

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**CONCEPTION ET VALIDATION D'UN DISPOSITIF POUR LA MESURE DU  
MODULE D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE DANS LE BOIS**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

WASSIM KHARRAT

NOVEMBRE 2016



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue (UQAT) dans le cadre des activités de la Chaire de Recherche du Canada en Valorisation, Caractérisation et Transformation du bois. Ce projet a été financé également par le conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le programme des bourses MITACS et la compagnie forestière Tembec.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Ahmed KOUBAA, Professeur chercheur à l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue et Directeur scientifique du Laboratoire de biomatériaux, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son soutien et ses encouragements, et pour m'avoir donné l'opportunité de travailler dans le cadre de ce projet.

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues ayant contribué de près ou de loin au projet de maîtrise et plus spécifiquement mes parents, ma fiancée, ma famille et mes amis pour leur respect et le support moral, qui contribuent grandement à ma réussite.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	II
TABLE DES MATIÈRES.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
RÉSUMÉ.....	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1.....	3
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1    Le contrôle non destructif.....	3
1.1.1    Définition du contrôle non destructif.....	3
1.1.2    Utilisation des techniques de CND pour l'évaluation des propriétés du bois.....	3
1.1.2.1    Evolution historique des techniques de CND du bois.....	5
1.1.2.2    Evaluation des propriétés du bois.....	8
1.1.2.2.1    Méthodes non destructives de mesure de la masse volumique du bois ....	9
1.1.2.2.1.1    Absorptiométrie des radiations ionisantes.....	10
1.1.2.2.1.2    Spectroscopie proche infrarouge (IRP).....	11
1.1.2.2.1.3    Méthode du résistographe.....	12
1.1.2.2.2    Méthodes non destructives de calcul du module d'élasticité.....	12
1.1.2.2.2.1    Les méthodes de résonance.....	13
1.1.2.2.2.2    La technique d'ultrasons.....	16

1.1.2.2.3	La relation entre le module d'élasticité dynamique MOED et le module d'élasticité statique MOES .....	20
1.1.2.2.4	Conclusion.....	23
<b>1.2</b>	<b>Les sources de variation du module d'élasticité dynamique du bois .....</b>	<b>24</b>
1.2.1	Généralités sur le bois .....	24
1.2.1.1	Matériau hygroscopique .....	25
1.2.1.2	Matériau orthotrope .....	25
1.2.1.3	Matériau poreux.....	26
1.2.1.4	Anatomie et structure.....	27
1.2.2	Les sources de variations du module d'élasticité dynamique en relation avec les propriétés du bois.....	30
1.2.2.1	La masse volumique .....	30
1.2.2.2	La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore .....	31
1.2.2.2.1	Effet de l'anisotropie du bois .....	31
1.2.2.2.2	Effet de l'orientation des cernes.....	32
1.2.2.2.3	Effet de la teneur en humidité.....	33
1.2.2.2.4	Effet des défauts dans le bois .....	34
1.2.2.2.5	Effet de la géométrie .....	35
1.2.2.3	La relation entre la masse volumique et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore. ....	35
<b>CHAPITRE 2</b>	.....	<b>37</b>
<b>DISCUSSION DES SOLUTIONS PROPOSÉES</b>	.....	<b>37</b>
<b>2.1</b>	<b>Problématique et objectifs .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2</b>	<b>Choix des solutions technologiques .....</b>	<b>39</b>
2.2.1	Solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux. ....	39
2.2.1.1	Introduction et principe .....	39

2.2.1.2	Bilan de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux .....	40
2.2.2	Solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs	41
2.2.2.1	Introduction et principe .....	41
2.2.2.2	Bilan de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs. ....	43
2.2.3	Comparaison des deux solutions et conclusion .....	43
2.3	<b>Etude de la solution N°2 : déplacer l'échantillon et fixer les deux transducteurs</b> .....	44
2.3.1	Introduction .....	44
2.3.2	Les essais préliminaires .....	44
2.3.3	La solution technologique proposée .....	45
2.3.3.1	Choix du mécanisme de déplacement du porte échantillon .....	48
2.3.3.2	Conception du porte échantillon .....	51
2.3.3.3	Choix et mise en place des deux actionneurs électriques .....	52
2.3.3.4	Assemblage des composants du dispositif de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore .....	55
2.3.3.5	Automatisation de l'opération de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore. ....	56
2.3.3.5.1	Le contrôleur 'TANGO Desktop' .....	57
2.3.3.5.2	Programmation .....	59
	<b>CHAPITRE 3</b> .....	63
	<b>INTRA-RING WOOD DENSITY AND DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY PROFILES OF BLACK SPRUCE AND JACK PINE FROM X-RAY DENSITOMETRY AND ULTRASONIC METHOD</b> .....	63
3.1	Résumé .....	63
3.2	Abstract .....	64

3.3	<b>Introduction</b> .....	64
3.4	<b>Material and methods</b> .....	67
3.4.1	Material .....	67
3.4.2	Wood density measurement.....	68
3.4.3	Wood ultrasonic velocity measurement .....	69
3.4.4	Modeling intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles ..	71
3.4.5	Statistical analysis .....	71
3.5	<b>Results and discussion</b> .....	71
3.5.1	Intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles .....	72
3.5.2	Earlywood - latewood transition.....	75
3.5.3	Radial variation in ring wood density and ring dynamic modulus of elasticity ..	79
3.5.4	Growth, density and elastic properties relationships .....	82
3.6	<b>Practical implications</b> .....	85
3.7	<b>Conclusions</b> .....	86
	<b>CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS PRATIQUES</b> .....	88
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	91

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Dispositif du Résistographe .....	12
Figure 1.2 : Schématisation de l'essai de résonance en flexion (Haines et al. 1996) .....	14
Figure 1.3 : Schématisation de l'essai de résonance longitudinale .....	16
Figure 1.4 : Méthode de mesure du temps de propagation du son dans le bois dans la direction parallèle à la fibre (Feio 2005). .....	17
Figure 1.5 : Principe de la détection de défaut dans les arbres sur pied (Wang et al. 2004) .....	18
Figure 1.6 : Principe de la tomographie ultrasonore (Martinis et al. 2004).....	19
Figure 1.7 : La relation entre le MOES et le MOED pour différentes essences de bois (Koubaa et al. 2012).....	20
Figure 1.8 : Différents plans ligneux d'un tronc d'arbre (adapté de Dubus 2014).....	26
Figure 1.9 : Structure du bois (Cailliez et al. 2002) .....	27
Figure 1.10 : Anatomie d'un tronc d'arbre (adapté de Everett et al. 2007) .....	28
Figure 1.11 : Coupe transversale d'un tronc d'arbre (Carvalho et al. 2013).....	29
Figure 1.12 : Variations de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore en fonction de la teneur en humidité (De Oliveira et al. 2005).....	34
Figure 1.13 : Effets des défauts sur la propagation de l'onde ultrasonore (Feio 2005) .....	35
Figure 2.1 : Les étapes de mesure du module d'élasticité dynamique .....	38
Figure 2.2 : Propagation des ondes ultrasonores .....	39
Figure 2.3 : Les transducteurs à rouleaux.....	40
Figure 2.4 : Principe de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux.....	40
Figure 2.5 : Les types de transducteurs utilisés dans la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs .....	42
Figure 2.6 : Principe de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs.....	42
Figure 2.7 : Les variations des mesures du temps de propagation pour le même échantillon de bois...	45
Figure 2.8 : Échantillon d'épinette noire.....	46
Figure 2.9 : Actuateur linéaire CXN-60-100 (Precision Motorized Positioning Stage, GMT GLOBAL INC (2014)).....	49

Figure 2.10 : Caractéristiques de l'actuateur CXN-60-100 (adapté de 'Precision Motorized Positioning Stage', GMT GLOBAL INC (2014)).....	49
Figure 2.11 : L'étai de fixation de l'échantillon de bois.....	51
Figure 2.12 : Fixation de l'étai sur la table de l'actuateur linéaire .....	52
Figure 2.13 : L'actionneur électrique 8CMA06.....	53
Figure 2.14 : Dimensions et spécifications de l'actionneur électrique .....	54
Figure 2.15 : Support de fixation de l'ensemble 'actionneur-transducteur émetteur-support de maintien .....	54
Figure 2.16 : Support de fixation de l'ensemble 'actionneur-transducteur récepteur-support de maintien'.....	55
Figure 2.17 : Dispositif de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore .....	56
Figure 2.18 : Le contrôleur 'TANGO Desktop' .....	57
Figure 2.19 : Schéma simplifié des axes des déplacements des différents composants .....	58
Figure 2.20 : Présentation de la position initiale des deux transducteurs .....	60
Figure 3.1 : Prototype for measurement of the propagation time of the ultrasonic wave.....	70
Figure 3.2 : Example of radial variation of: a) wood density and b) DMOE in Jack pine profiles (from ring 2 to ring 19).....	72
Figure 3.3 : Examples of within ring profiles and the fits obtained from the 6th order polynomials for: a) Ring density of black spruce; b) ring density of jack pine; c) DMOE of Black spruce; d) DMOE of Jack pine .....	74
Figure 3.4: Radial variation of E/L transition density (Bars indicate the standard error) for a) black spruce and b) jack pine.....	77
Figure 3.5 : Radial variation of E/L transition DMOE (Bars indicate the standard error) for a) black spruce ad b) jack pine .....	77
Figure 3.6 : Relationship between transition DMOE calculated at the earlywood-latewood (E/L) transition density and the transition DMOE as defined by the inflexion point method elasticity for black spruce and jack pine.....	78
Figure 3.7 : Radial variation of ring density (RD), earlywood density (EWD), and latewood density (LWD) for a) black spruce and b) jack pine .....	81
Figure 3.8 : Radial variation of ring dynamic modulus of elasticity (RDMOE), earlywood dynamic modulus of elasticity (EWDMOE), and latewood dynamic modulus of elasticity (LWDMOE) for a) black spruce and b) jack pin.....	81
Figure 3.9 : Relationship between ring density and ring dynamic modulus of elasticity for black spruce and jack pine.....	82

Figure 3.10 : Relationships between wood density and wood dynamic modulus of elasticity at the ring  
(R), earlywood (EW) and latewood (LW) levels for jack pine..... 83

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Récapitulatif des principales méthodes de contrôle non destructif (adapté de (Brancheriau 2013)).....	4
Tableau 1.2 : Les mesures du MOES et du MOED de l'épicéa et du sapin, adapté de (Haines et al. 1996).....	21
Tableau 1.3 : Les valeurs moyennes du MOES, MOET et le MOED en (N.mm <sup>2</sup> ) (Hassan et al. 2013)23	
Tableau 1.4 : Ordre de grandeurs des propriétés acoustiques du matériau bois (adapté de Brancheriau 2013).....	33
Tableau 1.5 : Variations des mesures du temps de propagation pour le bois de sapin Douglas sans caries à 12% d'humidité adapté de (Ross 2015) .....	33
Tableau 2.1 : Le Bilan de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux .....	41
Tableau 2.2 : Le Bilan de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs.....	43
Tableau 2.3 : Les étapes de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore .....	47
Tableau 2.4 : Spécifications mécaniques, de précision et électriques de l'actuateur CXN-60-100 (adapté de 'Precision Motorized Positioning Stage', GMT GLOBAL INC (2014)).....	50
Tableau 2.5 : Les spécifications du contrôleur 'TANGO Desktop' [37-38-39].....	59
Table 3.1 : Average, standard variation (between parenthesis) and range of Pearson's coefficient of determination between measured and predicted within-ring density and dynamic modulus of elasticity values from the 6 <sup>th</sup> order polynomial models for different rings for black spruce and jack pine .....	75
Table 3.2 : Average (Av), range (Ra) and standard variation for ring width, wood density and wood DMOE at earlywood-latewood transition, earlywood and latewood levels as defined by the inflexion method for different rings .....	80
Table 3.3 : Pearson's coefficient of correlations between the different traits for black spruce (upper) and jack pine (lower).....	84

## RÉSUMÉ

L'ultrason est un outil rapide de mesure non destructive du module d'élasticité dynamique (MOED) des matériaux dont le bois. Le MOED est fortement corrélé au module d'élasticité statique du bois et il est calculé à partir de la vitesse de propagation du son ( $V$ ) à travers l'échantillon du bois et sa masse volumique ( $D$ ). En pratique, la masse volumique utilisée dans cette formule est celle de l'espèce ou de l'échantillon à étudier. Cela introduit une importante source d'imprécision dans l'estimation du MOED due aux variations intra-arbres, intracernes et celles induites par les traitements sylvicoles.

Nous avons développé un prototype pour la mesure de la vitesse de propagation du son avec une résolution similaire à celle offerte par le densitomètre à rayon X lors de la mesure de la masse volumique (0,04 mm). Le prototype consiste en un chariot, qui sert comme porte échantillon, contrôlé par un microcontrôleur qui programme les séquences de déplacement de l'échantillon. Le temps de propagation du son dans le bois est mesuré entre l'émetteur et le récepteur d'ultrasons. Une méthode d'évaluation non destructive basée sur l'utilisation du densitomètre à rayon X et du prototype développé permettent de déterminer les propriétés du bois en particulier son MOED. Les variations du MOED à l'intérieur du cerne (MOED du bois initial et du bois final), de la moelle à l'écorce (Variation radiale) ont été étudiées. Nous avons utilisé une approche mathématique basée sur des polynômes de degrés élevés pour modéliser les profils du MOED intracernes dans l'épinette noire et le pin gris. Les corrélations entre les MOED mesurés et prédits sont élevées et significatives. Finalement, nous avons étudié les relations entre croissance, masse volumique et MOED à l'échelle des cernes. Les coefficients de corrélation entre la masse volumique et le MOED sont positifs et significatifs au niveau du cerne, du bois initial et du bois final.

## ABSTRACT

The ultrasonic technique, as a nondestructive evaluation tool, has become widely used to evaluate wood dynamic modulus of elasticity (DMOE). The DMOE is determined basing on wood density and ultrasonic velocity measurements. The use of wood average density introduces an important source of imprecision in estimating the DMOE because of some variations such as intra-tree, intra-rings and eventually these induced by silvicultural treatments. We have developed a prototype for measuring the ultrasonic velocity with a resolution similar to that provided by the X-ray densitometer when measuring wood density. A nondestructive evaluation method based on the use of X-ray densitometer and the developed prototype is used to determine radial and intra-ring wood DMOE profiles. This method can be used to identify the effect of silvicultural practice and to provide accurate information about mechanical properties of wood material. We have modelled intra-ring wood density and DMOE profiles in black spruce and jack pine using high orders polynomials. The correlation between the predicted and the measured wood properties were very high (up to 0,90) and highly significant. The correlations between wood radial growth, density and DMOE were examined. Finally, the relationships between ring width, ring density and ring DMOE were investigated. Ring density correlated well with ring DMOE.

## INTRODUCTION

La diminution des ressources disponibles en bois, l'augmentation des coûts de transformation de cette matière première et l'importance de mieux connaître la qualité et la valeur du bois issu des forêts expliquent l'intérêt des industriels au triage du matériau bois sans provoquer des ruptures influant son utilisation ultérieure. De ce fait, il paraît très important de développer des outils non destructifs, fiables et précis pour mesurer les propriétés du matériau bois qui présentent les indicateurs de la qualité et de la valeur des produits finis. Parmi les indicateurs de la qualité du bois, le module d'élasticité dynamique (MOED) déterminé à partir de la technique d'ultrasons est universellement admis comme outil pour l'évaluation non destructive des valeurs moyennes des constantes élastiques du bois. En effet, le MOED est étroitement lié aux propriétés mécaniques du bois et permet de fournir des données claires sur la qualité du bois comme étant une matière première prête à la transformation industrielle.

Le MOED dépend de la vitesse de propagation du son dans le bois et de la masse volumique de l'échantillon. Les outils actuels permettent de mesurer cette vitesse d'une façon statique à des points précis. Cela introduit une importante source d'imprécision dans l'estimation du MOED due aux sources de variations principalement la masse volumique qui varie non seulement d'un cerne à l'autre mais aussi dans le même cerne entre le bois initial et le bois final.

L'objectif général de ce travail est de développer et valider un dispositif expérimental pour la mesure des variations intra-arbres et intracernes du MOED du bois. Plus spécifiquement, les travaux visent à concevoir un prototype pour la mesure de la vitesse de propagation du son avec une résolution similaire à celle offerte par le

densitomètre à rayon X lors de la mesure de la masse volumique (0,04 mm). Cela permettra de minimiser l'effet des variations intra-arbres et intracernes de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore. Par la suite, la superposition des profils de la vitesse de propagation et de la masse volumique améliore grandement la précision de l'estimation du module d'élasticité dynamique et facilite entre autres l'étude des effets des traitements sylvicoles sur la rigidité du bois à partir des profils de variation du MOED au niveau du bois initial et du bois final. Les essences d'épinette noire et du pin gris seront étudiés dans ce projet.

Ce mémoire rend compte de tout ce qui a été réalisé durant ce projet. Il s'articule autour d'une introduction, de trois chapitres et d'une conclusion. Le premier chapitre est consacré à la revue bibliographique. Le second chapitre sera dédié à la présentation détaillée des solutions technologiques et le choix des solutions finales. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude des variations radiales et intracernes de la masse volumique et du module d'élasticité dynamique du bois de l'épinette noire et du pin gris afin de valider et évaluer la solution réalisée. Finalement, les conclusions, les implications pratiques des résultats et des suggestions pour l'orientation des travaux futurs sont présentées.

## CHAPITRE 1

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

#### *1.1 Le contrôle non destructif*

##### *1.1.1 Définition du contrôle non destructif*

Généralement, on définit le Contrôle Non Destructif (CND) comme étant l'ensemble des techniques et des procédés permettant d'examiner une structure, de tester et évaluer ses propriétés chimiques, physiques et mécaniques sans provoquer des dégâts influant son utilisation ultérieure (Dumont-Fillon 1996, Brashaw et al. 2009, Hassan et al. 2013). L'importance de ce procédé résulte de la mise en cause de tous les défauts ainsi que les non conformités susceptibles d'altérer la sécurité de l'utilisation d'un produit. Les techniques non destructives visent à étudier les changements critiques dans les paramètres structuraux afin d'éviter toute défaillance possible (Sohi et al. 2011). Le contrôle de la qualité figure comme étant le domaine le plus général de l'emploi du contrôle non destructif dans le but d'éviter les anomalies détectées. Le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activités scientifiques et industrielles qui regroupent des unités de recherche et de formation ainsi que des entreprises industrielles (Dumont-Fillon 1996). On distingue plusieurs méthodes de CND récapitulées dans le tableau 1 (Brancheriau 2013).

##### *1.1.2 Utilisation des techniques de CND pour l'évaluation des propriétés du bois*

Afin de réussir à faire le bon choix de l'essence de bois pour les différentes applications industrielles, les techniques de contrôle du bois ont largement évolué. Les chercheurs et les industrielles ne se contentent plus des techniques destructives (les essais mécaniques, physiques et chimiques), ils cherchent également à améliorer

les techniques de contrôle non destructif. De nos jours, le domaine du contrôle non destructif et d'Évaluation Non Destructive (END) des matériaux est en évolution continue (Brashaw et al. 2009). Ceci est particulièrement vrai dans le domaine du bois et des matériaux à base de fibres due à ses avantages évidents. En effet, l'augmentation des coûts de transformation de cette matière première expliquent l'intérêt des industriels au développement des techniques rentables d'évaluation non destructive.

**Tableau 1.1 :** Récapitulatif des principales méthodes de contrôle non destructif (adapté de (Brancheriau 2013))

Procédé CND	Méthode de contrôle	Domaine d'application
Optique	Examen visuel	Examen d'extérieur
	Thermographie infrarouge	Détermination des propriétés thermo physiques des surfaces
Électromagnétique	Courants de Foucault	Détection de défaut débouchant
	Magnétoscopie	Détection de défauts de surface
Fluide	Ressuage	Détection de défaut débouchant
	Étanchéité	Contrôle d'étanchéité
Rayonnement	Irradiation (Rayons X ou $\gamma$ )	Détection de défauts internes
Ondes mécaniques	Acoustiques et ultrasons	Détermination des propriétés mécaniques Détection de défauts internes et de surface

### *1.1.2.1 Evolution historique des techniques de CND du bois*

Les premières recherches sur les technologies de CND et de l'END des produits à base de bois ont porté sur des méthodes permettant d'évaluer les caractéristiques de performance du bois de charpente en Amérique du nord (Brashaw et al. 2009). Les techniques de CND et END ainsi que les procédures et les équipements résultant de ces efforts sont maintenant largement utilisés (Ross 2015). Actuellement, les efforts de recherche et de développement visent à examiner l'utilisation d'un large éventail de technologies d'essais non destructifs pour l'évaluation du bois et des matériaux à base de bois à travers l'étude des structures des arbres. L'impulsion initiale pour la recherche en CND et END du bois était la nécessité de fournir des méthodes d'évaluation des matériaux et produits à base du bois afin de garantir la bonne utilisation de ces matériaux (Brashaw et al. 2009).

L'évolution de la qualité des matériaux de bois est devenue un élément crucial et de valeur dans la chaîne opérationnelle. Pour cette raison, les industries de transformation du bois sont de plus en plus sous pression et cherchent à maximiser la valeur extraite. Un effort important a été consacré à développer des technologies de CND robustes et capables de prédire les propriétés de chaque arbre et mieux évaluer la valeur des forêts partout dans le monde. En Amérique du nord, les recherches sont basées sur l'évaluation de la qualité de l'arbre en utilisant les concepts fondamentaux de la CND et le développement des outils de test. La spectroscopie proche infrarouge (NIR 'Near Infrared) figure parmi les technologies utilisées. Elle évalue l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les matériaux dans le domaine infrarouge. En effet, l'utilisation du NIR pour évaluer les propriétés chimiques, mécaniques (résistance et rigidité) et anatomiques du bois a été largement étudiée donnant des indications positives sur l'utilité de cette technique pour l'évaluation du bois (So et al. 2004, Brashaw et al. 2009). Deux avantages peuvent expliquer l'utilisation fréquente de cette technique dans le secteur industriel comme outil d'analyse pour le

contrôle de la qualité : d'une part, la faible absorptivité molaire de bandes NIR qui permet un fonctionnement dans le mode de réflexion et par conséquent l'enregistrement des spectres d'échantillons solides avec peu ou sans traitement, ce qui augmente sensiblement le débit; d'autre part, la double fonction du signal d'analyse de l'échantillon qui facilite la détermination des paramètres physiques et chimiques (Blanco et al. 1998). Le problème posé c'est que le propriétaire du bois ne dispose pas d'un moyen fiable pour estimer la valeur des produits finis avant la récolte. Des recherches récentes sur la qualité du bois ont montré que toute une gamme de propriétés du bois et de la fibre peut être prévue par une simple mesure acoustique sur les arbres (Wang et al. 2007). Cela facilitera l'utilisation de la technologie de CND à un certain nombre d'étapes dans la chaîne de valeur opérationnelle. Les premières recherches sur la détection de l'arbre de décroissance en Amérique du nord comprennent la mesure des ondes sonores à travers la tige (rayons X, acoustique et géo-radar) dans les arbres urbains (Brashaw et al. 2009).

Les recherches en CND sont en cours dans plusieurs universités en Amérique du sud et des progrès importants ont été accomplis dans l'établissement des relations entre les paramètres d'essais non destructifs et la qualité du bois (Brashaw et al. 2009). Par exemple, la relation entre les paramètres de NIR et les diverses propriétés (masse volumique, coefficients de retraits, ...) a été étudiée. Les efforts visant à identifier et localiser les défauts de croissance, tel que l'infestation biologique en utilisant les micro-ondes, le laser, les rayons X et les technologies de rayons gamma, ont montré des résultats intéressants en particulier lorsqu'ils sont couplés avec des méthodes avancées d'analyse de données. D'autre part, les recherches concernant les techniques d'échographie ont permis de fournir d'excellentes informations de base concernant les vitesses des ondes et les propriétés des matériaux anisotropes. Ces résultats présentent une application potentielle en particulier dans la définition des propriétés des matériaux qui peuvent être utilisés dans les simulations des logiciels visant à examiner l'impact des pratiques sylvicoles sur la qualité du bois. L'adaptation de la

technologie des ultrasons pour classer les poteaux en service de transmission de puissance électrique était parmi les réussites au Brésil (Brashaw et al. 2009).

De l'autre côté du monde en Asie : la Chine, qui dispose actuellement de la plus grande zone de forêts de plantation rapide cultivées dans le monde, focalise ses recherches sur l'étude de l'impact des caractéristiques de croissance sur les propriétés du bois telles que la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle afin de mieux comprendre le potentiel des forêts de plantation (Lei 2005). De ce fait, l'application des techniques de CND aux matériaux de plantation cultivées est une étape importante pour comprendre comment améliorer sa qualité et comment identifier l'utilisation optimale des produits forestiers par l'industrie. Un large éventail de techniques de l'END, y compris les vibrations de basses fréquences, les ondes de contrainte et les rayons X ont été étudiés et sont en cours d'adoption par l'industrie pour le suivi de la qualité des produits finis. En 2003, l'institut chinois de recherche de l'industrie du bois a lancé une série d'études visant à développer des méthodes d'évaluation de la qualité du bois. Ces études ont identifié des relations utiles entre la mesure du module d'élasticité des arbres sur la base acoustique et les propriétés mécaniques du bois en flexion statique (Brashaw et al. 2009). Des techniques telles que les jauges de palpation et des déformations mécaniques combinées à une résistance de micro-forage ont également été développées pour fournir un moyen relativement peu coûteux pour l'évaluation de la qualité du bois.

Des chercheurs australiens ont été à l'avant-garde de l'emploi de la spectroscopie NIR pour la prédiction du rendement en pâte kraft dans les bois de feuillus. Les premiers travaux portent sur la farine de bois provenant des échantillons de copeaux d'arbres entiers. Bien que l'intérêt de l'Australie à l'application du NIR a mis l'accent sur les pâtes, les chercheurs néozélandais ont pris un accent sur le bois massif en particulier la prévision de la rigidité de petits échantillons de bois. De plus, des recherches menées par la CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), ont permis d'installer un système ultrasons pour localiser les défauts

internes des bois feuillus. De même, les systèmes à ultrasons par impulsion ont été utilisés avec succès pour localiser les nœuds.

En Europe, le CND et l'END du bois remontent à plus de 50 ans avec des travaux rapportés sur l'établissement de relations fondamentales entre les divers paramètres d'essais non destructifs et les propriétés mécaniques. De nos jours, l'étude des techniques de propagation d'ondes thermographiques, du radar et d'ultrasons permet de mieux évaluer les propriétés du bois. D'autre part, les techniques de CND qui utilisent la mesure de la rigidité en flexion, les rayons X et les diverses techniques de propagation et de vibration sonores sont à l'étude pour l'utilisation seule ou en combinaison. En effet, une variété de techniques y compris l'impédance électrique, le géo radar, la transmission du son et les essais mécaniques sont utilisés (Brashaw et al. 2009).

Pour conclure, un effort important a été consacré à la découverte et le développement des technologies de CND et END des produits à base du bois. Aujourd'hui, de nombreuses recherches sont en cours partout dans le monde pour favoriser le développement et l'utilisation des méthodes non destructives afin de révéler de nombreux défis qui se posent concernant l'utilisation des ressources forestières.

#### *1.1.2.2 Evaluation des propriétés du bois*

Les chercheurs tout comme les industriels ont profité du développement des techniques de CND et END<sup>1</sup> pour arriver à évaluer les propriétés du bois sans le détruire. Parmi les principales propriétés du bois figurent :

- (i) La teneur en humidité du bois : souvent exprimé en terme de la proportion en masse de l'eau par rapport à la masse anhydre de l'échantillon (Baettig 2005).

---

<sup>1</sup> Pour la suite de ce rapport, les termes 'CND' et 'END' sont considérés des synonymes

- (ii) L'angle des microfibrilles (AMF) : c'est l'inclinaison moyenne des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe de la fibre (Baillères et al. 1995).
- (iii) La masse volumique du bois définie comme étant le rapport de la masse du bois sur le volume qui la contient.
- (iv) Le module d'élasticité : c'est la constante de rigidité du bois.

Les techniques de CND permettent de mesurer ces propriétés dans le but de définir la qualité du bois mais la notion de qualité est en général une notion subjective qui devrait être bien définie suivant le contexte. Dans le cas du matériau bois, la qualité est reliée aux caractéristiques et propriétés qui le valorisent dans le cadre d'une application donnée. Certaines de ces propriétés sont souhaitables pour une application mais inutiles pour une autre. Par exemple, la faible masse volumique et la faible conductivité thermique du bois exempt de nœuds du bois de Thuya expliquent son utilisation dans la fabrication des bancs destinés aux saunas (le bois trop dense qui contient des nœuds devient trop chaud pour la peau) (Jozsa et al. 1997). Par contre, le bois de sciage structural nécessite une masse volumique élevée. Dans cette revue, nous nous intéressons à l'étude des techniques d'évaluation non destructive de la masse volumique et du module d'élasticité du bois.

#### *1.1.2.2.1 Méthodes non destructives de mesure de la masse volumique du bois*

Le bois, comme étant un matériau industriel tiré directement de l'arbre, possède plusieurs propriétés chimiques et physiques comme l'hétérogénéité, l'anisotropie et l'affinité pour l'eau. C'est ainsi que la masse volumique, qui pour la plupart des autres matériaux, présente une donnée relativement simple, devient dans le cas particulier du bois, une caractéristique extrêmement fluctuante. En effet, elle varie, non seulement d'une essence à l'autre, mais encore pour une même essence d'une station à une autre, pour une même station d'un arbre à un autre, pour un même arbre d'une année à l'autre et pour une même année d'une période à une autre. En outre, la masse

volumique du bois dépend aussi de la teneur en humidité de l'arbre, qui varie à son tour suivant la température et l'état hygrométrique de l'air ambiant (Polge 1963, Polge 1966).

La mesure de la masse volumique du bois permet non seulement de conditionner le rendement réel des peuplements forestiers mais aussi d'estimer les caractéristiques physiques (le retrait et la longueur des fibres) et mécaniques (les résistances à la compression et à la flexion) du bois (Polge 1966). Plusieurs techniques sont utilisées pour la mesure non destructive de la masse volumique du bois.

#### 1.1.2.2.1.1 Absorptiométrie des radiations ionisantes

Les études concernant cette méthode ont commencé depuis les années 60 afin d'obtenir la masse volumique locale des échantillons de bois. L'absorptiométrie est aujourd'hui largement utilisée en recherche et en industrie car elle présente une méthode efficace pour évaluer la masse volumique locale du bois (Baettig 2005). En effet, pour une teneur en humidité constante, la mesure de l'atténuation des rayons X ou  $\gamma$  est liée à la masse volumique de l'échantillon irradié. Les rayons X en particulier sont largement utilisés pour évaluer les propriétés du bois telles que la teneur en humidité (par atténuation du rayonnement ou par diffusion cohérente), l'angle de microfibrilles (par diffraction de rayons X) et la masse volumique du bois (par densitométrie à rayon X). Cette dernière, considérée comme l'attribut le plus important de la qualité du bois, est liée à de nombreuses autres propriétés y compris la rigidité et la stabilité dimensionnelle. Cela explique la grande évolution au niveau des techniques de mesures de cette propriété (Koubaa et al. 2002). La mesure de la masse volumique du bois est basée sur l'atténuation des rayons X. Actuellement, les outils développés de mesure de la masse volumique permettent de balayer les cernes de l'échantillon de bois de la moelle à l'écorce pour établir les profils intracernes de la variation de la masse volumique. Ces techniques peuvent fournir également la masse volumique du bois initial et du bois final pour chacun des cernes annuels de la

moelle à l'écorce (Koubaa et al. 2002, Bouslimi et al. 2014). De nos jours, cette méthode est largement utilisée pour la mesure de la masse volumique mais on ne pourrait pas l'appliquer directement à l'arbre. De plus, elle nécessite un échantillonnage délicat. Par contre, elle offre une grande précision qui est nécessaire pour calculer la variation de la masse volumique.

#### 1.1.2.2.1.2 Spectroscopie proche infrarouge (IRP)

Des études récentes montrent que la spectroscopie dans le proche infrarouge offre la possibilité d'estimer rapidement plusieurs propriétés importantes du bois notamment sa masse volumique (Schimleck et al. 2001). Cependant, pour utiliser cette méthode sur une base opérationnelle, il faut établir des courbes de calibration à l'aide de plusieurs échantillons représentatifs d'une grande variété de conditions de croissance et tester leur performance avec des échantillons provenant de nouvelles populations (Jones et al. 2005).

Les études portant sur cette technique montrent que la spectroscopie IRP adéquatement calibrée pourrait constituer la base d'un instrument d'essai universel capable de prédire une large gamme de propriétés du bois à partir d'un seul type de spectre (Schimleck et al. 2001, Jones et al. 2005).

Des résultats similaires confirment que les méthodes développées sont applicables à l'évaluation non destructive des ressources forestières à grande échelle, des programmes d'amélioration génétique des arbres et des traitements sylvicoles (Schimleck et al. 2001). Cette technique peut résoudre plusieurs problèmes quant à la mesure de la masse volumique et la caractérisation d'autres propriétés du bois. Par contre, l'exactitude des prévisions de différentes propriétés varie selon le traitement mathématique employé.

#### 1.1.2.2.1.3 Méthode du résistographe

La méthode du résistographe est basée sur la mesure de la résistance du matériau à l'avance d'un petit foret dont le diamètre varie entre 1,5 mm et 3 mm (Figure 1.1). Le principe de ce procédé est basé sur une corrélation entre la résistance du matériau testé à la pénétration du petit foret et la masse volumique du matériau. Ce test permet d'obtenir le profil de la masse volumique de l'échantillon. Plus précisément, nous pourrions visualiser la représentation graphique des valeurs de la résistance de l'outil de perçage par rapport à la profondeur de pénétration (jusqu'à 50 points de mesure par mm) (Feio 2005).



**Figure 1.1** : Dispositif du Résistographe

Cette méthode est classée comme quasi-non destructive car le diamètre du trou qui reste dans les échantillons après les tests est assez petit pour ne pas avoir des effets structurels sur la section restante (Emerson et al. 1998). Les profils obtenus présentent les variations de la masse volumique du bois initial et du bois final et permettent l'identification du bois pourri. Il est possible également de définir les différents stades de détérioration et détecter des discontinuités (par exemple des fissures) (Feio 2005).

#### 1.1.2.2.2 Méthodes non destructives de calcul du module d'élasticité

Les propriétés élastiques des matériaux solides sont d'une importance considérable à la fois dans le domaine de la science et de la technologie. Pour le bois, leur mesure

donne des informations essentielles pour la compréhension de la nature de la liaison au niveau structurel très fin. En plus, leur mesure est également importante pour les besoins de la conception technique puisqu'ils décrivent le comportement mécanique du bois (Bucur et al. 1984).

Le choix du matériau le plus approprié pour une application particulière nécessite des connaissances sur ses propriétés mécaniques. Les constantes élastiques décrivent le comportement mécanique de ces matériaux. Plusieurs méthodes dynamiques et statiques ont été utilisées pour mesurer ces constantes en particulier le module d'élasticité (Najafi et al. 2005). Les essais statiques de traction ou de flexion sont des essais destructifs. Par contre, les essais déterminés à partir de méthodes dynamiques permettent de mesurer le module d'élasticité d'une manière non destructive. Ces méthodes sont développées en parallèle avec les méthodes d'essais statiques pour de nombreux types de matériaux solides notamment le bois. Parmi ces méthodes, figurent les méthodes de résonance et la technique d'ultrasons.

#### 1.1.2.2.2.1 Les méthodes de résonance

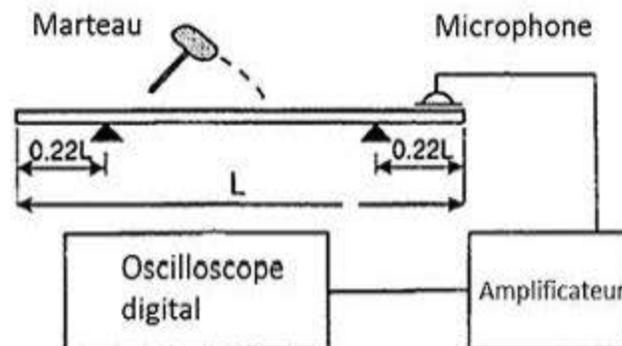
La mesure des vibrations longitudinales dans le bois afin de calculer le module d'Young a été employée vers les années 1970 (Haines et al. 1996). Le principe de cette méthode consiste à taper l'échantillon avec un marteau et recevoir par la suite le signal à travers un microphone sans fil. Les résonances ont été déterminées à partir d'une analyse de fréquence du signal et un micro-ordinateur pour le traitement des données (Sobue 1986).

Les méthodes de résonance sont utilisées pour la mesure du module d'Young permettant la caractérisation du bois utilisé pour la fabrication des instruments de musique. Ces méthodes ont été employées également pour étudier les propriétés mécaniques du contreplaqué, du bois lamellé collé et des matériaux composites époxy-peuplier (Haines et al. 1996). Plus précisément, les deux méthodes de résonance se basent sur l'excitation de l'échantillon par un coup avec un marteau de

vibration. Le poids du marteau doit être suffisamment grand pour fournir assez d'énergie pour exciter les vibrations sans détruire l'échantillon. Dans de nombreuses situations, ces exigences conduisent à un marteau avec un poids semblable à celui de l'échantillon. D'autre part, un microphone est placé à proximité de l'échantillon testé pour recevoir le son rayonné par l'échantillon de bois suite au coup de marteau. Le signal électrique généré dans le microphone est transmis à un oscilloscope de stockage numérique à transformée de Fourier pour traiter les données. Dans une expérience correctement posée, la fréquence de résonance la plus forte affichée sur l'écran de l'oscilloscope est la fréquence de résonance à partir de laquelle le module de Young peut être calculé. Suivant le mode de vibration on distingue deux méthodes de résonance : la résonance en flexion et la résonance longitudinale.

- **La résonance en flexion**

L'essai de résonance en flexion utilise le mode fondamental de vibration d'un faisceau libre-libre (un faisceau sans contrainte). Avec le montage approprié de cette méthode (Figure 1.2), il est facile de saisir la fréquence du mode fondamental de vibration en flexion lorsque le centre de l'échantillon est frappé perpendiculairement à sa longueur du haut vers le bas. L'ensemble du processus ne nécessite pas plus que quelques secondes.



**Figure 1.2 :** Schématisation de l'essai de résonance en flexion (Haines et al. 1996)

La fréquence mesurée permet de calculer le module de Young à partir de l'équation 1.1 (Haines et al. 1996) :

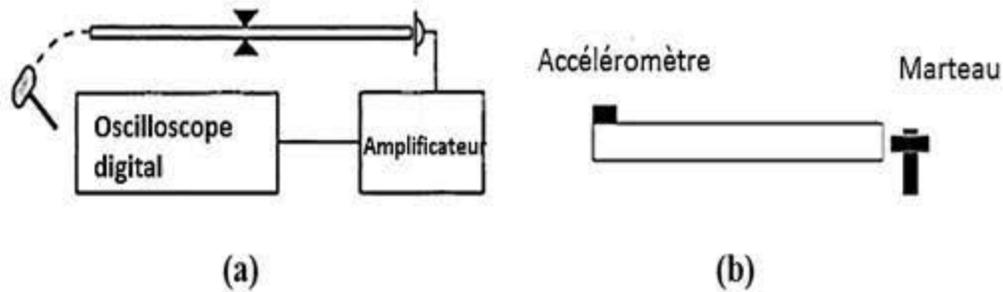
$$E = 0,946 \rho f^2 \frac{L^4}{h^2} \quad (1.1)$$

Avec,  $E$  : le module de Young [Pa] ;  $\rho$  : la masse volumique de l'échantillon de bois [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;  $f$  : la fréquence mesurée [Hz] ;  $L$  est la longueur de l'éprouvette [m] et  $h$  : la hauteur [m] (l'épaisseur verticale de l'éprouvette).

Le procédé de résonance en flexion est un outil utile pour déterminer le module de Young de bois. Avec la disponibilité de l'instrumentation moderne, ce test dynamique peut être effectué rapidement et le module de Young peut être calculé à partir d'une formule simple. De plus, la taille de l'objet standard adopté pour les essais de flexion statique est également idéale pour l'essai de flexion de résonance ce qui permet la comparaison des mesures du module d'élasticité mesurés par les deux méthodes.

- **La résonance longitudinale**

Le mode de vibration longitudinal est produit par l'application du coup de marteau directement de façon parallèle à la longueur de l'échantillon. Ce dernier est maintenu près de son centre. La figure 1.3 montre l'installation d'essai. Lorsqu'elle est correctement exécutée cette action établit la vibration longitudinale de l'échantillon agissant comme une barre. Les vibrations de flexion sont aussi facilement excitées par cette méthode, par conséquent, il est important d'identifier la bonne résonance. Le signal est transmis de la même manière que le test de flexion ainsi la fréquence de résonance est enregistrée. Les vibrations résultantes peuvent être détectées également par un petit accéléromètre qui est monté sur l'échantillon en utilisant une couche de cire. Elles sont par la suite transmises dans l'analyseur de FFT (Fast Fourier Transform) pour mesurer la fréquence de résonance fondamentale de chaque échantillon.



**Figure 1.3** : Schématisation de l'essai de résonance longitudinale  
 (a) (Haines et al. 1996) et (b) (Chiu et al. 2013)

La fréquence mesurée permet de calculer le module de Young à partir de l'équation 1.2 (Chiu et al. 2013):

$$E = \rho V^2 = \rho(2 * f * L)^2 = 4\rho f^2 L^2 \quad (1.2)$$

Avec,  $E$  : le module de Young [Pa],  $f$  : la fréquence de vibration longitudinale [Hz],  $\rho$  : la masse volumique de l'échantillon de bois [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] et  $L$  : la longueur totale de la barre [m].

Le procédé de résonance longitudinale est un outil fiable pour la mesure du module d'élasticité dynamique. Mais la technique pour exciter cette résonance exige de la pratique. Par exemple, l'échantillon doit être frappé directement en ligne avec la longueur de l'éprouvette. Les vibrations de flexion sont aussi facilement excitées par cette méthode, par conséquent, il est important d'identifier la bonne résonance (Haines et al. 1996, Hassan et al. 2013).

#### 1.1.2.2.2 La technique d'ultrasons

- **Principe de la technique d'ultrasons**

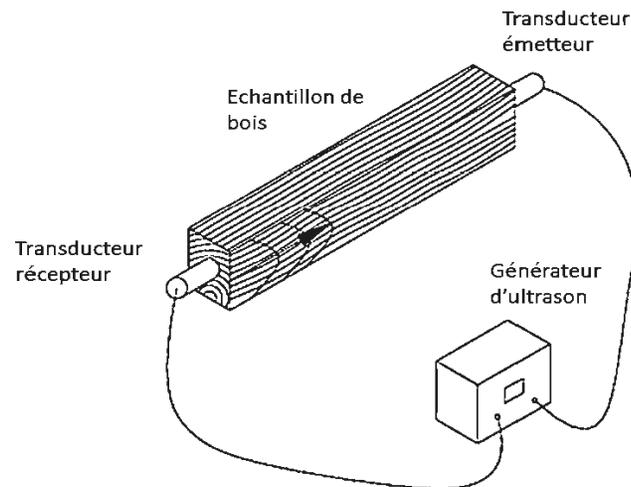
Le contrôle par ultrasons par l'intermédiaire de transmission est la technique la plus utilisée. Il nécessite une paire de transducteurs piézo-électriques, un générateur de signal pour produire le signal d'impulsion d'ultrasons et un dispositif pour mesurer le

temps de transmission de l'impulsion ultrasonore à travers l'échantillon (Chiu et al. 2013). Plus précisément afin d'obtenir une mesure du temps de propagation du son dans l'échantillon de bois, le générateur d'ultrasons émet simultanément une onde carrée, qui est envoyée au circuit de synchronisation et au compteur de fréquence pour activer le signal de démarrage de la mesure de différence de temps. Le transducteur de réception reçoit les impulsions ultrasonores émises et les convertit en impulsions électriques. Ces impulsions sont introduites dans l'oscilloscope et dans le circuit de synchronisation. Finalement, le circuit de synchronisation transmet un signal à basse tension au compteur de fréquence pour activer le signal d'arrêt de la mesure de différence de temps (Yang et Fortin 2001). Les deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrason sont identiques et appliqués d'une façon parallèle (Figure 1.4). Une fois que le temps de propagation du son dans le bois est calculé, le module d'élasticité dynamique ( $E$  en [Pa]) est mesuré par l'équation 1.3 :

$$E = \rho * V^2 \quad (1.3)$$

Avec,  $V$  : la vitesse de l'onde de contrainte définie par :  $V = \frac{d}{T'}$  [m/s]

$\rho$  : la masse volumique de l'échantillon de bois [ $\text{kg/m}^3$ ];  $d$ : l'épaisseur de l'échantillon [m] et  $T'$  : le temps de transmission [s].

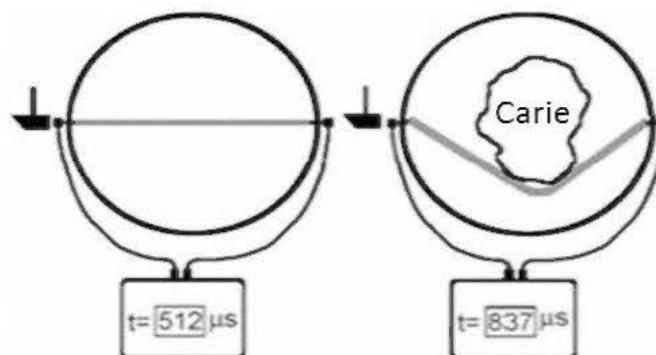


**Figure 1.4 :** Méthode de mesure du temps de propagation du son dans le bois dans la direction parallèle à la fibre (Feio 2005).

- Les champs d'application

Dans l'industrie du bois, la détection par ultrasons a reçu une attention considérable compte tenu de son coût relativement faible. De plus, il s'agit d'une méthode polyvalente et sécuritaire (De Oliveira et al. 2006). La technique d'ultrasons est couramment utilisée à deux niveaux dans la chaîne de production des usines de production du bois. D'une part, il permet le tri des troncs avant de commencer le cycle de production. Cette opération est de grande importance vue qu'elle permet d'éviter de produire du bois qui sera finalement non conforme ou de qualité inférieure. L'industriel est ainsi capable de gagner le temps et les frais de transformation du bois. D'autre part, la technique d'ultrasons présente un outil de contrôle de qualité ou encore de classification du produit fini.

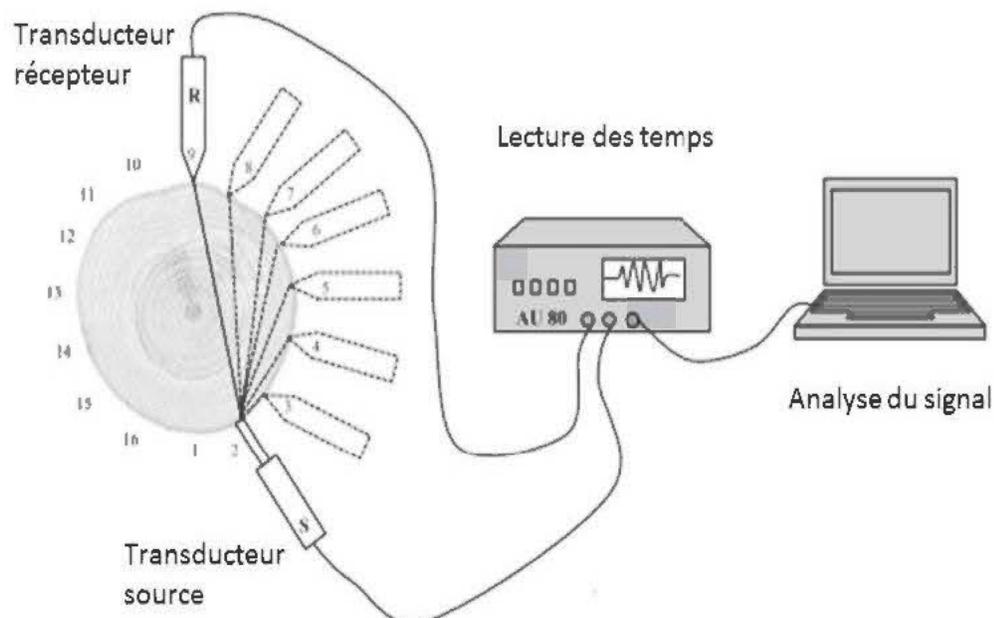
Concrètement, les méthodes acoustiques et la technique d'ultrasons en particulier sont largement utilisées dans le domaine de caractérisation du bois. En effet, l'ultrason présente un outil fiable pour l'évaluation de la qualité de l'arbre à travers l'estimation du module d'élasticité dynamique. Dans le cas du diagnostic mécanique, l'objectif consiste à savoir si l'arbre présente un risque de rupture et à sélectionner les arbres possédant un fort potentiel mécanique (classement mécanique) (Brancheriau 2013). Il permet en plus de détecter la pourriture interne et les défauts dans les arbres urbains (Figure 1.5).



**Figure 1.5** : Principe de la détection de défaut dans les arbres sur pied (Wang et al. 2004)

La technologie à ultrasons sert aussi à classer et inspecter les structures de bois en service par exemple les poteaux de transmission de puissance électrique. Le développement des outils de contrôle offre également la possibilité d'utiliser un outil portatif acoustique pour évaluer les propriétés des arbres sur pied et des troncs d'arbres (Wang et al. 2007). En effet, la tomographie par ultrasons, basée sur la mesure du temps de propagation des impulsions ultrasonores, permet de détecter l'état de dégradation de la section transversale d'un arbre sur pied, en utilisant un appareil portable et un logiciel pour la reconstitution de l'image en 2D et en 3D (Figure 1.6) (Martinis et al. 2004).

La technique d'ultrasons peut être utilisée également pour prédire la résistance et la rigidité des planches de bois de charpente ou encore pour surveiller les changements de la teneur en humidité des grumes fraîchement récoltées. Ces applications expliquent l'importance dédiée au développement de la technique d'ultrason en vue de l'utiliser dans le secteur du bois (Wang et al. 2007, Brashaw et al. 2009).

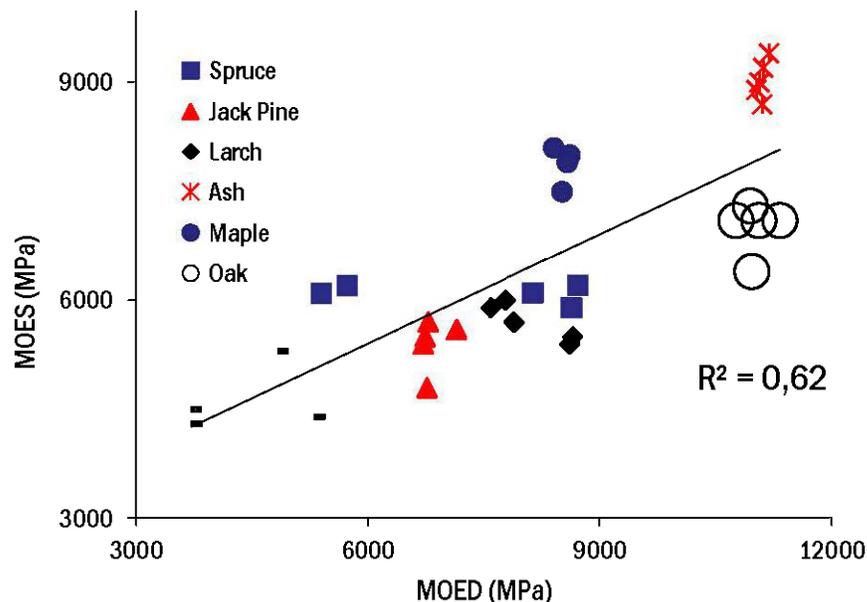


**Figure 1.6 :** Principe de la tomographie ultrasonore (Martinis et al. 2004)

### 1.1.2.2.3 La relation entre le module d'élasticité dynamique MOED et le module d'élasticité statique MOES

Plusieurs études ont examiné la relation entre le module d'élasticité dynamique du bois MOED (déterminé à partir des méthodes de résonance et la technique d'ultrason) et le module d'élasticité statique MOES (mesuré par les essais statiques conventionnelles) (Sales et al. 2011). Les travaux de (Zhenbo et al. 2006) ont montré une corrélation linéaire significative entre le MOES et le MOED du bois. Des résultats similaires pour différentes essences de bois sont trouvés par (Koubaa et al. 2012) (Figure 1.7).

Des coefficients de corrélation allant jusqu'à 0,96 ont été trouvés entre le MOES en flexion et le MOED mesuré par la technique d'ultrason pour le bois de pin sylvestre (Horáček et al. 2012).



**Figure 1.7 :** La relation entre le MOES et le MOED pour différentes essences de bois (Koubaa et al. 2012)

Les résultats des mesures du MOES et du MOED permettent de tirer plusieurs constatations. Les valeurs du MOED obtenues par la technique d'ultrason sont souvent supérieures à celles du MOES mesurées par des essais statiques à des pourcentages allant de 7 à 40 % suivant les essences de bois étudiées. En se basant par exemple sur les résultats de (Haines et al. 1996) (Tableau 1.2), les valeurs du MOED mesurées par la technique d'ultrasons sont nettement supérieures aux valeurs du MOES. De plus, ces mesures sont aussi supérieures à celles obtenues par les deux autres méthodes dynamiques.

La différence entre le module d'élasticité obtenu à partir de l'essai de flexion et celui des méthodes dynamiques est expliquée par plusieurs facteurs. Elle peut être due aux hautes fréquences de la méthode ultrasonique qui sont les plus élevées. En effet, la vitesse de l'onde ultrasonore est proportionnelle à la fréquence. Ainsi, le module d'élasticité, qui est à son tour proportionnel au carré de la vitesse, augmente suite à l'augmentation de la fréquence (Sales et al. 2011). D'autre part, le comportement viscoélastique et la haute aptitude du matériau bois à absorber les chocs expliquent les valeurs supérieures du MOED en comparaison avec le MOES.

**Tableau 1.2 :** Les mesures du MOES et du MOED de l'épicéa et du sapin, adapté de (Haines et al. 1996)

	Module d'élasticité (MPa)			
	Flexion statique	Résonance en flexion	Résonance longitudinal	Technique d'ultrason
Épicéa	10600	10600	11300	12400
Sapin	12500	12700	14000	15400

Une autre approche se base sur les caractéristiques de vibration du bois dans laquelle la force élastique restaurée est proportionnelle au déplacement, contrairement à la force dissipative qui est proportionnelle à la vitesse. Par conséquent, lorsqu'on

applique une force sur le matériau bois pour une courte durée, le bois présente un comportement élastique solide. Par contre, une fois que l'application de la force demeure pour une durée relativement longue, le comportement du matériau bois devient similaire à celui d'un liquide visqueux. Ce comportement peut être mis davantage en évidence dans le test de flexion statique (de longue durée) que dans le test par la technique d'ultrasons. Ainsi, le module d'élasticité déterminé selon la méthode à ultrasons est supérieur au module obtenu lors de l'essai de flexion statique (Chiu et al. 2013).

Les résultats obtenus confirment que les valeurs du module d'élasticité dynamique déterminées à partir des méthodes de résonance (résonance en flexion ou résonance longitudinale) sont plus proches du module d'élasticité statique que celle mesurées par la technique d'ultrasons. En effet, le coefficient de corrélation entre le MOES et le MOED lors des essais de résonance est supérieur au coefficient de corrélation entre le MOES et le MOED mesuré par la technique d'ultrasons. Le MOED déterminé par l'essai de résonance en flexion présente généralement le coefficient de corrélation le plus élevé (Sales et al. 2011). La différence entre les modules d'élasticité statique et dynamique est réduite en tenant compte de l'effet de la déviation en cisaillement pour le test de flexion statique (Hassan et al. 2013). Les résultats du tableau 1.3 montrent bien que le module d'élasticité en flexion sans l'effet de déviation en cisaillement (MOET) calculé à partir de l'équation (1.4) est bien supérieur au MOES déterminé par un essai de flexion conventionnel.

$$\mathbf{MOET = MOES(1 + \alpha)} \quad (1.4)$$

Avec, MOET : Le module d'élasticité en flexion sans l'effet de déviation en cisaillement [MPa]; MOES : le module d'élasticité en flexion [MPa]; et  $\alpha$  : la déviation déterminée par l'équation (1.5) :

$$\alpha = \frac{6}{5} \left( \frac{\mathbf{MOES}}{\mathbf{G}} \right) \left( \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{L}} \right)^2 \quad (1.5)$$

Avec,  $G$ : le module de cisaillement [MPa];  $h$ : la hauteur de l'échantillon [m] (profondeur) et  $L$ : la distance entre les appuis lors de l'essai de flexion [m].

**Tableau 1.3** : Les valeurs moyennes du MOES, MOET et le MOED en (N.mm<sup>2</sup>) (Hassan et al. 2013)

Paramètres	MOES	MOET	MOED
Moyenne	9015	9885	11805
Coefficient de variation (%)	14,3	14,1	15,4
Minimum	6007	6510	8518
Maximum	13100	14162	15783

L'augmentation des valeurs du module d'élasticité statique MOET par rapport au MOES en tenant compte de la déviation en cisaillement, explique la réduction de la différence entre les modules d'élasticité statique et dynamique.

Par ailleurs, le module à la rupture MOR est une propriété importante du bois. En effet, le MOR en essai de flexion est égal à la contrainte maximale de la fibre à l'instant de la rupture. Il nous renseigne sur la charge mesurée à la rupture de l'éprouvette. De ce fait, les chercheurs se sont intéressés à développer le lien entre le MOR et le MOED mesuré par les différentes méthodes dynamiques. Des corrélations importantes qui varient généralement entre 0,60 et 0,90 ont été rapportées. L'essai de résonance en flexion permet d'obtenir les meilleures corrélations entre le MOR et le MOED. D'autre part, la technique d'ultrason fournit les valeurs de MOR les plus élevées comparativement aux autres méthodes dynamiques (Hassan et al. 2013).

#### 1.1.2.2.4 Conclusion

Les essais statiques classiques pour déterminer les constantes élastiques des matériaux à base de bois sont très difficiles et complexes par rapport aux essais dynamiques. En effet, les essais statiques présentent plusieurs inconvénients :

- Ils nécessitent un équipement de test fixe et un temps d'essai relativement long.
- Ils ont besoin des instruments coûteux et complexes.
- Il est nécessaire de définir la taille et l'orientation de chaque échantillon pour chaque propriété élastique à déterminer ce qui limite fortement le nombre de panneau a testé (Najafi et al. 2005).

Il y a donc un grand besoin de procédures d'essais mieux adaptées pour déterminer les constantes élastiques, en particulier les méthodes dynamiques non destructives.

La technique aux ultrasons est un outil de contrôle non destructif qui permet de mesurer le module d'élasticité dynamique du matériau bois. Cette technique est très utilisée dans les industries de transformation du bois. Cependant, plusieurs recherches visent à l'améliorer afin d'augmenter son efficacité. En effet, la mesure du MOED par la technique d'ultrason manque de précision suite aux sources de variations de la masse volumique et de la vitesse de propagation du son en relation avec les propriétés du matériau bois.

## *1.2 Les sources de variation du module d'élasticité dynamique du bois*

Le MOED du bois est déterminé à partir de sa masse volumique  $D$  et de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans l'échantillon  $V$ . Ces deux paramètres sont à l'origine de la variation du MOED. En effet, la structure complexe du matériau bois et la variation importante de cette structure expliquent ces variations (Feio 2005).

### *1.2.1 Généralités sur le bois*

Le bois est un matériau bio polymérique ayant une structure complexe caractérisée par une disposition micro-structurale extrêmement élaborée. C'est une concordance de cellules disposées en plan ligneux au sein de l'arbre qui assurent la conduction de la sève brute de la racine vers les branches. Etant donné son origine biologique, les

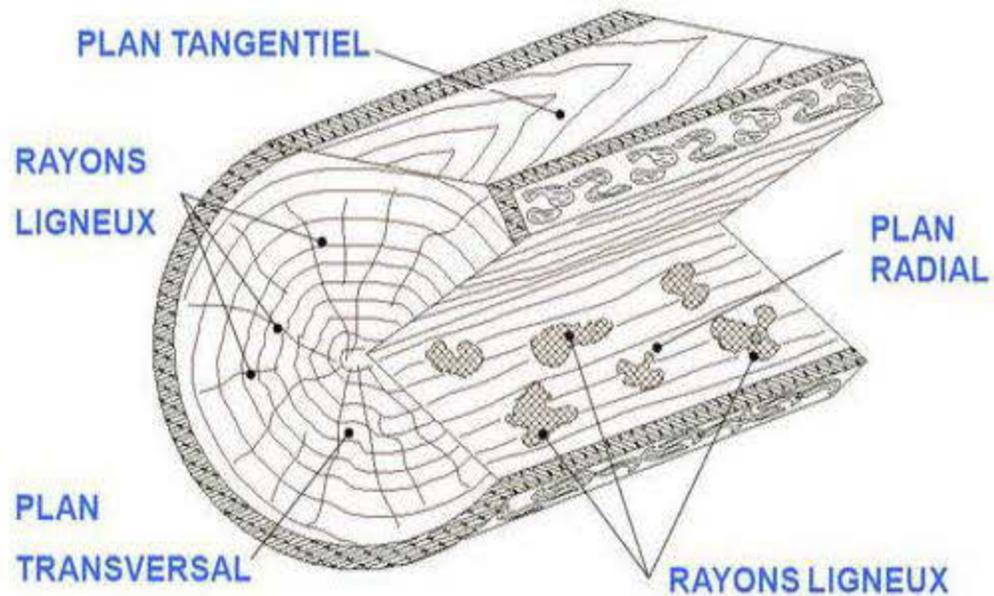
propriétés du matériau bois varient entre les espèces, dans une même espèce et à l'intérieur d'un même arbre (Polge 1964).

#### *1.2.1.1 Matériau hygroscopique*

Le bois est un matériau qui adsorbe et désorbe de l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure. Il contient de l'eau sous deux formes. Lorsque la teneur en humidité est maximale, il y a présence d'eau liée qui est absorbée à l'intérieur des parois cellulaires. Il y a aussi de l'eau liquide contenue dans les vides à l'intérieur des cellules. Quand le bois sèche, c'est l'eau liquide à l'intérieur des cavités cellulaires qui s'évapore en premier, jusqu'à l'obtention de la teneur en humidité correspondant au point de saturation des fibres. Ce dernier se situe à une teneur en humidité d'environ 30 % pour la plupart des essences de bois. Au-delà de cette teneur en humidité, il ne se produit plus de changements dimensionnels (gonflement) (Haygreen et al. 2005).

#### *1.2.1.2 Matériau orthotrope*

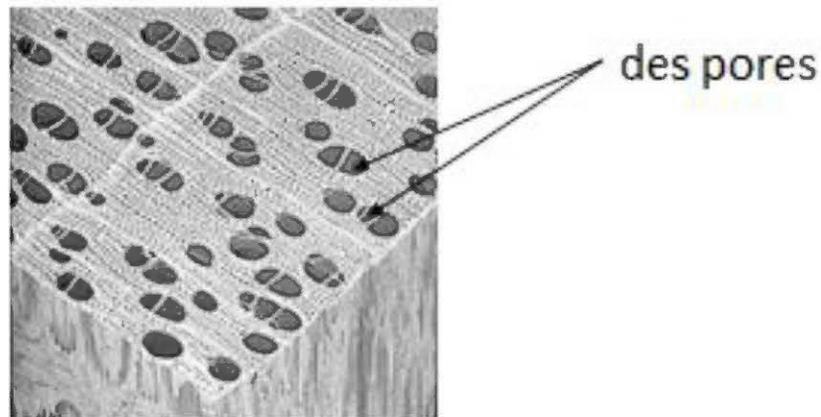
Le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés varient selon la direction considérée. Il existe trois plans principaux du bois, appelés plans ligneux (Figure 1.8). Ces plans se définissent par trois directions principales : la direction longitudinale (L) désigne la direction parallèle à l'axe de l'arbre passant par son centre, la direction radiale (R) indique une direction normale aux cernes et la direction tangentielle (T) identifie une direction perpendiculaire aux rayons ligneux et tangente aux cernes (Kretschmann 2010).



**Figure 1.8 :** Différents plans ligneux d'un tronc d'arbre (adapté de Dubus 2014)

### 1.2.1.3 Matériau poreux

Par sa structure anatomique, le bois est un matériau poreux. En général, les pores sont considérés comme étant des espaces vides se trouvant à l'intérieur du bois. Ces pores sont représentés par les lumens, les espaces intercellulaires et l'ensemble des plus petites cavités à l'intérieur des parois cellulaires. Les principaux aspects quantitatifs d'un matériau sont la surface spécifique de la matrice solide, l'espace poreux effectif et la distribution des tailles des pores. La figure 1.9 présente une observation de la microstructure du bois sur laquelle on peut remarquer la présence des pores.



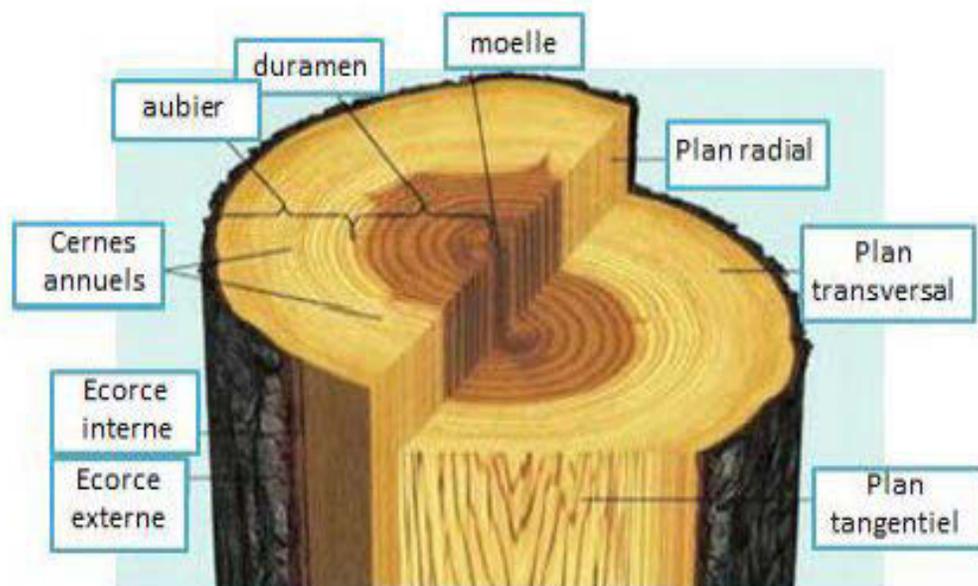
**Figure 1.9** : Structure du bois (Cailliez et al. 2002)

#### 1.2.1.4 Anatomie et structure

La croissance de l'arbre se réalise de manière concentrique, de l'extérieur vers l'intérieur. Elle est assurée par le cambium qui est constitué d'une fine couche de cellules embryonnaires, située sous la couche de l'écorce. Une coupe transversale d'un tronc d'arbre (Figure 1.10) permet de distinguer ses différents composants de l'extérieur vers l'intérieur :

- L'écorce : formée d'une part de l'écorce externe (cellules mortes), une enveloppe protectrice, étanche et imperméable et d'autre part de l'écorce interne (cellules vivantes ou liber).
- Le cambium : il donne naissance chaque année à des cellules concentriques qui forment un cerne annuel. Il fournit d'une part des cellules vivantes vers l'extérieur (le liber) et d'autre part des cellules vivantes vers l'intérieur qui donneront d'abord du bois de sève (l'aubier) puis après vieillissement un bois stable (le duramen).

- L'aubier : est situé entre le cambium et le duramen (Fig 1.10). Il contient des cellules encore vivantes qui assurent la conduction de la sève brute et l'entreposage des substances nutritives (Miller 1999).
- Le bois de cœur ou le duramen : est constitué de cellules mortes lignifiées qui ne participent pas à la croissance de l'arbre. Il joue uniquement le rôle de soutien mécanique. Le duramen est riche en extractibles, ce qui lui confère une durabilité naturelle du bois (Miller 1999).
- La moelle : c'est le tissu végétal un peu mou au centre du tronc. Il se forme au début de la croissance de l'arbre et ne se modifie pas.

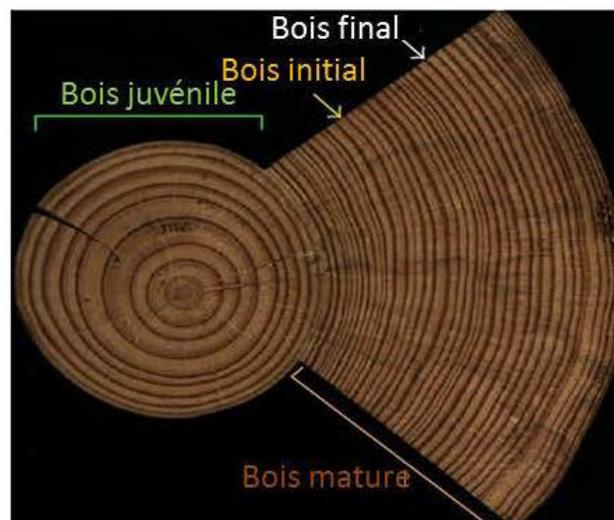


**Figure 1.10** : Anatomie d'un tronc d'arbre (adapté de Everett et al. 2007)

Une autre distinction très importante pour le bois (suivant sa structure) est celle du bois juvénile et du bois mature. Le terme bois juvénile décrit le bois pendant les premières années du fonctionnement du cambium de chaque unité de croissance. Le bois juvénile est donc le bois le plus ancien de chaque unité de croissance. Il est formé pendant les premières années de croissance de la tige. Il est situé à proximité de la moelle (les 5 à 20 premiers cernes sont juvéniles). Comparativement au bois

mature, il est caractérisé par une densité plus faible, des parois cellulaires plus minces, une proportion du bois final plus faible et un angle de microfibrille et un gonflement longitudinal assez élevés. Il en résulte que ses propriétés mécaniques sont plus faibles que le bois mature (Wiedenhoeft 2010).

Au niveau des cernes de croissance on peut également différencier le bois initial et le bois final (Figure 1.11). En effet, le bois initial est le bois produit au début de la saison de croissance caractérisé par un diamètre de cellule plus grand, une paroi cellulaire mince et un lumen large. Appelé également bois de printemps, il est généralement plus pâle et moins dense. Le bois final (appelé bois d'été) est plus dense car la paroi cellulaire est épaisse et le lumen est étroit. Il est produit en fin de saison de croissance. La transition bois initial / bois final peut être abrupte ou graduelle (Panshin et de Zeeuw 1980). Une coupe transversale (Figure 1.11) nous permet de différencier le bois juvénile du bois mature et d'identifier le bois initial et le bois final. La distinction du bois initial – bois final est plus facile chez les conifères que chez les feuillus et chez le bois des climats tempérés par rapport aux bois des climats tropicaux.



**Figure 1.11** : Coupe transversale d'un tronc d'arbre (Carvalho et al. 2013)

### 1.2.2 *Les sources de variations du module d'élasticité dynamique en relation avec les propriétés du bois*

Le bois est une substance de nature variable en raison de son origine en tant que matière naturelle. En conséquence, ses propriétés présentent de grandes variations induites par la physiologie de l'arbre et des facteurs externes qui influent sur sa croissance (Zobel et al. 1989). Le module d'élasticité dynamique, comme indicateur de la rigidité du bois, est calculé à partir de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore (V) à travers l'échantillon du bois et la masse volumique (D). Ainsi, la variation du MOED résulte de la variation de ces deux paramètres.

#### 1.2.2.1 *La masse volumique*

La masse volumique du bois est largement étudiée comme un élément déterminant de la qualité du bois (Zhang et al. 1994, Koubaa et al. 2002). Elle est une caractéristique très variable du matériau bois. Elle varie d'une essence à une autre, en fonction de la hauteur dans l'arbre, de la moelle vers l'écorce, selon les conditions de croissance, selon la teneur en humidité du bois et selon le type de bois (juvénile, mature, normal, réaction) (Panshin et al. 1980, Rozenberg et al. 2001).

La mesure de la masse volumique du matériau bois dépend initialement de l'effet d'échelle, ce qui entraîne une grande variabilité lors de la mesure de cette propriété. À l'échelle d'une bille, la masse volumique mesurée est égale à une moyenne comprenant celle du bois juvénile, du bois mature et des nœuds. À une échelle plus petite, pour les planches et les éprouvettes d'essai par exemple, la valeur mesurée est une moyenne de la masse volumique de plusieurs cernes. À l'échelle d'un cerne, la valeur mesurée correspond à la masse volumique moyenne du bois initial et du bois final. Finalement, seulement la masse volumique de la paroi cellulaire (matière lignocellulosique) est constante. Elle est égale à environ 1,50 chez les résineux (Alteyrac 2005).

De nos jours, les chercheurs et les industriels profitent du développement des outils et des techniques de mesure de la masse volumique, qui permettent de mesurer avec précision les variations de cette propriété, pour mieux étudier le comportement du matériau bois. En effet, les profils de variations intracernes de la masse volumique du bois fournissent des informations supplémentaires sur la formation des cernes annuels ainsi que les changements au niveau du processus physiologique au cours de la saison de croissance du bois (Koubaa et al. 2002).

#### *1.2.2.2 La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore*

Le module d'élasticité dynamique est proportionnel au carré de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans l'échantillon du bois. La vitesse, mesurée en m/s est calculé suivant l'équation (1.6) :

$$V = d/T' \quad (1.6)$$

Avec :  $d$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur d'ultrasons (l'épaisseur de l'échantillon du bois) [m] et  $T'$  est le temps corrigé de la propagation de l'onde ultrasonore [s].

L'onde sonore est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager.

Les ondes sonores dont la fréquence varie entre 20kHz et 1GHz sont nommées les ondes ultrasonores (Beall 1987). Les mesures du temps de propagation de l'onde ultrasonore varient remarquablement en relation avec les propriétés du matériau bois (Feio 2005).

#### *1.2.2.2.1 Effet de l'anisotropie du bois*

Pour caractériser la propagation de l'onde ultrasonore dans le matériau bois, on a recours à deux mesures. En premier lieu, la vitesse de propagation de l'onde

ultrasonore qui est directement liée au temps de propagation de l'onde ultrasonore (Équation 1.6) et en deuxième lieu l'impédance acoustique qui caractérise la résistance du matériau bois au passage de l'onde ultrasonore (Équation 1.7).

$$\mathbf{Z} = \pm \rho \times \mathbf{V} \quad (1.7)$$

Avec  $Z$  : l'impédance acoustique [ $\text{N.s.m}^{-3}$ ];  $\rho$  : la masse volumique [ $\text{kg/m}^3$ ]  
et  $V$  : la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore [ $\text{m/s}$ ].

Les propriétés acoustiques du matériau bois (vitesse de propagation et impédance acoustique) varient suivant l'orientation des fibres. Ainsi, ces propriétés varient dans la direction parallèle aux fibres (direction longitudinale); dans la direction perpendiculaire aux cernes (direction radiale) ou dans la direction tangente aux cernes annuels de croissance (direction tangentielle). En effet, la vitesse de l'onde ultrasonore pour le bois est environ trois fois plus rapide dans la direction longitudinale que dans la direction tangentielle ou radiale (Feio 2005). La valeur de l'impédance acoustique dans la direction longitudinale est beaucoup plus importante que dans la direction tangentielle ou radiale (Tableau 1.4).

#### *1.2.2.2.2 Effet de l'orientation des cernes*

Des recherches récentes ont traité l'effet de l'angle d'orientation des cernes sur le temps de propagation de l'onde ultrasonore. En effet, le temps de propagation du son mesuré avec des échantillons du bois de Douglas sans caries à 12% d'humidité pour une orientation de  $45^\circ$  est bien supérieur aux mesures du temps de propagation dans les directions radiale et tangentielle (Tableau 1.5).

**Tableau 1.4 :** Ordre de grandeurs des propriétés acoustiques du matériau bois (adapté de Brancheriau 2013)

Direction	Vitesse de propagation	Impédance acoustique
	[m/s]	[N. s. m <sup>-3</sup> ]
Longitudinale	5000	2,5 .10 <sup>6</sup>
Tangentielle	1400	0,7 .10 <sup>6</sup>
Radiale	1100	0,6 .10 <sup>6</sup>

**Tableau 1.5 :** Variations des mesures du temps de propagation pour le bois de sapin Douglas sans caries à 12% d'humidité adapté de (Ross 2015)

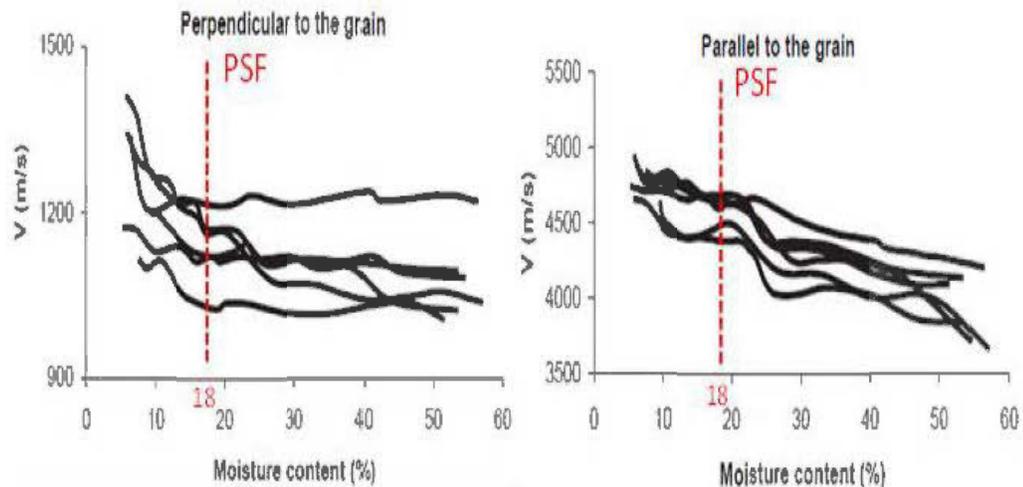
Distance (mm)	Temps de propagation de l'onde ultrasonore (µs)		
	Sens Radial	Sens Tangentiel	Orientation de 45°
64	43	51	64
140	94	112	139
292	195	234	290
394	264	315	392
495	331	396	492

#### 1.2.2.2.3 Effet de la teneur en humidité

Plusieurs chercheurs ont montré que la vitesse des ondes acoustiques diminue avec la teneur en humidité jusqu'au point de saturation des fibres (PSF). Pour des teneurs en humidité supérieures au PSF, la vitesse de propagation est constante dans la direction longitudinale (Beall 2002, Baltrušaitis et al. 2010).

Des études sur des essences de bois feuillus du Brésil dans les deux directions parallèle et perpendiculaire aux fibres confirment que la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité. La partie

constante des courbes après le PSF est plus évidente dans le sens tangential que dans le sens longitudinal (De Oliveira et al. 2005) (Figure 1.12).

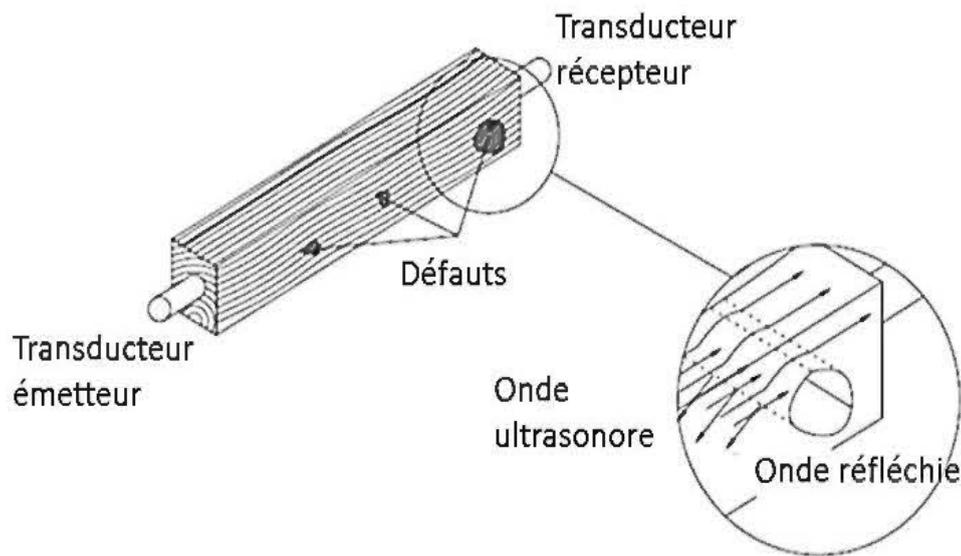


**Figure 1.12** : Variations de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore en fonction de la teneur en humidité (De Oliveira et al. 2005)

#### 1.2.2.2.4 Effet des défauts dans le bois

La vitesse de propagation dans le bois pourri est plus lente en raison de ses propriétés anatomiques (Feio 2005). En effet, la présence d'un défaut dans le bois provoque une déviation du signal ultrasonore ce qui explique l'augmentation du temps de propagation (Figure 1.13).

Les défauts, tout comme l'hétérogénéité et l'anisotropie du matériau bois, présentent une source de variation du temps de propagation de l'onde ultrasonore. Plusieurs études confirment qu'il est possible d'établir une corrélation entre l'efficacité de la propagation des ondes ultrasonores et les propriétés physiques et mécaniques du bois. Les vitesses élevées de propagation sont associées à une plus grande résistance à la rupture et à l'absence des défauts.



**Figure 1.13** : Effets des défauts sur la propagation de l'onde ultrasonore (Feio 2005).

#### *1.2.2.2.5 Effet de la géométrie*

La géométrie a un effet considérable dans le cas des matériaux à base de bois. En effet, la configuration physique de la matière à base de bois joue un rôle important dans la propagation des ondes ultrasonores. Pour les matériaux composites stratifiés, tels que de nombreux matériaux composites à base de bois, chaque interface de couche provoque des réflexions et des réfractions qui modifient le mode de propagation de l'onde ultrasonore. Un effet similaire se produit au niveau des couches adhésives dans des matériaux tels que le contreplaqué, les panneaux de placages stratifiés (LVL), etc. (Beall 2002).

#### *1.2.2.3 La relation entre la masse volumique et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore*

Les résultats des études qui examinent la relation entre la masse volumique et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore diffèrent suivant les essences de bois

étudiées. Des études réalisées au Brésil pour plusieurs essences de bois (feuillus et résineux) dans le but d'analyser l'influence de la masse volumique sur la vitesse d'une onde ultrasonore se propageant dans la direction longitudinale, indiquent que la vitesse des ondes ultrasonores augmente légèrement avec l'augmentation de la masse volumique du bois qui varie entre 900 à 1300 kg/m<sup>3</sup>. Les coefficients de corrélation étaient significatifs et variaient de 0,80 à 0,88 (De Oliveira et al. 2006).

D'autre part, une relation significative a été trouvée entre la masse volumique (qui varie entre 200 et 900 kg/m<sup>3</sup>) et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore (qui varie entre 2500 et 5800 m/s) pour plusieurs essences de bois. En général, les petites valeurs de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans la direction longitudinale correspondent à des masses volumiques élevées (Bucur 1995). Mishiro (1996) a étudié également la relation entre la masse volumique et la vitesse de propagation pour plusieurs essences de bois (feuillus et résineux). Il a remarqué que la vitesse dans la direction longitudinale est généralement indépendante de la masse volumique du bois.

## CHAPITRE 2

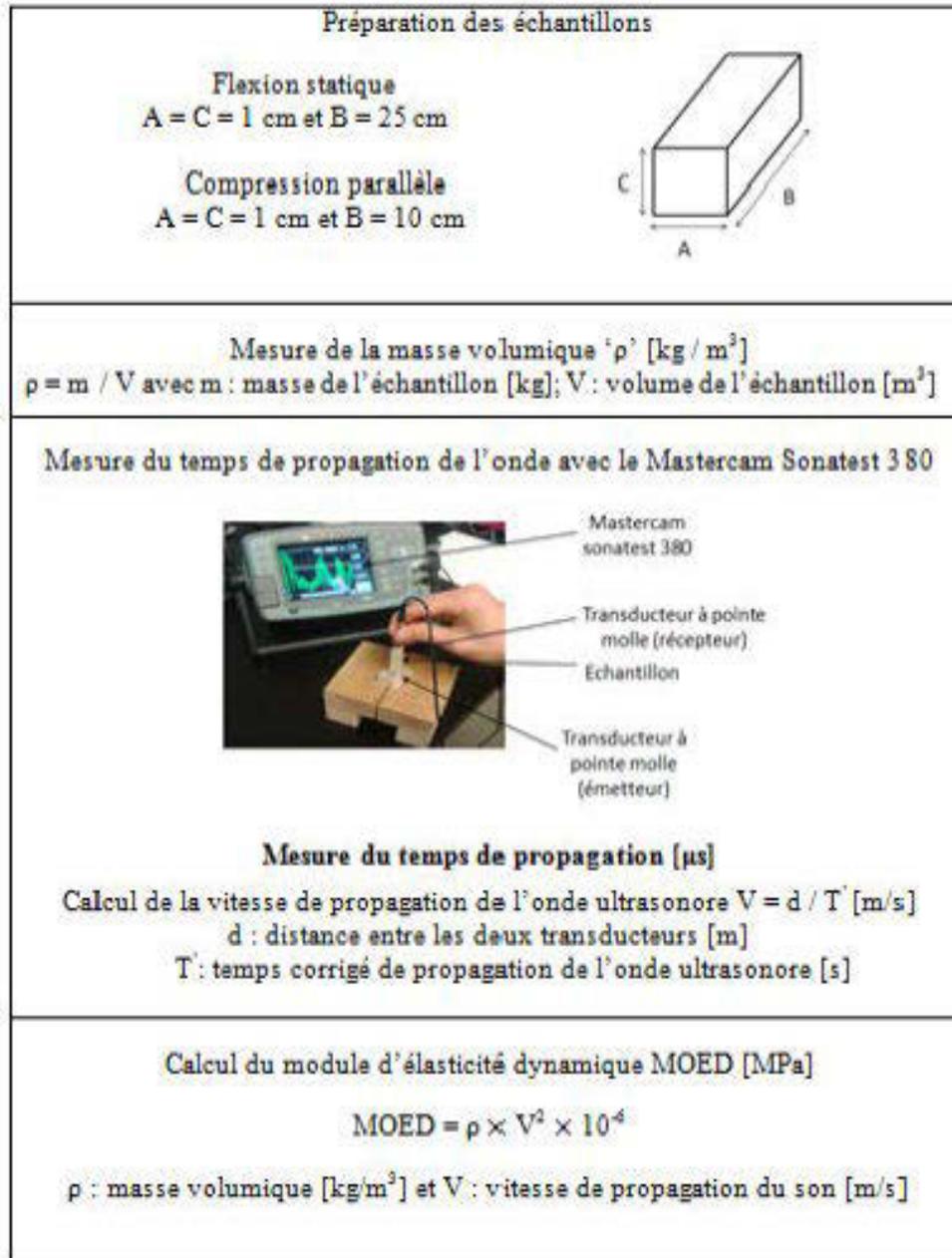
### DISCUSSION DES SOLUTIONS PROPOSÉES

#### *2.1 Problématique et objectifs*

Pour mesurer le module d'élasticité dynamique du matériau bois avec la technique d'ultrasons la démarche suivie se base sur quatre étapes (Figure 2.1) (Koubaa et al. 2012). La valeur obtenue du module d'élasticité dynamique nous donne une idée sur la rigidité de l'échantillon de bois. Dans cette mesure, la masse volumique ainsi que la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore sont considérées constantes à travers tout l'échantillon. Par contre, si on tient compte des variations de ces deux paramètres pour le matériau bois, cette mesure manque de précision. Dans ce contexte, l'objectif général de notre projet est de parvenir à mesurer avec précision le MOED permettant l'étude des variations intracernes de cette propriété.

En se basant sur l'équation  $MOED = \rho \times V^2$ , notre travail d'optimisation portera sur les mesures de la masse volumique ( $\rho$ ) et de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore ( $V$ ). Le densitomètre à rayon X nous permet de mesurer avec précision la variation de la masse volumique du bois à des résolutions qui pourront aller jusqu'à 0,01 mm. On aura donc la variation radiale de la masse volumique. L'optimisation de la mesure de la vitesse de propagation du son sera le but de notre projet. Plus précisément on cherche à mettre en place un dispositif qui assure la mesure du temps de propagation du son dans le bois avec une résolution similaire à celle du densitomètre à rayon X. Finalement, la superposition des deux courbes permettra la

détermination des profils des variations intra cernes du MOED du matériau bois à travers un échantillonnage précis et une technique de contrôle non destructif.

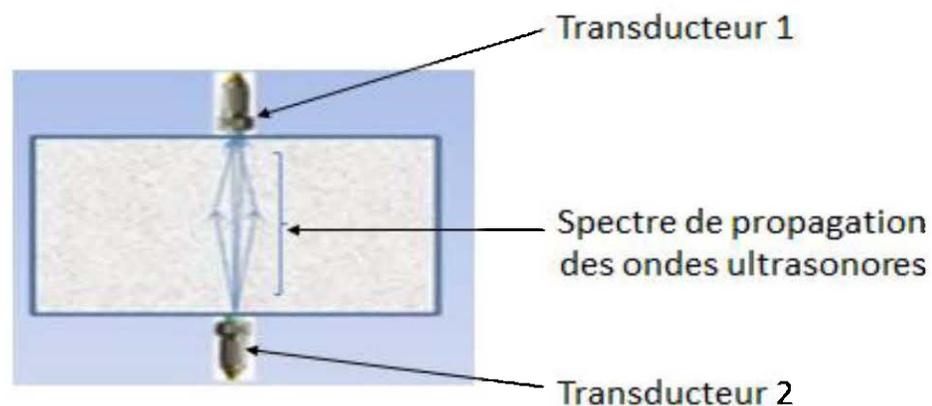


**Figure 2.1** : Les étapes de mesure du module d'élasticité dynamique

## 2.2 Choix des solutions technologiques

Les ultrasons sont des ondes mécaniques sinusoïdales qui se propagent dans la même direction que la vibration (Beall 1987). Pour cette raison, les deux transducteurs : l'émetteur et le récepteur devraient être appliqués d'une façon parallèle comme l'indique la figure 2.2.

Ainsi, deux solutions sont possibles : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux ou bien déplacer l'échantillon et fixer les deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrasons.

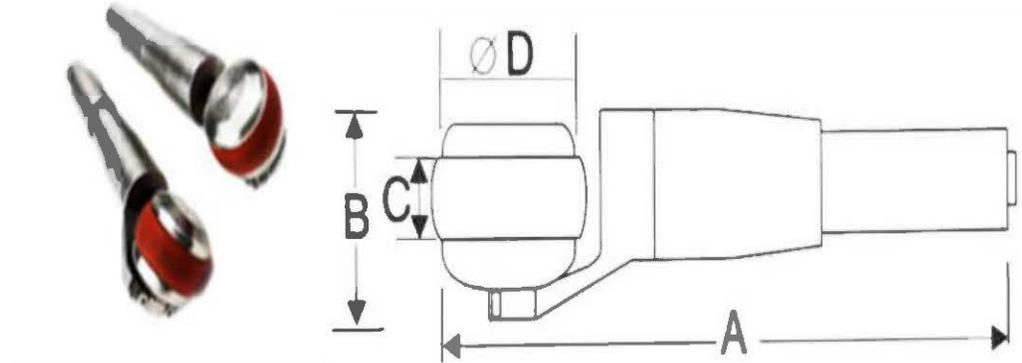


**Figure 2.2 :** Propagation des ondes ultrasonores

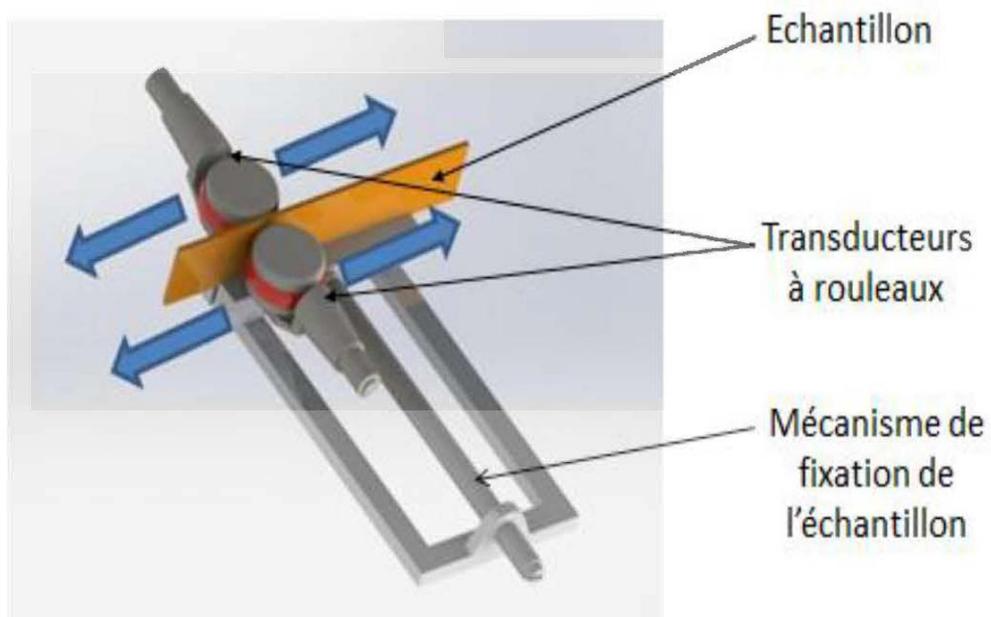
### 2.2.1 Solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux

#### 2.2.1.1 Introduction et principe

Les transducteurs à rouleaux (Figure 2.3) sont utilisés dans les tests automatisés ou lorsque des zones vastes nécessitent l'application des techniques de balayage à main (par exemple dans le cas du contrôle de cordon de soudure). Dans ce cas les deux transducteurs balayent toute la longueur de l'échantillon qui est déjà fixé sur un étau (Figure 2.3).



**Figure 2.3 :** Les transducteurs à rouleaux



**Figure 2.4 :** Principe de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux

*2.2.1.2 Bilan de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux*

Le tableau 2.1 résume les avantages et les inconvénients de la solution N°1.

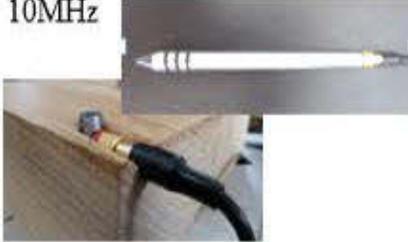
**Tableau 2.1** : Le Bilan de la solution N°1 : fixer l'échantillon à contrôler et utiliser deux transducteurs à rouleaux

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesurer avec précision le temps de propagation du son dans le bois et par la suite la vitesse de l'onde de contrainte.</li> <li>• Le caoutchouc est renouvelable ce qui prolonge la durée de vie de ce type de transducteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les transducteurs à rouleaux sont classés comme des produits spéciaux fabriqués sur commande pour cela ils sont très coûteux.</li> <li>• La surface de contact de ces transducteurs est très sensible pour cela un état de surface plus mince de l'échantillon est envisagé ce qui n'est pas toujours possible avec des échantillons avec des épaisseurs de quelques millimètres.</li> <li>• L'opérateur intervient dans la réalisation du test et l'acquisition des données.</li> </ul>

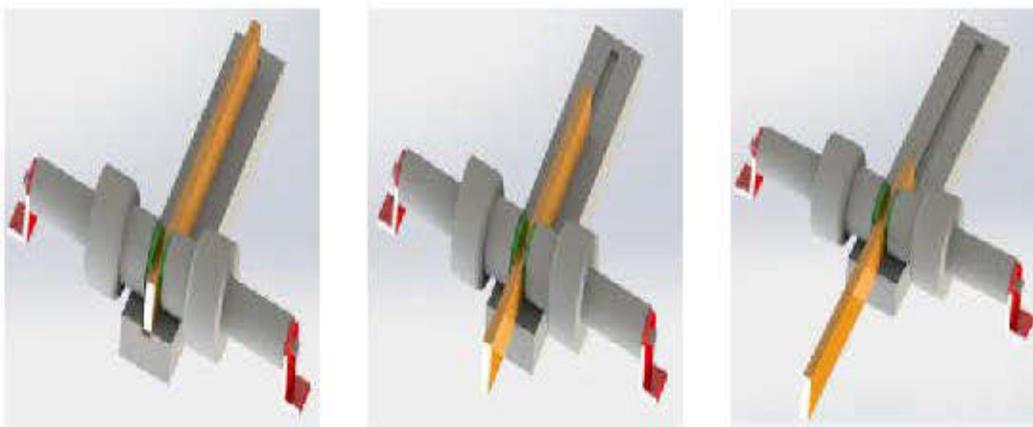
## 2.2.2 Solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs

### 2.2.2.1 Introduction et principe

On dispose de deux types de transducteurs que l'on pourrait utiliser pour cette solution. Les transducteurs à pointe molle ('Soft Tip Transducers') et une paire de transducteurs de 10 MHz composée d'un transducteur émetteur pointu et d'un transducteur récepteur rond (Figure 2.5). Pour élaborer cette solution, il faudrait appliquer les deux transducteurs après chaque déplacement de 0,04 mm de l'échantillon (Figure 2.6).

<p>Les transducteurs à pointe molle</p> 	<p>Ils sont parfaitement adaptés pour tester des échantillons de géométrie complexe et pour étudier les zones endommagées.</p>
<p>Une paire de transducteurs de 10MHz</p> 	<p>Ils permettent de mesurer avec plus de précision le temps de propagation grâce au transducteur émetteur pointu.</p>

**Figure 2.5 :** Les types de transducteurs utilisés dans la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs



**Figure 2.6 :** Principe de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs

### 2.2.2.2 Bilan de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs

Le tableau 2.2 résume les avantages et les inconvénients de la solution N°2.

**Tableau 2.2 :** Le Bilan de la solution N°2 : déplacer l'échantillon à contrôler et fixer les deux transducteurs

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un coût plus faible.</li> <li>• On connaît les particularités de chaque type de transducteurs.</li> <li>• Automatiser toute l'opération.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trouver des solutions technologiques pour fixer les transducteurs et éliminer les sources de variations des mesures.</li> <li>• L'application des transducteurs à pointe molle est très délicate. Elle dépend à la fois de l'état de la pointe (principalement le degré d'usure) et de l'effort appliqué par l'utilisateur.</li> </ul>

### 2.2.3 Comparaison des deux solutions et conclusion

La solution N°1 basée sur l'utilisation des transducteurs à rouleaux est plus facile à élaborer mais l'état de surface envisagée de l'échantillon de bois limite son domaine d'utilisation. En plus son coût élevé présente aussi une contrainte sachant qu'il est relativement difficile d'automatiser l'opération. D'autre part, la deuxième solution, étant moins chère, est favorisée malgré qu'elle nécessite la mise en place d'un mécanisme de déplacement de l'échantillon de bois et d'un dispositif de fixation des deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrasons.

Il en résulte que le choix de la solution N°2 : déplacer l'échantillon de bois à contrôler et fixer les deux transducteurs est le plus adéquat des points de vue technologique et financier.

### 2.3 *Etude de la solution N°2 : déplacer l'échantillon et fixer les deux transducteurs*

#### 2.3.1 *Introduction*

Le choix de cette solution exige la mise en place en premier lieu d'un mécanisme pour déplacer l'échantillon à contrôler sachant que les dimensions peuvent varier en longueur, largeur et épaisseur. En deuxième lieu, le choix et la conception du mécanisme de fixation des transducteurs dépendraient des essais préliminaires effectués par les deux types de transducteurs.

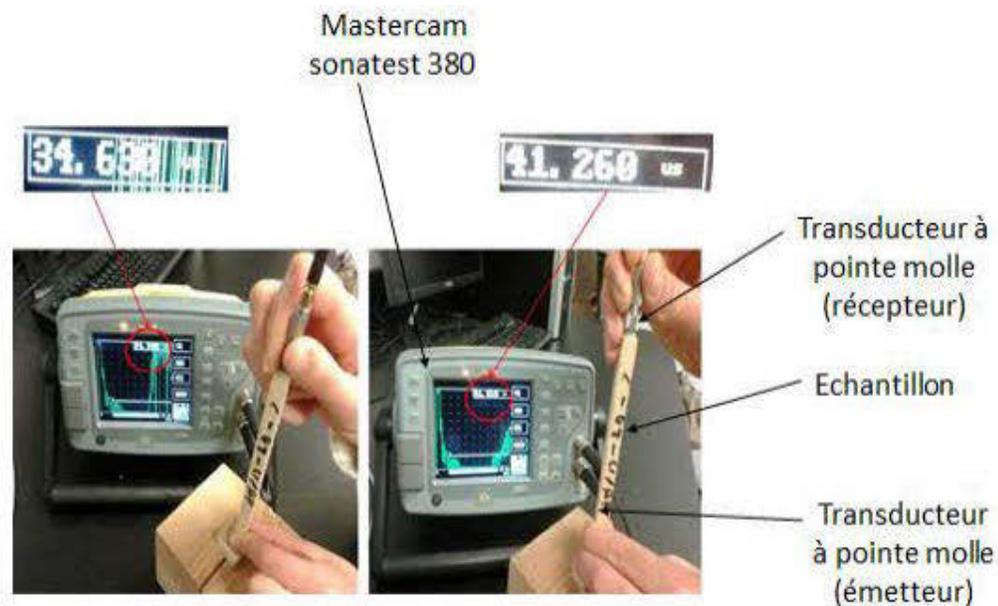
Ainsi, dans cette étude nous tenons dans un premier temps à présenter les contraintes observées lors des essais préliminaires avec les deux types de transducteurs pour justifier le choix du type du transducteur. Nous détaillons par la suite les solutions technologiques pour fixer les transducteurs choisis.

#### 2.3.2 *Les essais préliminaires*

Pour définir correctement le cahier de charge de notre projet, les essais préliminaires sont obligatoires. Le choix du type de transducteur se base sur les résultats des essais effectués. Dans notre dispositif, nous cherchons à déplacer un échantillon de quelques grammes, de dimensions maximales : 140 mm de longueur, 20 mm de largeur et quelques millimètres d'épaisseur avec une précision considérable, une faible vitesse de déplacement et une course entre 100 et 200 mm. Les interprétations tirées des essais ont permis d'identifier deux sources d'imprécision lors des mesures du temps de propagation de l'onde ultrasonore.

En premier lieu, l'intervention de l'opérateur lors de la mesure du temps de propagation affecte les résultats. En effet, la pression appliquée par l'opérateur varie d'un utilisateur à un autre d'où la différence observée au niveau des mesures réalisées sur le même échantillon et par conséquent la répétabilité des résultats est quasiment impossible (Figure 2.7). Cette source d'imprécision a été observée lors de l'utilisation des deux types de transducteurs.

En deuxième lieu, après un certain nombre de mesures on a observé une usure remarquable au niveau de la pointe molle des transducteurs. Par contre, pour le même nombre d'essais la paire de transducteurs de 10MHz de fréquence n'a présenté aucun indicateur d'usure. Ce facteur est d'importance capitale sachant qu'on effectuera moyennement entre 1500 et 2500 mesures pour chaque échantillon.



**Figure 2.7 :** Les variations des mesures du temps de propagation pour le même échantillon de bois

Les essais préliminaires nous ont permis de choisir la paire de transducteur de 10 MHz de fréquence d'une part pour sa bonne résistance à l'usure et d'autre part pour la précision offerte par le transducteur émetteur pointu.

### 2.3.3 La solution technologique proposée

L'étude de la technique d'ultrason ainsi que les essais préliminaires nous ont permis de définir la séquence que nous devons programmer pour mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonore avec une résolution de 0,04 mm. La séquence

consiste à une avance du porte échantillon de 0,04 mm suivi d'un temps d'arrêt de quelques secondes (déterminé par un essai expérimental). Ce temps d'arrêt est le temps nécessaire pour appliquer les transducteurs et mesurer le temps de propagation. La même séquence est par la suite répétée afin de balayer toute la longueur de l'échantillon (de la moelle à l'écorce).

Notre premier objectif est de concevoir un banc de déplacement de l'échantillon. Nous utilisons les échantillons de bois dont la longueur varie entre 80 et 100 mm, la largeur entre 15 et 20 mm et l'épaisseur entre 1,5 et 2 mm (figure 2.8).

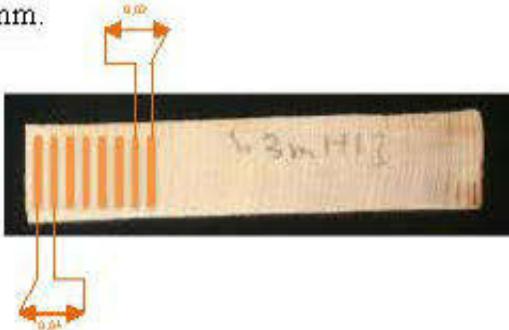


**Figure 2.8 :** Échantillon d'épinette noire

En effet, nous cherchons en réalité à déplacer tout un bloc qui joue le rôle d'un porte échantillon. Par la suite, le déplacement souhaité de l'échantillon résulte du déplacement du porte échantillon. Nous devons noter également que nos échantillons devraient être fixés suivant la direction horizontale. Les sources d'imprécision observées lors des essais préliminaires ont permis de définir la démarche à suivre pour mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonore. Cette démarche comporte quatre étapes (Tableau 2.3).

La phase de conception et de dimensionnement du porte échantillon dépendrait du choix du mécanisme de déplacement. Ainsi, nous présentons en premier lieu les spécifications et les critères de choix du mécanisme de déplacement du porte échantillon et nous détaillerons par la suite la phase de conception du porte échantillon. Nous clôturons la partie de conception par la phase de choix et de mise en place des deux actionneurs électriques qui assurent l'application des deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrason. Les phases d'assemblage et d'automatisation seront également détaillées.

**Tableau 2. 3 :** Les étapes de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore

Étapes	Description	Solutions proposées
1	Fixer l'échantillon de bois.	L'échantillon devrait être fixé horizontalement dans un porte échantillon → Usiner un étau de fixation.
2	Appliquer les deux transducteurs.	Les deux transducteurs devraient être appliqués avec la même pression → Utiliser deux actionneurs électriques linéaires.
3	Déplacer la porte échantillon avec une résolution de 0,04 mm.	Assurer un pas de déplacement de 0,04 mm similaire à la résolution offerte par le densitomètre à rayon X.
4	Les étapes 2 et 3 sont répétées pour balayer toute la longueur de l'échantillon avec une résolution de 0,04 mm.	<p>La variation radiale du temps de propagation de l'onde ultrasonore (de la moelle à l'écorce) est obtenue avec une résolution de 0,04 mm.</p>  <p>La résolution demandée lors de la mesure du temps de propagation (0,04 mm)</p>

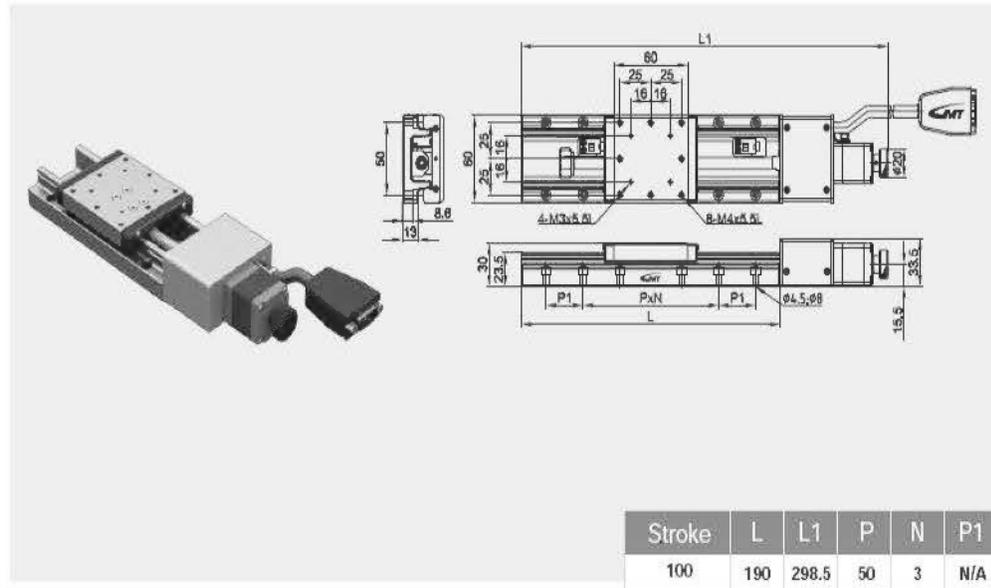
### 2.3.3.1 *Choix du mécanisme de déplacement du porte échantillon*

Un déplacement automatique suivant une seule direction est généralement garanti par un actuateur électrique linéaire. Cependant, dans notre cas, le choix de l'actuateur qui présentera également le mécanisme de déplacement du porte échantillon est fait en tenant compte de trois facteurs principaux :

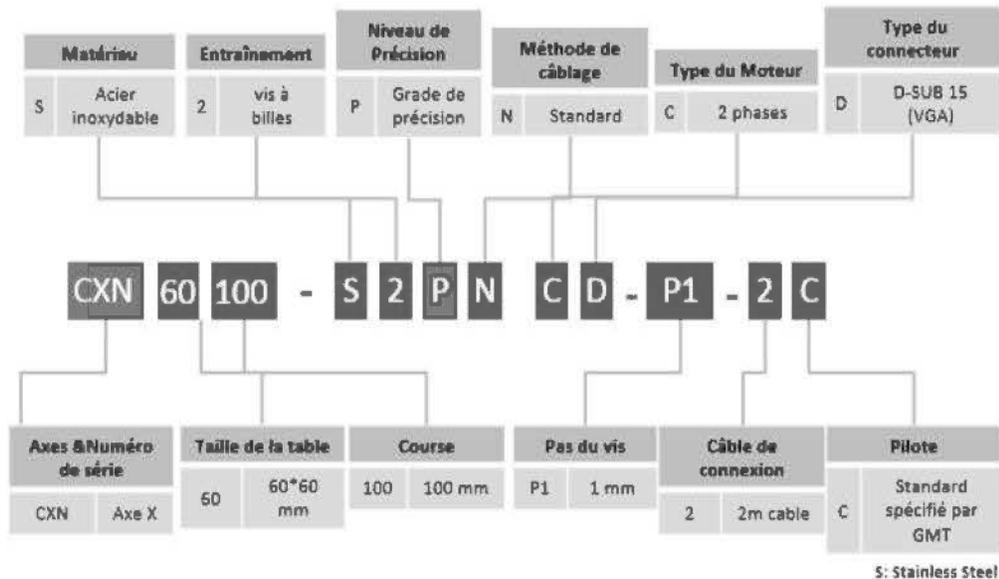
- La haute précision demandée pour assurer des petits déplacements du porte échantillon de 0,04 mm.
- La conception et les spécifications de la table de déplacement de l'actuateur électrique linéaire (la charge supportée, les dimensions et la facilité de fixation du porte échantillon).
- La possibilité de programmation du déplacement de la table de l'actuateur avec un automate pour assurer l'automatisation totale de l'opération de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore.

Le choix jugé le plus approprié en tenant compte du rapport qualité prix était l'actuateur électrique linéaire 'CXN 60 100 - S 2 P N - C D - P1' de GMT GLOBAL INC (Figure 2.9).

Il s'agit d'un actuateur électrique linéaire en acier inoxydable équipé d'un petit moteur électrique de deux phases avec un système de vis à billes. Le tableau 2.4 résume les spécifications mécaniques, électriques et de précision de l'actuateur choisi.



**Figure 2.9 :** Actuateur linéaire CXN-60-100 (Precision Motorized Positioning Stage, GMT GLOBAL INC (2014))



**Figure 2.10 :** Caractéristiques de l’actuateur CXN-60-100 (adapté de ‘Precision Motorized Positioning Stage’, GMT GLOBAL INC (2014))

**Tableau 2.4** : Spécifications mécaniques, de précision et électriques de l'actuateur CXN-60-100 (adapté de 'Precision Motorized Positioning Stage', GMT GLOBAL INC (2014))

Numéro de l'actuateur		CXN60100-S2PN-CD-P1	
Spécifications Mécaniques	Dimensions de la table	60x60 mm	
	Course de déplacement	100 mm	
	Type d'entraînement	Vis à billes	
	Matériau	Acier inoxydable	
	Poids	1.61 kg	
Spécifications de précision	Résolution	2 $\mu\text{m}$	
	Vitesse maximale	20 mm/s	
	Précision de positionnement	10 $\mu\text{m}$	
	Précision de répétabilité	$\pm 0.5 \mu\text{m}$	
	Capacité de chargement	Jusqu'à 14 kg	
	Parallélisme	20 $\mu\text{m}$	
	Linéarité dynamique	4 $\mu\text{m}$	
Parallélisme dynamique	10 $\mu\text{m}$		
Spécifications électriques	Moteur	Type 2 phases	
		Model Sanyo SH 5281-7211	
	Connecteur	Coté actuateur	Connecteur D-SUB 15 broches male
		Coté contrôleur	Connecteur D-SUB 15 broches femelle
	Capteur	Capteur du point de départ	Capteur Photoélectrique EE-SX4134
		Capteur de limite	
	Tension d'alimentation	24V $\pm$ 10%	

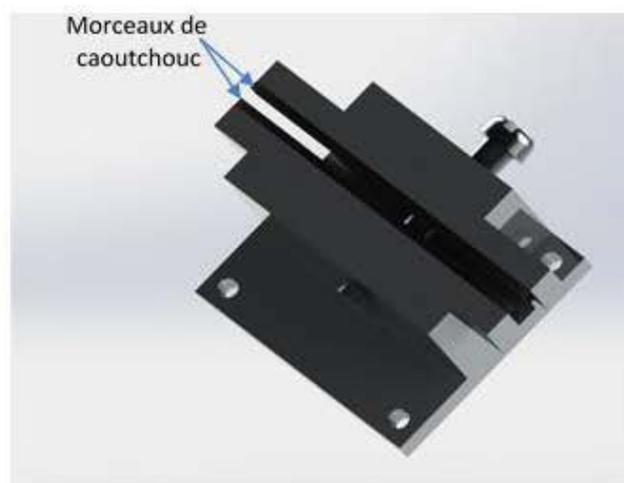
### 2.3.3.2 Conception du porte échantillon

Le porte échantillon devrait garantir la fixation des échantillons de bois avec une longueur maximale de 100 mm, une largeur maximale de 40 mm et une épaisseur de quelques millimètres. La solution technologique la plus facile à élaborer et la plus efficace consiste à usiner un étai de fixation.

Dans la phase de conception de l'étai de fixation deux facteurs entrent en jeu :

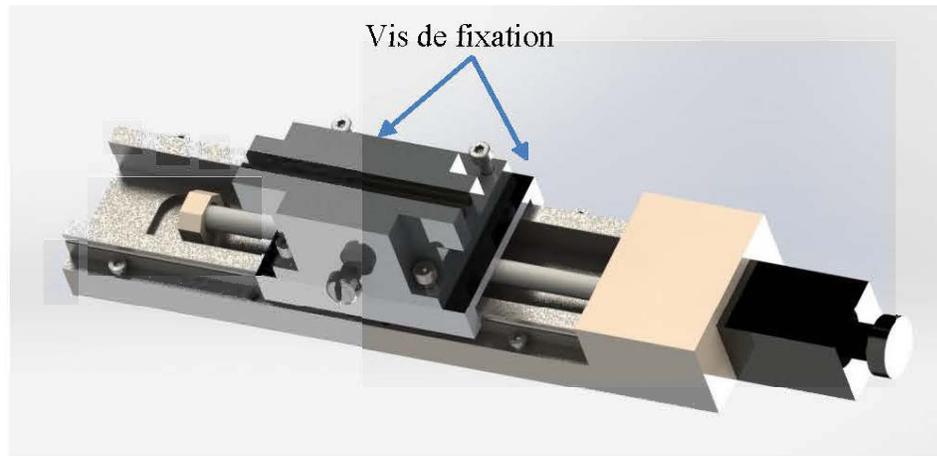
- Les dimensions de l'étai dépendraient des dimensions et des trous de fixations de la table de l'actuateur électrique linéaire.
- Le poids de l'étai ne devrait pas dépasser la capacité de chargement de la table de l'actuateur électrique linéaire.

En se référant au dessin de définition de l'actuateur électrique linéaire (Figure 2.9), la base de notre étai est de dimensions 60x60 mm et nous devons respecter le positionnement des trous de fixation. D'autre part, nous utilisons l'aluminium pour usiner notre étai. Ce choix permet de respecter la capacité de chargement de la table de l'actuateur électrique linéaire (voir spécifications mécaniques au Tableau 2.4) avec un coût raisonnable pour l'achat et l'usinage de l'aluminium.



**Figure 2.11** : L'étai de fixation de l'échantillon de bois

Les deux morceaux de caoutchouc (Figure 2.11) permettent de bien fixer les échantillons en bois de faibles épaisseurs sans endommager leur état de surface. L'ouverture des mors de l'étau usiné peut atteindre 20 mm. La fixation de l'étau sur la table de l'actuateur linéaire est réalisée par quatre vis à 6 pans creux (Figure 2.12).



**Figure 2.12** : Fixation de l'étau sur la table de l'actuateur linéaire

### 2.3.3.3 *Choix et mise en place des deux actionneurs électriques*

Nous cherchons à fixer chaque transducteur parallèlement à l'axe d'un actionneur dans le but de garantir l'application de la même pression durant la mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore. Afin de parvenir à automatiser notre application, nous visons à programmer la séquence suivante : la sortie de l'axe de l'actuateur permet d'appliquer les deux transducteurs d'ultrason puis un arrêt de quelques secondes est obligatoire pour prendre la mesure. Finalement, le mouvement de recul des axes des deux actionneurs est suivi par l'avance de l'échantillon de bois. Cette séquence se répète après chaque avance de 0,04 mm de notre échantillon.

Le choix des deux actionneurs électriques est basé sur trois facteurs :

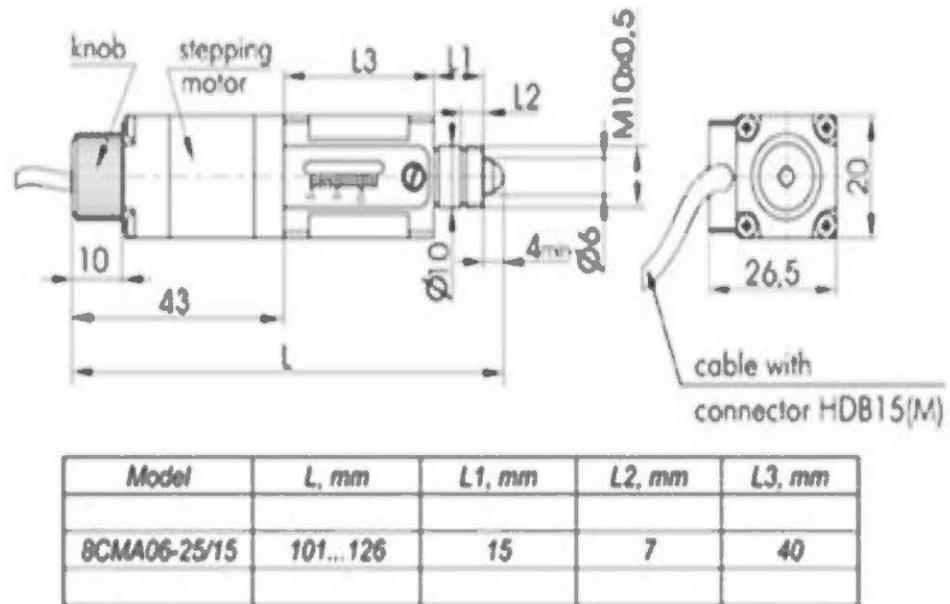
- La course de l'axe de l'actionneur. Nous cherchons une course minimale pour diminuer le temps de sortie et de recul de l'axe.

- La charge supportée par l'axe de l'actionneur sachant que nous aurons besoin d'usiner un support de maintien pour chaque type de transducteur. L'axe de l'actionneur doit supporter le poids de l'ensemble 'support-transducteur'.
- Les actionneurs électriques devraient être également programmables par un automate pour assurer l'automatisation de l'opération de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore.

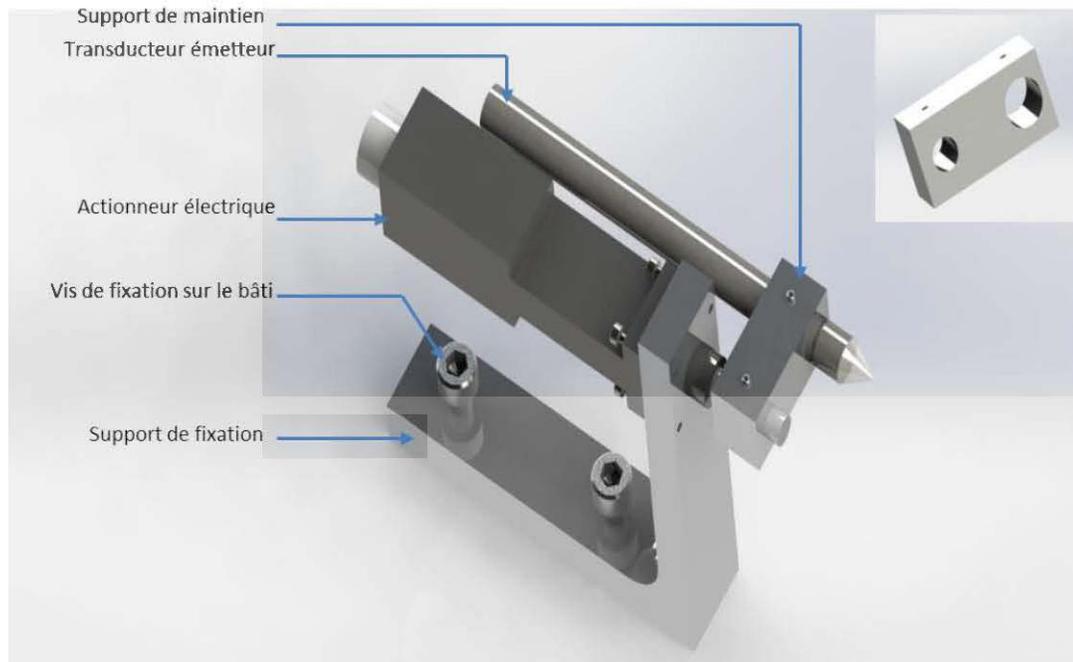
Nous avons choisi deux actionneurs électriques avec la plus petite course disponible sous le marché (25 mm) (Figure 2.13). Chaque actionneur est équipé d'un moteur pas à pas permettant les mouvements d'avance et de recul de son axe avec précision. Les dimensions et les spécifications des actionneurs sont présentées dans la figure 2.14. L'étape suivante consiste à usiner les supports de maintien pour chaque transducteur. Les deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrason ne sont pas identiques. De ce fait, la conception de chaque support de maintien dépend des particularités de chaque transducteur. Par contre, les deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrason devraient être parfaitement parallèles pour permettre la propagation de l'onde ultrasonore. De ce fait, les supports de fixation de l'ensemble « actionneur-transducteur-support de maintien » devraient être identiques (Figures 2.15 et 2.16).



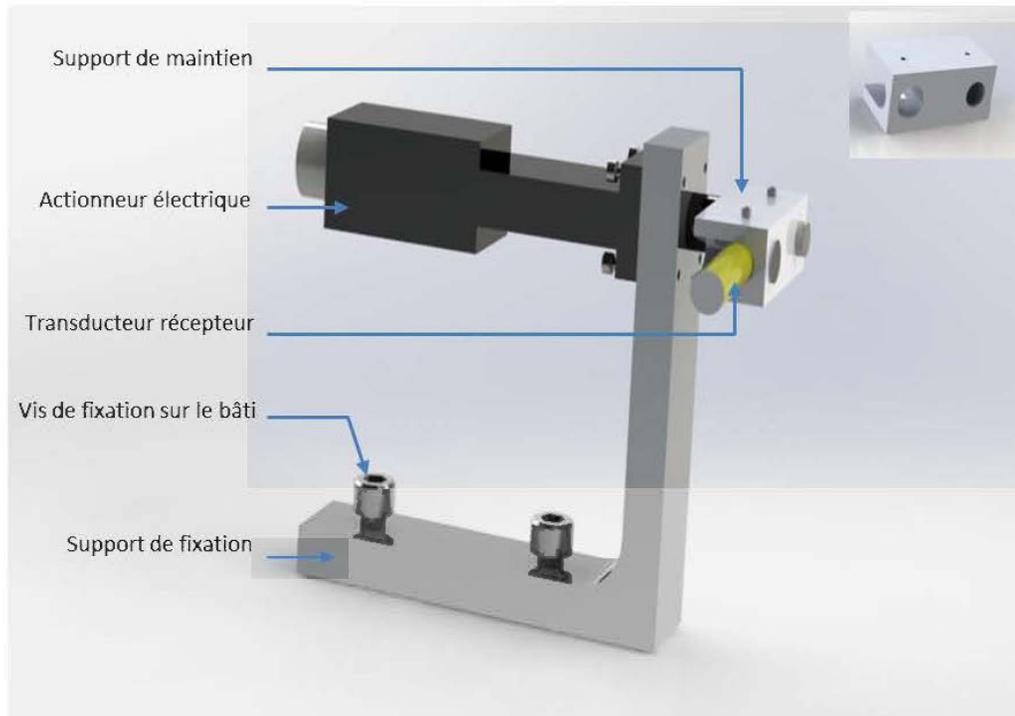
**Figure 2.13** : L'actionneur électrique 8CMA06



**Figure 2.14 :** Dimensions et spécifications de l'actionneur électrique



**Figure 2.15 :** Support de fixation de l'ensemble 'actionneur-transducteur émetteur-support de maintien'



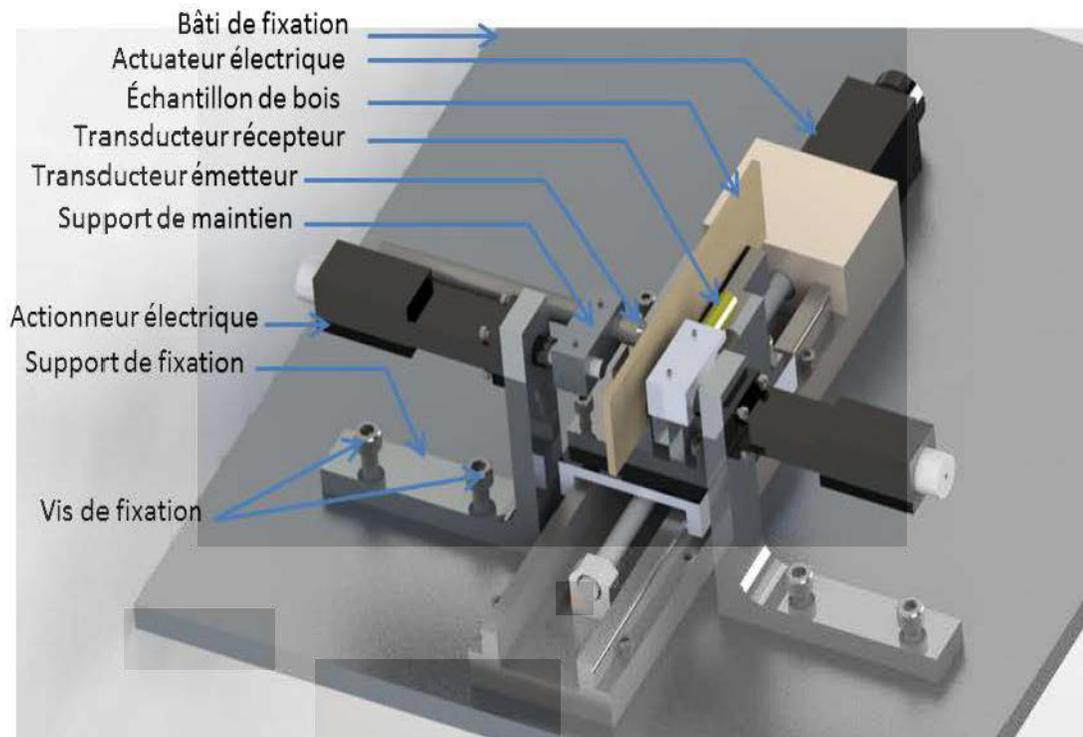
**Figure 2.16** : Support de fixation de l'ensemble 'actionneur-transducteur récepteur-support de maintien'

Les supports de maintien pour chaque transducteur ainsi que les deux supports de fixations sont usinés en aluminium. Le dimensionnement des deux supports de fixation est réalisé en tenant compte de la position finale de l'échantillon de bois fixé dans l'étau.

#### *2.3.3.4 Assemblage des composants du dispositif de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore*

L'étape d'assemblage des différentes pièces est cruciale pour garantir la fiabilité du dispositif. Le bâti est une plaque en aluminium de 10 mm d'épaisseur. L'assemblage a été réalisé en tenant compte de deux facteurs :

- La stabilité des différents composants : Nous avons choisi de fixer l'actuateur et les deux actionneurs en utilisant des vis de fixation. Ce choix garantit la planéité de la surface du bâti après l'assemblage.
- Le parallélisme des deux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrason.



**Figure 2.17** : Dispositif de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore

### 2.3.3.5 Automatisation de l'opération de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore

La phase d'automatisation de l'opération de mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore permet d'éliminer les sources d'imprécisions au niveau de la mesure de ce paramètre. En effet, l'intervention de l'utilisateur pour déplacer l'échantillon ou appliquer les deux transducteurs présente une source d'imprécision

des mesures du temps de propagation. De ce fait, l'automatisation de ces étapes garantit l'élimination des variations des mesures.

Le choix des différents composants de notre dispositif a été réalisé en tenant compte de la phase d'automatisation. Un contrôleur à plusieurs axes permettra de programmer les déplacements de l'actuateur électrique et des deux actionneurs. Les caractéristiques du contrôleur choisis seront détaillés par la suite.

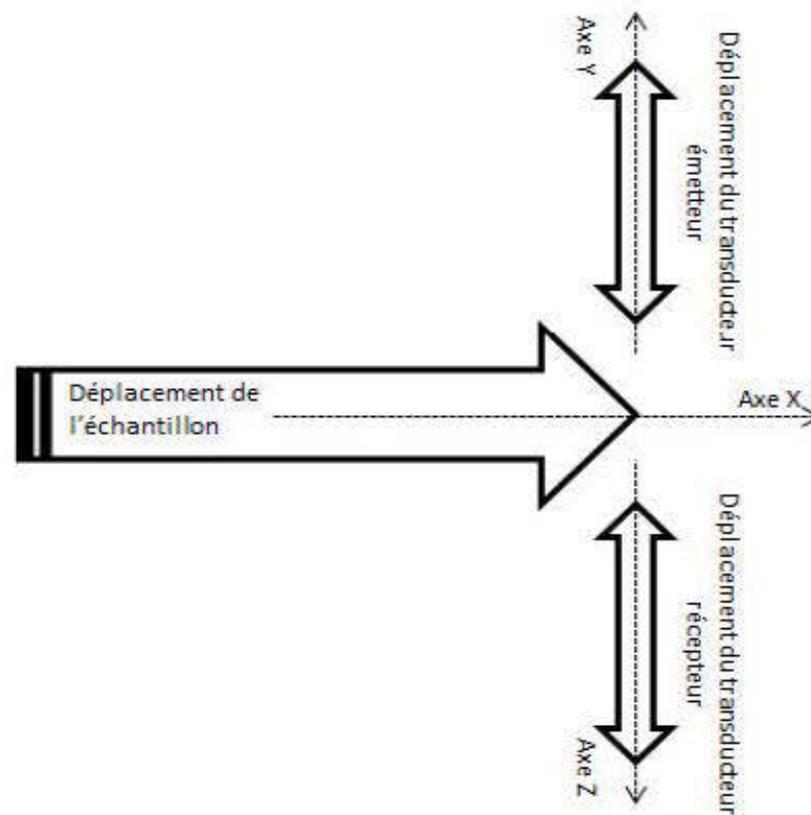
#### 2.3.3.5.1 Le contrôleur 'TANGO Desktop'

Le contrôleur 'TANGO Desktop' (Figure 2.18) est un dispositif d'entraînement des moteurs pas à pas à deux phases. Il peut être actionné soit en mode de fonctionnement "fonctionnement automatique" à l'aide d'un ordinateur externe ou en mode "fonctionnement manuel" au moyen d'une manette de contrôle. Il peut contrôler un maximum de quatre moteurs (contrôleur à quatre axes). Deux capteurs de fin de course sont disponibles par axe, destiné à la limitation de la course de déplacement. En outre, plusieurs entrées/sorties numériques et analogiques sont disponibles ainsi qu'une interface de capteur pour connecter différents types de codeurs.



**Figure 2.18** : Le contrôleur 'TANGO Desktop'

Nous avons choisi le contrôleur 'TANGO Desktop' à trois axes (X, Y et Z) pour programmer les séquences de déplacement générées par le moteur de l'actuateur électrique et les deux moteurs des deux actionneurs. Chaque axe est responsable du déplacement généré par un des trois moteurs. L'axe X présente l'axe de déplacement de l'actuateur électrique. Ainsi, le déplacement de l'échantillon se fait suivant la direction de l'axe X. Les axes Y et Z présentent les axes des déplacements des deux actionneurs reliés aux transducteurs émetteur et récepteur d'ultrasons. Afin de distinguer les deux axes, nous attribuons l'axe Y pour le déplacement du transducteur émetteur et l'axe Z pour le déplacement du transducteur récepteur. Le tableau 2.5 résume les caractéristiques et les spécifications du contrôleur choisi.



**Figure 2.19** : Schéma simplifié des axes des déplacements des différents composants

**Tableau 2.5** : Les spécifications du contrôleur ‘TANGO Desktop’ [37-38-39]

Le contrôleur ‘TANGO Desktop’		
	Nombre d’axes	1 à 3
<b>Spécifications et conditions</b>	Type de moteur programmable	Moteur pas à pas deux phases
	Température de fonctionnement	De +5 à +45 °C
	Refroidissement	Refroidissement par convection
	Dimensions (longueur×largeur×hauteur)	238×103.5×160 mm
	Poids	2,5 kg
	Communication	RS-232 et USB 2.0
		Modes de positionnement
<b>Positionnement</b>	Gamme de vitesse	De 0,000001 à 70 révolutions/s
	Accélération	De 0,0001 à 20 m <sup>2</sup> /s
	La vitesse de traitement	Jusqu’à 250 vecteurs /s

#### 2.3.3.5.2 Programmation

En tenant compte des axes attribués à chaque déplacement, nous pouvons définir la séquence de commande à programmer pour automatiser l’opération de mesure du temps de propagation de l’onde ultrasonore.

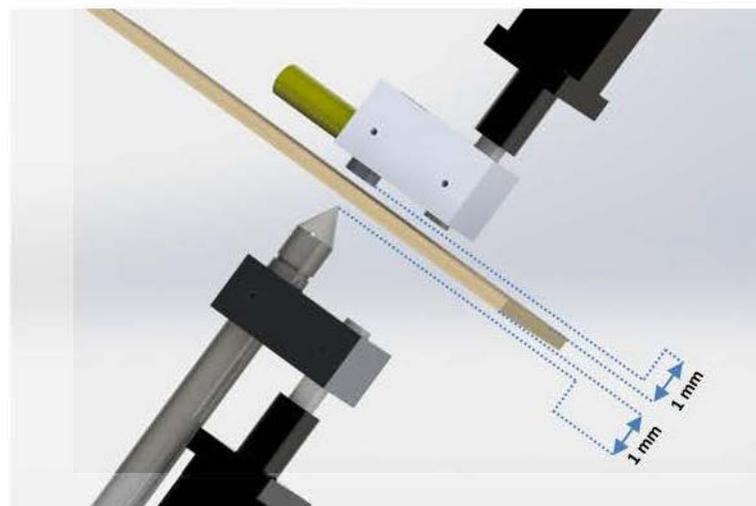
Nous commençons par décrire la position initiale de l’échantillon et des deux transducteurs. L’échantillon en bois est bien fixé sur l’étai et les axes des deux actionneurs sont en position de départ : on fixe les deux transducteurs de façon à ce

que la distance entre chaque surface de l'échantillon de bois et chaque transducteur soit de 1 mm (Figure 2.20). Par la suite, la séquence de commandes suivante devrait être exécutée :

- 1- La sortie simultanée des axes des deux actionneurs (avance de 1 mm) pour appliquer les deux transducteurs → Activer les axes Y et Z.
- 2- Un temps d'arrêt, déterminé à partir des essais expérimentaux, pour enregistrer la mesure du temps de propagation.
- 3- Le retour simultané des axes des deux actionneurs à leur position initial (recul de 1 mm) → Activer les axes Y et Z.
- 4- L'avance de l'ensemble actuateur-porte échantillon de 0.04 mm → Activer l'axe X.

Les quatre étapes sont répétées 'n' fois pour balayer toute la longueur de l'échantillon. La constante 'n' est calculée à partir de la longueur de l'échantillon 'L' et du pas de déplacement de l'échantillon 'p' suivant la formule suivante (Eq. 2.1) :

$$n = \frac{L}{p} \quad (2.1)$$



**Figure 2.20 :** Présentation de la position initiale des deux transducteurs

Les bibliothèques de liens dynamiques (les fichiers '.dll') fournis avec le contrôleur 'TANGO Desktop' permettent de programmer la liste de commandes avec trois langages de programmations : Visual C++, Visual Basic et LabVIEW. La phase de programmation passe par deux étapes. La première étape consiste à identifier les fonctions à utiliser pour écrire le programme. En deuxième lieu, on a cherché à modifier l'application offerte par le fournisseur du contrôleur afin de l'adapter au projet. Nous avons choisi le langage de programmation Visual Basic pour programmer la séquence de commandes permettant l'automatisation de la mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore.

Nous avons étudié le programme générant l'application offerte par le logiciel Visual Basic. Par la suite, nous cherchons à apporter des modifications à ce programme en utilisant les fonctions prédéfinis par TANGO Contrôler. Les mouvements d'avance et de recul des deux axes des deux actionneurs et le mouvement d'avance de l'actuateur électrique peuvent être exécutés en utilisant la fonction 'mor' (Move Relative). Cette fonction commande les déplacements d'un ou plusieurs axes en même temps par rapport à la position relative (les coordonnées définis sont des coordonnées relatives).

La syntaxe de la fonction Move Relative :  $pTango \rightarrow \text{Move Rel}(X, Y, Z, A, 1)$

Avec X, Y, Z et A sont les 4 axes du contrôleur et le numéro 1 pour désigner le premier contrôleur dans le cas où il y a plusieurs contrôleurs. Les valeurs des déplacements insérés dans la fonction 'mor' sont en mm. Nous pourrions changer l'unité en utilisant la fonction 'dim' (dimensions).

D'autre part, l'arrêt de quelques secondes pour l'enregistrement du temps de propagation de l'onde ultrasonore est réalisé par la fonction 'Sleep' (retardement). La syntaxe de la fonction 'Sleep' :  $pTango \rightarrow \text{Sleep}(t)$  avec 't' le temps d'arrêt en millisecondes. Les commandes numérotées de 1 à 4 se répètent 'n' fois pour cela ces commandes sont réalisées en boucle avec un compteur 'j'. Le compteur 'j'

s'incrémente de 0 à 'n' avec un pas de 1. De ce fait, Nous avons modifié l'application associée au langage Visual Basic.

Le paramètre 'n' calculé à partir de l'équation 8 sera inséré dans la case N. La fonction 'Exécuter' lance l'exécution des quatre commandes permettant la mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore.

## CHAPITRE 3

### INTRA-RING WOOD DENSITY AND DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY PROFILES OF BLACK SPRUCE AND JACK PINE FROM X-RAY DENSITOMETRY AND ULTRASONIC METHOD

#### *3.1 Résumé*

L'ultrason est un outil rapide de mesure non destructive du module d'élasticité dynamique (MOED) des matériaux dont le bois. Le MOED est calculé à partir de la vitesse de propagation du son à travers l'échantillon du bois et sa masse volumique. En pratique, la masse volumique utilisée pour la mesure du MOED est celle de l'espèce ou de l'échantillon à étudier. Cela introduit une importante source d'imprécision dans l'estimation du MOED due aux variations intra-arbres, intracernes et celles induites par les traitements sylvicoles. Nous avons développé un prototype pour la mesure de la vitesse de propagation du son avec une résolution similaire à celle offerte par le densitomètre à rayon X lors de la mesure de la masse volumique. Une méthode d'évaluation non destructive basée sur l'utilisation du densitomètre à rayon X et du prototype développé permet d'obtenir les courbes des variations radiales et intracernes du MOED. Ce dispositif développé peut ainsi être utilisé pour déterminer l'effet des pratiques sylvicoles sur les propriétés mécaniques du bois. Nous avons utilisé une approche mathématique basée sur des polynômes de degrés élevés pour modéliser les profils du MOED intracernes dans l'épinette noire et le pin gris. Le point d'inflexion des polynômes aux degrés élevés a servi pour définir la transition du bois initial au bois final. Les corrélations entre les MOED mesurés et prédits sont élevées et significatives. Les relations entre la croissance radiale, la masse volumique et le MOED furent étudiées. Les coefficients de corrélation entre la

masse volumique et le MOED sont positifs et significatifs au niveau du cerne, du bois initial et du bois final.

### 3.2 *Abstract*

The ultrasonic technique, a nondestructive evaluation tool, has become widely used to evaluate the wood elastic properties including the dynamic modulus of elasticity (DMOE). The DMOE is determined based on wood density and ultrasonic velocity measurements. The use of wood average density to estimate the DMOE introduces an important source of imprecision because of density variations such as intra-tree, intra-rings and those induced by silvicultural treatments. To insure a precise DMOE estimation, we developed a prototype for measuring the ultrasonic velocity with a resolution similar to that provided by the X-ray densitometer when measuring wood density. A nondestructive evaluation method based on the use of X-ray densitometer and the developed prototype is used to determine radial and intra-ring wood DMOE profiles. This method can be used to provide accurate information on wood mechanical properties and its sources of variation. The intra-ring wood density and DMOE profiles in black spruce and jack pine were modelled using high order polynomials. We defined the transition from earlywood to latewood as the inflection point. The correlation between the predicted and the measured wood density and DMOE were very high and highly significant. The correlations between wood radial growth, density and DMOE were examined. Close correlations were found between the density and the DMOE of ring, earlywood and latewood.

### 3.3 *Introduction*

Wood quality is the resultant of physical, mechanical and chemical characteristics possessed by a tree or a part of a tree that enable it to meet the property requirements for different end products (Mitchell 1961). Wood density is considered as the most important wood quality attribute. It is one of the parameters most widely used to predict the wood mechanical properties and other wood physical properties such as

dimensional stability (Koubaa et al. 2002). However, the wood density and all related wood quality attributes are highly variable and the sources of variation are multiple including within-tree, between trees, between sites, and tree genetic origin, etc. This high variability is due to genetic, environmental, and physiological factors (Panshin et al. 1980, Rozenberg et al. 2001). In the same species, the variation in wood density results from the variation of anatomical characteristics such as earlywood and latewood width. Wood density is usually defined as the ratio of its mass to its volume and is expressed in kilograms per cubic meter ( $\text{kg/m}^3$ ). This definition does not considerate the variations of wood density due to biological processes such as earlywood and latewood formation, juvenile wood formation and environmental conditions. Modern non-destructive measurement tools such as X-ray densitometry are widely used to assess the wood quality variation due to biological processes (intra-ring and inter-ring variations), genetic sources, and environmental conditions (tree-to-tree, site, silvicultural treatments, etc.).

Intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry are generally used to calculate ring density (RD), earlywood density (EWD), latewood density (LWD), ring width (RW), earlywood width (EWW) and latewood width (LWW). These parameters have been determined for many wood species such as European oak (Zhang et al. 1994), black spruce (Koubaa et al. 2002) and *Thuja occidentalis* (Bouslimi et al. 2014). Intra-ring wood density profiles are used to determine the suitability of a wood for a specific utilization especially for high-value added applications (Zobel et al. 1989, Zhang et al. 1994). Intra-ring wood density variation can also indicate wood uniformity and provides information about the wood growth process and the yield of wood fiber (Zobel et al. 1989, Pernestål et al. 1995).

The earlywood and latewood properties depend on the earlywood-latewood transition point (E/L). Several methods have been reported in literature to determine the transition point. Mork's index (Mork 1928) has long been used to determine E/L. There are at least two different interpretations of Mork's index (Denne 1988). According to the first interpretation, the E/L is obtained when the double wall

thickness become greater or equal to the width of the cell lumen. From the second interpretation, the E/L is obtained when the double cell wall thickness multiplied by 2 becomes greater or equal to lumen width. Although this index, from both interpretations, is arbitrary and very time consuming to measure, it allows to measure earlywood and latewood features in a consistent manner.

Since Mork's index method is based on double wall thickness and lumen diameter, it is necessary to measure these wood anatomical features in individual growth rings on microscopic slides or use indirect microscopic procedures (Evans et al. 1995). In addition, this method is difficult to be integrated into X-ray computational programs. Good agreement between earlywood and latewood features as determined by three methods: Mork's definition; threshold density; and maximum derivative method was reported (Barbour et al. 1997). However, Mork's index and maximum derivative methods showed better estimates for physiological variations than threshold method. Modelling intra-ring wood density profiles is generally used to define the earlywood – latewood transition. Pernestål et al. (1995) and Ivkovic et al. (2004) used modified spline functions to model the intra-ring wood density profiles. The E/L transition was defined using a numerical derivative method. (Koubaa et al. 2002) demonstrated that high order polynomial functions consider both the profile and intra-ring density variation in estimating E/L. These functions give a consistent estimation of the E/L transition point. The reported coefficients of correlation between the measured and the predicted density for the 6<sup>th</sup> order polynomial were well above 0.90. These results are important because modelling intra-ring wood density profiles can simplify the modelling of final wood product properties (Ivkovic et al. 2004).

Although wood density is considered as a the most important wood quality attribute, elastic properties are also important especially for engineering design purposes (Bucur et al. 1984). The wood dynamic modulus of elasticity (DMOE), as an elastic constant which describes wood mechanical behavior, is computed from wood density and ultrasonic wave velocity (Hassan et al. 2013). Among the different nondestructive techniques, the ultrasonic technique has become widely used to

evaluate the strength properties of living trees, logs, sawn timbers and wood based materials due to its rapid, flexible, portable, cost effective and ease of use (Najafi et al. 2005, Brashaw et al. 2009, Chiu et al. 2013). The DMOE of wood has been determined using ultrasonic wave velocity in the parallel to the grain direction and wood density based on the mass-to-volume ratio of the specimens (Yang et Fortin 2001, Horáček et al. 2012, Chiu et al. 2013, Hassan et al. 2013). However, no study to date has investigated the intra-ring wood DMOE profiles to determine the variation between earlywood and latewood DMOE. A nondestructive evaluation method based on X-ray densitometry and ultrasonic technique will be used to present intra-ring wood DMOE profiles.

The objectives of this study are therefore (1) to elaborate a nondestructive method to determine intra-ring wood dynamic modulus of elasticity profiles; (2) to model the intra-ring wood density and DMOE profiles in black spruce and jack pine using high order polynomial functions (Koubaa et al. 2002); (3) to determine the radial variation of ring wood density and ring dynamic modulus of elasticity (4) to evaluate the correlations between wood radial growth, density, and DMOE.

### *3.4 Material and methods*

The X-ray densitometry provides intra-ring wood density profiles and determines both annual ring width and wood density components. Intra-ring wood ultrasonic velocity profiles have been determined using the developed prototype and the Sonatest Mastercan ultrasonic flaw detector. The superposition of these two profiles allows to present intra-ring wood dynamic modulus of elasticity profile using a nondestructive method.

#### *3.4.1 Material*

The experimental material used in this study come from subsamples of previous studies on wood quality of Jack pine (Park et al. 2009) and black spruce (Koubaa et al. 2012) sampled from even-aged stands in the Abitibi region, Québec, Canada.

Eight black spruce and eight Jack pine trees were used. Discs taken at breast height were used in this study. Bark-to-bark samples passing from the pith were extracted from each disc. Thin strips (15 to 20 mm wide and 1.57 to 1.9 mm thick) were sawn from each sample. The sawn strips were extracted with cyclohexane/ethanol (2:1) solution for 24 hours and then with distilled water for another 24 hours to remove extraneous compounds (Grabner et al. 2005). After extraction, the strips were air-dried under restraint to prevent warping. Samples were then conditioned to 8% equilibrium moisture content before measurement. The same samples were used to determine wood density and time of ultrasonic wave propagation. In this study, intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity variations were determined using a nondestructive method based on X-ray densitometry and ultrasonic technique.

#### 3.4.2 *Wood density measurement*

Ring density (RD) and ring width (RW) of each ring were measured using a QTRS-01X Tree-Ring X-Ray scanner (QMC, Knoxville, Tennessee). The QTRS passes thin strips from increment cores through an accurately collimated soft X-ray beam using a precisely controlled stepping system and linear bearing carriage. A video image of the wood sample surface and the X-ray density graph are both displayed at the same scale on the screen. A linear resolution step size of 40  $\mu\text{m}$  was used for X-ray densitometry. Rings from pith to bark were scanned in air-dry condition to estimate the basic wood density (ovendry weight/green volume) for each ring from the pith to bark. Ring density (RD) and ring width (RW) of each ring were determined based on the intra-ring microdensitometer profiles. Incomplete or false rings as well as rings with compression wood or branch tracers were eliminated from the analysis. Matlab Software was used to determine the intra-ring wood density profiles with a resolution of 40  $\mu\text{m}$ .

### 3.4.3 *Wood ultrasonic velocity measurement*

We have developed a prototype for measuring the time of ultrasonic wave propagation with the same resolution of wood density measured by X-ray densitometry (40  $\mu\text{m}$ ). The prototype (Fig. 3.1) consists on a motorized linear translation stage, which serves as a sample holder, controlled by a microcontroller. The time of ultrasonic wave propagation in the wood sample is measured between the ultrasonic transmitter and receiver transducers with a resolution of 40  $\mu\text{m}$ . Ultrasonic transducers are mounted in parallel to two mini motorized actuators in order to ensure the application of the same pressure while measuring the propagation time of the ultrasonic wave.

After X-ray densitometry density measurements, a nondestructive test was carried out on the same samples to determine the time of ultrasonic wave propagation with a Masterscan 380 (Sonatest Inc, Texas) using 10 MHz frequency transducers. Ultrasonic waves are applied on the samples, through two transducers (transmitting and receiving transducers). A coupling agent is used to aid the transmission of the transducer pulses into the test specimen.

A correction factor was applied to calculate the ultrasonic wave velocity in wood samples in order to take into consideration the transport time of electric waves within the measuring circuit. A Plexiglas sample having the same thickness of the wood samples (2 mm) was used as a reference  $n$  to determine the correction factor (Hernández et al. 1998, Yang et Fortin 2001). The ultrasonic velocity was calculated using the following equation (Eq. 3.1):

$$V = \frac{d}{T - C_f} = \frac{d}{T - (t_r - \frac{d_r}{v_r})} \quad [m/s] \quad (3.1)$$

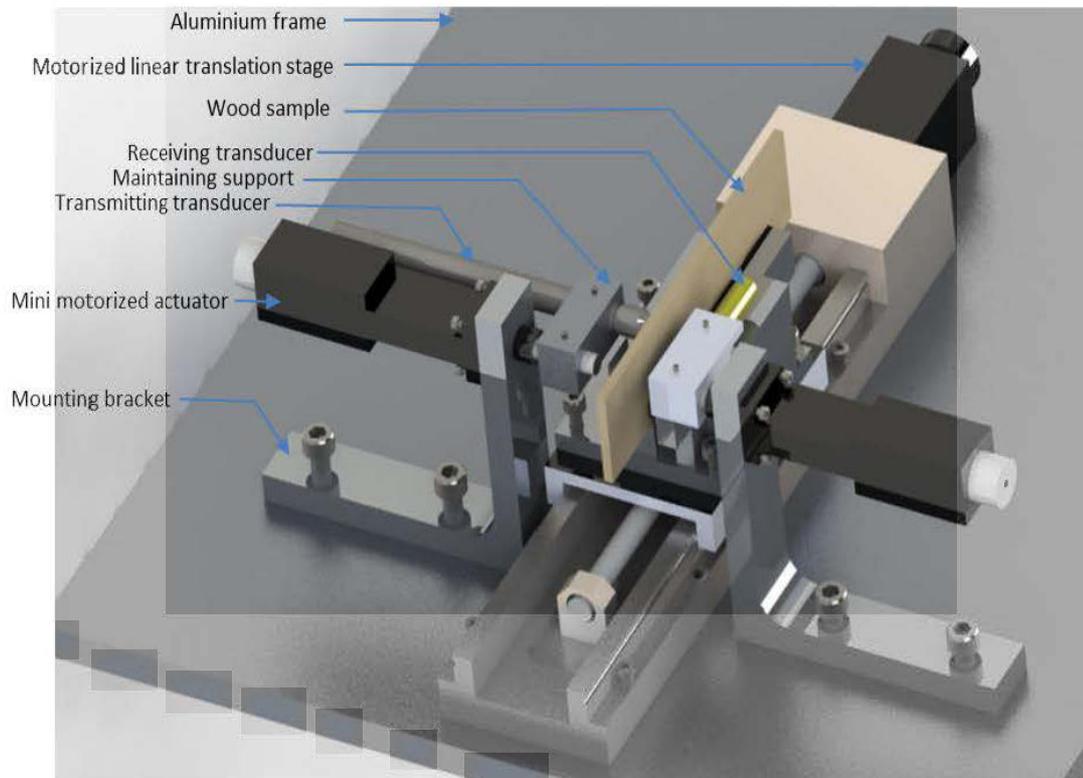
Where  $d$  is the thickness of the wood sample [m];  $T$  is the time of the ultrasonic wave propagation [s];  $C_f$  is the correction factor [s];  $t_r$  is the wave propagation time

through the reference Plexiglas core [s];  $d_r$  is the thickness of the reference Plexiglas core [m] and  $v_r$  is the wave velocity in the reference Plexiglas core (2670 m/s).

The dynamic modulus of elasticity based on ultrasonic technique was determined through the one dimensional wave equation as follows (Eq. 3.2):

$$\text{DMOE} = \rho \times V^2 \times 10^{-6} \quad [\text{MPa}] \quad (3.2)$$

Where  $\rho$  is the wood density measured by X-ray densitometry [ $\text{kg/m}^3$ ] and  $V$  is the ultrasonic wave velocity calculated using Eq. (3.1) [m/s].



**Figure 3.1** : Prototype for measurement of the propagation time of the ultrasonic wave

### 3.4.4 Modeling intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles

In this study we modelled the intra-ring wood density and DMOE profiles for black spruce and jack pine using 6<sup>th</sup> order polynomial functions (Eq. 3.3).

$$R = a_0 + a_1RW + a_2RW^2 + a_3RW^3 + a_4RW^4 + a_5RW^5 + a_6RW^6 \quad (3.3)$$

Where R is ring density or ring dynamic modulus of elasticity; RW is ring width in proportion and  $a_i$  are parameters to be estimated.

The E/L transition was defined as the inflexion point from the within ring density and DMOE profiles. The E/L transition is obtained by equaling the second derivative of the polynomial function to zero (Eq. 3.4). For a 6<sup>th</sup> order polynomial function, the second derivative gives 4 solutions; only one solution is of interest. Few restrictions were specified in the Matlab program to obtain this unique solution. These restrictions specify that the solution should be included in a positive slope and in the range of 40 to 90 % of ring width proportion. If more than one solution is obtained, the highest value among solutions is chosen.

$$\frac{d^2R}{dRW^2} = 2a_2 + 6a_3RW + 12a_4RW^2 + 20a_5RW^3 + 30a_6RW^4 \quad (3.4)$$

### 3.4.5 Statistical analysis

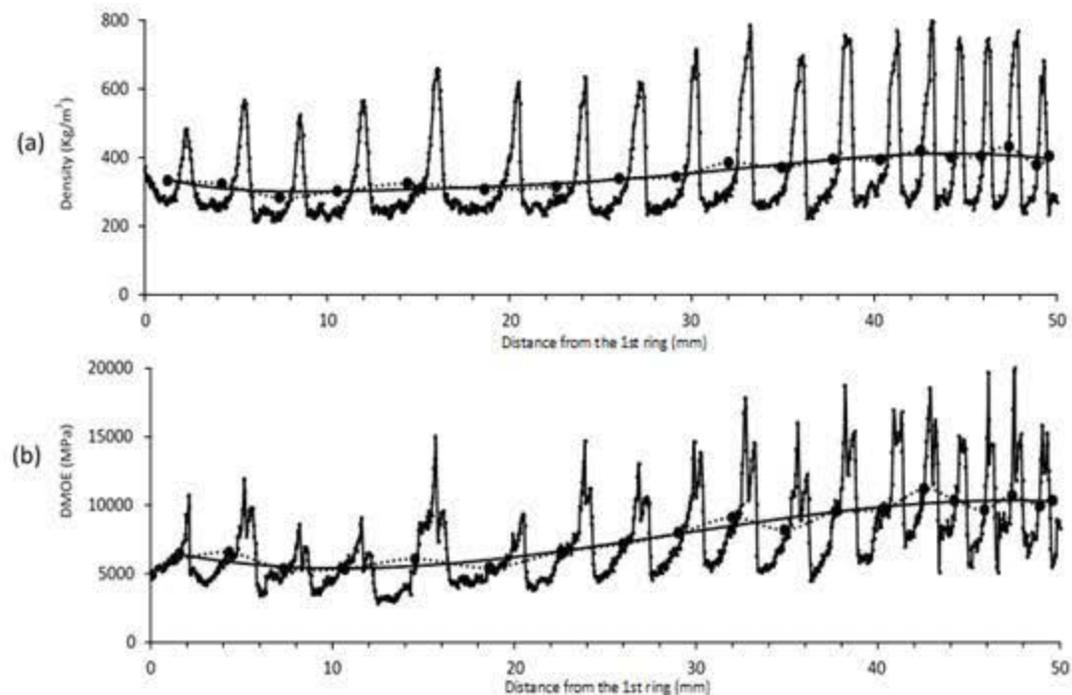
For both soft wood species (black spruce and jack pine), the correlations between wood radial growth, density and DMOE components were determined using the R software (Version 2.15.0 R, R Development Core Team, 2012) with a significance level of  $\alpha = 0.05$ .

## 3.5 Results and discussion

Typical X-Ray density and DMOE profiles of Jack pine wood are shown in figure 3.2. Both the within-ring and radial patterns variations of these properties are shown.

### 3.5.1 Intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles

Figure 3.3 shows the within ring variations of density and DMOE for black spruce and jack pine. For both species, similar within ring density patterns were obtained for wood density and DMOE. Wood density and DMOE increase slowly in earlywood to reach their maximum in the latewood. Then, both properties decrease at about mid latewood width to reach minimum values at the boundary between two growth rings. The similarity of intra-ring density and DMOE profiles confirms the close relationship between wood density and the wood stiffness even at the intra-ring level. Some slight difference between intra-ring density and DMOE profiles appears at the earlywood. In fact, intra-ring wood density profiles increase slowly in earlywood compared to those of DMOE which exhibit a relatively sharp increase. Similar patterns of within ring density variations were obtained by Koubaa et al. (2002) for black spruce and by Ivkovic et al. (2004) for Norway spruce and Douglas fir.

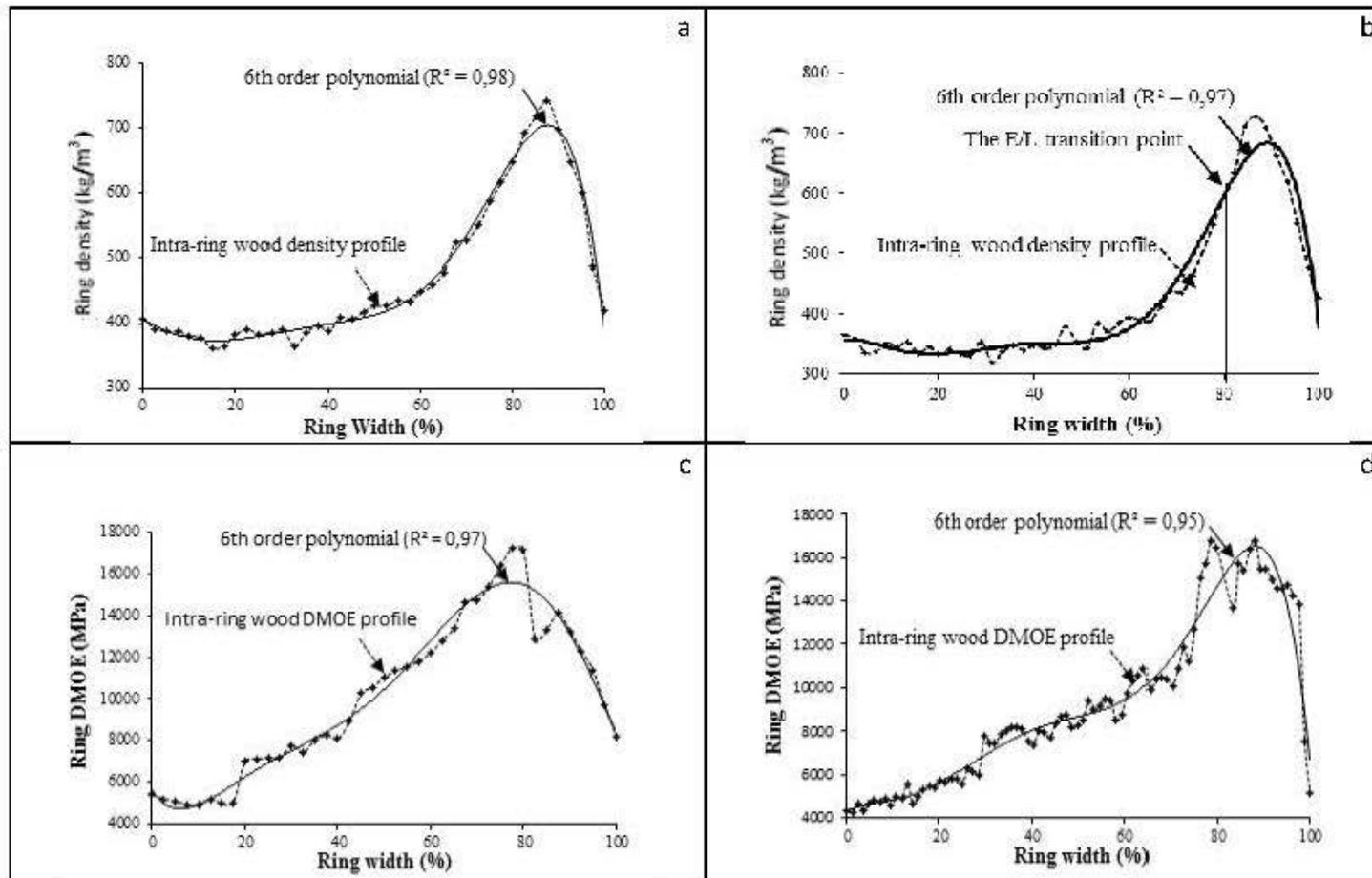


**Figure 3.2 :** Example of radial variation of: a) wood density and b) DMOE in Jack pine profiles (from ring 2 to ring 19)

The same 6<sup>th</sup> polynomial function modeling approach suggested by Koubaa et al. (2002) was used to model the within-ring density profiles and DMOE of black spruce and Jack pine samples of this study. Figure 3.3 also illustrates the fitness of the 6<sup>th</sup> order polynomials for the intra-ring density and DMOE profiles for two softwoods species ((a) black spruce and (b) jack pine). Table 3.1 indicates that 6<sup>th</sup> polynomial models fit the intra-ring wood density and DMOE profiles of black spruce and jack pine. The coefficients of correlation obtained between the measured and the predicted ring density data ranges from 0.88 to 1.00 with an average well over 0.95. These results indicate that these models are able to well describe the intra-ring wood density profiles in black spruce and jack pine and probably other softwood species. The obtained coefficients were in good agreement with those obtained by Koubaa et al (2002) for black spruce.

Table 3.1 also indicates that high order polynomials fit the intra-ring DMOE profiles in black spruce and jack pine. The coefficients of correlation obtained between the measured and the predicted DMOE data from the 6<sup>th</sup> order polynomial models range from 0.80 to 0.99 with an average well above of 0.90 (Table 3.1). These results indicate that high order polynomials are able to well describe the DMOE profiles of these two softwoods.

The measurement of the elastic properties of wood material yields information that is essential for the understanding of the nature of bonding at a very fine structural level (Bucur et al. 1984). As the elastic properties describe the mechanical behavior of wood; it is mandatory to determine intra-ring wood dynamic modulus of elasticity profiles. Moreover, modelling intra-ring wood DMOE profile can be an efficient tool to predict wood mechanical behavior.



**Figure 3.3 :** Examples of within ring profiles and the fits obtained from the 6th order polynomials for: a) Ring density of black spruce; b) ring density of jack pine; c) DMOE of Black spruce; d) DMOE of Jack pine.

**Table 3.1 :** Average, standard variation (between parenthesis) and range of Pearson's coefficient of determination between measured and predicted within-ring density and dynamic modulus of elasticity values from the 6<sup>th</sup> order polynomial models for different rings for black spruce and jack pine

	Ring from pith			
	5	10	15	20
Wood density profiles				
Black spruce				
Average profiles	0.96 (0.02)	0.97 (0.02)	0.96 (0.02)	0.97(0.02)
Range	0.88-0.99	0.91-0.99	0.91-0.99	0.92-1.00
Jack pine				
Average profiles	0.96 (0.02)	0.95 (0.02)	0.97 (0.02)	0.98 (0.01)
Range	0.92-0.98	0.90-1.00	0.89-0.99	0.96-0.99
Dynamic modulus of elasticity profiles				
Black spruce				
Average profiles	0.92 (0.03)	0.94 (0.04)	0.95 (0.03)	0.95 (0.02)
Range	0.82-0.99	0.88-0.99	0.86-0.99	0.91-0.99
Jack pine				
Average profiles	0.89 (0.04)	0.93 (0.02)	0.93 (0.03)	0.94 (0.02)
Range	0.80-0.97	0.88-0.98	0.82-0.99	0.91-0.99

### 3.5.2 *Earlywood - latewood transition*

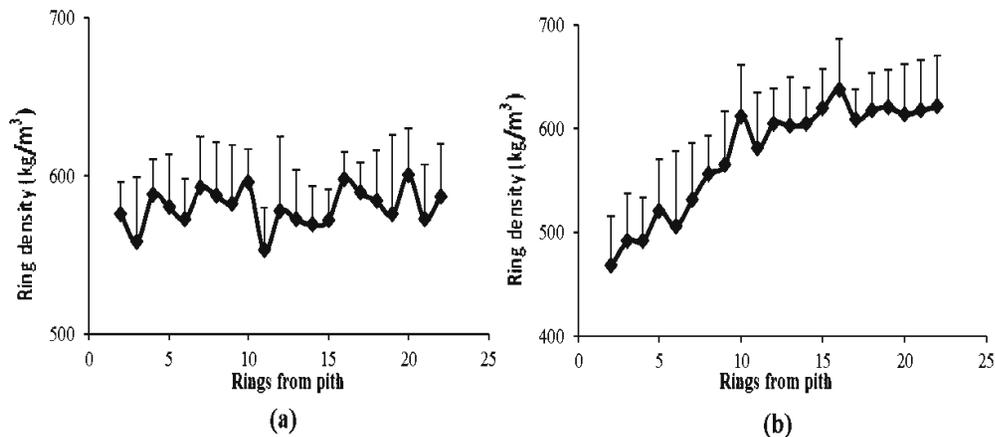
Table 3.2 shows that wood density at the E/L transition point (Fig. 3.3b) (E/L transition density) as defined by the inflexion point method presents a large variation for black spruce (Fig. 3.4a) and jack pine ((Fig. 3.4b). The radial pattern of variation of the E/L transition density of black spruce (Fig. 3.4a) is similar to that reported by Koubaa et al. (2002) and characterized by large variation with no specific trend of variation. On the other hand, the radial variation of E/L transition in jack pine (Fig.

3.4b) is characterized by a constant increase in the juvenile wood and a tendency to levelling off in mature wood. Similar pattern of radial variation in E/L wood transition is reported by Park et al. (2009).

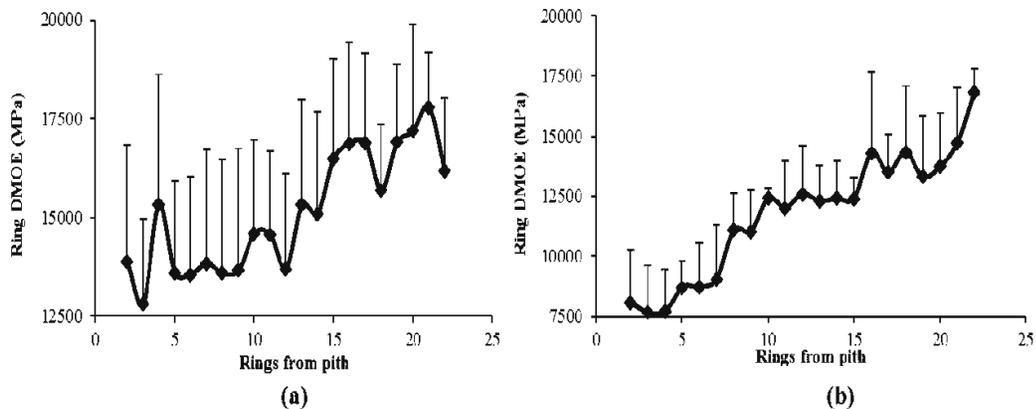
Within the same ring among the measured trees, the E/L transition showed also a large variation as indicated by the relatively large standard errors (Figs. 3.4a-b, Table 3.2). For example, the E/L transition density for the 10<sup>th</sup> annual ring from the pith varied from 541 to 655 kg/m<sup>3</sup> and from 548 to 672 kg/m<sup>3</sup> in black spruce and jack pine, respectively (Table 3.2). These results were in agreement with previous reports by Koubaa et al. (2005) for black spruce and by Park et al. (2009) for jack pine. Earlywood and latewood densities defined by this method also showed a large variation. In fact, for the same annual ring, earlywood density ranged from 383 to 432 kg/m<sup>3</sup> for black spruce and from 318 to 367 kg/m<sup>3</sup> for jack pine.

As shown in Table 3.2, wood density at the E/L transition points in black spruce and jack pine are variable. For black spruce, the average wood density at the E/L transition point is variable and higher than the 590 kg/m<sup>3</sup> reported by Koubaa et al. 2002 and the threshold wood density of 540 kg/m<sup>3</sup> used for black spruce in X-Ray densitometry programs. Similar results are found for jack pine. The E/L transition density is also variable and higher than the threshold density typically used for jack pine in X-ray densitometry programs. Since the wood density at the E/L transition points defined by the inflexion point method is variable and higher than the threshold wood density, the average earlywood and latewood widths and densities defined by the inflexion point method will be different from those defined by the threshold method for both black spruce and jack pine. Earlywood width defined by the inflexion point method will be larger, whereas latewood width will be smaller. Consequently, the latewood proportion defined by the inflexion point method will be lower. These results confirm the findings by Koubaa et al. (2002) that the E/L transition point varied greatly among individual growth rings and that the use of a predetermined fixed threshold wood density does not reflect the variation in the intra-ring wood density profiles among growth rings in a species.

The same method was also used to determine earlywood dynamic modulus of elasticity (EWDMOE), latewood dynamic modulus of elasticity (LWDMOE) and the dynamic modulus of elasticity at the earlywood latewood transition (Fig. 3.5a and Fig. 3.5b). Indeed, wood dynamic modulus of elasticity at the E/L transition point for the 10<sup>th</sup> annual ring varied from 9261 to 15798 MPa for black spruce and from 11162 to 15950 MPa for jack pine. For the same annual ring, EWDMOE ranged from 6500 to 13652 MPa for black spruce and from 7946 to 11613 MPa in jack pine. LWDMOE showed also a large variation from 10327 to 18792 MPa for black spruce and from 12873 to 16916 MPa for jack pine (Table 3.2).



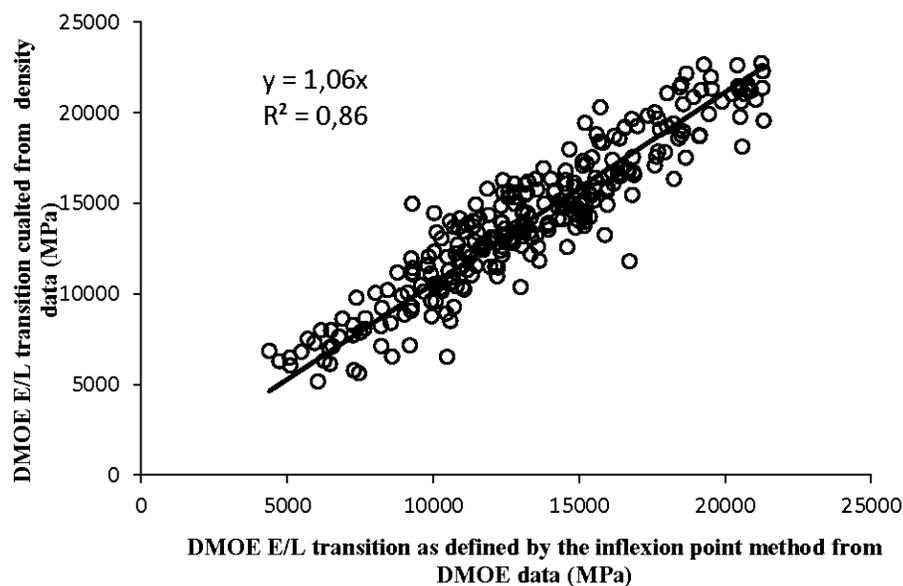
**Figure 3.4:** Radial variation of E/L transition density (Bars indicate the standard error) for a) black spruce and b) jack pine



**Figure 3.5 :** Radial variation of E/L transition DMOE (Bars indicate the standard error) for a) black spruce ad b) jack pine

The radial patterns of the DMOE at E/L transition of black spruce (Fig. 3.5a) and Jack pine (Fig. 3.5b) are shown. For both species the radial patterns of variations of the DMOE at E/L transition are similar to that of density. This result is expected and is due to the close relationship between the two properties.

Figure 3.6 showed the close relationship between the transition DMOE measured at the earlywood-latewood transition density and the transition DMOE as defined by the inflexion point method for all tested samples (black spruce and jack pine). We have obtained a linear regression curve ( $y = 1.06x$ ). An appropriate statistical test (student's t test) enabled us to conclude that there is no significant difference between transition DMOE calculated at the earlywood-latewood transition density and the transition DMOE as defined by the inflexion point method calculated from DMOE data. These results confirm again the close relationship between wood density and wood mechanical properties in particular the wood DMOE.



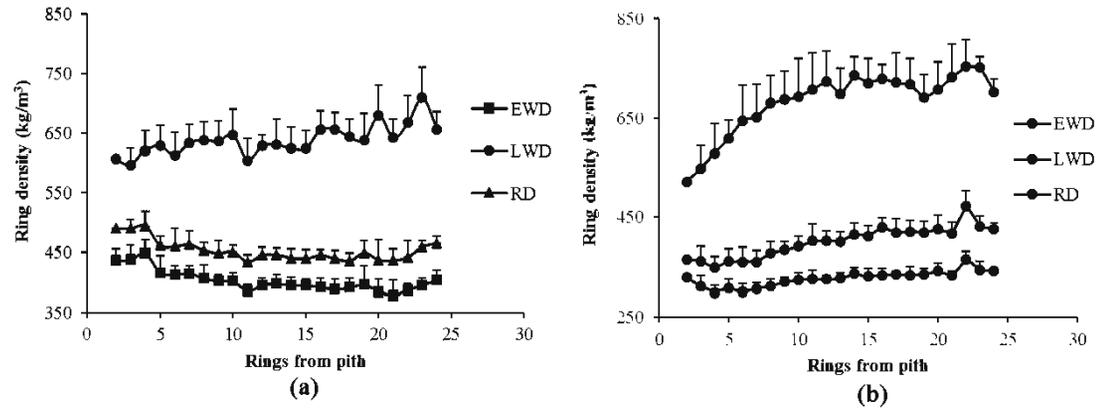
**Figure 3.6 :** Relationship between transition DMOE calculated at the earlywood-latewood (E/L) transition density and the transition DMOE as defined by the inflexion point method elasticity for black spruce and jack pine

### 3.5.3 *Radial variation in ring wood density and ring dynamic modulus of elasticity*

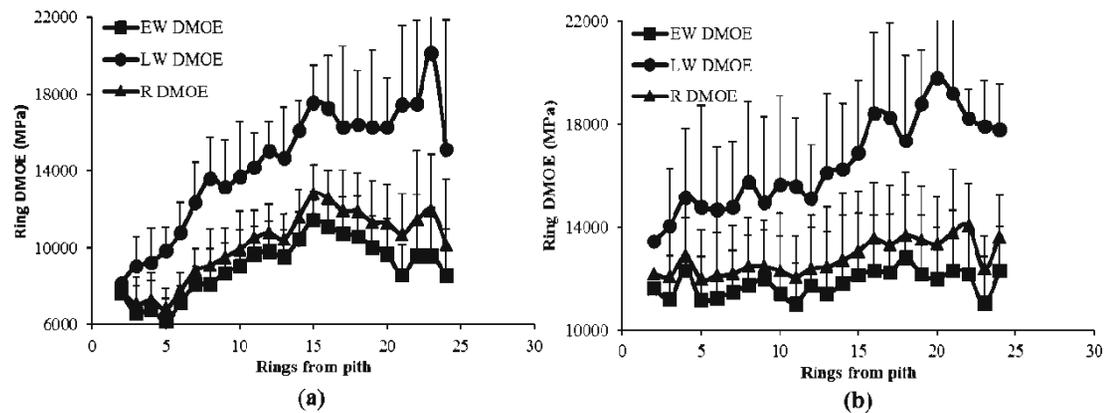
The mean values of intra-ring density over all sampled trees for two black spruce (a) and jack pine (b) are shown in Fig. 3.7a and Fig. 3.7b. The radial variation pattern of wood density is similar to that reported by Park et al. (2009) for jack pine, Koubaa et al. (2005) for black spruce, and Grabner et al (2005) for European larch. The ring density is relatively high near the pith and decreases to reach a minimum in the transition zone leading into mature wood where a slow and steady increase is observed. Earlywood density (Fig. 3.7a) decreases rapidly from its maximum near the pith to a low value in the transition zone. Then, this density slowly decreases with age (Koubaa et al. 2005). Latewood density (Fig. 3.7a) increases almost linearly to a maximum density at about ring 13 then leveled off in the transition zone and mature wood (Park et al. 2009). Similar typical pattern of variation is found for the DMOE (Fig. 3.8a and Fig. 3.8b). The ring DMOE increases with tree age then leveled off beyond the thirteenth ring. These results are similar to those previously reported by (Koubaa et al. 2012). A similar pattern of radial variation of the MOED was previously reported for hybrid poplar (Hernández et al. 1998). However, no study to date has investigated the radial variation of earlywood and latewood dynamic modulus of elasticity (EWDMOE and LWDMOE). DMOE and LWDMOE increase almost linearly to a maximum at about ring 15 and then decrease slowly through the outer rings (Fig. 3.8a and Fig. 3.8b).

**Table 3.2** : Average (Av), range (Ra) and standard variation for ring width, wood density and wood DMOE at earlywood-latewood transition, earlywood and latewood levels as defined by the inflexion method for different rings

	Black Spruce			Jack pine		
	Ring from pith					
	5	10	20	5	10	20
	Earlywood width					
Av (mm)	1.32 (0.37)	1.26 (0.35)	1.02 (0.20)	2.65 (0.27)	2.05 (0.31)	1.23 (0.32)
Ra (mm)	0.69-1.95	0.81-1.88	0.72-1.37	2.05-3.17	1.40-2.74	0.87-2.09
	Latewood width					
Av (mm)	0.39 (0.12)	0.30 (0.08)	0.23 (0.06)	0.58 (0.06)	0.50 (0.06)	0.38 (0.10)
Ra (mm)	0.22-0.61	0.15-0.48	0.16-0.31	0.47-0.67	0.44-0.58	0.25-0.63
	Earlywood density					
Av (kg/m <sup>3</sup> )	415 (27)	403 (14)	385 (17)	316 (16)	340 (13)	331 (22)
Ra (kg/m <sup>3</sup> )	376-491	383-432	344-418	296-348	318-367	295-359
	Latewood density					
Av (kg/m <sup>3</sup> )	637 (47)	673 (20)	692 (36)	612 (58)	734 (89)	726 (62)
Ra (kg/m <sup>3</sup> )	578-729	568-796	591-746	502-769	605-856	581-798
	Density at the earlywood latewood transition					
Av (kg/m <sup>3</sup> )	580 (33)	596 (20)	600 (29)	520 (49)	612 (49)	614 (48)
Ra (kg/m <sup>3</sup> )	536-653	541-655	547-649	433-623	548-672	482-674
	Earlywood dynamic modulus of elasticity					
Av (MPa)	11196 (2532)	11165 (1569)	11782 (2550)	6442 (802)	9924 (1165)	10728 (1886)
Ra (MPa)	8292- 17564	6500- 13652	8219- 15309	5161- 8090	7946- 11613	7975- 13680
	Latewood dynamic modulus of elasticity					
Av (MPa)	14791 (2390)	15152 (2450)	17908 (2352)	10624 (1006)	14614 (985)	16251 (3563)
Ra (MPa)	11900- 21677	10327- 18792	14045- 22146	8102- 12133	12873- 16916	11909- 21027
	Dynamic modulus of elasticity at the earlywood latewood transition					
Av (MPa)	13404 (2111)	13623 (1945)	15388 (1862)	9752 (1413)	12883 (1174)	14950 (1858)
Ra (MPa)	10437- 17650	9261- 15798	13075- 18448	6431- 12193	11162- 15950	11238- 17061



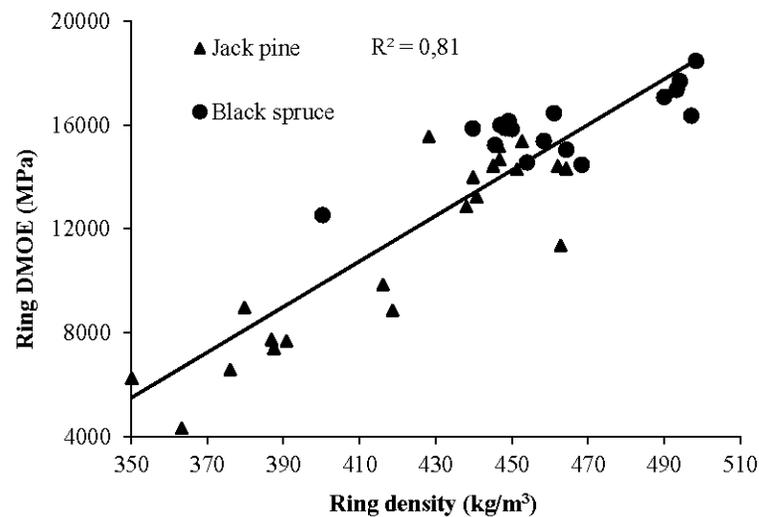
**Figure 3.7 :** Radial variation of ring density (RD), earlywood density (EWD), and latewood density (LWD) for a) black spruce and b) jack pine



**Figure 3.8 :** Radial variation of ring dynamic modulus of elasticity (RDMOE), earlywood dynamic modulus of elasticity (EWDMOE), and latewood dynamic modulus of elasticity (LWDMOE) for a) black spruce and b) jack pine

### 3.5.4 Growth, density and elastic properties relationships

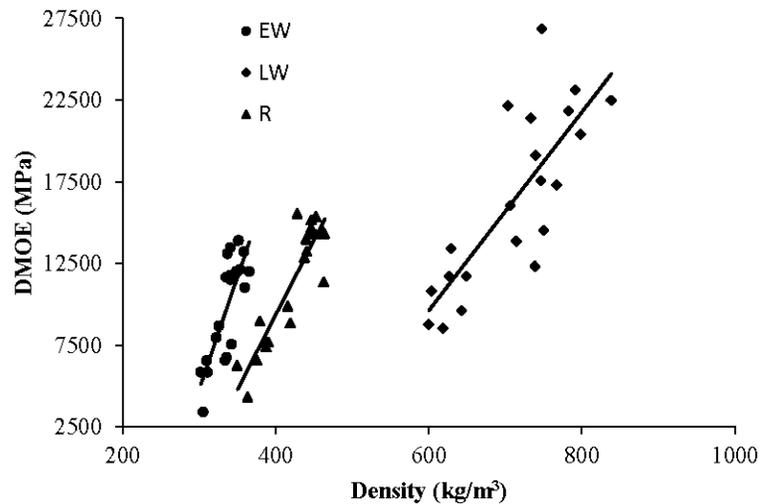
The developed technique allows us to determine the relationship between wood DMOE and wood density at ring earlywood and latewood levels (Figs. 3.9 and 3.10). Linear correlations were obtained at ring, earlywood and latewood levels (Fig. 3.10). The coefficient of determination for the linear correlation between RD measured with X-ray densitometry and RDMOE obtained with ultrasonic technique was  $R^2 = 0.81$  for two softwoods species (black spruce and jack pine) (Fig. 3.9).



**Figure 3.9 :** Relationship between ring density and ring dynamic modulus of elasticity for black spruce and jack pine

Table 3.3 indicates that ring density was positively correlated with earlywood and latewood densities. In fact, for both softwood species, the correlation between ring density and earlywood density was higher than between ring density and latewood density. These results were in agreement with previous studies (Koubaa et al. 2000) for black spruce. Ring DMOE showed the same observations. Indeed, the correlation between ring DMOE and earlywood DMOE was higher than between ring DMOE and latewood DMOE for black spruce and jack pine. Ring density correlated well

with ring DMOE. The average correlation coefficients are  $r = 0.45$  and  $r = 0.79$  for black spruce and jack pine, respectively. The correlation coefficient between ring density and ring DMOE for jack pine was higher than the correlation coefficient for black spruce (Table 3.3). Ring DMOE was also positively correlated with both EWD and LWD. Furthermore, EWD was positively correlated with EWDMOE. LWD was also positively correlated with LWDMOE. The correlation between LWD and LWDMOE was higher than the one between EWD and EWDMOE (Table 3.3). These results confirm the close relationships between wood density and wood dynamic modulus of elasticity. Table 3.3 also showed that the correlation between RDMOE and RW was negatively and statistically significant. The same observations were found at both earlywood and latewood levels. On the other hand, high positive relationships were found between RDMOE and both earlywood and latewood dynamic modulus of elasticity for both softwood species (Table 3.3). These results have some practical implications regarding nondestructive evaluation of wood density, growth, and stiffness from small samples with considerable accuracy.



**Figure 3.10 :** Relationships between wood density and wood dynamic modulus of elasticity at the ring (R), earlywood (EW) and latewood (LW) levels for jack pine

**Table 3.3** : Pearson's coefficient of correlations between the different traits for black spruce (upper) and jack pine (lower)

	RW	EWW	LWW	RD	EWD	LWD	RDMOE	EWDMOE	LWDMOE
RW		0.98***	0.81***	-0.21*	0.00 ns	-0.36*	-0.37*	-0.29*	-0.49**
EWW	0.99***		0.73***	-0.25*	-0.03 ns	-0.32*	-0.38*	-0.30*	-0.49**
LWW	0.82***	0.77***		-0.02 ns	0.08 ns	-0.49**	-0.31*	-0.25*	-0.50**
RD	-0.69**	-0.72***	-0.42**		0.91***	0.37*	0.45**	0.44**	0.33*
EWD	-0.58**	-0.58**	-0.39*	0.85***		0.11 ns	0.4**	0.46**	0.18 ns
LWD	-0.50**	-0.49**	-0.52**	0.75***	0.48**		0.18 ns	0.09 ns	0.49**
RDMOE	-0.65**	-0.66***	-0.48**	0.79***	0.65**	0.66***		0.98***	0.85***
EWDMOE	-0.60**	-0.61**	-0.44**	0.73***	0.65**	0.57**	0.98***		0.75***
LWDMOE	-0.61**	-0.60**	-0.55**	0.74**	0.54**	0.80***	0.89***	0.78***	

\* Significant at  $\alpha = 0.05$ ; \*\* Significant at  $\alpha = 0.01$ ; \*\*\* Significant at  $\alpha = 0.001$ ; ns not significant

RW: ring width, EWW: earlywood width, LWW: latewood width, RD: ring density, EWD: earlywood density, LWD: latewood density, RDMOE: ring dynamic modulus of elasticity, EWDMOE: earlywood dynamic modulus of elasticity, LWDMOE: latewood dynamic modulus of elasticity

### 3.6 Practical implications

In this work we have developed a nondestructive method to determine wood density and dynamic modulus of elasticity based on X-ray densitometry and ultrasonic technique. The developed technique was used to determine earlywood and latewood properties in order to provide more detailed characterization of wood mechanical behavior. At the scale of wood processing industry, this information could be important for pulping processes and OSB manufacturing. Few studies have investigated earlywood and latewood elastic properties (Jeong et al. 2009, Roszyk et al. 2016, Cramer et al. 2005). Roszyk et al (2016) reported that latewood modulus of elasticity is about three times higher than early wood modulus of elasticity for scots pine at low moisture content (8%). Thus, it is important to determine wood intra-rings properties through a nondestructive technique. These results can have a direct impact on wood processing behavior.

Results from this study further confirm that the ultrasonic technique can be used to determine elastic constants of wood with considerable accuracy (0.04 mm). Indeed, the relationship between ultrasonic velocity, density, and wood stiffness makes it a powerful experimental tool (Ross 2015). In fact, several studies (Yang and Fortin 2001, Sales et al. 2011, Horáček et al. 2012, Hassan et al. 2013) have investigated the relationships between wood dynamic and static modulus of elasticity. They showed a significant linear correlation between the static and dynamic modulus of elasticity. Only few studies have investigated the relationship between wood DMOE and wood density (Evans et al. 2001, Lasserre et al. 2009). Linear correlations ( $r = 0.70$ ) were found between the DMOE and wood density for *Eucalyptus delegatensis* (Evans et al. 2001).

The relationship between tree growth and wood properties, especially for mechanical properties, is very important in forest management strategies. For boreal species, improving growth through tree improvement programs or intensive forest

management strategies can lead to important reduction in the wood mechanical properties due to several biological factors including the increase of earlywood proportion, the production of larger cells with thinner walls, etc. Several studies (Wang et al. 2001) using anatomical and physical characterization tools clearly demonstrated the impact of intensive forest management strategies on earlywood, latewood and overall wood properties. However, the impact of intensive forest management on the mechanical properties is rarely studied due to the constraints of sample size, destructive nature of the characterization tests and the lack of effective tools for rapid and nondestructive characterization of these properties at the ring level. Such measurement are important to assesses the impact of the intensive forest management practices on the wood mechanical properties and to understand the physiological and biological processes in wood strength development. The method developed herein allows the measurement of intra-ring wood dynamic modulus of elasticity and offer the possibility of better understanding of the strength development and its relationship to growth and wood density. Radial profiles gives us the possibility to investigate the relationships between wood radial growth, density, and elastic properties at the ring, earlywood and latewood levels as shown in table 3.3

### *3.7 Conclusions*

Based on this study, the following conclusions can be drawn:

- 1) Intra ring wood dynamic modulus of elasticity profile can be determined using a nondestructive evaluation method based on X ray densitometry and ultrasonic technique.
- 2) Sixth order polynomials are able to well describe the intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles in black spruce and jack pine.

- 3) The inflexion point method can be used to determine with considerable accuracy the earlywood-latewood transition density and dynamic modulus of elasticity in black spruce and jack pine.
- 4) For black spruce and jack pine, the coefficients of correlation between wood density and wood dynamic modulus of elasticity were positive and statistically significant at ring, earlywood and latewood levels. Furthermore, high positive correlations were obtained between ring dynamic modulus of elasticity and both earlywood and latewood dynamic modulus of elasticity.

## CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS PRATIQUES

### Conclusions

Le module d'élasticité dynamique du matériau bois a été déterminé en utilisant une méthode non destructive basée sur l'utilisation du densitomètre à rayon X pour la mesure de la masse volumique et la technique d'ultrason pour la mesure de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore, respectivement. Le dispositif développé et le détecteur de défaut par ultrason (Sonatest Mastercan) a permis de mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonore avec une résolution de 0,04 mm. Ce dispositif a été validé par l'étude des variations radiales et intracernes du module d'élasticité dynamique pour l'épinette noire et le pin gris.

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le comportement mécanique du matériau bois peut être étudié avec précision en utilisant une méthode non destructive. Le dispositif développé permet d'évaluer le module d'élasticité dynamique du cerne, du bois initial et du bois final à partir d'un échantillonnage précis et non destructif.
- Les polynômes de degrés élevés présentent un outil mathématique fiable pour modéliser les profils des variations intracernes du module d'élasticité dynamique pour l'épinette noire et le pin gris. Le point d'inflexion des polynômes permet de définir adéquatement la transition du bois initial au bois final.
- Les variations radiales de la masse volumique sont identiques à celles précédemment reportées pour l'épinette noire et le pin gris. Les variations radiales du module d'élasticité dynamique suivent pratiquement le même patron de variation.

- La relation entre la masse volumique et le module d'élasticité dynamique a été étudiée. Les résultats mettent en évidence la relation linéaire positive entre ces deux paramètres non seulement au niveau du cerne mais aussi au niveau du bois initial et du bois final. Ces résultats obtenus pour les deux essences étudiées confirment la forte corrélation entre la masse volumique et les propriétés mécaniques du matériau bois.

### **Implications pratiques**

Dans ce travail nous présentons une méthode non destructive pour déterminer les profils des variations intracernes du MOED. Les résultats obtenus permettent de :

- Fournir des informations pertinentes sur le comportement mécanique du matériau bois. En effet, à travers un échantillonnage non destructif nous pourrions obtenir des informations sur l'évolution des propriétés mécaniques du matériau bois à l'échelle du cerne, du bois initial et du bois final. Ces données peuvent être utiles pour les procédés de transformation du bois en particulier la mise en pâte et la production des panneaux OSB.
- Étudier les effets des pratiques sylvicoles sur les propriétés du matériau bois. La technique d'ultrason peut-être une alternative pour mettre en évidence les changements des propriétés mécaniques du matériau bois suite aux pratiques sylvicoles. Ces observations permettraient de jouer les conditions de croissance de l'arbre en fonction de la qualité du bois recherchée par l'industrie.

### **Travaux futurs**

- L'épaisseur de l'échantillon de bois devrait être pratiquement constante. Ceux-ci n'est pas toujours garanti avec des petits échantillons de 2 mm d'épaisseur. Par contre, l'utilisation des capteurs laser qui mesurent

l'épaisseur de l'échantillon avec la même résolution que le densitomètre à rayon X et le prototype développé permet d'éliminer l'effet de la variation de l'épaisseur de l'échantillon de bois.

- La phase de programmation pourrait être améliorée au niveau de l'enregistrement des mesures du temps de propagation de l'onde ultrasonore. Une programmation plus développée facilitera l'acquisition des données.

## RÉFÉRENCES

- Alteyrac, J. (2005). "Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea Mariana* (MILL.)B.S.P.). " Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Canada. 136 p.
- Baettig, R. (2005). "Exploitation d'un rayonnement X poly énergétique pour la détermination de la teneur en eau et de l'angle de micro fibrilles du bois : Approche théorique et expérimentale. " Thèse de doctorat. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy, France. 252 p.
- Baillères, H., Chanson, B., Fournier, M., Tollier, M. et Monties, B. (1995). "Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*." *Annals of Forest Science*, 52, 157-172.
- Baltrušaitis, A., Ukvalbergienė, K. et Pranckevičienė, V. (2010). "Nondestructive evaluation of viscous-elastic changes in ammonia-modified wood using ultrasonic and vibrant techniques." *Wood Research*, 55 (4), 39-50.
- Barbour, R. J., Bergqvist, G., Amundson, C., Larsson, B. et Johnson, J. A. (1997). "New methods for evaluating intra-ring X-ray densitometry data: maximum derivative methods as compared to Mork's index in: Zhang et al. (Eds.) ", CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop Proceedings, August 18-22, Québec City, Québec, pp. II61-67.
- Beall, F. C. (1987). "Fundamentals of acoustic emission and acousto-ultrasonics." Proceedings of the 6th Nondestructive Testing of Wood Symposium. Washington. pp. 3-28.
- Beall, F. C. (2002). "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties." *Wood Science and Technology*, 36, 197-212.

Blanco, M., Coello, J., Iturriaga, H., MasPOCH, S. et de la Pezuela, C. (1998). "Near-infrared spectroscopy in the pharmaceutical industry." *The Analyst*, 123, 135R-150R.

Bouslimi, B., Koubaa, A. et Bergeron, Y. (2014). "Anatomical properties in *Thuja occidentalis*: Variation and relationship to biological processes." *International Association of Wood Anatomists*, 35(4), 363-384.

Bouslimi, B., Koubaa, A. et Bergeron, Y. (2014). "Effects of biodegradation by brown-rot decay on selected wood properties in eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.)." *International Biodeterioration & Biodegradation*, 87 (87-98).

Brancheriau, L. (2013). "Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites". Dossier de synthèse. Académie de Montpellier, Université Montpellier 2. 122 p.

Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Gonçalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R. F., Potter, S., Ross, R. J., 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. (1995). "Acoustics of Wood." CRC Press Inc., New York. 420 p.

Bucur, V. et Archer, R. R. (1984). "Elastic constants for wood by an ultrasonic method." *Wood Science and Technology*, 18, 255-265.

Cailliez, F., Gril, J., Thibaut, B. (2002). "Le bois, écomatériau par excellence." La Jaune et La rouge. Magazine N° 578-2002. Disponible sur le site : [http://www.lajauneetlarouge.com/article/le-bois-ecomatériau-par-excellence#.WB\\_I2i3hAKI](http://www.lajauneetlarouge.com/article/le-bois-ecomatériau-par-excellence#.WB_I2i3hAKI) Consulté le 6 novembre 2016.

Carvalho, A., Paiva, J., Louzada, J. et Lima-Brito, J. (2013). "The transcriptomics of secondary growth and wood formation in conifers." *Molecular Biology International*, 1-12.

Chiu, C.-M., Lin, C.-H. et Yang, T.-H. (2013). "Application of nondestructive methods to evaluate mechanical Properties of 32-Year Old Taiwan Incense Cedar (*Calocedrus formosana*) wood." *BioResources*, 8(1), 688-700.

Cramer, S., Kretschmann, D., Lakes, R. et Schmidt, T. ( 2005). "Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine." *Holzforschung*, 59, 531–538.

De Oliveira, F. G. R. et Almir, S. (2006). "Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods." *Bioresource Technology*, 97, 2443–2446.

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, 297–300.

Denne, M. P. (1988). "Définition of late wood according to Mork (1928)." *IAWA Bulletin*, 10, 59-62.

Dubus, C. (2014). "Structure du bois étude de la coupe transversale écorce aubier cœur cerne bois parfait ou duramen résineux feuillus." Présentation disponible sur le site SlidePlayer : <http://slideplayer.fr/slide/502990/%20/> Consulté le 6 novembre 2016.

Dumont-Fillon, J. (1996). "Contrôle non destructif (CND)." *Techniques de l'Ingénieur R 1400*. 42 p.

Emerson, R. N., Pollock, D. G., Kainz, J. A., Fridley, K. J., McLean, D. L. et Ross, R. J. (1998). "Nondestructive evaluation techniques for timber bridges " *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 1, 670-675.

Evans, R., Gartside, G. et Downes, G. (1995). "Present and prospective use of Silviscan for wood microstructure analysis." *Appita annual conference*, 91-96.

Evans, R. et Ilic, J. (2001). "Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density." *Forest Products Journal*, 51 (3), 53-57.

Everett, T. H., Weber, L. M., Berlyn, G. P. (2007). "Tree structure and growth." Encyclopaedia britannica. Disponible sur le site <https://www.britannica.com/plant/tree/Tree-structure-and-growth>. Consulté le 6 novembre 2016.

Feio, A. J. d. O. (2005). "Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour." Thèse de doctorat. University of Minho. 208 p.

Haines, D. W., Leban, J. M. et Herbe, 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, 253-263.

Hassan, K. T. S., Horacek, P. et Tippner, J. (2013). "Evaluation of stiffness and strength of Scots Pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques." *"Dynamic test of wood" bioresources*, 8(2), 1634-1645.

Haygreen, J. G., Shmulsky, R. et Bowyer, J. L. (2005). "Le bois et ses usages." *Forest Products and Wood Science*. 528 p.

Hernández, R., Koubaa, A., Beaudoin, M. et Fortin, Y. (1998). "Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones " *Wood and fiber science*, 30 (2), 138-147.

Horáček, P. et Tippner, J. (2012). "Nondestructive evaluation of static bending properties of Scots Pine wood using stress wave technique." *Wood Research*, 57(3), 359-366.

- Ivkovic, M. et Rosenberg, P. (2004). "A method for describing and modelling of within-ring wood density distribution in clones of three coniferous species." *Annals of Forest Science*, 61, 759–769.
- Jeong, G. Y., Zink-Sharp, A. et Hindman, D. P. (2009). "Tensile properties of earlywood and latewood from loblolly pine (*Pinus taeda*) using digital image correlation " *Wood and fiber science*, 41 (1), 51-63.
- Jones, P. D., Schimleck, L. R., Peter, G. F., Daniels, R. F. et Clark III, A. (2005). "Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia." *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 85-92.
- Jozsa, L. A. et Middleton, G. R. (1997). " Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. "Forintek Canada Corp. Division de l'Est. 42 p.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S. Y., Beaulieu, J. et Bousquet, J. (2005). "Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea Mariana* (Mill.) B.S.P.)." *Wood and fiber science*, 37 (3), 445-455.
- Koubaa, A., Schmittheisler, O. et Mvolo, C.-S. (2012). "Use of x-ray densitometry and high frequency ultrasonic tools for non-destructive assessment of juvenile-mature wood quality ": 4-20.
- Koubaa, A., Zhang, S. Y., Isabel, N., Beaulieu, J. et Bousquet, J. (2000). "Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce." *Wood and fiber science*, 32 (1), 61-71.
- Koubaa, A., Zhang, S. Y. T. et Makni, S. (2002). "Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry." *Annals of Forest Science*, 59, 511-518.

Kretschmann, D. E. (2010). "Mechanical properties of wood. " Wood handbook, wood as an engineering material. Forest Products Laboratory • United States Department of Agriculture Forest Service • Madison, Wisconsin: 5-1 - 5-44.

Lasserre, J.-P., Mason, E. G., Watt, M. S. et Moore, J. R. (2009). "Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood." *Forest Ecology and Management*, 258, 1924–1931.

Lei, J. (2005). "Forest resources of China. "Chinese forestry press, Beijing. 172p.

Martinis, R., Socco, L. V., Sambuelli, L., Nicolotti, G., Schmitt, O. et Bucur, V. (2004). "Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied." *Annals of Forest Science*, 61, 157–162.

Miller, R. (1999). "Structure of Wood; Wood handbook-Wood as an engineering material." General technical report. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin. 463 p.

Mishiro, A. (1996). "Effect of density on ultrasonic velocity in wood." *Mokuzai Gakkaishi*, 42 (9), 887-894.

Mitchell, H. L. (1961). "A concept of intrinsic wood quality and nondestructive methods for determining quality in standing timber." *Report No. 2233, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin*.

Mork, E. (1928). "Die qualität des fichtenholzes unterbesonderer rücksichtnahme auf schleif-und papierholz." *Der Papier-Fabrikant*, 26, 741-747.

Najafi, S. K., Bucur, V. et Ebrahimi, G. (2005). "Elastic constants of particleboard with ultrasonic technique." *Science Direct Materials letters*, 59, 2039-2042.

Panshin, A. J. et de Zeeuw, C. (1980). "Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada." New York, NY. 722 p.

Park, Y.-I. D., Koubaa, A., Brais, S. et Mazerolle, M. J. (2009). "Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of jack pine grown in boreal stands." *Wood and fiber science*, 41 (4).

Pernestål, K., Jonsson, B. et Larsson, B. (1995). "A simple model for density of annual rings." *Wood Science and Technology*, 29, 441-449.

Polge, H. (1963). "L'analyse densitométrique de clichés radiographique. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois." *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de la Station de Recherches et Experiences*, 20, 1-37.

Polge, H. (1964). "Le Bois juvénile des conifères " *Revue Forestière Française*, 16, 474-489.

Polge, H. (1966). "Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Applications dans les domaines Technologique et Physiologique." *Annals of Forest Science*, 23, 1-77.

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.

Roszyk, E., Molinski, W. et Kaminski, M. (2016). "Tensile properties along the grains of earlywood and latewood of scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in dry and wet state." *BioResources*, 11 (2), 3027-3037.

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, 385–394.

Sales, A., Candian, M. et Cardin, V. d. S. (2011). "Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques." *Construction and Building Materials*, 25, 1450–1454.

Schimleck, L. R., Evans, R. et Ilic, J. (2001). "Estimation of Eucalyptus delegatensis wood properties by near infrared spectroscopy." *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1671–1675.

So, C., Via, B. K., Groom, L. H., Schimleck, L. R., Shupe, T.F., Kelley, S.S et Rials, T.G. (2004). "Near infrared spectroscopy in the forest products industry ." *Forest products journal*, 54 (3), 6-16.

Sobue, N. (1986). "Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a FFT spectrum analyser." *Mokuzai Gakkaishi*, 32 (9), 744 -747.

Sohi, A. M. A., Khademi-Eslam, H., Hemmasi, A. H., Roohnia, M. et Talaiepour, M. (2011). "Nondestructive detection of the effect of drilling on acoustic performance of wood." "*Wood acoustics*," *BioResources*, 6(3), 2632-2646.

Wang, X., Carter, P., Ross, R. J. et Brashaw, B. K. (2007). "Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials." *Forest Products Journal*, 57, 6-13.

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 united states department of agriculture," Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL–GTR–147. 12 p.

Wang, X., Ross, R. J., McClellan, M., Barbour, R. J., Erickson, J. R., Forsman, J. W. et McGinnis, G. D. (2001). "Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method." *Wood and Fiber Science*, 33 (4), 522-533.

Wiedenhoef, A. (2010). "Structure and function of wood. Wood handbook, wood as an engineering Material. " Forest Products Laboratory • United States Department of Agriculture Forest Service • Madison, Wisconsin. 3-2 - 3-16.

Yang, J.-L. et Fortin, Y. (2001). "Evaluating strength properties of *Pinus radiata* from ultrasonic measurements on increment cores." *Holzforschung*, 55, 606–610.

Zhang, S. Y., Nepveu, G. et Eyono Owoundi, R. (1994). "Intratree and intertree variation in selected wood quality characteristics of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*)." *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1818-1823.

Zhenbo, L., Yixing, L., Haipeng, Y. et Junqi, Y. (2006). "Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels." *Frontiers of Forestry in China*, 4, 425–430.

Zobel, B. et Van Buijtenen, J. (1989). Wood variation: its causes and control. Springer-Verlag, Berlin, 363 p.