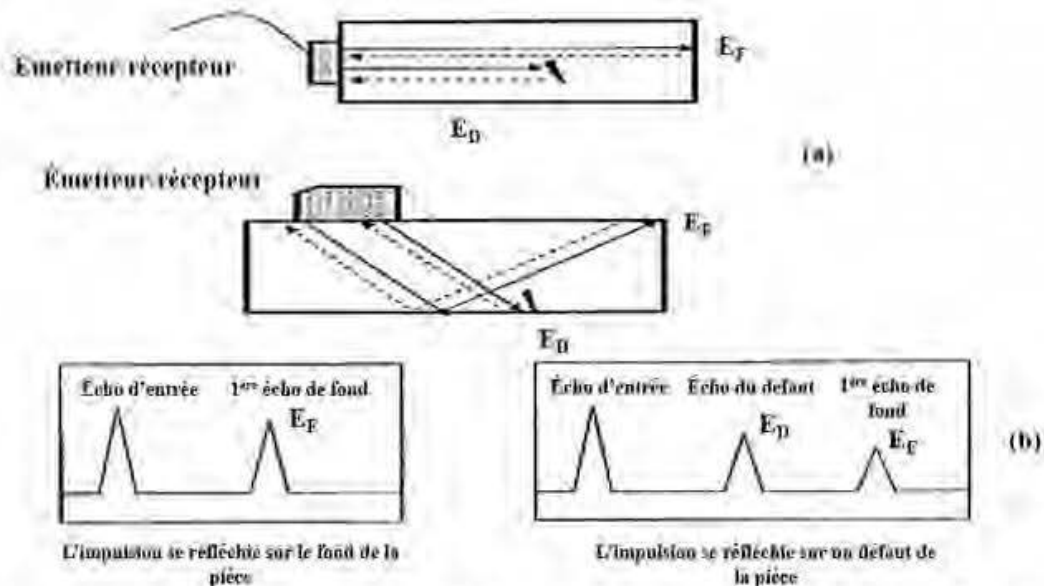


Figure 1.8: Technique impulsion-écho (a) en utilisant un seul transducteur en contact avec l'échantillon testé et (b) illustration de l'écho reçu dans une zone avec ou sans défaut (Maillou, 2013)

1.2.1.2.1.2 Technique par transmission

Contrairement à la technique écho-impulsion, la technique par transmission consiste à utiliser deux transducteurs, se basant généralement sur l'effet piézoélectrique : l'un joue le rôle d'émetteur et l'autre celui de récepteur. Comme le montre la figure 1.9, il existe deux alternatives de configuration de cette technique par transmission, dépendamment de l'emplacement de ces deux transducteurs. Si l'émetteur et le récepteur sont mis sur la même surface de l'échantillon, le principe de la détection des défauts est comparable à celle de la technique écho-impulsion (Bucur, 2010). Donc, le défaut est représenté par un signal d'amplitude plus faible (Bucur, 2010). Dans ce cas, ce type de détection est plus sensible aux défauts parallèles à la surface. En effet, la réflexion de l'onde ne sera pas détectable par le transducteur récepteur, alors qu'il est capable de détecter

les défauts perpendiculaires à la surface (Bucur, 2010; Ross, 2015). Dans le cas du bois, ce type d'inspection est plus utilisé pour évaluer la qualité de la surface de l'échantillon, car on n'a pas besoin d'une grande puissance d'impulsion (Bucur, 2010; Ross, 2015). En effet, les distances parcourues par les ondes dans le cas de la technique par transmission sont souvent moins importantes par rapport à la technique écho-impulsion (Bucur, 2010; Ross, 2015). Toutefois, il est possible d'observer des signaux parasites, dus à la présence des ondes de surface au cours de l'inspection (Bucur, 2010).

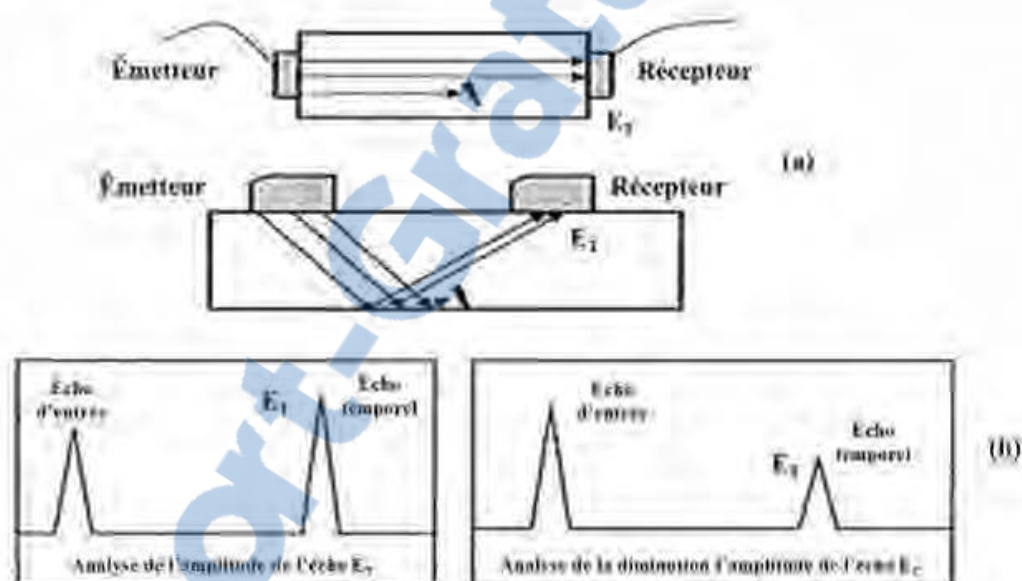


Figure 1.9: Technique par transmission ; (a) en mettant les transducteurs face à face ou bien sur la même surface de l'échantillon testé et (b) illustration de l'écho reçu dans une zone avec ou sans défaut (Maillou, 2013)

Lorsque l'émetteur et le récepteur sont placés l'un en face de l'autre, la fréquence des transducteurs est plus faible que dans les autres techniques, car les ondes n'ont besoin de se propager à travers l'échantillon qu'une seule fois. Cette technique diminue aussi le risque d'usure de la surface du récepteur vu qu'il n'est pas en mouvement (Bucur, 2010; Ross, 2015). Néanmoins, ce type de transmission n'est pas efficace pour détecter les caractéristiques des défauts (par exemple sa profondeur). Les défauts sont détectés quand leur présence bloque l'onde d'aller au récepteur (Ross, 2015). Dans d'autres domaines d'application tels que des

applications en imagerie structurale et en évaluation des caractéristiques mécaniques, la technique par transmission est avantageuse comparativement aux autres techniques (ex. la technique impulsion-écho) et celle est la plus utilisée pour l'évaluation des matériaux à base de bois (Ross, 2015).

1.2.1.2.1.3 Imagerie ultrasonore

L'imagerie interne d'un matériau suscite un grand intérêt auprès des scientifiques et industriels, car elle permet de caractériser différentes propriétés du matériau (ex. évaluation locale de module d'élasticité d'un tronc d'arbre). Cet intérêt a permis de développer et d'améliorer une vaste gamme d'appareils et d'équipements commerciaux de haute technologie sur le marché (Reis, 2017). Principalement, on s'intéresse à la tomographie ultrasonique, la technique la plus utilisée dans le domaine des produits du bois et des applications sur le terrain, comme les poteaux de bois destinés à la distribution de l'énergie électrique ou les ailes d'avions etc. (Giammei et al., 2008; Reis, 2017; Tomikawa et al., 1986). Les images de la tomographie par ultrasons permettent de fournir des informations importantes pour l'évaluation des risques liés aux arbres, notamment la détection des défauts internes de l'arbre (Giammei et al., 2008; Reis, 2017; Tomikawa et al., 1986).

Par ailleurs, la tomographie ultrasonique se base sur le même principe que la tomographie acoustique en faisant tout simplement pénétrer une onde ultrasonique dans l'arbre (Reis, 2017). En effet, le principe de la tomographie acoustique consiste à utiliser plusieurs capteurs montés sur le tronc de l'arbre, tout en introduisant une onde de contrainte à chaque fois (Figure 1.10). L'un des capteurs joue le rôle d'émetteur et les autres sont les récepteurs, avec un temps de propagation mesuré entre l'émetteur et tous les autres récepteurs (Bucur, 2005; Dackermann et al., 2014; Kawamoto et Williams, 2002). À la fin du procédé et en se basant sur le maillage de mesure créé par les différents cheminements des ondes, on obtient des itinéraires de mesure dont la quantité dépend du nombre de capteurs utilisés. Les variations de vitesse sont associées à des couleurs, afin de faciliter la

visualisation de l'image qui est construite avec le logiciel d'interpolation (Reis, 2017).

La tomographie acoustique est considérée comme étant plus ou moins sophistiquée puisqu'elle permet seulement de déterminer l'existence de défauts ou non, sa plus grande limitation étant l'interprétation de l'image produite. Mais, l'un des plus importants avantages de la tomographie ultrasonique est que son imagerie permet de qualifier et de quantifier les défauts (Reis, 2017). On peut donc différencier les types et les niveaux de détérioration et connaître le type de défaut (détérioration par champignons, creux, nœuds, etc.). De même, la qualité de l'image obtenue est liée principalement à la puissance de l'équipement et aussi à la qualité des données obtenues sur le terrain (Reis, 2017). Dépendamment de l'équipement utilisé, on peut alors obtenir des images 2D et même des images 3D permettant de visualiser la totalité de la structure interne des arbres debout (Bucur, 2005).

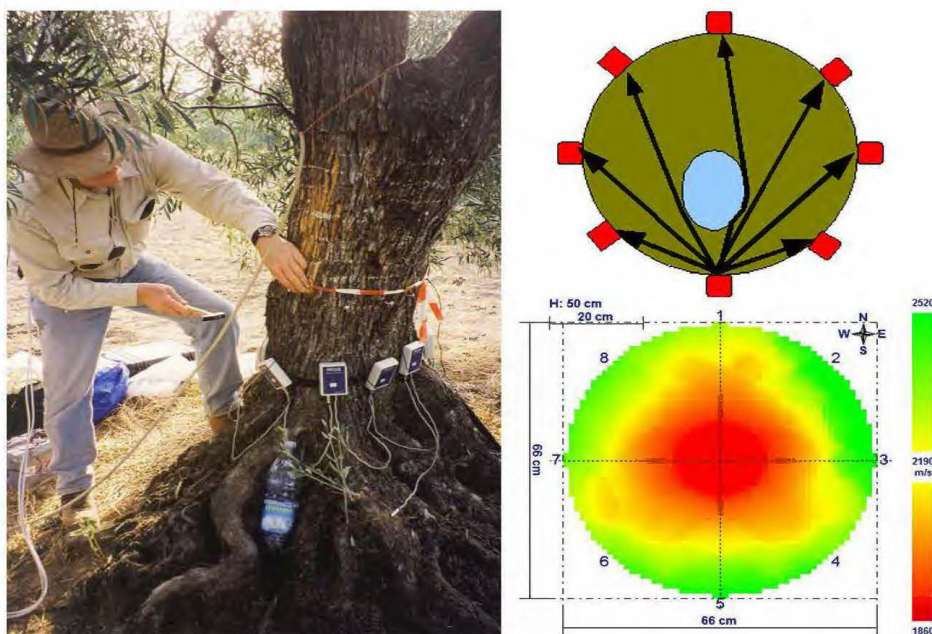


Figure 1.10: Exemple d'un test de diagnostic d'un tronc d'arbre en utilisant la tomographie acoustique (Cermák et al., 2015)

1.2.1.2.2 Évaluation des propriétés mécaniques par ultrason

Jusqu'à présent, la méthode d'ultrason par transmission, où l'émetteur et le récepteur sont placés l'un en face de l'autre, est considérée comme la meilleure méthode END, permettant l'évaluation dynamique de toutes les propriétés mécaniques d'un matériau (Figure 1.11) (Dahmen et al., 2010).

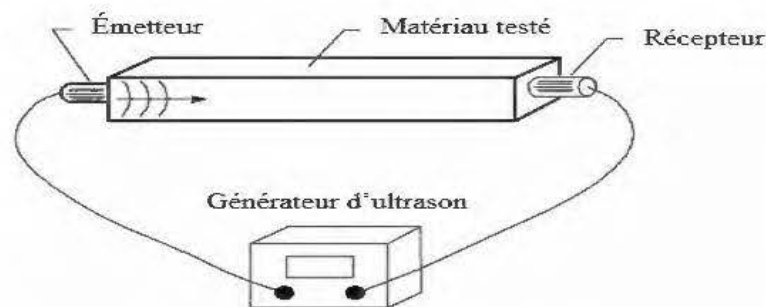


Figure 1.11: Dispositif de mesure du temps de propagation d'une onde ultrasonore dans un matériau (Wang et al., 2004)

Cette méthode a été principalement mise au point pour décrire le comportement élastique d'un matériau isotrope. Par la suite, elle fut adaptée pour d'autres matériaux en se basant sur la détermination de la vitesse de propagation (V_u , m/s) qui est calculée à partir de la longueur de l'échantillon (L , m) et du temps de propagation d'une onde ultrasonique (t , s) mesuré à l'aide d'un générateur d'ultrason selon l'équation 1.9 (Bucur et Archer, 1984; Bucur et Feeney, 1992; Kharrat, 2016).

$$V_u = \frac{L}{t} \quad (1.9)$$

Le choix de la théorie appliquée dépend de la nature de l'échantillon et de sa géométrie, particulièrement dans le cas des solides viscoélastiques orthotropes (Elsener, 2014). Dans ce contexte, Bucur (1983) était parmi les premiers chercheurs à utiliser cette méthode pour le bois. Par la suite, plusieurs autres chercheurs ont constaté que la théorie des ondes unidimensionnelles est appropriée pour décrire le comportement mécanique du bois afin de faciliter les calculs (Bucur et Feeney, 1992; Dackermann et al., 2016; Feio, 2006; Sandoz et al., 2000). Cette théorie

néglige l'influence du coefficient de Poisson pour calculer les propriétés mécaniques de bois. Elle se réfère principalement aux relations entre le module d'élasticité et la vitesse mesurée d'une onde ultrasonique longitudinale, celles entre le module du cisaillement et la vitesse mesurée d'une onde ultrasonique transversale et celles entre le coefficient de Poisson et ces deux vitesses mesurées (longitudinale et transversale), en appliquant respectivement les équations 1.10, 1.11 et 1.12 (Bucur, 1983; Elsener, 2014; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et al., 2016a).

$$E_i = \rho V_i^2 \quad \text{avec } i = L, R, T \quad (1.10)$$

$$G_{ij} = \rho \left(\frac{V_{ij} + V_{ji}}{2} \right)^2 \quad \text{avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (1.11)$$

$$\nu_{ij} = \frac{V_i^2 - 2V_{ij}^2}{2(V_i^2 - V_{ij}^2)} \quad \text{avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (1.12)$$

Avec :

- E_i : Le module d'élasticité dynamique, MPa ;
- G_{ij} : Le module du cisaillement dynamique, MPa ;
- ρ : La masse volumique du bois, kg/m³ ;
- V_i : La vitesse de propagation d'une onde longitudinale, m/s ;
- V_{ij} : La vitesse de propagation d'une onde transversale, m/s.

Considérant les erreurs de mesure des coefficients de Poisson du bois en appliquant la théorie des ondes unidimensionnelles adaptée pour les matériaux isotropes, d'autres chercheurs ont choisi d'appliquer la théorie des ondes unidimensionnelles faite pour les matériaux orthotropes (Bucur et Archer, 1984 ; Dackermann et al., 2016 ; Güntekin et Aydın, 2016b). La théorie orthotropique se base principalement sur les valeurs des vitesses des ondes d'ultrason longitudinales et transversales pour pouvoir déduire les coefficients de Poisson du bois. Cette théorie, un peu complexe, consiste à appliquer la stratégie suivante où il est important d'exprimer chaque terme de la matrice de souplesse en fonction des différents termes de la matrice de rigidité (Bucur et Archer, 1984; Güntekin et Aydın, 2016b).

- Matrice de rigidité C_{ij} :

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$C_{ii} = \rho V_{ii}^2 \quad (1.14)$$

$$C_{12} = \sqrt{(C_{11} + C_{66} - 2\rho \cdot (V_{12})^2) \cdot (C_{66} - C_{22} - 2\rho \cdot (V_{12})^2)} - C_{66} \quad (1.15)$$

$$C_{13} = \sqrt{(C_{11} + C_{55} - 2\rho \cdot (V_{13})^2) \cdot (C_{55} - C_{33} - 2\rho \cdot (V_{13})^2)} - C_{55} \quad (1.16)$$

$$C_{23} = \sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho \cdot (V_{23})^2) \cdot (C_{44} - C_{33} - 2\rho \cdot (V_{23})^2)} - C_{44} \quad (1.17)$$

Avec

- V_{ii} correspond à la vitesse de propagation d'une onde longitudinale et d'une onde transversale ;
- V_{ij} correspond à la vitesse de propagation d'une onde transversale à un angle de 45° .

- Les termes de la matrice de souplesse S_{ij} sont :

$$S_{11} = \frac{C_{22}C_{33} - (C_{23})^2}{\Delta C} = \frac{1}{E_{11}} ; S_{44} = \frac{1}{C_{44}} = \frac{1}{G_{44}} ; S_{12} = \frac{C_{23}C_{31} - C_{33}C_{21}}{\Delta C} \quad (1.18)$$

$$S_{22} = \frac{C_{33}C_{11} - (C_{13})^2}{\Delta C} = \frac{1}{E_{22}} ; S_{55} = \frac{1}{C_{55}} = \frac{1}{G_{55}} ; S_{13} = \frac{C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31}}{\Delta C} \quad (1.19)$$

$$S_{33} = \frac{C_{11}C_{22} - (C_{12})^2}{\Delta C} = \frac{1}{E_{33}} ; S_{66} = \frac{1}{C_{66}} = \frac{1}{G_{66}} ; S_{23} = \frac{C_{13}C_{21} - C_{11}C_{23}}{\Delta C} \quad (1.20)$$

$$\Delta C = C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{12}C_{23}C_{31} - (C_{12})^2C_{33} - (C_{13})^2C_{22} - (C_{23})^2C_{11} \quad (1.21)$$

- Les coefficients de Poisson sont calculés comme suit :

$$\nu_{21} = -\frac{S_{21}}{S_{22}} ; \nu_{31} = -\frac{S_{31}}{S_{33}} ; \nu_{32} = -\frac{S_{32}}{S_{33}} \quad (1.22)$$

$$\nu_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}} ; \nu_{13} = -\frac{S_{13}}{S_{11}} ; \nu_{23} = -\frac{S_{23}}{S_{22}} \quad (1.23)$$

Pour vérifier la théorie la plus fiable pour déterminer les coefficients de Poisson du bois, une comparaison doit être faite avec les coefficients de Poisson obtenus à partir des essais mécaniques statiques directs (Dackermann et al., 2016).

L'exactitude et la précision des calculs de coefficients de Poisson par les méthodes END sont toutefois toujours remis en question. Plusieurs études en cours s'intéressent au développement de nouvelles approches pour calculer les coefficients de Poisson du bois (Bucur, 2006; Dackermann et al., 2016; Wang et al., 2017). Les travaux de Kohlhauser et Hellmich (2012) ont permis la mise en évidence d'une nouvelle approche pour déterminer les coefficients de Poisson de différents matériaux, y compris l'aluminium (isotrope), les composites en fibre de silice avec une matrice en aluminium (isotrope transverse), et l'acier inoxydable soudé au métal (orthotrope). Cette nouvelle approche consiste à combiner deux méthodes telles la méthode ultrasonore et un essai mécanique statique uniaxial. L'utilité de cette combinaison a été confirmée dans le cas du bois en dérivant les équations correspondantes au calcul des différents coefficients de Poisson.

1.2.2 Propagation des ondes électromagnétiques dans le bois

Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques sont capables de se propager aussi dans le vide. Généralement, dans le cas des matériaux à base de bois, l'une des plus importantes différences entre ces deux types d'ondes est que les ondes mécaniques sont sensibles à la rigidité du bois, alors que les ondes électromagnétiques dépendent de sa teneur en humidité (Schickert et Bonitz, 2016). Pour cette raison, il est rare d'utiliser les techniques des ondes électromagnétiques pour l'évaluation du comportement mécanique du bois. Par contre, il existe plusieurs techniques qui se basent sur ce type d'ondes (les ondes électromagnétiques) et qui sont toujours en développement. Ces techniques offrent des avantages intéressants aux chercheurs forestiers (Tableau 1.1). Elles permettent de déterminer d'autres propriétés du bois comme les propriétés diélectriques, et aussi d'évaluer la structure interne du bois, incluant les arbres debout (Elloumi, 2016; James et al., 1985; Wang et al., 2016).

Dans ce contexte, parmi ces méthodes d'END du bois les plus utilisées, on retrouve l'application d'une technique de micro-ondes, la technique de thermographie par infrarouge, l'application des rayons X, le rayonnement laser et aussi les techniques térahertz (THz). Les techniques térahertz (THz) sont principalement destinées au domaine de construction du bois, bien que les chercheurs du bois ne sont pas encore sûrs d'appliquer la méthode THz directement sur la structure du bois en raison de l'effet de leur forte absorption par l'eau (Garbacz, 2016; Kirouac-Turmel, 2017). Chacune de ces méthodes d'ondes électromagnétiques se distinguent au niveau du domaine de fréquence dans lequel elles se situent et permet de déterminer différentes propriétés spécifiques du bois (Tableau 1.1) (Bucur, 2013). Par exemple, une des méthodes les plus développées et couramment utilisées dans l'industrie forestière est la méthode de balayage laser à haute résolution (Figure 1.12). Cette méthode permet la détection automatisée des défauts au niveau de plusieurs produits du bois comme les bûches, le bois d'œuvre, des panneaux, etc. Ce balayage est considéré alors comme une solution économique potentielle, car elle permet d'optimiser le processus de sciage, d'augmenter la production à valeur ajoutée, et par conséquent d'augmenter les chiffres d'affaires (Ross, 2015).

Dans certains cas, il est difficile d'interpréter correctement une telle imagerie ou une telle mesure obtenue par ces méthodes d'END, en particulier les matériaux hétérogènes comme le bois. Par conséquent, et afin d'améliorer les méthodes d'END du bois, surtout au niveau de la résolution des images obtenues avec l'équipement utilisé, plusieurs chercheurs recommandent les combinaisons de différentes techniques, que ce soit les techniques des ondes électromagnétiques ou encore les techniques des ondes électromagnétiques et celles des ondes mécaniques (Gallet et al., 2010; Schickert et Bonitz, 2016; Wang et al., 2017). À titre d'exemple, l'imagerie transmission-tomographie combine des ondes ultrasonores et les micro-ondes pour déterminer simultanément les propriétés élastiques ainsi que les propriétés diélectriques d'un tronc du bois (Schickert et Bonitz, 2016).

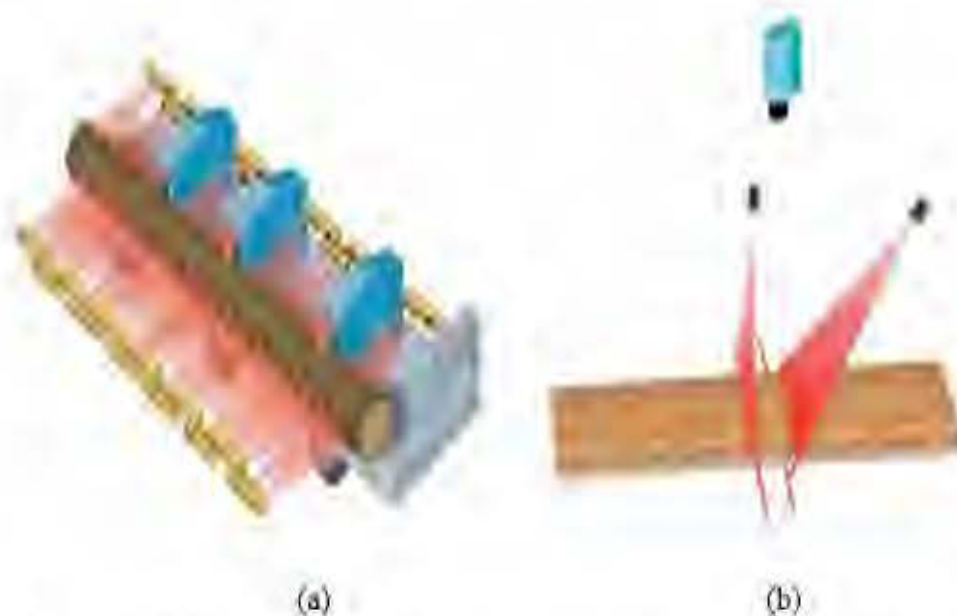


Figure 1.12: Exemple d'une configuration typique pour un balayage laser (a) d'une bille et (b) d'un bois d'œuvre (Ross, 2015)

1.3 Relations entre les propriétés mécaniques statiques et dynamiques du bois

1.3.1 Généralités sur les propriétés mécaniques du bois

Le bois est généralement connu comme étant un matériau orthotrope caractérisé par la matrice d'Hooke généralisée S_{ijkl} . Cette constatation découle du fait que les trois plans de symétrie du bois [le plan longitudinal radial (LR), le plan radial tangentiel (RT) et le plan longitudinal- tangentiel (LT)] sont mutuellement orthogonaux (Figure 1.13) (Ross, 2010). Chacun de ces trois plans est défini par deux directions principales, telles que la direction longitudinale (L) le long des fibres du bois, la direction radiale (R) aux rayons ligneux du bois et la direction tangentielle (T) aux cernes de croissance (Green et al., 1999; Morais et al., 2001; Navi et Heger, 2005; Ross, 2010). Cependant, la complexité structurale de ce matériau, qui varie en fonction du type du bois (feuillus et résineux) et de l'essence, est mise en évidence. Suite à cette complexité, un facteur d'anisotropie de l'essence étudiée calculé par d'autres chercheurs permet de dire avec exactitude si le bois étudié est un matériau orthotrope (matériau dont les propriétés ne varient qu'avec trois directions perpendiculaires, présente trois plans orthogonaux de symétrie élastique et est

caractérisé par 9 constantes élastiques indépendantes) ou bien anisotrope (matériau dont les propriétés varient en fonction de la direction, ne présente pas de symétrie élastique et caractérisé par 21 constantes élastiques indépendantes) (Gornet, 2008 ; Katz et al., 2008). À titre d'exemple, le calcul de ce facteur dans le cas de l'essence balsa révèle que ce bois est un matériau anisotrope (Katz et al., 2008).

$$[S_{ijkl}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \end{bmatrix}$$

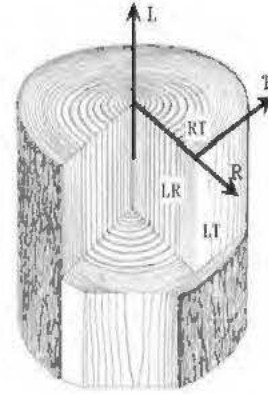


Figure 1.13: Directions principales du bois: longitudinale (L) radiale (R) tangentielle (T), et ses trois plans de symétrie : longitudinal-radial (LR), longitudinal- tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT) (Moutee, 2006)

Le comportement mécanique d'un matériau orthotrope se caractérise par douze constantes élastiques (propriétés mécaniques), dont neuf constantes indépendantes. Ces douze constantes élastiques se définissent par les trois modules d'élasticité (E_L , E_R et E_T), les trois modules de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}) et les six coefficients de Poisson (ν_{TL} , ν_{TR} , ν_{LT} , ν_{LR} , ν_{RT} et ν_{RL}), avec une relation entre les modules d'élasticité et les coefficients de Poisson qui est exprimée par l'équation 1.24 (Green et al., 1999; Najafi et al., 2005; Navi et Heger, 2005; Ross, 2010).

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (1.24)$$

Dans ce contexte, Gillis (1972) a étudié le comportement mécanique d'un point triple. Ce point triple est considéré comme un point de jonction de trois doubles parois et par conséquent comme une approximation de l'unité basique de la structure du bois de résineux. En effet, il constate que les différentes constantes élastiques du bois dépendent fortement de l'agencement structurel des cellules tubulaires, ce qui indique l'aspect anisotropique de ce matériau puisque les

propriétés diffèrent d'une direction à l'autre et que les modules d'élasticité et les modules du cisaillement suivent un ordre particulier, comme suit :

$$E_L > E_R > G_{LR} \sim G_{LT} > E_T > G_{RT}$$

Par ailleurs, les propriétés mécaniques du bois sont déterminées soit statiquement, par les méthodes destructives, notamment l'essai de la compression ou l'essai de flexion à trois points qui sont les essais les plus appliqués dans le cas du bois (surtout le bois de construction), soit dynamiquement par les méthodes non destructives, telles que la méthode d'ultrason ou la méthode de résonance (Halabe et al., 1997).

Vue la difficulté d'effectuer les essais statiques traditionnels normalisés, la prédiction de comportement statique du bois à partir des propriétés dynamiques semble être une avenue importante et intéressante. Toutefois, plusieurs études montrent que la fiabilité de cette prédiction change avec la propriété évaluée (module d'élasticité, module du cisaillement et coefficient de Poisson) (Dackermann et al., 2016; Feio, 2006; Güntekin et Aydın, 2016b; Halabe et al., 1997; Sales et al., 2011). En effet, la prédiction est considérée comme fiable : s'il existe une forte corrélation entre les mesures statiques et dynamiques; si le rapport entre les propriétés dynamiques semble être comparable à celui entre les propriétés statiques et encore si les propriétés dynamiques suivent le même ordre, que les propriétés statiques du bois (Dackermann et al., 2016; Feio, 2006; Güntekin et Aydın, 2016b; Halabe et al., 1997; Sales et al., 2011).

1.3.2 Modules d'élasticité

La majorité des études citées dans la littérature se basent sur la détermination du module d'élasticité longitudinale (E_L) pour diverses essences de bois en appliquant différents essais statiques, notamment par le test de compression parallèle, l'essai de flexion et parfois même l'essai de traction (Bucur, 2006 ; Elsener, 2014 ; Ross, 2010 ; de la Cruz-Sanchez, 2006). La détermination du module d'élasticité par le test de compression perpendiculaire est aussi fréquente (Bucur, 2006 ; Ross, 2010). Toutefois, peu d'études ont mesuré les modules d'élasticité radiale (E_R) et le

module d'élasticité tangentielle (E_T), car la plupart des applications du bois s'intéressent au module longitudinal (E_L) qui offre la plus grande résistance en comparaison aux deux autres modules (E_R et E_T). Cela ne diminue cependant en rien l'importance de connaître ces deux derniers modules dans certaines applications (ex. conception d'une construction à ossature en bois, le séchage du bois) (Dackermann et al., 2016; Ross, 2010).

De façon générale, les valeurs moyennes de E_R et E_T sont exprimées en fonction du module E_L déterminé lors d'un essai de compression en calculant les ratios (E_L/E_R) et (E_L/E_T). Selon plusieurs études, ces ratios sont respectivement égaux à 10 et 20 (Crespo et al., 2017; Elsener, 2014; Gachet et Guitard, 2006; Gonçalves et al., 2011; Keunecke et al., 2007). Toutefois, la relation la plus connue est celle déterminée par Bodig et Jayne (1982) et qui est exprimée par $E_L : E_R : E_T$ qui est égale à 20 : 1,6 : 1. C'est dans ce cadre que Hearmon (1948) est l'un des premiers chercheurs qui a étudié le module de chaque direction principale du bois (L, R ou T) et ce pour diverses essences de feuillus et de résineux. Il a démontré que, pour chaque essence étudiée, le module (E_L) est très supérieur au module (E_R) et que ce dernier est proche du module (E_T), mais reste généralement le plus élevé (Ross, 2010). Cette constatation fut confirmée aussi par Kollmann et Côté (1968) qui constatèrent que le rapport (E_L/E_R) diffère d'une essence à une autre, variant de 40,6 à 182 pour les essences de résineux, et de 12,1 à 62 pour les essences de feuillus (de la Cruz-Sanchez, 2006). En effet, le Tableau 1.3 indique les trois modules d'élasticité moyennes statiques (E_L , E_R et E_T) ainsi que les ratios entre eux pour les résineux et les feuillus, globalement calculés à une teneur en humidité de 12% (Guitard, 1987; Guitard et Amri, 1987).

À titre de comparaison, Gonçalves et al. (2011) trouvèrent que les rapports entre les modules d'élasticité obtenus pour les trois espèces étudiées Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Cupiuba (*Goupia glabra*) et gomme bleue de Sydney (*Eucalyptus saligna*), en utilisant l'ultrason, sont très proches des rapports obtenus lors de l'essai statique de compression. Ceci confirme le potentiel de l'ultrason pour la prédiction des modules statiques (E_L , E_R et E_T). De même, Güntekin et al. (2015a) ont trouvé

qu'il existe une forte corrélation entre les modules d'élasticité dynamiques et statiques (le coefficient de corrélation R^2 varie de 0,79 à 0,96 pour différentes essences de bois).

Tableau 1.3 : Les valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m^3) et les modules d'élasticité (MPa) pour les feuillus et les résineux, adaptées par Guitard et Amri (1987)

Essences étudiées		MV	E_L	E_R	E_T	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
Feuillus	Bouleau sp.	620	16700	1130	630	15	27	2
	Peuplier faux-tremble	310	9540	712	281	13	34	3
	Moyenne*	581	12700	1710	1020	7	12	2
Résineux	Épinette sp.	500	17000	830	650	20	26	1,3
	Pin sp.	540	16600	1120	580	15	29	2
	Mélèze	440	11700	923	759	13	15	1,2
	Thuya occidental	260	3540	649	287	5	12	2
	Moyenne*	415	11700	915	571	13	20	2

* Les valeurs moyennes de 43 bois feuillus et 37 bois résineux trouvées par Guitard et Amri (1987)

L'un des aspects les plus importants est que ces diverses études ont utilisé les mêmes échantillons de bois pour effectuer à la fois les essais statiques et les essais d'ultrason, ce qui explique en partie ces bons résultats (Gonçalves et al., 2011 ; Güntekin et al., 2015a). Comparé au module E_L , il est plus difficile de prédire les modules E_R et E_T . Certains chercheurs ont prouvé que l'ultrason est un outil fiable pour ce type de prédiction (E_R et E_T), mais que cette prédiction dépend de la fréquence des transducteurs, ainsi que de la forme et de la dimension des échantillons utilisés (Bucur, 1983; Bucur, 2006; Güntekin et Aydın, 2016b). D'autres travaux ont constaté qu'il faut appliquer des coefficients de correction pour cette estimation, car il n'y a pas de corrélation directe entre les modules statiques (E_R et E_T) et les modules dynamiques (E_R et E_T) déterminés par l'ultrason (Dackermann et al., 2016). Peu de travaux ont évalué ces deux modules (E_R et E_T) en utilisant la méthode de résonance (Otani et al., 2015). La majorité des études ont

déterminé le module E_L par la méthode de résonance et par la suite ont calculé les modules E_R et E_T , tout en se basant sur les ratios statiques entre $E_L/E_R (\approx 20)$ et $E_L/E_T (\approx 2)$ (Goulart et al., 2015; Leite et al., 2012; Neto et al., 2016 ; Otani et al., 2015).

Par ailleurs, la prédiction du seul module statique E_L obtenue en appliquant cette méthode de résonance (que ce soit en appliquant la vibration longitudinale ou la vibration de flexion), de même que la méthode d'ultrason, attire l'attention de plusieurs chercheurs (Crespo et al., 2017; Goulart et al., 2015; Keunecke et al., 2007; Leite et al., 2012; Neto et al., 2016). On trouve souvent dans la littérature des résultats similaires sur la relation entre E_L statique et E_L dynamique déterminé par la méthode d'ultrason ($E_{L,u}$) (Bucur, 2006; Wang et al., 2017). La majorité de ces études ont montré une forte corrélation entre ces deux propriétés, avec un coefficient de détermination (R^2) pouvant atteindre 0,96 (Bucur, 1983; Goulart et al., 2015; Ross et Pellerin, 1994; Sandoz, 1989,1996). Comme indiqué dans le tableau 1.4, cette corrélation est variable et elle dépend de l'essai statique appliqué, de l'essence étudiée et de la nature du matériel (bois d'œuvre, bille, panneau de bois, etc.)(Goulart et al., 2015; Leite et al., 2012; Neto et al., 2016).

Tableau 1.4 : Relation entre E_L statique et E_L d'ultrason pour divers produits de bois

Matériel testé	Essai statique effectué	Essence étudiée	R^2	Référence
Carottes de sondage	Essai de flexion	- Hêtre commun	0,92	(Bucur et Perrin, 1981)
Bois clair	Essai de compression	-Pin maritime	0,76	(Machado et al., 2003)
Arbres debout	Essai de flexion	- Épinette et pin	0,75 ⁽¹⁾	(Dzbeński et Wiktorski, 2007)
	Essai de compression	- Épinette et pin	0,44 ⁽¹⁾	
Bois de construction	Essai de flexion	- Pin sylvestre	0,70	(García et al., 2007)
		- Pin de laricio	0,73	
		- Pin sylvestre et pin de laricio	0,71	

⁽¹⁾ Corrélation entre le module statique et la vitesse ultrasonore

D'autres chercheurs ont étudié la relation entre E_L statique en flexion et E_L dynamique en utilisant les trois méthodes non destructives (ultrason, vibration longitudinale, et vibration de flexion dite aussi vibration transversale) (Haines et al., 1996; Hassan et al., 2013). Le but de ces travaux est de choisir la méthode non destructive la plus fiable pour évaluer cette propriété statique du bois (E_L) (Haines et al., 1996; Hassan et al., 2013). Ils ont démontré que les résultats de module dynamique E_L mesuré par la méthode de résonance (méthode d'analyse vibratoire) sont proches de ceux E_L statique. Par exemple, l'étude de Chauhan et Sethy (2016) faite sur huit essences de feuillus de différentes masses volumiques, révèle une forte corrélation entre le module statique en flexion et le module dynamique, mesuré par l'ultrason ($R^2=0,95$), et par la méthode de résonance longitudinale ($R^2=0,97$) et transversale ($R^2=0,96$).

Cette constatation est confirmée par Haines *et al.*, (1996) qui ont, de plus, montré que la résonance transversale est le meilleur outil pour estimer le module statique en flexion, notamment lorsqu'on utilise les mêmes dimensions d'échantillons normalisés pour l'essai statique de flexion et la méthode de résonance.

Les mêmes conclusions sont trouvées par d'autres chercheurs qui ont évalué les propriétés des billes de bois en appliquant la flexion statique, la méthode de vibration et la méthode de l'onde de contrainte (Ross et al., 1997; Wang et al., 2002). La méthode vibratoire reste toujours la meilleure méthode pour prédire le module statique E_L . Ceci est expliqué d'une part par l'effet du bois mature sur la propagation des ondes et d'autre part par le rapport entre le diamètre et la longueur qui jouent également un rôle au niveau de la perturbation des ondes de contrainte dans le cas des billes. En effet, plus ce rapport est élevé, plus la vitesse des ondes est élevée et par conséquent le module d'élasticité est surestimé (Ross et al., 1997; Wang et al., 2002). De même, Cademartori *et al.* (2014) ont rapporté que la méthode d'ultrason est celle qui présente le mieux le comportement statique du bois de gomme Rose (*Eucalyptus grandis*) comparé à la méthode d'onde mécanique, avec R^2 est de 0,93 et 0,81, respectivement. Malgré cela, la méthode d'onde mécanique

continue d'être considérée comme un outil très rapide et offre une alternative potentielle à l'essai de flexion statique du bois (Güntekin et al., 2014).

Par ailleurs, plusieurs études indiquent que le module longitudinal dynamique, déterminé par les méthodes non destructives, est plus élevé par rapport au module statique, et que le module dynamique mesuré par l'ultrason est le plus élevé (Brancheriau, 2013; Ilic, 2001; Liang et Fu, 2007; Ross, 2010). Ces différences sont attribuées au comportement viscoélastique du bois (Bouhajja, 2015; Halabe et al., 1997). Selon la méthode appliquée, l'ordre du module E_L du bois est comme suit (Bouhajja, 2015; Brancheriau, 2013; Ilic, 2001; Liang et Fu, 2007; Ross, 2010) :

$E_{\text{flexion 3 points}} < E_{\text{compression parallèle}} < E_{\text{vibration transversale}} < E_{\text{vibration longitudinale}} < E_{\text{onde mécanique}} < E_{\text{ultrason}}$.

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'estimation du module de rupture du bois à partir du module d'élasticité dynamique (Baar et al., 2015; Brancheriau, 2013; Görgün et Dündar, 2018; Hassan et al., 2013;). La majorité d'entre eux ont montré une relation forte entre le module de rupture de flexion et le module dynamique, avec des coefficients de détermination R^2 significatifs (variant de 0,6 à 0,9). En effet, le coefficient R^2 dépend de l'essence étudiée ainsi que de l'outil non destructif utilisé (ultrason, résonance longitudinale, etc.) (Brancheriau, 2013; Hassan et al., 2013; Kharrat, 2016). Certains travaux comme celui de Salmi *et al.* (2013), ont étudié la relation entre le module dynamique mesuré par ultrason en utilisant différents capteurs ayant trois fréquences différentes, et le module de rupture de flexion, ont découvert une corrélation moyenne dans le cas des fréquences élevées, et une corrélation faible dans le cas de fréquences d'ultrason faibles [$R^2 = 0,30$ (500 kHz), 0,53 (4 MHz), 0,44 (8 MHz)]. Par ailleurs, certains chercheurs ont montré que la relation entre le module rupture de flexion et E_L dynamique est relativement faible ($R^2 \approx 0,4$) comparée à celle entre E_L statique et E_L dynamique ($R^2 \approx 0,9$), ce qui leur a permis de conclure que les méthodes non destructives ne sont pas appropriées pour prédire le module de rupture, et que le module d'élasticité statique est celui qui offre la meilleure estimation du module de rupture (Baar et al., 2015; Chauhan et Sethy, 2016; Ilic, 2001).

1.3.3 Modules de cisaillement

Les modules de cisaillement sont des propriétés importantes pour le milieu pratique, notamment pour le domaine du bois structural. Dans le cas du bois, l'essai statique de cisaillement est très difficile à réaliser expérimentalement. De ce fait, le module du cisaillement statique G_{LR} est souvent estimé à partir du ratio (E_L/G_{LR}). Ce ratio (E_L/G_{LR}) est de l'ordre de 14 (Bodig et Jayne, 1982; Gonçalves et al., 2011), et varie de 7 à 25 selon l'essence étudiée. Il dépend aussi de l'essai statique réalisé (essai de cisaillement, essai de traction ou essai de compression) (Elsener, 2014; Harrison, 2006; Karácsonyi, 2011; Ross, 2010). En effet, la réalisation des types d'essais standards traditionnels, en particulier l'essai de compression et l'essai de traction, pour la détermination du module de cisaillement, est encore difficile et compliquée surtout au niveau de la préparation des échantillons. Ceci explique le nombre réduit de publications qui ont déterminé expérimentalement cette propriété (Güntekin et Aydın, 2016b).

Récemment, les chercheurs ont accordé une attention considérable à l'estimation de module de cisaillement à partir d'une autre propriété du bois (Castellanos, 2018; Cavalli et al., 2017a; Divos et al., 1998; Lahr et al., 2017; Leite et al., 2012; Müller et al., 2007; Roohnia et Kohantorabi, 2015). Ils ont étudié différentes relations parmi lesquelles la relation entre G_{LR} et E_L en statique et en dynamique (Cavalli et al., 2017a; Lahr et al., 2017; Leite et al., 2012), la relation entre G_{LR} statique et G_{LR} dynamique déterminé par la méthode d'ultrason, vibratoire de torsion, etc., (Divos et al., 1998; Roohnia et Kohantorabi, 2015) ainsi que la relation entre G_{LR} et la masse volumique (Castellanos, 2018; Müller et al., 2007). Leite *et al.* (2012) ont constaté qu'il n'existe aucune relation entre les mesures dynamiques de G_{LR} et E_L déterminées par la méthode de résonance en flexion, de même entre ce module G_{LR} dynamique et E_L statique déterminé par un essai de flexion.

Yoshihara *et al.* (1998) ont appliqué la méthode de résonance de flexion qui se base sur la théorie de Timoshenko, à partir de laquelle on peut déterminer simultanément le module de cisaillement et le module d'élasticité du bois. Également, la théorie de

Timoshenko a été appliquée pour déterminer le module de cisaillement en utilisant un essai statique de flexion. Ils ont constaté que l'essai statique de flexion permet de calculer le module de cisaillement, non pas avec la théorie de Timoshenko, mais suite aux modifications de cette théorie. Ils ont trouvé que le ratio E_L/G_{LT} dynamique (résonance de flexion) est comparable à celui obtenu par l'essai de flexion statique en ajustant la théorie de Timoshenko. En effet, ils ont constaté que la mesure du module de cisaillement à l'aide de l'essai de flexion statique en appliquant la théorie originale de Timoshenko est limitée si la distorsion de contrainte est près du point de chargement. Pour cette raison, la possibilité d'appliquer cette théorie originale pour déterminer le module de cisaillement dépend de plusieurs facteurs, particulièrement le rapport entre la profondeur de l'échantillon et la distance choisie entre les deux appuis et aussi la forme de la tête de chargement utilisée.

Lahr *et al.* (2017) ont établi qu'il est impossible d'estimer statiquement le module de cisaillement à partir du module d'élasticité en effectuant l'essai de flexion car R^2 est faible (R^2 ajusté = 0,32). Les mêmes résultats sont rapportés par Cavalli *et al.* (2017a). Par ailleurs, Divos *et al.*, (1998) ont constaté qu'il existe une forte relation entre G_{LR} statique déterminé par l'essai de flexion et G_{LR} dynamique obtenu par la vibration de torsion ($R^2 = 0,81$), et la vibration transversale ($R^2 = 0,78$). Ils ont montré que la vibration transversale est un bon estimateur du module de cisaillement statique, mais la détermination de la fréquence naturelle est très sujette à l'erreur. Pour cela, la méthode de vibration de torsion est considérée comme étant la meilleure méthode pour estimer le module de cisaillement statique. Selon ces études, les différents résultats sont principalement dus à la manière de réaliser l'essai de flexion statique et à la théorie appliquée pour la détermination du module de cisaillement. D'autres travaux ont rapporté un fort lien entre la masse volumique du bois et le module de cisaillement dynamique obtenu par la méthode de vibration de poutrelle en porte-à-faux, par la vibration de torsion et même par la vibration transversale (Cavalli *et al.*, 2017a; Guan *et al.*, 2016; Leite *et al.*, 2012; Olsson et Källsner, 2015). Par ailleurs, l'ultrason, de même que la vibration de torsion, sont considérés par certaines études comme un bon prédicteur, non seulement pour le module G_{LR} , mais aussi pour les modules G_{LT} et G_{RT} (Bucur, 1983; Gonçalves *et*

al., 2011; Güntekin et Aydın, 2016b; Güntekin et al. 2016a). Généralement, la fiabilité de ces méthodes pour la détermination des modules G_{LT} et G_{RT} est évaluée en comparant les rapports entre chacune et le module E_L ou le rapport entre les modules ($G_{LR} : G_{LT} : G_{RT}$), tel qu'indiqué dans le tableau 1.5. De même, les modules dynamiques doivent suivre le même ordre que les modules statiques (Ross, 2010; de la Cruz-Sanchez, 2006):

$$G_{LR} \gg G_{LT} > G_{RT}$$

Néanmoins, il reste encore à vérifier la pertinence d'utiliser les méthodes non destructives pour déterminer le module de cisaillement selon les trois plans du bois.

1.3.4 Coefficients de Poisson

De nos jours, il est nécessaire d'utiliser des logiciels de conception assistée par ordinateur pour effectuer la modélisation et la simulation d'une conception, notamment dans le domaine de la conception structurale de bois, surtout pour les structures à grande portée. Le but est de valider la résistance de la structure pour une application donnée. De ce fait, la connaissance des propriétés élastiques, dont les coefficients de Poisson sont difficiles à mesurer expérimentalement, est essentielle pour l'utilisation de ces logiciels (Aira et al., 2014; Dackermann et al., 2016; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et al., 2016a, 2016b; Mascia et Nicolas, 2013). Les informations trouvées dans la littérature sont limitées, parce que peu d'études mettent l'accent sur leurs calculs, même avec les méthodes non destructives (Dackermann et al., 2016; Elsener, 2014; Marmier et al., 2018). Certains chercheurs ont démontré que les méthodes non destructives ne sont pas appropriées pour la prédiction des coefficients de Poisson, puisque la majorité de ces études sont basées sur une théorie établie pour les matériaux isotropes, (Bucur, 1983; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et Aydın, 2016b; Otani et al., 2014b, 2015). Certaines récentes études visent le développement de nouvelles méthodes pour minimiser les erreurs de mesure de ces coefficients (Kohlhauser et Hellmich, 2012; Marmier et al., 2017; Mascia et Nicolas, 2013; Mora et al., 2009).

Tableau 1.5 : Valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m³), du module d'élasticité longitudinale (MPa) et des modules de cisaillement (MPa) pour les feuillus et les résineux, adapté par Guitard et Amri (1987)

Essences étudiées		MV	G _{LR}	G _{LT}	G _{RT}	E _L	G _{LR} /G _{LT}	G _{LR} /G _{RT}	G _{LT} /G _{RT}	E _L /G _{LR}
Feuillus	Bouleau sp.	620	1200	930	190	16700	1,3	6	5	14
	Peuplier faux-tremble	310	674	432	99	9540	2	7	4	14
	Moyenne*	581	1110	841	385	12700	1,3	3	2	11
Résineux	Épinette sp.	500	870	640	40	17000	1,4	22	16	20
	Pin sp.	540	1780	680	70	16600	3	25	10	9
	Mélèze	440	737	812	80	11700	1	9	10	16
	Thuya occidental	260	746	663	53	3540	1,1	14	13	5
	Moyenne*	415	772	713	76	11700	1,1	10	9	15

*Les valeurs moyennes de, 43 bois feuillus, et 37, bois résineux, trouvées par Guitard et Amri (1987)

La validation expérimentale pour n'importe quelle méthode utilisée est possible si les relations suivantes sont validées : (1.25 ; 1.26 ; 1.27). Par conséquent, les coefficients de Poisson calculés seront acceptés (Green et al., 2003; Mascia et Nicolas, 2013).

$$1 - \nu_{ij}\nu_{ji} > 0 \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (1.25)$$

$$|\nu_{ij}| < \sqrt{\frac{E_i}{E_j}} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (1.26)$$

$$1 - \nu_{LR}\nu_{RL} - \nu_{LT}\nu_{TL} - \nu_{RT}\nu_{TR} - 2\nu_{RL}\nu_{TR}\nu_{TL} > 0 \quad (1.27)$$

De plus, les six coefficients de Poisson du bois suivent l'ordre suivant (de la Cruz-Sanchez, 2006) :

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

Cet ordre diffère d'une essence à une autre et aussi selon la méthode appliquée, comme indiqué dans le tableau 1.6 (Guitard, 1987; de la Cruz-Sanchez, 2006).

Tableau 1.6 : Les valeurs moyennes de la masse volumique (MV) (kg/m³) et les coefficients de Poisson pour les feuillus et les résineux, adapté par Guitard et Amri (1987)

Essences étudiées		MV	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}
Feuillus	Bouleau sp.	620	1,406	0,037	0,099	2,522	1,465	0,977
	Peuplier faux-tremble	310	0,180	0,007	0,021	0,456	0,277	0,248
	Moyenne*	581	0,376	0,035	0,046	0,631	0,340	0,435
Résineux	Épinette sp.	500	0,337	0,021	0,018	0,430	0,374	0,561
	Pin sp.	540	0,314	0,016	0,031	0,605	0,465	0,449
	Mélèze	440	0,336	0,018	0,028	0,408	0,355	0,275
	Thuya occidentale	260	0,273	0,028	0,062	0,618	0,337	0,340
	Moyenne*	415	0,304	0,021	0,030	0,487	0,382	0,430

* Les valeurs moyennes de 43, bois feuillus, et 37, bois résineux, trouvées par Guitard et Amri (1987)

1.4 Principaux facteurs affectant le comportement mécanique du bois

Plusieurs facteurs influencent la variation des propriétés élastiques du bois et de façon plus directe la propagation des ondes au niveau du bois, notamment les ondes acoustiques et ultrasoniques. Ces facteurs sont liés principalement aux caractéristiques structurales et physiques du bois et aussi aux conditions environnementales.

1.4.1 Structure anatomique

En raison du caractère anisotropique du bois, ses propriétés mécaniques dépendent surtout de sa direction principale. Ces propriétés mécaniques varient en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres par rapport à la direction de la charge appliquée ou même par rapport à la direction de la propagation des ondes (Bouhajja, 2015; Dackermann et al., 2014; Ross, 2010).

À l'échelle microscopique, cette variation est attribuée à la composition, la répartition et l'orientation des différents éléments anatomiques du bois. À titre d'exemple, l'orientation des cellules est un élément clé de cette variation. En effet, le bois contient beaucoup de cellules axiales. Dans le cas des résineux, en moyenne 90% des cellules sont orientées selon la direction longitudinale, ce qui permet d'avoir une résistance mécanique importante dans cette direction (Hasegawa et al., 2011; Rowell, 2012). Cette résistance dépend en partie de la dimension de ces cellules, surtout leurs longueurs. Généralement, la longueur des cellules axiales des résineux, appelées trachéides, est d'environ 3 à 4 mm et le rapport entre la longueur et la largeur de la cellule est d'environ 100 :1 (Bucur, 2006; Elsener, 2014; Hansen, 2006). Dans le cas des feuillus, on parle de fibres qui sont moins longues que les trachéides, soit environ 1 mm de long, et le rapport entre la longueur et la largeur de la cellule est d'environ 50 :1 (Bucur, 2006; Elsener, 2014; Hansen, 2006).

Telle qu'illustrée à la figure 1.14, la paroi cellulaire de chaque fibre du bois est composée par une paroi primaire et une paroi secondaire, qui elle est formée par trois couches, S1, S2 et S3. Ces couches sont principalement composées par des

microfibrilles de cellulose caractérisées par un angle d'inclinaison par rapport à l'axe de la fibre appelé l'angle de microfibrilles (AMF), (Bytebier, 2009; Hansen, 2006). La couche S2 est la couche la plus dominante, puisqu'elle occupe plus de 80% du volume de la paroi secondaire. Elle a un AMF de 15° qui peut atteindre jusqu'à 30° (Bytebier, 2009; Hansen, 2006). Ceci rend cette couche très importante dans le comportement mécanique du bois, car l'AMF affecte significativement le comportement mécanique (Bytebier, 2009; Hansen, 2006). Toute augmentation de cet angle engendre une diminution de la résistance mécanique en direction longitudinale du bois (Hasegawa et al., 2011; Yang et Evans, 2003).

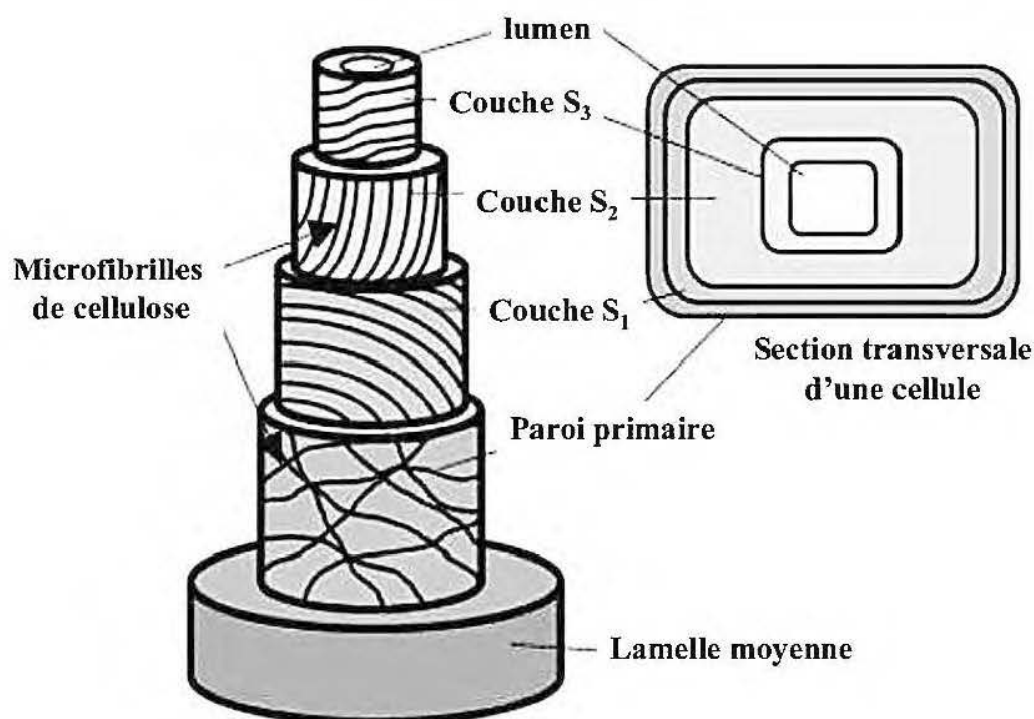


Figure 1.14: Structure tridimensionnelle de la paroi cellulaire d'une fibre (Guedes, 2013)

Plusieurs études ont montré que le module E_L est fortement relié à la variation de l'AMF et ils sont corrélés négativement (Figure 1.15) (Donaldson, 2008; Hasegawa et al., 2011; Keunecke et al., 2007). Les modules G_{LR} et G_{LT} sont aussi fortement corrélés à l'AMF. Ils augmentent avec l'AMF (2-3 fois), surtout en s'approchant de

45° (Figure 1.15) (Astley et al., 1998). Par contre, la variation de l'AMF n'affecte pas les modules E_R , E_T et G_{RT} qui sont presque constants (Astley et al., 1998).

La présence du bois juvénile et de compression (bois de réaction chez les résineux) influence aussi négativement le comportement mécanique du bois, dû principalement à l'effet de l'AMF (Hansen, 2006). En effet, l'AMF du bois juvénile est plus important comparativement à celui du bois mature. Dans le bois juvénile, l'AMF varie de 32° à 55° chez les résineux et de 20° à 25° chez les feuillus (Astley et al., 1998; Hansen, 2006; Kretschmann, 1997; Saadat et al., 2011). Dans le bois mature, l'AMF varie de 2° à 20° chez les résineux (Astley et al., 1998; Hansen, 2006; Kretschmann, 1997; Saadat et al., 2011). De même, l'AMF est plus élevée dans le bois de compression par rapport à celle du bois normal chez les résineux. Cependant, ce n'est pas le cas du bois de tension, qui est le bois de réaction chez les feuillus, car l'AMF y est presque négligeable (Bouhajja, 2015; Saadat et al., 2011). Toutefois, la présence de bois de tension chez les feuillus affecte aussi le comportement mécanique, vu qu'il a des fibres plus longues que celles du bois normal (Sotelo-Montes, 2006; Saadat et al., 2011). Ainsi, la longueur des fibres est considérée comme étant le facteur le plus important expliquant la variation des propriétés mécaniques du bois en présence de bois de tension (Dinh, 2011; Sotelo-Montes, 2006; Saadat et al., 2011). En conclusion, la présence du bois juvénile ou du bois de réaction est une source importante de variation des propriétés mécaniques du bois (Dinh, 2011; Sotelo-Montes, 2006; Saadat et al., 2011).

Par ailleurs le lumen, situé au centre de la paroi cellulaire de la fibre a un effet sur la variation des propriétés du bois. En effet, la variation du rapport de diamètre du lumen par rapport à l'épaisseur de la paroi cellulaire affecte surtout les modules du cisaillement, qui dépendent fortement de la rigidité de flexion des parois cellulaires (Keunecke et al., 2007). Ainsi, plus ce rapport est élevé, plus les modules du cisaillement sont élevés (Keunecke et al., 2007).

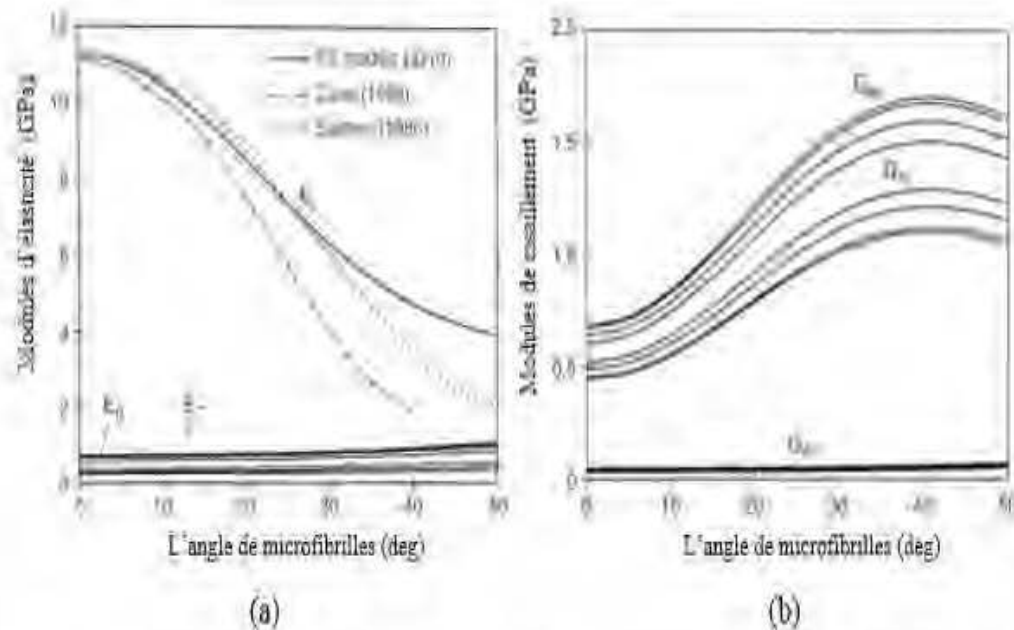


Figure 1.15: (a) Variation des modules d'élasticité et (b) de cisaillement du bois en fonction de l'angle de microfibrilles (AMF) (Astley et al., 1998)

En outre, les cernes de croissance sont constitués de bois initial et de bois final. Le rapport de diamètre du lumen relativement à l'épaisseur de la paroi cellulaire augmente graduellement du bois initial au bois final (Grotta et al., 2007; Hasegawa et al., 2011; Kharrat, 2016). Par conséquent, plus le rapport du bois initial au bois final d'une essence donnée est faible, plus ce bois est rigide dans la direction radiale (Burgert et al., 2001; Keunecke et al., 2007). De plus, la rigidité radiale est influencée par la fraction volumique des rayons (Burgert et al., 2001; Keunecke et al., 2007). Les rayons ligneux empêchent par exemple les ondes ultrasonores de se propager dans la direction tangentielle, par conséquent le module E_R est supérieur au module E_T (Hasegawa et al., 2011). Toutefois, pour certaines essences, le module E_T est plus élevé que le module E_R , ceci étant principalement dû au fait que cette essence possède une faible proportion du bois final ayant des couches plus larges (Bouhajja, 2015; Tabarsa et Chui, 2007a, 2007b). Le comportement mécanique du bois est aussi influencé négativement par les défauts du bois, notamment par les nœuds. Plus ces défauts sont nombreux et de grande taille, plus ils diminuent une faible rigidité du bois (Elsener, 2014; Feio, 2006; Ross, 2010).

1.4.2 La masse volumique

Une des caractéristiques les plus intéressantes d'évaluation de la qualité du bois est sa masse volumique, qui varie non seulement d'une essence à une autre, mais aussi du bois initial au bois final, du bois mature au bois juvénile et du bois de réaction au bois naturel (Cademartori et al., 2014; Kharrat, 2016; Rozenberg et al., 2001). Cette variation est principalement attribuée aux caractéristiques anatomiques du bois. Plus spécifiquement, elle varie en fonction du rapport entre l'épaisseur de la paroi cellulaire et le diamètre de la cellule, qui est en lien direct avec la rigidité du bois (Cademartori et al., 2014; Mascia et Cramer, 2009).

Dans ce cadre, plusieurs chercheurs se sont intéressés à étudier l'effet de cette propriété intrinsèque sur le comportement mécanique du bois (Mascia et Cramer, 2009; Ross, 2010; Tsoumis, 1991). Ils ont démontré que la masse volumique est un bon prédicteur du comportement mécanique du bois. De façon générale, plus la masse volumique est élevée plus les propriétés mécaniques sont importantes (Mascia et Cramer, 2009; Ross, 2010; Tsoumis, 1991). Cependant, certaines études ont découvert que ceci est vrai seulement dans le cas du module E_L , car la relation entre le module E_L et la masse volumique est linéaire positive et ils sont fortement corrélés (Feio, 2006; Güntekin et Aydin, 2016a; Izekor et al., 2010). Au contraire, la relation entre la masse volumique et les modules transversaux (E_R et E_T) est non linéaire, car ces deux modules sont fortement dépendants de la structure anatomique du bois (Feio, 2006; Keunecke et al., 2007). Ces résultats sont aussi vrais pour les modules de cisaillement et les coefficients de Poisson qui, respectivement, dépendent davantage de l'effet de la structure anatomique et de l'effet de la variation des modules d'élasticité que de la masse volumique (Feio, 2006; Ganey et al., 2007; Keunecke et al., 2007). En outre, même la relation entre E_L et la masse volumique dépend fortement de l'anatomie de l'essence étudiée (Feio, 2006; Ganey et al., 2007; Keunecke et al., 2007). Dans certaines études, suite à une comparaison entre deux essences, les résultats ont démontré que l'essence ayant la masse volumique la plus élevée n'a pas toujours le module E_L le plus élevé (Calegari et al., 2011; Keunecke et al., 2007). Ceci revient au fait qu'elle possède des éléments

cellulaires plus courts que l'essence de faible masse volumique (Calegari et al., 2011; Keunecke et al., 2007). Cependant, les caractéristiques de croissance, comme les nœuds, les irrégularités de grains, les grains croisés, etc., qui se retrouvent dans le bois, sont considérés comme une source de variation de la masse volumique. Par conséquent, on se limite souvent au bois clair et à fil droit pour prédire les propriétés mécaniques à partir de sa masse volumique (Güntekin et Aydin, 2016a).

1.4.3 La teneur en humidité et la température

Une variation de la teneur en humidité (H) a un effet significatif sur plusieurs caractéristiques du bois, surtout les propriétés mécaniques. En effet, une augmentation de H engendre une diminution des propriétés mécanique du bois (Feio, 2006; Ross, 2010). Cet aspect est bien remarquable, surtout au-dessous du point de saturation de fibre (PSF) où H est atteinte à approximativement entre 27% à 30% pour la majorité des essences (Boström, 1999; Feio, 2006). Cette influence de H est souvent étudiée lors de l'évaluation non destructive des propriétés mécaniques du bois. Plusieurs études démontrent que H a une influence négative sur la propagation des ondes, telles que les ondes vibratoires ou les ondes ultrasoniques (Bucur, 2006; Calegari et al., 2011; Montero et al., 2015; Tiitta et al., 2007). Dans le cas de l'effet de la teneur en humidité sur la vitesse de propagation des ondes d'ultrason, l'atténuation augmente avec l'augmentation de la teneur en humidité (Bucur, 2006; De Oliveira et al., 2005). En effet, pour un faible H ne dépassant pas 18%, le bois et les limites des cellules sont responsables de la dispersion des ondes d'ultrasons (Bucur, 2006; De Oliveira et al., 2005). En revanche, à une teneur en humidité élevée et au-dessous du PSF, seulement les limites de cellules ont un effet important sur la dispersion des ondes d'ultrason. Alors qu'au-dessus du PSF, c'est la porosité du bois qui est responsable de cette dispersion (De Oliveira et al., 2005).

Toutefois, l'effet de la teneur en humidité au-dessus du PSF est moins étudié, puisque la teneur en humidité de divers matériaux du bois ne dépasse pas 30%, vu qu'ils sont conditionnés par l'humidité relative de l'air et la température ambiante

(Bucur, 2006; De Oliveira et al., 2005; Montero et al., 2015). Plusieurs chercheurs ont montré aussi l'importance d'étudier l'effet de la température sur le comportement mécanique du bois que la teneur en humidité (Llana et al. 2013; Gerhards, 2007; Sandoz, 1993; Spinner, 1961). Ainsi, une augmentation de la température influence négativement les propriétés mécaniques du bois (Mascia et Cramer, 2009; Moutee, 2006). Mais, comme indiqué dans la figure 1.16, une faible teneur en humidité diminue cet effet (Elsener, 2014). Avec une variation de température de -20°C à 60°C , la diminution de la rigidité augmente de 6% à 40%, respectivement, lors de l'augmentation de H de 0% à 40% (Dinwoodie, 2000; Mascia et Cramer, 2009).

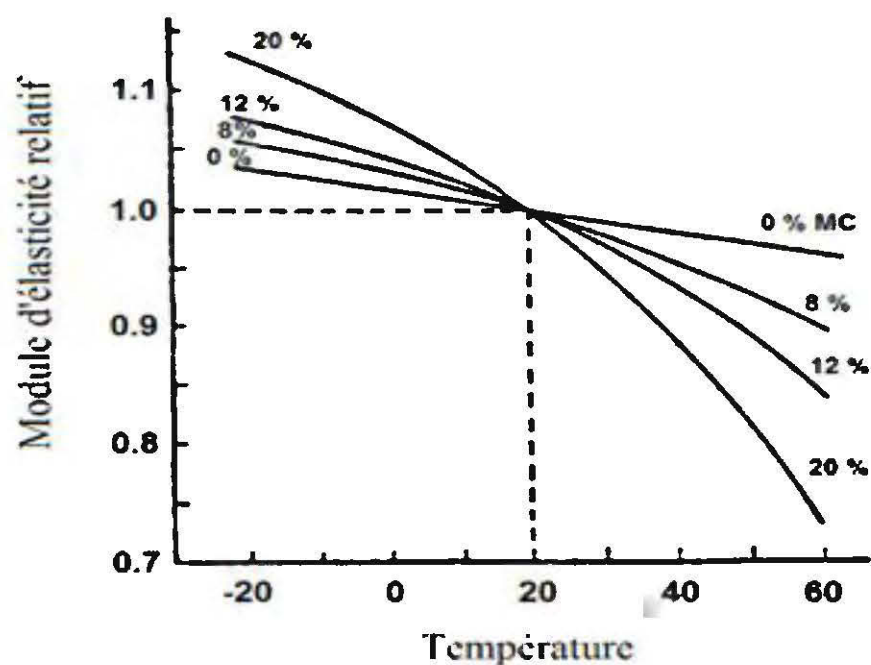


Figure 1.16: Variation du module d'élasticité relatif dans la direction longitudinale du bois en fonction de la teneur en humidité et de la température (Moutee, 2006; Sulzberger, 1953)

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Choix du matériel

Le présent projet étudie les propriétés mécaniques de sept essences de bois de la forêt boréale. Les essences de feuillus sont le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et le peuplier hybride (*Populus x species*). Les essences de résineux sont l'épinette blanche (*Picea glauca*), le pin gris (*Pinus banksiana*), le mélèze laricin (*Larix laricina*) et le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.). Ces arbres d'échantillonnage ont été récoltés de différents sites localisés dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada). La collecte de la majorité de ces arbres fut faite dans la scierie Bionor. Le choix de ces essences s'est basé sur leurs valeurs de la masse volumique afin de couvrir une vaste gamme de variation.

2.2 Préparation des échantillons

Pour chacune des essences étudiées, des billes de bois d'environ 300 mm de diamètre et de 2,50 m de longueur ont été débitées en planches de 27mm d'épaisseur. Un rabotage de la surface de chacune de ces planches de 27mm d'épaisseur est fait à l'aide d'une raboteuse de bois Dewalt (Maryland, États-Unis), afin d'obtenir 25mm d'épaisseur. Selon le plan de coupe (plans de coupe tangentiel et radial), deux planches ont été utilisés pour préparer différents types d'échantillons sans défaut (Figure 2.1).

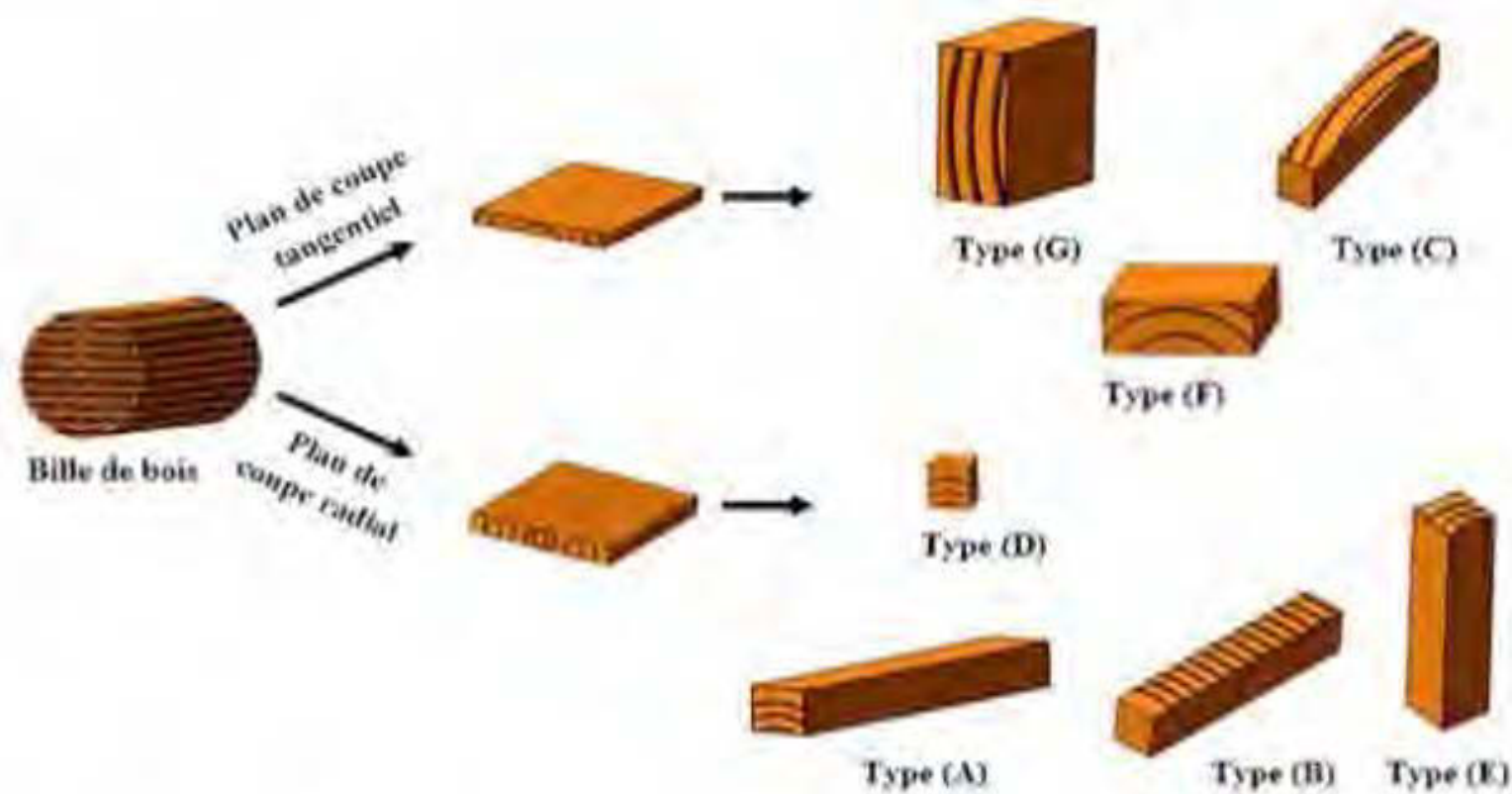


Figure 2.1: Diagramme montrant le protocole d'échantillonnage réalisé et les différents types d'échantillons préparés

Pour étudier la variation triaxiale, ces différents types d'échantillons ont été coupés selon les trois directions principales du bois : direction longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Le tableau 2.1 résume le nombre et les dimensions des échantillons préparés ainsi que les normes utilisées pour chaque test effectué.

Tableau 2.1: Nombre et dimensions des échantillons préparés pour les différentes propriétés mesurées

Test effectué	Propriété déterminée	Dimensions de l'échantillon (mm) (L, R, T)	Type d'échantillon	Nombre des échantillons	Norme ou références
Méthode de résonance	$E_{r,L}^1$ $E_{r,f,L}$ $G_{r,LR}^2$ $G_{r,LR}$	410 x 25 x 25 (360 x 20 x 20) ⁵	A ⁶	210	ASTM E1876-01 /C1259-02
	$E_{r,R}$; $G_{r,LT}$	25 x 150 x 25 (20 x 150 x 20) ⁵	B	210	
	$E_{r,T}$; $G_{r,RT}$	25 x 25 x 150 (20x 20 x 150) ⁵	C	210	
Méthode d'ultrason	$E_{u,L}$ $E_{u,R}$ $E_{u,T}$ $G_{u,LR}$ $G_{u,LT}$; $G_{u,RT}$	15x 15 x 15	D	210	(Bucur, 2006, 2017; Güntekin et al., 2016a)
Compression parallèle	$E_{c,L}$ $\epsilon_{c,L}^3$	100 x 25 x 25 (100 x 20 x 20) ⁵	E	210	ASTM D143-01
Compression perpendiculaire	$E_{c,R}$; $\epsilon_{c,R}$	25 x 50 x 50 (20 x 50 x 50) ⁵	F	210	
	$E_{c,T}$; $\epsilon_{c,T}$	25 x 50 x 50 (20 x 50 x 50) ⁵	G	210	
Flexion sur trois points	$E_{s,f}$, MOR ⁴ , $G_{f,LR}$	410x25x25 (360x20x20) ⁵	A	210	

Directions principales du bois sont la direction longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)

Méthodes de mesure sont la résonance (r), l'ultrason (u), la compression (c) et la flexion (f)

¹ $E_{i,j}$: Module d'élasticité par la méthode de mesure i dans la direction j

² $G_{i,jk}$: Module de cisaillement par la méthode de mesure i dans le plan jk

³ $\epsilon_{c,i}$: Déformation élastique de la compression dans la direction i

⁴MOR : Module de rupture en flexion

⁵ Dimensions des échantillons pour le peuplier hybride et le thuya occidental

⁶ Types d'échantillons comme indiqués sur la figure 2.1

Un total de 1470 échantillons ont subi une adsorption dans une chambre de conditionnement LABOCON (Melton Mowbray, Royaume-Uni) à une humidité relative de 60% et une température de l'air ambiant de 20 °C. Ce conditionnement a permis d'atteindre une teneur en humidité d'équilibre d'environ 12% pour respecter les normes en vigueur. Le contrôle et la mesure de la teneur en humidité du bois sont effectués à l'aide d'un humidimètre 'Tramex WME Wood Moisture

Encounter' (Kilmacanogue, Ireland). Pour chaque échantillon, un ensemble de paramètres tel que les dimensions (longueur, largeur et épaisseur) et la masse ont été mesurés en utilisant un pied à coulisse de précision $\pm 0,02$ mm et une balance analytique de précision $\pm 0,01$ g, respectivement. En se basant alors sur la moyenne de ces différents paramètres, la masse volumique de l'échantillon est calculée par le quotient de la masse moyenne et le volume trouvé.

2.3 Mesure des propriétés mécaniques de bois

2.3.1 Méthodes destructives : essais de compression et de flexion

Les résultats de différents essais statiques réalisés sont considérés comme des références. Les tests ont été effectués en utilisant une machine universelle électromécanique de marque Zwick/Roell Z20 (Ulm, Allemagne) avec une capacité de 20 KN.

2.3.1.1 Essai de compression :

Pour faire l'étude triaxiale, trois types d'essais de compression sont réalisés en fonction de la direction d'application de la force par rapport à la direction de l'orientation des fibres du bois (Figure 2.2). Pour chaque essai, un extensomètre mécanique à jauge de contrainte de type « clipsable » a été utilisé afin d'augmenter la précision des mesures.

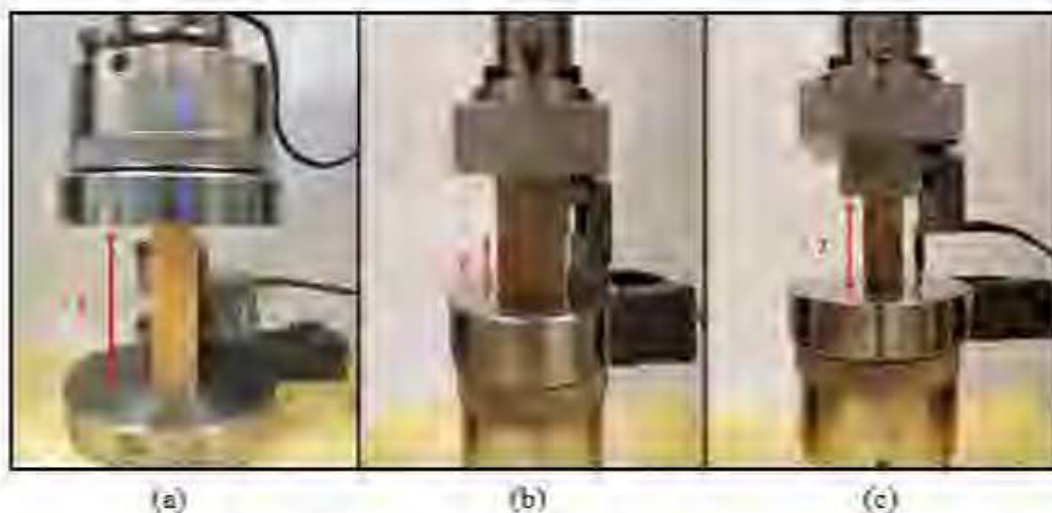


Figure 2.2: Dispositif expérimental de l'essai de compression (a) longitudinale, (b) radiale et (c) tangentielle

Ces trois tests sont faits selon la norme ASTM D143-01 (ASTM, 2000) et en considérant les différents types d'échantillons (E, F et G) (Figure 2.1) :

- La compression longitudinale où la force appliquée est parallèle à la direction longitudinale du bois. Cet essai est effectué sur des échantillons de type (E) et permet de déterminer expérimentalement le module d'élasticité longitudinale (E_{cl}) et la déformation longitudinale (ϵ_{cl}). Pour ce test, la vitesse de la traverse utilisée est de 0,3 mm/min ;
- La compression radiale où la force appliquée est parallèle à la direction radiale du bois. Cet essai est fait sur des échantillons de type (F) et permet de déterminer expérimentalement le module d'élasticité radiale (E_{cr}) et la déformation radiale (ϵ_{cr}) en utilisant une vitesse de 0,305 mm/min ;
- La compression tangentielle où la force appliquée est parallèle à la direction tangentielle du bois. Cet essai est réalisé sur des échantillons de type (G) et permet de déterminer expérimentalement le module d'élasticité tangentielle (E_{ct}) et la déformation tangentielle (ϵ_{ct}) en utilisant une vitesse de 0,305 mm/min

En se situant dans le domaine élastique du bois, chaque module d'élasticité en compression (E_{ci}) a été calculé à partir de la pente de la courbe contrainte



σ_i déformation ε_i représentée à l'aide du logiciel d'essais de Zwick testXpert (Équation 2.1).

$$E_{c,i} = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \text{ avec } i = L, R, T \quad (2.1)$$

Les six coefficients de Poisson (ν_{ji}) sont calculés théoriquement à partir de l'équation 2.2, en se basant sur les différentes déformations trouvées ($\varepsilon_{c,L}$, $\varepsilon_{c,R}$, $\varepsilon_{c,T}$) (Aira et al., 2014; Gonçalves et al., 2011)

$$\nu_{ji} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.2)$$

Pour chaque échantillon, les trois modules de cisaillement du bois ($G_{c,L,R}$; $G_{c,L,T}$; $G_{c,R,T}$) ont été calculés théoriquement selon la formule suivante (Dackermann et al., 2016; Hudson, 1993; Saint-Venant, 1856) :

$$G_{c,ij} = \frac{E_{c,i}E_{c,j}}{E_{c,i}+E_{c,j} + 2\nu_{ij}E_{c,j}} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.3)$$

Avec

- $G_{c,ij}$: Le module de cisaillement dans le plan (ij), MPa ;
- $E_{c,i}$: Le module d'élasticité en compression dans la direction (i), MPa ;
- $E_{c,j}$: Le module d'élasticité en compression dans la direction (j), MPa ;
- ν_{ij} : Le coefficient de Poisson calculé.

2.3.1.2 Essai de flexion

Les essais statiques de flexion de trois points ont été faits sur des échantillons de type (D) pour déterminer le module statique de flexion ($E_{s,f}$), ainsi que le module de rupture (MOR) (Figure 2.3). D'après la norme ASTM D143-01 (ASTM, 2000), la distance entre les deux appuis (L_1) correspond à 300 et 375mm pour les échantillons ayant une section transversale de 20 x 20 mm et de 25 x 25mm, respectivement

(Tableau 2.1). Ces différents essais ont été réalisés avec une vitesse de la traverse de 1,3 mm/min. Comme le montre la figure 2.3, chaque échantillon doit être placé de façon à ce que la charge appliquée soit perpendiculaire à la surface transversale du bois. Par ailleurs, un déflectomètre (extensomètre spécifique pour les essais de flexion) a été utilisé pour mesurer le $E_{s,f}$.

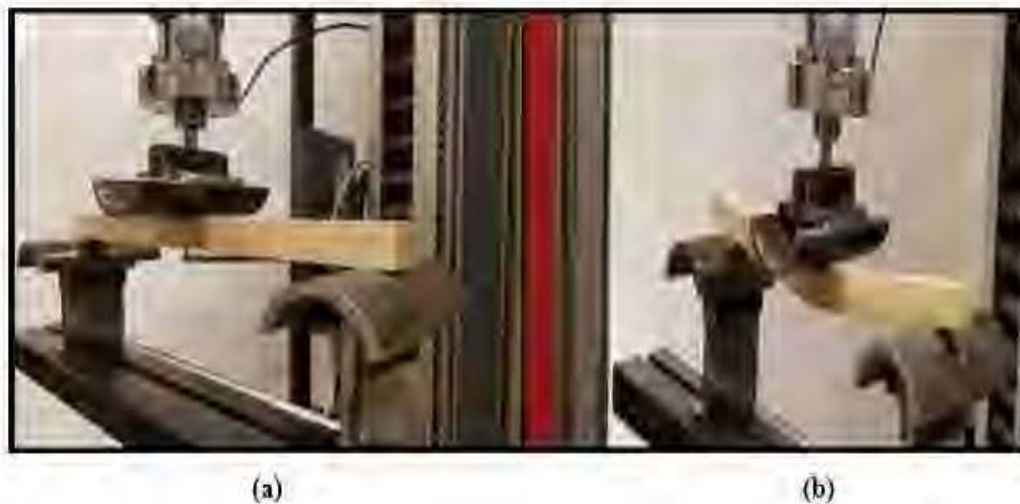


Figure 2.3: Dispositif expérimental d'essais statiques de flexion à trois points pour déterminer (a) le module d'élasticité en flexion ($E_{s,f}$) et (b) le module de rupture MOR

La détermination de ces propriétés ($E_{s,f}$ et MOR) est faite selon les équations 2.4 et 2.5 (ASTM, 2000) :

$$E_{s,f} = \frac{L^3 \Delta F}{4 b h^3 \Delta \delta} \quad (2.4)$$

$$MOR = \frac{3 L F_{max}}{2 b h^2} \quad (2.5)$$

Avec

- $E_{s,f}$: Module d'élasticité en flexion, MPa ;
- MOR : Module de rupture, MPa ;
- F : Force mesurée en dessous de la limite élastique, N ;

- F_{max} : Force maximale mesurée, N ;
- δ : Déflexion mesurée, mm ;
- L : Distance entre les deux appuis, mm ;
- b : Largeur de la section transversale de l'échantillon, mm ;
- h : Hauteur de la section transversale de l'échantillon, mm.

Pour déterminer le module de cisaillement, les échantillons ont été soumis de nouveau à un autre essai non normalisé de flexion à trois points. Pour cet essai, la vitesse de la traverse est maintenue à 1,3 mm/min. Ainsi, la distance entre les deux appuis (L_2) doit être inférieure à la distance normalisée (L_1). La distance (L_2) utilisée était de 100 et 188 mm pour les échantillons ayant une section transversale de 20 x 20 mm et de 25 x 25mm, respectivement. Ce choix est fait pour assurer les inégalités suivantes (Christoforo et al., 2013a; 2013b; Lahr et al., 2017)

$$\frac{L_1}{h} \geq 21 \quad (2.6)$$

$$\frac{L_2}{h} \geq \frac{5}{4} \quad (2.7)$$

Avec :

- h : Épaisseur de l'échantillon testé, mm.

Les forces appliquées sur l'échantillon (F_1 et F_2 , en N) s'obtiennent pour une certaine valeur de déformation (δ_1 et δ_2) associée au quotient ($L_1/125$) et ($L_2/125$), tel que (Christoforo et al., 2013a; 2013b) :

$$\delta_1 = \frac{F_1 L_1^3}{48 I_z E} + \frac{3F_1 L_1}{10 A G} = \frac{L_1}{125} \quad (2.8)$$

$$\delta_2 = \frac{F_2 L_2^3}{48 I_z E} + \frac{3F_2 L_2}{10 A G} = \frac{L_2}{125} \quad (2.9)$$

Avec

- E : Le module d'élasticité, MPa ;
- G : Le module de cisaillement, MPa ;
- I_z : Moment d'inertie de la section transversale qui est égale à $\frac{bh^3}{12}$, mm⁴ ;

- A : La section transversale de l'échantillon qui est égale à bh , mm^2 .

À partir des équations précédentes 2.8 et 2.9, on peut déterminer le module du cisaillement dans le plan longitudinal-radial ($G_{f,LR}$) selon l'équation 2.10 (Christoforo et al., 2013a, 2013b).

$$G_{f,LR} = \frac{3 F_1 F_2 L_1 L_2 (L_1^2 - L_2^2)}{10 b h (F_1 L_1^3 \delta_2 - F_2 L_2^3 \delta_1)} \quad (2.10)$$

2.3.2 Méthodes non destructives

2.3.2.1 Mesures ultrasoniques

La détermination des propriétés mécaniques du bois par la méthode ultrasonique est faite à l'aide d'un générateur d'ultrason Sonatest Mastrecam 380 (Texas, États-Unis) et des transducteurs positionnés sur les faces de l'échantillon (Figure 2.4). Le générateur permet de mesurer le temps de propagation de l'onde à partir de l'émetteur au récepteur.

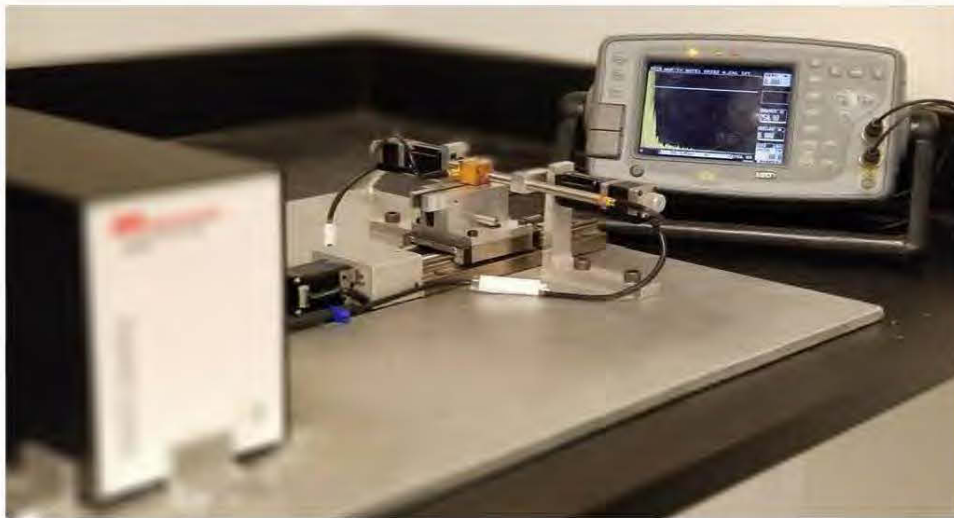


Figure 2.4: Banc d'essai aux ultrasons

Deux types d'ondes ont été pénétrées dans un échantillon de type (D) (Figure 2.1). Pour mesurer les modules d'élasticité, une onde longitudinale est introduite en utilisant des transducteurs 10MHz de fréquence pour la direction longitudinale du

bois, et 2,5Mhz de fréquence pour la direction transversale (radiale et tangentielle). Pour mesurer les modules de cisaillement, une onde transversale est introduite en utilisant cette fois des transducteurs de fréquence 1MHz. Le tableau 2.2 synthétise toutes les propriétés mesurées par l'ultrason, les différents types des ondes utilisées pour chaque test et les différentes équations appliquées pour le calcul des propriétés.

Tableau 2.2: Les différentes propriétés mesurées par l'ultrason en fonction de type d'onde pénétrée dans le bois, adapté par Crespo et al., (2017)

Propriété mesurée	Type de l'onde	Direction de propagation	Direction de polarisation	Équation appliquée	N° d'équation
$E_{u,L}^{(2)}$	Longitudinale (10MHz) ⁽¹⁾	L	L	$E_{u,L} = \rho V_{LL}^2$	(2.11)
$E_{u,R}$	Longitudinale (2.5MHz)	R	R	$E_{u,R} = \rho V_{RR}^2$	(2.12)
$E_{u,T}$	Longitudinale (2.5MHz)	T	T	$E_{u,T} = \rho V_{TT}^2$	(2.13)
$G_{u,LR}^{(3)}$	Transversale (1MHz)	L ou R	R ou L	$G_{u,LR} = \rho \left(\frac{V_{LR} + V_{RL}}{2} \right)^2 = \rho V_{LR}^2$	(2.14)
$G_{u,LT}$	Transversale (1MHz)	L ou T	T ou L	$G_{u,LT} = \rho \left(\frac{V_{LT} + V_{TL}}{2} \right)^2 = \rho V_{LT}^2$	(2.15)
$G_{u,RT}$	Transversale (1MHz)	R ou T	T ou R	$G_{u,RT} = \rho \left(\frac{V_{RT} + V_{TR}}{2} \right)^2 = \rho V_{RT}^2$	(2.16)

L : direction longitudinale, R : direction radiale, T : direction tangentielle

⁽¹⁾ Fréquence des capteurs utilisés

⁽²⁾ $E_{u,i}$ (MPa) : Module d'élasticité mesuré par l'ultrason dans la direction L, R et T

⁽³⁾ $G_{u,ij}$ (MPa) : Module de cisaillement mesuré par l'ultrason dans le plan LR, LT et RT

⁽⁴⁾ V_{ij} (m/s) : Vitesse d'ultrason calculée

⁽⁵⁾ ρ (kg/m³) : Masse volumique de l'échantillon

Les choix de la forme et la dimension des échantillons sont les deux paramètres les plus importants pour réduire l'apparition des signaux parasites. Pour cette étude, les échantillons utilisés sont de forme carrée et d'une dimension 15mm pour chaque direction. Pour cette dimension (15mm), l'atténuation de l'onde ultrasonique est relativement faible (Bucur, 2017). Par conséquent, la propagation des ondes dans le bois devient plus facile surtout dans le cas des ondes transversales. Par ailleurs, une égalité entre les vitesses de cisaillement (V_{LR} et V_{RL}), (V_{LT} et V_{TL}) et (V_{RT} et

V_{IR}) a été reportée dans le cas d'un échantillon carré, ayant approximativement une symétrie orthorhombique, ce qui simplifie d'une part les expériences réalisées et d'autre part les calculs des propriétés (Bucur, 2017; Güntekin et al., 2016a ; Keunecke et al., 2007).

La propagation des ondes dans un milieu infini est dictée par la distance entre les transducteurs qui devrait être au moins trois fois supérieure à la longueur d'onde (λ) (Bucur, 2006; Crespo et al., 2017; Trinca et Gonçalves, 2009). Cette condition a été respectée pour les différents tests. De ce fait, un gel a été appliqué pour assurer le couplage entre l'échantillon et les capteurs au cours des mesures. Comme l'indique la figure 2.5, deux dispositifs ont été utilisés pour fixer l'échantillon d'une part, et d'autre part pour y garder la même pression exercée. Nous avons élaboré et construit le dispositif (b) qui est compatible à la fois avec les capteurs de fréquence 2.5 Mhz et celui de 1MHz.

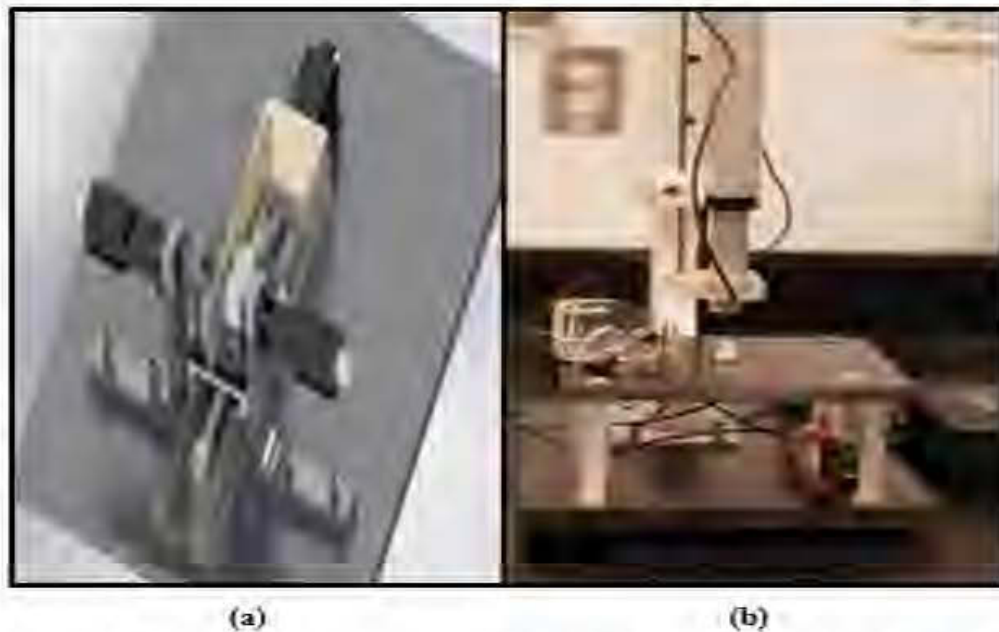


Figure 2.5: Dispositifs utilisés pour la fixation de l'échantillon et des capteurs (a) (Kharrat, 2016)

Pour le même échantillon, chaque essai réalisé a été répété trois fois afin de diminuer l'incertitude des mesures. Au total, 3780 mesures de temps de propagation

des ultrasons ont été prises pour calculer les six vitesses mentionnées dans le tableau 2.2. Chaque vitesse est obtenue par le quotient de la distance parcourue par l'onde et le temps corrigé (Équation 2.17). Ce temps corrigé (T_C) est exprimé par la différence entre le temps de vol de l'onde mesuré dans l'échantillon et un facteur de correction de calibrage pris en compte avant de commencer les différents tests réalisés (Bouhajja, 2015; Kharrat, 2016).

$$V_b = \frac{d_b}{T_C} = \frac{d_b}{T_b - F_C} \quad (2.17)$$

Avec :

- V_b : Vitesse de propagation du son dans le bois, m/s ;
- d_b : Distance mesurée de l'échantillon de bois, m ;
- T_b : Temps de vol mesuré dans l'échantillon de bois, s ;
- F_C : Facteur de correction, s.

Ce facteur de correction permet d'éliminer dans le calcul la durée du parcours de l'onde dans le circuit électrique. Il est déterminé à partir de l'équation 2.18, tout en utilisant un morceau de plexiglas comme échantillon de référence (Bouhajja, 2015; Kharrat, 2016).

$$F_C = t_r - \frac{d_r}{V_r} \quad (2.18)$$

Avec :

- t_r : Temps de vol dans le morceau de référence, s ;
- d_r : Distance mesurée du morceau de référence, m ;
- V_r : Vitesse de référence pour le matériau de plexiglas qui est égale à 2760 m/s pour la vitesse de propagation longitudinale et 1395 m/s pour la vitesse de propagation transversale (Frenet, 2000).

Les coefficients de Poisson ont été calculés en suivant les mêmes démarches présentées dans la section (1.2.1.2.2). Deux théories des ondes unidimensionnelles ont été appliquées : une théorie adaptée pour les matériaux isotropes et l'autre pour les matériaux orthotropes. Dans la présente étude, une comparaison entre les

différents coefficients de Poisson trouvés par ces deux théories a été faite. En appliquant la théorie des matériaux isotropes, les trois coefficients de Poisson ($\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$) ont été définies par l'équation 2.19 et trois autres ($\nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{TR}$) par l'équation 2.20 (Dackermann et al., 2016).

$$\nu_{ij} = \frac{V_{ii}^2 - 2V_{ij}^2}{2(V_{ii}^2 - V_{ij}^2)} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.19)$$

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.20)$$

Dans le cas de la théorie des matériaux orthotropes, les six coefficients de Poisson ont été calculés à partir des différents termes de la matrice de souplesse (S_{ij}) (Équation 2.21) (Dackermann et al., 2016)

$$\nu_{ij} = -\frac{S_{ij}}{S_{ii}} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.21)$$

Les paramètres constituant la matrice de souplesse (S_{ij}) ont été mesurés à partir des termes de la matrice de rigidité (C_{ij}). Dans ce contexte, les vitesses de propagation de l'onde longitudinale ($V_{//}$) et de l'onde transversale ($V_{\perp}$) permettent de déterminer les six termes de cette matrice de rigidité (C_{11} , C_{22} et C_{33}) et (C_{44} , C_{55} et C_{66}), respectivement. Cependant, les paramètres (C_{12} , C_{23} et C_{13}) dépendent d'une vitesse d'onde transversale réfractée (V_{θ}) à un angle (θ) de 45° (θ angle entre la direction de polarisation et la direction de propagation de l'onde). En se basant sur l'équation 2.22, cette vitesse de cisaillement est déterminée comme suit (Dackermann et al., 2016; Elsener, 2014):

$$V_{\theta} = \frac{V_{//} V_{\perp}}{V_{//} \sin^{1.7} \theta - V_{\perp} \cos^{1.7} \theta} \quad (2.22)$$

2.3.2.2 Mesures acoustiques par résonance

Le comportement mécanique du bois est déterminé dynamiquement par la méthode de résonance (nommée aussi la méthode d'analyse vibratoire ou la méthode de

l'excitation impulsionnelle). Trois modes de vibration sont possibles : le mode de vibration longitudinale, de flexion et de torsion. Le principe de cette méthode consiste à déterminer expérimentalement une fréquence fondamentale correspondant au mode de vibration appliquée. Par conséquent, les modules d'élasticité, de flexion et de cisaillement sont obtenus en se basant sur la fréquence de la vibration longitudinale, de flexion et de torsion, respectivement. Dans ce contexte, l'appareil du GrindoSonic MK6 (Leuven, Belgique) a été utilisé.

Cet appareil est formé d'un ensemble de marteaux, d'un instrument Front Panel MK6 Advanced et de deux capteurs (un capteur piézoélectrique et un capteur acoustique 'microphone' (Figure 2.6).



Figure 2.6: Équipement de l'appareil GrindoSonic MK6 (Leuven, Belgique)

Avec cet instrument Front Panel MK6 Advanced, un mouvement oscillatoire a été traité en éliminant les perturbations harmoniques lors des premières périodes (Figure 2.7). Différents paramètres ont été définis :

- La fréquence de résonance de l'échantillon testé ;
- La durée de deux périodes propres de vibrations fondamentales ;
- Le décrétement logarithmique ;
- La capacité d'amortissement spécifique.

Les signaux vibratoires temporels sont d'abord enregistrés et analysés sur une durée de huit périodes à l'aide de l'horloge de quartz de cet équipement. Le cristal de référence de cette horloge oscille à une fréquence de 2 kHz (Croiset et al, 1980).

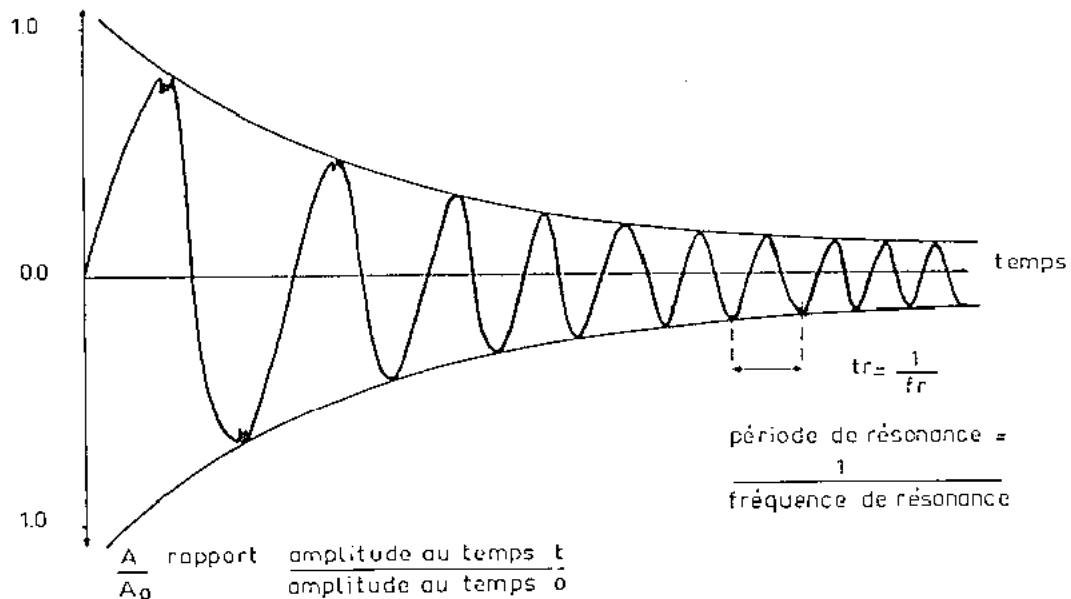


Figure 2.7: Exemple d'un mouvement oscillatoire libre en régime sous amorti
(Croiset et al., 1980)

En se basant alors sur la durée entre deux amplitudes successives de ce mouvement libre amorti, la fréquence de résonance est définie comme suit (Croiset et al., 1980):

$$f_r = \frac{2 \cdot 10^6}{R} \quad (2.23)$$

Avec :

- f_r : La fréquence de résonance, Hz ;
- R : La durée de deux périodes propres de vibrations, μs .

Le choix d'afficher directement la fréquence de résonance se fait lors d'un simple réglage. La validation de la valeur affichée a été faite au préalable à partir des essais effectués sur une pièce en céramique (pièce de référence). Cependant, au cours des essais préliminaires, deux problèmes ont été constatés. Le premier problème est que la réponse trouvée par Grindosonic MK6 n'est pas constante. Pour les mêmes

conditions d'application, on a remarqué une grande différence entre les fréquences de deux essais successifs effectués sur le même échantillon de bois. Pour identifier correctement la fréquence de résonance, on a utilisé un logiciel d'analyse fréquentielle « Audacity » qui nous permet d'avoir le spectre fréquentiel du matériau testé (Figure 2.8). Ainsi, la fréquence retenue est celle trouvée par l'appareil de Crindosonic, qui est considérée comme valable si elle est proche de la valeur trouvée par le logiciel.

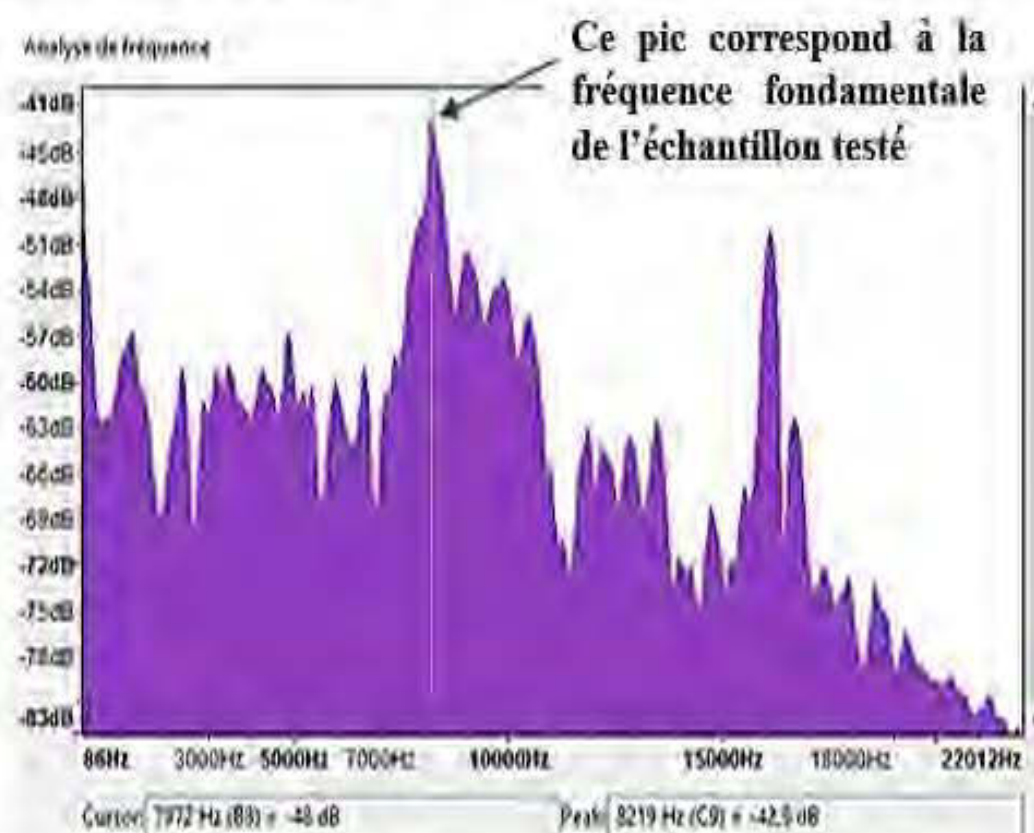


Figure 2.8: Spectre fréquentiel d'un échantillon déterminé par le logiciel Audacity

En ce qui concerne le deuxième problème, lors de l'expérience, on a observé le risque de déplacement de l'échantillon qui engendre par conséquent le déplacement du capteur utilisé, le microphone. Ces risques de déplacement perturbent considérablement les mesures. Pour résoudre ce problème, un support de fixation est conçu de façon à assurer une vibration libre de l'échantillon, mais en réduisant les forces externes exercées sur l'échantillon (Figure 2.9).

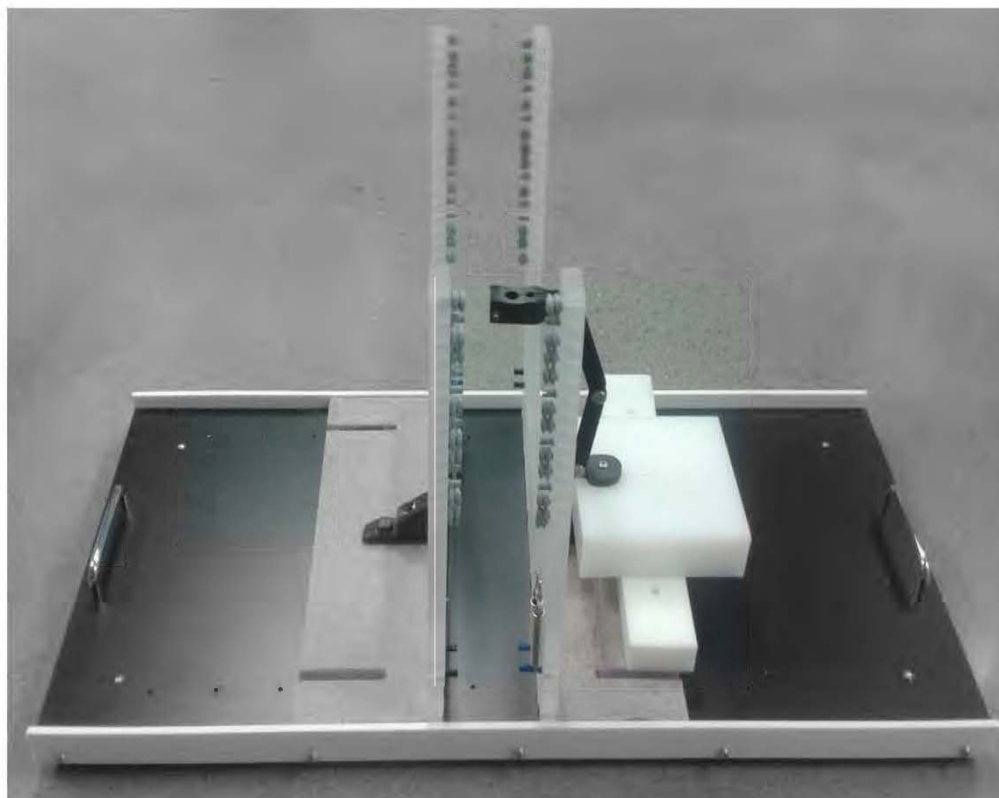


Figure 2.9: Support de fixation de l'échantillon et des capteurs utilisés

L'appareil de Grindosonic présente une sensibilité phénoménale et une précision de $\pm 0,01\%$ pour les matériaux homogènes. Par contre, pour les matériaux hétérogènes comme le bois, pour préserver cet avantage, chaque essai est répété plusieurs fois. Le calcul des différentes propriétés a été fait par 'le logiciel GenEmod' de Grindosonic, en se basant sur la fréquence moyenne et les dimensions de l'échantillon.

Les propriétés élastiques sont déterminées selon les différents modes de vibrations et pour trois types d'échantillons (A, B et C), selon la norme ASTM E1876-01 (ASTM, 2001) et la littérature (ASTM, 2001; Haines et al., 1996; Leite et al., 2012; Otani et al., 2015) (Figure 2.1). Selon chaque type d'échantillon, le tableau 2.3 montre les divers tests réalisés ainsi que les propriétés correspondantes.

Tableau 2.3: Propriétés élastiques déterminées par la méthode de résonance selon le type de l'échantillon et le mode de vibration utilisée

Type d'échantillon	Mode de vibration	Propriétés mesurées
Longitudinal (A)	Vibration longitudinale	$E_{r,L}$
	Vibration de flexion	$E_{rL,f}$
	Vibration de torsion	$G_{r,LR}$
Radial (B)	Vibration longitudinale	$E_{r,R}$
	Vibration de torsion	$G_{r,LT}$
Tangentiel (C)	Vibration longitudinale	$E_{r,T}$
	Vibration de torsion	$G_{r,RT}$

La détermination des coefficients de Poisson des matériaux orthotropes comme le bois par la méthode de résonance est très discutable. Tel que présenté dans la figure (2.10), un processus itératif a été appliqué, ce processus se base sur deux coefficients de Poisson : un coefficient initial donné selon le type du matériau (0.3 pour le bois) et un coefficient réel calculé par l'équation 2.19. Dans le cas où la différence entre les deux coefficients est d'au moins 2%, l'itération de processus s'arrête et la valeur du coefficient sera affichée (ASTM, 2001, 2012; Cossolino et Pereira, 2010; Song et al., 2017)

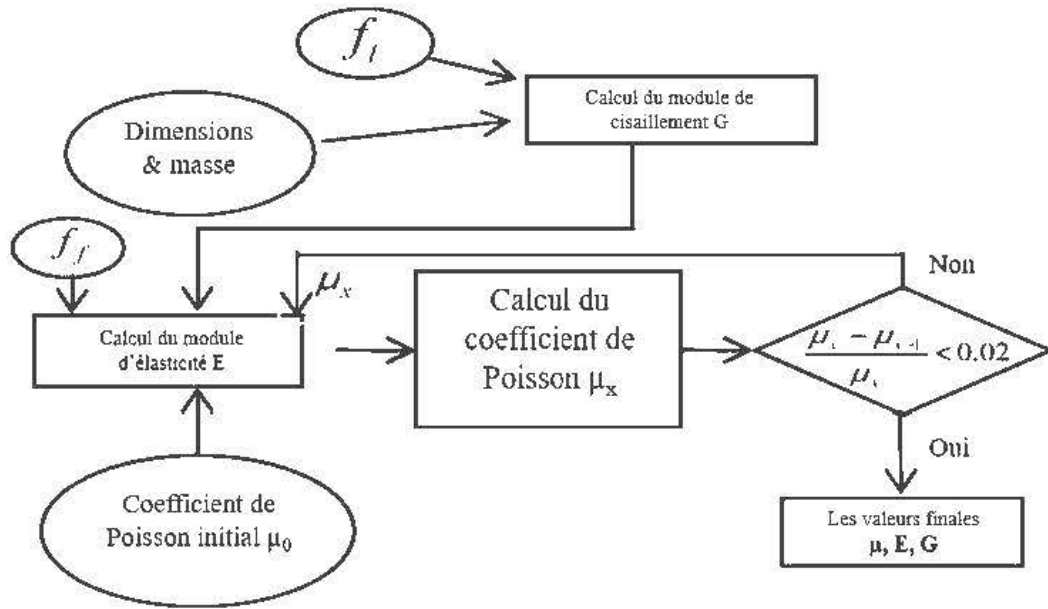


Figure 2.10: Processus itératif pour déterminer les coefficients de Poisson d'un matériau par la méthode de résonance (Song et al., 2017)

Pour la présente étude, on se base principalement sur la théorie de l'élasticité qui nous a permis de déterminer les six coefficients du Poisson en appliquant l'équation (2.24) pour les coefficients (v_{LR}, v_{LT}, v_{RT}) et l'équation (2.25) pour les coefficients (v_{RL}, v_{TL}, v_{TR}) (Cossolino et Pereira, 2010; Song et al., 2017):

$$v_{ij} = \frac{E_i}{2 G_{ij}} - 1 \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.24)$$

$$\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j} \text{ avec } i \neq j \text{ et } i, j = L, R, T \quad (2.25)$$

Avec :

- v_{ij} : Coefficient de Poisson mesuré dans le plan (ij) ;
- E_i : Module d'élasticité mesuré dans la direction (i), MPa ;
- G_{ij} : Module de cisaillement mesuré dans le plan (ij), MPa.

Par ailleurs, la bonne exécution de chaque mode consiste à placer correctement le point d'excitation et le point d'emplacement du capteur. Ce qui suit est une description concrète de la façon d'effectuer les divers modes de vibration en

indiquant les meilleurs emplacements correspondant pour mettre en place les capteurs et le coup de marteau.

2.3.2.2.1 *Méthode de résonance : mode de vibration longitudinale*

En utilisant le support construit, l'application de mode de vibration longitudinale implique la suspension de l'échantillon à 0,224 de sa longueur à l'une de ses deux extrémités au moyen de fils en plastique (Figure 2.11). À l'aide d'un marteau à boule métallique de taille moyenne, on tape au centre de la surface transversale de l'échantillon pour générer une vibration longitudinale au sein de l'échantillon. La détection de cette vibration se fait par un microphone situé au centre de l'autre surface transversale de l'échantillon (Figure 2.11).

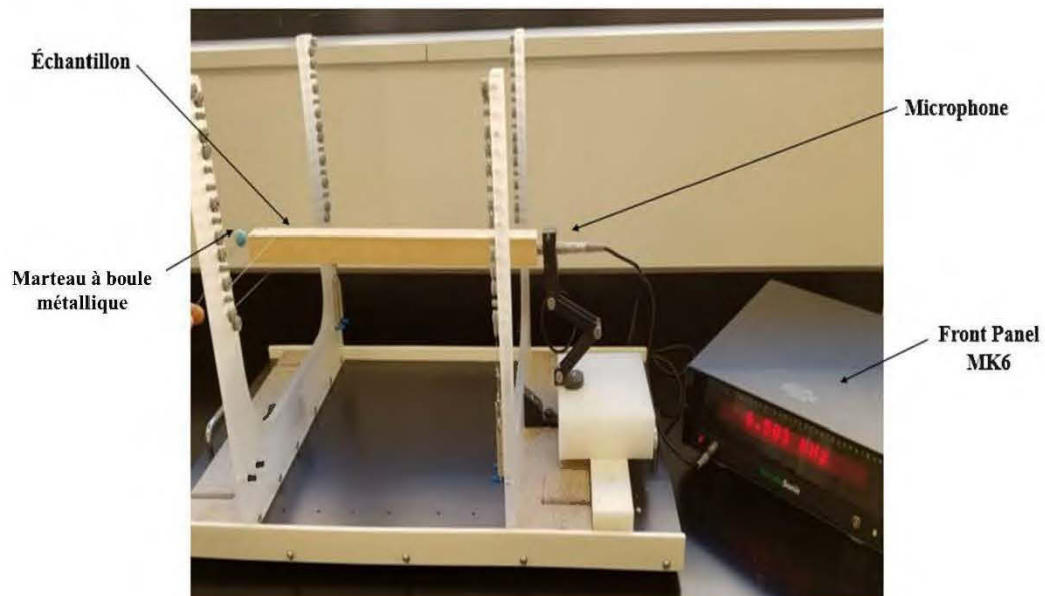


Figure 2.11: Illustration d'un mode de vibration longitudinale

2.3.2.2.2 *Méthode de résonance : mode de vibration de flexion*

Tel que pour la vibration longitudinale, l'échantillon est maintenu à 0,224 de sa longueur de chaque côté (Figure 2.12). Cette position est considérée comme la position nodale correspondant au mode fondamental, lequel est le premier mode propre de vibration de flexion. En utilisant les mêmes marteau et capteur, la figure (2.12) montre la façon de générer une vibration de flexion dans l'échantillon.

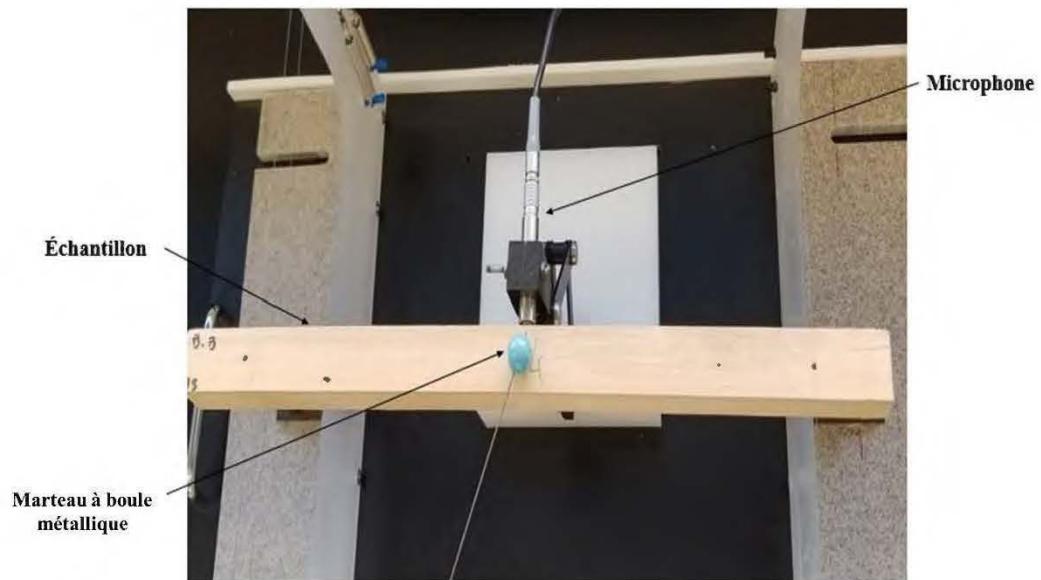


Figure 2.12: Illustration de mode de vibration de flexion dans le cas de la méthode de résonance

2.3.2.2.3 Méthode de résonance : mode de vibration de torsion

Pour introduire une vibration de torsion, on se réfère aux deux points nœuds de la vibration de flexion dont le point d'impact doit être au-dessous du nœud et le point de détecteur correspond exactement au deuxième nœud. La figure (2.13) représente la configuration du mode de vibration de torsion.

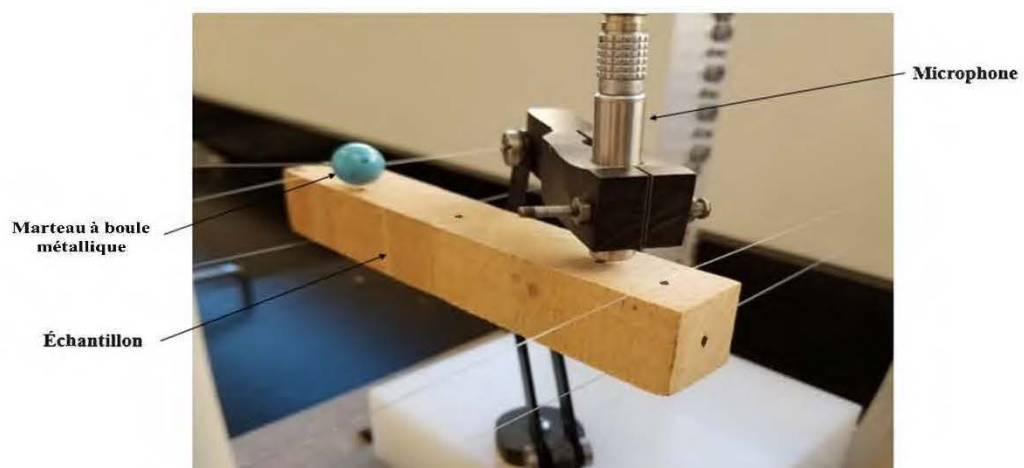


Figure 2.13: Illustration de mode de vibration de torsion dans le cas de la méthode de résonance

2.4 Analyse statistique

Pour chaque direction du bois (longitudinale, radiale et tangentielle), toutes les propriétés étudiées sont soumises à une analyse de variance (ANOVA). Les facteurs considérés (ou variables indépendantes) sont : l'essence du bois (épinette blanche, bouleau blanc, peuplier hybride, peuplier faux-tremble, pin gris, mélèze et thuya occidental) et le type de méthodes de mesure [méthodes destructives (flexion, compression), méthodes non destructives (ultrason, méthode de résonance)]. Les variables dépendantes (ou variables réponses) sont les propriétés mécaniques élastiques [modules d'élasticités (E_L , E_R et E_T) et de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}), et les coefficients de Poisson (ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{TR} , ν_{LT} et ν_{RT})]. Ces analyses permettent de mettre en évidence l'effet de l'essence et de la méthode de mesure sur les différentes propriétés indiquées.

Le modèle général est le suivant :

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i \times \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2.26)$$

Où Y_{ij} représente la valeur de la variable réponse (propriétés élastiques ou mécaniques) ; μ est l'effet moyen général (intercepte) ; α_i est l'effet de l'essence ; β_j est l'effet de la méthode de mesure ; $\alpha_i \times \beta_j$ est l'effet de l'interaction entre l'essence et la méthode de mesure ; et ε_{ij} l'erreur résiduelle.

Toutes les analyses sont exécutées à l'aide du logiciel SAS (SAS, 2018) en utilisant le modèle mixte (PROC MIXED). La signification statistique des effets fixes est déterminée à l'aide des tests F à $P \leq 0,05$. Le test Z (à $P \leq 0,05$) est utilisé pour déterminer la signification des erreurs. Pour chaque direction, de multiples comparaisons sont également faites par le test de *Tukey* pour déterminer les différences significatives entre les moyennes des essences et des méthodes de mesure pour chaque propriété étudiée (E_L , E_R , E_T , G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}). En considérant la direction du bois, des corrélations entre les propriétés mécaniques mesurées par les méthodes destructives (modules d'élasticité et de cisaillement statiques) et celles mesurées par les méthodes non destructives (modules d'élasticité et de cisaillement

dynamiques) sont également déterminées avec la matrice de corrélations de Pearson pour chaque essence, pour les feuillus et les résineux et pour toutes les essences confondues. Des corrélations entre le module d'élasticité dynamique ($E_{u,L}$ et $E_{r,L}$) et de flexion statique ($E_{s,f}$) et le module de rupture en flexion (MOR) sont également réalisées pour évaluer ces relations.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Modules d'élasticité

3.1.1 Étude du comportement statique du bois en compression selon trois axes par des méthodes non destructives (ultrason et résonance)

3.1.1.1 Analyse de variance

Le tableau 3.1 présente les résultats de l'analyse de variance (valeurs de F et de P) de différentes sources de variation (méthodes de mesure, essences du bois et leur interaction) du module d'élasticité pour les trois directions du bois (longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)). Pour chaque direction étudiée, les effets de la méthode, de l'essence et de l'interaction méthode-essence sur la variation du module d'élasticité sont très significatifs ($p < 0,001$) (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F (Z pour l'erreur) et P pour chaque source de variation du module d'élasticité selon la direction du bois (longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T))

Sources de variation	DDL	Variables dépendantes (module d'élasticité)					
		E _L ⁽¹⁾		E _R ⁽²⁾		E _T ⁽³⁾	
		F (Z pour l'erreur)	P > F (P > Z)	F (Z pour l'erreur)	P > F (P > Z)	F (Z pour l'erreur)	P > F (P > Z)
Essence	6	1080,19	<,0001	1321,70	<,0001	2535,04	<,0001
Méthode	2	969,70	<,0001	10633,7	<,0001	8260,06	<,0001
Essence* méthode	12	52,74	<,0001	689,96	<,0001	1052,50	<,0001
Erreur	609	17,45	<,0001	17,45	<,0001	17,45	<,0001

⁽¹⁾ E_L : module d'élasticité longitudinal

⁽²⁾ E_R : module d'élasticité radial

⁽³⁾ E_T : module d'élasticité tangentiel

3.1.1.2 Variation triaxiale des modules élastiques statiques et dynamiques

Le tableau 3.2 présente la variation triaxiale (L, R et T) des moyennes des modules d'élasticité statiques (déterminés par la méthode de compression) et dynamiques (mesurés par la méthode d'ultrason et de résonance) de différentes essences de la forêt boréale (épinette blanche, bouleau blanc, peuplier hybride, peuplier faux-tremble, pin gris, mélèze et thuya occidental). Pour chaque direction étudiée, le module d'élasticité varie significativement avec la méthode de mesure (compression, ultrason et résonance), ainsi qu'avec l'essence utilisée (Tableau 3.1).

De façon générale, on constate que, quel que soit la méthode utilisée, le module d'élasticité longitudinal (E_L) est très élevé par rapport au radial (E_R) ($> \times 10$) et au tangentiel (E_T) ($> \times 20$), respectivement (Bucur, 2006; Güntekin et al., 2015a; Handbook, 1999; Keunecke et al., 2007; Ross, 2010b). Ainsi, la variation triaxiale du module d'élasticité n'est pas similaire entre les essences du bois (Tableau 3.2). À titre d'exemple, pour le peuplier faux-tremble et dans le cas de la méthode de résonance, le E_L est 19 fois plus grand que E_R et 36 fois plus grand que E_T . Dans le cas du pin gris, la variation triaxiale est plus faible, ou le E_L est 9 fois plus grand que le E_R et 22 fois plus grand que le E_T , ce qui confirme le caractère anisotrope du bois (Dackermann et al., 2016; Gonçalves et al., 2011; Ross, 2010b).

Pour l'ensemble des feuillus, les valeurs moyennes d' $E_{c,L}$, $E_{c,R}$, $E_{c,T}$ sont égales à 9179, 621 et 230 MPa, respectivement (Tableau 3.2). Pour l'ensemble des résineux testés, les valeurs moyennes d' $E_{c,L}$, $E_{c,R}$, $E_{c,T}$ sont égales à 7384, 2885 et 223 MPa, respectivement (Tableau 3.2). Ces valeurs sont élevées par rapport aux valeurs rapportées dans la littérature. Cette surestimation s'explique par le fait que ces valeurs sont entièrement citées de manière empirique. Pour la même teneur en humidité (12%), les valeurs obtenues dans ce travail sont comparables à celles rapportées par Guitard et El Amri, (1987) (Tableau 1.3), avec une variation de plus de 30%. Cette variation a été également mentionnée par plusieurs travaux et a souvent été attribuée à la nature anisotrope et la variation naturelle du bois (Crespo et al., 2017). En prenant le bouleau blanc comme exemple, les modules statiques

d' $E_{c,L}$, $E_{c,R}$, $E_{c,T}$ sont respectivement d'environ 12216, 806 et 285 MPa (avec $MV = 585 \text{ kg/m}^3$) (Tableau 3.2), alors que les valeurs d' $E_{c,L}$, $E_{c,R}$, $E_{c,T}$ rapportées par Bodig et Jayne (1982) sont respectivement égales à 12045, 1069 et 516 MPa (avec $MV = 480 \text{ kg/m}^3$).

Par ailleurs, quelle que soit l'essence utilisée, la méthode d'ultrason montre les valeurs du module d'élasticité les plus élevées suivi par la méthode de résonance et la méthode destructive de compression, respectivement (Tableau 3.2). Cette variation est statistiquement significative (Tableau 3.1). Ces résultats concordent avec ceux de nombreux travaux (Bucur, 2006; Chiu et al. 2012; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et al., 2015a; Keunecke et al., 2007).

En effet, dans le cas des essais statiques (destructifs), un processus isotherme (température constante et uniforme) est impliqué durant la transformation physique (Crespo et al., 2017; Gonçalves et al., 2011). Pour assurer l'uniformité de la température, il doit y avoir transfert de chaleur, ou d'énergie thermique, entre le système de mesure et l'extérieur. Alors que, dans le cas des mesures dynamiques avec les outils non destructifs, le processus thermodynamique impliqué est dit adiabatique (aucun transfert thermique n'intervient entre le milieu extérieur et le système de mesure) (Crespo et al., 2017; Gonçalves et al., 2011). Ainsi, l'énergie reste quasiment constante dans le cas des essais statiques, où une force élastique (proportionnelle au déplacement) est exercée à court terme (Chiu et al., 2012; Crespo et al., 2017; Hassan et al., 2013; Karlinasari, Wahyuna, et Nugroho, 2008). Par conséquent, le bois est considéré comme étant un solide élastique (Hassan et al., 2013; Karlinasari et al., 2008). Néanmoins, l'énergie accroît progressivement dans le cas des essais dynamiques et dans lesquelles une application de force (proportionnelle à la vitesse) est plus longue (Chiu et al., 2012; Crespo et al., 2017; Hassan et al., 2013; Karlinasari et al., 2008). Dans ce cas, le comportement du bois est considéré comme étant un liquide visqueux et la variation est plus importante (Hassan et al., 2013; Karlinasari et al., 2008).

Tableau 3.2 : Variation triaxiale (longitudinale, radiale et tangentielle) des moyennes de modules d'élasticité statiques et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'espèce

Essences étudiées	MV ³ (kg/m ³)	Direction longitudinale			Direction radiale			Direction tangentielle			N ²
		E _{c,L} ⁴ (MPa)	E _{u,L} ⁵ (MPa)	E _{r,L} ⁶ (MPa)	E _{c,R} (MPa)	E _{u,R} (MPa)	E _{r,R} (MPa)	E _{c,T} (MPa)	E _{u,T} (MPa)	E _{r,T} (MPa)	
Bouleau blanc	585 (4,7) ¹	12216 (12,8) Aa ^{7,8}	18362 (1,6) Ab	16236 (5,1) Ac	806 (14,6) ADa	2110 (3,3) Ab	996 (20,7) Ac	285 (18) Aa	1189 (5) Ab	597 (9,2) Ac	30
Peuplier faux-tremble	425 (2,7)	10093 (24,1) Ba	14638 (4,6) Bb	13084(7,1) Bb	544 (17,8) BCa	1588 (4,6) Bb	683 (22,5) Ba	156 (29,1) BDa	538 (11,9) Bb	359 (2,8) Bc	30
Peuplier hybride	387 (7,3)	5229 (18,2) Ca	8773 (5,6) Cb	8230 (8,4) Cb	513 (13,8) BCDa	1500 (9,7) Bb	637 (20,8) Ba	250 (22,1) AEa	503 (11,6) Bb	337 (18,5) Bc	30
Mélèze laricin	665 (4,4)	10863 (12,7) ABa	23040 (9,1) Db	15349 (10) Ac	902 (20,9) Aa	5069 (2,5) Cb	982 (22,3) Aa	454 (25,5) Ca	2495 (3,1) Cb	576 (20,7) Ac	30
Pin gris	502 (6,7)	10225(14,9) Ba	17917 (11,5) Ab	13338 (17,7) Bc	631 (32,8) Ca	2466 (3,4) Db	1520 (12,6) Cc	166 (24,3) BDEa	1282 (5,2) Db	597 (15) Ac	30
Épinette blanche	372 (4,2)	5776 (17,8) Ca	10887 (7,1) Eb	9203 (17,7) Cb	374 (26,4) BDa	2094 (2,5) Eb	744 (16,5) Bc	151 (31,9) BDa	629 (5,3) Eb	222 (6,4) Ca	30
Thuya occidentale	304 (7,5)	2672 (19,6) Da	4271 (18,1) Fa	4106(21,6) Da	346 (23,7) Da	1913 (9,7) Fb	204 (17,7) Da	122 (59,8) Da	285 (13,3) Fb	136 (23,5) Da	30

¹ Coefficient de variation (%).

² Nombres d'échantillons utilisés pour chaque test.

³ Moyennes de la masse volumique par essence.

⁴ E_{c,i} Module d'élasticité en compression dans la direction i avec i = L (longitudinale), R (radiale) ou T (tangentielle)

⁵ E_{u,i} Module d'élasticité mesuré par l'ultrason dans la direction i avec i = L (longitudinale), R (radiale) ou T (tangentielle)

⁶ E_{r,i} Module d'élasticité mesuré par la résonance dans la direction i avec i = L (longitudinale), R (radiale) ou T (tangentielle)

⁷ Les lettres majuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les essences pour chaque direction (deux essences ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

⁸ Les lettres minuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les méthodes pour chaque direction (deux méthodes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

Pour chaque direction, la comparaison des moyennes des modules d'élasticité (test de Tukey) montre que la différence est très significative entre les trois méthodes de mesure (Tableau 3.2). Les moyennes pour le module d'ultrason, toutes les essences confondues, ($E_{u,L}$, $E_{u,R}$ et $E_{u,T}$) sont d'environ 41%, 75% et 77% supérieures à ceux de compression ($E_{c,L}$, $E_{c,R}$ et $E_{c,T}$), respectivement. Ces valeurs sont similaires à celles rapportées par plusieurs travaux (Baar et al., 2015; Chauhan et Sethy, 2016; Crespo et al., 2017). D'autres études ont montré une augmentation de 10 à 20% du module longitudinal mesuré par ultrason ($E_{u,L}$) par rapport à celui de compression ($E_{c,L}$) (Güntekin et al., 2015b; Haines et al., 1996; Smulski, 2007). Selon De Oliveira *et al.* (2012), la source la plus probable de cette sous-estimation entre $E_{u,L}$ et $E_{c,L}$ est qu'on ne tient pas compte du coefficient de Poisson dans les calculs des deux modules déterminés respectivement par ultrason et par compression statique. La vitesse d'ultrason accroît aussi progressivement avec l'augmentation de la fréquence de l'onde longitudinale utilisée. Pour cette raison, les valeurs trouvées de $E_{u,L}$ sont fortement influencées par le choix de la fréquence de l'onde pénétrée dans l'échantillon (Baar et al., 2015; Bucur et Archer, 1984; Chauhan et Sethy, 2016). Le choix de la fréquence dépend considérablement de l'atténuation des ondes qui varie selon l'essence étudiée, la direction du bois, la dimension de l'échantillon utilisé et aussi de l'agent de couplage appliqué (De Oliveira et al., 2002).

Par ailleurs, la différence entre les moyennes des modules statiques de compression et celles des modules dynamiques mesurés par la méthode de résonance est moins importante (Tableau 3.2). Les modules de résonance ($E_{r,L}$, $E_{r,R}$ et $E_{r,T}$) sont approximativement supérieurs de 28%, 29% et 44% à ceux de compression ($E_{c,L}$, $E_{c,R}$ et $E_{c,T}$), respectivement. Ainsi, et pour les trois directions, les valeurs des modules dynamiques, mesurés par la méthode de résonance sont plus proches et comparables à celles des modules statiques que celles des modules dynamiques mesurés par ultrason. Ceci est expliqué par le fait que la vitesse acoustique, déterminée par la vibration longitudinale, présente la rigidité globale de l'échantillon entier soumis à l'essai (Chauhan et Sethy, 2016). En outre, comme dans le cas des essais statiques, les vitesses de résonance restent liées aux variations

localisées dans l'échantillon. Cependant, les vitesses des ondes ultrasoniques suivent toujours le chemin disponible le plus rapide, par exemple, la présence de bois final est considérée comme étant le chemin le plus rapide (Baar et al., 2012; Chauhan et Sethy, 2016). Par conséquent, la vitesse d'ultrason présente la rigidité moyenne du chemin suivi, et plus spécifiquement, la rigidité de l'échantillon de la partie traversée par l'onde. Cela peut expliquer la grande variation du module d'ultrason par rapport à ceux de compression ($>40\%$) et de résonance ($>18\%$) (Baar et al., 2012; Chauhan et Sethy, 2016). En outre, la variation observée entre les modules dynamiques mesurés par l'ultrason et ceux mesurés par la méthode de résonance ($>18\%$), pour la même direction, peut être aussi attribuée à la différence entre les fréquences d'ultrason (qui sont de l'ordre de MHz) et les fréquences de résonance (qui sont de l'ordre kHz) (Chauhan et Sethy, 2016; Haines et al., 1996; Montero et al., 2015). Généralement, plus la fréquence est élevée, plus la vitesse de l'onde (acoustique ou ultrasonique) est élevée, et par conséquent la valeur de module mesuré augmente avec la fréquence de l'onde pénétrée (Bucur, 2006; Chauhan et Sethy, 2016; Haines et al., 1996; Montero et al., 2015).

D'autre part, pour chaque direction, le module d'élasticité varie significativement selon l'essence ($p < 0,001$) (Tableau 3.1). Toutefois, et indépendamment de la méthode, l'ampleur de cette variation n'est pas de la même grandeur pour toutes les essences étudiées et la direction considérée (Tableau 3.2). À titre d'exemple, la différence entre les moyennes d' $E_{c, L}$ est non significative entre le bouleau et le mélèze laricin, ainsi qu'entre le peuplier faux-tremble, le mélèze laricin et le pin gris (Tableau 3.2).

Généralement, les modules d'élasticité les plus élevés sont obtenus pour les essences les plus denses, telles que le bouleau blanc pour les feuillus et le mélèze laricin pour les résineux. Toutefois, cette relation n'est pas aussi évidente pour toutes les essences étudiées. Dans plusieurs cas, les valeurs élevées des vitesses acoustiques mesurées (méthodes d'ultrason et de résonance) n'admettent pas une masse volumique élevée (Tableau 3.2). Selon Barr *et al.* (2012, 2015), une augmentation de la masse volumique entraîne souvent une augmentation de la

distribution des contraintes internes dans le bois et par conséquent une augmentation de sa rigidité. En contrepartie, plusieurs autres travaux ont montré que la relation entre la masse volumique du bois et la vitesse acoustique n'est pas aussi claire (Malecki, 2013 ; De Oliveira et Sales, 2006).

Contrairement aux résultats de Malecki (2013), les travaux de De Oliveira et Sales (2006) ont indiqué qu'il existe une relation proportionnelle entre ces deux paramètres. Ils ont expliqué ces résultats par le fait que la vitesse acoustique est affectée par le module spécifique de l'élasticité, qui est le rapport du module élastique par la masse volumique (Baar *et al.*, 2012). Ceci signifie que tout dépend de l'effet de la variation de la masse volumique sur la rigidité du bois. Les deux paramètres (vitesse acoustique et masse volumique) sont inversement proportionnels dans le cas où une augmentation de la masse volumique ne s'accompagne pas d'une augmentation du module d'élasticité (Baar *et al.*, 2012; Ilic, 2003). Cependant, ils peuvent être proportionnels dans le cas où une augmentation de la masse volumique s'accompagne d'une augmentation du module d'élasticité (Baar *et al.*, 2012; Ilic, 2003). Cette proportionnalité a été trouvée plus particulièrement dans le cas des études réalisées au sein de l'espèce elle-même (c.-à-d. les études faites sur le bois initial et le bois final des espèces tropicales du Brésil) (De Oliveira et Sales, 2006). Plusieurs autres travaux ont montré aussi qu'il n'y a aucune relation entre la masse volumique du bois et la vitesse acoustique telle que le cas de la présente étude (Baar *et al.*, 2012; Beall, 2002; Güntekin et Aydın, 2016a; Ilic, 2003; Mishiro, 1996; Smulski, 2007). L'absence d'une relation claire entre ces deux propriétés indépendantes est attribuée principalement à l'influence de la structure anatomique des essences étudiées. En effet, la masse volumique reflète la quantité de substance de la paroi cellulaire réelle présentée dans un volume donné (Smulski, 2007). Ce volume varie énormément puisqu'il contient un volume de vide formé par les lumens, les espaces intercellulaires et les micro-vides cellulaires (Smulski, 2007). En contrepartie, les ondes acoustiques se propagent dans le bois seulement à travers la substance de la paroi cellulaire qui a une masse volumique constante d'environ 1,5 pour toutes les essences (Smulski, 2007).

Dans ce travail, les valeurs moyennes de vitesses ultrasoniques mesurées varient pour les feuillus de 4819 à 5906, 1887 à 1995 et 1130 à 1417 en (m/s) dans la direction longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T), respectivement. Pour les résineux, les vitesses d'ultrason (m/s) obtenues dans les trois directions L, R et T se situent dans les intervalles de 3819 à 5937, 2206 à 2735 et 987 à 1919, respectivement. Ces différents intervalles sont comparables à ceux trouvés dans la littérature (Gomes et al., 2013; Güntekin et Aydın, 2016b; Güntekin et al., 2015b; De Oliveira et al., 2002). De plus, la variation de ces vitesses est relativement faible (le coefficient de variation (CV) est inférieur ou égal à 9%). Par conséquent, la variation ($\leq 11\%$) de modules dynamiques d'ultrason est faible dans les trois directions (Tableau 3.2). Ces résultats sont semblables à ceux de Bucur (2006), qui a utilisé des échantillons carrés de 16 mm de dimension. Plusieurs travaux ont montré que moins le spécimen du bois étudié contient d'inclinaison de fibres et de courbures des anneaux de croissance, plus que la variation de vitesse d'ultrason est faible (Gonçalves et al., 2011, 2014). Pour la méthode de résonance, la variation du module dynamique est plus importante surtout pour les directions radiale et tangentielle (Tableau 3.2). Pour les tests statiques de compression (Tableau 3.2), les plus grandes variations du module d'élasticité étaient encore dans les deux directions (radiale ou tangentielle). Selon Gonçalves *et al.* (2011), cette variation est principalement due à l'influence de la courbure de le cerne de croissance sur les valeurs du module élastique statique (Gonçalves et al., 2011).

Les valeurs moyennes du module de compression trouvées dans cette étude sont aussi comparables à celles rapportées par Bodig et Jayne (1982). La légère variation observée est attribuée à la variation de la masse volumique de différentes essences étudiées (Crespo et al., 2017).

Le calcul des ratios d'anisotropie ($E_L : E_R : E_T$) permet de valider et évaluer les méthodes de mesure (Gonçalves et al., 2011; Daniel Guitard, 1987; de la Cruz-Sanchez, 2006). Les ratios E_L / E_R , E_L / E_T et E_R / E_T ont été calculés pour chaque essence étudiée et pour chaque méthode de mesure (Tableau 3.3). Pour la majorité des espèces, le rapport E_R / E_T est presque constant et la valeur est autour de 3, quelle

que soit la méthode utilisée. Selon Keunecke *et al.* (2007), l'existence d'une fraction volumique en rayons ligneux entraîne souvent une augmentation de la rigidité radiale par rapport à la rigidité tangentielle. Pour cette raison, le ratio E_L/E_R est plus faible que le ratio E_L/E_T . L'invariabilité du rapport E_R/E_T permet de déduire que, de façon générale, les ondes acoustiques et les forces statiques appliquées sont influencées par les mêmes éléments anatomiques notamment les rayons ligneux.

Pour la même méthode, généralement, les essences ayant une masse volumique comparable ont des ratios E_R/E_T similaires (Tableau 3.3). À titre d'exemple, pour le bouleau blanc ($MV = 585 \text{ kg/m}^3$) et le mélèze laricin ($MV = 665 \text{ kg/m}^3$), le rapport E_R/E_T est égal à 2 pour les méthodes non destructives et 3 pour le test de compression. Ce ratio est un peu plus élevé (7) pour le thuya occidental qui possède la MV la plus faible (304 kg/m^3) dans le cas de l'ultrason. Ceci montre que l'effet de la MV sur la variation du ratio E_R/E_T est plus important que la structure anatomique. Plus la MV est élevée, plus les rigidités radiales et tangentielles sont élevées (Gonçalves *et al.*, 2011).

Par ailleurs, le tableau 3.3 indique aussi que l'orthotropie des espèces feuillues étudiées est supérieure à celle des résineux. En utilisant la moyenne, les ratios de E_L/E_R et E_L/E_T sont égaux à 15 et 43, respectivement pour les feuillus comparés à 13 et 37, respectivement pour les résineux. Ces résultats sont conformes à la littérature, puisqu'habituellement l'anisotropie des feuillus est plus importante que celle des résineux, en raison de la grande complexité de la structure anatomique des feuillus (Crespo *et al.*, 2017; Gonçalves *et al.*, 2011; De Oliveira *et al.*, 2002; Ross, 2010). Selon Gachet et Guitard (2006), l'anisotropie élastique d'un tissu ligneux (E_L/E_T) résulte d'une part d'un effet géométrique associé à la morphologie de la trachéide et d'autre part de l'anisotropie de la double paroi cellulaire, principalement gouvernée par l'orientation des microfibrilles (AMF) de cellulose dans la sous-couche pariétale S2. À l'inverse des résultats de Gonçalves *et al.* (2011), dans le présent travail, les ratios E_L/E_R et E_L/E_T calculés pour le test de compression sont comparables à ceux déterminés par la méthode de résonance. Ces

ratios sont moins importants pour l'ultrason, dus principalement aux valeurs élevées de E_R et E_T trouvées par la méthode d'ultrason comparé aux méthodes de compression et de résonance (Tableau 3.2).

De façon générale, dans cette étude, les ratios E_L/E_R et E_R/E_T trouvés sont comparables à ceux rapportés dans la littérature pour les trois méthodes (Tableau 1.3) (Crespo et al., 2017; Keunecke et al., 2007). Dans le cas d'anisotropie élastique (E_L/E_T), seulement les valeurs calculées par la méthode d'ultrason sont semblables à celles rapportées dans la littérature, alors que celles mesurées par les méthodes de résonance et de compression sont plus importantes (Tableau 3.3) (Crespo et al., 2017; Keunecke et al., 2007). Selon Daniel (1987), les ratios statiques de compression E_L/E_R , E_L/E_T et E_R/E_T sont approximativement égaux à 8, 14 et 2, respectivement pour les feuillus. Cependant, pour les résineux, selon Halasz et Scheer (1986), ces ratios statiques de compression sont égaux à 12, 20 et 2, respectivement (Crespo et al., 2017; Keunecke et al., 2007). Dans cette étude, les valeurs de E_L/E_R et E_R/E_T sont comparables à ces travaux (Tableau 1.3), alors que celles de E_L/E_T sont plus élevées pour les méthodes de résonances et de compression (elles varient de 22 à 41 et de 21 à 65, respectivement). Pour la méthode d'ultrason, l'anisotropie élastique (E_L/E_T) est comparable à ces travaux (Crespo et al., 2017; Keunecke et al., 2007) et elle est égale à 20 pour les feuillus et 14 pour les résineux.

Dans l'ensemble, contrairement à la méthode de résonance et de compression, les trois ratios calculés par la méthode d'ultrason sont relativement comparables à ceux rapportés (Tableau 1.3). Des mêmes conclusions sont rapportées par Crespo *et al.* (2017). On peut alors constater que la méthode ultrasonique semble être la méthode la plus propice pour mesurer les modules d'élasticité du bois et ainsi valider l'hypothèse que le bois est un matériau orthotrope. Ceci revient au fait que les mesures ultrasoniques selon les trois directions sont faites sur le même échantillon, offrant donc moins de variation (Crespo et al., 2017).

Tableau 3.3 : Les ratios d'anisotropie calculés (E_L/E_R , E_L/E_T et E_R/E_T) en fonction de l'essence et de la méthode de mesure

Essence étudiée	Méthode utilisée	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T
Bouleau blanc	Méthode d'ultrason	9	15	2
	Méthode de résonance	16	27	2
	Essai de compression	15	43	3
Peuplier faux-tremble	Méthode d'ultrason	9	27	3
	Méthode de résonance	19	36	2
	Essai de compression	19	65	3
Peuplier hybride	Méthode d'ultrason	6	17	3
	Méthode de résonance	13	24	2
	Essai de compression	10	21	2
Mélèze laricin	Méthode d'ultrason	5	9	2
	Méthode de résonance	16	27	2
	Essai de compression	12	24	2
Pin gris	Méthode d'ultrason	7	14	2
	Méthode de résonance	9	22	3
	Essai de compression	16	62	4
Épinette blanche	Méthode d'ultrason	5	17	3
	Méthode de résonance	12	41	3
	Essai de compression	15	38	2
Thuya occidental	Méthode d'ultrason	2	15	7
	Méthode de résonance	20	30	2
	Essai de compression	8	22	3

En contrepartie, trois types d'échantillons ont été utilisés pour les mesures statiques (compression) et de résonance (Figure 2.1). Selon Gachet et Guitard (2006), le comportement élastique du bois est marqué par deux particularités : d'une part, la très grande rigidité spécifique dans la direction longitudinale, et d'autre part, la très forte anisotropie élastique (E_L/E_T). Dans le cas des résineux, une valeur de E_L/E_T proche de 20 est considérée comme une limite de l'anisotropie tissulaire du fait de

la présence de rayons ligneux, ce qui contribue à l'augmentation de la rigidité radiale (E_R) au détriment de la rigidité longitudinale (E_L).

3.1.1.3 Prédiction triaxiale des modules d'élasticité statiques en compression par les modules dynamiques mesurés par les méthodes d'ultrason et de résonance

Des modèles de prédiction du module d'élasticité statique en compression à partir des modules d'élasticité dynamiques mesurés par les méthodes de résonance et d'ultrason sont établis pour chaque direction du bois (L, R, T), toutes essences confondues (Figures 3.1- 3.3). Pour la direction longitudinale, la figure 3.1 montre que la relation entre le module d'élasticité en compression ($E_{c,L}$) et ceux déterminés par l'ultrason ($E_{u,L}$) et la résonance ($E_{r,L}$) est parfaitement linéaire et très forte [les coefficients de détermination sont très élevés ($R^2 \approx 1$)]. Toutefois, cette corrélation est plus importante pour la méthode de résonance ($E_{r,L}$) comparée à celle d'ultrason ($E_{u,L}$). Le coefficient de détermination (R^2) entre $E_{c,L}$ et $E_{r,L}$ et $E_{c,L}$ et $E_{u,L}$ est égal à 0,92 et 0,80, respectivement.

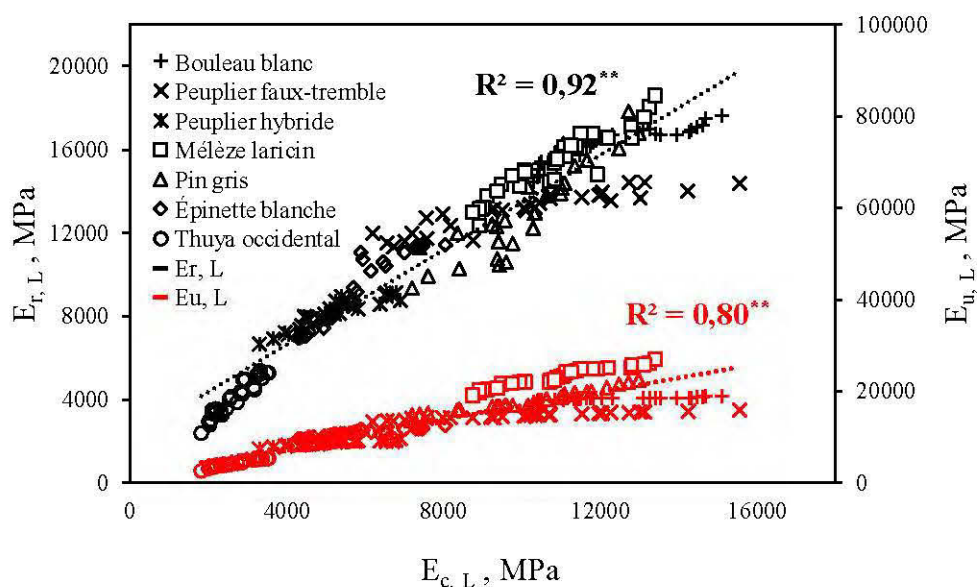


Figure 3.1: Corrélation entre le module statique en compression ($E_{c,L}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r,L}$) et d'ultrason ($E_{u,L}$) pour la direction longitudinale

Les mêmes conclusions sont soulevées, en considérant chaque espèce de façon individuelle que ce soit pour les résineux, ou pour les feuillues (Tableau 3.4). Les coefficients de détermination entre $E_{c,L}$ et $E_{u,L}$ sont comparables que ceux entre $E_{c,L}$ et $E_{r,L}$ (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : Coefficients de détermination (R^2) calculés entre ($E_{c,L}$ et $E_{u,L}$) et ($E_{c,L}$ et $E_{r,L}$) pour chaque essence individuelle et pour l'ensemble des résineux et des feuillus

Essence étudiée	Relation étudiée	Équation de régression ($y = A x + B$)	R^2
Bouleau blanc	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 0,17 (E_{u,L}) + 16281$	0,85
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 0,48 (E_{r,L}) + 10406$	0,82
Peuplier faux-tremble	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 0,27 (E_{u,L}) + 11915$	0,95
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 0,35 (E_{r,L}) + 9607$	0,82
Peuplier hybride	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 0,47 (E_{u,L}) + 6320$	0,81
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 0,64 (E_{r,L}) + 4820$	0,84
Ensemble des feuillus	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,06 (E_{u,L}) + 4156$	0,83
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 0,94 (E_{r,L}) + 3865$	0,88
Mélèze laricin	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,47 (E_{u,L}) + 7042$	0,95
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,04 (E_{r,L}) + 4098$	0,87
Pin gris	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,30 (E_{u,L}) + 4620$	0,93
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,41 (E_{r,L}) - 1101$	0,83
Épinette blanche	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 0,72 (E_{u,L}) + 6751$	0,91
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,46 (E_{r,L}) + 688$	0,90
Thuya occidental	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,45 (E_{u,L}) + 400$	0,97
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,61 (E_{r,L}) - 206$	0,91
Ensemble des résineux	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,99 (E_{u,L}) + 666$	0,95
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,28 (E_{r,L}) + 1087$	0,96
Toutes les essences confondues	$E_{c,L}$ vs $E_{u,L}$	$E_{c,L} = 1,51 (E_{u,L}) + 1665$	0,80
	$E_{c,L}$ vs $E_{r,L}$	$E_{c,L} = 1,14 (E_{r,L}) + 2084$	0,92

En concordance avec Baar *et al*, (2015), cette étude révèle l'exactitude et l'utilité de ces deux outils non destructifs (résonance et ultrason) pour estimer le module d'élasticité longitudinal en compression, notamment la méthode de résonance qui est la méthode la plus précise (Tableau 3.4). Cet aspect ne néglige pas l'importance de la méthode d'ultrason surtout au niveau de l'étude de chaque espèce individuelle

et aussi au niveau de sa performance et de son potentiel pour des usages sur site (Baar et al., 2015).

Certes, le choix d'utiliser une méthode non destructive pour mesurer le module dynamique dépend du type d'application, mais la précision de la prédiction du module statique en fonction du module dynamique reste toujours relative à plusieurs autres facteurs, particulièrement la méthode choisie, l'essence étudiée et la teneur en humidité du bois (Hering et al., 2012; Jiang et al., 2017; Keunecke et al., 2007). Indépendamment de ces facteurs, plusieurs chercheurs affirment que les valeurs du coefficient de corrélation entre le module statique et celui dynamique (R^2) sont souvent supérieures à 0,80 (Güntekin et al., 2015a; Lourenço et al., 2007; Wang et al., 2007b).

L'explication plausible à cette forte corrélation revient principalement à des attributs structuraux du bois, ainsi qu'à ses composants. Du point de vue structural, l'agencement fibreux du bois joue un rôle vital pour la propagation des ondes acoustiques dans la direction longitudinale. Le bois est constitué de 90% de cellules axiales qui sont les trachéïdes pour les résineux et les fibres pour les feuillues (Essien et al., 2017; Hasegawa et al., 2011). La facilité d'introduire une onde acoustique et sa propagation dans cet axe du bois dépendent principalement des caractéristiques des cellules axiales (Keunecke et al., 2007). En fait, ces cellules sont considérées comme étant des résonateurs acoustiques élémentaires (Keunecke et al., 2007). La continuité de la propagation des ondes acoustiques est assurée par leur arrangement. De façon plus spécifique, et du point de vue moléculaire, cette continuité de propagation des ondes est maintenue par la continuité des régions cristallines dans la paroi cellulaire, due à la présence pertinente de la cellulose tout au long de l'axe longitudinal (Essien et al., 2017; De Oliveira et al., 2002). Relativement à ce point, la cellulose du bois est le polymère le plus dominant qui définit la rigidité longitudinale de la paroi cellulaire, principalement celle de la couche S2 (Essien et al., 2017; Hori et al., 2002).

De façon plus spécifique, après la masse volumique du bois, l'AMF de la cellulose dans la paroi cellulaire est le deuxième facteur qui influence le plus les propriétés mécaniques du bois, en particulier sa rigidité et sa résistance. En effet, plus l'AMF est faible, plus le module d'élasticité est important. Ceci revient au fait que la contrainte appliquée s'appose parallèlement aux chaînes de cellulose, d'où une plus grande résistance du matériau et une déformation plastique plus faible avant la rupture (Bergander et Salmén, 2002; Essien et al., 2017; Gindl et Schöberl, 2004). Cet AMF (par rapport à l'axe longitudinal des cellules) a le même effet sur la transmission de l'énergie acoustique que sur la rigidité statique du bois. Plus l'angle est faible, plus la transmission de l'énergie acoustique est facile et par conséquent, l'onde se propage rapidement dans l'échantillon (Essien et al., 2017; Hasegawa et al., 2011; De Oliveira et al., 2002).

Selon plusieurs études, c'est l'AMF dans la sous-couche S2 qui est considéré comme l'un des paramètres prédominants qui affectent considérablement les caractéristiques mécaniques du bois, ainsi que la propagation des ondes à l'intérieur du bois et par conséquent l'anisotropie élastique d'un matériau (Hasegawa et al., 2011; Ilic, 2003). Ceci est attribué au volume important de la couche S2 au niveau de la paroi cellulaire (elle présente 83% de la paroi) (Essien et al., 2017), ainsi qu'au taux élevé de cristallisation de la cellulose dans cette couche S2. Cette couche assure donc la conductance pour la réponse acoustique et élastique du bois (Essien et al., 2017; Gindl et Schöberl, 2004).

En d'autres termes, les ondes acoustiques sont contrôlées et influencées par les mêmes caractéristiques du bois qui touchent grandement la rigidité longitudinale, d'où la grande précision des outils destructifs exploités dans ce présent travail pour prédire le module statique longitudinal (en compression parallèle) ($R^2 > 0,80$). Ceci n'est pas vrai pour les modules radial (R) et tangentiel (T) et où les coefficients de détermination R^2 entre les modules statiques et dynamiques pour chaque direction sont faibles à moyens (R^2 varie entre 0,23 et 0,55) (Figures 3.2 et 3.3).

Pour la direction radiale, la relation entre le module d'élasticité statique déterminé par le test de compression ($E_{c,R}$) et le module d'élasticité dynamique obtenu par la méthode d'ultrason (ondes longitudinales) ($E_{u,R}$) ou celle de résonance ($E_{r,R}$) est faible ($R^2=0,23$ et $0,34$, respectivement).

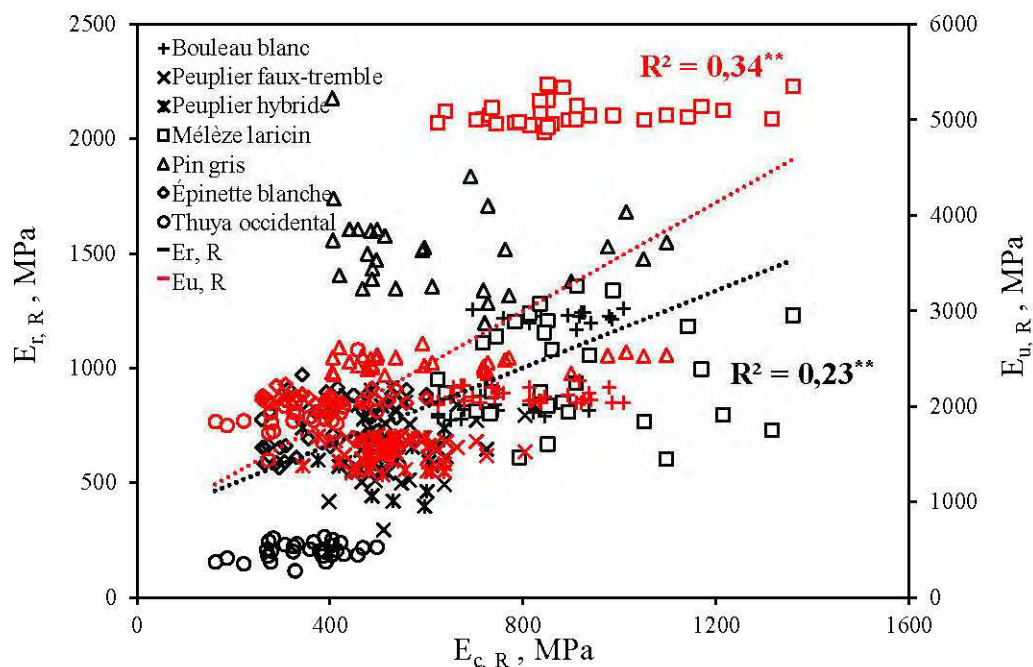


Figure 3.2: Relation entre le module d'élasticité statique en compression ($E_{c,R}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r,R}$) et d'ultrason ($E_{u,R}$) pour la direction radiale

L'absence d'une relation forte entre le module statique et dynamique selon la direction radiale est accordée aux caractéristiques structurales relatives à cette direction. La forme et la disposition des éléments du bois dans la direction axiale (sens de l'axe) et dans la direction radiale (de la moelle à l'écorce) semblent être les éléments clés qui contrôlent la diffusion des ondes dans le matériau bois.

Selon Feio (2006), et en tenant compte de la disposition radiale des éléments du bois, l'onde propagée se réfracte au niveau des limites des cernes de croissance traversés (Feio, 2006). En effet, chaque limite de ces cernes est considérée comme étant une nouvelle interface pour l'onde incidente. Par ailleurs, un cerne annuel est formé par une fraction de bois initial et une autre fraction de bois final (Hasegawa

et al., 2011). Ces deux types du bois sont distincts au niveau du diamètre du lumen et de l'épaisseur de la paroi cellulaire (Hasegawa et al., 2011; Hori et al., 2002). Le bois initial se compose de cellules à lumen plus larges, mais à faible paroi cellulaire, alors que le bois final est constitué de cellules à lumen plus étroites, mais à paroi cellulaire plus épaisse. La transition physiologique du bois initial au bois final s'accompagne non seulement par des modifications morphologiques, mais également d'une diminution importante de l'AMF moyenne dans la paroi cellulaire (Gachet et Guitard, 2006). Par conséquent, la masse volumique est plus élevée au niveau du bois final par rapport au bois initial (Hasegawa et al., 2011). La variation de la masse volumique au niveau des cernes induit également une réfraction de l'onde pénétrée pour chaque cerne. Ainsi, une partie de l'onde incidente sera réfléchi, alors que la partie restante sera transmise au cerne suivant (Feio, 2006). De même, la différence entre le bois initial et celui final peut aussi entraîner une variation au niveau de l'impédance acoustique (Bucur, 1980; Le Clezio et al., 2010). En effet, l'onde va se propager dans deux milieux (bois initial et bois final) ayant une impédance acoustique différente (Bucur, 1980; Le Clezio et al., 2010). Pour cette raison, la réflexion partielle de l'onde à chaque interface devient de plus en plus importante, et par conséquent, l'onde perd rapidement son énergie. De ce fait, la dissipation de l'énergie acoustique accroît au fur et à mesure de déplacement de l'onde d'un cerne à un autre (Feio, 2006).

Sur le plan moléculaire, les principaux polymères agrégés dans la direction transversale sont la lignine et l'hémicellulose (De Oliveira et al., 2002). La présence de la lignine a un effet majeur sur la trajectoire de propagation de l'onde. La structure tridimensionnelle et la faible masse volumique de ce composant moléculaire sont les raisons principales de la diffusion aléatoire de l'onde (Essien et al., 2017). Cette dispersion de l'onde contribue ainsi à la perte rapide de l'énergie acoustique. Face à la cellulose, l'absorption de l'énergie par la lignine a des effets indésirables, car l'existence de la lignine entrave la voie parcourue par l'onde (Essien et al., 2017). Tout cela fait de cet élément moléculaire un dispersant de l'onde propagée.

La conductance acoustique d'hémicellulose est quasiment élevée aussi, mais reste toujours moins importante que celle de la cellulose (Essien et al., 2017). Cette bonne conductance d'hémicellulose soutient l'onde pour atteindre finalement la cellulose en passant par la lignine (Essien et al., 2017). La présence de ces deux polymères (la lignine et l'hémicellulose) augmente par conséquent l'apparition des régions amorphes (De Oliveira et al., 2002), ce qui explique la forte atténuation de l'onde dans cet axe transversal du bois (De Oliveira et al., 2002).

En outre, il convient de noter l'importance de la morphologie structurale de la paroi cellulaire sur la variation de l'onde et sur la rigidité latérale du bois. De ce fait, Bergander et Salmén (2002) prouvent qu'une augmentation de l'AMF dans les couches S1 et S3 de la paroi cellulaire réduit considérablement le module transversal du bois. Également, ces deux couches (S1 et S3) ont un impact significatif sur la perturbation du chemin suivi par l'onde (Bergander et Salmén, 2002; Hori et al., 2002). Cependant, bien que les éléments affectant la rigidité du bois, soumis à une charge transversale, soient les mêmes éléments affectant la variation de l'onde, la prédiction radiale d'un module statique en se basant sur des modules dynamiques reste toujours incertaine.

Contrairement aux éléments longitudinaux qui fournissent un parcours régulier pour l'onde acoustique, tous les éléments transversaux contribuent à bloquer l'onde pénétrée et agissent ainsi comme des obstacles dans le chemin suivi par l'onde (De Oliveira et al., 2002).

Par ailleurs, la rigidité tangentielle est souvent influencée par les mêmes éléments affectant la rigidité radiale (De Oliveira et al., 2002; Via et al., 2009). De même pour la direction tangentielle, toutes ces particularités structurales expliquent le fait qu'il n'y a pas de relation entre le module statique et les modules dynamiques (De Oliveira et al., 2002). La figure 3.3 montre que le coefficient de corrélation trouvé est toujours inférieur à 0,5 [R^2 est égal à 0,27 entre $E_{c,T}$ et $E_{r,T}$ et 0,55 entre $E_{c,T}$ et $E_{u,T}$]. Cependant, la différence la plus importante entre les deux directions R et T réside dans la présence radiale des rayons ligneux (Feio, 2006; Hasegawa et al.,

2011). Ces rayons ligneux sont reconnus comme étant des éléments de continuité de chemin parcouru par l'onde dans la direction radiale du bois (Feio, 2006; De Oliveira et al., 2002). Par contre, pour la direction tangentielle, ces rayons agissent comme des obstacles pour l'onde, ce qui explique que ces rayons est à l'origine d'une dispersion plus importante des ondes dans cette direction (Feio, 2006; Hasegawa et al., 2011; De Oliveira et al., 2002).

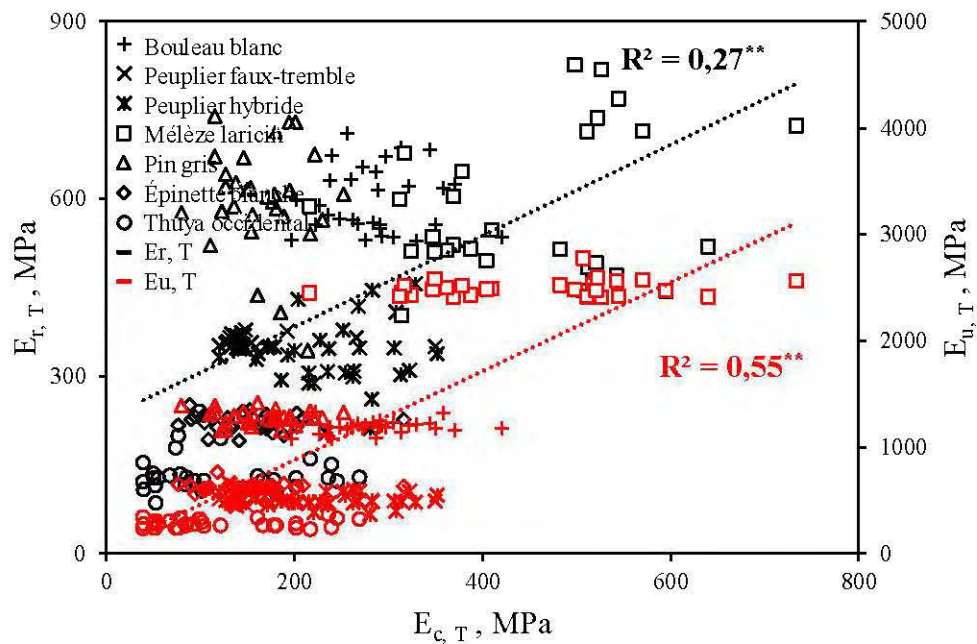


Figure 3.3: Relation entre le module d'élasticité statique en compression ($E_{c,T}$) et les modules dynamiques déterminés par la méthode de résonance ($E_{r,T}$) et d'ultrason ($E_{u,T}$) pour la direction tangentielle

Tel que présenté dans les figures 3.4 et 3.5, une faible relation entre les deux modules dynamiques (méthodes de résonance et d'ultrason) a été trouvée dans les directions R et T du bois. Cela montre également l'influence cruciale de la complexité structurale de ces deux directions sur la distribution des ondes, de telle sorte que leur effet varie en fonction du type de l'onde introduite dans le bois.

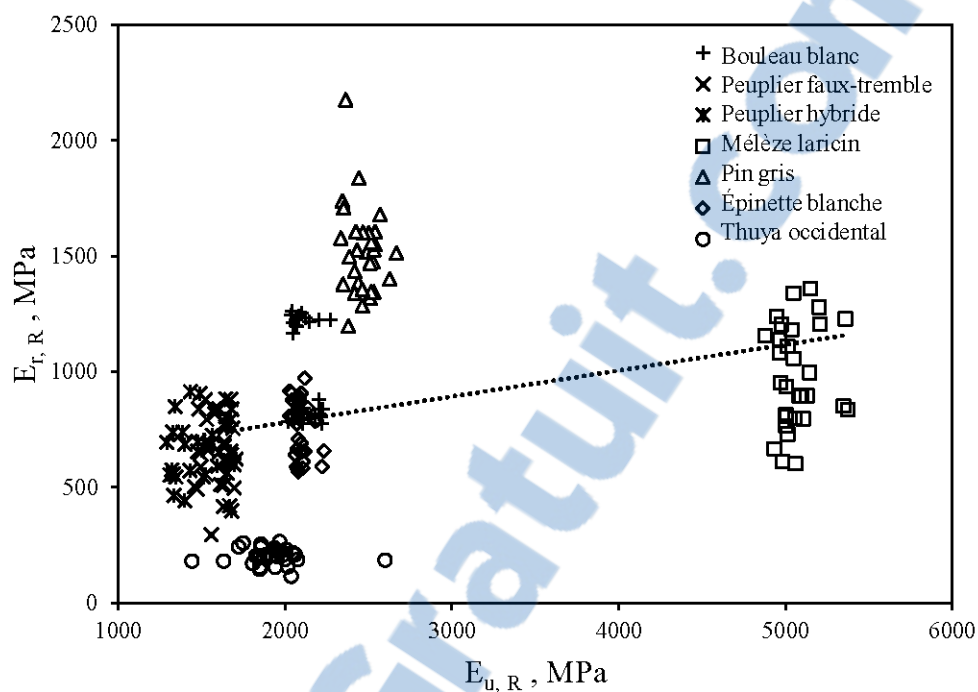


Figure 3.4: Relation entre le module d'élasticité radial obtenu par l'ultrason ($E_{u,R}$) et celui obtenu par la résonance ($E_{r,R}$)

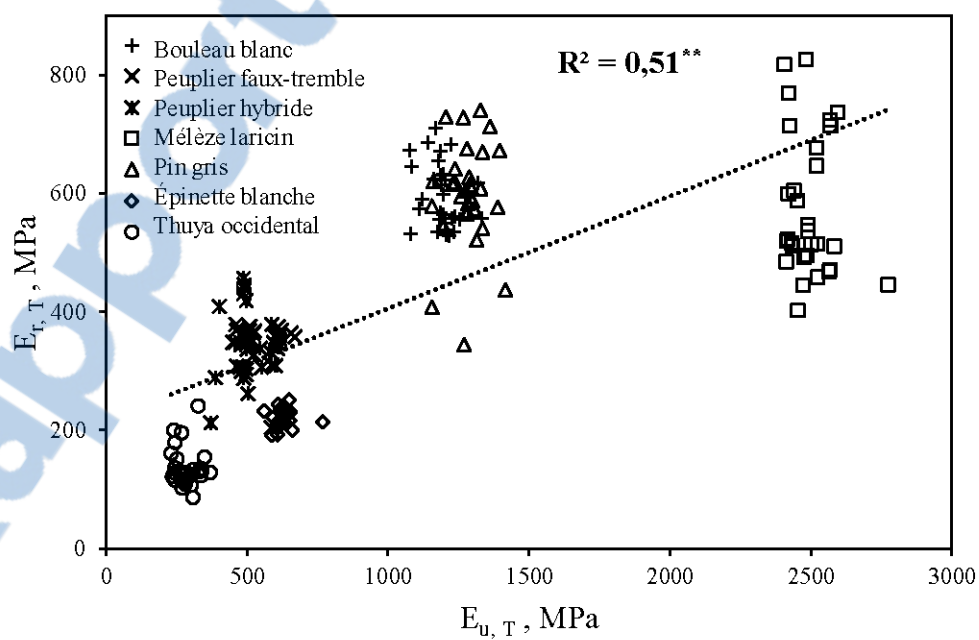


Figure 3.5: Relation entre le module d'élasticité tangential obtenu par l'ultrason ($E_{u,T}$) et celui obtenu par la résonance ($E_{r,T}$)

3.1.2 Étude du comportement statique du bois en flexion par les méthodes non destructives (ultrason et résonance)

3.1.2.1 Analyse de variance

Le Tableau 3.5 résume les résultats de l'analyse de variance (valeurs de F et de P) de l'effet de chaque source de variation (la méthode de mesure, l'essence du bois et l'interaction entre eux) sur la variation des propriétés mécaniques du bois [le module d'élasticité statique en flexion ($E_{s,f}$), les modules d'élasticité dynamique ($E_{u,L}$ et $E_{r,L}$) et le module de rupture en flexion (MOR)]. Les résultats indiquent que le module d'élasticité varie en fonction de la méthode de mesure et de l'essence ($p < 0,001$). L'effet de l'essence est très significatif ($p < 0,001$) aussi pour le MOR.

Tableau 3.5 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F et P pour chaque source de variation du module d'élasticité et celui de rupture MOR

Source de variation	Variables dépendantes					
	Module d'élasticité			MOR		
	DDL	F (Z pour l'erreur)	P > F (P > Z)	DDL	F (Z pour l'erreur)	P > F (P > Z)
Essence	6	1557,35	<,0001	6	235,33	<,0001
Méthode	2	485,89	<,0001	-	-	-
Essence* méthode	18	48,75	<,0001	-	-	-
Erreur	812	20,15	<,0001	203	10,07	<,0001

3.1.2.2 Étude comparative entre les propriétés mécaniques du bois déterminées par les essais non destructifs (modules d'élasticité dynamiques) et l'essai de flexion (module d'élasticité en flexion et le module de rupture)

Pour les différentes essences étudiées, le tableau (3.6) montre les moyennes des propriétés statiques mesurées par l'essai de flexion ($E_{s,f}$ et MOR) et les modules dynamiques déterminés par l'ultrason ($E_{u,L}$) et la méthode de résonance ($E_{r,L}$ et $E_{rf,L}$). Généralement, les différents modules d'élasticité ($E_{s,f}$, $E_{r,L}$, $E_{rf,L}$ et $E_{u,L}$)

varient significativement selon la méthode de mesure et l'essence testée (Tableau 3.5). De même, le module de rupture (MOR) varie significativement selon l'essence du bois utilisée (Tableau 3.5).

En premier lieu, on constate que les méthodes non destructives fournissent toujours les modules les plus élevés en comparaison avec ceux obtenus par l'essai statique de flexion. Le module statique de flexion ($E_{s,f}$) est inférieur respectivement à 8, 15 et 31% par rapport à ceux mesurés par la résonance flexionnelle ($E_{rf,L}$), la résonance longitudinale ($E_{r,L}$) et l'ultrason ($E_{u,L}$). Plusieurs autres chercheurs ont aussi trouvé une différence entre les modules statiques ($E_{s,f}$) et les modules dynamiques ($E_{rf,L}$, $E_{r,L}$ et $E_{u,L}$) (Baar et al., 2015; Chauhan et Sethy, 2016; Güntekin, et al., 2012; Oberhofnerová et al., 2016; Wang et al., 2008).

Cependant, la différence réside dans le degré de cette variation. Pour des mesures statiques, le degré de cette variation est affecté par le type de l'essai de flexion appliqué (Baar et al., 2015). À titre d'exemple, Haines *et al.* (1996) ont constaté des variations moins faibles ($\leq 6\%$) entre le module statique de flexion et le module dynamique (à la fois par l'ultrason et la résonance flexionnelle). Cette faible variation revient au fait de l'application d'un essai de flexion de quatre points au lieu de trois points. Vu l'effet négligeable de l'apparition des contraintes de cisaillements, l'essai de flexion de quatre points minimise la sous-estimation du module statique comparé à celui de flexion de trois points (Haines et al., 1996; Hassan et al., 2013; Ilic, 2001).

Toutefois, on ne peut pas négliger aussi l'effet du fluage dans le cas du bois (Baar et al., 2015; Divos et Toshinari, 2005; Güntekin et Aydın, 2016a). En effet, le module d'élasticité augmente au fur et à mesure de la diminution du temps de chargement du matériau. Ce temps de chargement est plus long dans le cas d'un test destructif (> 1 min) comparativement à un test non destructif (< 1 ms) (Baar et al., 2015; Divos et Toshinari, 2005; Görgün et Dündar, 2018; Teranishi et al., 2008). Ceci explique également l'augmentation des modules dynamiques déterminés par les différents outils non destructifs, principalement attribué au comportement

viscoélastique du bois (Cho, 2007; Haines et al., 1996; Hassan et al., 2013; Hodoušek et al., 2016; Leite et al., 2012)

Pour les mesures dynamiques, le temps de chargement désiré explique également le fait que les mesures d'ultrason sont les plus élevées, suivies par celles de la vibration longitudinale et de flexion (ou transversale). Relativement à ce point, cet ordre particulier est aussi affecté par la fréquence de la méthode non destructive appliquée (Hodoušek et al., 2016). En effet, la fréquence définie a un rôle vital sur le calcul du module dynamique. De façon générale, une basse fréquence génère une diminution au niveau du module dynamique mesuré (Hodoušek et al., 2016; Ouis, 2002). Dans cette étude, les fréquences d'ultrason, de la résonance longitudinale et de la résonance flexionnelle se situent respectivement dans la gamme de fréquences de l'ordre de MHz, kHz et Hz. Ces différentes raisons expliquent pourquoi l'ultrason a les modules les plus élevés ($\approx 13984\text{MPa}$) par rapport à ceux trouvés par la résonance longitudinale ($\approx 11364\text{MPa}$) ainsi que transversale ($\approx 10476\text{MPa}$). Cet ordre relatif est semblable à celui évoqué dans la littérature (Baar et al., 2015; Görgün et Dündar, 2018; Hassan et al., 2013; Oberhofnerová et al., 2016; Wang et al., 2008).

Toutefois, une comparaison entre les différentes caractéristiques du bois (statiques, ultrasoniques et vibrationnelles) montre que les caractéristiques vibrationnelles se rapprochent davantage des caractéristiques statiques en flexion (Tableau 3.6). Ce rapprochement est attribué à la dimension de l'échantillon testé, en tenant compte notamment de sa longueur (Tableau 2.1) (Casado et al., 2010; Hodoušek et al., 2016). Généralement, une longueur importante contribue à une diminution de la fréquence de résonance (Casado et al., 2010). Par conséquent, la différence entre les modules statiques et dynamiques devient plus faible (Casado et al., 2010; Hodoušek et al., 2016). Cette comparaison dévoile aussi que les caractéristiques de la vibration flexionnelle sont les plus proches des caractéristiques statiques en flexion. Pour chaque essence individuelle, une différence non significative a été trouvée entre $E_{s,f}$ et $E_{rf,L}$ (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Variation des moyennes des modules d'élasticité statiques (essais de flexion) et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'essence

Essences étudiées	MV ³ (kg/m ³)	Flexion statique		Méthode de résonance		Ultrason	N ²
		E _{s, f} ⁴ (MPa)	MOR ⁵ (MPa)	E _{r, L} ⁶ (MPa)	E _{rf, L} ⁷ (MPa)	E _{u, L} ⁸ (MPa)	
Bouleau blanc	585 (4,7) ¹	13939 (5,3) Aa ^{9, 10}	109 (8,4) A	16236 (5,1) Ab	14939 (4,7) Aab	18362 (1,6) Ac	30
Peuplier faux-tremble	425 (2,7)	11046 (8,5) Bab	63 (9,9) B	13084 (7,1) Ba	11990 (6,3) Bb	14638 (4,6) Ba	30
Peuplier hybride	387 (7,3)	7143 (9,9) Ca	65 (12,2) B	8230 (8,4) Ca	7762 (9,5) Ca	8773 (5,6) Ca	30
Mélèze laricin	665 (4,4)	12254 (10,2) Ba	103 (12,1) C	15349 (10) Ab	13378 (9,1) ABa	23040 (9,1) Dc	30
Pin gris	502 (6,7)	11463 (15,6) Ba	80 (15) D	13338 (17,7) Bb	12518 (16,6) Bab	17917 (11,5) Ec	30
Épinette blanche	372 (4,2)	7841 (17,2) Ca	46 (20,6) E	9203 (17,7) Ca	8724 (15,1) Ca	10887 (7,1) Fb	30
Thuya occidentale	304 (7,5)	3677 (22,4) Da	43 (11,3) E	4106 (21,6) Da	4024 (22,4) Da	4271 (18,1) Aa	30

¹ Coefficient de variation (%),

² Nombres d'échantillons utilisés pour chaque test,

³ Moyennes de la masse volumique par essence,

⁴ E_{s, f}: Module statique en flexion

⁵ MOR : Module de rupture en flexion

⁶ E_{r, L} : Module d'élasticité mesuré par la résonance dans la direction longitudinale

⁷ E_{rf, L} : Module de flexion mesuré par la résonance dans la direction longitudinale

⁸ E_{u, L} : Module d'élasticité mesuré par ultrason dans la direction longitudinale

⁹ Les lettres majuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les essences pour chaque direction (deux essences ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

¹⁰ Les lettres minuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les méthodes pour chaque direction (deux méthodes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

Cette constatation a d'ailleurs été approuvée par plusieurs études antérieures (De Lima et al., 2018; Görgün et Dündar, 2018; Haines et al., 1996; Segundinho et al., 2012; Wang et al., 2008; Yin et al., 2010). En effet, l'éventualité de la déflexion du cisaillement n'est pas entièrement présente dans le cas des tests dynamiques d'ultrason et de résonance longitudinale où le module exprimé ne représente que les attributs longitudinaux (Güntekin et al., 2012; Hassan et al., 2013; Teranishi et al., 2008). À ce sujet, Barrett *et al.* (2008) ont souligné que l'inclusion de cette déflexion est produite au cours d'un test de flexion statique ainsi que dynamique par la résonance de flexion. Cette particularité reflète ainsi la faible différence entre $E_{s,f}$ et $E_{rf,L}$ comparé à celle entre $E_{s,f}$ et $E_{r,L}$ et $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$, respectivement.

Par ailleurs, les valeurs trouvées ($E_{s,f}$ et MOR) par l'essai statique de flexion sont également liées aux valeurs de la masse volumique des essences. En effet, l'effet de l'essence sur la variation du module mesuré est statistiquement significatif ($p < 0,001$) (Tableau 3.6). Par exemple, dans le cas des résineux, ces propriétés diminuent graduellement de mélèze laricin ($E_{sf} = 12254$ MPa, MOR = 103 MPa avec $MV = 665$ kg/m³) au thuya occidental ($E_{s,f} = 3677$ MPa, MOR = 43 MPa avec $MV = 304$ kg/m³) (Tableau 3.6). La même tendance a également été trouvée dans le cas des mesures non destructives. Les mêmes résultats sont rapportés dans la littérature (Chauhan et Sethy, 2016; Görgün et Dündar, 2018; Leite et al., 2012; Wang et al., 2008).

Il est aussi important de noter que l'essai destructif de flexion aboutit à des moyennes comparables à celles trouvées par d'autres recherches (Bodig et Jayne, 1982; Kretschmann, 2010). Pour la même teneur en humidité de la présente étude ($H = 12\%$), Kretschmann (2010) a rapporté que les propriétés $E_{s,f}$ et MOR du pin gris (avec $MV = 430$ kg/m³) sont égales, respectivement, à 9300 et 68 MPa. Ceci est semblable aux propriétés du pin gris trouvées dans cette étude (avec $MV = 502$ kg/m³), où $E_{s,f}$ et MOR sont d'environ 11463 et 80 MPa, respectivement (Tableau 3.6). Une légère différence a été trouvée entre les valeurs rapportées par Kretschmann (2010) et celles de cette étude. Cette faible différence peut être due à la variation des sites de récolte des arbres et par conséquent à une variation au

niveau de la masse volumique, et aussi à la variation de plusieurs paramètres expérimentaux, y compris notamment le choix de la norme appliquée, les dimensions de l'échantillon testé et aussi la distance mise entre les deux appuis (Casado et al., 2010; Oberhofnerová et al., 2016).

3.1.2.3 Prédiction des modules d'élasticité statiques en flexion par les modules dynamiques

L'importance d'une évaluation non destructive du module statique de flexion ($E_{s,f}$) réside en particulier dans le fait d'élaborer des modèles de prédiction. Ces modèles permettent de déterminer la relation entre le module $E_{s,f}$ et les modules dynamiques mesurés par les trois méthodes non destructives : l'ultrason ($E_{u,L}$), la résonance longitudinale ($E_{r,L}$) et la résonance flexionnelle ($E_{rf,L}$).

Dans la présente étude, une analyse de corrélation entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$, $E_{s,f}$ et $E_{r,L}$ et $E_{s,f}$ et $E_{rf,L}$ est effectuée séparément pour chaque type d'espèce individuelle, pour l'ensemble des résineux et des feuillus et pour l'ensemble des diverses espèces étudiées. Sur la base des propriétés trouvées, le tableau 3.7 présente la matrice de corrélation (R^2) pour ces différents groupes.

En partant de la relation entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$, le coefficient de détermination trouvé (R^2) varie de 0,61 à 0,88 en fonction de l'essence étudiée. Les R^2 les plus bas sont généralement trouvés dans le cas des essences feuillues, par exemple pour le peuplier hybride, R^2 est égal 0,61. Telle que montrée dans le tableau 3.7, la relation entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$ est statistiquement très significative ($p < 0,001$). Le R^2 de cette relation (régression linéaire) est égal à 0,83, et ce pour toutes les essences confondues (Figure 3.6). Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par plusieurs chercheurs (Baar et al., 2015; Karlinasari et al., 2008; Liang et Fu, 2007; De Oliveira et al., 2002).

Tableau 3.7 : Coefficient de détermination (R^2) pour l'ensemble des feuillus, des résineux et toutes les essences confondues

L'ensemble des feuillus	MV	$E_{u,L}$	$E_{r,L}$	$E_{rf,L}$	$E_{s,f}$	MOR
MV	1					
$E_{u,L}$	0,77**	1				
$E_{r,L}$	0,75**	0,98**	1			
$E_{rf,L}$	0,77**	0,98**	0,99**	1		
$E_{s,f}$	0,76**	0,96**	0,99**	0,99**	1	
MOR	0,86**	0,55**	0,56**	0,58**	0,60**	1
L'ensemble des résineux	Mv	$E_{u,L}$	$E_{r,L}$	$E_{rf,L}$	$E_{s,f}$	MOR
MV	1					
$E_{u,L}$	0,90**	1				
$E_{r,L}$	0,76**	0,95**	1			
$E_{rf,L}$	0,73**	0,92**	0,99**	1		
$E_{s,f}$	0,72**	0,92**	0,98**	0,99**	1	
MOR	0,83**	0,84**	0,78**	0,74**	0,75**	1
Toutes les essences confondues	Mv	$E_{u,L}$	$E_{r,L}$	$E_{rf,L}$	$E_{s,f}$	MOR
MV	1					
$E_{u,L}$	0,88**	1				
$E_{r,L}$	0,75**	0,88**	1			
$E_{rf,L}$	0,73**	0,85**	0,99**	1		
$E_{s,f}$	0,72**	0,83**	0,98**	0,99**	1	
MOR	0,83**	0,70**	0,72**	0,70**	0,71**	1

* Significatif à $\alpha = 0,05$, ** Significatif à $\alpha = 0,01$, *** Significatif à $\alpha = 0,001$, ns non significatif à $\alpha < 0,05$

De ce fait, Güntekin et Aydin (2016a) affirme une forte corrélation entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$ pour les quatre essences de résineux testées, y compris le pin de Calabre (*Pinus brutia*) ($R^2=0,74$), le pin noir (*Pinus nigra*) ($R^2=0,69$), le cèdre (*Cedrus libani*) ($R^2=0,66$) et l'épicéa d'Orient (*Picea orientalis*) ($R^2=0,8$). De même, Teles *et al.* (2011) ont montré que les valeurs de (R^2) pouvaient atteindre 0,82 pour une espèce de feuillu tropical, le laurier rouge (*Sextonia rubra*). Ceci est aussi le cas de l'étude réalisée par Chiu *et al.* (2012), avec R^2 quasiment égal à 0,74. Par ailleurs, Chiu *et al.* (2012) ont montré qu'il existe une forte relation entre la vitesse d'ultrason (V_u) et le module statique de flexion ($E_{s,f}$), avec laquelle R^2 est à peu près égal à 0,69.

Dans le cadre du présent travail, des résultats similaires ont été trouvés, où la corrélation entre $E_{s,f}$ et V_u est positive ($R^2=0,74$). L'importance de cette relation ($E_{s,f}$ vs V_u) réside dans quelques utilisations spécifiques où il était difficile de mesurer la masse volumique du bois en service. En outre, cette importance apparaît également dans certaines applications sur site où un seul côté de l'élément testé est disponible (Kumar et al., 2002; Machado et al., 2009). Dans le cas de cette configuration, il était également nécessaire d'appliquer la méthode indirecte d'ultrason (les capteurs d'ultrason sont positionnés sur la même surface de l'élément) (Machado et al., 2009). De ce fait, Oberhofnerová *et al.* (2016) prouvent que la méthode indirecte d'ultrason est aussi bonne pour la prédiction non destructive de $E_{s,f}$, tel que $R^2 \approx 0,5$. Pourtant, la force de cette prédiction dépend essentiellement de la distance mise entre les deux capteurs (l'émetteur et le récepteur). Pour des courtes distances, Oberhofnerová *et al.* (2016) ont montré que les vitesses mesurées ne servent qu'à l'évaluation locale de la surface du bois. Ceci est confirmé par Machado et al. (2009 et Teder et al. (2011).

Pour ces différentes raisons, il est toujours recommandé de s'appuyer sur la relation entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$ pour estimer précisément le module $E_{s,f}$. Ainsi, une bonne corrélation (R^2) entre $E_{s,f}$ et $E_{u,L}$ est généralement supérieure à 0,8. L'ensemble de ces études dévoilent alors le potentiel de la méthode ultrasonique pour caractériser approximativement $E_{s,f}$, et ce en dépit de la variété d'applications pratiques de la méthode ultrasonique. Malgré cela, le potentiel de cette méthode est considéré moins prometteur que celui de la méthode de résonance.

Pour l'ensemble des essences testées, la figure 3.6 montre qu' $E_{s,f}$ est fortement corrélée à $E_{r,L}$ ($R^2 = 0,98$) et aussi à $E_{tf,L}$ ($R^2 = 0,99$) avec un niveau de signification très élevé (Tableau 3.7). Cette forte corrélation a été confirmée par plusieurs chercheurs (Görgün et DüNDAR, 2018; Güntekin et al., 2012; Hassan et al., 2013; Oberhofnerová et al., 2016; Ross et Pellerin, 1994; Zhou et al., 2013). En utilisant les mêmes modes de vibration de la méthode de résonance (mode de vibration longitudinale et transversale), la majorité de ces études prouvent que le mode de vibration transversale (flexionnelle) est toujours le plus proche pour prédire

précisément le comportement élastique statique du bois en flexion. En prenant l'exemple de l'étude de Chauhan et Sethy (2016), le module $E_{s,f}$ est étroitement lié aux modules dynamiques $E_{r,L}$ et $E_{rf,L}$ ($R^2 \approx 0,95$ à $0,97$). Également, Teles *et al.* (2011) ont montré que la vibration transversale offre le meilleur modèle de prédiction de $E_{s,f}$ ($R^2 = 0,95$), ce qui a été affirmé aussi par l'étude de Baar *et al.* (2015) menée sur cinq types de feuillus tropicaux ($R^2 = 0,76$).

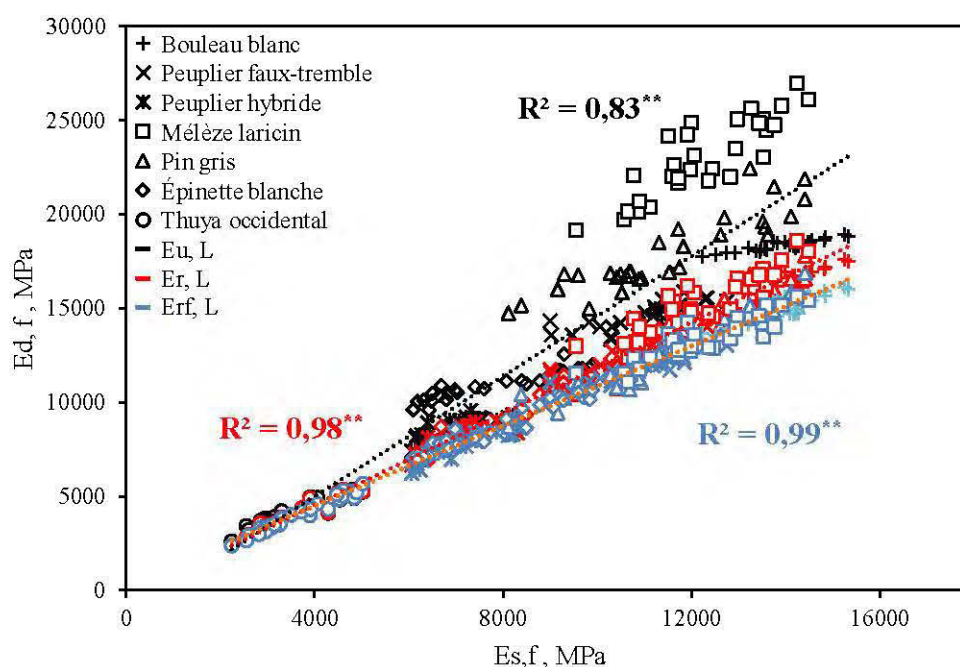


Figure 3.6: Corrélation entre le module statique de flexion ($E_{s,f}$) et le module d'élasticité longitudinal obtenu par ultrason ($E_{u,L}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration longitudinale ($E_{r,L}$) ou bien la vibration de flexion ($E_{rf,L}$) pour les sept essences étudiées

Ceci est expliqué par le fait que les ondes longitudinales (à la fois les ondes d'ultrason et de la vibration longitudinale) traitent principalement les effets élastiques du bois (Bucur, 1983; Sotelo-Montes et al., 2007). Au contraire, les ondes transversales (mode de vibration de flexion) traitent les effets de cisaillement du bois, ce qui se produit également dans le cas d'un essai destructif de flexion (flexion en trois points) (Ilic, 2001; Sotelo-Montes et al., 2007). Ceci est similaire aux résultats trouvés dans la littérature (Halabe et al., 1997; Oberhofnerová et al., 2016).

Bien que chaque type d'onde ait été influencé par différents effets, une forte corrélation ($R^2 > 0,80$) a été trouvée entre $E_{u,L}$ et $E_{r,L}$ et $E_{u,L}$ et $E_{rf,L}$ (Figure 3.7). Cette forte corrélation reflète à quel niveau la réponse matérielle est bonne en appliquant ces diverses méthodes non destructives (Halabe et al., 1997; Oberhofnerová et al., 2016).

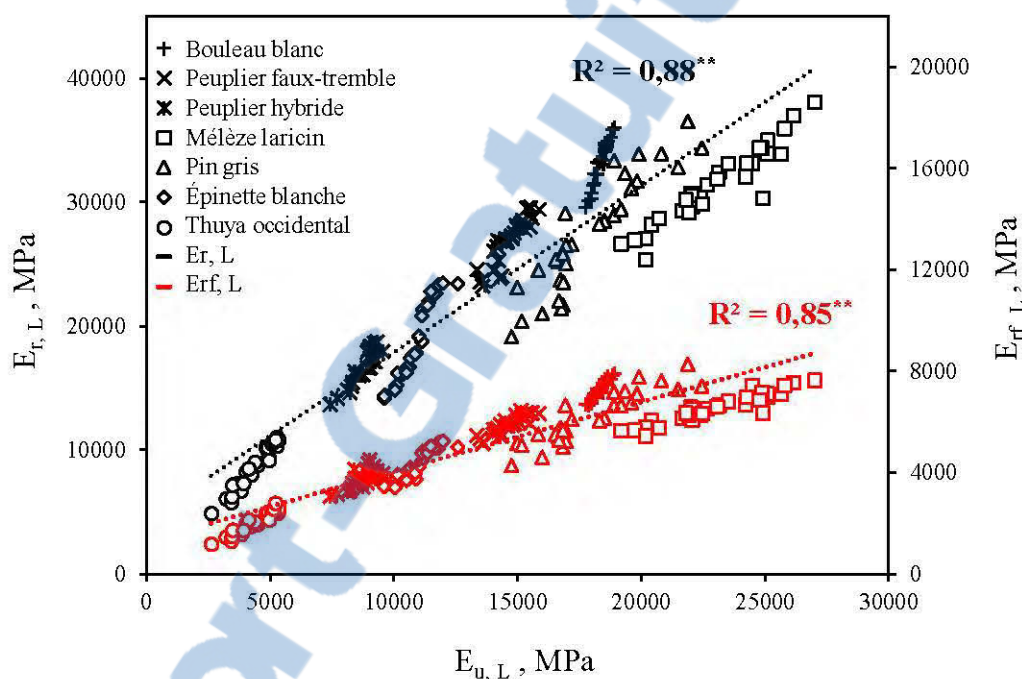


Figure 3.7: Corrélation entre le module d'élasticité obtenu par ultrason ($E_{u,L}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration longitudinale ($E_{r,L}$) ou bien la vibration de flexion ($E_{rf,L}$) pour les sept essences étudiées

Malgré l'important potentiel de la vibration transversale pour estimer précisément le module de flexion élastique du bois, sa grande sensibilité rend son usage pratique un peu compliqué. Cette haute sensibilité est particulièrement liée à la découpe et la finition de l'échantillon d'essai. De ce fait, l'uniformité de l'échantillon réside principalement dans le calcul du moment d'inertie qui est l'un des paramètres requis pour identifier correctement le module dynamique de la vibration transversale (Teles et al., 2011). L'absence d'usinage précis peut entraîner d'énormes erreurs de calcul, notamment dans le cas où l'épaisseur (de même que la largeur) varie considérablement avec la longueur de l'échantillon. Cette exigence d'un

parallélisme parfait des surfaces de l'échantillon est moins importante dans le cas de la vibration longitudinale (Ilic, 2003). Pour ces différentes raisons, la force prédictive du module ($E_{s,f}$) par ces méthodes non destructives est souvent associée à plusieurs facteurs, à savoir la méthode de mesure appliquée, la teneur en humidité du bois, l'essence étudiée et le type d'échantillons testé, etc. (Görgün et Dündar, 2018; Güntekin et al., 2012; Ergun Güntekin et al., 2014)

3.1.2.4 Prédiction du module de rupture (MOR) en flexion par le module statique en flexion et les modules dynamiques

La prédiction non destructive du MOR est particulièrement essentielle. Dans le travail actuel, des corrélations linéaires furent faites entre MOR et $E_{s,f}$, MOR et $E_{u,L}$, MOR et $E_{r,L}$ et MOR et $E_{rf,L}$. En considérant chaque essence à part, les différentes corrélations sont faibles à bonnes ($R^2 = 0,19-0,63$). Toutefois, les corrélations entre MOR et les modules dynamiques sont bonnes, en analysant les résultats de toutes les essences confondues ($R^2 = 0,7-0,72$) (Figure 3.8). Par contre, la relation entre MOR et les modules dynamiques reste moins importante que celle entre $E_{s,f}$ (le module statique en flexion) et les modules dynamiques ($R^2 = 0,83-0,99$) (Figure 3.6). Selon Hansen (2006), ceci peut être dû à la grande sensibilité du MOR aux anomalies locales comparé à $E_{s,f}$.

De façon générale et considérant chaque essence à part, le R^2 trouvé entre MOR et le module d'ultrason est plus ou moins faible ($R^2 = 0,20-0,58$) comparé à celui trouvé entre le MOR et le module de résonance ($R^2 = 0,19-0,63$). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Baar *et al.* (2015), où R^2 varie de 0,22 à 0,57 pour la méthode d'ultrason et de 0,12 à 0,76 pour la méthode de résonance. La faible corrélation entre MOR et le module dynamique dans le cas d'ultrason peut être expliquée par le fait que les ondes ultrasoniques sont moins affectées par les caractéristiques du matériau comparé aux ondes acoustiques produites par la méthode de résonance (Baar et al., 2015; Görgün et Dündar, 2018). Ceci est principalement dû à l'effet du mécanisme de mesure sur lequel s'appuie chaque méthode (ultrason et résonance) (Baar et al., 2015). Tel qu'expliqué dans la section

(3.1.1.2), le module d'ultrason représente davantage les caractéristiques du bois dans la zone traversée par l'onde (Baar et al., 2015).

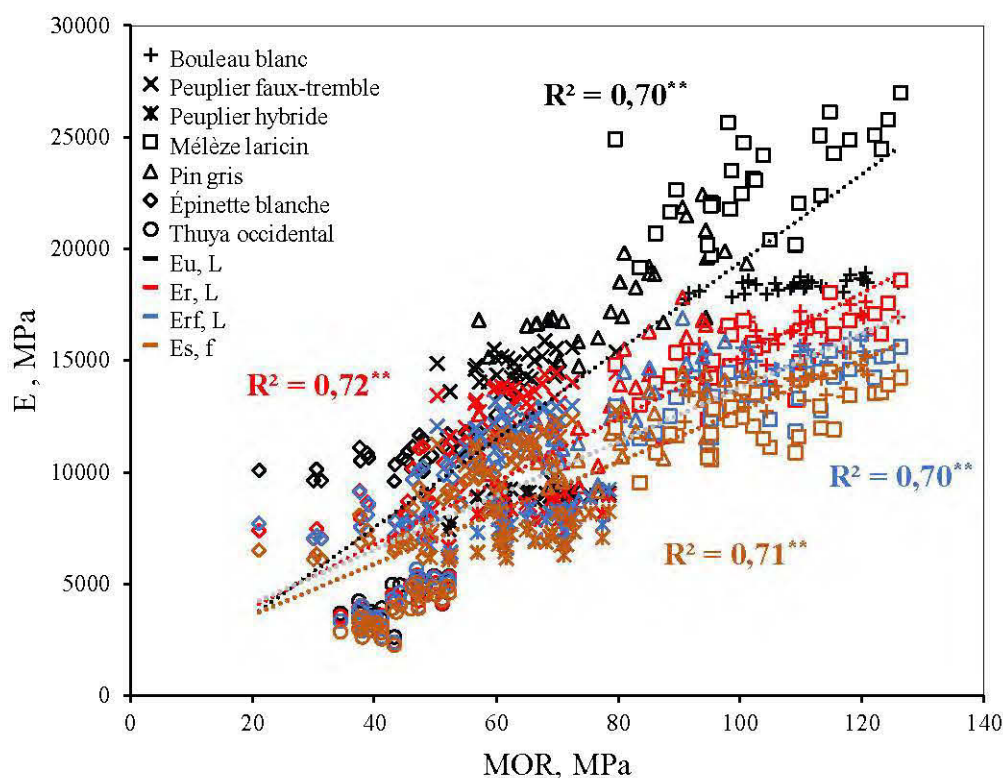


Figure 3.8: Relation entre le module de rupture MOR et les modules obtenus par l'essai de flexion statique ($E_{s,f}$), la méthode d'ultrason ($E_{u,L}$) et la méthode de résonance ($E_{r,L}$ et $E_{rf,L}$)

Cependant, la corrélation entre le MOR et $E_{u,L}$ est plus importante en considérant toutes les essences confondues (Tableau 3.7). La valeur de R^2 est près de 0,70. Ceci est comparable aux coefficients trouvés entre MOR et $E_{s,f}$, MOR et $E_{r,L}$ et MOR et $E_{rf,L}$ (Figure 3.8). Peu importe alors la méthode utilisée pour estimer le module MOR, le tableau 3.7 montre que la corrélation obtenue était statistiquement significative. Ces résultats concordent avec ceux trouvés dans la littérature (Barrett et al., 2008; Güntekin et Aydin, 2016a; Güntekin et al., 2012; Krzosek et al., 2008; De Oliveira et al., 2002).

Dans une étude faite par Chiu *et al.* (2012) sur le cèdre à encens de Taïwan (*Calocedrus formosana*), les valeurs de R^2 pour l'ensemble des relations sont presque identiques et sont égales à 0,48 (MOR et $E_{u,L}$), 0,52 (MOR et $E_{r,L}$) et 0,56 (MOR et $E_{s,f}$). De même, Ilic (2001) rapporte que le coefficient de corrélation de MOR et $E_{s,f}$, MOR et $E_{r,L}$ et MOR et $E_{rf,L}$ est d'environ 0,77; 0,69 et 0,81, respectivement. Également, Campos *et al.* (2012) ont constaté que $E_{rf,L}$ est fortement lié au MOR ($R^2 > 0,85$) dans le cas des poutres de bois en forme de I. Ces corrélations positives révèlent alors le caractère utile des moyens non destructifs pour évaluer le MOR en flexion, en mettant l'accent sur le potentiel de la méthode de résonance en vibration transversale.

De ce fait, il convient de souligner que cette estimation non destructive du MOR du bois dépend toujours de la variation des caractéristiques de flexion au sein de l'espèce elle-même, ou même entre les différentes espèces étudiées. Cet effet explique pourquoi les modèles d'estimation du MOR manquent de prévisibilité dans le cas d'une étude d'une seule espèce (où il existe une faible variabilité des caractéristiques) face à l'étude de toutes les espèces confondues (où il existe une forte variabilité des caractéristiques) (Del Menezzi *et al.*, 2010). En outre, les modules dynamiques sont fortement établis sur le comportement élastique du bois (Menezzi *et al.*, 2013; Güntekin et Aydin, 2016a). En le comparant aux divers modules dynamiques, le module statique de flexion est perçu comme le meilleur prédicteur du MOR (Del Menezzi *et al.*, 2013; Güntekin et Aydin, 2016a).

3.2 Modules de cisaillement

3.2.1 Analyse de variance

Le Tableau 3.8 montre l'analyse de variance (valeurs de F et P) des différentes sources de variation telles que la méthode de mesure, les essences du bois et leur interaction sur le module de cisaillement des trois plans principaux de bois : le plan longitudinal radial (LR), longitudinal-tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT). Pour chaque plan étudié, les diverses sources de variation ont un effet significatif sur le module de cisaillement mesuré ($p < 0,001$).

Tableau 3.8 : Résultats de l'analyse de variance montrant les valeurs de F (Z pour l'erreur) et P pour chaque source de variation du module de cisaillement selon les différents plans du bois (longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT))

Source de variation	Variables dépendantes (Module de cisaillement)								
	$G_{LR}^{(1)}$			$G_{LT}^{(2)}$			$G_{RT}^{(3)}$		
	DDL	F (Z pour l'erreur)	P > F	DDL	F (Z pour l'erreur)	P > F	DDL	F (Z pour l'erreur)	P > F
Essence	6	852,48	<,0001	6	336,18	<,0001	6	957,20	<,0001
Méthode	2	14769,2	<,0001	2	2458,10	<,0001	2	5708,43	<,0001
Essence* méthode	18	288,12	<,0001	12	70,10	<,0001	12	320,24	<,0001
Erreur	812	20,15	<,0001	609	17,45	<,0001	609	17,45	<,0001

⁽¹⁾ G_{LR} : module de cisaillement dans le plan LR

⁽²⁾ G_{LT} : module de cisaillement dans le plan LT

⁽³⁾ G_{RT} : module de cisaillement dans le plan RT

3.2.2 Étude comparative entre les modules de cisaillement du bois déterminés par les méthodes destructives et non destructives

Le tableau 3.9 montre la variation triaxiale du module de cisaillement en fonction des trois plans principaux du bois : les plans LR, LT et RT pour les diverses essences étudiées. Dans la présente étude, les modules statiques de cisaillement sont déterminés analytiquement en utilisant l'essai de compression ($G_{c, LR}$, $G_{c, LT}$, $G_{c, RT}$) et l'essai de flexion ($G_{f, LR}$). Cependant, les modules dynamiques sont déterminés expérimentalement en appliquant la méthode d'ultrason ($G_{u, LR}$, $G_{u, LT}$, $G_{u, RT}$) et de résonance torsionnelle ($G_{r, LR}$, $G_{r, LT}$, $G_{r, RT}$). Ainsi, selon chaque plan étudié, on constate une variation significative du module de cisaillement selon la méthode de mesure appliquée et l'essence de bois testée (Tableau 3.9). De façon générale, la même tendance de variation des trois modules de cisaillement a été constatée pour toutes les espèces étudiées, et ce, quelle que soit la méthode appliquée (statique ou dynamique) (Tableau 3.9). Les moyennes de G_{LR} sont les plus élevées, suivies par celle de G_{LT} puis de G_{RT} (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 : Variation triaxiale des moyennes de modules de cisaillement statiques et dynamiques et de la masse volumique en fonction de l'espèce

Essences étudiées	MV ³ (kg/m ³)	Plan longitudinal radial				Plan longitudinal tangentiel			Plan radial tangentiel			N ²
		G _{c,LR} ⁴ (MPa)	G _{f,LR} ⁵ (MPa)	G _{u,LR} ⁶ (MPa)	G _{r,LR} ⁷ (MPa)	G _{c,LT} (MPa)	G _{u,LT} (MPa)	G _{r,LT} (MPa)	G _{c,RT} (MPa)	G _{u,RT} (MPa)	G _{r,RT} (MPa)	
Bouleau blanc	585 (4,7) ¹	446 (17) Aa ^{8,9}	496 (13,5) Aa	5259 (11,8) Ab	1878 (4,9) Ac	188 (17) ABCa	894 (8,3) Ab	844 (18,4) Ab	106 (17,4) Aa	741 (3,8) Ab	549 (8,3) Ac	30
Peuplier faux-tremble	425 (2,7)	352 (21) Aa	256 (17,9) ABCa	4144 (4,7) Bb	1460 (6,5) Bc	126 (32,6) Ba	696 (8,5) Bb	659 (22,8) Bb	69 (22,4) ACa	343 (6,9) Bb	322 (3,4) Bb	30
Peuplier hybride	387 (7,3)	341 (16) Aa	221 (13,2) BCa	2745 (10,9) Cb	957 (8) Cc	206 (21,4) ABCa	591 (10,6) Cb	538 (14,4) Bb	109 (17) Aa	325 (18,4) Bb	298 (17,4) Bb	30
Mélèze laricin	665 (4,4)	420 (22,7) Aa	450 (23,8) ABa	4785 (7,3) Db	1684 (9,3) ABc	280 (26) Aa	1250 (2,6) Db	994 (22,8) Cc	171 (24,3) Ba	752 (3,9) Ab	382 (20,5) Cc	30
Pin gris	502 (6,7)	423 (29,3) Aa	366 (18,1) ABCa	4648 (7,5) Db	1707 (17) ABc	116 (24,2) BCa	749 (5,7) Ab	825 (14) Ab	51 (25,8) Ca	554 (6,4) Cb	622 (13,9) Dc	30
Épinette blanche	372 (4,2)	250 (26,8) Aa	271 (14,3) ABa	3245 (6,1) Eb	1067 (10,4) Cc	122 (32) Ca	661 (2,9) BCb	639 (29,3) Bb	62 (26,6) ACa	452 (4) Db	114 (4,6) Ac	30
Thuya occidentale	304 (7,5)	213 (22,7) Aad	190 (15,8) Ca	1423 (8,3) Fc	455 (22,9) Dd	101 (58,3) BCa	523 (8) Ab	133 (9,5) Da	60 (51,1) ACa	259 (13,9) Eb	112 (17,9) Ac	30

¹ Coefficient de variation (%),

² Nombres d'échantillons utilisés pour chaque test,

³ Moyennes de la masse volumique par essence,

⁴ G_{c,ij} : Module de cisaillement en compression dans le plan ij avec i, j= L (longitudinale), R (radiale) ou T(tangentielle)

⁵ G_{f,LR} : Module de cisaillement en flexion dans le plan LR

⁶ G_{u,ij} : Module de cisaillement mesuré par ultrason dans le plan ij avec i, j= L (longitudinale), R (radiale) ou T(tangentielle)

⁷ G_{r,ij} : Module de cisaillement mesuré par résonance dans le plan ij avec i, j= L (longitudinale), R (radiale) ou T(tangentielle)

⁸ Les lettres majuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les essences pour chaque plan du bois (deux essences ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

⁹ Les lettres minuscules indiquent une comparaison des moyennes entre les méthodes pour chaque plan du bois (deux méthodes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes)

Cette tendance est similaire à celle trouvée par plusieurs autres travaux (Aydm et al., 2017 ; Gonçalves et al., 2011 ; Ozyhar et al., 2013). Par ailleurs, la variation triaxiale dépend de l'essence étudiée (Tableau 3.9). Par exemple et dans le cas de la méthode d'ultrason, l'ampleur de la variation triaxiale du bouleau blanc et du thuya occidental est très différente. Les modules de cisaillement du thuya occidental ont une variation triaxiale moins importante que celle du bouleau blanc. Pour le thuya occidental, $G_{u,LR}$ est 3 fois plus grand que $G_{u,LT}$, tandis qu'il en vaut le double (6 fois) dans le cas de bouleau blanc (Tableau 3.9). De plus, $G_{u,LR}$ est 5 fois plus élevé que $G_{u,RT}$ pour le thuya occidental contre 7 fois plus dans le bouleau blanc. Cette variation est principalement attribuée à l'aspect anisotrope du bois (Crespo et al., 2017; Keunecke et al., 2007; Ozyhar et al., 2013).

Pour toutes les essences étudiées, le test LSD dévoile que la différence des moyennes de G_{LR} , mesurés par les deux essais statiques (compression parallèle et flexion à trois points) est non significative (Tableau 3.9). Cette non-signification prouve la fiabilité de l'essai de flexion et sa capacité à calculer le module G_{LR} .

Ainsi, pour le même plan étudié, les méthodes non destructives, en particulier la méthode d'ultrason, fournissent toujours un module du cisaillement plus élevé que celui obtenu par les méthodes destructives (Tableau 3.9). Ceci est en accord avec les résultats trouvés par Keunecke *et al.* (2007). Comme dans le cas des modules d'élasticité, cette différence résulte du comportement viscoélastique caractéristique du bois (Ozyhar et al., 2013). Toutefois, la différence entre les modules dynamiques d'ultrason ($G_{u,LR}$, $G_{u,LT}$, $G_{u,RT}$) et les modules statiques en compression ($G_{c,LR}$, $G_{c,LT}$, $G_{c,RT}$) est très importante. À l'inverse, plusieurs études ont prouvé que cette variation est de seulement 20% (Aydm et Ciritcioğlu, 2018; Bucur, 2006; Dackermann et al., 2016). En prenant l'exemple de l'étude de Keunecke *et al.* (2007), suivant la norme DIN 68364, les valeurs d'ultrason se situent approximativement dans la même plage des valeurs statiques. La variation trouvée peut être due à plusieurs facteurs, notamment, les difficultés rencontrées lors de l'identification correcte du plan de mesure du module de cisaillement (LR, LT et RT). Cela ne se limite pas seulement aux méthodes dynamiques, mais également au

cas des méthodes statiques. En effet, lors d'un essai de cisaillement statique, il existe une forte probabilité de l'apparition inattendue des contraintes secondaires (Güntekin et al., 2016a; Harrison, 2006). La distribution de ces contraintes inhérentes diffère d'un essai statique à un autre (Güntekin et al., 2016a). Ces contraintes secondaires contribuent également à la dispersion des valeurs du module de cisaillement mesuré, et par conséquent, augmentent le risque d'identification incorrecte du module de cisaillement. Le module statique de cisaillement reste fortement lié au test effectué et aussi au choix de la norme suivie (Güntekin et al., 2016a).

Les résultats trouvés par Dackermann *et al.*, (2016) montrent une sous-estimation d'environ 20% entre $G_{u,LT}$ et G_{cLT} et aussi entre $G_{u,RT}$ et G_{cRT} et une surestimation d'environ 10% entre $G_{u,LR}$ et G_{cLR} . L'explication plausible de la variation trouvée dans cette étude comparée à celle rapportée par Dackermann *et al.* (2016) ($\approx 20\%$) est principalement reliée à la différence entre les essences étudiées, à l'inclination des fibres de l'échantillon et à la sensibilité de la méthode d'ultrason. Cette sensibilité est fortement liée aux types des ondes pénétrées dans le bois. Elle est plus grande dans le cas d'une pénétration des ondes transversales (Bucur, 2006). Comparativement aux ondes longitudinales, les ondes transversales sont affectées par la géométrie de l'échantillon utilisé (Aydın et Ciritcioğlu, 2018).

Une comparaison entre les vitesses des ondes transversales trouvées dans cette étude et celles rapportées dans la littérature, est illustrée dans le tableau 3.10. Ce tableau montre les moyennes des vitesses d'ultrason trouvées pour l'ensemble des résineux et des feuillus. Hormis la vitesse dans le plan (LT), la plupart des valeurs obtenues ne sont généralement pas dans les mêmes intervalles déterminés par Bucur (2006). Par contre, tel que discuté précédemment dans la section (3.1.1.2), les vitesses des ondes longitudinales trouvées dans cette étude se situent dans les mêmes intervalles de Bucur (2006).

Tableau 3.10 : Valeurs moyennes de la vitesse transversale d’ultrason (m/s) selon les trois plans principaux du bois (longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangentiel (LT) et radial-tangentiel (RT))

Vitesse d’ultrason	Ensemble d’essences	Moyennes (m/s)	Référence ³
V_{LR}^1	Feuillus	2936 (3,7) ²	1294-1744
	Résineux	2716 (3,5)	1050-1630
V_{LT}	Feuillus	1255 (3,8)	1148-1468
	Résineux	1314 (2,3)	1030-1660
V_{RT}	Feuillus	982 (4,2)	536-1006
	Résineux	1038 (3,3)	298-600

¹ V_{ij} : Vitesse transversale d’ultrason dans le plan ij avec i, j = L (longitudinale), R (radiale) ou T (tangentielle)

² Coefficient de variation (%)

³ Bucur (2006)

Malgré la différence entre les espèces étudiées, le choix de la référence de Bucur (2006) est basé sur deux raisons: premièrement, peu d’études ont déterminé les modules de cisaillement en appliquant l’ultrason pour les mêmes essences étudiées dans ce projet, deuxièmement, les échantillons testés par Bucur (2006) ont les mêmes forme et taille que ceux utilisés dans cette étude. Cette incompatibilité (Tableau 3.10) montre que la propagation des ondes transversales est affectée considérablement, non seulement par la structure anatomique de l’essence étudiée, la dimension de l’échantillon et sa géométrie, mais aussi par les conditions expérimentales des tests. En effet, la différence observée entre les résultats peut être causée par le type du milieu de contact, et l’orientation des transducteurs ainsi que leur polarisation (Aydm et Ciritcioğlu; 2018). Ceci permet d’expliquer la variation élevée trouvée (>50%) entre les moyennes d’ultrason ($G_{u,LR}$, $G_{u,LT}$) et de résonance ($G_{r,LR}$, $G_{r,LT}$), respectivement (Tableau 3.9). En effet, une différence significative a été trouvée entre $G_{u,LR}$ et $G_{r,LR}$, et ce pour les diverses essences étudiées (Tableau 3.9).

Toutefois, l’effet de la polarisation des transducteurs n’est pas présent dans la méthode de résonance puisqu’elle se base sur la fréquence de résonance du matériau testé dans le calcul. Par conséquent, la méthode de résonance est moins sensible par rapport à la méthode d’ultrason. Malgré la faible sensibilité de la méthode de

résonance, les variations trouvées entre les moyennes de résonance ($G_{r, LR}$, $G_{r, LT}$, $G_{r, RT}$) et celles statiques ($G_{c, LR}$, $G_{c, LT}$, $G_{c, RT}$) dépassent aussi 50% (Tableau 3.9). Cette variation est élevée comparée aux autres études (<30%) (Aydın et Ciritcioğlu, 2018; Bucur, 2006; Dackermann et al., 2016). Cela est principalement attribué aux mêmes raisons mentionnées précédemment (géométrie, méthode appliquée et niveau de sensibilité de la méthode), mais aussi à la méthode analytique utilisée pour le calcul des modules statiques du cisaillement qui se base sur différentes hypothèses. Dans ce contexte, Dackermann *et al.* (2016) ont dévoilé que la méthode analytique de mesure de $G_{c, LR}$, $G_{c, LT}$, $G_{c, RT}$ reste partiellement applicable pour les deux essences étudiées : *Corymbia maculata* (*Eucalyptus maculata*) et Tallowood (*Eucalyptus microcorys*).

Les moyennes statiques des modules $G_{c, LR}$, $G_{c, LT}$ et $G_{c, RT}$ sont respectivement d'environ 380, 174 et 95 MPa pour l'ensemble des feuillus versus 327, 155 et 86 MPa pour l'ensemble des résineux. Pour la même teneur en humidité ($H=12\%$), les trois moyennes du cisaillement sont largement inférieures aux valeurs données par Guitard et El Amri (1987) dont, par exemple, les moyennes de modules de cisaillement de feuillus (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}) sont égales respectivement à 1260, 971, 366 MPa. Il est vrai que la méthode de mesure est l'une des raisons de cette différence, mais l'étendue de MV entre les espèces joue également un rôle important. En effet, selon Guitard et El Amri (1987), la marge de MV est d'environ 100 à 1280 kg/m³ pour un ensemble de 43 essences des feuillus et d'environ 260 à 590 kg/m³ pour un ensemble de 37 essences de résineux. Pour la présente étude, cette marge est de 387 à 585 kg/m³ pour les feuillus et de 304-665 kg/m³ pour les résineux. Pour les mêmes essences, ces intervalles sont plus comparables à ceux rapportés par Bodig et Jayne (1982). Ainsi, les moyennes de $G_{c, LR}$, $G_{c, LT}$, $G_{c, RT}$ obtenues dans cette étude sont proches des valeurs trouvées par Bodig et Jayne (1982). Par exemple, pour le peuplier faux-tremble, le module de $G_{c, LR}$ trouvé dans cette étude est d'environ 352 MPa (MV = 425 kg/m³) alors que celui rapporté par Bodig et Jayne (1982) est d'environ 574 MPa (MV = 350 kg/m³).

La validité d'une méthode de mesure dépend en grande partie de la vérification des différents ratios indiqués dans le tableau 3.11. L'importance de ces différents ratios provient du fait qu'il est difficile de comparer les valeurs obtenues avec les valeurs recueillies dans la littérature (Divos et al., 1998; Keunecke et al., 2007; Müller et al., 2007).

Pour les essais statiques de compression, les ratios E_L/G_{LR} varient de 13 jusqu'à 29 (Tableau 3.11). Ceci est en accord avec ceux trouvés par d'autres travaux (Castellanos, 2018; Divos et al., 1998; Elsener, 2014; Harrison, 2006a; Karácsonyi, 2011; Ross, 2010). La majorité de ces études ont montré que le ratio E_L/G_{LR} se situe généralement dans l'intervalle 7-25. Comme présenté dans le tableau 3.11, pour l'ensemble des feuillus, les ratios statiques de G_{LR}/G_{RT} et G_{LT}/G_{RT} sont respectivement égaux à 4 et 1,8. Ceci est aussi concordant avec les ratios donnés par Guitard (1987), où les ratios de G_{LR}/G_{RT} et G_{LT}/G_{RT} sont égales à 3,4 et 2,6, respectivement (de la Cruz-Sanchez, 2006). Pour les résineux, les ratios statiques sont plus faibles que ceux rapportés par Guitard (1987). Les ratios G_{LR}/G_{RT} et G_{LT}/G_{RT} sont respectivement égaux à 9 et 1,8 comparés à 10,3 et 8,9 rapportés par Guitard (1987).

Mais, le ratio G_{LT}/G_{RT} est comparable à la plage des valeurs 1,90-21,40 présentée par Bucur (2006) pour un ensemble de 11 essences différentes (à la fois des résineux et des feuillus). Malgré la variabilité au niveau des valeurs de $G_{c,LR}$, $G_{c,LT}$ et $G_{c,RT}$, ces ratios trouvés accordent une confiance à la méthode analytique suivie dans ce travail pour déterminer les modules de cisaillement, tout en se basant sur les modules élastiques expérimentaux et les coefficients de Poisson trouvés (Dackermann et al., 2016; Gonçalves et al., 2011).

Également pour le cas d'application des méthodes non destructives (ultrason ou résonance), le tableau 3.11 montre que les différents ratios déterminés (G_{LR}/G_{RT} ; G_{LR}/G_{RT} ; G_{LT}/G_{RT} et E_L/G_{LR}) se situent dans les mêmes intervalles mentionnés précédemment. De même, et selon les différents ratios obtenus par l'essai statique et les essais dynamiques, les résultats montrent la fiabilité des méthodes non

destructives pour déterminer le module de cisaillement du bois. Les ratios dynamiques de E_L/G_{LR} sont toujours moins importants que ceux obtenus par la méthode de compression. À l'inverse l'étude faite par Gonçalves *et al.* (2011) pour un ensemble de trois espèces Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Cupiuba (*Goupia glabra*) et gomme bleu de Sydney (*Eucalyptus saligna*), montre que les différents ratios obtenus par l'ultrason sont presque similaires à ceux obtenus par l'essai statique de compression. À titre d'exemple, le ratio E_L/G_{LR} est égal à 7,9 dans le cas d'ultrason et à 7,7 dans le cas de compression pour l'espèce Garapeira (*Apuleia leiocarpa*).

La différence observée entre le ratio E_L/G_{LR} trouvé dans cette étude et celui rapporté par Gonçalves *et al.* (2011) est due principalement au choix de la fréquence ultrasonore utilisée, que ce soit dans le cas d'ondes transversales ou longitudinales. Gonçalves *et al.* (2011) ont utilisé des capteurs de 1MHz pour les deux types d'ondes (transversales et longitudinales). En général, plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation du bois est importante (Arciniegas *et al.*, 2014; Beall, 2002; Senalik *et al.*, 2014). Ainsi, la surestimation des modules trouvés par l'ultrason est moins faible en utilisant des basses fréquences. Cependant, l'atténuation du bois est plus importante lorsqu'on pénètre une onde transversale comparée à une onde longitudinale. Dans cette étude, des capteurs de 1 MHz et 10 MHz sont utilisés respectivement dans le cas des ondes transversales et longitudinales (Tableau 2.2).

Le module E_L mesuré par Gonçalves *et al.* (2011) est élevé comparé à celui de l'étude présente (avec 10MHz). Puisque G_{LR} a été mesuré par la même fréquence de capteur, cet effet rend le ratio E_L/G_{LR} un peu plus faible par rapport au ratio rapporté par Gonçalves *et al.* (2011). De même, le degré d'atténuation de bois et la fréquence de mesure expliquent aussi la différence observée entre les ratios d'ultrason et la méthode de résonance (Tableau 3.11).

En comparant à la méthode d'ultrason, la vibration torsionnelle reste la méthode la plus proche à la méthode de compression. Ceci est expliqué par le fait que l'atténuation des ondes vibratoires de bois est moins importante que celle des ondes

ultrasoniques et par conséquent plus proche des caractéristiques naturelles du bois (Ploix, 2006). Comme il est montré dans le tableau 3.11, les ratios G_{LR}/G_{RT} , G_{LR}/G_{RT} et G_{LT}/G_{RT} obtenus par la méthode de résonance sont presque identiques à ceux déterminés par l'essai de compression. En prenant le peuplier hybride comme exemple, les deux méthodes (compression et résonance) ont les mêmes ratios G_{LR}/G_{RT} , G_{LR}/G_{RT} et G_{LT}/G_{RT} qui sont égales à 2 ; 3 et 1,85, respectivement.

Tableau 3.11 : Variation des différents ratios de modules de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}) en fonction de l'essence et de méthode de mesure

Essence étudiée	Méthode utilisée	G_{LR}/G_{LT}	G_{LR}/G_{RT}	G_{LT}/G_{RT}	E_L/G_{LR}
Bouleau blanc	Méthode d'ultrason	6	7	1,2	3
	Méthode de résonance	2	3	1,5	9
	Essai de compression	2	4	1,8	27
Peuplier faux-tremble	Méthode d'ultrason	6	12	2	4
	Méthode de résonance	2	5	2	9
	Essai de compression	3	5	1,8	29
Peuplier hybride	Méthode d'ultrason	5	8	1,8	3
	Méthode de résonance	2	3	1,8	9
	Essai de compression	2	3	1,9	15
Mélèze laricin	Méthode d'ultrason	4	6	2	5
	Méthode de résonance	2	4	3	9
	Essai de compression	2	2	1,6	26
Pin gris	Méthode d'ultrason	6	8	1,4	4
	Méthode de résonance	2	3	1,3	8
	Essai de compression	4	8	2	24
Épinette blanche	Méthode d'ultrason	5	7	1,5	3
	Méthode de résonance	2	9	5,6	9
	Essai de compression	2	4	2	23
Thuya occidental	Méthode d'ultrason	3	5	2	3
	Méthode de résonance	3	4	1,2	9
	Essai de compression	2	4	1,7	13



3.2.3 Prédiction des modules de cisaillement statiques du bois par les méthodes non destructives

Comme dans le cas des modules d'élasticité, il est également important de prédire les modules du cisaillement statique à partir des méthodes non destructives (ultrason et résonance torsionnelle). Tel qu'illustré à la figure 3.9 et en considérant toutes les essences confondues, il apparaît que la relation entre $G_{c, LR}$ et $G_{u, LR}$ ainsi qu'entre $G_{c, LR}$ et $G_{r, LR}$ est relativement faible à moyenne, avec $R^2 = 0,37$ et $0,42$, respectivement dans le plan LR. Ces coefficients de détermination (R^2) sont aussi souvent faibles, en considérant chaque espèce à part ($R^2 < 0,3$).

De même, les figures 3.10 et 3.11 montrent des corrélations faibles à moyennes ($R^2 < 0,38$) entre les modules de cisaillement statiques et dynamiques dans les deux autres plans (LT et LR).

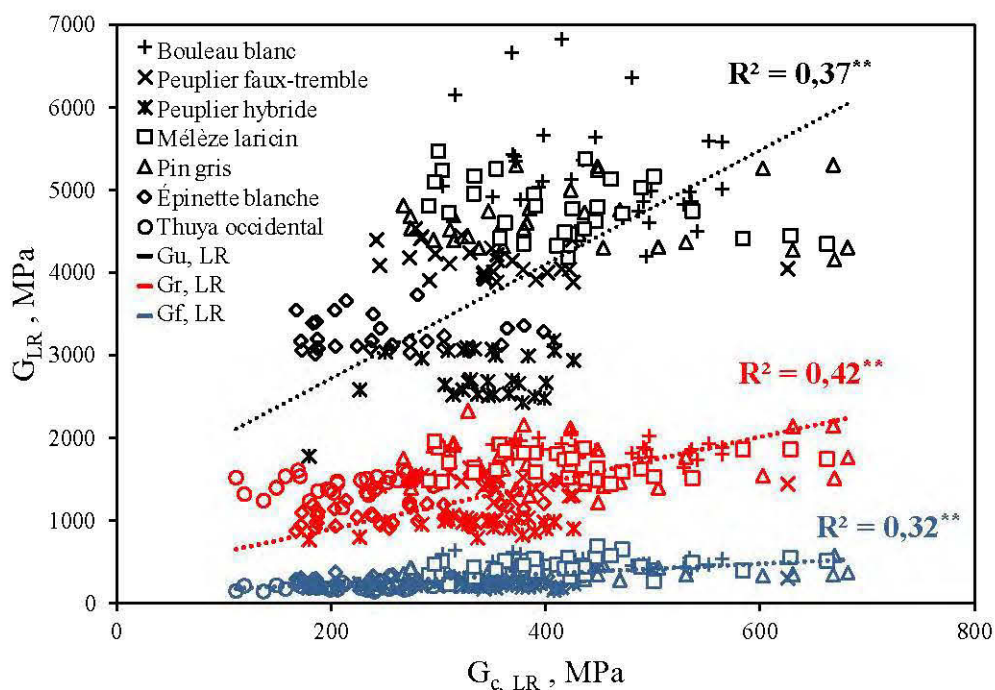


Figure 3.9: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c, LR}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r, LR}$), la méthode d'ultrason ($G_{u, LR}$) et l'essai de flexion ($G_{f, LR}$)

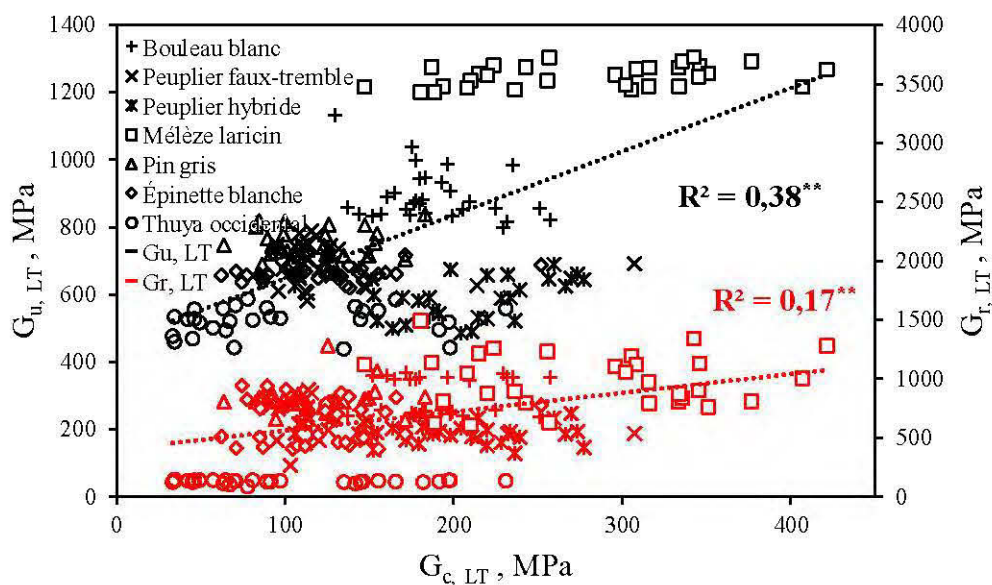


Figure 3.10: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c,LT}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r,LT}$), la méthode d'ultrason ($G_{u,LT}$) et l'essai de flexion ($G_{f,LT}$)

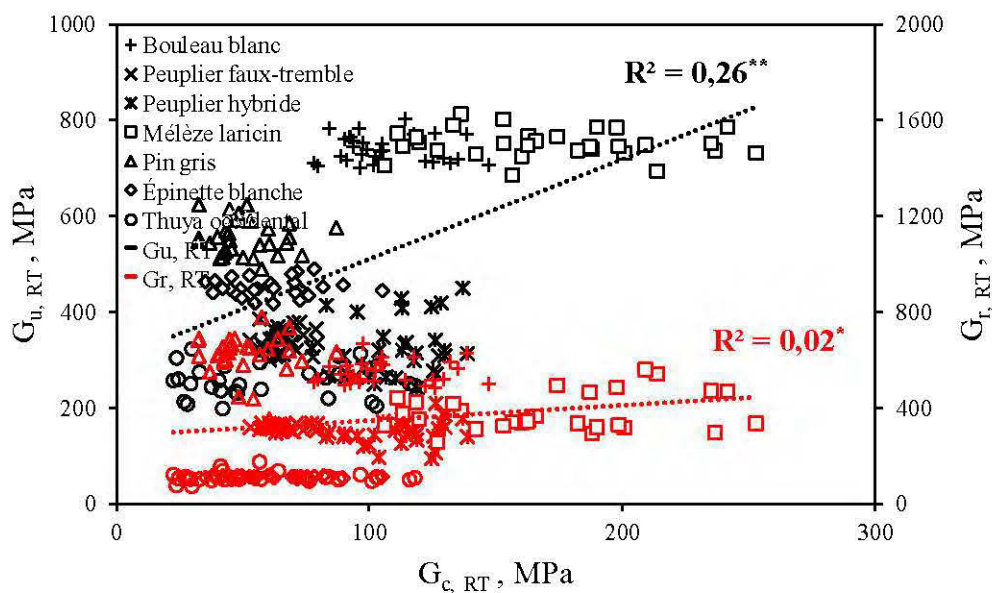


Figure 3.11: Relation entre le module de cisaillement obtenu par l'essai de compression ($G_{c,RT}$) et celui obtenu par la méthode de résonance en appliquant la vibration de torsion ($G_{r,RT}$), la méthode d'ultrason ($G_{u,RT}$) et l'essai de flexion ($G_{f,RT}$)

Dans cette section, le manque de concordance avec la littérature est en partie dû à la grande variabilité des résultats, notamment en ce qui concerne la manière dont ces modules de cisaillement sont mesurés (Divos et al., 1998). D'autre part, la plupart des études se concentrent seulement sur la relation entre le module d'élasticité et celui de cisaillement (Castellanos, 2018; Divos et al., 1998; Müller et al., 2007; Roohnia et Kohantorabi, 2015). De ce fait, la majorité d'entre elles s'appuient seulement sur le rapport (E/G) pour confirmer la fiabilité d'une telle méthode appliquée (à la fois destructive ou non destructive) pour mesurer le module de cisaillement du bois. Toutefois, pour les trois plans de bois analysés (LR, LT et RT), les faibles relations entre les modules statiques et dynamiques de cisaillement s'expliquent par plusieurs raisons : du point de vue acoustique, les ondes transversales se propagent dans un plan bien défini (LR, LT et RT), et par conséquent, l'atténuation du bois est plus élevée que dans le cas d'une propagation unidirectionnelle (L, R ou T) (Crespo et al., 2017). Ainsi, le contre-effet de la direction transversale du bois (R ou T) est toujours présent, ce qui explique la puissante perturbation engendrée sur les ondes pénétrées, notamment dans les plans (LT et RT). Tel qu'illustré dans les figures (3.12 et 3.13), les corrélations entre les deux modules dynamiques de cisaillement mesurés sont faibles à moyennes dans le même plan (LT ou RT) ($R^2 < 0,5$).

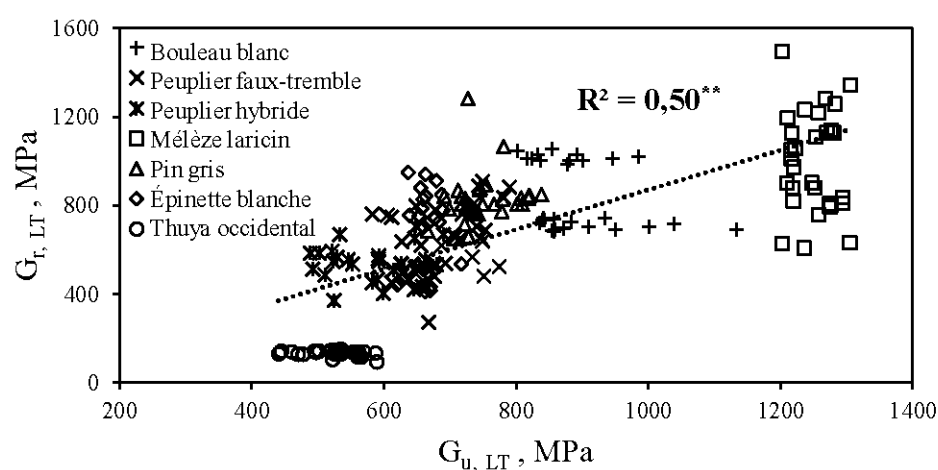


Figure 3.12: Relation entre le module dynamique de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,LT}$) et celui obtenu par l'ultrason ($G_{u,LT}$) toutes essences confondues

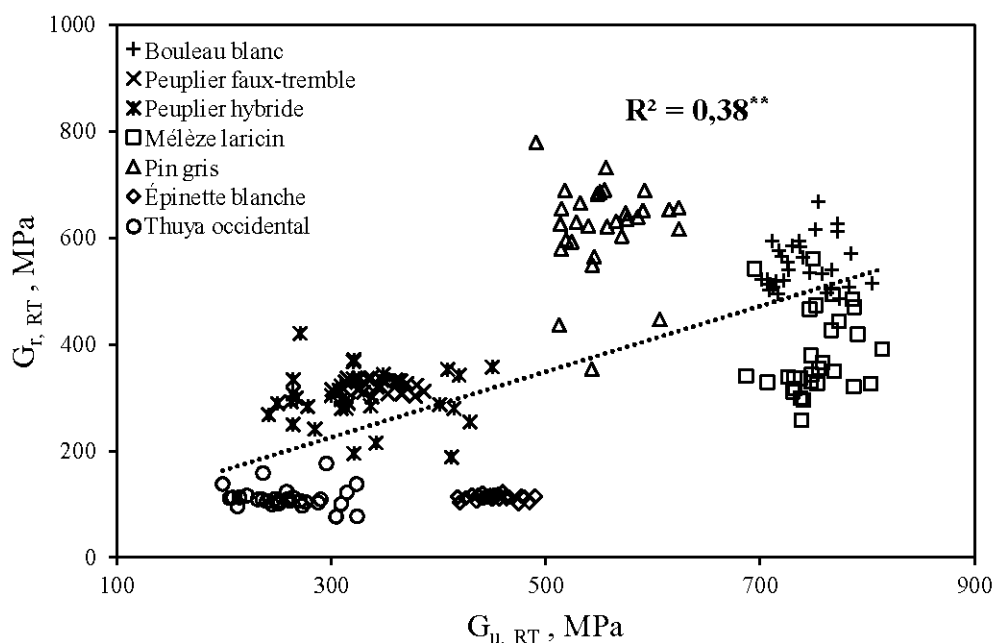


Figure 3.13: Relation entre le module dynamique de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,RT}$) et celui obtenu par l’ultrason ($G_{u,RT}$) toutes essences confondues

À l’inverse, dans le plan LR, le coefficient de détermination (R^2) entre $G_{u,LR}$ et $G_{r,LR}$ est d’environ 0,85 (Figure 3.14). Cette forte corrélation est expliquée par la faible variation entre les mesures en combinant toutes les essences. Pour chaque essence individuelle, cette relation ($G_{u,LR}$ et $G_{r,LR}$) est plus faible ($R^2 < 0,3$). La faible relation entre les modules dynamiques notamment dans le plan LT et RT est due au fait que la méthode de vibration en torsion est plus sensible aux caractéristiques surfaciques du bois, alors que la méthode par ultrasons est sensible aux caractéristiques internes du bois (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998). D’autre part, tel que discuté dans la section (3.1.1.3), la divergence des ondes est induite par l’anatomie et les composants du matériel. Ainsi, divers éléments affectent grandement la rigidité de cisaillement du bois, à savoir le pourcentage de rayons, l’ultrastructure de la paroi cellulaire, la teneur en lignine et la forte connexion entre les cellules via la lamelle moyenne (Keunecke et al., 2007; Khokhar et al., 2008; Müller et al., 2007). Cependant, l’effet majeur reste relatif à la porosité du bois (Kováčik, 1999; Müller et al., 2007). Cet aspect poreux rend difficile la diffusion de l’onde, en particulier

les ultrasons. Ceci est principalement dû au fait que les ondes acoustiques ne peuvent pas se déplacer dans le vide (Navi, 2006).

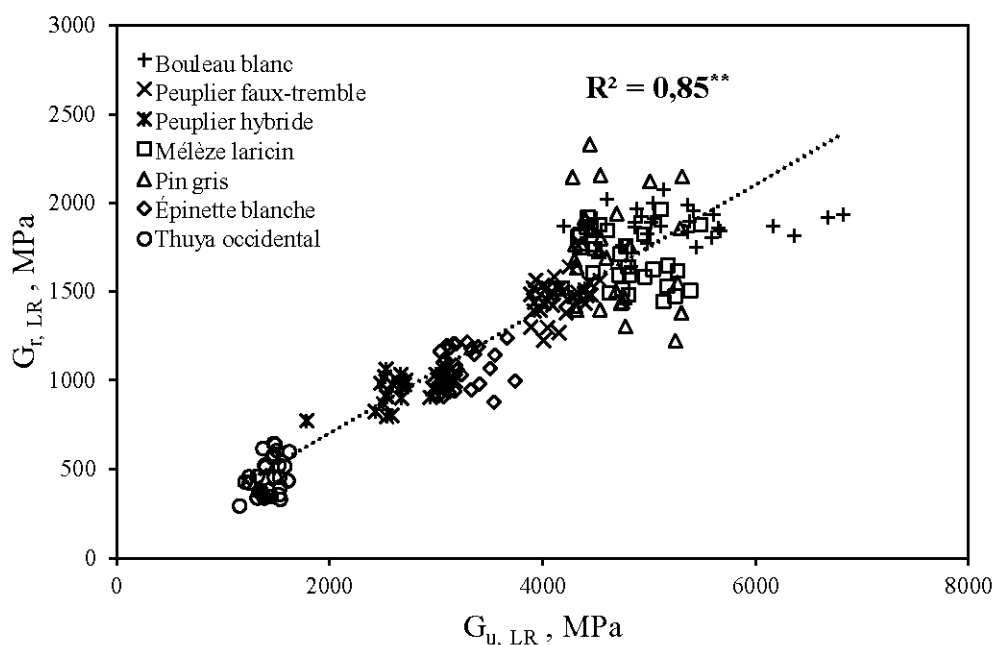


Figure 3.14: Relation entre le module de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r, LR}$) et celui obtenu par l’ultrason ($G_{u, LR}$) toutes essences confondues

Par ailleurs, comme pour le cas des modules élastique radial et tangentiel (E_R et E_T), la plupart des caractéristiques qui déterminent le module de cisaillement du bois ont un impact négatif sur le chemin suivi par l’onde. Les éléments les plus importants contribuant à la variation des ondes sont l’épaisseur de la paroi cellulaire ainsi que l’AMF de la couche S_2 (Keunecke et al., 2007). L’importance de ces éléments réside dans leur relation avec la rigidité de la paroi cellulaire (Keunecke et al., 2007). Ils définissent la rigidité en flexion de cette paroi qui affecte grandement le module de cisaillement.

En effet, lors d’un essai de cisaillement (dynamique ou statique), il y a toujours une apparition de contrainte de flexion (Khokhar et al., 2008; Yoshihara et al., 1998). L’apparition de ces contraintes secondaires est souvent considérée comme la principale source de cette diversité au niveau des mesures. En prenant comme exemple un spectre fréquentiel trouvé par la méthode de résonance torsionnelle, il

est possible alors de visualiser deux types de mode vibratoire : soit le mode de flexion ou le mode de torsion. Cela rend difficile d'identifier correctement la fréquence correspondante au mode de torsion, à partir de laquelle on peut mesurer le module de cisaillement. Pour cela, en utilisant la méthode de résonance torsionnelle, certains chercheurs ont révélé le besoin de compétences et d'expertises spécifiques afin de minimiser ces erreurs expérimentales (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998).

Ainsi, du point de vue statique, ces contraintes inhérentes (les contraintes de flexion) rendent difficile la comparaison des résultats obtenus même pour des tests identiques avec les mêmes essences, ce qui peut également expliquer pourquoi il n'y a pas de forte corrélation ($R^2=0,32$) entre le module mesuré par le test de compression ($G_{c,LR}$) et de flexion ($G_{f,LR}$) (Figure 3.9). Ainsi, la différence entre $G_{c,LR}$ et $G_{f,LR}$ est généralement non significative (Tableau 3.9).

D'autre part, la difficulté de réaliser un essai statique, en particulier la préparation des échantillons normalisés, amène les chercheurs à recommander l'utilisation des méthodes non destructives, notamment la méthode de vibration torsionnelle qui est la plus adéquate (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998; Müller et al., 2007; Nakao et Okano, 2007; Roohnia et Kohantorabi, 2015). Malgré cela, les études sont en cours pour chercher une méthode plus facile, comme la méthode de vibration de flexion (évaluation simultanée du module d'élasticité et du module de cisaillement) (Roohnia et Kohantorabi, 2015). Peu d'études ont prouvé l'efficacité de cette méthode de flexion, que ce soit sur le plan dynamique ou statique (Yoshihara et al., 1998; Yoshihara et Yoshinobu, 2015). En prenant comme exemple l'étude de Divos et al. (1998) sur le bois de construction, le module de cisaillement est mesuré par trois tests : le test statique de flexion et le test dynamique de résonance en flexion et de torsion. Divos et al. (1998) ont montré que les mesures de résonance en torsion étaient proches des mesures statiques de flexion. L'erreur relative dans la détermination du module de cisaillement ne dépasse pas 1,1% avec la résonance de torsion, contre 6,8% avec la résonance en flexion (Divos et al., 1998). Cela est dû à la forte sensibilité de cette technique (résonance en flexion), particulièrement

au niveau de l'identification précise de ces fréquences propres. De ce fait, dans la présente étude, on constate que le coefficient de détermination (R^2) entre les modules dynamiques ($G_{u,LR}$ et $G_{r,LR}$) et le module statique en appliquant la méthode statique de flexion ($G_{f,LR}$), s'avère important ($R^2 \approx 0,50$) par rapport à la méthode analytique de compression ($G_{c,LR}$) (Figure 3.9). Cela peut démontrer aussi la fiabilité de l'essai statique de flexion dans la détermination du module G_{LR} .

3.2.4 Prédiction des modules du cisaillement du bois à partir des modules d'élasticité

Comme mentionné précédemment, l'estimation du module de cisaillement se fait dans la plupart des industries en utilisant le ratio (E/G) qui a une valeur d'environ 16 (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998; Roohnia et Kohantorabi, 2015). Cependant, il a été démontré que ce ratio varie d'une essence à une autre (Tableau 3.11). De ce fait, les chercheurs ont ainsi approuvé que la détermination du module de G à partir de ce ratio (E/G) est approximative et imprécise (Bucur, 2006; Gonçalves et al., 2011; Ploix, 2006; Roohnia et Kohantorabi, 2015). Cela contribue alors au risque d'obtenir une mauvaise estimation de cette propriété (G). Cela a donc nécessairement mené à étudier la relation entre le module élastique (E) et le module de cisaillement (G). Pour chaque méthode de calcul, les relations entre (E_L , G_{LR}), (E_R , G_{LT}) et (E_T , G_{RT}) ont été analysées (Tableau 3.12).

Il est à noter que ces différentes relations sont rarement étudiées dans la littérature. La plupart des travaux se sont limités à étudier la relation entre E_L et G_{LR} , avec des essais expérimentaux différents de ceux de la présente étude (Divos et al., 1998; Lahr et al., 2014, 2017; Yoshihara, 2011). Ainsi, les majorités d'entre eux ont généralement utilisé la méthode de résonance. Les études ayant examinées les relations (E_L , G_{LR}) en utilisant les méthodes d'ultrason et de compression sont rares.

Dans le cas de la méthode de résonance, une forte corrélation significative a été obtenue pour ces trois relations, et même pour chaque essence individuelle. Dans l'ensemble, le R^2 atteint respectivement 0,95 ($E_{r,L}$, $G_{r,LR}$), 0,68 ($E_{r,R}$, $G_{r,LT}$) et 0,87

($E_{r, T}$, $G_{r, RT}$) (Tableau 3.12). Ces corrélations confirment la pertinence de la vibration longitudinale dans la prédiction dynamique du module de cisaillement, et ce pour les différents plans étudiés.

Tableau 3.12 : Coefficient de détermination (R^2) des modules d'élasticité et de cisaillement pour toutes les essences confondues

	$E_{r, L}$	$E_{rf, L}$	$E_{r, R}$	$E_{r, T}$	$G_{r, RL}$	$G_{r, LT}$	$G_{r, RT}$
$E_{r, L}$	1						
$E_{rf, L}$	0,99**	1					
$E_{r, R}$	0,41**	0,43**	1				
$E_{r, T}$	0,64**	0,64**	0,54**	1			
$G_{r, LR}$	0,95**	0,96**	0,52**	0,69**	1		
$G_{r, LT}$	0,57**	0,56**	0,69**	0,50**	0,58**	1	
$G_{r, RT}$	0,49**	0,52**	0,57**	0,87**	0,59**	0,33**	1

* Significatif à $\alpha = 0,05$, ** Significatif à $\alpha = 0,01$, *** Significatif à $\alpha = 0,001$, ns non significatif à $\alpha < 0,05$

Ainsi, cette étude montre la pertinence de la vibration de flexion dans l'estimation du module de cisaillement ($G_{r, LR}$). Une forte corrélation ayant été trouvée entre $E_{rf, L}$ et $G_{r, LR}$, avec R^2 égale à 0,96 (Tableau 3.12). En se basant alors sur les fortes corrélations trouvées, on déduit qu'il n'est pas vraiment nécessaire d'appliquer les trois modes de vibrations (longitudinale, flexion et torsion) pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'échantillon testé (Figures 3.15- 3.17). Il suffit alors d'appliquer un seul mode de vibration, de préférence le mode de vibration longitudinale, vu qu'il est simple d'application. De ce fait, il est vrai que les avantages de la méthode de résonance sont nombreux, en particulier la rapidité et la simplicité d'exécution. Cette déduction peut être considérée comme un avantage supplémentaire de la méthode de résonance par rapport à la méthode d'ultrason.

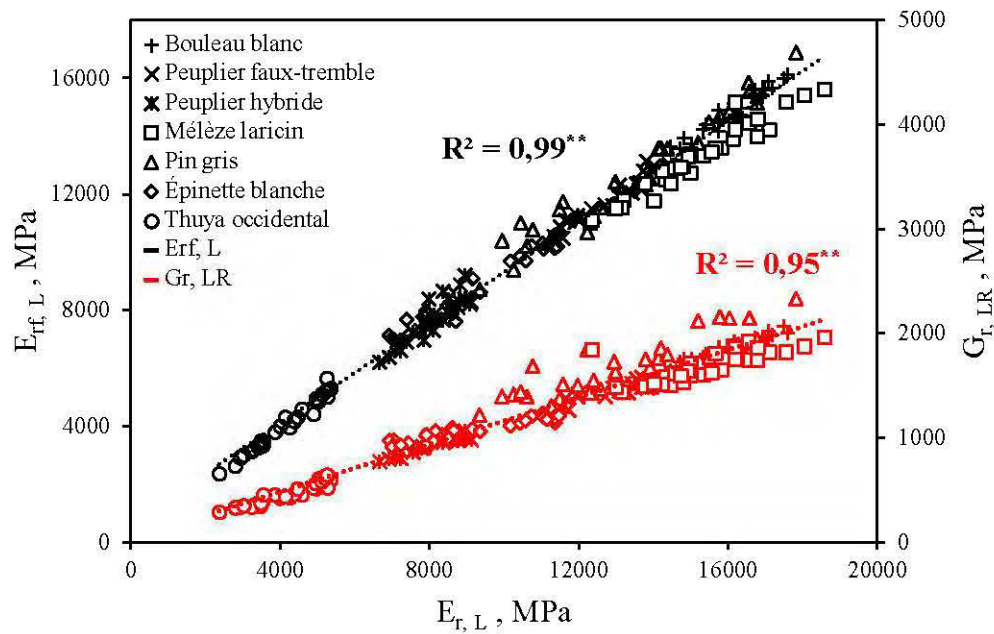


Figure 3.15: Corrélation entre le module obtenu par la vibration longitudinale ($E_{r, L}$) et celui obtenu par la vibration de flexion ($E_{rf, L}$) et la vibration de torsion ($G_{r, LR}$) toutes essences confondues

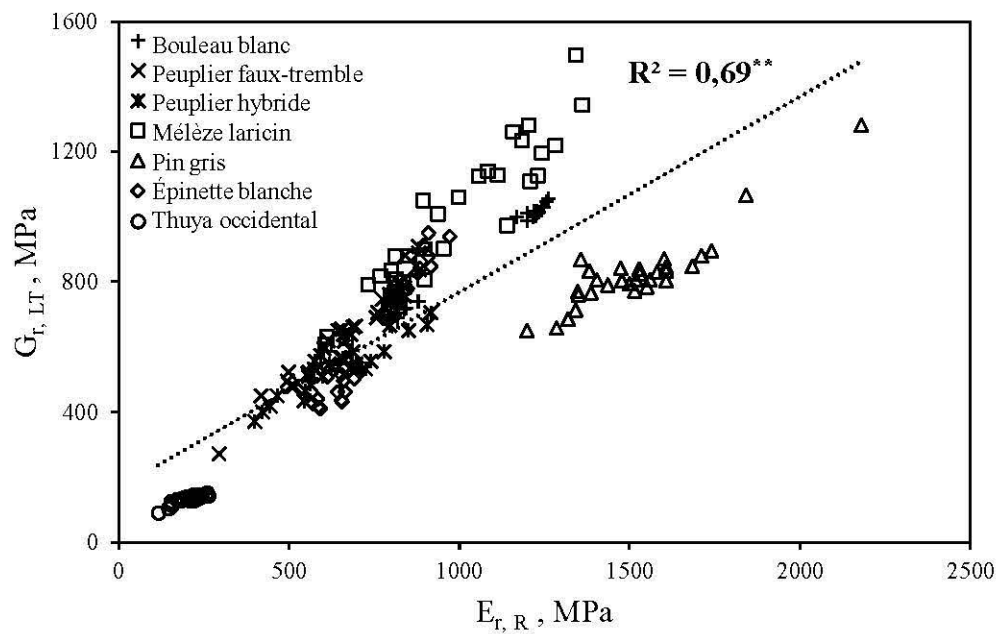


Figure 3.16: Corrélation entre le module d'élasticité radial obtenu par la vibration longitudinale ($E_{r, R}$) et le module de cisaillement obtenu par la vibration de torsion ($G_{r, LT}$) toutes essences confondues

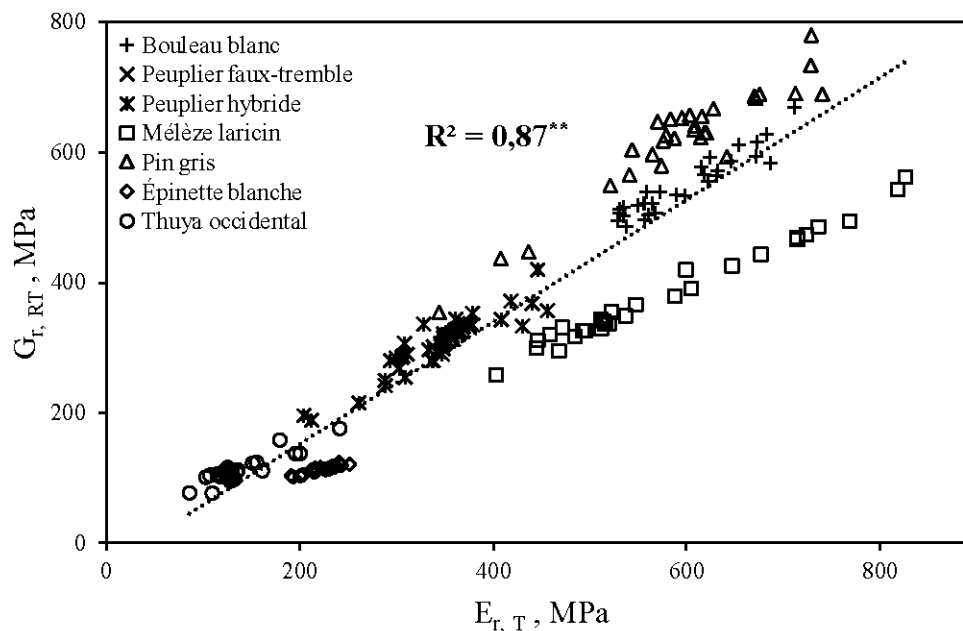


Figure 3.17: Corrélation entre le module d'élasticité tangentiel obtenu par la méthode de résonance ($E_{r,T}$) et le module de cisaillement obtenu par la méthode de résonance ($G_{r,RT}$) toutes essences confondues

Des études antérieures ont rapporté une corrélation faible entre le module d'élasticité (E) et de cisaillement (G) ($R^2 < 0,3$) (Divos et al., 1998; Lahr et al., 2014). La forte corrélation entre E et G dans notre étude est due, d'une part, au mode de vibration appliqué et, d'autre part, à la méthode expérimentale suivie. En pratique, la façon d'effectuer la vibration longitudinale ainsi que la vibration de flexion est généralement similaire dans toutes les études (Chauhan et Sethy, 2016; Hassan et al., 2013; Leite et al., 2012; Roohnia et Brancheriau, 2015). Cependant, dans le cas de la vibration de flexion, la différence réside dans le plan d'excitation choisi. Malgré l'effet de ce plan excité sur la corrélation entre E et G , la plupart des études n'ont pas mis l'accent là-dessus. À titre d'exemple, Leite *et al.* (2012) ont évalué les propriétés dynamiques (module d'élasticité et module de cisaillement) du bois de Copaïer (*Copaifera langsdorffii*) en utilisant la vibration de flexion (qui permet de déterminer simultanément ces deux paramètres). Une faible corrélation entre E et G a été trouvée. Leite *et al.* (2012) n'ont cependant pas précisé à quel plan appartenait la propriété mesurée ni le nombre d'échantillons utilisés, ce qui

limite les résultats. Ce type d'études nécessite un nombre important d'échantillons en vue de valider les résultats trouvés. En effet, l'identification du plan d'excitation est importante, car il peut affecter considérablement le degré de corrélation entre ces propriétés (E et G). Dans la recherche actuelle, le plan d'excitation pour déterminer le module de flexion correspond au plan tangentiel (LT) le plus proche de la moelle. Ce choix est basé sur la norme ASTM D143-01 (ASTM, 2000), faite pour l'essai statique de flexion du bois.

Selon Roohnia et Kohantorabi (2015), il existe généralement trois méthodologies à suivre pour calculer le module de cisaillement par la méthode de résonance, telle que le théorème avancé de Timoshenko (1955) sur la vibration de flexion, la norme ASTM C1548-02 (ASTM, 2012) faite pour les matériaux réfractaires, et la formule fournie par Divos *et al.* (1998). Les mesures du module de cisaillement devraient être comparables, quelle que soit la méthodologie utilisée. Or, le choix de la façon d'appliquer la méthode de résonance affecte considérablement les résultats. De ce fait, Divos *et al.* (1998) ont effectué une comparaison entre ces différents modes d'application de la méthode de résonance pour la détermination du G et ont montré qu'il existe une différence significative entre les modules de cisaillement obtenus. Cette différence constatée s'explique peut-être par le fait que le mode de torsion induit une condition de contrainte de cisaillement pure dans l'échantillon, comparé aux autres types de méthodes. Il y a donc le risque d'apparition de contraintes de cisaillement hors plan qui, par conséquent, vont influencer le module de cisaillement calculé (Yoshihara, 2011).

De ce fait, on peut alors constater que ce type de relation ($E_{r,L}$ et $G_{r,L,R}$) est fortement lié à la répartition des contraintes associées à chaque mode. La distribution des contraintes de torsion diffère largement de celle des contraintes de flexion, en comparaison aux contraintes longitudinales (Khokhar, 2011). En effet, le module d'élasticité est affecté par les contraintes normales agissant perpendiculairement sur la section du bois (Khokhar, 2011). Toutefois, le module de cisaillement est affecté par les contraintes de cisaillement agissant tangentielllement sur la section du matériau (Khokhar, 2011). De ce fait, le degré de la corrélation entre $E_{r,L}$, déterminé

par la vibration longitudinale, et $G_{r,LR}$, peut s'expliquer par le phénomène d'allongement ou de raccourcissement des fibres. Plus précisément, les fibres de bois s'allongent ou se raccourcissent dans la direction longitudinale du bois (Khokhar, 2011). Dans ce cas, la direction longitudinale correspond principalement à la direction des contraintes normales. Par conséquent, la présence de l'un de ces deux phénomènes (l'allongement ou le raccourcissement des fibres) ne peut affecter que le module d'élasticité. Pour cela, la relation entre $E_{r,L}$ et $G_{r,LR}$ dépend aussi de la variation dimensionnelle des fibres du bois (Dündar et al., 2016; Keunecke et al., 2007; Khokhar, 2011).

D'autre part, tel que discuté précédemment dans la section (3.2.3), les contraintes de cisaillement peuvent être générées suite à une vibration de flexion (faite pour mesurer $E_{rf,L}$). Ainsi, l'ampleur de corrélation entre $E_{rf,L}$, déterminé par la vibration de flexion et $G_{r,LR}$, peut s'expliquer par la différence de distribution des contraintes de cisaillement en flexion et en torsion. Les attributs géométriques de l'échantillon testé ont un effet majeur sur cette différence de distribution des contraintes de cisaillement (en flexion ou même en torsion). En effet, la différence réside dans le fait que les contraintes de cisaillement en flexion sont affectées par des attributs géométriques internes (la fibre neutre de l'échantillon), tandis que celles en torsion sont affectées par les attributs externes comme la forme de l'échantillon, sa surface, etc. (Roohnia et Kohantorabi, 2015). Par conséquent, l'ampleur de la corrélation $E_{rf,L}$ et $G_{r,LR}$ est fortement lié à l'homogénéité de l'échantillon testé. Plus la présence de défauts est faible (exemple les défauts de durcissement dans le séchage au four), plus l'échantillon de bois est homogène. La présence de défauts peut entraîner une variation du flux de cisaillement et peut ainsi affecter la mesure finale du module de cisaillement (Divos et al., 1998; Roohnia et Kohantorabi, 2015).

L'homogénéité du bois est en grande partie liée à la dimension de l'échantillon testé. La dimension de l'échantillon est d'une grande importance, notamment lorsque la vibration en flexion est utilisée pour déterminer à la fois les modules d'élasticité et de cisaillement. La plupart des travaux qui étudient la relation entre $E_{rf,L}$ et $G_{r,LR}$, mesurent simultanément ces deux propriétés (Cavalli et al., 2017b;

Divos et al., 1998; Guan et al., 2016; Hearmon, 1958). À ce sujet, Chui (1991) a montré que la vibration de flexion est utile pour estimer avec précision le module de cisaillement, à condition que le rapport entre la longueur de l'échantillon (L) et son épaisseur (e) n'excède pas 10. Cette condition n'a pas été respectée dans la plupart des études menées dans le domaine de la construction, car ils ont testé des échantillons de taille structurale, par exemple le bois de charpente (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998; Hearmon, 1958). L'homogénéité et les dimensions de l'échantillon expliquent la forte corrélation trouvée dans cette étude entre $G_{r,LR}$ et $E_{f,L}$, comparé à celle rapportée dans la littérature (Cavalli et al., 2017b; Divos et al., 1998; Guan et al., 2016; Hearmon, 1958). Guan *et al.* (2016) ont étudié la relation entre $G_{r,LR}$ et $E_{f,L}$ pour un ensemble de six matériaux de composites de bois minces, en respectant cette condition ($\frac{L}{e} < 10$) et, ils ont trouvé qu'il y avait une relation parfaitement linéaire entre ces deux paramètres, avec un R^2 presque égale à 1.

De ce fait, dans le cas de la méthode de résonance, on constate que la forte corrélation trouvée entre E et G ressemble à une relation connue pour les matériaux isotropes et donnée par l'équation suivante (Khokhar, 2011):

$$G = \frac{E}{2(\nu + 1)} \quad (3.1)$$

Avec

- E : Le module d'élasticité, MPa
- G : Le module de cisaillement, MPa
- ν : Le coefficient de Poisson

En se basant alors sur ce rapprochement, on peut déduire que le bois a le comportement d'un matériau quasi-isotrope dans un plan défini. Cependant, pour confirmer cette déduction, les propriétés étudiées doivent aussi être mesurées par les méthodes statiques qui sont considérées comme les méthodes de référence (Guan et al., 2016).

Dans le cas de la méthode d'ultrason, les figures (3.18-3.20) montrent qu'il existe une corrélation moyennement forte entre $E_{u,L}$ et $G_{u,LR}$; $E_{u,R}$ et $G_{u,LT}$; et $E_{u,T}$ et $G_{u,RT}$, avec (R^2) de l'ordre de 0,70. Cette corrélation est très faible en considérant chaque essence de façon individuelle. La forte corrélation trouvée, toutes essences confondues, et la faible corrélation dans le cas de chaque essence est due au degré de dispersion des valeurs dans un intervalle bien défini. Dans le cas où chaque essence est étudiée séparément, les valeurs des modules de cisaillement étaient distribuées dans une large gamme de valeurs de modules d'élasticité. Ce qui implique le risque d'avoir des valeurs très dispersées, et par conséquent une corrélation faible entre E et G . À titre d'exemple, le cas du thuya occidental, les valeurs de $G_{u,LR}$ sont de 1159 à 1620 MPa dans un intervalle des valeurs de $E_{u,L}$ variant de 4200 à 6826 MPa (Tableau 3.2 et 3.9). Cependant, cette dispersion est moins importante dans le cas de toutes les essences confondues. En se basant sur les résultats trouvés, on ne peut pas conclure que la mesure ultrasonique des modules d'élasticité $E_{u,L}$, $E_{u,R}$ et $E_{u,T}$ est suffisante pour estimer les modules de cisaillements $G_{u,LR}$, $G_{u,LT}$ et $G_{u,RT}$, respectivement. Cette estimation reste toujours moins précise que la méthode de résonance et dépend toujours du degré de la dispersion des valeurs trouvées.

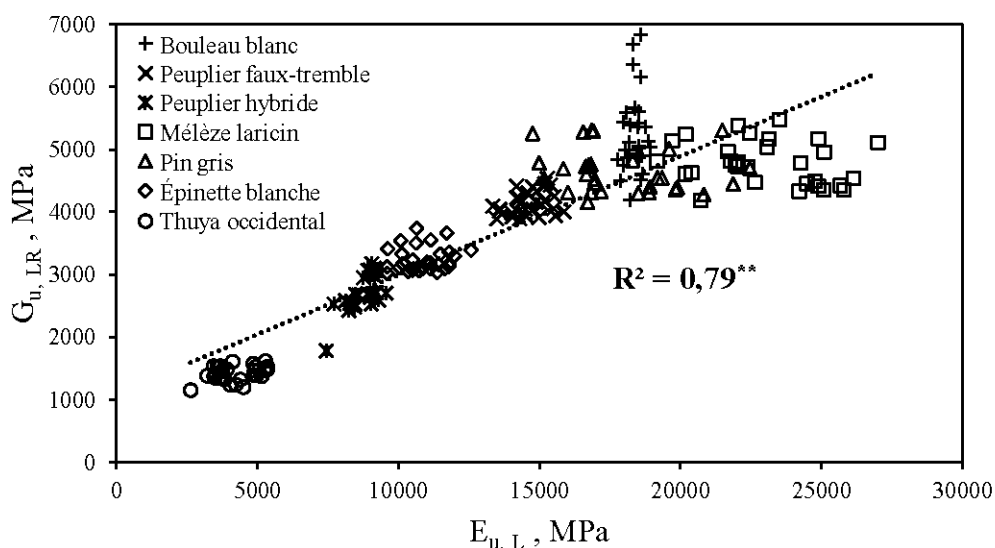


Figure 3.18: Relation entre le module d'élasticité longitudinal ($E_{u,L}$) et le module de cisaillement ($G_{u,LR}$) déterminés par la méthode d'ultrason

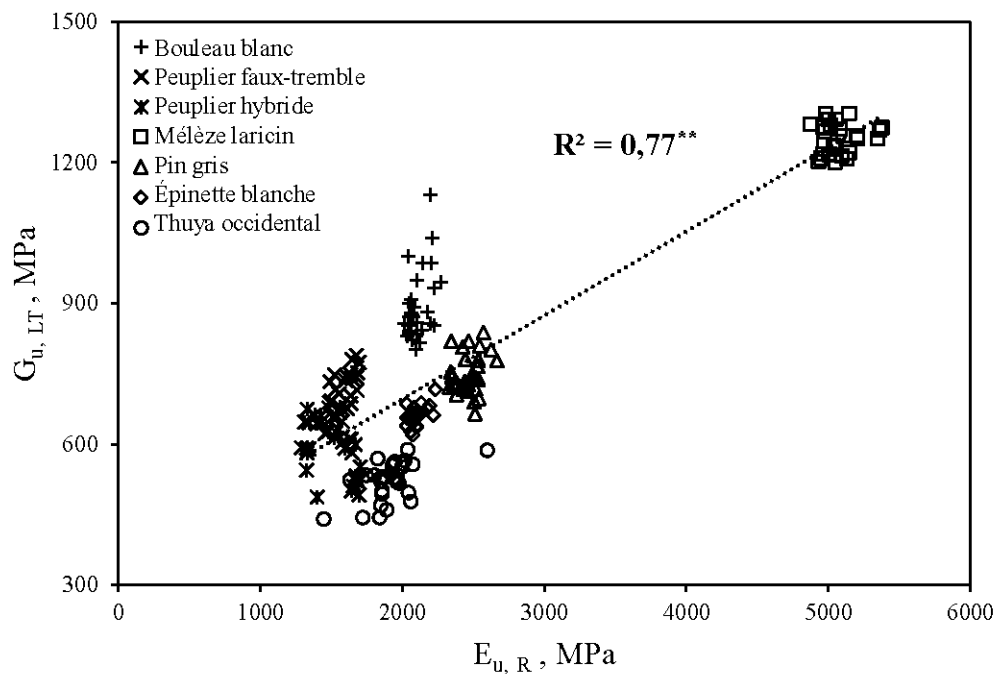


Figure 3.19: Relation entre le module d'élasticité radial d'ultrason ($E_{u,R}$) et le module de cisaillement ($G_{u,LT}$) déterminés par la méthode d'ultrason

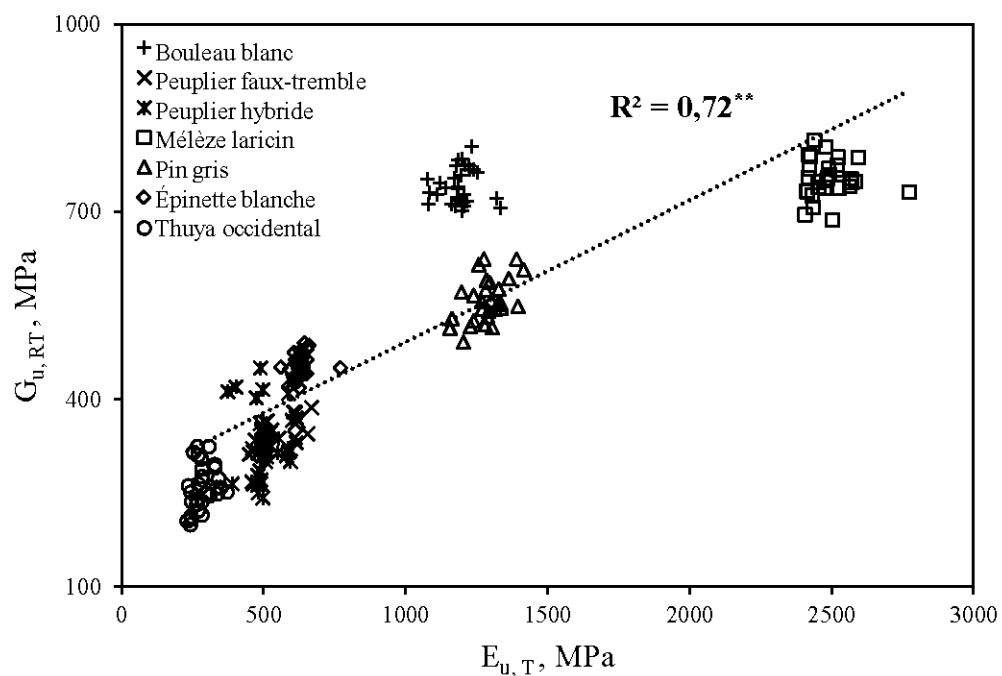


Figure 3.20: Relation entre le module d'élasticité tangentiel ($E_{u,T}$) et le module de cisaillement ($G_{u,RT}$) déterminés par la méthode d'ultrason

Cependant, dans le cas de l'essai statique de compression, les corrélations trouvées entre $E_{c,L}$ et $G_{c,LR}$ ainsi qu'entre $E_{c,R}$ et $G_{c,LT}$ sont faibles ($R^2=0,37$ et $0,26$, respectivement). Par contre, les figures 3.21 et 3.22 révèlent une forte corrélation entre $E_{c,R}$ et $G_{c,LR}$; $E_{c,T}$ et $G_{c,LT}$; et $E_{c,T}$ et $G_{c,RT}$. On constate alors qu'une relation significative a été trouvée entre le module de cisaillement dans le plan ij et le module d'élasticité dans la direction j . Cette forte corrélation entre $E_{c,j}$ et $G_{c,ij}$ peut s'expliquer par l'effet de la répartition non uniforme des contraintes de cisaillement γ_{ij} . La contrainte de cisaillement (γ_{ij}) est maximale suivant l'axe j (Khokhar, 2011).

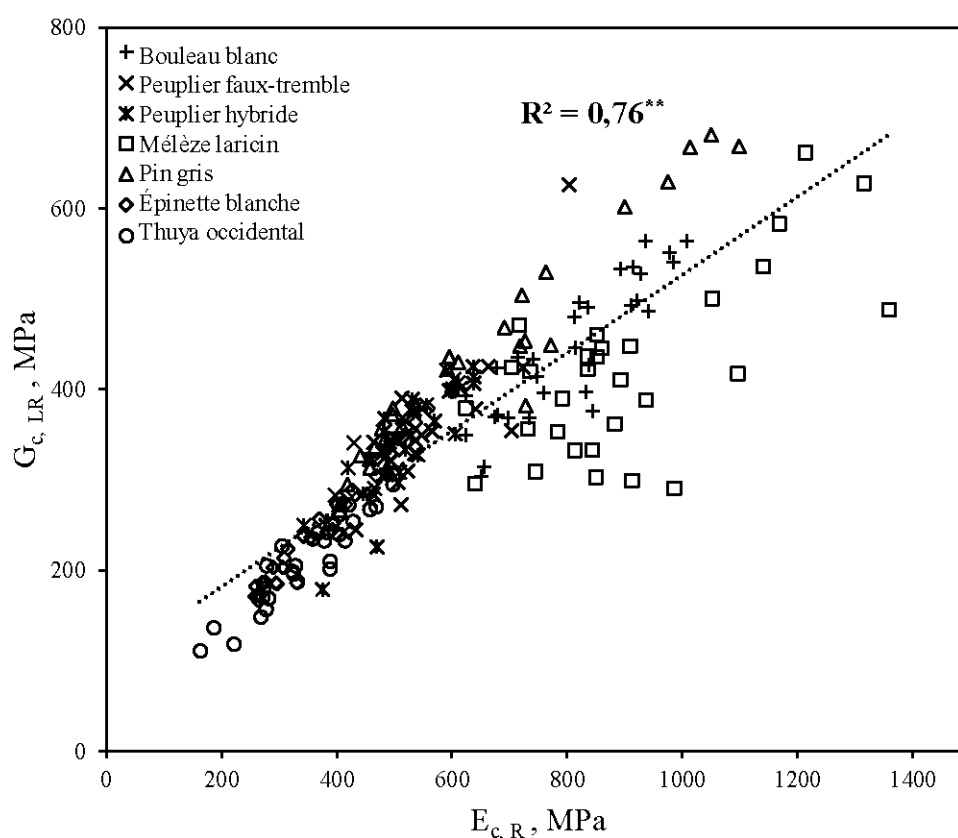


Figure 3.21: Relation entre le module d'élasticité radial ($E_{c,R}$) et le module de cisaillement ($G_{c,LR}$) déterminés par la méthode de compression

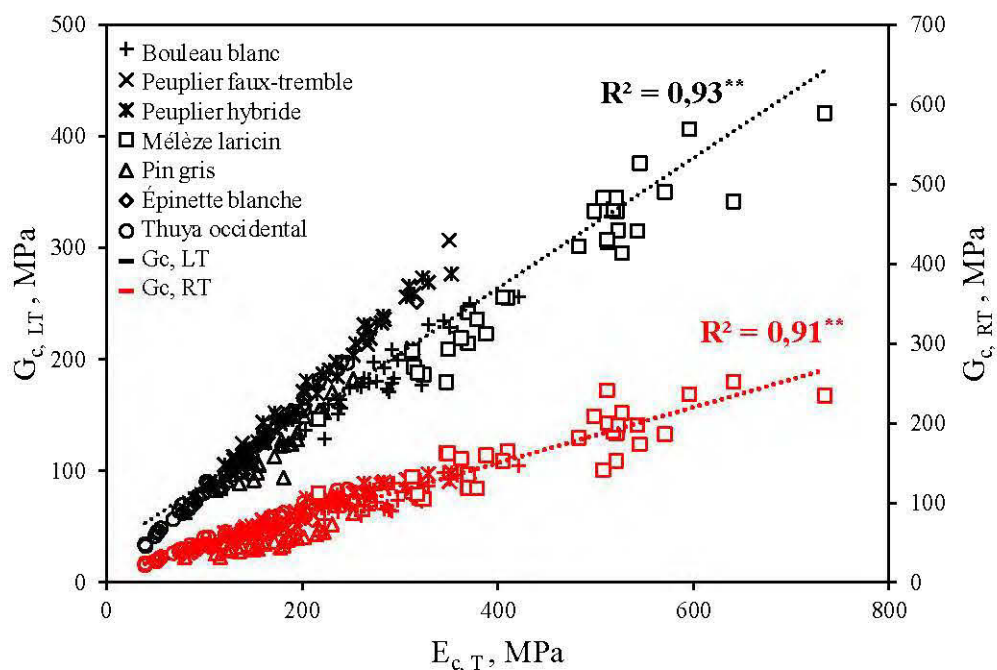


Figure 3.22: Relation entre le module d'élasticité tangentiel ($E_{c,T}$) et les modules de cisaillement ($G_{c,LT}$ et $G_{c,RT}$) déterminés par la méthode de compression.

Cependant, on se réfère généralement aux résultats trouvés dans la recherche actuelle. La méthode de résonance torsionnelle est la meilleure méthode pour prédire dynamiquement le module de cisaillement selon chaque plan. Ainsi, on peut confirmer que le module de cisaillement mesuré dans un plan bien défini dépend principalement de la distribution des contraintes de cisaillement dans le matériau testé. Cette distribution des contraintes diffère non seulement d'une méthode statique à une autre dynamique, mais aussi d'une méthode dynamique à une autre méthode dynamique. On peut constater que plus ces contraintes sont affectées par une direction particulière, plus le degré de corrélation entre le module de cisaillement mesuré et le module élastique de cette direction est élevé. À titre d'exemple, dans le cas de la méthode non destructive, le module de cisaillement mesuré dans un plan identifié est influencé par la direction de propagation des ondes comparée à la direction de polarisation.

3.3 Évaluation des coefficients de Poisson par les méthodes destructives et non destructives

3.3.1 Validation des méthodes de mesure appliquées

Les logiciels d'analyse par simulation numérique des comportements des matériaux possèdent de nos jours une réelle importance, surtout auprès des industries. En particulier, ces logiciels facilitent un choix correct de dimensions d'une telle conception, ce qui permet d'éviter tout risque de sécurité (i.e., effondrement de conception réalisé) et aussi le risque de gaspillage de la matière et donc de réduire les coûts. Toutefois, la modélisation et la simulation d'un matériau nécessitent une bonne connaissance du comportement élastique du matériau modélisé, surtout au niveau de coefficients de Poisson. Pour certains matériaux comme le bois, les coefficients de Poisson sont rarement rapportés dans la littérature. Ceci est dû à la difficulté de la détermination expérimentale de ces coefficients. Ces difficultés résident principalement au niveau des besoins en équipements chers (comme les extensomètres optiques) et aussi au niveau de la phase de préparation des échantillons de bois. En effet, la détermination des coefficients de Poisson nécessite des échantillons coupés dans le plan radial ainsi que tangentiel. Cependant, les limites de taille de bois dans ces deux plans de coupe rendent cette phase de préparation des échantillons un peu compliquée (Dackermann et al., 2016)

Étant donné les difficultés de l'essai expérimental des coefficients de Poisson du bois, plusieurs méthodes analytiques existantes se basent sur des théories différentes pour les calculer. De ce fait, il existe plusieurs théories applicables, mais elles reposent sur plusieurs hypothèses. Pour cela, la validation de la méthode du calcul de ces coefficients se base principalement sur la validation des trois inégalités (équations 1.25, 1.26, 1.27) (Green et al., 2003; Mascia et Nicolas, 2013). Dans la recherche actuelle, quatre théories analytiques ont été utilisées pour mesurer les coefficients de Poisson. Dans cette section, on s'intéresse donc à savoir laquelle de ces théories est acceptée. Pour chaque essence étudiée, le tableau 3.13 montre les moyennes des six coefficients de Poisson déterminés analytiquement pour chacune

des trois méthodes appliquées : l'essai de compression, la méthode d'ultrason et la méthode de résonance.

Tableau 3.13 : Les six coefficients de Poisson calculés pour les différentes essences selon l'essai de compression, la méthode d'ultrason (en appliquant la théorie isotropique et orthotropique) et la méthode de résonance.

Essence étudiée	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{TR}
Bouleau blanc	3,322 ¹	-0,413	-0,457	0,205	-0,015	-0,284
	0,298 ²	0,130	-0,343	0,034	0,008	-0,191
	0,376 ³	1,671	2,783	2,871	0,728	0,157
	5,929 ⁴	10,876	1,969	0,187	0,099	0,565
Peuplier faux-tremble	3,482 ¹	-0,481	-0,441	0,183	-0,013	-0,249
	0,302 ²	0,106	-0,431	0,033	0,004	-0,140
	0,695 ³	2,632	2,834	1,959	0,456	0,210
	4,894 ⁴	8,145	1,723	0,271	0,172	0,635
Peuplier hybride	3,303 ¹	-0,412	-0,435	0,257	-0,017	-0,238
	0,272 ²	0,156	0,056	0,047	0,009	-0,027
	0,598 ³	2,388	-0,030	12,813	3,498	-0,029
	2,123 ⁴	1,727	0,830	0,529	0,681	1,314
Mélèze laricin	3,565 ¹	-0,504	-0,246	0,231	-0,019	-0,152
	0,367 ²	0,336	0,284	0,081	0,037	0,140
	-0,505 ³	8,018	7,085	-0,318	0,136	0,119
	6,716 ⁴	7,473	1,198	0,168	0,150	0,966
Pin gris	2,913 ¹	-0,076	-0,520	0,339	-0,004	-0,207
	0,320 ²	0,281	0,117	0,044	0,020	0,061
	0,139 ³	6,086	11,045	0,538	0,187	0,063
	3,598 ⁴	13,250	3,949	0,309	0,084	0,290
Épinette blanche	3,286 ¹	-0,395	-0,022	0,268	-0,010	-0,006
	0,285 ²	0,269	-0,815	0,055	0,016	-0,242
	0,124 ³	0,856	0,159	8,679	1,333	-0,001
	3,513 ⁴	4,503	1,323	0,309	0,251	0,844
Thuya occidental	3,525 ¹	-0,241	-0,395	0,182	-0,008	-0,266
	0,233 ²	0,310	-1,260	0,103	0,021	-0,183
	0,051 ³	0,265	-88,199	247,458	64,166	-6,298
	1,981 ⁴	2,291	1,166	0,580	0,702	1,216

¹Coefficients de Poisson déterminés par la méthode de résonance

²Coefficients de Poisson déterminés par la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotropique (la théorie des ondes unidimensionnelles)

³Coefficients de Poisson déterminés par la méthode d'ultrason en appliquant la théorie orthotropique

⁴Coefficients de Poisson déterminés par la méthode de compression

Pour les coefficients de Poisson déterminés par l'essai de compression, les trois inégalités de vérification (équations 1.25, 1.26, 1.27) ne sont pas validées (Green et al., 2003; Mascia et Nicolas, 2013). Par conséquent, les valeurs trouvées ne sont

pas acceptées (Green et al., 2003; Mascia et Nicolas, 2013). À titre d'exemple, pour le bouleau blanc, v_{LT} est égal à 10,88 (Tableau 3.13). Cette valeur implique qu'avec la compression longitudinale de l'échantillon, l'allongement tangentiel est beaucoup plus important que le raccourcissement dans la direction de la charge appliquée (direction longitudinale) (Aira et al., 2014). À cette valeur ($v_{LT} = 10,88$), l'allongement tangentiel doit être visible à l'œil nu, ce qui n'est pas le cas durant l'expérience. Ainsi, pour un matériau ayant le même comportement que le bois, cette valeur très élevée montre que la variation au niveau de l'échantillon est pratiquement plus proche de celle de la rupture. Alors que, dans cette étude, tous les essais de compression sont effectués dans le domaine élastique de l'échantillon testé.

La détermination du coefficient de Poisson du bois lors d'un essai statique de compression est la méthode la plus utilisée par les autres chercheurs (Aira et al., 2014; Dackermann et al., 2016; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et al., 2016a; 2016b). En effet, ils la considèrent comme la méthode la plus abordable pour une détermination expérimentale de cette propriété. Vu le comportement viscoélastique du bois, il est requis d'avoir une haute précision dans les mesures d'entrée. Pour le cas d'un essai de compression, les mesures d'entrée correspondent aux déformations telles que les déformations axiales et latérales. Suite à une charge de compression appliquée dans la direction i , le coefficient de Poisson mesuré v_{ij} est donné par le ratio d'une déformation axiale i et une autre latérale dans la direction j (Dackermann et al., 2016). La différence entre l'étude actuelle et les autres études réside, non pas au niveau de la méthode du calcul, mais plutôt dans la méthode de mesure de ces déformations (axiale et latérale) (Aira et al., 2014; Dackermann et al., 2016; Gonçalves et al., 2011; Güntekin et al., 2016a, 2016b). En effet, dans la présente étude, les mesures d'entrée sont faites de manière indirecte alors que les autres études appliquent généralement des mesures directes. Cependant, cette nécessité d'avoir une grande précision s'impose autant pour les mesures de déformations de façon indirecte que pour le cas des données directes. Dans l'étude actuelle, les erreurs de mesures sont principalement dues au fait que les

déformations ont été mesurées de façon indirecte (ε_L , ε_R , et ε_T). Chacune de ces déformations correspond à la déformation de l'échantillon d'un essai de compression [compression longitudinale (ε_L), radiale (ε_R) et tangentielle (ε_T)]. Il est donc préférable d'appliquer la méthode directe pour mesurer les six coefficients du bois, ceci afin de minimiser ces erreurs de mesures. De ce fait, cette méthode directe implique que les trois déformations soient mesurées sur le même échantillon, dans le même environnement et au même moment.

Toutefois, dans ce cas de mesures directes, la déformation axiale de l'échantillon est facilement obtenue, tandis que la détermination des deux déformations latérales reste la phase la plus délicate et la plus dure. Pour mesurer les déformations latérales, la plupart des études ont utilisé des jauges de déformation liées aux surfaces latérales de l'échantillon (Aira et al., 2014; Dackermann et al., 2016; Marmier et al., 2018). Du point de vue expérimental, ce genre du test est extrêmement difficile, en raison de la grande sensibilité de ces jauges de déformation. En effet, ce type de jauge est très délicat à installer, à placer sur un matériau de bois, et à utiliser dans ce type d'application. De façon générale, pour chaque surface latérale, trois jauges de déformation doivent être installées, l'une suivant la direction verticale, une autre suivant la direction horizontale et une 3ème avec un angle d'inclinaison de 45° par rapport à la verticale. Ainsi, ces jauges n'offrent pas la même précision que les extensomètres. Pour cette raison, il est préférable d'installer au moins un extensomètre pour mesurer la déformation dans la direction axiale. Ceci afin de pouvoir vérifier si la mesure donnée par les jauges est correcte ou pas. Il est vrai que cet essai statique de mesure des coefficients de Poisson est considéré comme l'essai de référence. Mais, à cause de toutes ces difficultés expérimentales, les chercheurs s'intéressent aujourd'hui à réaliser d'autres essais plus faciles à appliquer, et surtout à vérifier le potentiel des méthodes non destructives pour mesurer ces six coefficients du bois.

Néanmoins, le tableau 3.13 montre les six coefficients trouvés en se basant sur les mesures ultrasoniques. Deux théories des ondes unidimensionnelles ont été appliquées : une théorie adaptée aux matériaux isotropes et l'autre aux matériaux

orthotropes. En effet, la nature du matériau testé se rapproche du comportement d'un matériau orthotrope. Ainsi, la théorie conçue pour ce type des matériaux est la plus plausible pour déterminer les six coefficients de Poisson du bois. Cependant, les résultats trouvés sont à l'inverse de ceux attendus. Les trois inégalités sont validées dans le cas d'application de la théorie des ondes unidimensionnelles adaptée aux matériaux isotropes et non pas aux matériaux orthotropes. Ces résultats sont similaires à ceux de Dackermann *et al.* (2016) qui ont appliqué les mêmes relations de calculs pour deux essences de feuillus (bois de Gomme Tacheté et bois de Suif).

De ce fait, la non-validation des six coefficients de Poisson trouvés par les relations orthotropiques s'explique principalement par la méthode de mesure des vitesses d'ultrason. Ces relations se basent sur une vitesse d'onde transversale ($V_{ij/ji}$) qui se propage à un angle de 45° par rapport aux axes principaux du bois. Dans la présente étude, cette vitesse a été calculée analytiquement à partir de l'équation 2.22 (Armstrong et al., 2007; Dackermann et al., 2016; Snackenberger, 1991). En effet, la détermination de ces coefficients par les relations orthotropiques dépend non seulement de la mesure expérimentale de cette vitesse ($V_{ij/ji}$), mais aussi de la précision de la mesure. Cela rend l'étape expérimentale de plus en plus difficile, particulièrement au niveau du découpage des échantillons. Ces mesures expérimentales des vitesses ultrasoniques impliquent la préparation des échantillons coupés à des angles appropriés par rapport aux axes d'anisotropie du bois (L, R, T). Dans ce cas, cet angle doit être égal à 45° .

En prenant comme exemple l'étude de Gonçalves *et al.* (2011) qui a appliqué la même théorie orthotropique en mesurant expérimentalement cette vitesse ($V_{ij/ji}$) de l'onde propagée à 45° par rapport à l'axe principal de bois, on a montré que les trois inégalités sont validées pour toutes les essences étudiées, soit Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Cupiuba (*Goupia glabra*) et Sydney l'eucalyptus Bluegomme (*Eucalyptus saligna*). Ceci confirme théoriquement les mesures obtenues pour les six coefficients de Poisson. Cependant, Gonçalves *et al.* (2011) ont montré que cette méthode de mesure reste toujours incertaine. En effet, les valeurs trouvées dans le

plan (RL, LR et LT) ne sont pas comparables à celles obtenues par l'essai statique de compression. En particulier, les valeurs dans le plan (LR) sont toujours supérieures à 1. Dans ce contexte, Ozyhar *et al.* (2013) ont appliqué la même méthode de mesure que Gonçalves *et al.* (2011) pour le bois du hêtre (*Fagus sylvatica*). Ils ont prouvé l'incapacité de la méthode d'ultrason en appliquant la théorie d'orthotropie. En concordance avec les résultats de Gonçalves *et al.* (2011), les coefficients de Poisson dynamiques trouvés par Ozyhar *et al.*, (2013) sont très élevés par rapport à ceux obtenus par l'essai statique. Ainsi, ces coefficients dynamiques sont supérieurs à 1, surtout les valeurs dans les plans TR et TL (avec $v_{TL} > 1$ et $v_{TR} > 2$). En effet, les coefficients de Poisson dépassant 1 sont considérés inhabituels pour le bois (Ozyhar et al., 2013).

Toutefois, on ne peut pas constater que la non-validation de cette méthode de mesure dans ces deux études soit liée aux valeurs élevées des coefficients. De façon générale, le coefficient de Poisson est inférieur à 1 pour le cas des matériaux isotropes (Gonçalves et al., 2011). Pour le cas des matériaux anisotropes à symétrie orthotrope, tels que le bois, ces coefficients de Poisson ne peuvent pas avoir de limites (Ozyhar et al., 2013; Ting et Chen, 2005). Pour ce type de matériau, les coefficients de Poisson peuvent généralement respecter les conditions suivantes $v_{ij} > 1$ et $v_{ji} < 1$ (Gonçalves et al., 2011).

Ainsi, la raison principale pour la non-validation de cette méthode de mesure dans les études de Gonçalves *et al.* (2011) et Ozyhar *et al.* (2013) revient au fait que les valeurs trouvées sont incomparables avec celles des essais statiques. Ceci peut être dû à la difficulté de la préparation des échantillons similaires ayant un angle d'inclinaison de 45° par rapport à la direction principale du bois. Ainsi, il n'était pas possible de garantir que l'onde pénétrée puisse se propager à cet angle exactement, ce qui implique des erreurs de mesure de vitesse. En outre, une des raisons principales de la non-validation de cette méthode est le fait qu'elle se base principalement sur une théorie complexe telle que celle montrée dans la section (1.2.1.2.2). Cette théorie se base déjà sur plusieurs hypothèses. Parmi ces hypothèses, le bois est considéré comme matériau ayant une symétrie orthotrope

élastique. Cette hypothèse est raisonnable pour le bois, mais reste toujours lié à l'essence étudiée et aux caractéristiques d'anisotropie de ce matériau (Katz et al., 2008). À titre d'exemple, le facteur d'anisotropie de l'essence de balsa est tellement élevé que l'on peut le considérer comme un matériau orthotrope dont le comportement se rapproche d'un comportement anisotrope (Katz et al., 2008).

Les trois inégalités sont vérifiées pour le cas de l'application de la méthode ultrasonique en appliquant la théorie isotropique (Tableau 3.13). Cette méthode de mesure est aussi approuvée par Dackermann *et al.* (2016). Ils ont montré que les coefficients de Poisson trouvés par la relation d'isotropie simplifiée sont les plus raisonnables et les plus proches des coefficients déterminés statiquement. Relativement à ce point, les mesures des coefficients de Poisson obtenus par la méthode de résonance se basent sur la même hypothèse de l'isotropie du bois. En effet, les valeurs trouvées par la méthode de résonance sont aussi vérifiées. En se basant alors sur cette hypothèse de l'isotropie du bois, on constate que les méthodes non destructives de mesure (méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotrope et méthode de résonance) sont validées, et ce pour les sept essences étudiées. Toutefois et pour valider la méthode de calcul, il reste à vérifier si ces différentes valeurs acceptées sont proches des valeurs rapportées par la littérature.

3.3.2 Vérification des six coefficients de Poisson trouvés par les deux méthodes non destructives (la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotrope et la méthode de résonance)

Tel que discuté dans la section (3.3.1), les six coefficients de Poisson validés par les trois inégalités sont présentés dans le tableau 3.13. La méthode de résonance et celle d'ultrason sont utilisées pour mesurer les coefficients de sept essences étudiées. Ces deux méthodes utilisables se basent principalement sur une théorie adaptée pour les matériaux isotropes. En effet, l'absence d'étude de corrélation entre les coefficients dynamiques et statiques s'explique par la non-validation des coefficients statiques déterminés par l'essai de compression. De ce fait, on s'intéresse en premier lieu à savoir si les coefficients de Poisson validés se

rapprochent du comportement mécanique du bois soumis à un essai statique de compression, et en deuxième lieu, à faire une comparaison entre les différents coefficients de Poisson validés et ceux de la littérature afin de confirmer la méthode de mesure appliquée.

De façon générale, un ordre suivi par les six coefficients de Poisson a été trouvé pour chaque méthode de mesure appliquée. Pour la méthode de résonance, les valeurs les plus élevées sont ν_{LR} suivie par ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{TR} , ν_{LT} et ν_{RT} . Cet ordre est généralement obtenu pour les différentes essences étudiées (Tableau 3.13). Ainsi, quatre des six coefficients pour l'ensemble des essences étudiées ont des valeurs négatives, telles que ν_{LT} , ν_{RT} , ν_{TL} et ν_{TR} . Ces valeurs négatives permettent de constater que le bois subit facilement des changements de volume (Lakes, 1993).

Effectivement, on remarque que, sous un essai de compression longitudinale, la valeur ν_{RL} de l'échantillon est positive, tandis que celle de ν_{TL} est négative (Tableau 3.13). Ceci démontre que l'échantillon gonflera dans la direction radiale ($\nu_{RL} > 0$) et aura une restriction dans la direction tangentielle ($\nu_{TL} < 0$). La même chose est remarquée lorsque l'échantillon est sous un essai de compression radiale, ν_{LR} est positif, donc un gonflement de l'échantillon dans la direction longitudinale, et ν_{TR} est négatif, donc une restriction de l'échantillon dans la direction tangentielle. Ceci peut être expliqué par le principe de l'équilibre de la quantité de matière. De façon simple, l'échantillon testé a une quantité de matière fixe. Lorsqu'il est comprimé dans telle direction, il va garder la même quantité de matière et donc la matière va faire une réaction et va se répartir dans les autres directions perpendiculaires à la direction de charge. Par exemple, sous une charge de compression, en premier temps la matière va se placer dans la direction perpendiculaire à la charge de compression, les cellules dans la direction perpendiculaire à cette charge vont être plus proches, et le vide entre les cellules va être éliminé par la suite. On va donc remarquer un changement de volume dans cette direction et par conséquent on va observer un gonflement de l'échantillon. Cependant, en se basant sur les valeurs trouvées (ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{LR} et ν_{TR}), on constate que le bois peut réagir de manière

complètement différente pour la même direction de charge (longitudinale ou radiale).

En se basant sur ces constatations, lors de l'application d'une charge en compression, ce comportement simultané (à la fois valeur négative et valeur positive du coefficient de Poisson) ne correspond pas au comportement naturel du bois. Ce comportement ne décrit pas non plus le comportement de n'importe quel autre biomatériau. En effet, on peut trouver ce type de comportement dans les matériaux développés par l'être humain par exemple les échafaudages de biomatériaux faits par Soman *et al.* (2012). Ainsi, ce type de matériaux est très utilisable dans l'ingénierie tissulaire, laquelle consiste principalement à créer des biomatériaux innovants en synthétisant des substituts biologiques (Chaubaroux, 2013; Soman et al., 2012). D'où l'importance de ces matériaux ayant un comportement simultané (coefficients de Poisson à la fois positif et négatif) pour certaines applications, en particulier les applications biomédicales (Chaubaroux, 2013). Ainsi, ces matériaux peuvent résister à des déformations biaxiales (Soman et al., 2012). À titre d'exemple, un timbre cardiaque avec un comportement de coefficient de Poisson simultané pourrait résister aux forces de compression et d'étirement générées lors de la contraction du muscle myocarde (Soman et al., 2012). Toutefois, pour toutes ces raisons, on déduit que les valeurs trouvées par la méthode de résonance (v_{RL} , v_{TL} , v_{LR} et v_{TR}) ne décrivent pas correctement le comportement d'un échantillon de bois soumis à une compression uniaxiale que ce soit dans la direction longitudinale (v_{RL} , v_{TL}) ou bien radiale (v_{LR} et v_{TR}).

Il reste alors à vérifier la justesse des deux coefficients obtenus par cette méthode de résonance (v_{LT} et v_{RT}). En effet, la moindre différence a été constatée entre v_{LT} et v_{RT} (Tableau 3.13). On remarque aussi que les valeurs de ces deux coefficients sont les plus petites en comparant aux autres coefficients (Tableau 3.13). Ainsi, ils sont très proches l'un de l'autre. Tel que présenté dans le tableau (3.14), les moyennes de ces deux coefficients (v_{LT} , v_{RT}) sont à peu près égales à -0,3 pour l'ensemble des résineux, et à -0,4 pour l'ensemble de feuillus. Ces valeurs négatives de v_{LT} et v_{RT} permettent de constater qu'un échantillon de bois chargé dans la direction

tangentielle est facilement déformable volumétriquement (Lakes, 1993). Cette constatation ne s'approche pas du comportement statique de bois. Ainsi, elle ne concorde pas avec la littérature (Tableau 1.6) (Guitard, 1987; de la Cruz-Sanchez, 2006). De ce fait, Guitard (1987) montre que le ratio de v_{RT} / v_{LT} est très élevé, pouvant atteindre à peu près 12 pour un ensemble de feuillus étudiés ($MV=650 \text{ kg/m}^3$) et 16 pour un ensemble de résineux ($MV=450 \text{ kg/m}^3$).

La variation des valeurs de v_{LT} et v_{RT} issues de la méthode de résonance n'est pas la même pour la méthode d'ultrason. En effet, pour l'ultrason, une grande différence a été constatée entre ces deux propriétés (v_{LT} et v_{RT}). À titre d'exemple, la valeur de v_{LT} trouvée par l'ultrason est la valeur la plus élevée et elle est de l'ordre de 0,31 pour le thuya occidental (Tableau 3.13). En revanche, la valeur de v_{RT} trouvée par l'ultrason est la plus faible et elle est de l'ordre de -1,26 (Tableau 3.13). De plus, un ordre complètement différent du coefficient de Poisson a été trouvé pour la méthode d'ultrason. Généralement, les valeurs les plus élevées sont pour v_{LR} suivies par celles de v_{LT} , v_{RL} , v_{TL} , v_{TR} et v_{RT} , respectivement (Tableau 3.13). Cet ordre est similaire à celui trouvé par Gonçalves *et al.* (2011) pour la méthode d'ultrason. Toutefois, Gonçalves *et al.* (2011) ont confirmé que la méthode d'ultrason n'est pas capable d'estimer les coefficients de Poisson du bois. Ceci revient au fait que les valeurs trouvées par l'ultrason ainsi que l'ordre de ces valeurs sont statistiquement différentes par rapport aux valeurs statiques trouvées par un essai de compression. Dans ce contexte, Guitard (1987) indique que, de façon générale, les coefficients de Poisson lors d'un essai statique du bois suivaient cet ordre particulier $v_{TR} > v_{TL} > v_{RL} \approx v_{RT} \gg v_{LR} > v_{LT}$.

En effet, les ordres trouvés par les deux méthodes non destructives (ultrason et résonance) appliquées dans cette étude sont différents entre eux et même avec la littérature (Tableau 1.6). Plusieurs chercheurs montrent que cet ordre varie d'une essence à une autre, même en appliquant les mêmes méthodes statiques (Aira *et al.*, 2014; Crespo *et al.*, 2017; Mascia et Lahr, 2006; de la Cruz-Sanchez, 2006). Ils ont montré que cette variation est due à l'effet significatif de l'essence testée sur le coefficient mesuré. Donc, contrairement à Gonçalves *et al.* (2011), on ne peut pas

compter uniquement sur l'ordre suivi par les six coefficients de Poisson pour valider une telle méthode appliquée. Cependant, la validation de la méthode de mesure est liée principalement à ce que les mesures expérimentales trouvées se décrivent et se rapprochent du comportement statique de bois.

De ce fait, en se comparant à la méthode de résonance, on remarque que les coefficients trouvés par la méthode d'ultrason sont généralement les plus proches du comportement statique du bois soumis à une charge de compression uniaxiale. À titre d'exemple, Bodig (1973) montre que les valeurs de ν_{LR} et ν_{LT} du peuplier faux-tremble sont à peu près respectivement 0,458 et 0,202, avec un ratio ν_{LR}/ν_{LT} égale à 2,3 (Janowiak et al., 2007). Ceci est très semblable aux valeurs trouvées par l'ultrason dans notre étude pour le peuplier faux-tremble, le rapport ν_{LR}/ν_{LT} est égale à 2,8 (Tableau 3.13). Mais, ce rapport est égal à 8 dans le cas de la méthode de résonance (Tableau 3.13). Ainsi, à l'inverse de la méthode de résonance, pour la majorité des essences testées, on remarque que quatre des six coefficients mesurés par l'ultrason ont des valeurs positives, ce qui montre que le bois résiste à la déformation volumétrique (Tableau 3.14) (Lakes, 1993).

Toutefois, en appliquant aussi l'ultrason, des valeurs négatives ont été trouvées dans le cas des mesures des coefficients ν_{RT} et ν_{TR} . Il est vrai qu'une différence considérable a été constatée entre ces valeurs (ν_{RT} , ν_{LT}) et (ν_{LR} , ν_{TR}). Mais, cette différence entre chacun de ces deux coefficients reste beaucoup moins faible par rapport à la méthode de résonance. À titre d'exemple, le ratio entre ν_{LR}/ν_{TR} dans le cas de mélèze laricin est 2,6 en appliquant l'ultrason et à 2,4 en appliquant la résonance (Tableau 3.13). Vue la faible différence observée dans le cas d'ultrason, on ne peut pas considérer que le bois se rapproche du comportement d'un matériau de l'ingénierie tissulaire (des matériaux ayant à la fois des coefficients de Poisson positif et négatif soumis à une charge uniaxiale), inversement à la méthode de résonance. Dans le cas d'ultrason, on peut constater que le bois a un comportement de matériau auxétique (les matériaux auxétiques ce sont les matériaux ayant des coefficients de Poisson négatifs) (Ren et al., 2015). Cet effet auxétique est dû au degré de l'anisotropie de bois. Vu l'aspect du bois, Ting et Chen (2005) montrent

que, théoriquement, les coefficients de Poisson pour ce type de matériau ne peuvent pas avoir de limites (Ozyhar et al., 2013). Ainsi, pour les matériaux anisotropes, la plage des coefficients de Poisson est plus large, comparativement aux matériaux isotropes dont le coefficient (ν) est entre -1 et 1 (Lakes, 1993).

Les valeurs négatives de ν_{RT} et ν_{TR} peuvent être expliqués par la plage étroite d'angle d'orientation qui existe entre la charge appliquée (radiale et tangentielle) et les fibres (Tableau 3.13) (Lakes, 1993). Dans ce contexte, Ren *et al.* (2015) ont prouvé que la performance auxétique d'un matériau dépend de leur géométrie plutôt que de la composante chimique du matériau de base. En effet, la structure poreuse du bois, étant différente d'une essence étudiée à une autre, est considérée comme l'une des caractéristiques géométriques importantes. Cette structure poreuse joue un rôle primordial dans le contrôle du coefficient de Poisson mesuré, tant que la déformation appliquée est toujours dans le domaine élastique du bois (Soman et al., 2012). Dans la microstructure, l'aspect auxétique du bois est affecté par les changements de forme dans les pores (Ren et al., 2015). Les pores du bois peuvent être sous plusieurs formes géométriques (forme circulaire, rectangulaire, etc.) (Gillis, 1972). De façon générale, les pores du bois se rapprochent de la forme d'origine hexagonale (i.e., la forme de la section transversale des trachéides dans les résineux) (Gillis, 1972). À titre d'exemple, sous une charge de compression, cette forme hexagonale peut devenir une forme ellipsoïdale (Gillis, 1972; Marmier et al., 2018; Ren et al., 2015). Par conséquent, cette forme ellipsoïde obtenue implique un coefficient de Poisson de valeur négative.

Ainsi, une des causes probables de ces valeurs négatives est qu'une déformation non affine peut avoir lieu et peut se manifester par un déploiement des cellules lorsque l'ensemble de la structure subit une charge comprimée (Lakes, 1993). En effet, le déplacement des atomes est supposé affine et se fait d'une manière identique et égale à la déformation appliquée sur l'échantillon de bois (Hepworth et al., 2001; Wen et al., 2012). Macroscopiquement, cette déformation appliquée localement est une déformation affine (Lakes, 1993). En revanche, à l'échelle anatomique, deux caractéristiques du bois affectent considérablement l'affinité de

cette déformation : son comportement viscoélastique et, en particulier, la non-homogénéité de sa structure (Hepworth et al., 2001; Lakes et Wineman, 2006; Wen et al., 2012). Cette non-homogénéité permet donc des déformations non affines et, par conséquent, es concentrations de contraintes autour des discontinuités telles des anomalies naturelles (Wen et al., 2012). Ces différentes raisons prouvent bien que les coefficients de Poisson trouvés par la méthode d’ultrason peuvent caractériser le comportement mécanique statique réel du bois.

Toutefois, le tableau 3.14 montre que les mesures trouvées par les deux méthodes (ultrason et résonance) ne se situent pas dans le même intervalle que la littérature. Par conséquent, aucune des valeurs des coefficients de Poisson dans l’étude actuelle n’est acceptée. À titre d’exemple, les valeurs de ν_{LR} trouvées par la résonance sont supérieures à l’unité et de l’ordre d’à peu près 3, et ce pour les sept essences testées (Tableau 3.14), ce qui indique une surestimation de ν_{LR} en le comparant aux valeurs de la littérature (Bucur, 2006; Guitard, 1987; Miller, 1999; de la Cruz-Sanchez, 2006). En effet, la non-validation de la méthode de résonance revient au fait que le processus de calcul de cette méthode se base principalement sur un coefficient de Poisson prédéfini égal à 0,3 (Figure 2.10). Par ailleurs, cette valeur de (ν_{LR}) (>3) est inhabituelle pour le bois. Tel que discuté précédemment dans cette section, les valeurs trouvées par cette méthode montrent que le bois possède un comportement totalement différent de son comportement réel, et n’en est même pas proche (Güntekin et al., 2016b). Gao *et al.* (2016) suggèrent une autre technique pour calculer ces six propriétés, en utilisant la méthode de résonance. Cette technique consiste à coller sur chaque surface de l’échantillon des jauges de déformations placées l’une perpendiculaire à l’autre (Gao et al., 2016). Les déformations longitudinale et transversale sont données par ces deux jauges utilisées. Suite à l’application d’une vibration de flexion, l’analyse spectrale de la fréquence de flexion de premier ordre permet d’identifier les amplitudes de chacune des déformations (transversale et longitudinale). Donc, le rapport d’amplitude calculé entre ces deux déformations était égal à la valeur mesurée du coefficient de Poisson. Gao *et al.* (2016) ont approuvé alors la pertinence de cette technique pour mesurer

dynamiquement trois coefficients de Poisson (ν_{LR} , ν_{LT} et ν_{RT}) pour cinq essences étudiées, telles le hêtre, le balsa, l'épinette, le pin sylvestre et le frêne. Cette validation revient à dire que Gao *et al.* (2016) ont trouvé des coefficients dynamiques presque similaires aux coefficients déterminés par les essais statiques appliqués (un essai de traction et un essai de flexion de quatre points).

Tableau 3.14 : Les valeurs moyennes des six coefficients de Poisson trouvées pour l'ensemble des feuillus et des résineux en utilisant les deux méthodes non destructives (la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotrope et la méthode de résonance)

	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{TR}
Feuillus	3,369 ¹	-0,435	-0,444	0,215	-0,015	-0,257
	0,291 ²	0,131	-0,239	0,038	0,007	-0,119
	0,229-0,495 ³	0,374-0,641	0,56-0,912	0,018-0,086	0,009-0,051	0,231-0,496
Résineux	3,322	-0,304	-0,296	0,255	-0,010	-0,158
	0,301	0,299	-0,419	0,071	0,024	-0,056
	0,280-0,485	0,276-0,467	0,373-0,530	0,036-0,083	0,025-0,058	0,245-0,403

¹Coefficients de Poisson déterminés par la méthode de résonance

²Coefficients de Poisson déterminés par la méthode d'ultrason en appliquant la théorie isotropique (la théorie des ondes unidimensionnelles)

³L'intervalle des valeurs statiques de coefficients de Poisson déterminés par (Miller, 1999)

Pour la méthode d'ultrason, les valeurs de coefficient se rapprochent du comportement réel de bois. Selon une étude sur le pin blanc, Marmier *et al.* (2018) ont démontré la possibilité d'existence de cet aspect d'auxéticité dans le bois, surtout lorsqu'il est comprimé hors de ces axes principaux (L, R et T). Ainsi, ils ont montré l'importance de cette auxéticité du bois dans certaines applications comme les applications qui se base sur la résistance aux chocs, l'absorption des vibrations, etc. Cependant, on remarque qu'en utilisant la méthode d'ultrason, quatre des six coefficients de Poisson pour l'ensemble des résineux (ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RL} ν_{TL}) se situent dans les mêmes intervalles que la littérature, tandis que deux des six coefficients pour l'ensemble des feuillus (ν_{LR} et ν_{RL}) se situent aussi dans les mêmes intervalles rapportés dans la littérature (Tableau 3.14). Cette différence est notamment due à la différence d'homogénéité entre les types d'essences (Aira et al., 2014). Pour cela,

il n'est pas certain que la méthode d'ultrason soit validée pour calculer ces paramètres. Les mesures de six coefficients de Poisson restent incertaines, et les résultats présentés ici semblent incertains et contestables. Même dans la littérature, rares sont les études qui valident cette méthode (ultrason) pour la prédiction de ces coefficients, telles que les études antérieures de Crespo *et al.*, (2017) et Dackermann *et al.*, (2016). Cependant, la majorité des études rapportent l'inverse (Gonçalves *et al.*, 2011; Gonçalves *et al.*, 2014; Güntekin *et al.*, 2016a; Ozyhar *et al.*, 2013).

La raison probable de l'incertitude des méthodes non destructives revient principalement au degré de dispersion des ondes qui est déjà principalement relié au degré d'anisotropie et à l'homogénéité du bois testé (Chen et Lakes, 1989). Cette dispersion dépend toujours de trois facteurs principaux soient l'essence étudiée, la direction de propagation des ondes dans l'essence, et les conditions expérimentales (i.e., la fréquence des capteurs, les dimensions de l'échantillon testé, l'agent de couplage utilisé, etc.) (Chen et Lakes, 1989).

En conclusion, la validation des valeurs trouvées par les trois inégalités (équations 1.25, 1.26, 1.27) n'est pas suffisante pour valider les deux méthodes de mesure (l'ultrason et la résonance). Ainsi, les valeurs mesurées ne se rapprochent pas des valeurs trouvées dans la littérature. Pour ces raisons, la présente étude ne permet pas de confirmer que ces deux méthodes non destructives soient capables d'estimer les coefficients de Poisson du bois.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Avec ce projet, nous avons présenté une étude exhaustive sur le potentiel de l'utilisation des méthodes non destructives pour une évaluation triaxiale du comportement mécanique du bois. Cette évaluation implique la détermination de douze propriétés mécaniques du bois (trois modules d'élasticité, trois modules de cisaillement et six coefficients de Poisson) selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle. Sept espèces de bois ayant des masses volumiques et des structures anatomiques différentes ont été étudiées : trois essences feuillues [le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), le peuplier hybride (*Populus x species*)] et quatre essences résineuses [l'épinette blanche (*Picea glauca*), le pin gris (*Pinus banksiana*), le mélèze laricin (*Larix laricina*) et le thuya occidental (*Thuja occidentalis* T.)]. Les propriétés mécaniques étudiées sont déterminées par des essais statiques normalisés (essais de compression et de flexion à trois points) ainsi que d'autres essais dynamiques (méthode d'ultrason et méthode de résonance). Dans le présent travail, une étude comparative entre les différentes méthodes et une étude de la corrélation entre les propriétés statiques et dynamiques du bois ont été accomplies. L'objectif de ces deux études est d'évaluer le potentiel des méthodes non destructives (méthodes d'ultrason et de résonance) dans la prédiction du comportement statique du bois. De nombreuses conclusions ont pu être tirées à partir de ces deux études.

- En se basant sur les modèles de prédiction trouvés, les deux méthodes non destructives utilisées (la méthode d'ultrason et de résonance) permettent d'évaluer avec précision le module d'élasticité longitudinal de compression (E_L) ($R^2=0,80-0,99$). Cependant, l'évaluation non destructive du module d'élasticité radial et tangentiel en compression (E_R et E_T) reste faible à moyen ($R^2<0,50$). La prédiction de ces deux propriétés (E_R et E_T) reste toujours relative aux rapports trouvés de ces deux propriétés par rapport à E_L . De ce fait, les ratios E_L/E_R et E_L/E_T mesurés par la méthode de résonance sont plus proches de ceux mesurés par l'essai statique de compression, alors que les ratios E_L/E_R et E_L/E_T

déterminés par la méthode d'ultrason sont approximativement similaires à ceux rapportés dans la littérature.

- Dans le cadre de l'étude des propriétés statiques de flexion du bois (le module d'élasticité et le module de rupture), il s'avère que la méthode de résonance et d'ultrason ont un grand potentiel pour prédire précisément le module statique de flexion. La méthode de résonance flexionnelle est la plus fiable ($R^2=0,99$) pour décrire le comportement de flexion du bois. L'estimation non destructive du module de rupture de flexion est considérée comme bonne ($R^2 \leq 0,72$). Toutefois, la prédiction du module de rupture de flexion à partir du module statique de flexion est plus précise.
- Pour l'étude des modules de cisaillement du bois (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}), leur détermination analytique est confirmée en se basant sur des essais statiques, soit les trois essais de compression et de flexion. Les ratios G_{LR}/G_{LT} , G_{LR}/G_{RT} , G_{LT}/G_{RT} ainsi que le ratio E_L/G_{LR} , sont similaires à ceux rapportés dans la littérature.
- En outre, cette étude a montré que la corrélation entre les modules de cisaillement statique et dynamique est toujours faible ($R^2=0,02-0,42$) et par conséquent les méthodes non destructives ne sont pas crédibles pour prédire le module de cisaillement du bois et ce dans les différents plans étudiés (LR, LT et RT). Toutefois, l'estimation du module de cisaillement du bois à partir du module de l'élasticité est plus précise ($R^2=0,68-0,95$). Mais, cette estimation dépend beaucoup de la direction du module d'élasticité et du plan du module de cisaillement. Le choix entre ces deux paramètres (la direction du module d'élasticité et le plan du module de cisaillement) varie en fonction de la méthode appliquée (dynamique ou statique) et des conditions expérimentales (ex. la façon de préparer l'échantillon).

- Les méthodes non destructives utilisées ne sont pas aptes à estimer les six coefficients de Poisson du bois. Aucune des valeurs trouvées ne décrit correctement le comportement statique du bois. Les mesures de ces coefficients nécessitent une bonne précision au niveau des données d'entrée (les données expérimentales). Il demeure encore nécessaire d'appliquer un essai statique pour déterminer ces six coefficients de Poisson.

La présente recherche peut être considérée comme étant l'une des premières études à examiner la variation triaxiale des propriétés mécaniques du bois [modules d'élasticité (E_L , E_R et E_T) et de cisaillement (G_{LR} , G_{LT} et G_{RT}), et les coefficients de Poisson (ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{TR} , ν_{LT} et ν_{RT})] en utilisant des méthodes destructives (essais statiques de compression et de flexion à trois points) et des méthodes non destructives (l'ultrason et la résonance). Elle démontre la possibilité d'utiliser des méthodes destructives, non pas pour déterminer seulement le module d'élasticité, mais aussi pour déterminer le module de cisaillement du bois. Cela présente de nombreux bénéfices et ouvre plusieurs perspectives très importantes, notamment au niveau de la simplicité d'effectuer un essai de flexion statique. Ce type d'études est de nos jours en cours de développement. Cette recherche démontre également la pertinence des méthodes non destructives, notamment la méthode de résonance pour une évaluation des propriétés élastiques du bois. Cette découverte ne minimise pas l'importance de la méthode d'ultrason, notamment en ce qui concerne son utilisation potentielle sur le terrain.

En perspective, les travaux futurs devraient se concentrer sur les limites des méthodes non destructives utilisées (ultrason et méthode de résonance). Parmi ces limites, on cite que ces méthodes appliquées ne sont pas toujours appropriées pour prédire les modules d'élasticité radiaux et tangentiels en compression, les modules de cisaillement et surtout les coefficients de Poisson. En premier lieu, on sait que de nos jours des outils non destructifs de haute technologie sont développés (c.-à-d. la méthode de résonance), alors pour les travaux futurs, refaire les mêmes expériences en utilisant d'autres équipements (GrindoSonic MK7, Sonelastic, etc.) pourrait améliorer la précision des mesures et aussi la rapidité des essais. Sur le plan

pratique, les équipements de la méthode de résonance peuvent remplacer les équipements d'ultrason utilisés dans les chaînes industrielles, en appliquant la méthode de résonance longitudinale ou flexionnelle. En outre, pour diminuer autant que possible les erreurs expérimentales dans le cas de la méthode d'ultrason, des travaux devraient être effectués afin de déterminer le choix des dimensions de l'échantillon par rapport à la fréquence des capteurs et à l'agent de couplage appliqué.

En second lieu, il vaudra mieux que les travaux futurs se concentrent sur la recherche, la création et le développement de nouvelles méthodes que l'on pourrait appliquer pour ce type d'études, comme par exemple une combinaison d'une méthode destructive et d'une autre non destructive. En effet, ce genre de travaux futurs seraient importants, intéressants et pourraient permettre de profiter de l'avantage de chaque méthode. C'est exactement le même esprit pour le cas du choix de matériaux. Ces nouvelles méthodes pourraient certainement constituer un avantage et aider à prédire précisément les coefficients de Poisson du bois.

RÉFÉRENCES

- Aira, J. R., Arriaga, F., et Íñiguez-González, G. (2014). Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests. *Biosystems engineering*, 126, 12-22.
- Arciniegas, A., Prieto, F., Brancheriau, L., et Lasaygues, P. (2014). Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees*, 28(6), 1559-1567.
- Armstrong, J. P., Patterson, D. W., et Sneckenberger, J. E. (2007). Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 32-43.
- Astley, R., Stol, K., et Harrington, J. (1998). Modelling the elastic properties of softwood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56(1), 43-50.
- ASTM Standard C1548-02 (2012), Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio of refractory materials by impulse excitation of vibration: American Society for Testing and Materials (ASTM), New York. 7p.
- ASTM Standard D143-94(2000), Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. American Society for Testing and Materials (ASTM), New York. 31p.
- ASTM Standard E1876-01 (2001). Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM), New York. 16p.
- Aydın, M., et Ciritcioğlu, H. H. Kızılcam (*Pinus brutia* Ten.) odunu kesme modüllerinin Ultrasonik dalga yayılımı ile tahmini. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 176-187.
- Baar, J., Tippner, J., et Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 767-769.
- Baar, J., Tippner, J., et Rademacher, P. (2015). Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2), 239-252.
- Barrett, J., Lam, F., et Chen, Y. (2008). Comparison of machine grading methods for Canadian Hemlock. Communication présentée au 10e conférence

internationale sur l'ingénierie du bois WCTE, Miyazaki, Japan. Repéré le 05 octobre 2018 à http://support.sbcindustry.com/Archive/2008/june/Paper_087.pdf

- Beall, F. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood science and technology*, 36(3), 197-212.
- Bergander, A., et Salmén, L. (2002). Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *Journal of materials science*, 37(1), 151-156.
- Blackstock, D. T. (2000). *Fundamentals of physical acoustics*. John Wiley et Sons, New York. ISBN 0-471-31979. 541p.
- Bodig, J. (1973). Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Science*, 5, 249-264.
- Bodig, J., et Jayne, B. (1982). *Mechanics of wood and wood composites* Van Nostrand Reynold company, New York. ISBN-0-44200822-8. 714p.
- Boström, L. (1999). PRO 8: 1st International RILEM Symposium on Timber Engineering (Vol. 8): RILEM publications, Cedex, Cachan, France. ISBN: 2-912143-10-1. 1056p.
- Bouhajja, A. (2015). Effet des coupes partielles sur les propriétés mécaniques du bois de l'épinette noire (*Picea Mariana*). Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 122p.
- Brancheriau, L. (2013). Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Thèse de doctorat, Université Montpellier II. 122p.
- Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R. F., Porter, S., Ross, R. I., Wang, X. et Yin, Y. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood A worldwide research update. *Forest Products Journal*, 59 (3), 7-13.
- Bucur, V. (1980). Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l'effet de sollicitations de longue durée. *Annales des Sciences Forestières*, 37(3), 249-264.
- Bucur, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, 21(3), 116-126.
- Bucur, V. (2003). Elastic symmetry for wood mechanical characterization. *Proceeding of the WCU2003 September 7-10, Paris, France, 2003*. 1011-1014p.

- Bucur, V. (2005). Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. *Ultrasonics*, 43(4), 237-239.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*, 2e éd. Springer Series in Wood Science Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. ISBN: 978-3-540-30594-1. 394p.
- Bucur, V. (2010). *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Springer Science et Business Media, Dordrecht Heidelberg, The Netherlands. ISBN: 978-90-481-9549-7. 401p.
- Bucur, V. (2013). *Nondestructive characterization and imaging of wood*: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 354p.
- Bucur, V. (2017). *The Acoustics of Wood* (1995). CRC Press Boca Raton, Florida, United States. ISBN: 978-0-203-71012-8. 300p.
- Bucur, V., et Archer, R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood science and technology*, 18(4), 255-265.
- Bucur, V., et Feeney, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics*, 30(2), 76-81.
- Bucur, V., et Perrin, A. (1981). Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. *Annales des Sciences Forestières*, 38(2), 283-298.
- Burgert, I., Bernasconi, A., Niklas, K., et Eckstein, D. (2001). The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees. *Holzforschung*, 55(5), 449-454.
- Bytebier, K. (2009). *Etude du comportement mécanique de la paroi cellulaire du bois par Microscopie à Force Atomique*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. 169p.
- Cademartori, P. H. G. d., Missio, A. L., Gatto, D. A., et Beltrame, R. (2014). Prediction of the modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. *Floresta e Ambiente*, 21(3), 369-375.
- Calegari, L., Gatto, D. A., et Stangerlin, D. M. (2011). Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood. *Brazilian Journal of Wood Science*, 2(2), 64-74.
- Campos, M., Del Menezzi, C., et de Souza, M. (2012). Flexural properties of wood I-beams flanged with tropical hardwoods. *Journal of Tropical Forest Science*, 24 (3), 358-367.

- Casado, M., Acuña, L., Vecilla, D., Relea, E., Basterra, A., Ramón, G., et López, G. (2010). The influence of size in predicting the elastic modulus of *Populus x euramericana* timber using vibration techniques Structures and Architecture, P. J. S Cruz (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. DOI: 10.1201/b10428-282. 579p.
- Castellanos, J. R. S. (2018). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(48). 181-202.
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Goli, G., et Togni, M. (2017a). Shear modulus of old timber. iForest-Biogeosciences and Forestry, 10(2), 446.
- Cavalli, A., Marcon, B., Cibecchini, D., Mazzanti, P., Fioravanti, M., Procino, L., et Togni, M. (2017b). Dynamic excitation and FE analysis to assess the shear modulus of structural timber. Materials and Structures, 50(2), 130.
- Cermák, J., Nadezhdina, N., Trcala, M., et Simon, J. (2015). Open field-applicable instrumental methods for structural and functional assessment of whole trees and stands. iForest-Biogeosciences and Forestry, 8(3), 226.
- Chaubaroux, C. (2013). Revêtements à base de collagène pour la fonctionnalisation de biomatériaux. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg. 193p.
- Chauhan, S., et Sethy, A. (2016). Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. Maderas. Ciencia y tecnología, 18(2), 373-382.
- Chen, C., et Lakes, R. (1989). Dynamic wave dispersion and loss properties of conventional and negative Poisson's ratio polymeric cellular materials. Cellular Polymers, 8(5), 343-359.
- Chiu, C.-M., Lin, C.-H., et Yang, T.-H. (2012). Application of nondestructive methods to evaluate mechanical properties of 32-year-old Taiwan incense cedar (*Calocedrus formosana*) wood. BioResources, 8(1), 688-700.
- Cho, C.-L. (2007). Comparison of Three Methods for Determining Young. Taiwan Journal of Forest Science, 22(3), 297-306.
- Christoforo, A. L., Icimoto, F. H., Fernandes, C. V., Fiorelli, J., Negrão, J., et Lahr, F. A. R. (2013a). Shear and longitudinal modulus of elasticity in structural profiled round timber beams. International Journal of Materials Engineering, 3(4), 87-91.
- Christoforo, A. L., Ribeiro Filho, S. L. M., Panzera, T. H., et Lahr, F. A. R. (2013b). Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. Ciência Rural, 43(4), 610-615.



- Chui, Y. (1991). Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters. *Wood science and technology*, 25(2), 125-134.
- Cossolino, L. C., et Pereira, A. H. A. (2010). Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Informativo Técnico Científico. Repéré le 04 october 2018 à <http://sonelastic.com/images/RT03-ATCP.pdf>
- Crespo, J., Aira, J. R., Vázquez, C., et Guaita, M. (2017). Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured via Conventional, Ultrasound, and 3-D Digital Image Correlation Methods in *Eucalyptus globulus* Labill. *BioResources*, 12(2), 3728-3743.
- Croiset, G., Leclercq, A., Lecomte, H., et Questienne, P. (1980). Étude comparative de deux méthodes de détermination du module d'élasticité du bois et de ses dérivés. Station de technologie forestière, CRA, Gembloux, rapport interne. 52p.
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F., et Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47(5), 787-803.
- Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., et Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Construction and Building Materials*, 102, 963-976.
- Dahmen, S., Ketata, H., Ghozlen, M. H. B., et Hosten, B. (2010). Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave. *Ultrasonics*, 50(4), 502-507.
- Damodarasamy, S. (2009). *Basics of Structural Dynamics and Aseismic Design*: PHI Learning Private Limited, New Delhi. ISBN:978-81-203-3843-2. 344p.
- de la Cruz-Sanchez, C. M. D. L. C. (2006). Mesure des constantes élastiques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) dans des conditions d'équilibre du séchage à basse température, Mémoire de maîtrise,, Université Laval, Québec, Canada. 139p.
- De Lima Junior, M. P., Biazzon, J. C., De Araujo, V. A., Munis, R. A., Martins, J. C., Cortez-Barbosa, J., Gava, M., Valarelli, I.D et Morales, E. A. M. (2018). Mechanical Properties Evaluation of *Eucalyptus grandis* Wood at Three Different Heights by Impulse Excitation Technique (IET). *BioResources*, 13(2), 3377-3385.

- De Oliveira, F. G. R., Candian, M., Lucchette, F. F., Salgon, J. L., et Sales, A. (2005). A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). *Building and Environment*, 40(2), 297-300.
- De Oliveira, F. G. R., De Campos, J. A. O., et Sales, A. (2002). Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. *Materials Research*, 5(1), 51-55.
- De Oliveira, F. G. R., et Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18), 2443-2446.
- Del Menezzi, C., Mendes, L., De Souza, M., et Bortoletto, G. (2013). Effect of Nondestructive Evaluation of Veneers on the Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) from a Tropical Species. *Forests*, 4(2), 270-278.
- Del Menezzi, C. H. S., Silveira, R. R., et Souza, M. (2010). Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. *Acta Amazonica*, 40(2), 325-332.
- Dinh, A. T. (2011). Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure. Thèse de doctorat, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), Nancy, France. 163p.
- Dinwoodie, J. (2000). *Timber: its nature and behavior* (2éd.). E and FN Spon (Routledge), London. ISBN: 978-0419235804. 272p.
- Divos, F., Tanaka, T., Nagao, H., et Kato, H. (1998). Determination of shear modulus on construction size timber. *Wood science and technology*, 32(6), 393-402.
- Divos, F., et Toshinari, T. (2005). Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood= Kapsolat a faanyag statikus és dinamikus rugalmassági modulusza között. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2005(1), 105-110.
- Donaldson, L. (2008). Microfibril angle: measurement, variation and relationships—a review. *IAWA journal*, 29(4), 345-386.
- Dündar, T., et Divos, F. (2014). European Wood NDT et NDE Research and Practical Applications. *Eurasian Journal of Forest Science*, 2(1), 35-43.
- Dündar, T., Wang, X., As, N., et Avcı, E. (2016). Potential of ultrasonic pulse velocity for evaluating the dimensional stability of oak and chestnut wood. *Ultrasonics*, 66, 86-90.

- Dzbeński, W., et Wiktorski, T. (2007). Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees. Communication présentée au 53e conférence de contrôle de la qualité du bois et des produits en bois (COST). Repéré le 05 octobre 2018 à <http://www.coste53.net/downloads/Warsaw/Warsaw-presentation/COSTE53-ConferenceWarsaw-Presentation-Dzbeski.pdf>
- Elloumi, I. (2016). Caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 131p.
- Elsener, R. (2014). Material characterization of timber utility poles using experimental approaches. Thèse de doctorat, Université technologique de Sydney, Sydney, Australia. 168p.
- Ensminger, D., et Bond, L. J. (2011). Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications, 2e éd: Taylor and Francis, Boca Raton, CRC press. ISBN: 978-0-8247-5889-9. 765p.
- Essien, C., Via, B. K., Cheng, Q., Gallagher, T., McDonald, T., Wang, X., et Eckhardt, L. G. (2017). Multivariate modeling of acoustomechanical response of 14-year-old suppressed loblolly pine (*Pinus taeda*) to variation in wood chemistry, microfibril angle and density. *Wood science and technology*, 51(3), 475-492.
- FAO. (2009). State of the world's forests 2009. Rome, IT: Food and Agriculture Organization of United Nations. Food and agriculture organization of the united nations, Rome, Italie. 152p.
- Feio, A. (2006). Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour. Thèse de doctorat, Université du Minho, Braga, Portugal. 219p.
- Frenet, D. (2000). Application de la technologie multi-elements à la caractérisation des matériaux par ondes acoustiques de surface en régime impulsionnel. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. 170p.
- Gachet, C., et Guitard, D. (2006). Influence relative de la morphologie cellulaire et de l'angle des microfibrilles sur l'anisotropie élastique tissulaire Longitudinale/Tangentielle du bois sans défaut des résineux. *Annals of forest science*, 63(3), 275-283.
- Gallet, P., Brancheriau, L., Thaunay, P., & Lasaygues, P. (2010). Caractérisation des bois sur pied par imagerie ultrasonore. Communication présentée au 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France. Repéré le 05 octobre 2018 à

https://www.researchgate.net/publication/47800343_Caracterisation_des_bois_sur_pied_par_imagerie_ultrasonore

- Ganev, S., Gendron, G., Cloutier, A., et Beauregard, R. (2007). Mechanical properties of MDF as a function of density and moisture content. *Wood and Fiber Science*, 37(2), 314-326.
- Gao, Z., Zhang, X., Wang, Y., Yang, R., Wang, G., et Wang, Z. (2016). Measurement of the Poisson's ratio of materials based on the bending mode of the cantilever plate. *BioResources*, 11(3), 5703-5721.
- Garbacz, P. (2016). Terahertz imaging—principles, techniques, benefits, and limitations. *Problemy Eksploatacji, Maintenance Problems*, (1), 81-92.
- García, M. C., Seco, J. F.-G., et Prieto, E. H. (2007). Improving the prediction of strength and rigidity of structural timber by combining ultrasound techniques with visual grading parameters. *Materiales de Construcción*, 57(288), 49-59.
- Gerhards, C. C. (2007). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*, 14(1), 4-36.
- Giammei, N., Proust, A., Marlot, D., Lenain, J. C., Lanvin, J.-D., Brancheriau, L., et Klinka, J.-M. (2008, mai). Utilisation de techniques émission acoustique et acousto-ultrasons pour évaluation de l'état d'endommagement d'une aile d'avion en bois. Communication présentée les Journées Cofrend Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, Toulouse, France. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.ndt.net/article/cofrend2008/papers/118.pdf>
- Gillis, P. P. (1972). Orthotropic elastic constants of wood. *Wood science and technology*, 6(2), 138-156.
- Gindl, W., et Schöberl, T. (2004). The significance of the elastic modulus of wood cell walls obtained from nanoindentation measurements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(11), 1345-1349.
- Gomes Ribeiro, P., González, J. C., Gonçalves, R., Teles, R. F., et de Souza, F. (2013). Ultrasound waves for assessing the technological properties of *Pinus caribaea* var *hondurensis* and *Eucalyptus grandis* wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(2), 195-204.
- Gonçalves, R., Trinca, A. J., et Cerri, D. G. P. (2011). Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Wood and fiber science*, 43(1), 64-75.

- Gonçalves, R., Trinca, A. J., et Pellis, B. P. (2014). Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood science and technology*, 48(2), 269-287.
- Gornet, L. (2008). Généralités sur les matériaux composites. Cours en ligne, GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique. 48p. Repéré le 02 juin 2018 à <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1/document>
- Görgün, H. V., et Dündar, T. (2018). Strength grading of turkish black pine structural timber by visual evaluation and nondestructive testing. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(1), 57-66.
- Goulart, S., Arriel, T., Stephane de Sousa Resende, S., Silva, J., Lima, J., et Gherardi Hein, P. R. (2015). Wood stiffness of Corymbia and Eucalyptus species. Communication présentée au II Congrès brésilien des sciences et technologies de Madère, Belo Horizonte, Brésil. Repéré le 05 october 2018 à https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Ricardo_Gherardi_Hein/publication/282219934_WOOD_STIFFNESS_OF_Corymbia_AND_Eucalyptus_species/links/5608840c08aea25fce3b849d.pdf
- Green, D. W., Winandy, J. E., et Kretschmann, D. E. (1999). *Wood handbook: Mechanical properties of wood*. Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory. 463p.
- Green, R. E. (2004). Non-contact ultrasonic techniques. *Ultrasonics*, 42(1), 9-16.
- Green, R. E., Djordjevic, B. B., et Hentschel, M. P. (2003). *Nondestructive Characterization of Materials XI: Proceedings of the 11th International Symposium, Berlin, Germany, June 24-28, 2002 (Vol. 6)*: Springer Science et Business Media, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-55859-7. 101p.
- Grotta, A. T., Leichti, R. J., Gartner, B. L., et Johnson, G. (2007). Effect of growth ring orientation and placement of earlywood and latewood on MOE and MOR of very-small clear Douglas-fir beams. *Wood and Fiber Science*, 37(2), 207-212.
- Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. F., et Yan, H. (2016). Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method. *Construction and Building Materials*, 121, 285-289.
- Guedes, F. T. (2013). Vers l'identification des acteurs moléculaires responsables des propriétés mécaniques du bois de tension de peuplier. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Centre-Val de Loire, France. 219p.
- Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*: Cépaduès Éditions, Toulouse, France.

- Guitard, D., et El Amri, F. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des sciences forestières*, 44 (3), 335-358.
- Güntekin, E., et Aydın, T. Y. (2016a). Prediction of bending properties for some softwood species grown in Turkey using ultrasound. *Wood Research*, 61(6), 993-1002.
- Güntekin, E., et Aydın, T. Y. (2016b). Determination of elastic constants for anatolian black pine wood using ultrasound. Communication présentée au conférence mondiale sur l'ingénierie du bois, Vienne ,Autriche. Repéré le 05 octobre 2018 à https://www.researchgate.net/profile/Tugba_Yilmaz_Aydin/publication/313531525_DETERMINATION_OF_ELASTIC_CONSTANTS_FOR_AN_ATOLIAN_BLACK_PINE_WOOD_USING_ULTRASOUND/links/589d9762458515738820556a/DETERMINATION-OF-ELASTIC-CONSTANTS-FOR-ANATOLIAN-BLACK-PINE-WOOD-USING-ULTRASOUND.pdf
- Güntekin, E., Aydın, T. Y., et Niemz, P. (2015a). Prediction of compression properties in three orthotropic directions for some important Turkish wood species using ultrasound. *BioResources*, 10(4), 7252-7262.
- Güntekin, E., Aydın, T. Y., t., et Niemz, P. (2015b). Determination of Young's Modulus in Three Orthotropic Directions for Calabrian Pine and Taurus Cedar Using Ultrasound and Digital Image Correlation (DIC). Communication présentée au 3e Symposium international sur les technologies innovantes en ingénierie et sciences, Valence, Espagne. Repéré le 05 octobre 2018 à https://www.researchgate.net/publication/281236412_Determination_of_Young's_Modulus_in_Three_Orthotropic_Directions_for_Calabrian_Pine_and_Taurus_Cedar_Using_Ultrasound_and_Digital_Image_Correlation_DIC
- Güntekin, E., Emiroglu, Z. G., et Yilmaz, T. (2012). Prediction of bending properties for turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) lumber using stress wave method. *BioResources*, 8(1), 231-237.
- Güntekin, E., Ozkan, S., et Yilmaz, T. (2014). Prediction of bending properties for beech lumber using stress wave method. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(1), 93-98.
- Güntekin, E., Yilmaz Aydın, T., et Aydın, M. (2016a). Elastic constants of Calabrian pine and cedar.. Communication présentée au symposium international sur la foresterie, Kastamonu, Turkey. Repéré le 05 octobre 2018 à https://www.researchgate.net/profile/Tugba_Yilmaz_Aydin/publication/313531525_DETERMINATION_OF_ELASTIC_CONSTANTS_FOR_AN_ATOLIAN_BLACK_PINE_WOOD_USING_ULTRASOUND/links/589d9762458515738820556a/DETERMINATION-OF-ELASTIC-CONSTANTS-FOR-ANATOLIAN-BLACK-PINE-WOOD-USING-ULTRASOUND.pdf

[3531335 Elastic Constants of Calabrian Pine and Cedar/links/589d9592a6fdcc3e8beea3ab/Elastic-Constants-of-Calabrian-Pine-and-Cedar.pdf](https://doi.org/10.1002/elasticity.1234)

- Güntekin, E., Yılmaz Aydın, T., et Niemz, P. (2016b). Some orthotropic elastic properties of *Fagus orientalis* as influenced by moisture content. *Wood Research*, 61(1), 95-104.
- Haines, D. W., Leban, J.-M., et Herbé, C. (1996). 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 science and technology*. 30(4), 253-263.
- Halabe, U. B., Bidigalu, G. M., GangaRao, H. V., et Ross, R. J. (1997). Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials evaluation*. 55 (9), 1013-1018.
- Halasz, R. v., et Scheer, C. (1986). *Holzbau-Taschenbuch. Architekturtechnische, Wissenschaften*, Berlin. ISBN: 978-3-433-03082-0. 358p.
- Hansen, H. J. (2006). *Acoustic studies on wood. Mémoire de maîtrise*, Université de Canterbury, Christchurch, Nouvelle-Zélande. 157p.
- Harrison, S. K. (2006). *Comparison of shear modulus test methods. Mémoire de maîtrise*, Institut polytechnique et université d'État de Virginie. 115p.
- Hasegawa, M., Takata, M., Matsumura, J., et Oda, K. (2011). Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51(3), 296-302.
- Hasenstab, A., Hillemeier, B., et Krause, M. (2005, mai). Defect localisation in wood with low frequency ultrasonic echo technique. Communication présentée au 14e symposium international sur les essais non destructifs du bois Hannover, Germany. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.ndt.net/article/v11n04/hasenstab/hasenstab.htm>
- Hassan, K. T., Horáček, P., et Tippner, J. (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources*, 8(2), 1634-1645.
- Hearmon, R. (1958). The influence of shear and rotatory inertia on the free flexural vibration of wooden beams. *British Journal of Applied Physics*, 9(10), 381.
- Hearmon, R. F. S. (1948). *The elasticity of wood and plywood, Special report on forest products research*, London, 5-44.
- Hepworth, D., Steven-Fountain, A., Bruce, D., et Vincent, J. (2001). Affine versus non-affine deformation in soft biological tissues, measured by the

- reorientation and stretching of collagen fibres through the thickness of compressed porcine skin. *Journal of biomechanics*, 34(3), 341-346.
- Hering, S., Keunecke, D., et Niemz, P. (2012). Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood science and technology*, 46(5), 927-938.
- Hodoušek, M., Dias, A. M. P. G., Martins, C., Marques, A., et Böhm, M. (2016). Comparison of non-destructive methods based on natural frequency for determining the modulus of elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*. *BioResources*, 12(1), 270-282.
- Hori, R., Müller, M., Watanabe, U., Lichtenegger, H., Fratzl, P., et Sugiyama, J. (2002). The importance of seasonal differences in the cellulose microfibril angle in softwoods in determining acoustic properties. *Journal of materials science*, 37(20), 4279-4284.
- Hudson, J. (1993). *Comprehensive rock engineering, principals, practice and projects, volume 3, Rock testing and site characterization*. Pergamon Press. Oxford. ISBN: 0-08-042066-4. 1011p.
- Ilic, J. (2001). Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 59(3), 169-175.
- Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61(3), 167-172.
- Izekor, D., Fuwape, J., et Oluyeye, A. (2010). Effects of density on variations in the mechanical properties of plantation grown *Tectona grandis* wood. *Archives of Applied Science Research*, 2(6), 113-120.
- James, W. L., Yen, Y.-H., et King, R. J. (1985). A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood United States Department of Agriculture. Research Note FPL-0250, Forest Products Laboratory, Madison.
- Janowiak, J. J., Hindman, D. P., et Manbeck, H. B. (2007). Orthotropic behavior of lumber composite materials. *Wood and Fiber Science*, 33(4), 580-594.
- Jayne, B. A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9(11), 413-416.
- Jiang, J., Bachtiar, E. V., Lu, J., et Niemz, P. (2017). Comparison of moisture-dependent orthotropic Young's moduli of Chinese fir wood determined by ultrasonic wave method and static compression or tension tests. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(6):927-938

- Karácsonyi, Z. (2011). A természetes faanyag nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása. nyme. Thèse de doctorat, Université de Hongrie occidentale. 105p.
- Karlinasari, L., Wahyuna, M., et Nugroho, N. (2008). Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of Gmelina wood (*Gmelina arborea*). *Journal of Tropical Forest Science*, 99-104.
- Katz, J. L., Spencer, P., Wang, Y., Misra, A., Marangos, O., et Friis, L. (2008). On the anisotropic elastic properties of woods. *Journal of materials science*, 43(1), 139-145.
- Kawamoto, S., et Williams, R. S. (2002). Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites: a review. Gen Techn Rep FPL-GTR-134. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison. 18p.
- Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteanu, K., Lüthi, T., et Niemz, P. (2007). Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood science and technology*, 41(4), 309.
- Kharrat, W. (2016). Conception et validation d'un dispositif pour la mesure du module d'élasticité dynamique dans le bois. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 112p.
- Khokhar, A., Zhang, H., RIDLEY-ELLIS, D., et MOORE, J. (2008). Determining the shear modulus of Sitka spruce from torsion tests. Communication présentée au 10e Conférence mondiale sur l'ingénierie du bois, Miyazaki, Japan.. Repéré le 05 octobre 2018 à https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/5612287/paper_292.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1551385579&Signature=Z6nUKSH6S69nBnfzikvb1EU8P8k%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDetermining_the_Shear_Modulus_of_Sitka_S.pdf
- Khokhar, A. M. (2011). The evaluation of shear properties of timber beams using torsion test method. Thèse de doctorat, Université Université Napier d'Édimbourg. 178p.
- Kirouac-Turmel, M. (2017). Amélioration du montage de détection térahertz par interférométrie dans le domaine fréquentiel. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique. 117p.
- Kohlhauser, C., et Hellmich, C. (2012). Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of

combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: application to metals and wood. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 33, 82-98.

Kollmann, F. F. P., et Côté, W. A. (1968). *Principles of wood science and technology: solid wood*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-87928-9. 592p.

Kováčik, J. (1999). Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials. *Journal of materials science letters*, 18(13), 1007-1010.

Kretschmann, D. (2010). Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapitre 5. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison*. 5.1-5.46p.

Kretschmann, D. E. (1997). Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for loblolly pine. Communication présentée à l'atelier international sur la qualité du bois (CTIA/IUFRO), Québec, Canada. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/krets97b.pdf>

Krzosek, S., Grzeskiewicz, M., et Bacher, M. (2008). Mechanical properties of Polish-grown *Pinus silvestris* L. structural sawn timber. Paper presented at the Conference COST E53. Communication présentée au Conférence COUT, action E53 «les Besoins des utilisateurs finaux pour les matériaux en bois et des produits», Delft, The Netherlands. Repéré le 05 octobre 2018 à http://www.coste53.net/downloads/Delft/Presentations/COSTE53-Conference_Delft_Krzosek_Grzeskiewicz_Bacher.pdf

Kumar, S., Jayawickrama, K., Lee, J., et Lausberg, M. (2002). Direct and indirect measures of stiffness and strength show high heritability in a wind-pollinated radiata pine progeny test in New Zealand. *Silvae Genetica*, 51(5-6), 256-260.

Lahr, F. A. R., Christoforo, A. L., Panzera, T. H., Silva, D. A. L., et Gonçalves, D. (2014). Anisotropy influence in obtaining stiffness property in bending of Brazilian Wood species. *International Journal of Materials Engineering*, 4(3), 92-96.

Lahr, F. A. R., Christoforo, A. L., Varanda, L. D., Chahud, E., Araújo, V. D. A., et Branco, L. A. M. N. (2017). Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. *Acta Scientiarum. Technology*, 39(4), 433-437.

Lakes, R. (1993). Advances in negative Poisson's ratio materials. *Advanced Materials*, 5(4), 293-296.

- Lakes, R. S., et Wineman, A. (2006). On Poisson's ratio in linearly viscoelastic solids. *Journal of Elasticity*, 85(1), 45-63.
- Le Clezio, E., Fortineau, J., Feuillard, G., Brancheriau, L., et Lasaygues, P. (2010). Caractérisation ultrasonore du bois. Communication présentée au 10e congrès Français d'Acoustique, Lyon, France. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00554455/document>
- Leite, E. R. d. S., Hein, P. R. G., Souza, T. M. d., et Rabelo, G. F. (2012). Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. *Cerne*, 18(1), 41-47.
- Liang, S.-q., et Fu, F. (2007). Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *Journal of Forestry Research*, 18(4), 309-312.
- Llana, D. F., Iñiguez Gonzalez, G., Arriaga Martitegui, F., et Niemz, P. (2013). Influence of temperature and moisture content in Non-destructive values of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Wood Research*, 59(5): 769-780.
- Lourenço, P. B., Feio, A. O., et Machado, J. S. (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1617-1627.
- Machado, J., Palma, P., et Simões, S. (2009). Ultrasonic indirect method for evaluating clear wood strength and stiffness. Communication présentée au 7e symposium international sur les essais non destructifs en génie civil, Nantes, France. Repéré le 05 octobre 2018 à https://www.researchgate.net/profile/Jose_Machado9/publication/236969561_Ultrasonic_indirect_method_for_evaluating_clear_wood_strength_and_stiffness/links/0c96051b7276122a02000000.pdf
- Machado, J. S., Costa, D., et Cruz, H. (2003). Evaluation of pine timber strength by drilling and ultrasonic testing. Communication présentée au symposium international sur les essais non destructifs en génie civil (NDT-CE 2003), Lisbonne, Portugal. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/p047/p047.htm>
- Maillou H. (2013). Les procédés et processus d'assemblage et de maintenance des aéronefs, les procédés de mesures et de contrôle. Notes de cours, Lycée Pierre Mendès, France, 15p. Repéré le 05 octobre 2018 à <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/6077/6077-bts-aeronautique-cours-cnd.pdf>
- Malecki, I. (2013). *Physical foundations of technical acoustics*: Elsevier. Pergamon Press. ISBN: 9781483158716. 770p.

- Marmier, A., Biesheuvel, S., Elmalik, M., Kirke, A., Langhof, M., Paiva, J. P., Toudup, J. et Evans, K. E. (2018). Evidence of negative Poisson's ratio in wood from finite element analysis and off-axis compression experiments. *Materials Letters*, 210, 255-257.
- Martin, S. J. S., Neuenschwander, J., et Sennhauser, U. (2012). Air coupled ultrasonic contactless method for non-destructive determination of defects in laminated structures. U.S. Patent Application n° 14/238,895. Repéré le 05 october 2018 à <https://patents.google.com/patent/US20140216158A1/en>
- Mascia, N. T., et Cramer, S. M. (2009). On the effect of the number of annual growth rings, specific gravity and temperature on redwood elastic modulus. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(1), 47-60.
- Mascia, N. T., et Lahr, F. A. R. (2006). Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. *Materials Research*, 9(3), 301-310.
- Mascia, N. T., et Nicolas, E. A. (2013). Determination of Poisson's ratios in relation to fiber angle of a tropical wood species. *Construction and Building Materials*, 41, 691-696.
- Miller, R. B. (1999). Structure of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. General technical report FPL; GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, p. 2.1-2.4, 113.
- Mishiro, A. (1996). Effect of density on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi*, 42, 887-894.
- Mitchell, H.-L. (1961). A concept of intrinsic wood quality, and nondestructive methods for determining quality in standing timber: Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin. Report n°. 2233.
- Montero, M., de la Mata, J., Esteban, M., et Hermoso, E. (2015). Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2), 407-420.
- Sotelo-Montes, C. (2006). Variation génétique des caractéristiques de croissance et du bois de capirona (*Calycophyllum spruceanum*) provenant de l'Amazonie péruvienne. Thèse de doctorat, Université Laval. 182p.
- Sotelo-Montes, C. S., Beaulieu, J., et Hernández, R. E. (2007). Genetic variation in wood mechanical properties of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *Wood and Fiber Science*, 39(4), 578-590.
- Mora, C. R., Schimleck, L. R., Isik, F., Mahon, J. M., Clark, A., et Daniels, R. F. (2009). Relationships between acoustic variables and different measures of

stiffness in standing *Pinus taeda* trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(8), 1421-1429.

- Morais, J., Xavier, J., Dourado, N., et Lousada, J. (2001). Mechanical behaviour of wood in the orthotropic directions. Communication présentée au 1^e conférence internationale de la société européenne de la mécanique du bois, Building Materials Laboratory, Materials Science and Engineering Department, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL). Repéré le 04 octobre 2018 à http://www.jmcx.utad.pt/pdf/artigos/FICESWM_MBWOD.pdf
- Moutee, M. (2006). Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. Thèse de doctorat., Université Laval, Québec, Canada. 194p.
- Müller, U., Sretenovic, A., Gindl, W., et Teischinger, A. (2007). Longitudinal shear properties of European larch wood related to cell-wall structure. *Wood and Fiber Science*, 36(2), 143-151.
- Najafi, S. K., Bucur, V., et Ebrahimi, G. (2005). Elastic constants of particleboard with ultrasonic technique. *Materials Letters*, 59(16), 2039-2042.
- Nakao, T., et Okano, T. (2007). Evaluation of modulus of rigidity by dynamic plate shear testing. *Wood and Fiber Science*, 19(4), 332-338.
- Navi, P. (2006). Propriétés acoustiques des matériaux: propagation des ondes planes harmoniques: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR). ISBN: 2-88074-691-4. 260p.
- Navi, P., et Heger, F. (2005). Comportement thermo-hydrromécanique du bois: Applications technologiques et dans les structures: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR). ISBN: 2-88074-602-5. 298p.
- Nowak, T., Hamrol-Bielecka, K., et Jasienko, J. (2015). Non-destructive testing of wood—correlation of ultrasonic and stress wave test results in glued laminated timber members. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, 92.
- Neto, C. C., Arroyo, F., De Araujo, V. A., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., et Junior, C. C. (2016). EDGE Glued Panels Grading through Transversal Vibration Testing. *International Journal of Materials Engineering*, 6(3), 97-102.
- Oberhofnerová, E., Arnetová, K., Holeček, T., Borůvka, V., et Bomba, J. (2016). Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering. *BioResources*, 11(2), 5155-5168.

- Olsson, A., et Källsner, B. (2015). Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis. *Materials and Structures*, 48(4), 977-985.
- Otani, L. B., Amico, S. C., Trindade, R. S., et Pereira, A. H. (2014a, septembre). Characterization of the elastic moduli of composite materials by the impulse excitation technique. Communication présentée au 2^e conférence brésilienne sur les matériaux composites, São José dos Campos-SP Repéré le 04 octobre 2018 à https://www.researchgate.net/profile/Lucas_Otani/publication/301198692_CHARACTERIZATION_OF_THE_ELASTIC_MODULI_OF_COMPOSITE_MATERIALS_BY_THE_IMPULSE_EXCITATION_TECHNIQUE/links/570b97c208ae8883a1ffccc3.pdf
- Otani, L. B., de Alcântara Segundinho, P. G., Morales, E. A. M., et Pereira, A. H. A. (2015). Elastic moduli characterization of wood and wood products using the Impulse Excitation. *ATCP physical engineering 1* (February). 33p.
- Otani, L. B., Pereira, A. H. A., Melo, J. D. D., et Amico, S. C. (2014b). Elastic Moduli characterization of composites using the Impulse Excitation. *ATCP Physcial Engineering*. DOI 10.13140/RG.2.1.1551.2481
- Ouis, D. (2002). On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. *Wood science and technology*, 36(4), 335-346.
- Ozyhar, T., Hering, S., Sanabria, S. J., et Niemz, P. (2013). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood science and technology*, 47(2), 329-341.
- Pellerin, R. (1965). A Vibrational Approach to Nondestructive Testing of Structural Timber. *Forest Products Journal*. 15(3), 93-101.
- Ploix, M.-A. (2006). Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon. 147p.
- Proto, A., Macrì, G., Bernardini, V., Russo, D., et Zimbalatti, G. (2017). Acoustic evaluation of wood quality with a non-destructive method in standing trees: a first survey in Italy. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(4), 700-706. DOI 10.3832/ifor2065-010
- Reis, M. N. dos. (2017). Associação de métodos não destrutivos para inspeção de árvores= Association of nondestructive tools for tree inspection. Thèse de doctorat, Faculté de génie agricole de l'Université d'État de Campinas. 95p.

- Ren, X., Shen, J., Ghaedizadeh, A., Tian, H., et Xie, Y. M. (2015). Experiments and parametric studies on 3D metallic auxetic metamaterials with tuneable mechanical properties. *Smart Materials and Structures*, 24(9), 095016.
- Roebben, G., Bollen, B., Brebels, A., Van Humbeeck, J., et Van der Biest, O. (1997). Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of scientific instruments*, 68(12), 4511-4515.
- Roohnia, M., et Brancheriau, L. (2015). Orientation and position effects of a local heterogeneity on flexural vibration frequencies in wooden beams. *Cerne*, 21(2), 339-344.
- Roohnia, M., et Kohantorabi, M. (2015). Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood. *BioResources*, 10(3), 4867-4876.
- Ross, R. J. (1992). *Nondestructive testing of wood: Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials*. University of Colorado Boulder University of Colorado. 43-47p.
- Ross, R. J. (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010. 509p.
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood: Second Edition General Technical Report FPL-GTR-238*. Madison, WI: U.S., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Ross, R. J., Brashaw, B. K., et Pellerin, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, 48(1), 14.
- Ross, R. J., McDonald, K. A., Green, D. W., et Schad, K. C. (1997). Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*, 47(2), 89.
- Ross, R. J., et Pellerin, R. F. (1994). Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. General Technical Report FPL-GTR-70 (Rev.), Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, WI. 1-40p.
- Rowell, R. M. (2012). *Handbook of wood chemistry and wood composites (2^e éd)*. CRC press. Boca Raton. ISBN: 978-1-4398-5381-8. 703p.
- Rozenberg, P., Franc, A., Bastien, C., et Cahalan, C. (2001). Improving models of wood density by including genetic effects: a case study in Douglas-fir. *Annals of forest science*, 58(4), 385-394.

- Saadat-N, M., Brancheriau, L., Gallet, P., Enayati, A. A., Pourtahmasi, K., et Honavar, F. (2011). Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood. *BioResources*, 6(2), 1172-1185.
- Saint-Venant, B. (1856). Sur la distribution d'élasticité autour de chaque point d'un solide ou d'un 2 milieu de texture quelconque. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 8, 257-561.
- Sales, A., Candian, M., et de Salles Cardin, V. (2011). Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1450-1454.
- Salmi, A., Karppinen, T., Montonen, R., Saranpää, P., et Hæggström, E. (2013). Ultrasonic estimate of the modulus of rupture and quantification of the frequency dependent dynamic modulus in Norway Spruce. *Journal of Applied Physics*, 113(2), 024904.
- Sandoz, J. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood science and technology*, 23(1), 95-108.
- Sandoz, J. (1993). Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood science and technology*, 27(5), 373-380.
- Sandoz, J., Benoit, Y., et Demay, L. (2000). Wood testing using acousto-ultrasonic. Communication présentée au 12^e Symposium international sur les CND du bois, Sopron, Hongrie. Repéré le 05 octobre 2018 à http://www.qseeman.com/product/UC-170_eng/uc-170_refl.pdf
- Sandoz, J. L. (1996). Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. Communication présentée au 10^e symposium international sur les essais non destructifs du bois, Lausanne, Suisse. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.ndt.net/article/sandoz/sandoz.htm>
- SAS. (2018). SAS Institute Inc, Cary, NC. In.
- Schickert, M., et Bonitz, F. A. (2016, juin). Transmission-Tomographic Imaging Setup Combining Elastic and Electromagnetic Wave Functionality. Communication présentée au 19^e Conférence mondiale sur les contrôles non destructifs (WCNDT), Berlin. Repéré le 05 octobre 2018 à <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we2b5.pdf>
- Segundinho, P. G. d. A., Cossolino, L. C., Pereira, A. H. A., et Calil Junior, C. (2012). Analysis of the natural vibration frequency test method to obtain the modulus of elasticity of wood structural components. *Revista Árvore*, 36(6), 1155-1162.
- Senalik, A. C., Schueneman, G., et Ross, R. J. (2014). Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review.

General Technical Report FPL-GTR-235. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison

- Smulski, S. J. (2007). Relationship of stress wave-and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 44-57.
- Snackenberger, J. (1991). Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle. *Wood and Fiber Science*, 23 (1), 32-43.
- Soman, P., Lee, J. W., Phadke, A., Varghese, S., et Chen, S. (2012). Spatial tuning of negative and positive Poisson's ratio in a multi-layer scaffold. *Acta biomaterialia*, 8(7), 2587-2594.
- Song, W., Zhong, Y., et Xiang, J. (2017). Mechanical parameters identification for laminated composites based on the impulse excitation technique. *Composite Structures*, 162, 255-260.
- Sotomayor-C., J. R. (2016). Dynamic modulus of rigidity of seven types of Mexican wood determined by torsional vibration. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 125-134.
- Spinner, S. (1961). Temperature dependence of elastic constants of some cermet specimens. *Journal of the National Bureau of Standards, Civil Engineering and Instrumentation*, 65, 89-96.
- Sulzberger, P. (1953). The effect of temperature on the strength of wood. *Aeron. Res. Cons. Comm. Rep. ACA-46*, Melbourne.
- Tabarsa, T., et Chui, Y. H. (2007a). Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. *Wood and Fiber Science*, 33(2), 223-232.
- Tabarsa, T., et Chui, Y. H. (2007b). Stress-strain response of wood under radial compression. Part I. Test method and influences of cellular properties. *Wood and Fiber Science*, 32(2), 144-152.
- Tanasoiu, V., Miclea, C., et Tanasoiu, C. (2002). Nondestructive testing techniques and piezoelectric ultrasonics transducers for wood and built in wooden structures. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 4(4), 949-957.
- Teder, M., Pilt, K., Miljan, M., Lainurm, M., et Kruuda, R. (2011). Overview of some non-destructive methods for in-situ assessment of structural timber. Communication présentée 3e conférence internationale de génie civil, Jelgava, Lettonie. Repéré le 05 octobre 2018 à

http://llu.fb.ltu.lv/conference/Civil_engineering/2011/Latvia-Univ-Agriculture_civil_engineering2011_137-143.pdf

- Teles, R. F., Del Menezzi, C. H. S., de Souza, F., et de Souza, M. R. (2011). Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: Interrelationship between methods and physical-acoustical variables. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 2(1), 1-14.
- Teranishi, M., Koizumi, A., et Hirai, T. (2008). Evaluation of quality indexes of bending performance and hardness for hardwoods. *Journal of wood science*, 54(5), 423-428.
- Tiitta, M., Beall, F. C., et Biernacki, J. M. (2007). Acousto-ultrasonic assessment of internal decay in glulam beams. *Wood and Fiber Science*, 30(3), 259-272.
- Timoshenko, S. (1955). *Vibration Problems in Engineering*. D. Van Nostrana Co. Inc., Princeton, Hew Jersey. 497p. disponible sur le lien <https://archive.org/details/vibrationproblem031611mbp/page/n7>. Page consultée le 07 octobre 2018.
- Ting, T., et Chen, T. (2005). Poisson's ratio for anisotropic elastic materials can have no bounds. *The quarterly journal of mechanics and applied mathematics*, 58(1), 73-82.
- Tomikawa, Y., Iwase, Y., Arita, K., et Yamada, H. (1986). Nondestructive inspection of a wooden pole using ultrasonic computed tomography. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 33(4), 354-358.
- Trinca, A. J., et Gonçalves, R. (2009). Effect of the transversal section dimensions and transducer frequency on ultrasound wave propagation velocity in wood. *Revista Árvore*, 33(1), 177-184.
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization (Vol. 115)*: Van Nostrand Reinhold New York. ISBN: 978-3-941300-22-4. 494p.
- Via, B., So, C., Shupe, T., Groom, L., et Wikaira, J. (2009). Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(1), 60-66.
- Vun, Y., Bhardwaj, M., Hoover, K., Wanowijak, J., Kimmel, J., et Worley, S. (2006, september). Development of non-contact ultrasound as a sensor for wood moisture content. Communication présentée au 9^e conférence européenne sur les END, Berlin. Repéré le 05 octobre 2018 à

https://www.researchgate.net/publication/240641415_Development_of_Non-contact_Ultrasound_as_a_Sensor_for_Wood_Moisture_Content

- Wang, D., Wang, Q., Wang, H., et Zhu, H. (2016). Experimental study on damage detection in timber specimens based on an electromechanical impedance technique and RMSD-based mahalanobis distance. *Sensors*, 16(10), 1765.
- Wang, S.-Y., Chen, J.-H., Tsai, M.-J., Lin, C.-J., et Yang, T.-H. (2008). Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 149-158.
- Wang, X., et Carter, P. (2015). Acoustic Assessment of Wood Quality in Trees and Logs. Nondestructive Evaluation of Wood. General Technical Report FPL-GTR-238: 87-101.
- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., et Pellerin, R. F. (2004). Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 12p.
- Wang, X., Ross, R. J., et Carter, P. (2007a). Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior. *Wood and Fiber Science*, 39(1), 28-38.
- Wang, X., Ross, R. J., Mattson, J. A., et Erickson, J. R. (2002). Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs. *Forest Products Journal*, 52(2), 79.
- Wang, X., Ross, R. J., Mattson, J. A., Erickson, J. R., Forsman, J. W., Geske, E. A., et Wehr, M. A. (2001). Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs. US Department of Agriculture. Forest Products Laboratory, FPL-RP-600.
- Wang, X., Ross, R. J., McClellan, M., Barbour, R. J., Erickson, J. R., Forsman, J. W., et McGinnis, G. D. (2007b). Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*, 33(4), 522-533.
- Wang, X.; Senalik, C. A; Ross, R. J. (2017). Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-246. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 539 p.
- Wen, Q., Basu, A., Janmey, P. A., et Yodh, A. G. (2012). Non-affine deformations in polymer hydrogels. *Soft matter*, 8(31), 8039-8049.

- Yaitskova, N., et Van de Kuilen, J. W. (2014). Time-of-flight modeling of transversal ultrasonic scan of wood. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(6), 3409-3415.
- Yang, J., et Evans, R. (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61(6), 449-452.
- Yin, Y., Nagao, H., Liu, X., et Nakai, T. (2010). Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods. *Journal of wood science*, 56(1), 33-40.
- Yoshihara, H. (2011). Measurement of the Young's modulus and shear modulus of in-plane quasi-isotropic medium-density fiberboard by flexural vibration. *BioResources*, 6(4), 4871-4885.
- Yoshihara, H., Kubojima, Y., Nagaoka, K., et Ohta, M. (1998). Measurement of the shear modulus of wood by static bending tests. *Journal of wood science*, 44(1), 15-20.
- Yoshihara, H., et Yoshinobu, M. (2015). Young's modulus and shear modulus of solid wood measured by the flexural vibration test of specimens with large height/length ratios. *Holzforschung*, 69(4), 493-499.
- Zani, M.-L. (2001). CND par Ultrasons: le "sans-contact" est prêt, mais... *Mesures*, 734, 63-66.
- Zhang, S. (2003). Wood quality attributes and their impacts on wood utilization. XII World Forestry Congress, Quebec City, Canada. Repéré le 04 october 2018 à <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0674-B1.HTM>
- Zhou, Z.-R., Zhao, M.-C., Wang, Z., Wang, B. J., et Guan, X. (2013). Acoustic testing and sorting of Chinese poplar logs for structural LVL products. *BioResources*, 8(3), 4101-4116.