



HAL
open science

Caractérisation mécanique de la loupe de thuya (*Tetraclinis Articulata* (Vahl) Masters) en vue de sa valorisation

Mohammed El Mouridi

► **To cite this version:**

Mohammed El Mouridi. Caractérisation mécanique de la loupe de thuya (*Tetraclinis Articulata* (Vahl) Masters) en vue de sa valorisation. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. Français. NNT : . tel-00805175

HAL Id: tel-00805175

<https://theses.hal.science/tel-00805175>

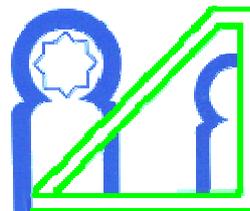
Submitted on 28 Mar 2013

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

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



UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
Sciences et Technique du Languedoc



UNIVERSITÉ MOHAMMED V
Faculté des Sciences de Rabat

T H È S E en COTUTELLE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II
Ecole Doctorale : Information, Structures, Systèmes
Spécialité : Mécanique et Génie Civil
et le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MOHAMMED V
Discipline : Sciences de l'ingénieur
Spécialité : Sciences du Bois

Caractérisation mécanique de la loupe de thuya (*Tetraclinis Articulata* (Vahl) Masters) en vue de sa valorisation

Par

Mohammed EL MOURIDI

Soutenance prévue le 15 décembre 2011 devant le jury composé de :

Abdelilah BENYOUSSEF	Pr UM5 (FSR, Maroc)	President
Rachid EL GUERJOUMA	Pr UM (LAUM, France)	Rapporteur
Abdessadek SESBOU	Pr (ENFI, Maroc)	Rapporteur
Thomas DELAUNAY	MC UM2 (IES, France)	Examineur
Joseph GRIL	DR CNRS (LMGC, France)	Directeur de thèse
Abdelillah HAKAM	Pr UM5 (FSR, Maroc)	Co-directeur de thèse
Abderrahim FAMIRI	Dr (CRF, Maroc)	Co-encadrant
Thierry LAURENT	PrAg UM2 (LMGC, France)	Co-encadrant
Olivier ARNOULD	MC UM2 (LMGC, France)	Invité
Tancrède ALMERAS	CR CNRS (LMGC, France)	Invité
Loïc Brancheriau	Dr (CIRAD, France)	Invité
Mohammed EL KORTBI	Ing (CTIBA, Maroc)	Invité
Didier LAUX	MC UM2 (IES, France)	Invité

Remerciement

Table des matières

REMERCIEMENT	4
TABLE DES MATIÈRES	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	11
1.1 INTRODUCTION : PROBLÉMATIQUE DE LA LOUPE DE THUYA AU MAROC	11
1.1.1 Généralités sur le thuya du Maroc	11
1.1.1.1 Caractéristiques botaniques.....	11
1.1.1.2 Caractéristiques écologiques.....	12
1.1.1.2.1 Facteurs climatiques	13
1.1.1.2.2 Facteurs édaphiques.....	13
1.1.1.2.3 Facteurs orographiques	13
1.1.1.2.4 Régénération du thuya.....	13
1.1.1.3 Mode de traitement du thuya.....	14
1.1.1.4 Répartition géographique du thuya	14
1.1.2 La loupe de thuya	15
1.1.2.1 Définition d'une loupe.....	15
1.1.2.2 Loupe de thuya.....	17
1.1.2.3 Utilisation du bois de la loupe de thuya marocain	17
1.1.3 Rôle socioéconomique du bois de thuya et de la loupe de thuya.....	17
1.1.4 Caractéristiques physiques et mécaniques du thuya.....	19
1.1.5 Présentation de la problématique de la loupe de thuya au Maroc.....	19
1.1.5.1 Aléas climatiques et sécheresse répétitive.....	19
1.1.5.2 Le surpâturage.....	20
1.1.5.3 L'extraction de la gomme sandaraque	20
1.1.5.4 La surexploitation du secteur artisanal	20
1.1.5.5 Solutions envisagées	21
1.1.5.5.1 A court terme.....	21
1.1.5.5.2 A long terme.....	22
1.1.6 Conclusions.....	23
1.2 STRUCTURE ET ANISOTROPIE DU MATÉRIAU BOIS	24
1.2.1 A l'échelle macroscopique.....	24
1.2.2 A l'échelle microscopique	26
1.2.2.1 Le tissu et la cellule.....	26
1.2.2.2 La paroi cellulaire	27
1.3 DÉTERMINATION DES SYMÉTRIES MATÉRIELLES.....	29
1.3.1 Introduction.....	29
1.3.2 Généralités sur les ultrasons	29
1.3.3 Méthodes ultrasonores par immersion	30
1.3.4 Méthode par contact direct.....	31
1.3.5 Conclusions.....	32
PARTIE A : CARACTÉRISATION STRUCTURELLE MULTI-ÉCHELLE DE LA LOUPE DE THUYA	33
2 ANALYSE À L'ÉCHELLE DE LA LOUPE	34
2.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	34
2.1.1 Matériel végétal	34
2.1.2 Méthode : Tomographie X.....	34
2.1.2.1 Présentation de la tomographie X.....	34

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

2.1.2.2	Principe de fonctionnement du scanner à rayons X	35
2.1.2.3	Acquisition de la série de radiographies.....	36
2.1.2.4	Outil de reconstruction tomographique.....	37
2.2	RÉSULTATS ET ANALYSE	37
2.2.1	<i>Analyse de la loupe entière</i>	37
2.2.2	<i>Analyse de la distribution et de l'orientation des excroissances</i>	39
2.3	CONCLUSIONS	44
3	ANATOMIE DE LA LOUPE ET DU BOIS DE THUYA	44
3.1	INTRODUCTION	44
3.2	MATÉRIEL ET MÉTHODE	45
3.2.1	<i>Matériel végétal</i>	45
3.2.2	<i>Méthode</i>	45
3.3	RÉSULTATS	46
3.3.1	<i>Bois de thuya</i>	46
3.3.2	<i>Loupe de thuya</i>	48
3.4	DISCUSSION	50
3.5	CONCLUSION	50
	PARTIE B : CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT ÉLASTIQUE DE LA LOUPE DE THUYA	52
4	CARACTÉRISATION MÉCANIQUE À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE	53
4.1	MATÉRIEL ET MÉTHODE	53
4.1.1	<i>Matériel végétal</i>	53
4.1.2	<i>Dispositif expérimental</i>	54
4.2	RÉSULTATS ET ANALYSES.....	57
4.2.1	<i>Plateau entier</i>	57
4.2.2	<i>Échantillons parallélépipédiques</i>	58
4.2.3	<i>Échantillons cubiques</i>	63
4.3	CONCLUSION	65
5	MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE ULTRASONORE PAR CONTACT DIRECT SUR ÉCHANTILLONS SPHÉRIQUES.....	67
5.1	PRINCIPE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	67
5.1.1	<i>Principe</i>	67
5.1.2	<i>Préparation des échantillons</i>	69
5.1.3	<i>Création d'un outil de traçage</i>	69
5.1.4	<i>Création d'un outil de repérage</i>	70
5.1.5	<i>Interfaces de contact échantillon-transducteur</i>	71
5.2	MATÉRIELS.....	72
5.2.1	<i>Matériau isotrope de référence : alliage d'aluminium 2017A</i>	72
5.2.2	<i>Matériau orthotrope homogène : bois de hêtre</i>	74
5.3	TRAITEMENT DES DONNÉES.....	74
5.3.1	<i>Modélisation théorique du problème direct</i>	75
5.3.2	<i>Résolution du problème inverse</i>	78
5.3.2.1	Principe de la résolution par la méthode des moindres carrés	78
5.3.2.2	Pondération du critère d'erreur	79
5.3.2.3	Solution analytique (unicité de la solution et séparabilité des termes)	80
5.4	VALIDATION DE LA MÉTHODE	80
5.4.1	<i>Numérique</i>	80
5.4.1.1	Matériau au comportement isotrope : alliage d'aluminium	80

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

5.4.1.2	Matériau au comportement orthotrope : hêtre.....	81
5.4.2	<i>Expérimentale</i>	84
5.4.2.1	Mesure du temps de vol.....	84
5.4.2.2	Matériau au comportement orthotrope : hêtre.....	85
5.5	CONCLUSIONS.....	88
6	CARACTÉRISATION PAR SPECTROSCOPIE ULTRASONORE RÉSONANTE	90
6.1	INTRODUCTION	90
6.2	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	90
6.2.1	<i>Dispositif expérimental</i>	90
6.2.2	<i>Préparation des échantillons</i>	91
6.2.3	<i>Traitement des données</i>	92
6.3	RÉSULTATS	93
6.3.1	<i>Validation de la méthode sur un échantillon de matériau isotrope (alliage d'aluminium)</i>	93
6.3.2	<i>Validation de la méthode sur un échantillon de matériau orthotrope (bois de hêtre)</i>	93
6.4	CONCLUSION	94
7	APPLICATION AU CAS DU THUYA À L'ÉCHELLE MÉSOSCOPIQUE.....	96
7.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL.....	96
7.1.1	<i>Bois de thuya</i>	96
7.1.2	<i>Loupe de thuya</i>	96
7.2	RÉSULTATS	98
7.2.1	<i>Méthode ultrasonore sur échantillon sphérique</i>	98
7.2.1.1	Bois de thuya	98
7.2.1.2	Loupe de thuya.....	101
7.2.2	<i>Spectroscopie ultrasonore résonante</i>	104
7.2.3	<i>Discussion</i>	104
7.3	COMPARAISON ENTRE ANATOMIE ET ANISOTROPIE ÉLASTIQUE	105
7.3.1	<i>Bois de thuya</i>	105
7.3.2	<i>Loupe de thuya</i>	109
7.4	CONCLUSION	111
8	CONCLUSION GÉNÉRALE	112
9	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115

Introduction générale

Au Maroc, la forêt de thuya joue un rôle économique et social important pour les populations locales. Cependant, ces dernières décennies, cette forêt connaît une dégradation importante notamment à cause de la surexploitation du thuya par le secteur artisanal pour répondre à une forte demande du marché.

Le thuya est souvent connu pour sa loupe : un renflement de sa souche se développant au niveau du collet et de la racine. Cette loupe offre un bois de bonnes qualités (dur, homogène et à grain fin), mais c'est surtout pour son aspect esthétique qu'elle est recherchée. En effet, la présence de petites excroissances foncées noyées dans la matière ligneuse plus claire confère à ce bois un remarquable moucheté. Cette loupe de thuya est donc très appréciée des ébénistes et des marqueteurs dont la plus grande concentration d'artisans marocains est localisée à Essaouira.

Ce bois de loupe de thuya se travaille actuellement de manière traditionnelle et empirique, conduisant à la production importante de déchets. Pour remédier, à court terme, à la raréfaction de cette matière première, la voie d'investigation choisie dans ce travail consiste donc à limiter les déchets d'usinage. Cet objectif passe par la caractérisation du matériau et notamment l'identification du réseau de symétries matérielles, dont on sait l'importance qu'elles revêtent pour l'usinage du bois en général. En effet, à ce jour, ce matériau n'a fait l'objet d'aucune étude de caractérisation physico-mécanique.

L'objectif principal de cette thèse est donc de caractériser le bois de la loupe de thuya, et en particulier d'identifier son réseau de symétries matérielles en relation avec sa structure interne. Pour cela, nous avons développé deux axes de recherche :

- Un axe de « caractérisation multi-échelle » par tomographie X à l'échelle macroscopique de la loupe entière et par analyse de coupes anatomiques à l'échelle microscopique.
- Un deuxième axe, concernant l'étude du comportement mécanique (anisotropie élastique) de la loupe de thuya. Pour ce faire, nous avons développé un nouveau banc expérimental de mesure ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques permettant de déterminer les symétries matérielles d'un matériau.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme « Averroès » d'échanges universitaires entre l'Europe et les pays du Maghreb et a été soutenu par deux projets franco-marocains, à savoir :

- Un projet de Recherche Agronomique pour le développement (P.R.A.D. 08/08 n°16878 WC, géré par Egide) intitulé « Détermination des axes principaux d'anisotropie, caractérisation technologique et valorisation de la loupe de thuya (*tetraclinis articulata*) par le tranchage et sciage » ;
- Un projet de coopération CNRS (France) / CNRST (Maroc) intitulé « contrôle des paramètres de découpes de la loupe de thuya en vue d'une utilisation rationnelle en marqueterie et en ébénisterie ».

Cette thèse est constituée de deux parties A et B faisant suite à une étude bibliographique. Dans cette dernière (chapitre 1), nous présentons des données sur le thuya et la loupe de

thuya, le rôle socio-économique de la forêt de thuya, la problématique de la surexploitation de cette matière première et les solutions envisagées à court terme et à long terme pour remédier à la raréfaction de cette ressource ainsi qu'une description des propriétés physico-mécaniques du matériau bois (anisotropie, relation entre structure interne et comportement).

La première partie A traite de la caractérisation multi-échelle du bois de la loupe de thuya, elle est composée de 2 chapitres :

- Le chapitre 2 est centré sur l'analyse de la structure interne à l'échelle de la loupe entière par tomographie X. Cette technique non destructive a permis de visualiser en 3D la distribution des cernes de croissance et des excroissances au sein d'une loupe.
- Le chapitre 3 est consacré à l'étude de la structure du bois de la loupe de thuya à l'échelle microscopique. Pour ce faire, nous avons effectué une analyse comparative des coupes anatomiques du bois de thuya et de la loupe de thuya dans le but d'étudier l'effet de la présence des excroissances au sein du bois de la loupe.

La deuxième partie (B) est consacrée à l'étude de l'anisotrope élastique du bois de la loupe de thuya, elle est composée de 4 chapitres :

- Le chapitre 4 donne une première caractérisation mécanique à l'échelle d'un plateau longitudinal de loupe, par une méthode ultrasonore par contact direct. Cette caractérisation concerne la dispersion des rigidités dans trois directions orthogonales définies à partir de la direction longitudinale de l'arbre.
- Le chapitre 5 présente la mise au point d'une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques avec la validation théorique et expérimentale de cette méthode sur deux matériaux aux comportements différents, pris comme matériaux de référence : un alliage d'aluminium (isotrope) et un bois de hêtre (orthotrope).
- Le chapitre 6 propose une perspective de ce travail et notamment de la caractérisation mécanique du matériau. En effet, la méthode développée au chapitre 5 est bien indiquée pour identifier les symétries matérielles d'un matériau et permet d'obtenir, pour un matériau orthotrope, les 3 termes diagonaux de la matrice de rigidité et une combinaison des 6 autres. L'application de la méthode de Spectroscopie Ultrasonore Résonante (RUS) à des échantillons cubiques taillés au sein des échantillons sphériques et selon les directions identifiés grâce à la méthode par contact direct, permet d'atteindre l'intégralité des coefficients de la matrice de rigidité du bois de la loupe de thuya.
- Le chapitre 7 est consacré à l'étude de l'anisotropie du bois de la loupe de thuya. Dans ce chapitre nous présentons l'application de la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques de bois de thuya et de loupe. Ce chapitre traite aussi l'étude de la relation structure interne-anisotropie élastique du bois de thuya et de la loupe à l'échelle macroscopique (quelques cm^3). L'étude de la structure interne est réalisée en utilisant la tomographie X et celle de l'anisotropie par la méthode ultrasonore détaillée dans le chapitre 5.

À la fin de cette thèse, nous présenterons une conclusion générale dans laquelle nous rappellerons les principaux résultats obtenus et nous proposerons quelques perspectives d'études complémentaires.

Cette thèse a donné lieu à deux publications dont les références sont mentionnées ci-dessous :

1. M. El Mouridi, T. Laurent, A. Famiri, B. Kabouchi, T. Alméras, G. Calchera, A. El Abid, M. Ziani, J. Gril, A. Hakam. 2011. « Caractérisation physique et mécanique du bois de la loupe de thuya », *Phys. Chem. News*, vol 59 : 57-64.
2. M. El Mouridi, T. Laurent, L. Brancheriau, O. Arnould, A. Famiri, A. Hakam, J. Gril. 2011. Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples. *Maderas-Cienc Tecnol.* 13(3).

1 Étude bibliographique

1.1 Introduction : Problématique de la loupe de thuya au Maroc

1.1.1 Généralités sur le thuya du Maroc

1.1.1.1 Caractéristiques botaniques

Le thuya de berbérie (ou du Maghreb), *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast, appartient à l'ordre des Pinales, famille de Cupressacées, sous famille des Callitroidées, genre Tetraclinis. C'est la seule espèce représentant ce genre dans l'hémisphère nord (Boudy 1950). C'est une espèce endémique de la méditerranée sud occidentale et surtout du Maghreb (Dakak 2002).

Le thuya est une espèce résineuse à croissance très lente, longévive et qui peut dépasser 400 ans dans les marabouts (Boudy 1950). En hauteur, l'accroissement annuel est estimé de 20 cm/an jusqu'à 25 ans, et de 10 cm/an jusqu'à 60 ans. En diamètre, il est de 3 à 4 mm/an jusqu'à 30 ans et de 1,5 à 2,5 mm/an jusqu'à 60 ans. Ces chiffres dépendent de plusieurs paramètres notamment, la profondeur du sol et les précipitations annuelles. Le thuya est considéré comme un arbre de 3^{ème} grandeur, sa hauteur dépasse rarement les 15 m avec valeur moyenne est de 6 à 7 m. Dans des conditions exceptionnellement favorables le thuya peut atteindre 20 m de hauteur voir plus dans les marabouts et les endroits inaccessibles à l'homme (Boudy 1952). Le diamètre d'un thuya à 1,30 m de hauteur est de l'ordre de 0,20 à 0,30 m en moyenne dans les peuplements traités en taillis et allant de 0,50 à 0,60 m dans les vieilles futaies comme témoignent certains arbres trouvés dans des stations maraboutiques d'Essaouira (Boudy 1952).



Figure 1: Arbre de thuya

Le port est de forme pyramidal (Figure 1) et il tend à s'étaler en parasol avec l'âge. Le fût est bien rectiligne et il peut atteindre 3 à 5 m de long. La partie utilisable comme bois d'œuvre a souvent une longueur inférieure à 3 m. Ce fût est couvert par une écorce crevassée dans les deux sens qui est peu épaisse et forme une sorte de quadrillage serré. L'écorce contient des canaux résinifères renfermant une résine exploitable (gomme sandaraque).

La ramification est implantée à la tige avec des inclinaisons très variables. Les branches sont de faibles dimensions. Les jeunes rameaux sont aplatis et composés d'articles formés de feuilles opposées ce qui lui attribue le nom de l'espèce articulata.

Les racines de thuya sont généralement traçantes et peuvent aussi être pivotantes dans des situations particulières. Elles donnent un réseau serré et dense pour fixer solidement l'arbre dans les sols rocheux et déclives. Cette espèce émet abondamment les rejets de souche jusqu'à un âge très avancé.

1.1.1.2 Caractéristiques écologiques

La grande partie de l'aire des tétraclinaies du Maroc se trouve dans l'étage bioclimatique semi-aride à variante tempérée, douce, chaude et très chaude (Fennane 1982). Elles peuvent se développer aussi dans le sub-humide à variante chaude, douce ou tempérée sur sols filtrants, sur des fortes pentes ou sur expositions chaudes (Fennane 1987).

1.1.1.2.1 Facteurs climatiques

- **Précipitation**

Le thuya est peu exigeant en eau, son optimum pluviométrique se situe entre 250 et 600 mm/an (Fennane 1984). La neige, facteur lié au froid, limite le développement en altitude de thuya qui souvent cède la place au chêne vert et au genévrier rouge (Taoufiki 1993).

- **Température**

De point de vue température, l'optimum thermique du thuya se situe dans les variantes douces, tempérées et chaudes. L'arbre n'est jamais présent dans les zones froides. Il est rarement présent dans les zones où la moyenne des minima est entre 0 et 2,3°C. Les valeurs moyennes des maxima du mois le plus chaud sont généralement entre 28 et 38°C (Fennane 1984).

1.1.1.2.2 Facteurs édaphiques

- **Substrats**

Le thuya est connu par son tempérament plastique et sa résistance, ces deux caractères lui permettent de coloniser tous types de substrats allant des plus meubles (sables d'Essaouira) aux plus compacts (calcaire jurassique du Rif et Atlas) et des plus tendres (marne, argile) aux plus résistants (grés, quartzite) (Hatimi 1994).

- **Sols**

Le thuya pousse sur des sols peu profonds de type rendzine, sur des sols bruns ou rouges et sur des sols superficiels à horizons peu différenciés ou dégradés (Fennane 1987), d'où son intérêt dans des milieux difficiles.

1.1.1.2.3 Facteurs orographiques

Le thuya occupe une frange altitudinale importante, comprise entre le bord de la mer et 1000 m dans le Maroc septentrional, 1500 à 1700 m dans le Maroc méridional. Cette large frange explique la grande diversité des écosystèmes organisés par ce résineux (Fennane 1982).

1.1.1.2.4 Régénération du thuya

La régénération de thuya est assurée par rejet de souche, par semi et par plantation.

- Régénération par semi : la régénération naturelle par semis ne participe qu'à titre occasionnel et complémentaire aux autres modes de multiplication de thuya (Boudy 1950). Elle ne se manifeste que rarement en raison de l'influence du surpâturage, de la dégradation du couvert végétal et par conséquent l'érosion du sol. L'irrégularité des précipitations constitue aussi un facteur limitant pour ce type de régénération (Ben Abid 1976).
- Régénération par rejets de souche : le thuya est parmi les rares résineux qui ont la faculté d'émettre des rejets de souches. La régénération est assurée par rejets de souche, il en résulte qu'à l'état actuel, la majorité des tétraclinaies est traitée en taillis. La faculté de rejeter les souches peut aller jusqu'à l'âge de 250 ans.
- Régénération par plantation : à l'exception de quelques plantations réalisées au cours des années 1950-1960 à l'est du pays, cette essence a été délaissée par le reboiseur.

Celui-ci l'a exclu du programme régulier du Plan National de Reboisement (PNR) et ne l'a retenue que dans le cadre du programme prospectif.

1.1.1.3 Mode de traitement du thuya

Deux principaux modes de traitement peuvent être envisagés pour le thuya : le taillis simple et le taillis sous futaie.

Le traitement du taillis simple est appliqué soit pour les peuplements à l'état pur ou en mélange, et est recommandé dans les stations caractérisées par des conditions écologiques généralement moins favorables.

Quand au taillis sous futaie, il est appliqué pour des peuplements possédant de grandes potentialités de production jugées suffisantes pour produire, à long terme, du bois d'œuvre de calibre utilisable pour la marqueterie. Au lieu de faire une coupe à blanc-étoc, 30 à 40 beaux pieds par hectare sont réservés et seront susceptibles de donner, à long terme, du bois d'œuvre.

1.1.1.4 Répartition géographique du thuya

Le thuya est une essence endémique à l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie) à l'exception de quelques îlots au Sud-Est de l'Espagne et sur l'île de Malte.

En Afrique du Nord, il occupe une superficie d'environ 30000 ha en Tunisie et 143000 ha en Algérie. C'est au Maroc où cette espèce couvre une aire beaucoup plus étendue qui représente 80% des tetraclinaies Nord Africaines (Fennane 1982). Au Maroc, les peuplements de thuya occupent une superficie d'environ 566000 ha [www.eauxetforets.gov.ma/fr/text.aspx?id=1061], cette superficie peut se diviser en 6 grandes zones forestières (Terre et Vie) :

- Zone Rifaine : le thuya constitue des peuplements assez importants souvent denses et riches en espèce mésophiles, sur le versant méditerranéen qui est beaucoup plus chaud et sec que le versant atlantique (Fennane 1982).
- Zone Maroc orientale : le thuya constitue l'essence principale de la région.
- Zone du Moyen atlas oriental
- Zone des vallées du plateau central et de la Meseta occidentale : les tetraclinaies de cette zone sont les plus souvent hétérogènes et cantonnées dans les principales vallées des Oueds tels que Beht, Bou Regreg, Kourifla et Nfifikh (Fennane 1982).
- Zone Moyen Atlas occidentale et de haut Atlas : cette zone englobe les piémonts Nord Atlantiques, les revers sud du Haut Atlas, le haut Atlas occidentale et la région d'Essaouira.
- Zone de l'Anti Atlas

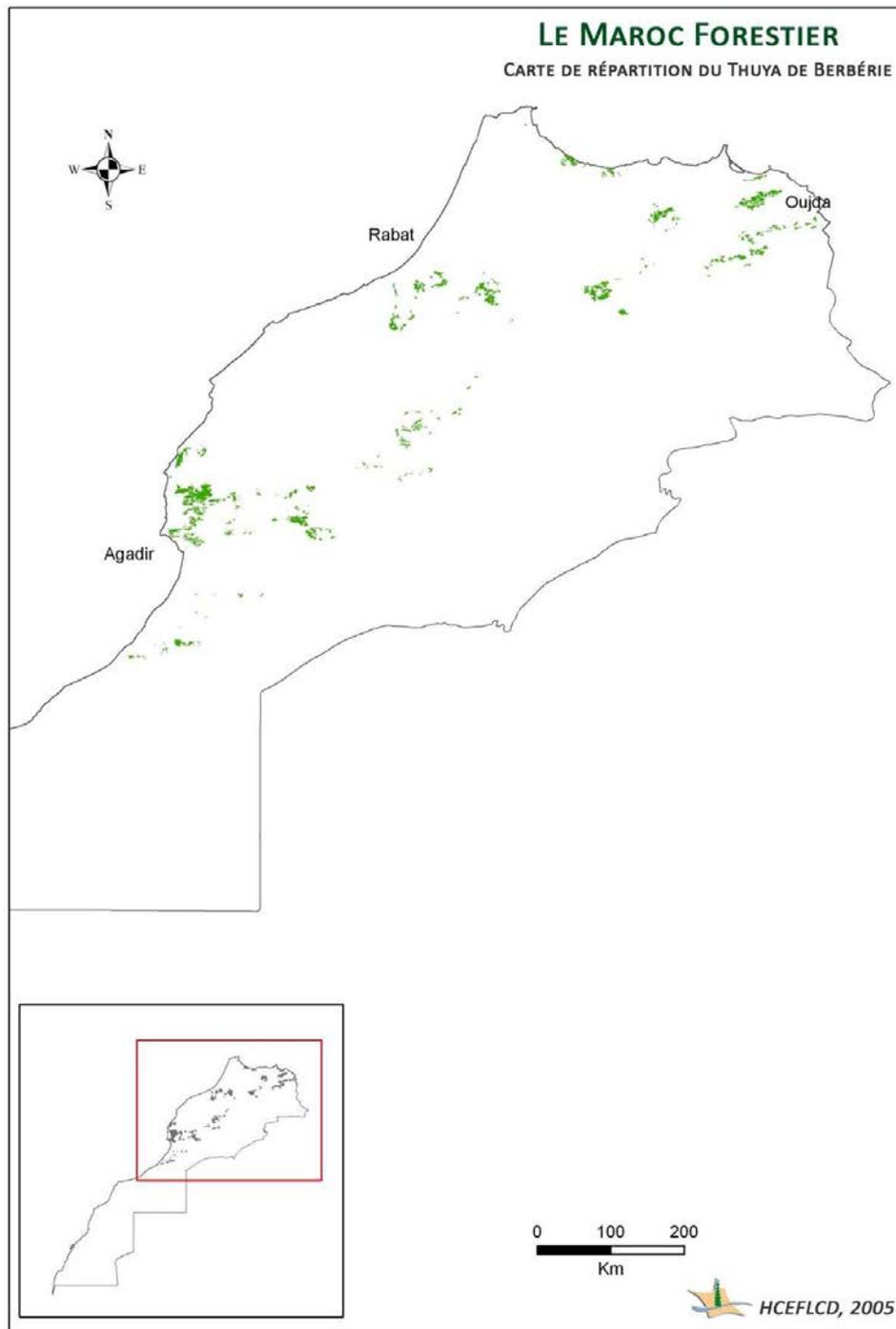


Figure 2 : Répartition géographique du thuya au Maroc
[www.eauxetforets.gov.ma/fr/text.aspx?id=1061]

1.1.2 La loupe de thuya

1.1.2.1 Définition d'une loupe

Une loupe est une boule, parfois énorme, qui pousse sur le tronc des arbres. C'est une réaction de l'arbre, provoquée par un certain nombre de facteurs. Elle est considérée comme une anomalie ou une singularité de l'arbre, lui conférant un caractère de rareté, cependant, elle n'est pas une maladie. Son apparence, très caractéristique, est visible sur la partie extérieure de l'arbre par une excroissance de petites pousses formant une ou un ensemble de grappes de

petits nœuds. Ces grappes peuvent envelopper partiellement ou entièrement le tronc ou les racines (la souche). L'écorce prend alors un aspect gonflé et gercé laissant apparaître, sous la pression de nouvelles pousses, des picots (petits tétons ou petites feuilles). Ces pousses, souvent minuscules, cachées sous l'écorce, ne dépassent pas la taille de quelques millimètres, voire un à deux centimètres suivant les essences. Elles feront place à d'autres pousses formant ainsi progressivement la loupe. Les loupes croissent avec un rythme accéléré par rapport au bois normal. En effet, les cernes de croissance à l'intérieur de la loupe montrent des cernes plus larges que celles du reste de l'arbre.

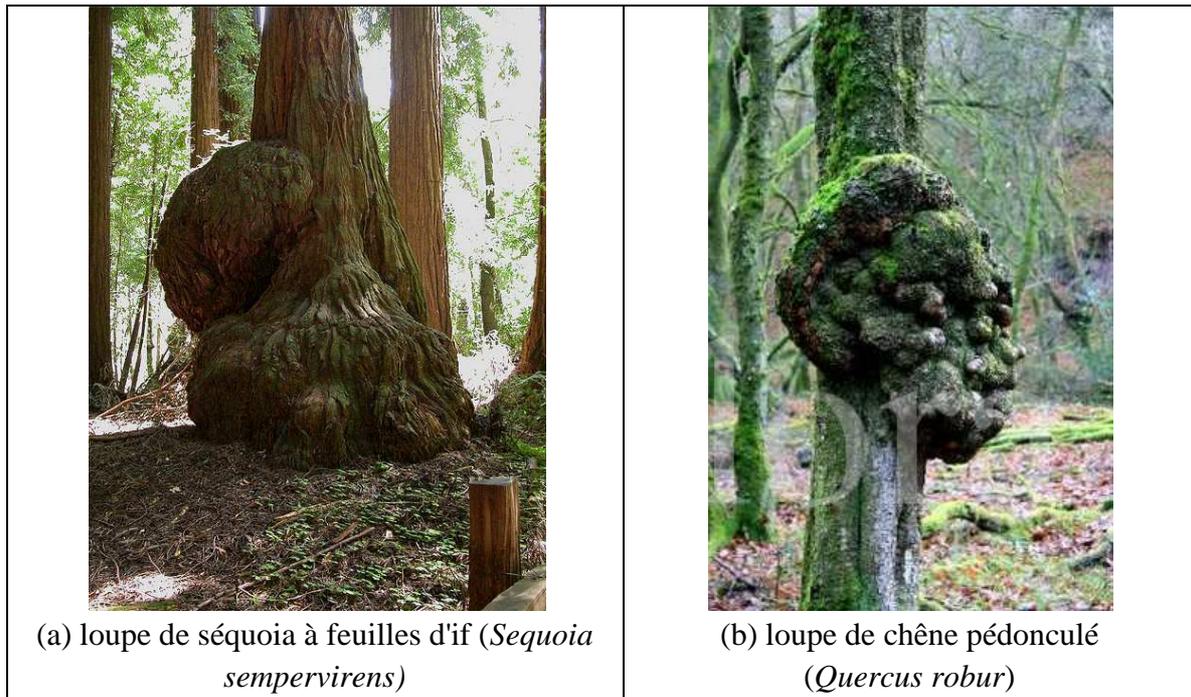


Figure 3 : Loupes sur le tronc des arbres : (a) loupe de séquoia à feuille d'If (www.bbs.keyhole.com/ubb/ubbthreads.php?ubb=showflat&Number=1375487) (b) loupe du chêne pédonculé (www.imageflora.com/Large-Gall-Burr-on-English-Oak-in-Woodland-on-Exmoor-Devon-Engalnd-0005860700)

Jusqu'à présent, personne ne sait exactement pourquoi une loupe se forme et peu de recherches ont été faites pour découvrir les raisons de cette croissance. La plupart spéculent que les loupes peuvent être le résultat d'une formation de galle (une tumeur ou une croissance des tissus en réponse à une attaque par les champignons, les insectes ou les bactéries). Les arbres répondent souvent aux attaques de ces producteurs de galle en formant des tissus mous, en réponse à des produits chimiques injectés par l'attaquant. D'autres pensent que cette déformation n'est rien qu'un dérèglement du cambium qui s'est mis à créer une prolifération tourbillonnaire de cellules, créant ainsi une grosse boule de bois. Des agressions d'origine humaine (blessures) par le biais d'élagage réguliers ou par son bétail peuvent être la cause du développement de la loupe.

Il est à noter que certaines essences sont plus disposées que d'autres à créer une loupe et que le nombre d'arbres qui produisent de la loupe est assez faible. Les arbres les plus connus sont (Figure 3) : l'orme, le frêne, l'eucalyptus, le chêne, le charme, l'érable, l'amboine, le padouk et le peuplier. De plus, pour une même essence et sur un lieu identique, plusieurs

arbres fournissent des loupes de dimensions différentes et d'autres n'en fournissent pas du tout. Ce phénomène n'est donc pas encore clarifié.

1.1.2.2 Loupe de thuya

L'une des particularités du thuya c'est la formation, chez certains sujets, d'une énorme verrue au niveau de collet et de la racine et qui donne naissance avec l'âge à une loupe (Figure 4) dont le poids varie usuellement entre 25 et 100 kg. Selon (Boudy 1950), l'origine de cette protubérance est attribuée aux mutilations répétées (blessures, incendie...) auxquelles l'arbre réagit en formant des bourgeons au niveau de collet. Le thuya est parmi les rares arbres qui développent une loupe en dessous de la souche et pas sur le tronc.

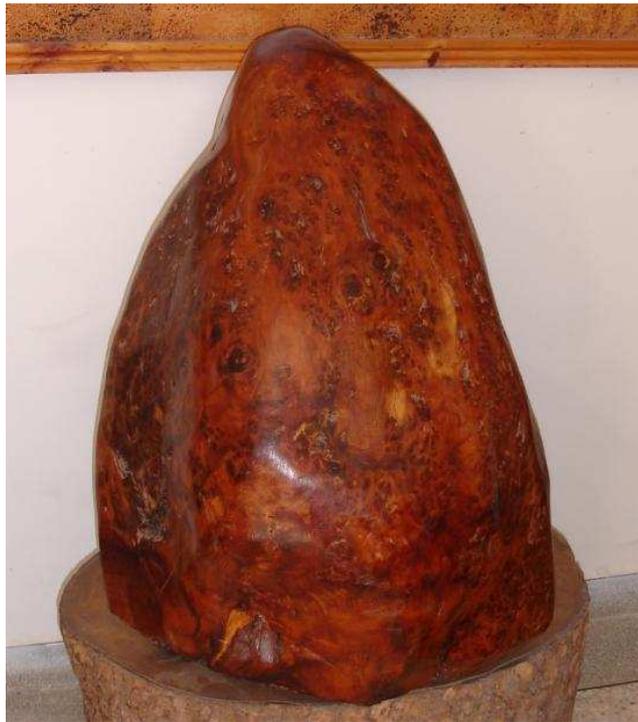


Figure 4 : Loupe de thuya

1.1.2.3 Utilisation du bois de la loupe de thuya marocain

La loupe de thuya offre un bois d'excellentes qualités technologiques. C'est un bois dur, homogène et à grains fins, il a été toujours recherché par les artisans ébénistes et les marqueteurs d'Essaouira en raison de son aspect esthétique (moucheté, Figure 4). Les loupes de thuya sont utilisées principalement pour produire des ouvrages d'art, des meubles de luxe et des outils. Il est utilisé aussi dans le placage industriel (voulons et tableaux de bord de voiture de haute gamme).

1.1.3 Rôle socioéconomique du bois de thuya et de la loupe de thuya

Au Maroc, les forêts de thuya jouent un rôle socio-économique important dans le cadre de la satisfaction des besoins locaux des populations riveraines en matière de parcours (pour le bétail), produits ligneux (bois d'œuvre, bois de feu, bois de service et les loupes), gomme sandaraque, tanin, goudron végétal et la production de miel :

- Bois d'œuvre : composé de madriers et de loupes, il est destiné à la production d'objets artisanaux. Avec le développement de la marquèterie, l'approvisionnement en bois d'œuvre de thuya est devenu problématique, vu l'offre trop limitée. Les madriers et loupes, qui se font de plus en plus rares, proviennent des vieux et gros arbres dépérissants ou morts sur pieds appartenant à des vieux peuplements qui n'ont jamais fait l'objet d'exploitation régulière.
- Bois de service : constitué de perches et de perchettes destinées généralement à la construction d'habitats (toiture) en milieu rural et en agriculture. Elles sont cédées par l'administration des eaux et forêts à titre de menus produits à des prix symboliques.
- Bois de feu : utilisé pour le chauffage ou carbonisé pour obtenir du charbon de qualité moyenne, la production moyenne annuelle en bois de feu pour la période de 1990-2002 est de l'ordre de 5190,5 stères pour une superficie moyenne annuelle de 169,72 ha sans parler des prélèvements illicites que connaissent toutes les forêts de thuya (Khotbi 2004).
- Gomme sandaraque : l'écorce peu épaisse de thuya contient des canaux résinifères où circule une résine dite gomme sandaraque qui a été longtemps exploitée dans la région d'Essaouira. Cette exploitation, souvent anarchique, est l'une des origines des mutilations de nombreux peuplements. Le rendement moyen est de l'ordre de 10 g/brin (Khotbi 2004). Ce produit est exporté en totalité à l'étranger pour être utilisé dans la fabrication des vernis de luxe et en pharmacie.
- Tanin : peu utilisé en artisanat mais reste d'utilisation locale et médicinale.
- Goudron végétal : obtenu par distillation et exploité en faible quantité pour les besoins locaux.

La production moyenne, réalisée durant la période de 1980 à 1990, est présentée dans le Tableau 1. Les recettes forestières s'élèvent à 1157236 Dh soit l'équivalent de 105203€ (Terre et Vie).

	bois d'œuvre	bois de feu	bois de service
Production moyenne	3798 loupes et 3380 m ³ de bois	321418 stères	59440 unités de perche et de perchette

Tableau 1 : Production moyenne de bois d'œuvre, bois de feu et bois de service pour la période de 1980 à 1990.

Dans le secteur artisanal, le travail de bois de thuya (marquèterie, ébénisterie...) est localisé principalement dans la ville d'Essaouira. Au Maroc ce secteur emploie environ 7000 artisans répartis sur Essaouira (près de 4.000), Khemisset et Agadir (Bulletin d'artisan 2007). En 1990, les exportations des produits artisanaux sont de l'ordre de 3134776 Dh (Terre et Vie).

Le secteur artisanal connaît un essor remarquable et contribue largement au développement économique et social par l'absorption d'une main d'œuvre importante, la création de l'emploi aussi bien pour le monde urbain que rural, la réalisation d'importantes recettes en devise, développement de l'activité touristique (exemple ville d'Essaouira) et la valorisation de certains produits forestiers.

De plus, le thuya joue aussi un rôle considérable dans la protection des sols. En effet, cette espèce constitue des peuplements dans des conditions très difficiles, comme les dunes d'Essaouira, et d'autres régions montagneuses où les peuplements du thuya assurent la protection contre l'érosion éolienne et pluviale.

1.1.4 Caractéristiques physiques et mécaniques du thuya

Réputé pour ses bonnes qualités esthétiques et technologiques, le bois de thuya a été toujours recherché par les artisans marqueteurs et ébénistes d'Essaouira. C'est un bois homogène, à grain fin, rouge brun avec un aubier blanc et assez mince. Il a une odeur aromatique très agréable et il est connu pour son caractère imputrescible. Grâce à ses nombreuses qualités esthétiques, notamment son bel aspect et son odeur, l'utilisation de bois de thuya est consacrée à la décoration.

Après séchage, le classement des bois débités fait ressortir une forte proportion de bois de bonne qualité, homogène, mais couvert de nombreux petits nœuds qui sont sans importance pour son emploi actuel. Les calibres des bois utilisés ne permettent d'ailleurs d'obtenir au débit que des pièces de dimensions faibles ou moyennes (Hatimi 1994). De points de vue caractéristiques technologiques, le thuya est un bois lourd ayant une faible hétérogénéité intracerne en comparaison avec d'autres espèces résineuses comme l'épicéa, le sapin et le cèdre (Dakak 2002). Son duramen présente une infradensité plus importante que celle de l'aubier. Son infra-densité moyenne est d'environ 590 kg/m^3 . Il a des bonnes caractéristiques mécaniques sauf pour la tenue à la rupture transverse. Son humidité à l'état vert est faible. Son séchage s'effectue rapidement, très facilement et avec des risques de fentes et de déformations très limités (Hatimi 1994). L'anisotropie de retrait du bois de thuya est faible, de l'ordre de 1,38 en moyenne, ce qui lui permet d'avoir une bonne stabilité dimensionnelle. Le retrait chez le thuya reste faible comparé à celui d'autres essences résineuses à l'exception du cèdre et du pin radiata (Hatimi 1994).

Les travaux réalisés par Dakak (Dakak 2002) sur des carottes de bois de thuya provenant de 12 stations différentes montrent que les ondes ultrasonores longitudinales se propagent dans celui-ci avec des vitesses moyennes qui valent : $V_{LL} = 4619 \text{ m/s}$, $V_{RR} = 1945 \text{ m/s}$ et $V_{TT} = 1359 \text{ m/s}$. Celles des ondes de cisaillement sont $V_{LT} = 1785 \text{ m/s}$, $V_{TL} = 1704 \text{ m/s}$, $V_{LR} = 1676 \text{ m/s}$ et $V_{RL} = 736 \text{ m/s}$. L'anisotropie acoustique est à peu près la même pour les 12 stations. Les valeurs moyennes d'anisotropie acoustique pour les ondes longitudinales sont : $V_{LL}/V_{RR} = 2,42$, $V_{LL}/V_{TT} = 3,43$ et $V_{RR}/V_{TT} = 1,42$. De même, pour les ondes de cisaillement : $V_{LT}/V_{TL} = 1,05$, $V_{LT}/V_{TR} = 2,44$ et $V_{LR}/V_{LT} = 0,94$. On retrouve ici les ordres de grandeurs usuels pour l'anisotropie élastique des bois.

1.1.5 Présentation de la problématique de la loupe de thuya au Maroc

Les forêts de thuya ont subi et subissent une dégradation importante. Cette dégradation est due à plusieurs facteurs notamment les aléas climatiques, la sécheresse répétitive, le surpâturage, l'extraction de la gomme sandaraque et la surexploitation du secteur artisanal. Les loupes de thuya sont ainsi devenues très rares à cause de leur exploitation abusive.

1.1.5.1 Aléas climatiques et sécheresse répétitive

Les aléas climatiques et la sécheresse répétitive affectent directement le développement des arbres et leur croissance. Ces dernières années, nous assistons à de graves problèmes de dépérissement des forêts de thuya marocaines. La désertification d'espaces jadis forestiers s'accélère au fur et à mesure de la disparition des arbres forestiers affaiblis par des pèjorations d'ordre édaphique, climatique et compliqué par l'action humaine.

Ce phénomène de désertification est la conséquence des problèmes de la dégradation du couvert, de l'érosion des sols et de la faible régénération des forêts. Dans ces situations, les arbres existants se trouvent rapidement exposés aux aléas du climat suite à la réduction de la densité et la perte de la productivité des sols, qui ne retiennent plus ni l'eau ni les éléments nutritifs.

Les arbres et les souches de thuya sont maintenant affaiblis, suite à une pratique forestière inappropriée depuis le début du 20^{ème} siècle à nos jours. Les coupes successives, la sécheresse chronique ces dernières années, ont exposées ces forêts de thuya à un dépérissement alarmant, aggravé certaines années par l'action des ravageurs défoliateurs et du bois.

1.1.5.2 Le surpâturage

La forêt de thuya constitue une zone importante de parcours et un espace de vie rurale dans lequel les populations en présence trouvent le pâturage pour le bétail. Elle contribue pour une large part aux unités fourragères nécessaires pour l'entretien des troupeaux. Cependant, ces populations ne se limitent pas à satisfaire leurs besoins mais opèrent un surpâturage même dans les zones interdites mettant ainsi en danger la pérennité de la forêt. La taille des troupeaux, dans beaucoup de cas, excède les potentialités productives des parcours. Ces troupeaux constituent, sur le plan social, un élément de stabilité des structures villageoises traditionnelles. Dans la forêt d'Amsitten, par exemple, des études ont montré que la charge du bétail est de 30 caprins/ha/an (Terre et Vie).

Le thuya est une espèce robuste et résistante et de nouvelles régénérations sont observées régulièrement mais qui, malheureusement, ne peuvent pas aboutir à de jeunes plantules et donner par la suite des arbres car elles sont très vite broutées par les chèvres en été lorsque l'herbe manque et que les animaux se convertissent à la biomasse foliaire des arbres forestiers, même résineuse. Il en découle à moyen et long termes, une absence quasi-générale de régénération.

1.1.5.3 L'extraction de la gomme sandaraque

Le gemmage, opération d'extraire la gomme sandaraque, entraîne des conséquences néfastes sur les brins exploités. Cette pratique désastreuse a entraîné la disparition de plusieurs tetraclineas. Pour palier aux inconvénients du gemmage, l'Administration des Eaux et Forêts a décidé en 1982 que seules les parcelles destinées à être recépées l'année suivante peuvent être parcourues par cette pratique.

1.1.5.4 La surexploitation du secteur artisanal

Les forêts de thuya ont subi une exploitation abusive, principalement, par le secteur artisanal qui est le plus consommateur du bois d'œuvre de thuya. L'enquête menée par (Hatimi 1994) auprès des artisans a montré, qu'à Essaouira, la quantité moyenne consommée en produits de thuya est de l'ordre de 212 kg de souches/artisan/mois et 4 madriers/artisan/mois. Ce secteur accuse un déficit sur le plan d'approvisionnement en matière première (madriers et loupes) suite à un déséquilibre entre l'offre et la demande de la matière première. Ce déséquilibre conduit à une surexploitation de bois mort sur pieds pour la confection des madriers et l'extraction de souches mortes. Actuellement, les vieux arbres capables de fournir des madriers de qualité sont très rares, les loupes sont aussi devenus très rares, d'où une réelle

difficulté dans l'approvisionnement en ce produit. Pour faire face à cette situation, l'approvisionnement en matière première est assuré par d'autres régions comme celles du Sud (Tensift) du Nord-Ouest (Khemisset). L'exploitation abusive des artisans marqueteurs dans les vieux peuplements et même sur les jeunes recépages a contribué à la diminution de la densité de ces forêts. Étant donné que le thuya est une espèce à croissance lente, la reconstitution des peuplements de thuya capables de fournir du bois d'œuvre nécessite une longue période et des mesures urgentes de bonne gestion. Actuellement, les forêts de thuya semblent répondre aux besoins en matière de bois de feu, bois de service et produits divers. Le déficit est globalement enregistré pour le bois d'œuvre destiné à l'artisanat.

1.1.5.5 Solutions envisagées

1.1.5.5.1 A court terme

- **Limitation des déchets**

L'inadéquation entre l'offre et la demande de la matière première (madriers et loupes) était la cause de l'augmentation des prix d'achat des loupes et madriers ces dernières années. Cette augmentation a incité les artisans marqueteurs à utiliser cette matière première d'une façon rationnelle afin de maximiser le revenu global en valorisant ces produits et en limitant les déchets. La limitation des déchets du bois de la loupe de thuya passe par l'amélioration de son tranchage et son sciage dans le but d'augmenter son rendement en usinage.

Avant d'être travaillé, le bois de thuya (madriers et loupes) doit subir les opérations de sciage et de tranchage. Les planches (plaques) débitées ont une épaisseur entre 4 et 10 mm. Ces opérations entraînent des pertes (ou déchets) énormes en bois, allant directement au feu, qui varient de 25 à 35% pour les madriers et de 30 à 50% pour les loupes. Le tournage amène ce pourcentage à 75% environ (Hatimi 1994).

Pour faire face à cette situation, il est nécessaire d'améliorer le sciage et le tranchage du bois de thuya et de la loupe de thuya par l'emploi de machines et de conditions de coupe plus adaptées à la technologie de ce bois.

- **Valorisation des produits fabriqués**

La valorisation des produits artisanaux est devenue une nécessité pour les artisans. La rareté de la matière première (loupes et madriers) utilisée dans la marqueterie, l'augmentation de son prix d'achat et l'augmentation d'effectif des artisans ont incité ces derniers à utiliser la matière première d'une façon plus rationnelle. Le travail de bois de thuya se fait maintenant avec beaucoup d'attention, les artisans essayent par leur savoir faire de valoriser de mieux en mieux la quantité de bois mise à leur disposition. Disposant par exemple de deux quantités égales en matière première, soit 65 kg, un artisan peut faire un coffret dont la valeur peut atteindre 15000 Dh alors qu'un autre peut faire 110 boîtes de 20 Dh chacune (Hatimi 1994).

La réalisation des nouveaux produits finis comme les placages de bois de loupe de thuya peut être une solution adéquate au problème étudié. En effet, la possibilité d'avoir un placage d'épaisseur de moins d'un millimètre, présentant une bonne qualité mécanique et esthétique, permet d'augmenter considérablement le rendement en matière première qui peut atteindre alors 80%.

1.1.5.5.2 A long terme

Comme nous l'avons signalé précédemment, tous les arbres de thuya ne possèdent pas de la loupe. Jusqu'à présent nous ne savons pas comment se forme la loupe ni les mécanismes à l'origine cette formation. La détermination des paramètres qui peuvent être à l'origine du déclenchement du processus de formation de la loupe permettrait, à long terme, de diminuer le problème de dépérissement de la forêt de thuya en réduisant la surexploitation de bois de thuya, et surtout de la loupe de thuya, par l'augmentation de la ressource. En effet, la forêt se régènerait plus vite en plantant des arbres pouvant donner des madriers, et surtout des loupes, de qualités technologiques et esthétiques meilleures. Ceci permettrait de maintenir les activités artisanales de marqueterie et d'ébénisterie qui ont, au Maroc, une grande importance économique et sociale.

Puisque le développement de la loupe peut être attribué aux mutilations répétées (paragraphe 1.1.2.2), une étude a été menée au Centre de Recherche Forestière (CRF) dans le but de déterminer les mécanismes à l'origine du déclenchement du processus de formation de la loupe de thuya. Cette étude consiste à appliquer plusieurs types de stress sur des jeunes arbres de thuya. Ces stress correspondent à ce que les arbres peuvent subir durant leur vie et devraient permettre d'identifier celui ou ceux qui sont à l'origine de la formation de la loupe. Les différents types de stress appliqués aux arbres de thuya sont : brûlure, blessure verticale à l'aide d'un rasoir, un simple garrottage à l'aide de ces branches, double garrottage, piquetage, mutilation. Des arbres de thuya qui n'ont subi aucun stress sont utilisés comme échantillon témoin.

En 2001, trois dispositifs expérimentaux ont été réalisés dans la pépinière du Centre de Recherche Forestière de Rabat (Figure 5) en plantant 288 arbres de thuya (96 arbres par dispositif). Après 8 ans de croissance, une première exploitation a été faite pour voir s'il y a formation d'une loupe et quel type de stress est responsable de cette formation. Sept arbres (1 échantillon par stress plus un témoin) ont été exploités (tronc et loupe) et scannés par tomographie X dans le cadre de cette thèse.



Figure 5 : Pépinière de CRF, plantation de jeunes thuyas

1.1.6 Conclusions

Cette thèse est principalement focalisée sur le développement de solutions à court terme et donc sur la diminution des déchets lors du travail de la loupe de thuya. Or, en général, la qualité de l'usinage du bois repose sur les symétries naturelles (anisotropie) du matériau qui découlent de son mode de croissance (Thibaut 1988). La loupe de thuya ne présente pas les mêmes symétries naturelles que le bois présent dans le tronc. En suivant la même logique, l'amélioration de la coupe de la loupe de thuya passe alors, dans un premier temps, par l'identification de ses symétries matérielles et mécaniques. Le bois de la loupe de thuya a fait l'objet de très peu d'études bien qu'il possède des caractéristiques différentes du bois trouvé dans le tronc. Il est travaillé de façon traditionnelle avec des connaissances empiriques.

Nous nous attacherons donc principalement à caractériser ce bois d'un point de vue anatomique et mécanique. La caractérisation des symétries du comportement mécanique (i.e., directions principales) a été effectuée d'un point de vue du comportement élastique uniquement. En effet, il est plus simple de caractériser ce type de comportement que celui à la rupture. Ainsi, nous utilisons ici le fait que, dans le cas du bois au moins, il y a une corrélation très forte entre les symétries du comportement à la rupture et celles du comportement élastique. En effet, ces deux comportements sont fortement dépendants de la structure anatomique, et des symétries matérielles, du matériau (Smith, Landis, et Gong 2003). C'est pourquoi nous mettrons aussi en relation la structure particulière de la loupe et les directions principales de son comportement élastique anisotrope. La loupe se développant dans l'arbre, nous commencerons par étudier le bois de thuya.

1.2 Structure et anisotropie du matériau bois

Le bois est un matériau poreux, hétérogène, perméable, fortement anisotrope et hygroscopique (Navi et Heger 2005). C'est matériau composite naturels, cellulaire à fibres orientées (Figure 6).

Par définition, l'anisotropie correspond au fait que les propriétés physiques d'un matériau dépendent de la direction de sollicitation. Dans le cas du bois, l'anisotropie est présente à toutes les échelles de sa structure : macroscopique, microscopique et nanoscopique. L'échelle macroscopique sera toujours relative, dans notre cas, à un échantillon de dimensions variant entre quelques centimètres et une dizaine de centimètres (loupe entière et petits échantillons). L'échelle microscopique ira de l'échelle du tissu (cerne, ensemble de cellules) à celle de la paroi cellulaire. L'échelle nanoscopique sera l'échelle des molécules constitutives (cellulose, hémicellulose, lignine...). Le schéma de la Figure 6 illustre les différents échelles de la structure du matériau bois (ces des résineux), de l'arbre à la molécule.

Afin de bien comprendre l'origine du comportement anisotrope du matériau bois, nous présentons dans les paragraphes suivants une description plus détaillée de sa structure à l'échelle macroscopique puis microscopique. Le passage entre ces échelles nous amène à mettre en relation l'anatomie du bois et ses propriétés physiques et mécaniques.

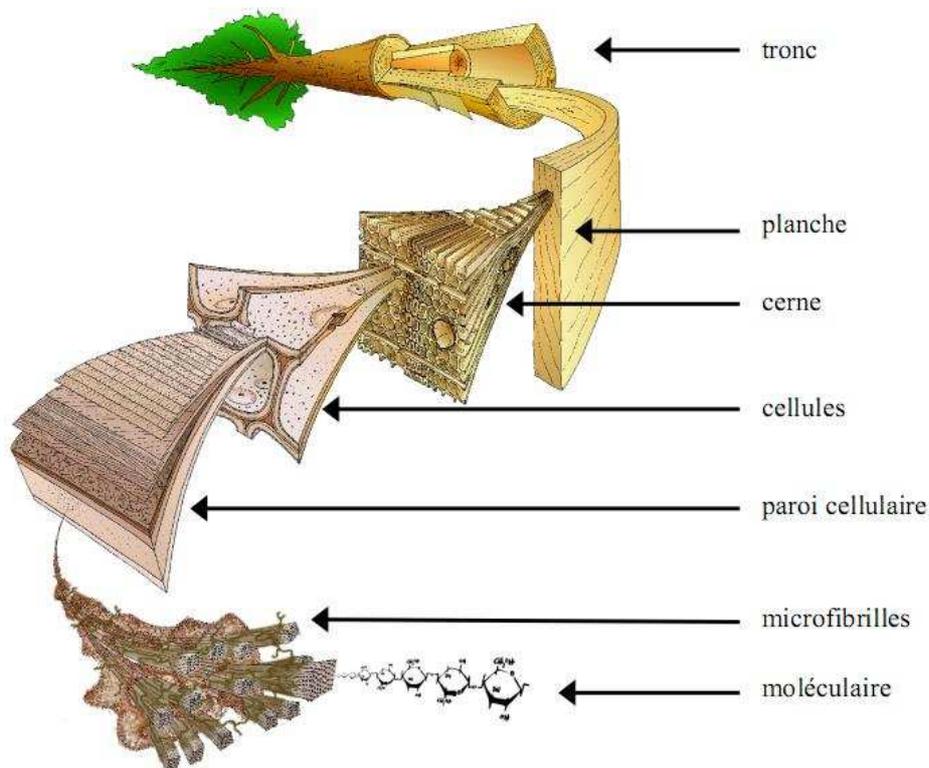


Figure 6 : Différentes échelles dans le bois (Harrington, 1996)

1.2.1 A l'échelle macroscopique

A cette échelle, le bois se présente sous forme des couches concentriques, cernes annuels de croissance, qui correspondent aux accroissements annuels de l'arbre. L'aubier, partie

extérieure du tronc, est constitué d'environ 10% de cellules vivantes (i.e., les parenchymes (Navi et Heger 2005)) et a pour rôle la conduction de la sève brute (principalement en périphérie). La partie intérieure du tronc, appelée duramen ou bois de cœur, est constituée de cellules mortes qui n'ont qu'un rôle de soutien mécanique de la structure que constitue l'arbre. Généralement le duramen se distingue de l'aubier par une couleur plus foncée (Figure 7) obtenue par la sécrétion de phénols oxydés (extractibles) favorisant la durabilité du bois.

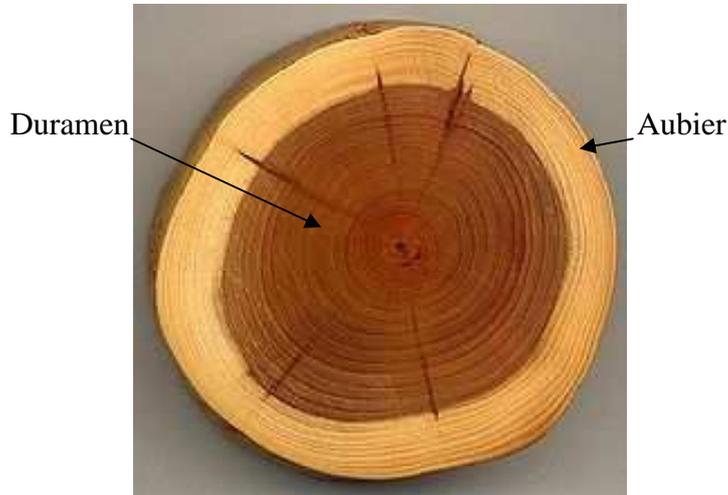


Figure 7 : Aubier (zone claire) et duramen (zone foncée)

Un cerne de croissance annuelle est composé de deux types de bois différents (Figure 8) : le bois initial et le bois final. Le bois initial, ou de printemps, est composé des cellules ayant un lumen de grand diamètre et une épaisseur de paroi cellulaire relativement réduite, ce qui explique son principal rôle de conduction. Contrairement au bois initial, le bois final, ou d'été, est composé de cellules ayant un lumen de plus faible dimension et une épaisseur de paroi cellulaire plus importante, ce qui explique son principal rôle de soutien mécanique (Figure 9). Le bois initial apparaît à l'échelle macroscopique plus clair que le bois final car sa densité est plus faible. Cette organisation « macroscopique » de la structure du bois entraîne trois directions principales d'anisotropie (Figure 8) : la direction longitudinale (L), dans la direction des fibres, la direction radiale (R), dirigée du cœur vers l'écorce, et la direction tangentielle (T) aux cernes. Ces directions sont associées à des plans caractéristiques : transverse (perpendiculaire à L), plan radial (perpendiculaire à T et passant par la moelle) et tangentiel (perpendiculaire à R et ne passant pas par la moelle). On dit que le bois, à cette échelle, a un comportement (quasi)orthotrope en coordonnées cylindriques aussi bien pour ses propriétés physiques (e.g., retrait) que mécaniques (élasticité, rupture, etc.).

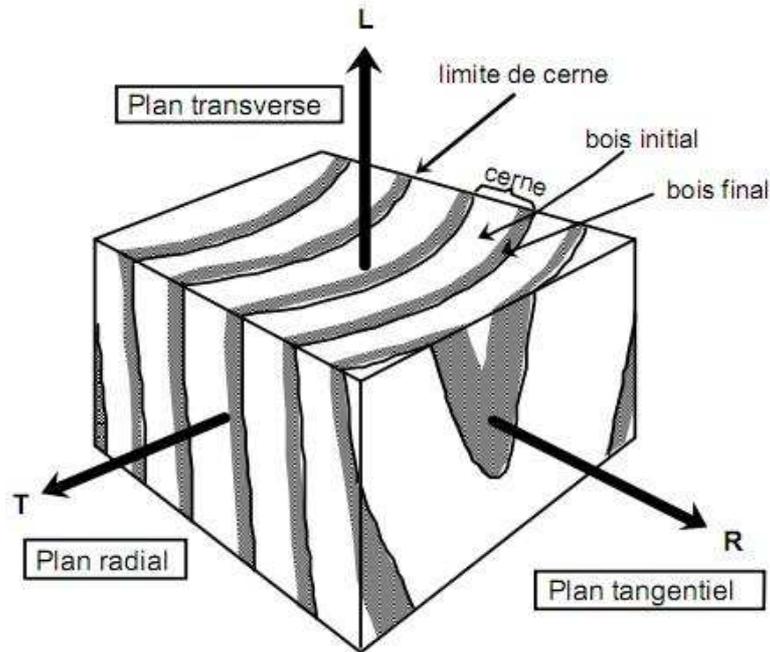


Figure 8 : Plans de symétrie naturelle du matériau bois

L'échelle d'observation macroscopique ne fait intervenir que des volumes élémentaires suffisamment grands par rapport à la microstructure cellulaire. La caractérisation physique et surtout la prédiction du comportement du matériau à cette échelle est rendue difficile par la présence d'irrégularités locales et d'une hétérogénéité induite par les différentes phases de croissance qui induisent de fortes variabilités dans sa réponse à une sollicitation.

1.2.2 A l'échelle microscopique

1.2.2.1 Le tissu et la cellule

La structure cellulaire du bois à cette échelle (Figure 9) est de type « nid d'abeilles » avec des cellules longitudinales (à peu près 90%) qui sont principalement des trachéides (cas des résineux) (Navi et Heger 2005). Ces cellules ont une épaisseur négligeable devant leur longueur, le rapport longueur-largeur est de l'ordre de 100:1. Elles assurent le rôle de soutien mécanique et de conduction de la sève à l'aide de ponctuations entre cellules. Les autres types de cellules, disposées radialement, sont des parenchymes qui constituent les rayons ligneux. Elles jouent un rôle de conduction radiale et de stockage de nutriments. L'arrangement des cellules conserve les directions principales vues dans la Figure 8.

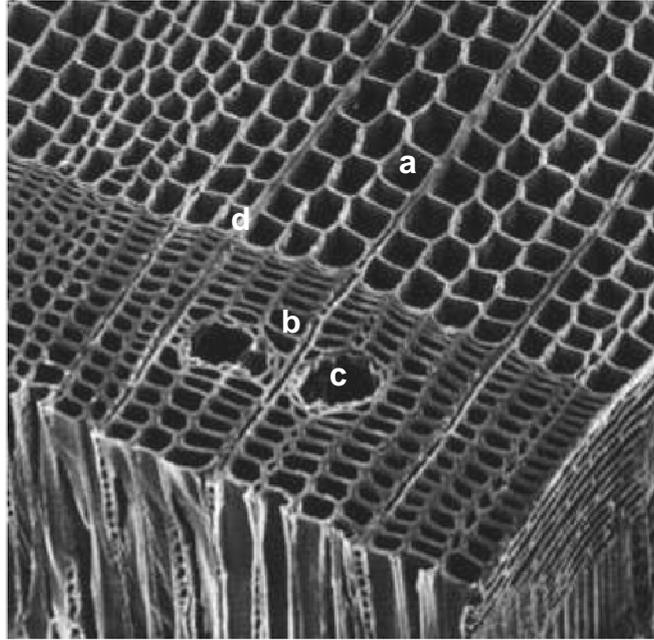


Figure 9 : Micrographie MEB (~300×300 μm) du plan ligneux d'un bois de résineux (d'après B. Clair) : (a) trachéide dans le bois de printemps, (b) trachéide dans le bois d'été, (c) canal résinifère et (d) rayon ligneux.

1.2.2.2 La paroi cellulaire

Même à l'échelle de la paroi cellulaire, l'hétérogénéité est présente. En effet, la paroi cellulaire est formée par un empilement de couches de composition, épaisseur et orientation des directions principales différentes (Figure 10). En allant de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule, nous trouvons en premier, la lamelle mitoyenne (ML) qui assure le lien entre les cellules, puis la paroi primaire (P) et finalement la paroi secondaire qui est généralement composée de trois sous couches appelée S1, S2 et S3. La paroi primaire est la paroi initiale de la cellule vivante. La paroi secondaire est déposée lors du développement de la cellule.

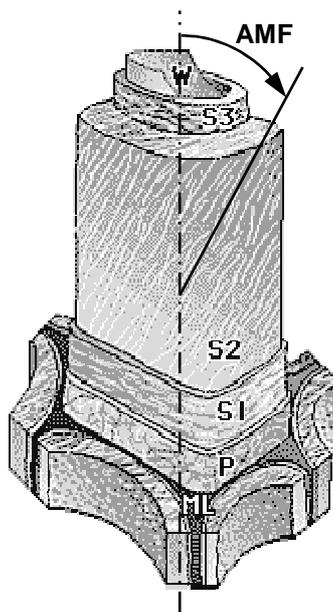


Figure 10 : Différentes couches de la paroi cellulaire et angle MF des microfibrilles dans la sous-couche S2 d'après (Koch 1985)

L'épaisseur de la lamelle mitoyenne est de l'ordre du micromètre, celle de la paroi primaire est encore plus faible, elle est de l'ordre d'un dixième de micromètre. La lamelle mitoyenne est principalement composée de pectines et de lignines qui sont des polymères amorphes. La paroi primaire est principalement de lignine, d'hémicellulose et d'un réseau de microfibrilles de cellulose paracristalline sans orientation particulière.

La paroi secondaire représente la couche la plus épaisse et elle est composée de trois sous-couches de lignine, d'hémicellulose et de microfibrilles de cellulose, cristalline à environ 70% et de quelques nm de diamètre (élanement supérieur à 10000), disposées en hélice autour du lumen. Chaque sous-couche est similaire à un matériau composite à fibres de cellulose orientées dans une matrice de lignine et d'hémicelluloses (Salmen 2004). La première sous-couche, appelée S1, a une épaisseur faible (0,1 à 0,35 μm) et des microfibrilles qui font un angle avec l'axe longitudinal de la cellule qui varie entre 60° et 80°. La deuxième sous-couche, appelée S2, est la couche la plus épaisse, son épaisseur pouvant varier de 1 à 10 μm . Elle constitue la majeure partie de la paroi cellulaire (jusqu'à 85% de l'épaisseur). Elle est constituée d'environ $\frac{1}{4}$ de lignine, $\frac{1}{4}$ d'hémicellulose et $\frac{1}{2}$ de cellulose paracristalline (Panshin et De Zeeuw 1970). L'angle des microfibrilles dans celle-ci varie de 0° à 30°. Cette couche étant la plus épaisse avec la plus grande quantité de cellulose et des microfibrilles quasi-alignées avec la direction L, elle est le déterminant principal des propriétés élastiques à l'échelle macroscopique. C'est pourquoi on relève usuellement son angle de microfibrilles qui est appelé AMF (Figure 10). La troisième sous-couche, appelée S3, est une couche fine (de 0,5 à 1,1 μm) où les microfibrilles sont arrangées de façon similaire à la couche S1 avec un angle allant de 60° à 90°. L'intérieur de la cellule, contenant éventuellement de la sève, est appelé lumen.

Le comportement global de la paroi cellulaire est à nouveau de type orthotrope en coordonnées cylindriques suivant l'axe de la cellule. Chacune des couches de la paroi secondaire a un comportement quasi-isotrope transverse avec comme première direction principale celle des microfibrilles de cellulose. Quelque soit l'essence, la matière ligneuse constituant la paroi cellulaire est, en première approximation, identique. C'est pourquoi il est possible de prédire le comportement élastique macroscopique orthotrope du bois à l'aide de relations empiriques dites de Guitard (Guitard 1987) basées sur la densité du bois (quantité de matière ligneuse), le type de bois (i.e., résineux ou feuillus pour la différence d'organisation et de type de cellules) et la teneur en eau (effet plastifiant de l'eau sur les polymères amorphes comme les hémicelluloses principalement). Il est possible d'affiner les prédictions du comportement élastique en tenant compte dans un second temps de l'angle des microfibrilles AMF de la sous-couche S2 puis des variations de composition chimiques (quantité de cellulose, extractibles, etc.) et enfin de l'arrangement et de la répartition du type de cellules.

1.3 Détermination des symétries matérielles

1.3.1 Introduction

Selon Dieulesaint et Royer (Dieulesaint et Royer 1974), il existe huit groupes de symétrie matérielle à savoir : triclinique, monoclinique, orthotrope, trigonal, tétragonal, isotrope-transverse, cubique et isotrope. Le cas triclinique ne possède aucun plan de symétrie matérielle, c'est le groupe le plus anisotrope. La matrice de rigidité contient 21 coefficients indépendants. Le groupe monoclinique présente un seul plan de symétrie matérielle, le nombre des coefficients de la matrice de rigidité est réduit à 13. Dans le cas du groupe de symétrie orthotrope nous disposons 3 plans de symétrie matérielle orthogonaux, le nombre des coefficients de la matrice de rigidité est réduit à 9.

Les symétries matérielles et/ou le comportement mécanique de certains matériaux, en particulier biologiques (e.g., bois, os) et géologiques (e.g., roches des différentes couches du manteau terrestre), sont mal connus. Pour cela, la recherche de symétries matérielles de ces types de matériaux fait l'objet de nombreuses études utilisant des méthodes différentes. Les méthodes de caractérisation mécanique, (visco)élastique, des matériaux à l'échelle macroscopique sont diverses (Degallaix et Ilschner, B. 2007) : sollicitations uniaxiales ou multi-axiales à différentes vitesses (i.e., du quasi-statique au dynamique) sur éprouvette standard au sein d'une machine d'essai (type presse hydraulique, électromécanique, DMA, etc.), analyse vibratoire des résonances d'une éprouvette (dans le domaine acoustique généralement) et propagation d'ondes diverses, généralement dans le domaine ultrasonore. Les méthodes reposant sur la mesure de temps de propagation (ou de vol) d'ondes ultrasonores sont généralement bien adaptées pour caractériser les symétries matérielles (élastiques), déterminer le comportement mécanique (viscoélastique) [(Bucur 2006) ; (Kohlhauser et al. 2009)] et pour fournir des indications sur les propriétés structurales d'un matériau (symétrie matérielle). Ces méthodes sont particulièrement adaptées à l'étude des matériaux biologiques et géologiques, car elles permettent de mesurer les propriétés élastiques sur des échantillons de petite taille (François, Geymonat, et Berthaud 1998). De plus, les données les plus complètes sur les constantes élastiques des matériaux ont été déterminées en mesurant le temps de vol d'impulsions sonores (Maynard, 1996).

1.3.2 Généralités sur les ultrasons

Les ultrasons sont des ondes élastiques (vibrations mécaniques) prenant naissance et se propageant dans tout milieu matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique). La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Les ondes ultrasonores peuvent être produites en utilisant soit des matériaux piézoélectriques, un laser ou des transducteurs électromagnétiques.

Il existe deux types d'onde ultrasonore : les ondes ultrasonores de compression de polarisation longitudinale (Figure 11), les plus rapides, où les particules matérielles se déplacent parallèlement à la direction de propagation en engendrant des fronts de

compression-décompression perpendiculaires à cette direction de propagation ; et les ondes ultrasonores de cisaillement de polarisation transversale (Figure 12) pour lesquelles les particules matérielles se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation.

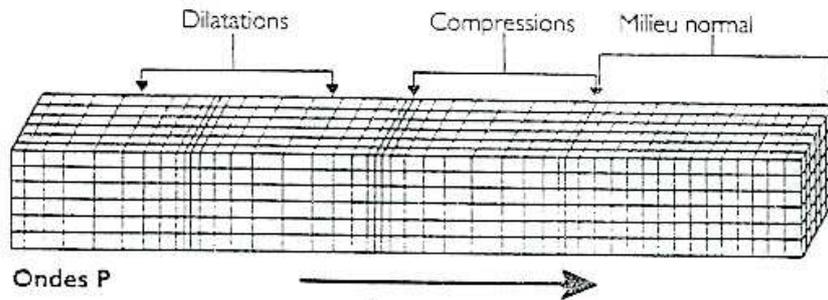


Figure 11 : Propagation d'une onde ultrasonore longitudinale
[<http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html>]

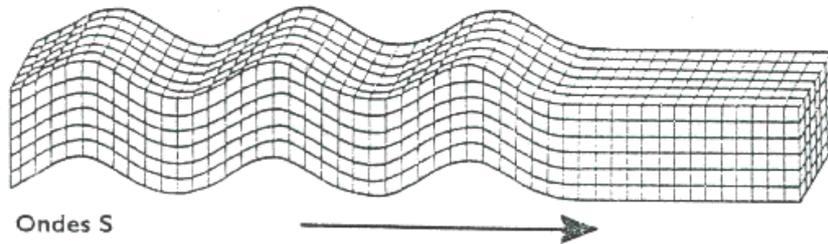


Figure 12 : Propagation d'une onde ultrasonore transversale
[<http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html>]

Les vitesses de propagation (en m/s) des ondes ultrasonores longitudinales (V_L) et transversales (V_T), dans les milieux élastiques isotropes, sont liées aux caractéristiques du matériau par les relations suivantes :

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} < V_L < \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

avec E le module d'Young, C le module de rigidité ou G le module de cisaillement (en Pa), ν le coefficient de Poisson, ρ la masse volumique (en kg/m^3). Pour les ondes longitudinales, les bornes de la vitesse de propagation dans l'équation correspondent respectivement : i) au mode « barre longue » où l'onde se propage dans toute la section de l'échantillon avec une longueur d'onde grande par rapport aux dimensions de la section ; ii) au mode « milieu infini » pour de faibles longueur d'onde par rapport aux dimensions de l'échantillon.

Il existe au moins deux grandes catégories de méthodes ultrasonores : la méthode ultrasonore par contact direct et la méthode ultrasonore par immersion.

1.3.3 Méthodes ultrasonores par immersion

La méthode par immersion a été développée dès le début des années 70 [(Markam 1970) ; (Vinh 1981) ; (Preziosa et al. 1981) ; (Hosten et Castagnède 1983) ; (Hosten et Deschamps

1983)]. Le principe de cette méthode consiste à exciter un échantillon au moyen d'une onde ultrasonore longitudinale plane, et à observer les variations de la vitesse de propagation de l'onde en fonction de l'angle d'incidence et de la direction de propagation. Des transducteurs ultrasonores génèrent ses ondes qui se propagent à travers un liquide couplant (e.g., eau, huile, ...) avant de traverser l'échantillon. Les échantillons utilisés ont généralement une forme géométrique parallélépipédique. La vitesse de propagation étant directement reliée aux constantes élastiques, elle permet de déterminer une rigidité apparente dans la direction de propagation. Pour déterminer intégralement la matrice de rigidité d'un matériau orthotrope, il est nécessaire de disposer de 3 échantillons taillés suivant les axes de symétrie ou principaux d'orthotropie et d'utiliser les 2 types d'onde ultrasonore. Par exemple, dans le cas du bois, il est nécessaire de disposer de 3 échantillons de bois sont nécessaires et doivent être taillés le long de la même fibre suivant L, pour limiter la variabilité entre les échantillons et selon trois plans LR, LT et RL (Figure 13). Cette technique a été développée au LMGC dans le cadre de la thèse de Pierre Bérard (Bérard 2003).

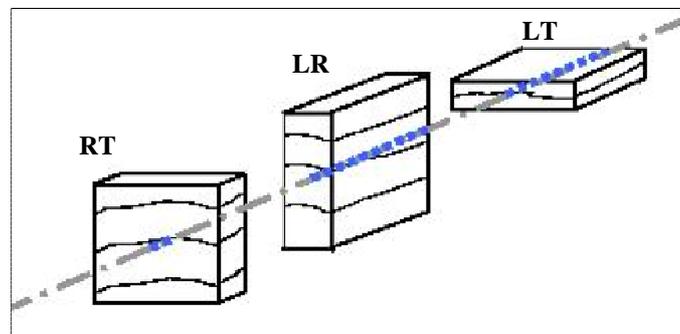


Figure 13 : Prélèvement des trois échantillons de bois suivant un axe unique L selon les plans LR, LT et RL.

Cette méthode est utilisée principalement pour déterminer la matrice de rigidité de tous les matériaux dont les directions de symétrie (ou au moins la classe de symétrie) sont connues à l'avance. Dans le cas du bois de la loupe de thuya, nous connaissons ni les symétries matérielles ni les directions de symétrie, ce qui rend l'utilisation de cette méthode délicate. De plus, même si les échantillons sont tous taillés suivant le direction L, de fortes variabilités peuvent exister entre ceux-ci, ne serait-ce que par une différence de quantité de bois de printemps par rapport au bois d'été comme illustré sur la Figure 13, ce qui rend l'indentification des propriétés élastiques parfois difficiles.

1.3.4 Méthode par contact direct

Dans le cas de la méthode par contact direct, son principe repose sur l'excitation d'un échantillon au moyen d'une onde ultrasonore directement transmise à l'échantillon, et la détermination de la vitesse de propagation de l'onde à travers l'échantillon. Les transducteurs sont en contact direct sur les faces parallèles de l'échantillon. Les échantillons sont généralement de forme cubique, prismatique, polyédrique à 16 ou 26 faces (François, Geymonat, et Berthaud 1998), (Bucur 1985), (Keunecke et al. 2007) ou cylindrique à faces multiples (Bucur 2006). A nouveau, la vitesse de propagation de l'onde est directement reliée aux constantes élastiques.

La détermination des symétries matérielles d'un matériau anisotrope nécessite un nombre élevé de directions de mesure. L'utilisation d'un échantillon de forme géométrique cubique (6 faces) ou polyédrique (16 ou 26 faces) permet d'avoir 3, 8 ou 13 directions de mesure par échantillon respectivement. Si les directions de symétrie (ou principales) sont connues a priori, cette méthode permet d'obtenir tout (ou une partie) de la matrice de rigidité du matériau dans son repère de symétrie naturelle, suivant le nombre de directions de mesure et le type d'onde utilisée (e.g., longitudinale, transversale). Par contre si les directions de symétries ne sont pas connues, le nombre d'informations disponibles est trop faible et ne permet généralement pas forcément de les déterminer. Par exemple, pour un matériau orthotrope, il faut déterminer 9 termes de rigidité. Si les mesures ne sont pas effectuées suivant les directions de symétrie naturelles, il faut aussi déterminer 3 angles soit un total de 12 inconnues. Il faut donc au moins 12 mesures avec 9 directions différentes en utilisant à la fois des ondes longitudinale et transverse (François 1995). Il faut donc des géométries polyédriques car l'utilisation de la géométrie cubique se traduit par l'utilisation d'un nombre important d'échantillons taillés dans toutes les directions. Deux problèmes majeurs vont être engendrés, le premier est la difficulté de tailler des échantillons dans toutes les directions et le deuxième est à nouveau la variabilité inévitable entre échantillons dans le cas du bois.

1.3.5 Conclusions

Dans le cadre de cette thèse, il a été décidé d'effectuer des mesures par contact direct sur un seul et unique échantillon de forme sphérique afin de déterminer les symétries du comportement élastique de la loupe de thuya par rapport au bois de thuya à l'état sec en s'affranchissant des problèmes de variabilités entre échantillons. Cette géométrie permet de multiplier plus simplement le nombre de directions de mesure que dans le cas d'un polyèdre. Elle a été recommandée par plusieurs auteurs. François (François 1995) a indiqué qu'il est intéressant de développer des mesures par immersion sur une sphère. Plus tard, Bucur et Rasolofosaon (Bucur et Rasolofosaon 1998) ont effectué des tests ultrasonores sur des échantillons sphériques en utilisant toujours la méthode d'immersion qui lui a permis d'avoir 100 points de mesure, ce qui est largement suffisant pour déterminer les symétries matérielles. De même Soma et al (Soma, Shida, et Arima 2002) ont utilisé des échantillons sphériques pour mesurer et calculer la vitesse de propagation des ultrasons en fonction de l'angle de fil. Jusqu'à présent, cette géométrie n'a jamais été utilisée dans la méthode ultrasonore par contact direct.

Partie A :

Caractérisation structurelle multi-échelle de la loupe de thuya

Ce chapitre est composé de deux grandes parties. La première est consacrée à l'analyse de la structure interne d'une loupe entière de thuya accessible par tomographie X. Cette étude va permettre, notamment, de caractériser la distribution d'un élément caractéristique de la loupe : les excroissances qui forment le mouchetis noir observé à l'œil nu.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation à l'échelle microscopique de la loupe et du bois de thuya à l'aide d'observation au microscope optique de coupes anatomiques

2 Analyse à l'échelle de la loupe

D'un point de vue bibliographique, l'analyse structurale de la loupe n'a jamais fait l'objet de travaux. Nous proposons donc, ici, d'utiliser la tomographie X sur une loupe entière pour visualiser les cernes de croissance et surtout la distribution des excroissances au sein du matériau.

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Matériel végétal

Pour étudier la structure interne à l'échelle macroscopique de la loupe, nous disposons d'une loupe de thuya provenant de la région de Khémisset au Maroc (Figure 14). Après son exploitation, la loupe a été mise au séchage naturel sous abri pendant plusieurs semaines avant son arrivée au LMGC. Elle a ensuite été transportée au LERFoB de Nancy pour les essais de tomographie X. Cette loupe a pour dimensions $40 \times 60 \times 40 \text{ cm}^3$, elle contient des espaces vides (galeries) au milieu de la partie supérieure externe.



Figure 14 : Loupe de thuya et direction L du tronc de l'arbre

2.1.2 Méthode : Tomographie X

2.1.2.1 Présentation de la tomographie X

La tomographie X est une méthode non destructive permettant d'obtenir des images tridimensionnelles à partir d'une série de radiographies X. L'échantillon à analyser est placé dans un faisceau de rayons X d'intensité I_0 . L'intensité transmise I , et donc le nombre de photons, dépend des propriétés d'absorption du matériau traversé suivant la loi de Beer-Lambert (Longuetaud 2005) :

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (3)$$

avec μ , le coefficient d'atténuation fonction du matériau traversé et de la longueur d'onde du faisceau et x , la distance parcourue par le faisceau à l'intérieur du matériau. La radiographie obtenue est une intégration des informations d'atténuation le long du trajet des photons. Afin

d'obtenir une représentation tridimensionnelle, une série de radiographies est réalisée sous différents angles en faisant tourner l'échantillon autour d'un axe. À partir de cette série de radiographies, chaque section du matériau, suivant un plan de normale l'axe de rotation de l'échantillon, est reconstruite à l'aide d'un algorithme basé sur le principe de rétroprojection filtrée (Longuetaud 2005). La description tridimensionnelle est obtenue par empilement de ces coupes.

2.1.2.2 Principe de fonctionnement du scanner à rayons X

Le scanner utilisé dans cette étude est un tomographe médical adapté à l'étude du bois, de marque « General Electric » type « Brightspeed Exel 4 coupes ». Il est constitué d'une source de rayons X en rotation et d'un ensemble de récepteurs disposés en arc de cercle (Figure 15). La source génère un faisceau de photons d'ouverture assez large, faisceau en éventail ou en cône, pour englober entièrement l'objet étudié. Ce faisceau peut avoir des caractéristiques de largeur et d'énergie variables.

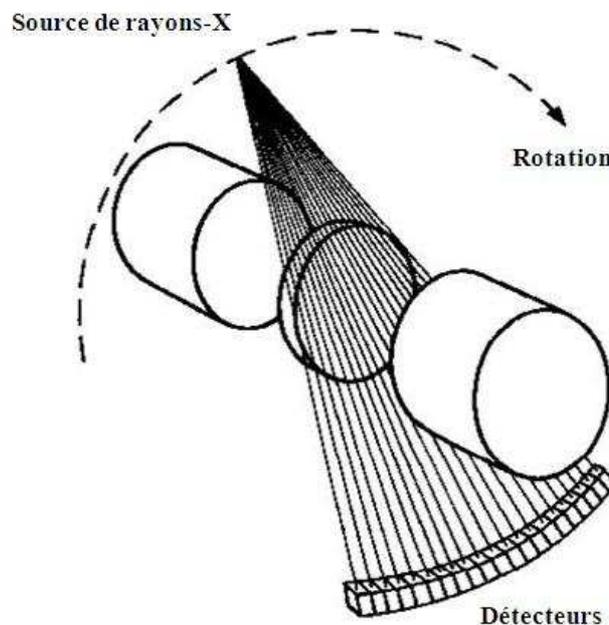


Figure 15 : Schéma de fonctionnement du scanner

Le scanner est constitué :

- d'un système de mesure contenant :
 - Un tube à rayons X, permettant de générer et de focaliser les rayons X selon un « axe de détection ».
 - Un ensemble de détecteurs qui recueillent les rayons X résiduels après la traversée de l'échantillon.
- d'un système de reconstruction de l'image à partir des signaux électriques convertis en nombres binaires, eux-mêmes transformés en niveaux de gris traduisant le degré d'atténuation des rayons X.
- d'une console de visualisation de l'image.

Les images visualisées dans la console de visualisation, sont données par rapport à une base orthonormée $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ liée au scanner (Figure 16). \vec{y} correspond à l'axe vertical et \vec{z} à la direction de déplacement de la table mobile.



Figure 16 : Scanner à rayons X adapté au matériau bois

[<https://www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/plateforme/equipements/scanner.html>]

2.1.2.3 Acquisition de la série de radiographies

Avant chaque acquisition proprement dite, il est nécessaire de réaliser un « scout » ou « acquisition de localisation ». Le scanner effectue deux examens rapides de l'échantillon, ce qui permet de délimiter précisément les zones à explorer (Figure 17).

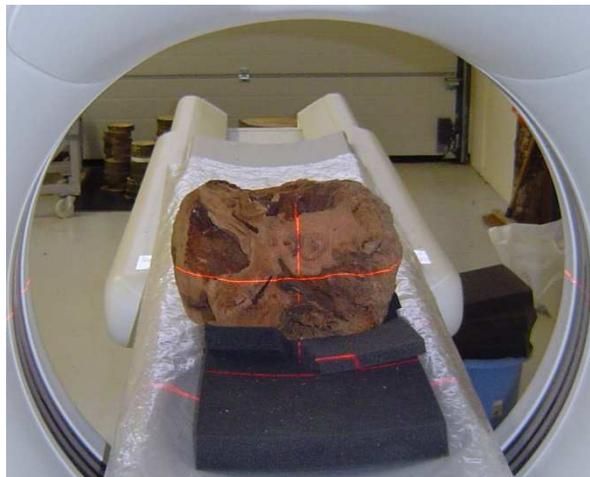


Figure 17 : Acquisition de localisation de la loupe à scanner

Pour l'acquisition, deux modes d'expérimentation sont possibles, le mode axial et le mode hélicoïdal. Le mode axial consiste à réaliser des vues en section de l'échantillon, la table est immobile lors de l'acquisition des données et se déplace suivant \vec{z} entre deux mesures. L'émission de rayons X est ponctuelle. En mode hélicoïdal, la table se déplace en continu durant toute l'acquisition et l'émission de rayons X est également continue. Ce mode est deux fois plus rapide que le premier.

Le Tableau 2 présente les différents paramètres réglables et leurs valeurs extrêmes pour chacun des deux modes.

Paramètres	Axial	Hélicoïdal
Temps d'acquisition par coupe	0,5 à 4 secondes	0,5 à 1 seconde
Épaisseur de coupe	0,625 à 10 mm	
Intervalle	Intervalle = épaisseur × nombre d'images par rotations	épaisseur/10 < Intervalle < 2 × épaisseur
Tension	80 à 140 kV	
Intensité	10 à 440 mA par pas de 5 mA	

Tableau 2 : Paramètres réglables du scanner

Le temps d'acquisition par coupe peut avoir une influence sur la résolution de l'image : s'il est trop court, l'image risque d'être bruitée [https://www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/plateforme/equipements/scanner.html]. Pour cette raison nous avons retenu un temps d'acquisition par coupe d'une seconde.

L'épaisseur de coupe joue sur la résolution spatiale. Elle est définie en fonction de la dimension et de la configuration des détecteurs. Les configurations des détecteurs sont les suivantes : 4×3,75mm, 4×5mm, 1×1,25mm et 2×0,625mm. Le premier chiffre correspond au nombre de détecteur et le second à l'épaisseur. L'épaisseur de coupe choisie est de 0,625mm. L'intervalle correspond à la distance entre deux coupes. La tension détermine la force de pénétration des rayons X, tandis que l'intensité est reliée au débit.

2.1.2.4 Outil de reconstruction tomographique

Après reconstruction tomographique, simultanée à l'acquisition, nous obtenons une image tridimensionnelle de l'échantillon sous la forme de séries de coupes transversales de 512 × 512 pixels, la résolution dépendant du diamètre d'acquisition choisi. Les images obtenues sont en noire et blanc, chaque nuance de gris correspond à une isodensité, la couleur la plus claire correspond aux zones les plus denses (i.e., les plus absorbantes), celles plus foncée correspondent aux densités plus faibles.

Il existe plusieurs logiciels permettant la visualisation des données récupérées du scanner. Nous avons utilisé dans le cadre de ce travail ImageJ [www.ansci.wisc.edu/equine/parrish/index.html] avec les plugins Gourmands et Volume Viewer [http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/volume-viewer.html], ce dernier permet d'obtenir une visualisation en 3D, à partir de l'ensemble des images.

2.2 Résultats et analyse

2.2.1 Analyse de la loupe entière

Les images scannées en 2D de la loupe entière dans les 3 plans (\vec{x}, \vec{y}) , (\vec{x}, \vec{z}) et (\vec{y}, \vec{z}) sont présentées respectivement sur la Figure 18, la Figure 19 et la Figure 20. La direction \vec{z} correspond dans notre cas à la direction L de la loupe (Figure 14).

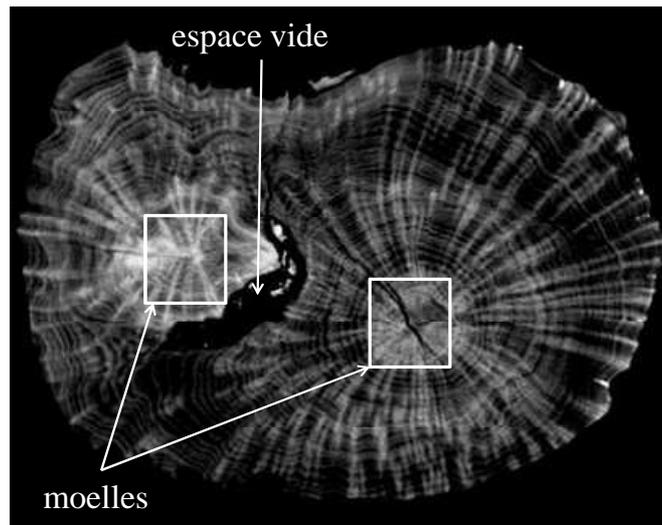


Figure 18 : Coupe dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) de la tomographie d'une loupe entière

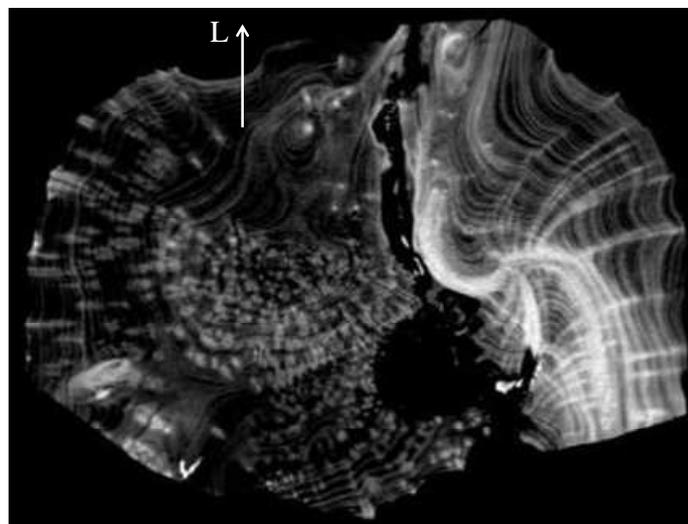


Figure 19 : Coupe dans le plan (\vec{x}, \vec{z}) de la tomographie d'une loupe entière

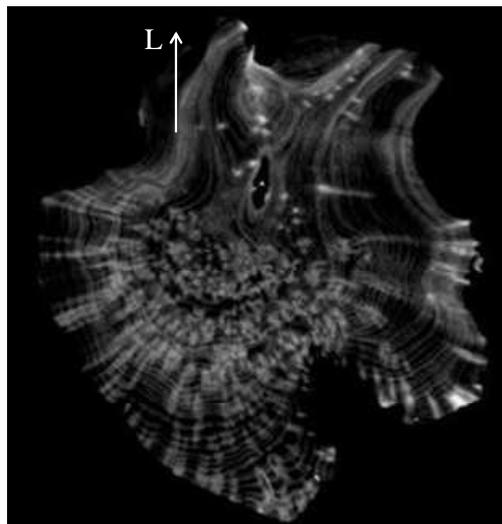


Figure 20 : Coupe dans le plan (\vec{y}, \vec{z}) de la tomographie d'une loupe entière

À partir de l'observation de ces 3 images, nous pouvons dégager trois constatations. Premièrement cette loupe contient deux moelles visibles dans le plan transversal (\vec{x}, \vec{y}) (Figure 18). Deuxièmement, l'existence de la cavité, identifiable par la zone noire, et repérée sur la Figure 18, est à rapprocher de l'existence des deux moelles à l'intérieur de cette loupe. En effet, le déclenchement du processus de formation de la loupe s'est probablement fait sur deux racines voisines de l'arbre. La croissance de chacune d'elles a donc, progressivement réduit l'espace situé entre les deux parties de loupe. Troisièmement, les excroissances correspondent aux taches de couleur plus claire. Leur densité est donc plus élevée que la matière ligneuse qui les entoure. Elles ont la forme de petites tiges (Figure 21a) dont les grands axes sont visibles sur la Figure 18 orientés principalement radialement par rapport à la moelle. Leur longueur peut atteindre quelques centimètres. Leur section circulaire visible sur la Figure 19 et la Figure 20 présente un diamètre ne dépassant pas 4 mm.

Les cernes de croissance, a priori concentriques autour de chacune des moelles, sont visibles sur la Figure 18. Un grossissement de la zone 'C' localisée par un rectangle blanc sur la Figure 21b montre que les cernes de croissances présentent des « ondulations » (Figure 21c). La bosse externe de ces ondulations correspond à une déviation du cerne causée par la présence d'une excroissance.

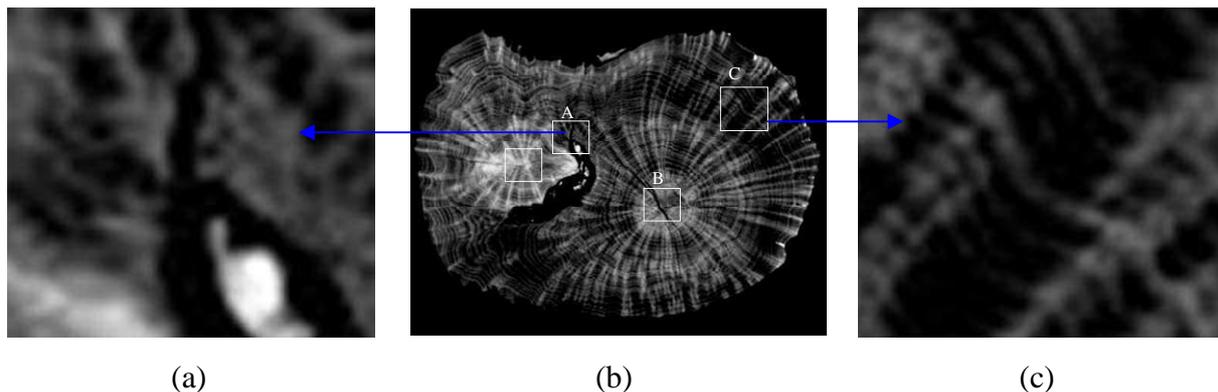


Figure 21 : Observation a) des excroissances et c) de leur interaction avec les cernes sur la coupe de la Figure 18 (b).

2.2.2 Analyse de la distribution et de l'orientation des excroissances

Les excroissances modifient donc le développement des cernes de croissance, en créant par exemple de petites ondulations de ceux-ci. Ces excroissances, de densité plus élevée que la matière ligneuse les entourant, vont avoir une incidence sur le comportement mécanique de la loupe de thuya. Il est donc nécessaire, a priori, d'analyser la distribution de ces excroissances et plus précisément leur orientation dans la loupe ainsi que leur concentration. Pour pouvoir dégager l'orientation des excroissances au sein de la loupe, nous avons cherché à isoler les excroissances des images 3D du scan. La Figure 22 présente la visualisation des excroissances en 3D. Pour atteindre cette image, nous avons choisi une propriété d'affichage qui consiste à afficher seulement deux niveaux de gris : les voxels de valeur voisine de 255 pour le blanc, et ceux de valeur voisine de 0 pour le noir. Le premier niveau de gris correspond aux zones les plus denses et le deuxième aux zones de faible densité. Les zones de densité intermédiaire ne seront donc pas affichées. De cette image 3D nous remarquons que cette loupe contient un

nombre très élevé d'excroissances. Si nous limitons l'analyse de la Figure 22 à la partie droite de l'image, correspondant au développement de la loupe sur la racine latérale droite, nous pouvons observer que ces excroissances sont orientées radialement par rapport à une zone centrale localisée sur la figure.

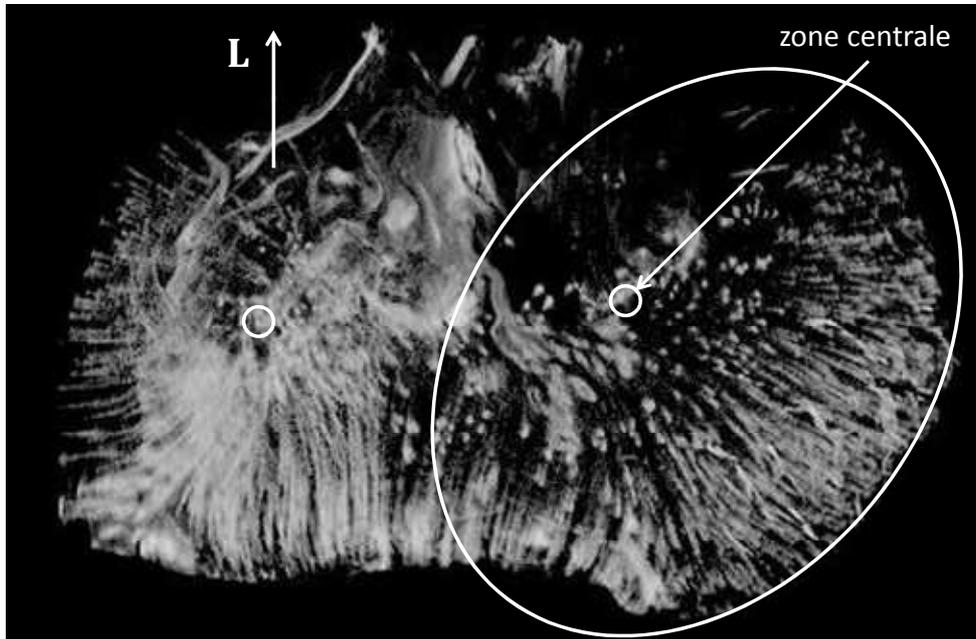


Figure 22 : Visualisation 3D uniquement des excroissances à l'intérieur d'une loupe entière
 Pour étudier la concentration des excroissances, nous avons choisi de réaliser des coupes successives faites dans le plan transversal avec un pas de 44 mm en hauteur en commençant par le niveau le plus bas. La Figure 23 représente les différentes traces des plans de coupe repérées par leur hauteur (en mm) par rapport à la base de la loupe.

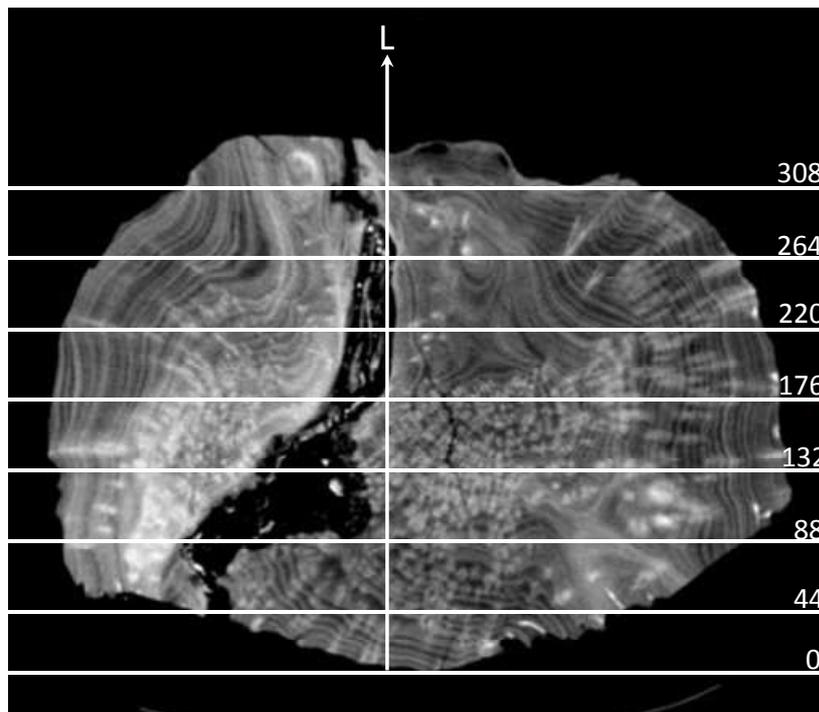


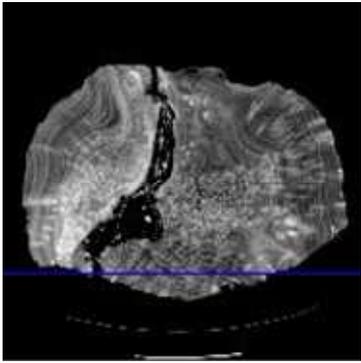
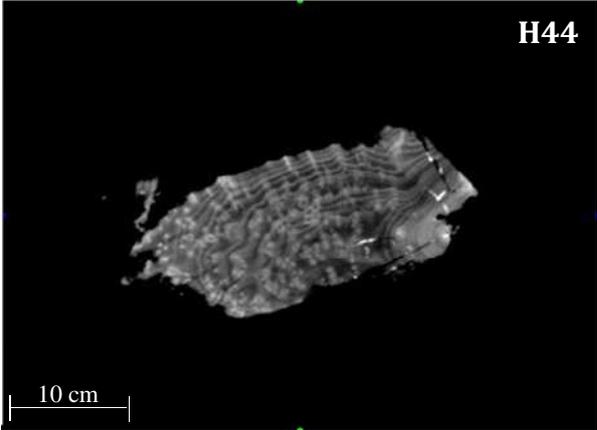
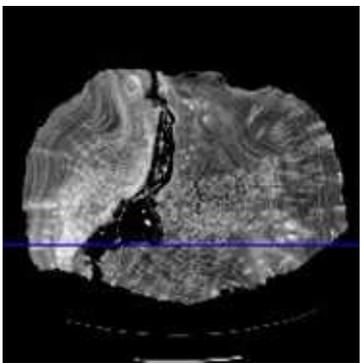
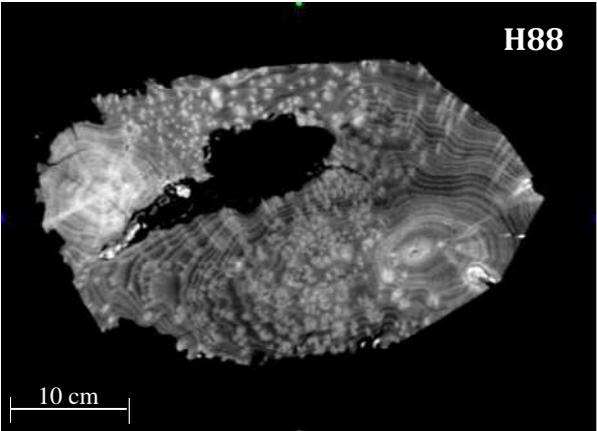
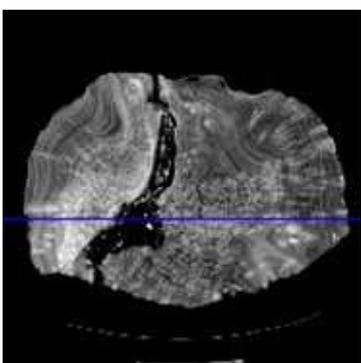
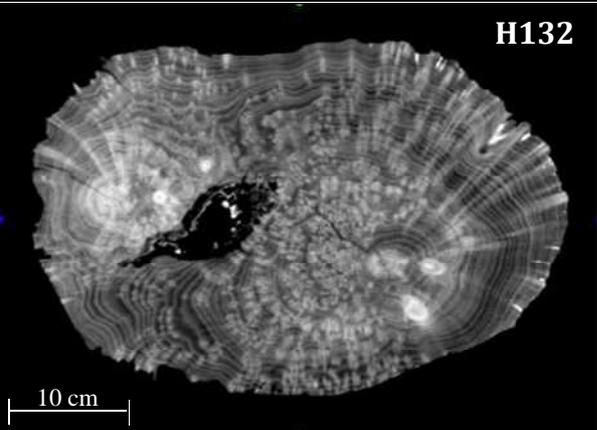
Figure 23 : Traces des plans de coupe transversale repérées par leur hauteur (en mm)

Le Tableau 3 présente, dans la colonne de droite, les coupes transversales repérées dans le coin supérieur droit de l'image par leur hauteur (H44 par exemple pour 44 mm) et correspondant à la trace du plan de coupe présentée en bleu sur la vue transversale à gauche.

L'observation des images des coupes transversales scannées (Tableau 3), nous permet de distinguer deux zones différentes :

- La zone médiane inférieure de la loupe correspondante aux images scannées H44, H88, H132 et H176 avec une concentration très élevée d'excroissances.
- La zone médiane supérieure (H220, H264, H308) dont la concentration d'excroissances diminue en remontant vers le tronc de l'arbre, pour atteindre en H308 une zone avec très peu d'excroissances avec une structure proche de celle du bois de thuya.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

Trace du plan de coupe	Plan de coupe transversale correspondant
 <p>A grayscale image showing the trace of a cut plane on a circular cross-section of a wood sample. A blue horizontal line is drawn across the middle of the image, indicating the location of the cut. The wood grain is visible as concentric rings.</p>	 <p>H44 10 cm A grayscale image of a transverse cut of a wood sample, labeled H44. The image shows a detailed view of the wood grain with concentric growth rings. A scale bar in the bottom left corner indicates 10 cm.</p>
 <p>A grayscale image showing the trace of a cut plane on a circular cross-section of a wood sample. A blue horizontal line is drawn across the middle of the image, indicating the location of the cut. The wood grain is visible as concentric rings.</p>	 <p>H88 10 cm A grayscale image of a transverse cut of a wood sample, labeled H88. The image shows a detailed view of the wood grain with concentric growth rings. A scale bar in the bottom left corner indicates 10 cm.</p>
 <p>A grayscale image showing the trace of a cut plane on a circular cross-section of a wood sample. A blue horizontal line is drawn across the middle of the image, indicating the location of the cut. The wood grain is visible as concentric rings.</p>	 <p>H132 10 cm A grayscale image of a transverse cut of a wood sample, labeled H132. The image shows a detailed view of the wood grain with concentric growth rings. A scale bar in the bottom left corner indicates 10 cm.</p>

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

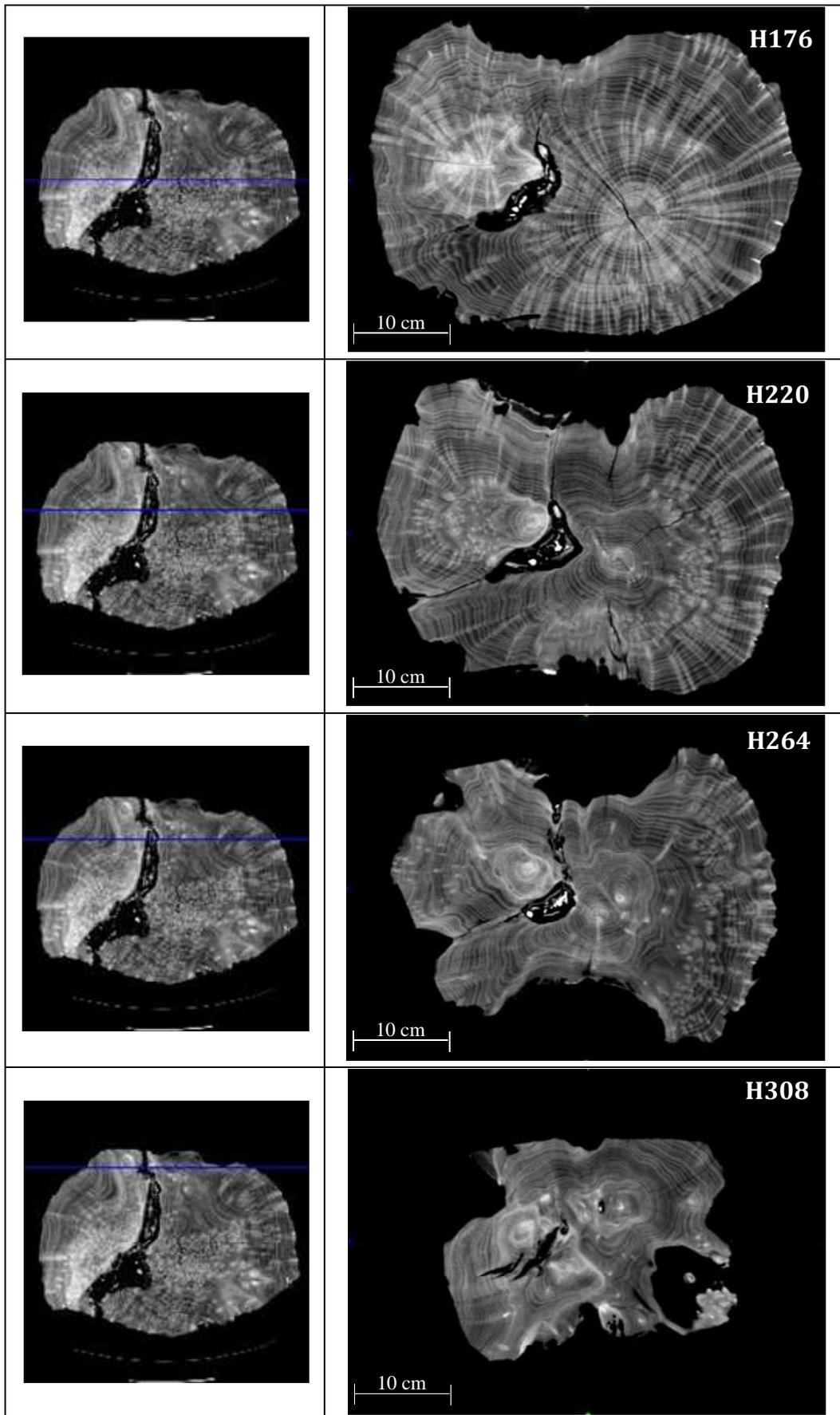


Tableau 3 : Coupes successives du scan de la loupe entière à différentes hauteurs

2.3 Conclusions

La tomographie X conduite sur une loupe entière, nous a permis de visualiser la structure interne de celle-ci et de caractériser la distribution des excroissances à l'intérieur de cette loupe. Nous remarquons qu'il n'existe pas une symétrie cylindrique au niveau de la structure, par contre au niveau local, nous avons des symétries analogues à celle du bois : nous arrivons bien à déterminer une direction du fil correspond à la direction L de l'arbre, une direction des cernes de croissance équivalente à la direction T d'orthotropie et une direction radiale perpendiculaire au 2 autres. Dans le plan radial d'un arbre, les éléments radiaux sont les rayons ligneux, dans le cas de la loupe nous avons une similitude avec les excroissances. Cependant, ces excroissances ne sont pas toujours perpendiculaires à l'axe longitudinal, leur distribution est de forme sphérique. Le fait d'avoir identifié 3 directions naturelles de symétrie nous indique a priori que nous avons un matériau localement orthotrope.

Cependant, il reste à vérifier comment cette orthotropie matérielle locale se traduit en termes d'anisotropie au niveau mécanique. De toute évidence, ces excroissances vont avoir une incidence sur le comportement mécanique de la loupe. Par ailleurs nous avons remarqué des variations de la concentration d'excroissances le long de l'axe longitudinal.

3 Anatomie de la loupe et du bois de thuya

Ce chapitre a pour objectif d'apporter un complément aux études à l'échelle macroscopique par tomographie X en analysant la microstructure de la loupe et du bois de thuya par l'analyse de coupes anatomiques. D'un point de vue bibliographique, ce chapitre constitue une première contribution à l'étude de la structure interne du bois de la loupe de thuya car, à notre connaissance, aucun résultat n'existe sur ce sujet.

3.1 Introduction

Bien que le bois de thuya et celui de la loupe proviennent du même arbre, ils possèdent tous deux une structure différente visible aussi bien à l'œil nu que par tomographie X comme nous venons de le voir dans le chapitre précédent. Cette différence porte surtout sur la présence des excroissances de couleur plus foncée (Figure 24) et sur la forme des cernes de croissances.

A priori, le comportement du bois de thuya est différent de celui de la loupe de par la présence des excroissances qui modifie la croissance secondaire de la loupe. Pour vérifier cette hypothèse et voir l'incidence des excroissances sur la structure interne du bois de la loupe de thuya, nous avons réalisé des coupes anatomiques au voisinage des excroissances.



Figure 24 : Bois de la loupe de thuya : structure à l'échelle macroscopique, présence des excroissances et forme des cernes de croissance

3.2 Matériel et méthode

3.2.1 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est le même que celui du chapitre précédent. Pour l'analyse microscopique de la structure interne, le matériel végétal utilisé se compose de 4 échantillons parallélépipédiques de dimensions $5 \times 5 \times 20 \text{ mm}^3$, 3 échantillons de bois de thuya et un échantillon de bois de la loupe. Les échantillons du bois de thuya sont taillés de façon à ce que les 3 faces correspondent aux 3 plans de symétrie matérielle LR, LT et RT. L'échantillon de bois de la loupe est extrait de sa partie inférieure correspondant à une zone de forte concentration d'excroissances. Il est usiné de façon à isoler ou contenir en son sein une seule excroissance dont le grand axe correspond avec la grande longueur de l'échantillon parallélépipédique.

Pour comparer la structure anatomique de la loupe et celui du bois de thuya, nous avons réalisés des coupes anatomiques à l'aide d'un microtome manuel d'une part sur des échantillons de bois de thuya selon les 3 plans de symétrie matérielle LR, TL et RT et, d'autre part, sur des échantillons de bois de la loupe contenant au moins une excroissance, selon le plan perpendiculaire à la direction longitudinale de l'excroissance.

3.2.2 Méthode

Les images anatomiques ont été obtenues à l'aide d'un microscope optique de marque Leica (Figure 25), surmonté d'une caméra. L'ensemble est connecté à un ordinateur qui enregistre les images. Pour obtenir des images suffisamment claires et de bonne qualité, l'épaisseur des coupes a été fixée à $20 \mu\text{m}$. De ce fait, nous n'avons pas eu besoin d'utiliser de coloration dans les coupes anatomiques. Les observations ont été conduites à des différents grossissements (25, 100, 400 et 630).

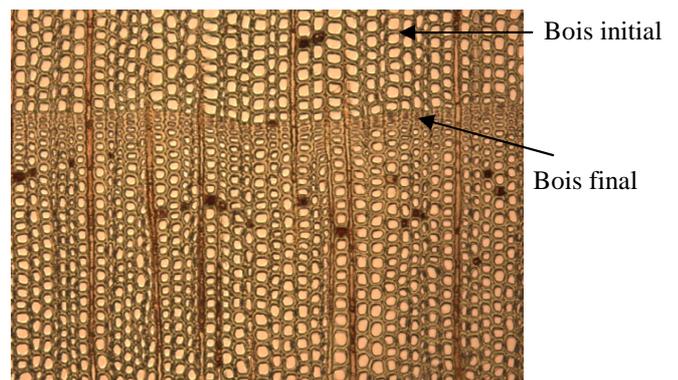


Figure 25 : microscope optique de marque Leica

3.3 Résultats

3.3.1 Bois de thuya

La Figure 26 représente des coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan transversal RT à différents grossissements. Sur la Figure 26a, réalisée avec un grossissement faible, nous observons les différents cernes de croissance d'épaisseur régulière. Il existe aussi une sorte de cerne supplémentaire d'épaisseur très mince possédant quelques lignes de parenchyme, c'est un faux cerne ou cerne nul de croissance. La Figure 26b présente un seul cerne annuel de croissance. Nous pouvons remarquer que le bois initial (de printemps) constitue l'essentiel du cerne (faible proportion de bois final). En effet, le bois initial contient une vingtaine de trachéides dans la direction radiale alors que le bois final n'en possède que 4 ou 5 au maximum. Les Figure 26c et d représentent la zone limite du bois initial et bois final. Par ces deux grossissements, nous pouvons observer la différence classique d'épaisseur des parois des trachéides entre le bois initial et le bois final ainsi que le volume du lumen. Les parois des cellules du bois final sont plus épaisses que celles du bois initial. Les rayons ligneux (parenchymes) sont identifiables par leur coloration plus foncée sur l'image.



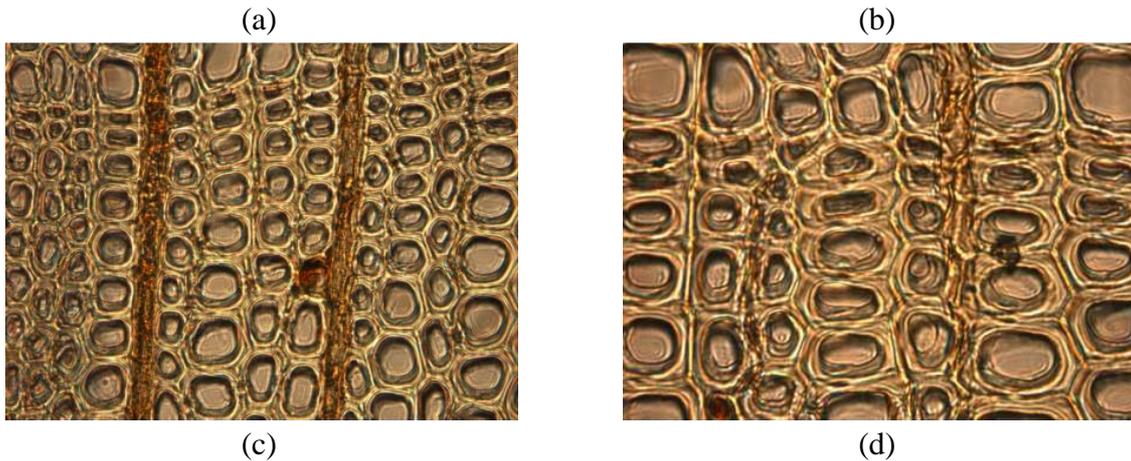


Figure 26 : Coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan transverse RT à différents grossissements : a) $\times 25$, dimensions : $4,14 \times 3,08 \text{ mm}^2$; b) $\times 100$, dimensions : $1,03 \times 0,77 \text{ mm}^2$; c) $\times 400$, dimensions : $258 \times 191 \text{ }\mu\text{m}^2$; d) $\times 630$, dimensions : $163 \times 121 \text{ }\mu\text{m}^2$

La Figure 27 représente des coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan LR à différents grossissements. La majorité des cellules, les trachéides, sont arrangées longitudinalement (direction L). On remarque aussi la présence de rayons ligneux dans la direction radiale. La couleur plus foncée, marquée sur quelques cellules longitudinales peut correspondre à la présence de résine stockée à l'intérieur de celles-ci. La Figure 27b montre des ponctuations aréolées, leur rôle est d'assurer la communication latérale entre les trachéides pour la conduction de la sève.

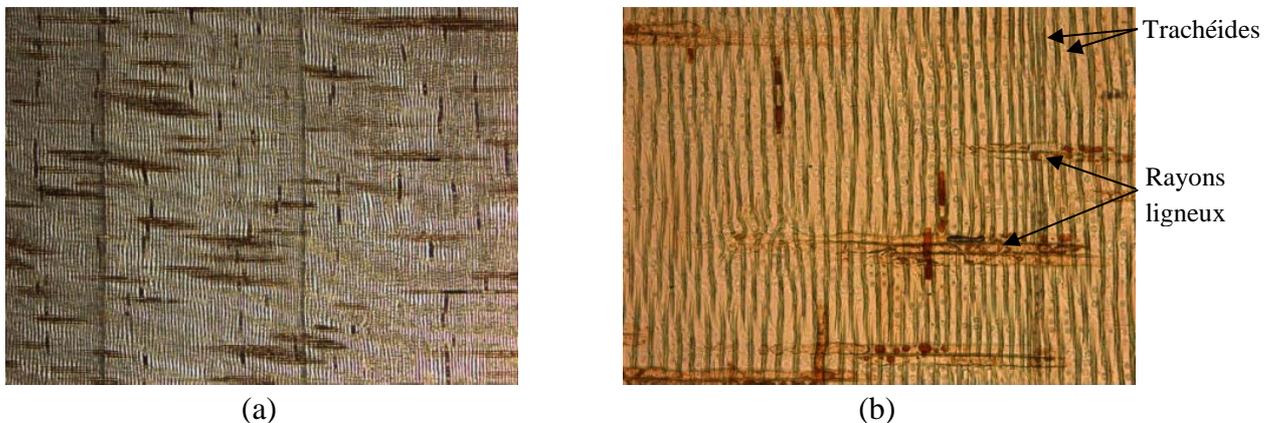


Figure 27 : Coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan radial LR à différents grossissements : a) $\times 25$, dimensions : $4,14 \times 3,08 \text{ mm}^2$; b) $\times 100$, dimensions : $1,03 \times 0,77 \text{ mm}^2$.

La Figure 28 présente des coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan LT à différents grossissements. Les Figure 28a et b montrent les cellules verticales, trachéides, sectionnés longitudinalement et les cellules horizontales, rayons ligneux, sectionnés transversalement. On remarque alors que ceux-ci sont composés d'une seule rangée de quelques parenchymes. On dit qu'ils sont unisériés.

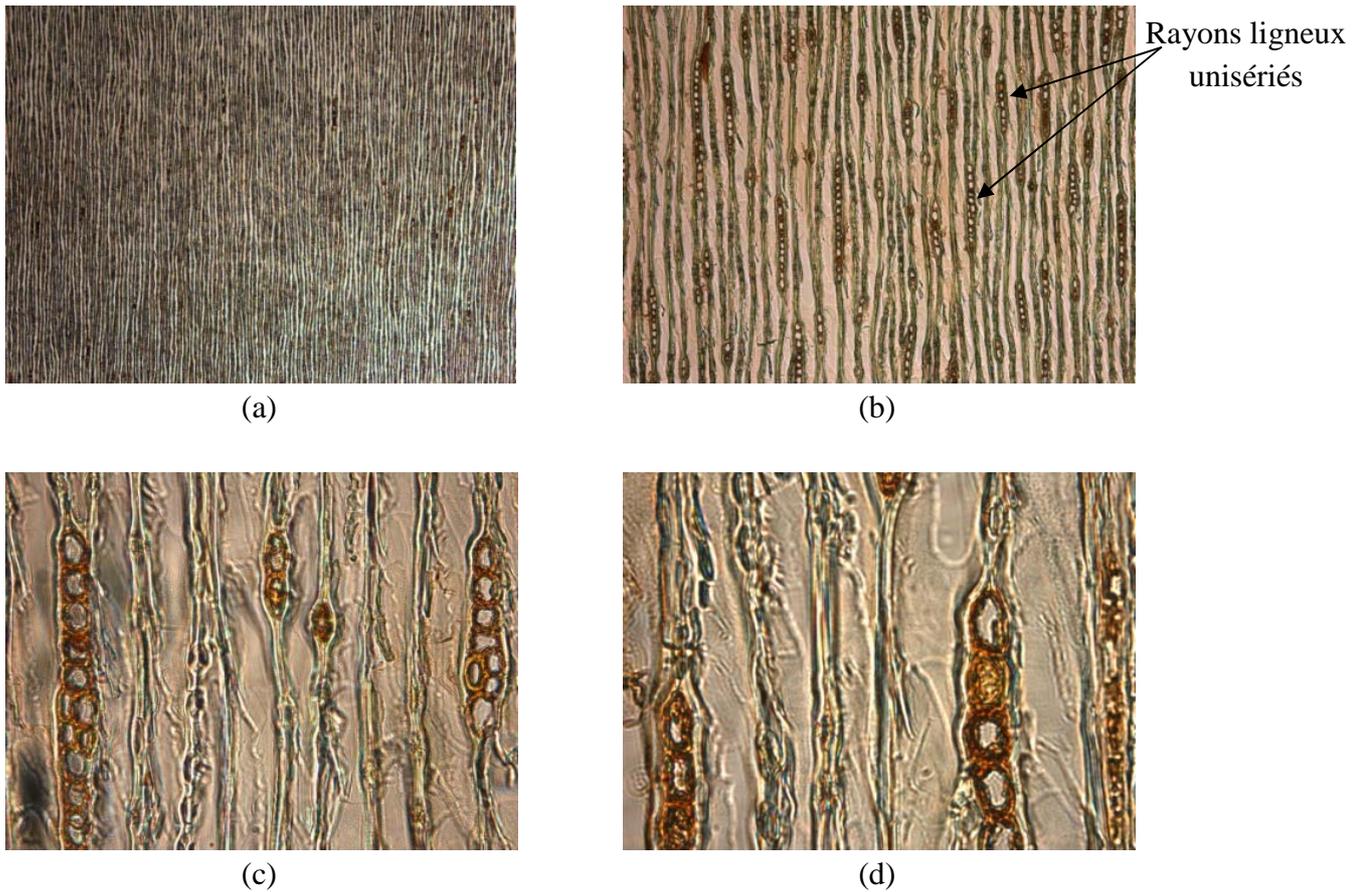


Figure 28 : Coupes anatomiques du bois de thuya dans le plan tangentiel LT à différents grossissements : a) $\times 25$, dimensions : $4,14 \times 3,08 \text{ mm}^2$; b) $\times 100$, dimensions : $1,03 \times 0,77 \text{ mm}^2$; c) $\times 400$, dimensions : $258 \times 191 \text{ }\mu\text{m}^2$; d) $\times 630$, dimensions : $163 \times 121 \text{ }\mu\text{m}^2$

À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que le bois de thuya présente une structure typique de résineux sans particularités.

3.3.2 Loupe de thuya

La Figure 29 présente à l'échelle microscopique une coupe locale du bois de la loupe de thuya orientée perpendiculairement à la direction longitudinale des excroissances facilement reconnaissables par leur couleur plus foncée.

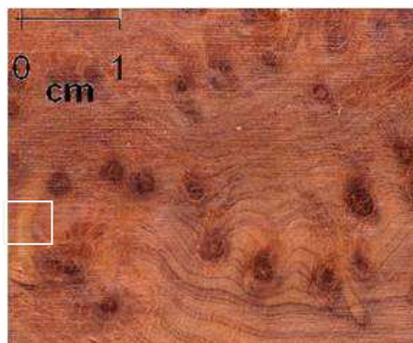


Figure 29 : Coupe locale de la loupe de thuya perpendiculairement à la direction longitudinale des excroissances (échelle macroscopique)

La Figure 30 représente une coupe anatomique, vue au microscope optique à faible grossissement, dans le plan transversal d'une excroissance localisée sur la Figure 29 par un rectangle blanc.

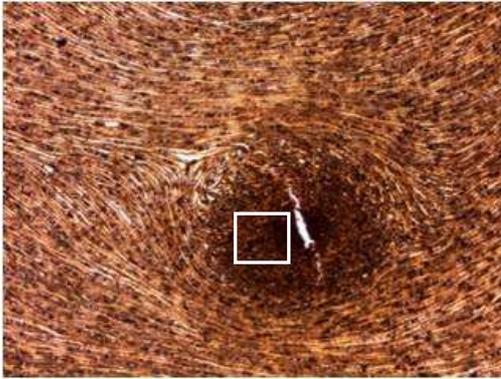


Figure 30 : Micrographie optique d'une excroissance dans son plan transversal ($\times 25$, dimensions $4,10 \times 3,03 \text{ mm}^2$)

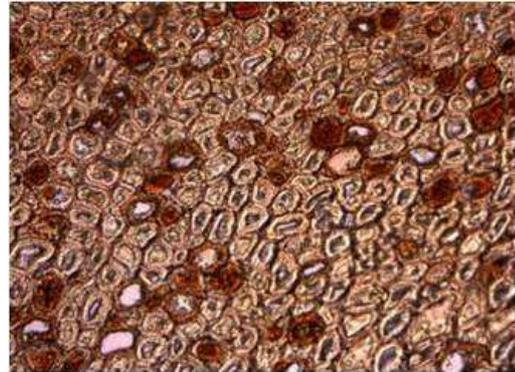


Figure 31 : Micrographie optique à l'échelle microscopique dans le plan transverse d'une excroissance ($\times 400$, dimensions : $258 \times 191 \mu\text{m}^2$)

Nous avons également réalisé un autre grossissement ($\times 400$) sur une zone à l'intérieur de l'excroissance. Cette zone est délimitée par le carré blanc visible sur la Figure 30. Le résultat de ce grossissement est présenté sur la Figure 31. Cette figure montre que les cellules de cette excroissance ont des parois plus épaissies que celles du bois de thuya (Figure 26c). L'épaisseur importante des parois cellulaires des cellules composant l'excroissance confirme et explique le résultat trouvé sur les images en tomographie X de la loupe de thuya, à savoir que la densité des excroissances est plus élevée que la matière ligneuse les entourant. De plus, il semble qu'il y ait un mélange de trachéïdes disposées « radialement » et de parenchymes isolés (paroi plus foncée, Figure 28d). Cette plus forte densité et la présence plus homogène de parenchymes expliquent aussi la couleur plus foncée des excroissances.

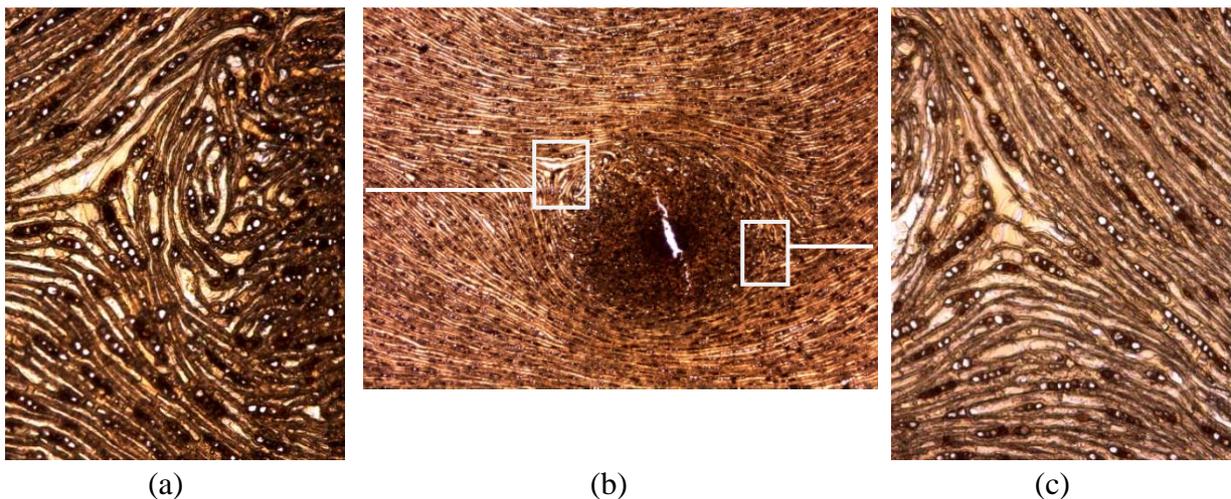


Figure 32 : Vue à l'échelle microscopique dans le plan transverse de 2 zones voisines de l'excroissance (b, dimensions : $4,10 \times 3,03 \text{ mm}^2$, $\times 25$) : a) zone 1 : $\times 100$, dimensions : $258 \times 191 \mu\text{m}^2$; c) zone 2 : $\times 100$, dimension : $258 \times 191 \mu\text{m}^2$

La Figure 32 se concentre sur les zones situées en bordure de l'excroissance. Sur cette image nous avons défini deux zones, délimitées par les rectangles blancs dans la Figure 32b, et correspondant aux Figure 32a et c. Ces deux figures montrent des variations angulaires importantes entre les cellules (trachéides) au voisinage d'une excroissance, ces variations peuvent atteindre localement 90°. On constate aussi une quantité un peu plus importante de rayons ligneux par rapport au bois de thuya (Figure 28b).

3.4 Discussion

Grâce aux observations faites sur les coupes anatomiques réalisées dans le plan transversal d'une excroissance, nous avons pu identifier l'effet de la présence des excroissances sur la structure interne du bois de la loupe de thuya que nous allons mettre en relation avec son comportement mécanique dans la partie suivante.

Les excroissances ont une densité plus élevée comparée à celle du bois de thuya ou encore à la matière ligneuse les entourant. Ce résultat issu des coupes obtenues par la tomographie X est corroboré à l'échelle microscopique. En effet, la comparaison du réseau cellulaire d'une excroissance de la loupe de thuya (Figure 31), avec celui du bois de thuya montre que les parois cellulaires des excroissances sont beaucoup plus épaisses.

Le deuxième résultat important que nous pouvons tirer de ces coupes anatomiques est l'existence d'une grande variation angulaire des trachéides du tissu cellulaire du bois de la loupe se trouvant au voisinage d'une excroissance. Cette distribution des cellules dans le plan transversal de l'excroissance se retrouve également dans les autres plans.

La loupe de thuya peut être assimilée à un composite constitué par des excroissances de densité élevée, et distribuée radialement, noyées dans une "matrice" de tissu ligneux de densité plus faible, voisine de celle du thuya mais avec de fortes désorientations des trachéides suivant l'axe des excroissances.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude de la structure interne du bois de la loupe de thuya à l'échelle macroscopique et microscopique en utilisant deux méthodes différentes. À l'échelle macroscopique, nous avons utilisé la tomographie X. À l'échelle microscopique, nous avons travaillé sur des coupes anatomiques réalisées à partir d'échantillons de 5×5×20 mm³.

Les résultats trouvés sur les échantillons de bois de thuya que ce soit par la tomographie X ou par les coupes anatomiques ont montré que ce bois possède une structure « classique » de résineux. En revanche, les résultats trouvés sur le bois de la loupe ont montré que la structure du bois de la loupe est très différente. La présence des excroissances de densité élevée, orientées radialement, au sein d'une matière ligneuse, similaire à celle du bois de thuya mais fortement désorientée, entraîne un changement considérable dans la structure interne de la loupe.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

L'objectif de la partie suivante est de caractériser le comportement élastique du bois de la loupe et de le mettre en relation avec les spécificités anatomiques mises en évidence de cette partie.

Partie B :

Caractérisation du comportement élastique de la loupe de thuya

Cette partie est composée de quatre chapitres (4 à 7) qui sont au cœur des travaux de cette thèse. Le chapitre 4 est consacré à la caractérisation mécanique à l'échelle d'un plateau de loupe (échelle macroscopique) par une méthode ultrasonore classique. Il permettra d'identifier les gradients de rigidité au sein d'un plateau et de les comparer avec ceux du bois de thuya.

Le chapitre 5 détaille la mise au point et la validation d'une nouvelle méthode de détermination des symétries du comportement élastique d'un matériau à l'aide d'un essai ultrasonore par contact direct sur un échantillon de forme sphérique.

Le chapitre 6 est plus prospectif et traite de l'application d'une méthode de spectroscopie ultrasonore résonante au cas du bois et de la loupe de thuya. Cette technique permet de déterminer complètement la matrice de rigidité d'un matériau en particulier si ses symétries matérielles sont connues.

Le chapitre 7 est focalisé sur l'application de ces deux méthodes au cas d'échantillons de bois et de la loupe de thuya (échelle mésoscopique) afin de déterminer les symétries du comportement élastique ainsi que certaines composantes du tenseur d'élasticité. Le comportement est finalement mis en relation avec l'anatomie et la structure du bois et de la loupe de thuya.

4 Caractérisation mécanique à l'échelle macroscopique

4.1 Matériel et méthode

4.1.1 Matériel végétal

Nous disposons, pour évaluer la distribution des rigidités au sein d'une loupe, d'un plateau de loupe de thuya (Figure 33b) de la région de Khémisset (Maroc) de masse volumique moyenne de 936 kg/m^3 avec une teneur en eau de 8%. Ce plateau de 60 mm d'épaisseur est découpé selon un plan longitudinal de la loupe conformément au mode opératoire relevé dans une enquête préliminaire menée auprès des maîtres-artisans des coopératives de travail du thuya et de la loupe de thuya d'Essaouira (projet PRAD, avril 2010). Le plateau de la Figure 33b est disposé selon l'axe vertical ascendant c'est-à-dire que la partie supérieure du plateau se situe proche du fût de l'arbre. La direction L correspond donc à la direction longitudinale de l'arbre.

Les autres directions perpendiculaires à L sont repérées ici 1 et 2 plutôt que les indices R et T classiquement utilisés pour le matériau bois. En effet, la présence des excroissances modifiant fortement l'arrangement cellulaire (i.e., pas de tendance circulaire comme les cernes du bois) comme nous avons pu le voir dans la partie A, elles modifient aussi a priori les symétries matérielles du matériau.

Ce plateau a été ensuite débité (trait de scie de 3,2mm) en échantillons parallélépipédiques de dimensions $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ (Figure 33c), dont les positions dans le plateau et leur orientation ont été repérées.

Un de ces cubes a été redécoupé (trait de scie de 1,2mm) en cubes dont le côté a une dimension voisine de 20 mm (Figure 33d) afin d'analyser la distribution ou les variations des rigidités au sein d'un échantillon parallélépipédique de dimensions $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$.

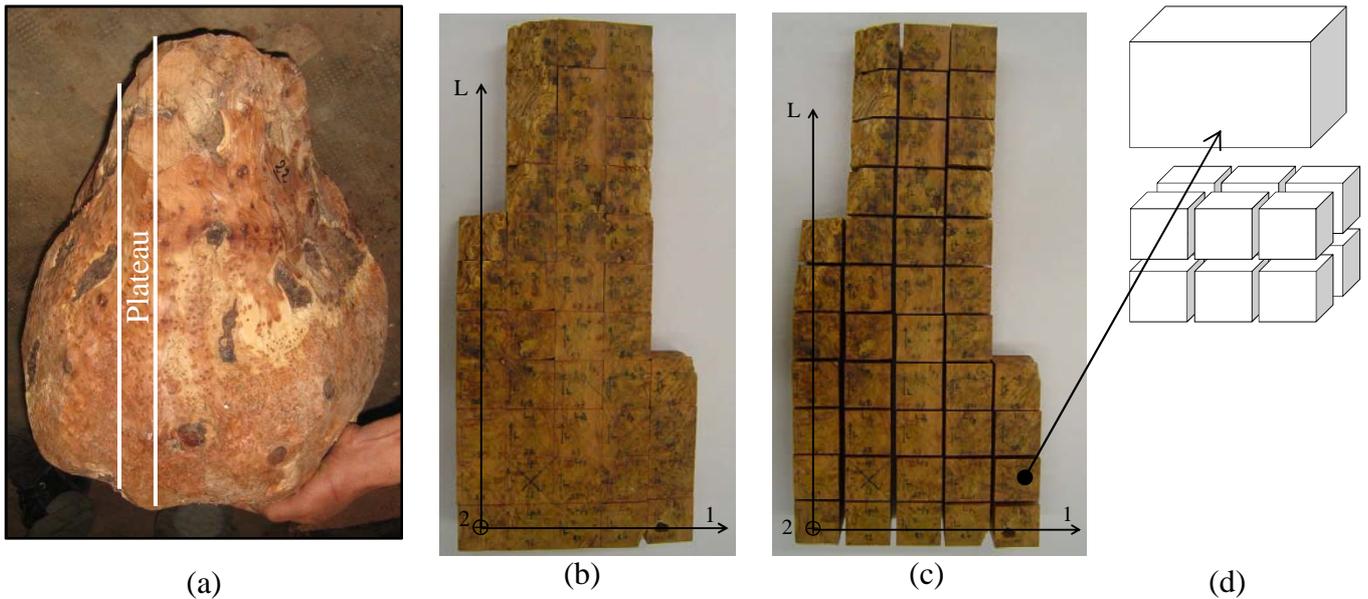


Figure 33 : Plateau de loupe de thuya et débit : a) loupe entière et localisation du plateau, b) plateau et repérage, c) débit du plateau en échantillons de $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ et d) découpe d'un échantillon en cubes d'environ 20 mm de côté

4.1.2 Dispositif expérimental

La méthode retenue est la mesure des rigidités par une méthode ultrasonore classique par contact direct. Celle-ci à l'avantage d'être rapide et de permettre ainsi le traitement d'un grand nombre d'échantillons. Le dispositif expérimental (Figure 34) est constitué d'un générateur d'impulsion large bande (modèle 5800 PR, 35 MHz, Panametrics), d'un oscilloscope (modèle 54621 A, 60 MHz, Agilent) et d'un « banc ultrasonore », constitué d'un bâti, et de deux transducteurs ultrasonores longitudinaux de 1 MHz (modèle V303 SU, \varnothing 13 mm, Panametrics). Les supports des transducteurs sont montés sur des glissières afin de s'adapter à des longueurs différentes d'échantillons. Chaque bloc support est équipé d'un dispositif de « réglage fin » de la longueur, constitué d'une liaison hélicoïdale commandée manuellement par un bouton moleté. Ce dernier dispositif de réglage sert également au réglage de l'effort de contact entre les transducteurs et l'échantillon pour assurer une transmission correcte des ondes ultrasonores. Enfin, toujours pour améliorer la transmission de l'onde, il est possible d'enduire légèrement les surfaces de contact transducteur/échantillon avec un gel siliconé (gel couplant D, Sofranel). Pour éviter qu'il ne pénètre dans l'échantillon, le gel est placé directement sur la surface du transducteur et recouvert d'un film cellophane.

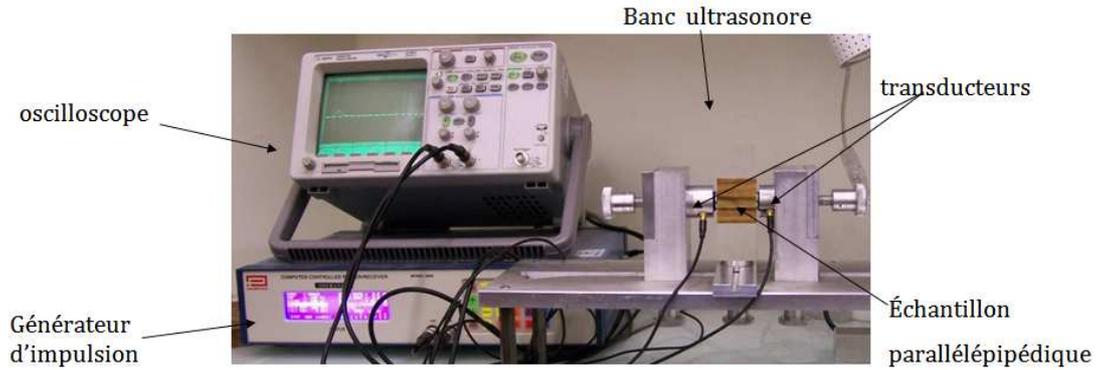


Figure 34 : Dispositif expérimental

La détermination de la vitesse de propagation dans l'échantillon se fait par mesure relative du temps de vol entre le matériau testé et un de référence comme un alliage d'aluminium dont l'échantillon est de dimensions similaires à ceux testés. Ceci permet de s'affranchir de l'incertitude introduite par la méconnaissance de l'instant exact où l'onde ultrasonore est envoyée dans l'échantillon. Cette différence de temps de vol est mesurée à l'oscilloscope entre le premier pic positif de chaque signal reçu (Figure 35). Cette méthode n'est pas la plus précise mais elle est rapide à mettre en œuvre et est valide dans le cas présent car les signaux reçus sont relativement semblables. Il est important de remarquer que vu la dimension des échantillons, des transducteurs et la longueur d'onde (de l'ordre du mm), le mode de propagation des ondes ultrasonore est de type « milieu infini » (voir les paragraphes 1.3.2 et 5.4.2.1).

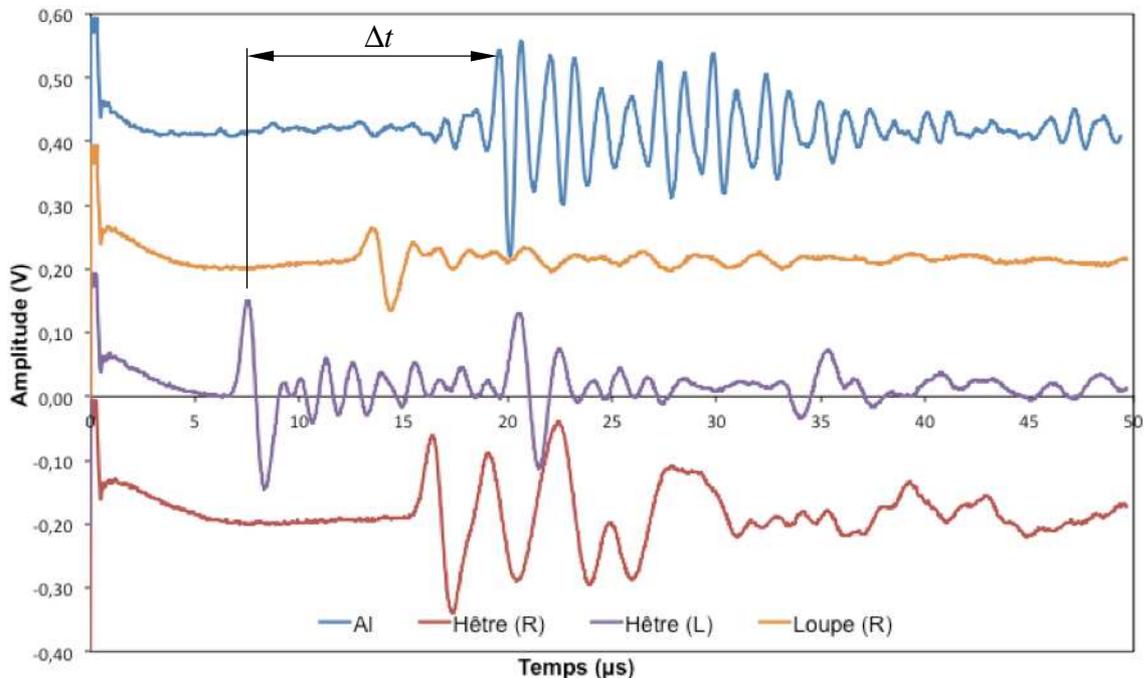


Figure 35 : Comparaison des signaux ultrasonores reçus sur différents matériaux. Les échantillons sont tous sphériques de diamètre 36 mm (voir le chapitre 5). Les courbes ont été décalées en ordonnée par souci de lisibilité.

Connaissant les caractéristiques (i.e., masse volumique ρ et rigidité C , voir le paragraphe 5.4.2.1) de l'alliage d'aluminium utilisé en référence, la dimension de l'échantillon dans la direction de propagation de l'onde (coté de longueur ℓ du cube), nous déterminons le temps de vol τ dans l'échantillon testé suivant :

$$\tau = \Delta t + \left[\ell \sqrt{\frac{\rho}{C}} \right]_{Al}, \quad (4)$$

avec Δt la différence de temps de vol entre l'échantillon de référence et celui testé (Figure 35). On détermine ainsi la vitesse de propagation V_d suivant dans la direction testée \vec{d} pour le matériau testé, ce qui permet de déterminer la rigidité équivalente, C_d^* , dans cette direction à partir de la relation suivante pour un cube :

$$C_d^* = \rho V_d^2 = \frac{m}{\ell \tau^2}, \quad (5)$$

avec ρ la masse volumique de l'échantillon cubique et m sa masse. Une borne supérieure de l'incertitude expérimentale sur la mesure de la rigidité se calcule à partir de l'expression :

$$\frac{\Delta C_d^*}{C_d^*} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \ell}{\ell} + 2 \frac{\Delta \tau}{\tau}. \quad (6)$$

avec :

$$\Delta m = 0,01g, \Delta \ell = 0,01mm \text{ et } \Delta \tau = 0,02\mu s.$$

Cette incertitude est de l'ordre de 0,7% pour un cube de coté 20 mm de loupe de thuya.

La mesure des rigidités équivalentes a été faite, dans un premier temps, sur le plateau entier dans la seule direction permettant d'obtenir un signal : la direction repérée 2 sur la Figure 33a (i.e., épaisseur du plateau). Les mesures ont ensuite été faites sur chaque échantillon parallélépipédique (de dimensions $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$) dans les 3 directions, afin de mesurer la valeur des rigidités équivalentes dans les directions (L, 1, 2), avec 5 points de mesure par face (Figure 36). Enfin, un troisième jeu de mesure de rigidités équivalentes a été réalisé sur les cubes dans les 3 directions mais uniquement au centre de chacune des faces.

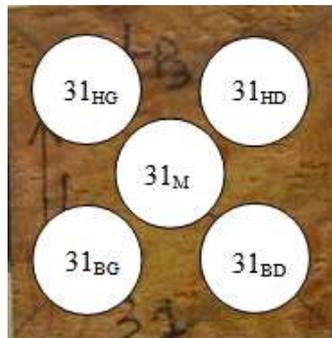


Figure 36 - Localisation des 5 points de mesure de l'échantillon repéré « 31 »

Une analyse statistique de la distribution des rigidités est conduite avec pour objectifs : d'une part, détecter les gradients de propriétés au sein du plateau (dans les directions L et 1) et d'autre part, étudier l'anisotropie de ces propriétés en comparant les valeurs de rigidités dans les différentes directions (L, 1, 2). Pour cela, nous nous baserons sur un modèle de régression

linéaire multiple, en faisant une procédure « pas à pas descendante » pour l'identification des variables pertinentes du modèle, c'est-à-dire que nous étudions, dans un premier temps les corrélations entre les rigidités et l'ensemble des variables puis nous reprenons l'analyse statistique uniquement à partir du groupe de variables significativement corrélées identifiées dans l'étape précédente. L'intervalle de confiance à 95% de la moyenne d'une propriété est calculé à partir de la relation $\bar{x} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$, où sigma est l'écart-type et n le nombre d'échantillons.

4.2 Résultats et analyses

4.2.1 Plateau entier

La Figure 37 montre les différents points qui ont pu être testés sur le plateau entier. Comme nous pouvons le remarquer sur cette figure, il n'a pas été possible d'accéder à tous les points de mesure. En effet, certaines zones du plateau ne présentaient pas de faces parallèles (zone supérieure gauche) et, dans d'autre cas, le signal ultrasonore était trop faible pour pouvoir identifier sans ambiguïté le premier pic positif (zone inférieure gauche). Au total 29 points de mesure sur le plateau ont été exploités. Le tracé des rigidités équivalentes mesurées selon leur position sur le plateau est représenté sur la

Figure 38.

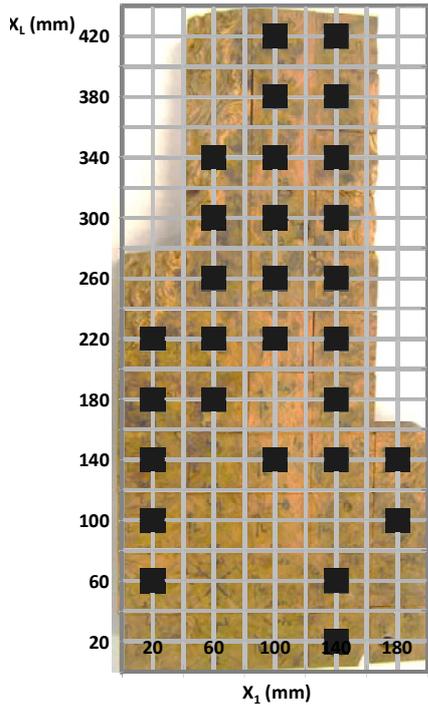


Figure 37 : Position des points de mesure du plateau de loupe de thuya

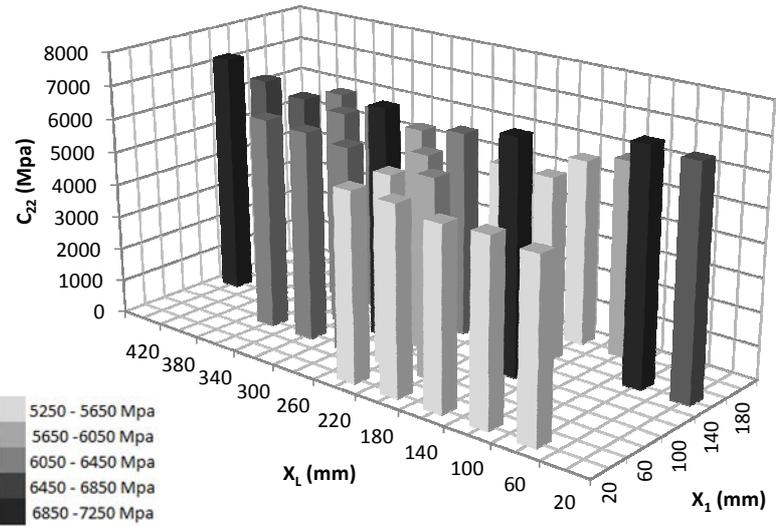


Figure 38 : Distribution des rigidités équivalentes dans la direction 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Intervalle de confiance à 95%
C_{22} (MPa)	5274	7240	6071	215

Tableau 4 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et intervalle de confiance à 95% de la moyenne des rigidités équivalentes mesurées dans la direction 2

Le Tableau 4 présente les valeurs minimale, maximale et moyenne de rigidité mesurée dans la direction 2. Cette première étude expérimentale conduite à l'échelle du plateau entier montre que la valeur moyenne de la rigidité équivalente dans l'épaisseur du plateau, perpendiculaire à la direction longitudinale, est beaucoup plus importante que la valeur moyenne maximale dans le plan transversal du bois de thuya : $C_{RR} = 2510$ MPa, calculée à partir des données extraites de Dakak (Dakak 2002).

Nous allons affiner ce résultat, dans l'étude qui va suivre, par l'analyse des résultats obtenus toujours à l'échelle du plateau mais sur les échantillons parallélépipédiques.

4.2.2 Échantillons parallélépipédiques

Avant de présenter les résultats de la distribution des rigidités au sein du plateau de loupe de thuya, et comme précédemment, il faut préciser que tous les échantillons du plateau n'ont pas pu être retenus pour l'analyse. Certains d'entre eux ont été rejetés soit parce qu'ils ont éclaté lors du sciage, soit, plus fréquemment, parce que le signal ultrasonore était trop faible. Ceci peut être lié à la présence d'occlusion ou de fissure à l'intérieur de l'échantillon, empêchant

la propagation des ondes. Les échantillons retenus et exploitables sont présentés sur la Figure 39 et correspondent aux échantillons non cochés. Ils sont au nombre de 19.



Figure 39 : Échantillons retenus pour l'analyse (non cochés)

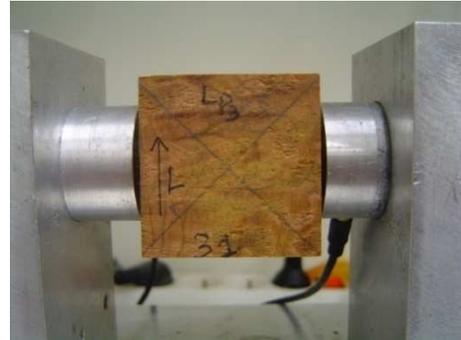


Figure 40 : Test sur échantillon au centre des faces latérales (dans la direction 1)

Les échantillons ont été testés en 5 points de mesure différents par direction (Figure 36) dans chacune des 3 directions L, 1 et 2 (

Figure 40) soit 95 mesures par direction et 285 au total.

L'analyse statistique permet de déterminer, dans chacune des directions, la significativité des corrélations entre les rigidités des échantillons et leur position dans le plateau. Les variables étudiées dans cette analyse sont au nombre de 4 :

- les 2 variables de position de l'échantillon : X_L , selon l'axe (O, \vec{L}) et X_1 selon l'axe $(O, \vec{1})$ (Figure 1b) ;
- la variable $X_L X_1$, traduisant le couplage entre les 2 variables de position, permet de repérer une éventuelle variation du gradient de rigidité selon X_L en fonction de la position selon X_1 ;
- la variable « coin » c de valeur 0 au centre et 1 au bord. En effet, il est nécessaire de vérifier que les mesures prises dans les coins de l'échantillon sont cohérentes avec celles effectuées au centre de l'échantillon et qu'il n'existe donc pas d'effet de bords.

Les rigidités dans les 3 directions s'écrivent sous la forme :

$$\rho V_i^2 = a_i + b_i X_L + c_i X_1 + d_i X_L X_1 + e_i c + \varepsilon, \quad (7)$$

avec $i = \{L, 1, 2\}$, V_i la vitesse de propagation dans la direction i et a_i , b_i , c_i , d_i et e_i les coefficients de régression linéaire et ε l'erreur.

Le Tableau 5 donne les valeurs estimées ainsi que la significativité statistique (P-value) des coefficients de régression de l'équation (4). Les résultats de cette analyse statistique montrent l'existence d'une corrélation significative (P-value <5%) :

- des valeurs de rigidité longitudinale avec la position longitudinale (X_L), avec la position transversale (X_1) du plateau et avec la variable de couplage des positions ($X_L X_1$) ;
- des valeurs de rigidité dans la direction 1 et la position transversale (X_1);
- des valeurs de rigidité dans la direction 2 et les positions longitudinale (X_L) et transversale (X_1).

	Coefficient (Variable)	Valeur estimée	P-value (%)
ρV^2_L (MPa)	a_L	7258	0,0%
	$b_L (X_L)$	23,5	0,0002%
	$c_L (X_1)$	21,5	0,1%
	$d_L (X_L X_1)$	-0,1	0,82%
	e_L	-425,7	22%
ρV^2_1 (MPa)	a_1	8860	0,0%
	$b_1 (X_L)$	-1,44	16,2%
	$c_1 (X_1)$	-5,18	3,17%
	$d_1 (X_L X_1)$	-40,7	91,3%
	e_1	0,000	62,2%
ρV^2_2 (MPa)	a_2	6821	0,0%
	$b_2 (X_L)$	1,18	3,9%
	$c_2 (X_1)$	6,17	0,0%
	$d_2 (X_L X_1)$	0,000	50,8%
	e_2	-188	34,9%

Tableau 5- Valeurs estimées et P-value des coefficients de régression entre les rigidités des échantillons et les variables X_L , X_1 , $X_L X_1$ et « coin »

Enfin, point important, les résultats montrent aussi qu'il n'existe pas de corrélation entre les valeurs des rigidités dans les différentes directions et la position (centrale ou sur les bords) de la mesure au sein d'un échantillon (P-value >5%) ce qui traduit l'absence d'effet de bord sur ces mesures. Nous pouvons donc poursuivre l'analyse statistique sur l'ensemble des mesures.

La Figure 41 (respectivement Figure 42) montre le tracé des rigidités dans les 3 directions en fonction de la position selon l'axe longitudinal de l'arbre X_L (respectivement transversal X_1).

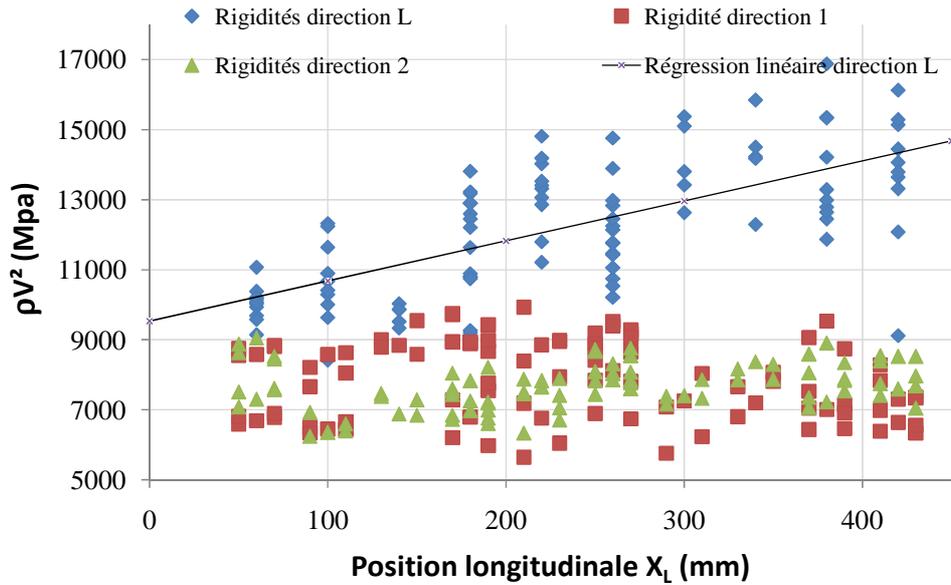


Figure 41 : Tracé des rigidités dans les 3 directions en fonction de la position longitudinale X_L

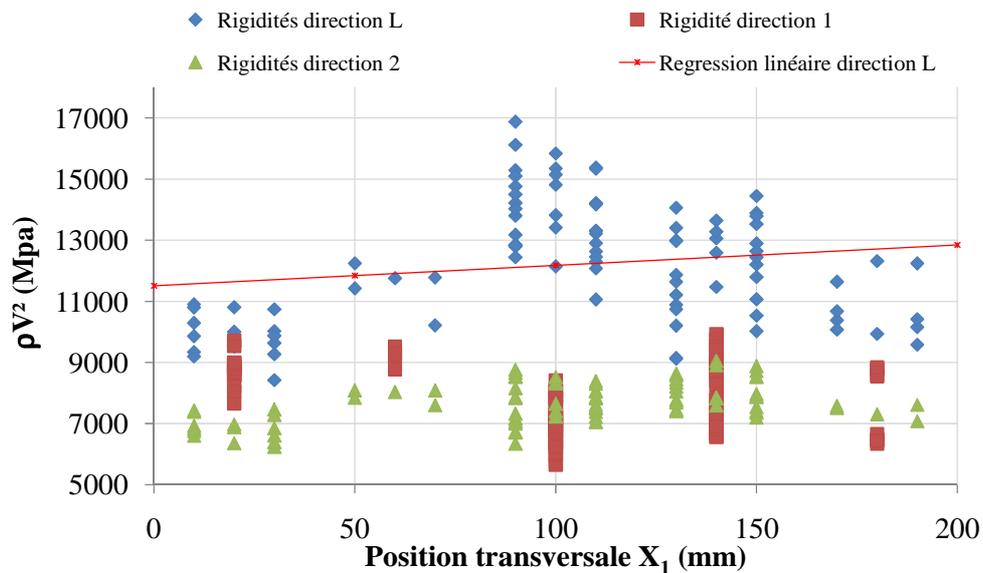


Figure 42 : Tracé des rigidités dans les 3 directions en fonction de la position transversale X_1

La Figure 41 montre, d'une part, que les valeurs des rigidités longitudinales sont supérieures aux rigidités transversales (direction 1 ou 2) et, d'autre part, que les rigidités transversales sont du même ordre de grandeur. Pour vérifier que ces rigidités transversales dans les directions 1 et 2 ne sont pas significativement différentes, nous avons mené une analyse statistique sur l'ensemble des rigidités transversales en fonction des variables « direction » d (de valeur 0 pour la direction 1 et 1 pour la direction 2) ainsi que les positions X_L , X_1 et $X_L X_1$. Les rigidités transversales, ρV_T^2 , dans la direction 1 et 2 confondues, s'écrivent sous la forme :

$$\rho V_T^2 = a_T + b_T d + c_T X_L + f_T X_1 + g_T X_L X_1 + \varepsilon \quad (8)$$

avec : a_T , b_T , c_T , f_T et g_T les coefficients de régression linéaire et ε l'erreur.

Les résultats de cette analyse, présentés dans le Tableau 6, donnent les valeurs estimées ainsi que la P-value des coefficients de régression de l'équation (5).

	Coefficient (Variable)	Valeur estimée	P-value (%)
ρV_T^2 (MPa)	a_T	7887	0,0%
	$b_T(d)$	-177	19,6%
	$c_T(X_L)$	0,036	95,3%
	$f_T(X_1)$	0,22	87,8%
	$g_T(X_L X_1)$	0,00	39,1%

Tableau 6 : Valeurs estimées et P-value des coefficients de régression entre les rigidités transversales (direction 1 et 2) des échantillons et les variables d (direction), X_L , X_1 , $X_L X_1$

Les résultats (Tableau 6) montrent qu'il n'existe pas de corrélation entre les valeurs des rigidités transversales et la direction 1 et 2 (P-value >5%). Les rigidités transversales dans la direction 1 et 2 ne sont donc pas significativement différentes. Ce résultat est remarquable car dans le bois de thuya (Dakak 2002), cette différence de rigidité entre les directions transversale, radiale et tangentielle existe avec un rapport voisin de 2 (dans la direction radiale, le bois est plus rigide que dans la direction tangentielle).

Le Tableau 7 présente la comparaison entre les valeurs moyennes des rigidités dans le plan transversal entre le bois de thuya et la loupe de thuya (avec un intervalle de confiance de 95%).

Thuya (Dakak 2002)		Loupe de thuya	
ρV_{TT}^2	ρV_{RR}^2	ρV_{lou2}^2	IC
1250	2560	7753	68

Tableau 7 : Valeurs des rigidités moyennes (en MPa) dans le plan transversal entre le bois de thuya et de la loupe (intervalle de confiance de la moyenne à 95%).

L'étape suivante consiste à reprendre l'analyse statistique des rigidités longitudinales en ne tenant compte que des variables significativement corrélées. La rigidité dans la direction L s'écrit sous la forme :

$$\rho V_L^2 = a_L + b_L X_L + c_L X_1 + d_L X_L X_1 + \varepsilon. \quad (9)$$

Les résultats de cette analyse présentés dans le Tableau 8, donnent les valeurs estimées, l'intervalle de confiance à 95% ainsi que la P-value des coefficients de corrélation de l'équation (6).

	Coefficient (Variable)	Valeur estimée	Intervalle de confiance	P-value (%)
ρV_L^2 (MPa)	a_L	6917	[5231 ; 8604]	0,0%
	$b_L(X_L)$	23,5	[14,2 ; 32,7]	0,0%
	$c_L(X_1)$	21,5	[8,9 ; 34]	0,1%
	$d_L(X_L X_1)$	-0,100	[-0,17 ; 0,026]	0,84%

Tableau 8 : Valeurs estimées des coefficients de corrélation entre les rigidités longitudinales des échantillons et leurs positions dans le plateau

Les résultats de cette deuxième étape de l'analyse statistique (Tableau 8) montrent que les corrélations trouvées dans l'étape précédente sont toujours significatives. Nous avons tracé, sur les Figure 41 et Figure 42, la droite du modèle de régression établie à partir des coefficients estimés.

Nous pouvons donc conclure ici sur une « rigidification » importante du bois de la loupe de thuya dans le sens longitudinal du bas vers le haut. Dans la zone inférieure de la loupe, la valeur de rigidité vaut 7 GPa, par contre, 45 cm plus haut, dans la « zone de transition » situé entre la loupe et le tronc du thuya, la valeur de la rigidité longitudinale estimée (i.e., 14,7 GPa) est très proche de la valeur de la rigidité longitudinale estimée sur celle du bois de thuya (14,4 GPa).

Par contre, les tests sur les autres variables montrent que leur effet n'est pas significatif au seuil de 5%. Il n'existe donc pas de corrélation significative entre les rigidités dans les directions transversales (1 et 2) et les positions longitudinales ou transversales du plateau.

4.2.3 Échantillons cubiques

La Figure 43 présente, sur le même graphique, les valeurs des rigidités mesurées sur un échantillon parallélépipédique dans les trois directions L, 1 et 2 (une mesure centrale par échantillon et par direction) et les valeurs des rigidités (trait vertical) et leur moyenne mesurées sur les 12 échantillons cubiques extraits de cet échantillon parallélépipédique.

Pour faciliter la comparaison, nous avons placé les valeurs des rigidités des échantillons cubiques à côté de celle de l'échantillon parallélépipédique et ceci pour chacune des 3 directions. Les barres verticales représentent les valeurs minimales et maximales des rigidités pour les 12 échantillons cubiques. La comparaison des rigidités montre que, quelle que soit la direction testée, la rigidité mesurée sur l'échantillon parallélépipédique est toujours supérieure à la valeur moyenne des rigidités des échantillons cubiques. Cependant, la valeur de l'échantillon parallélépipédique reste toujours à l'intérieur de l'intervalle [min, max] des valeurs mesurées sur les échantillons cubiques. Toutefois, la rigidité de l'échantillon parallélépipédique dans la direction 2 (de plus grande épaisseur soit 60 mm) est très proche de la valeur maximale des rigidités des échantillons cubiques.

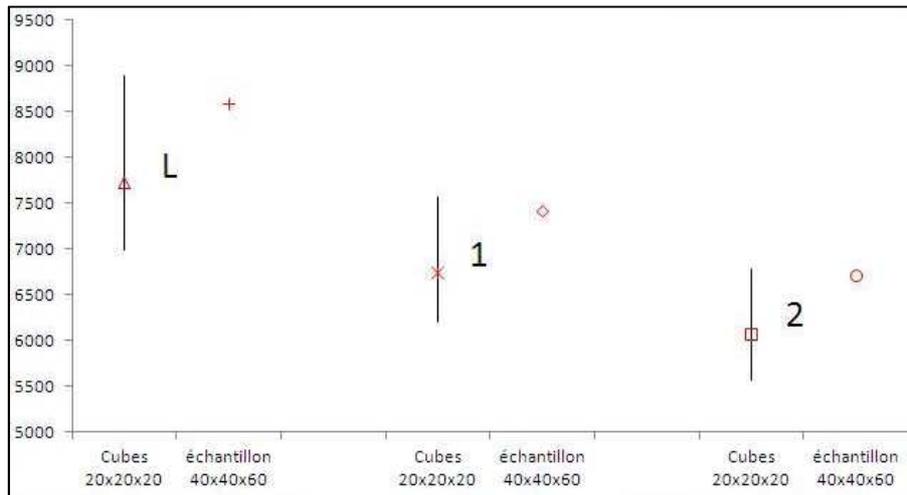


Figure 43 : Comparaison des valeurs de rigidité mesurées sur les cubes des 20mm et sur l'échantillon de dimension $40 \times 40 \times 60 \text{mm}^3$ dans les 3 directions (1, 2, L), la barre verticale correspond aux valeurs minimale et maximale des rigidités.

Nous pouvons donc conclure de cette étude que les valeurs de rigidité mesurées sur un échantillon parallélépipédique sont proches de celles mesurées sur les 12 échantillons cubiques tirés de ce dernier. Le passage d'échantillons de dimensions de l'ordre de 40 mm à des échantillons de 20 mm s'accompagne néanmoins d'une légère diminution des rigidités mesurées.

Cette légère diminution des rigidités peut être due aux plusieurs facteurs notamment, le changement d'orientation des cernes de croissance ou bien la présence ou non des excroissances.

En effet, pour l'échantillon parallélépipédique (suffisamment grand) de dimension $40 \times 40 \times 60 \text{mm}^3$, la mesure du temps de vol dans la direction L par exemple (Figure 44), est faite au centre de l'échantillon contenant des « cernes » relativement bien alignés. Après découpage en échantillons cubiques, la mesure du temps de vol dans la direction L est faite dans d'autres endroits dont les cernes sont distribués différemment (cernes perpendiculaires dans le cas du cube 4 et 6 par exemple, Figure 44). De plus, la présence des excroissances dans les cubes 1 et 5 par exemple peut affecter la mesure du temps de vol. Cela explique que la mesure sur le grand échantillon soit dans le haut de la plage des mesures sur petits échantillons.



Figure 44 : Variation de la distribution des cernes dans un échantillon parallélépipédique de dimension $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ et dans les petits échantillons cubiques de 20mm de côté près découpage.

4.3 Conclusion

L'analyse de la distribution des rigidités du bois de la loupe au sein d'un plateau montre que le bois de la loupe de thuya présente des symétries matérielles différentes de celles du bois de thuya. En effet, nous observons un gradient de rigidité dans le sens longitudinal. Les zones les plus basses de la loupe présente une valeur de rigidité longitudinale voisine de celles transversales et tend, vers les zones les plus hautes, proche du tronc, vers des valeurs voisines de celle du bois de thuya (dans la direction longitudinale). Ce résultat est à rapprocher des observations faites sur les coupes transversales de la tomographie de la loupe entière (voir le Chapitre 2). Les zones de la loupe proche du tronc présente de moins en moins d'excroissances et la structure de la loupe ou en tout cas l'organisation de la matière dans un plan transversal tend vers celle du bois de thuya. A priori la forte présence des excroissances dans le bas de la loupe de thuya engendre une « homogénéisation » des caractéristiques mécaniques ou moins dans les 3 directions mesurées.

Pour aller plus loin et étudier complètement les symétries matérielles de la loupe de thuya, nous nous sommes orientés vers un échantillon de forme sphérique afin d'obtenir, sur le même échantillon, un grand nombre de directions mesurées.

Cette étude préliminaire nous permet de fixer la dimension des échantillons sphériques de loupe de thuya. Cette dimension doit répondre à une double contrainte :

- Être la plus grande possible pour garantir une mesure précise sur un volume représentatif ;
- Assurer une transmission suffisante des ondes ultrasonores pour obtenir un signal exploitable.

Les mesures effectuées sur des échantillons de $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ ont montré une bonne transmission des ondes ultrasonores dans les deux directions transverses d'épaisseur 40 mm.

Au-delà de 40 mm, il arrive que le signal devienne trop faible pour effectuer une mesure correcte. En effet, sur les mesures effectuées sur le plateau de loupe de thuya, la mauvaise transmission des ondes ultrasonores, dans la direction d'épaisseur 60 mm, a conduit à écarter 12 mesures sur les 41 faites sur le plateau (Figure 37). Pour cette raison, nous avons retenu, pour la suite, comme dimension d'échantillon sphérique, une valeur voisine de 40 mm et qui peut même être plus faible puisque les rigidités mesurées sur des échantillons cubiques d'environ 20 mm de côté sont très proches de celles obtenues sur les échantillons parallélépipédiques.

5 Mise au point d'une méthode ultrasonore par contact direct sur échantillons sphériques

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'adaptation, la mise au point et la validation du banc expérimental de mesure ultrasonore par contact direct conduit sur des échantillons sphériques. Ce banc expérimental est conçu spécifiquement pour la détermination des symétries matérielles de tout type de matériau au comportement mécanique mal-connu. La validation du banc ultrasonore s'est faite sur deux matériaux de référence : tout d'abord un alliage d'aluminium (2017A), au comportement homogène, isotrope, peu amortissant et ayant une vitesse de propagation des ondes dans la même gamme que celle du bois dans la direction longitudinale (i.e., quelque 1000 m/s), puis le bois de hêtre (*Fagus sylvatica*) homogène à l'échelle de l'essai (i.e., dimension de l'échantillon et longueur d'onde des ultrasons supérieure aux dimensions des cernes) et au comportement orthotrope.

La validation à partir de l'alliage d'aluminium passe par la détermination de ses coefficients de rigidité par deux méthodes expérimentales. La première méthode est un essai classique de traction et la deuxième est un essai ultrasonore par contact direct conduit sur une sphère d'aluminium prise au voisinage de l'éprouvette de traction.

La validation expérimentale du banc expérimental sur le bois de hêtre consiste à rechercher ses symétries matérielles après avoir effectué une désorientation contrôlée par les trois angles d'Euler (ψ, τ, λ). Les symétries matérielles correspondent aux directions principales de la matrice de rigidité supposée orthotrope. La détermination de cette matrice est réalisée en traitant successivement le problème direct (i.e., la vitesse de propagation des ondes dans une direction quelconque est calculée à partir de la connaissance a priori de la matrice de rigidité dans le repère principal du matériau) et le problème inverse à partir d'une série d'essais ultrasonores (i.e., mesure de la vitesse de propagation des ondes dans plusieurs directions).

Une modélisation théorique du problème direct est présentée. Sa résolution numérique permet de calculer la rigidité apparente du matériau dans n'importe quelle direction de propagation des ondes. À partir de la solution du problème direct, la résolution du problème inverse permet de déterminer 3 coefficients de la matrice de rigidité, 3 combinaisons linéaires des 6 autres coefficients (les mesures ne sont faites qu'avec des ondes longitudinales de compression) et l'orientation du repère d'orthotropie.

5.1 Principe et dispositif expérimental

5.1.1 Principe

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps de vol de l'onde ultrasonore traversant l'échantillon sphérique dans toutes les directions (balayage de mesure en 3D). Les directions de mesure sont déterminées en choisissant un mode de traçage latitude-longitude

qui permet de repérer un nombre élevé de directions sur la sphère. Chaque intersection d'une latitude et d'une longitude est une direction de mesure (Figure 45). Avec un pas angulaire fixe de 15° entre 2 longitudes et 2 latitudes, nous obtenons 133 directions de mesure. Ce mode de traçage conduit à une concentration de points de mesure au niveau des pôles au détriment de l'équateur. Il est alors nécessaire de tenir compte de cette répartition non homogène des points lors de l'identification des directions principales. Il existe d'autre mode de traçage comme des découpages conduisant à un ensemble de surfaces d'aire constante sur toute la surface de la sphère garantissant une répartition homogène des points de mesure mais leur mise en œuvre est plus complexe.

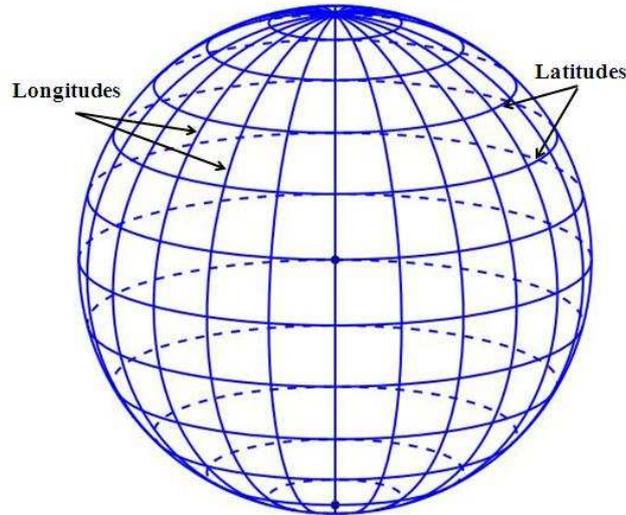


Figure 45 : Mode de traçage longitude-latitude

Le dispositif expérimental (Figure 46) est le même que celui du chapitre précédent (voir le paragraphe 5.1.2). Seul le « banc ultrasonore » a été légèrement modifié comme nous allons le décrire dans les paragraphes suivant.

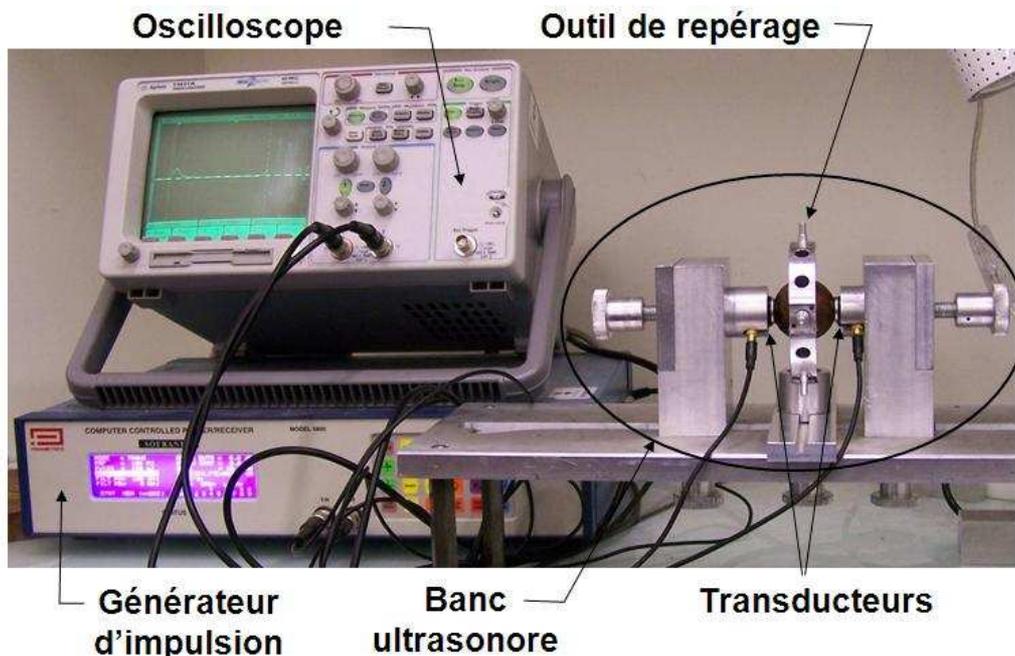


Figure 46 : Dispositif expérimental

5.1.2 Préparation des échantillons

Pour le bois de hêtre et de thuya, un premier débit a été réalisé dans le but de transformer le billon en barreaux de section carrée de dimension $500 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ suivant les axes L, R et T. Pour le bois de la loupe de thuya, nous avons choisi de travailler dans le même repère que dans le chapitre précédent, à savoir la direction longitudinale de l'arbre L et 2 directions arbitraires 1 et 2 appartenant au plan transverse. Comme pour le hêtre et le bois de thuya, nous avons débité un barreau de section carrée de dimension $500 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ suivant les axes L, 1 et 2.

Ces barreaux de hêtre, de thuya et de loupe de thuya ont ensuite été ramenés à une section cylindrique de 38 mm de diamètre par une opération classique de tournage. Ces barreaux cylindriques ont été repris en usinage sur un tour équipé d'un porte-outil dédié à l'usinage d'échantillons sphériques de diamètre $36 \pm 0,1 \text{ mm}$ (Figure 47).

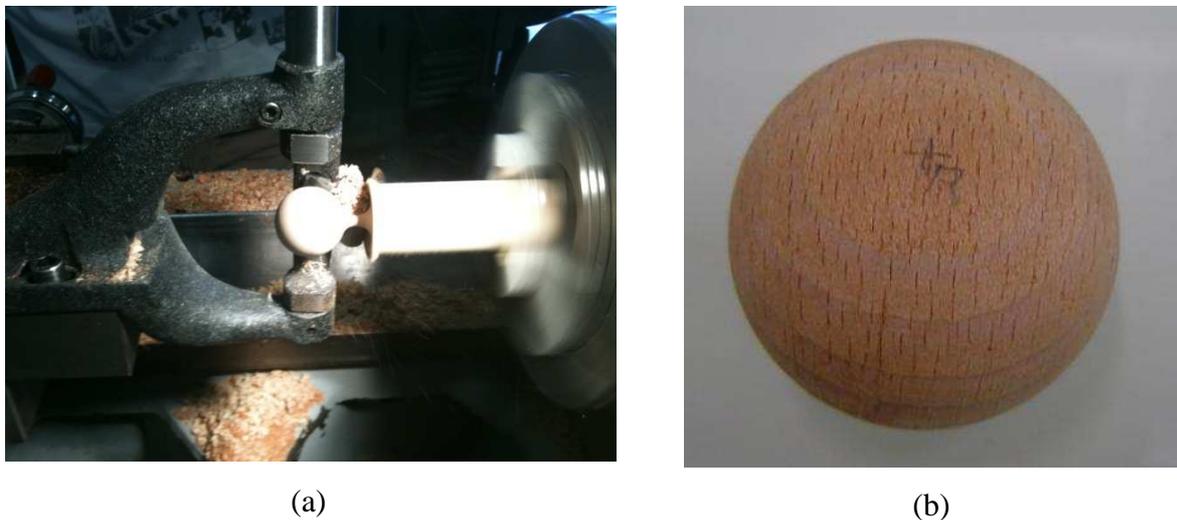


Figure 47 : Usinage d'un échantillon sphérique : a) outil d'usinage des sphères sur un tour conventionnel ; b) échantillon sphérique usiné de 36 mm de diamètre.

5.1.3 Création d'un outil de traçage

Comme nous l'avons vu, le repérage des points nécessite le tracé précis de la sphère sous forme de latitudes et de longitudes. Un outil de traçage a donc dû être spécialement conçu pour le réaliser (Figure 48). Il est constitué d'un système de centrage et de maintien de la sphère et d'un arceau pivotant autour des axes de maintien de la sphère. Un ensemble de 10 alésages, équi-répartis angulairement, ont été usinés sur cet arceau. Un crayon de papier, muni d'un porte-crayon, est ensuite mis en position successivement dans chacun des alésages pour tracer les latitudes ou laissé en position centrale pour tracer les longitudes.



Figure 48 : Outil de traçage

Ce mode de repérage n'assure pas une distribution de points équi-répartis sur la surface de la sphère (Figure 45), nous disposons d'une concentration de points de mesure au niveau des pôles. Cette concentration de points peut s'avérer intéressante lorsque que l'on a besoin d'informations supplémentaires sur une zone particulière mais pose aussi un problème lors de l'identification des directions de symétrie matérielle comme nous le verrons plus loin.

5.1.4 Création d'un outil de repérage

Le rôle de l'outil de repérage est de positionner précisément la sphère dans la direction souhaitée pour la mesure ultrasonore. Ce repérage de la direction testée sur le banc ultrasonore est assuré par un montage spécial (Figure 49) permettant d'amener en coïncidence 2 points d'intersection latitude/longitude, situés à 90° sur une même longitude, avec 2 pointes sèches montées à 90° sur l'arceau de traçage. La direction de mesure est contrôlée indirectement par la position géométrique des 2 pointes sèches situées dans le plan perpendiculaire à la direction testée. La sphère est orientée manuellement jusqu'à obtenir l'orientation souhaitée.

Un réglage préliminaire de la position des deux pointes sèches par rapport à l'axe des transducteurs est nécessaire. Il est réalisé grâce à une glissière perpendiculaire à la direction principale des deux transducteurs et consiste, en l'absence d'échantillon, à amener visuellement le point d'intersection des deux pointes sèches en coïncidence avec l'axe des deux transducteurs.

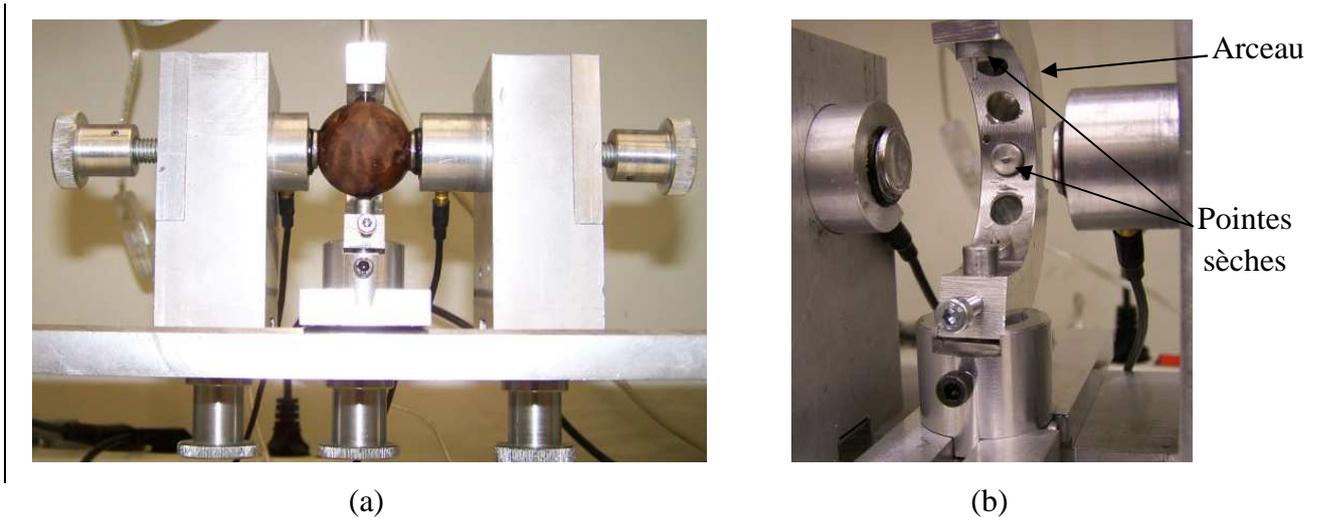


Figure 49 : Outil de repérage : (a) avec l'échantillon et (b) sans échantillon

5.1.5 Interfaces de contact échantillon-transducteur

La forme géométrique sphérique de l'échantillon entraîne que le contact entre ce dernier et la surface terminale plane des transducteurs est (quasi)ponctuel (Figure 50). Ce contact ne pose aucun problème pour certains matériaux ayant une très bonne transmission des ondes ultrasonores, à l'interface avec les transducteurs, comme l'aluminium mais ce n'est pas le cas pour le bois.

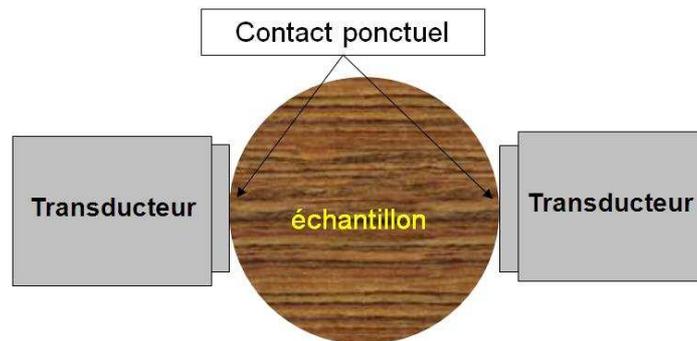


Figure 50 : Contact ponctuel entre échantillon et transducteurs

En effet, des essais préliminaires, conduits sur des échantillons sphériques de bois de hêtre directement en contact avec les deux transducteurs de surface terminale plane, ont montré que la transmission des ondes ultrasonores est considérablement diminuée dans ce cas et qu'il est souvent impossible de déterminer le temps du vol, en particulier dans les directions R et T. Afin de résoudre ce problème, nous avons usiné des interfaces de liaison en alliage d'aluminium (2017A) entre l'échantillon sphérique et la surface terminale plane des deux transducteurs pour augmenter la surface de contact entre ces deux derniers (Figure 51). Ces interfaces sont centrées sur l'extrémité du transducteur grâce à un épaulement. La zone de contact du transducteur avec la sphère du matériau à tester devient alors une portion de sphère dont le plus grand diamètre est d'environ 5 mm.

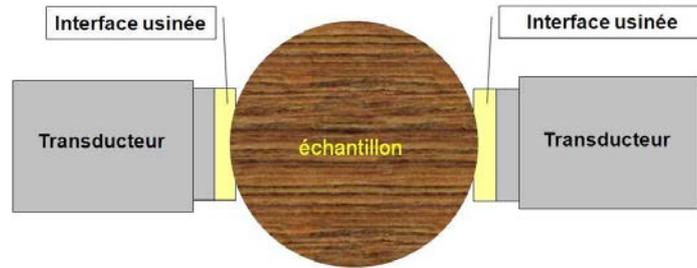


Figure 51 : Augmentation de la surface de contact par ajout des interfaces à calotte sphérique

La présence de ces deux interfaces de liaison engendre une modification de la distance de propagation de l'onde ultrasonore et par la suite du temps de vol qu'il est nécessaire de corriger sauf pour une mesure relative (voir le paragraphe 5.1.2). La correction se fait en mesurant la différence des temps de vol avec et sans interfaces sur un matériau acceptant une bonne transmission sur un contact ponctuel entre la sphère et le transducteur. L'alliage d'aluminium 2017A répond à cette contrainte. On obtient ainsi une correction du temps de vol de $0,2 \mu\text{s}$, ce qui est faible par rapport au temps de vol mesuré dans l'alliage d'aluminium ($6 \mu\text{s}$) ou le bois (de 8 à $23 \mu\text{s}$). La Figure 52 montre la disposition de la sphère pour effectuer cette correction.

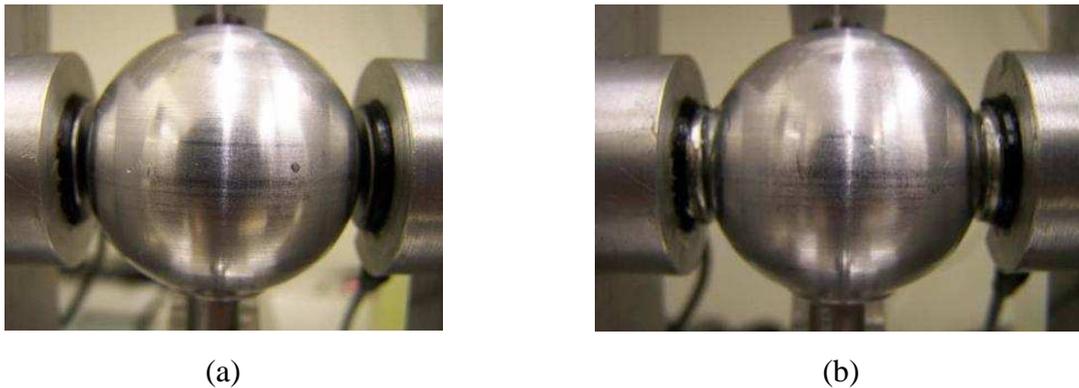


Figure 52 : Correction du temps de vol : a) essai sans interfaces ; b) essai avec interfaces.

Le dispositif qui vient d'être présenté, permet d'obtenir les rigidités d'un matériau dans un nombre quelconque (ou du moins élevé) de directions. Dans la suite du manuscrit nous présenterons la méthode qui permet d'obtenir à la fois les directions du repère de symétries matérielles et certaines valeurs de rigidité à partir d'un jeu de données obtenues dans plusieurs directions. Pour valider cette méthode, nous avons eu recours à des échantillons de « référence ».

5.2 Matériels

5.2.1 Matériau isotrope de référence : alliage d'aluminium 2017A

La validation de la méthode passe par la détermination des propriétés élastiques d'un matériau isotrope de référence (alliage d'aluminium 2017A) suivant deux méthodes expérimentales : d'une part, à partir d'un essai classique de traction quasi-statique (mesure des déformations longitudinale et transverse par des jauges de déformation) et, d'autre part, à partir de la

méthode ultrasonore conduite sur une sphère d'aluminium prise au voisinage de l'éprouvette de traction. La méthode ultrasonore par contact direct sur l'échantillon sphérique permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore et, en mesurant la masse volumique du matériau, de déterminer le module de rigidité du matériau en traction/compression. L'essai de traction est réalisé dans la même direction que la mesure ultrasonore sur une éprouvette prélevée dans la prolongation de la sphère et usinée suivant la direction de mesure ultrasonore (Figure 53) pour palier à une éventuelle (légère) anisotropie de l'alliage suite au procédé d'obtention du brut (i.e., étirage ou extrusion). Dans le cas d'un matériau isotrope comme l'aluminium, deux paramètres sont nécessaires pour déterminer la matrice de rigidité : le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν . L'essai de traction nous a permis de déterminer ces deux paramètres et d'en déduire la matrice de rigidité. L'essai ultrasonore, avec une onde longitudinale de compression uniquement, ne permet d'accéder qu'aux 3 premiers coefficients de la diagonale de la matrice de rigidité qui sont identiques dans ce cas si le matériau est bien isotrope. La comparaison des résultats entre les essais va nous permettre aussi de valider le fait que le temps de vol mesuré sur la sphère peut être relié à la célérité de l'onde en divisant « simplement » le diamètre de la sphère par le temps, et que cette célérité est bien reliée à la rigidité.

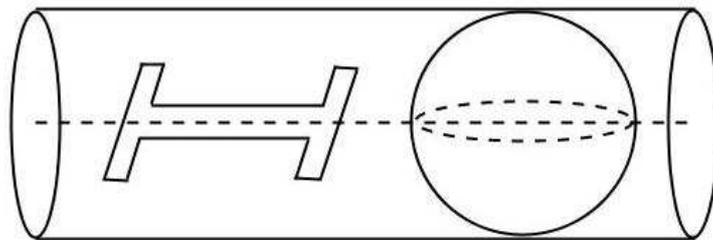


Figure 53 : Confection des éprouvettes pour l'essai de traction et l'essai ultrasonore pris dans un barreau cylindrique.

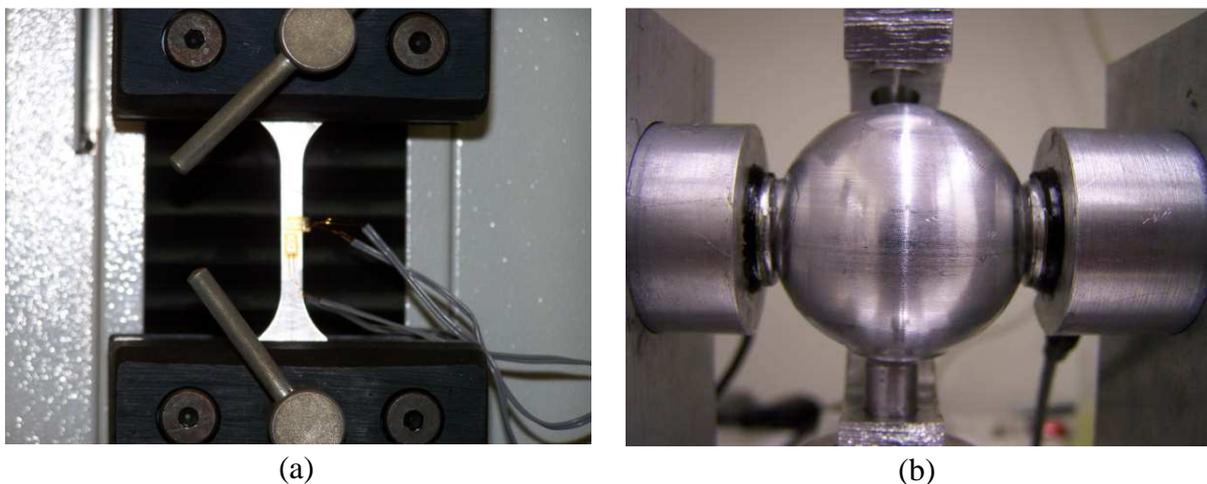


Figure 54 : Détermination de la constante de rigidité : (a) par essai de traction ; (b) par essai ultrasonore

Pour chaque essai, les résultats sont obtenus sur un même échantillon en répétant 30 fois la mesure. La masse de l'échantillon est mesurée à l'aide d'une balance de type PM 100 de Mettler-Toledo. L'erreur de mesure de la balance est $\Delta m = \pm 0,01g$, le diamètre de l'échantillon

est mesuré par un pied à coulisse de type Mitutoyo d'incertitude $\Delta r = \pm 0,01$ mm. La masse volumique calculée pour cet alliage d'aluminium est alors de $\rho = 2806$ kg/m³. (l'incertitude sur cette mesure valant 2,8 kg/m³)

5.2.2 Matériau orthotrope homogène : bois de hêtre

Nous avons choisi de travailler sur le bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) de la forêt de Sainte-Baume, région de sud-est de la France, pour valider notre méthode. La raison pour laquelle nous avons fait ce choix est que le bois de hêtre est un matériau très homogène (pores diffus, largeur de cernes environ 3mm) pour une longueur d'onde comprise entre 1,6 et 4,8 mm pour une fréquence de 1 MHz) et orthotrope, à l'échelle de la mesure, et qui peut donc être considéré comme un matériau de référence. Les échantillons ont été sélectionnés dans la partie périphérique de l'arbre pour avoir des rayons de courbure des cernes les plus grands possibles. La teneur en eau des échantillons est de 12%, et leur masse volumique est de 700 kg/m³ (l'incertitude sur cette mesure valant 1,6 kg/m³). Les 3 directions naturelles de bois, L, R et T, ont été déterminées anatomiquement, à l'œil nu, avant l'usinage des échantillons sphériques.

5.3 Traitement des données

Suivant la Figure 55, $(0, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})_{\text{abs}}$ représente le repère orthonormé, pris comme absolu, lié au banc ultrasonore. $\vec{3}$ est la direction verticale, la direction $\vec{2}$ est la direction de propagation des ondes et la direction $\vec{1}$ est la direction perpendiculaire au 2 autres directions. $(0, \vec{1}^*, \vec{2}^*, \vec{3}^*)$ est le repère choisi pour le traçage des latitudes et des longitudes. C'est un repère lié à l'échantillon sphérique, il caractérise le positionnement de la sphère suivant la direction de propagation de l'onde ultrasonore. C'est aussi le repère choisi pour la représentation en 3D des rigidités apparentes.

Pour repérer toutes les directions de mesure au cours des essais ultrasonores, 2 paramètres angulaires sont nécessaires, φ et θ , pour passer du repère $(0, \vec{1}^*, \vec{2}^*, \vec{3}^*)$ au repère $(0, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})_{\text{abs}}$. $(0, \vec{1}', \vec{2}', \vec{3}')$ et $(0, \vec{1}'', \vec{2}'', \vec{3}'')$ représentent les repères intermédiaires entre le repère absolu et le repère de traçage.

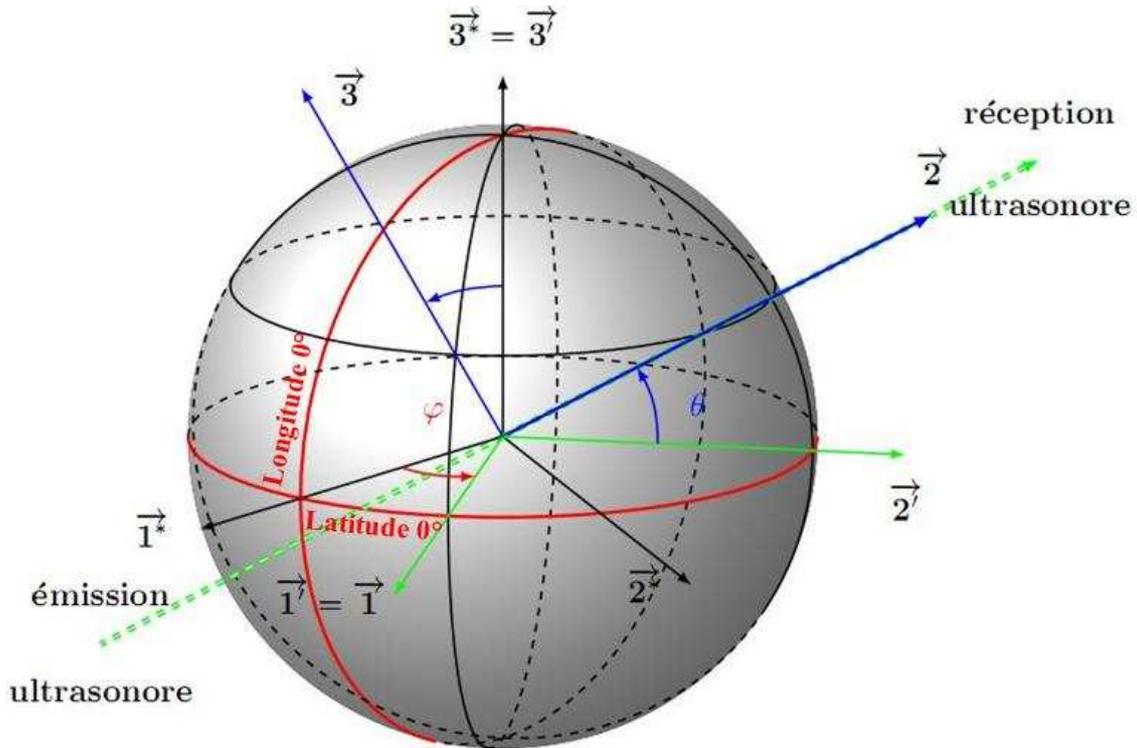


Figure 55 : Positionnement de la direction de propagation de l'onde ultrasonore à partir du traçage de la sphère

Concernant le repère lié au matériau, nous appelons $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ le repère d'orthotropie dans le cas du bois de hêtre ou de thuya (matériau orthotrope) et $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{L})$ celui dans le cas de la loupe de thuya. Quand le traçage est fait suivant le repère d'orthotropie, le repère de traçage et celui lié au matériau sont identiques.

La rigidité apparente C , selon la direction $\vec{2}$, se calcule à partir de la relation :

$$C = \rho V^2 = \frac{3m}{\pi r \tau^2}, \quad (10)$$

avec ρ la masse volumique de l'échantillon (en kg/m^3), V la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore mesurée dans la direction $\vec{2}$ (en m/s), m la masse de l'échantillon sphérique (kg), r son rayon (en m) et τ le temps de vol (en s).

5.3.1 Modélisation théorique du problème direct

Le problème direct est présenté de la manière suivante : connaissant la matrice de rigidité du matériau testé, dans son repère d'orthotropie, il s'agit de déterminer l'expression de la rigidité apparente C obtenue lors d'une mesure dans la direction $\vec{2}$ déterminée par θ et φ (Figure 55). Les résultats de la totalité des essais ultrasonores autour de la sphère peuvent ainsi être simulés par le calcul.

- Calcul de la rigidité dans une direction quelconque : $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ est donné dans $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})_{\text{abs}}$ par ses angles (ψ, τ, λ) définissant les 3 rotations successives d'Euler. La matrice de passage P qui relie les 2 repères est :

$$P = \begin{pmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\tau & \sin\tau \\ 0 & -\sin\tau & \cos\tau \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

soit encore :

$$P = \begin{bmatrix} \cos\lambda \sin\psi + \cos\psi \cos\tau \sin\lambda & \cos\psi \cos\lambda - \cos\tau \sin\psi \sin\lambda & \sin\tau \sin\lambda \\ -\cos\psi \cos\tau \cos\lambda + \sin\psi \sin\lambda & \cos\tau \cos\lambda \sin\psi + \cos\psi \sin\lambda & -\cos\lambda \sin\tau \\ -\cos\psi \sin\tau & \sin\psi \sin\tau & \cos\tau \end{bmatrix}, \quad (12)$$

que nous noterons :

$$P = \begin{pmatrix} R_1 & T_1 & L_1 \\ R_2 & T_2 & L_2 \\ R_3 & T_3 & L_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Pour un matériau orthotrope de tenseur de rigidité $\underline{\underline{C}}$ connu et écrit dans $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$, nous cherchons la rigidité C_i dans une direction quelconque \vec{d}_i donnée dans $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$. Cette direction \vec{d}_i est décrite dans le repère sphérique par deux angles :

- azimut $\varphi \in [0, 2\pi]$,
- déclinaison $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

Les coordonnées du vecteur direction \vec{d}_i dans $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})$ sont :

$$\vec{d}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i \cos\varphi_i \\ \cos\theta_i \sin\varphi_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Alors les rigidités mesurées dans n directions différentes sont $C_i = C(\theta_i, \varphi_i)$ avec $i \in [1 \dots n]$.

Les coordonnées de la direction \vec{d}_i dans le repère $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ sont :

$$\begin{bmatrix} d_{R,i} \\ d_{T,i} \\ d_{L,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{R} \cdot \vec{d}_i \\ \vec{T} \cdot \vec{d}_i \\ \vec{L} \cdot \vec{d}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i + R_2 \cos\theta_i \sin\varphi_i + R_3 \sin\theta_i \\ T_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i + T_2 \cos\theta_i \sin\varphi_i + T_3 \sin\theta_i \\ L_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i + L_2 \cos\theta_i \sin\varphi_i + L_3 \sin\theta_i \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Dans ce qui suit, et pour simplifier les notations, nous allons omettre l'indice i .

Si nous supposons que nous appliquons au matériau une déformation ε_d purement unidirectionnelle dans la direction \vec{d}_i et que nous cherchons la valeur de la contrainte σ_d dans cette même direction, on obtient alors la rigidité :

$$C(\varphi, \theta) = \sigma_d / \varepsilon_d. \quad (16)$$

Le tenseur de déformation associé à la déformation appliquée s'écrit, en notation tensorielle :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \varepsilon_d \underline{\underline{d}} \underline{\underline{d}}^t. \quad (17)$$

La contrainte résultante dans la direction \vec{d}_i s'écrit :

$$\sigma_d = \underline{\underline{d}}^t \underline{\underline{\sigma}} \underline{\underline{d}}. \quad (18)$$

La loi de comportement s'écrit, en notation tensorielle :

$$\underline{\underline{\underline{\sigma}}} = \underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}} \Rightarrow \underline{\underline{\underline{\sigma}}} = \varepsilon_d \underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t \Rightarrow \sigma_d = \underline{\underline{\underline{d}}}^t \left(\varepsilon_d \underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t \right) \underline{\underline{\underline{d}}}, \quad (19)$$

et nous avons donc :

$$C(\varphi, \theta) = \sigma_d / \varepsilon_d = \underline{\underline{\underline{d}}}^t \left(\underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t \right) \underline{\underline{\underline{d}}}. \quad (20)$$

Ces relations sont intrinsèques, c'est-à-dire qu'elles sont valables dans n'importe quelle base, en particulier dans $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$, on a :

$$\underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t = \begin{bmatrix} d_R^2 & d_R d_T & d_R d_L \\ d_R d_T & d_T^2 & d_T d_L \\ d_R d_L & d_T d_L & d_L^2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Pour calculer $\underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t$ nous passons des notations tensorielles aux notations vectorielles contractées, pour le tenseur des rigidités :

$$\underline{\underline{\underline{C}}} = \begin{pmatrix} C_{RR} & C_{RT} & C_{RL} & 0 & 0 & 0 \\ C_{RT} & C_{TT} & C_{TL} & 0 & 0 & 0 \\ C_{RL} & C_{TL} & C_{LL} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

$$\text{et } \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t = \begin{bmatrix} d_R^2 \\ d_T^2 \\ d_L^2 \\ 2d_T d_L \\ 2d_L d_R \\ 2d_R d_T \end{bmatrix}, \quad (23)$$

d'où :

$$\underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t = \begin{bmatrix} C_{RR} d_R^2 + C_{RT} d_T^2 + C_{RL} d_L^2 \\ C_{RT} d_R^2 + C_{TT} d_T^2 + C_{TL} d_L^2 \\ C_{RL} d_R^2 + C_{LT} d_T^2 + C_{LL} d_L^2 \\ 2C_{44} d_T d_L \\ 2C_{55} d_L d_R \\ 2C_{66} d_R d_T \end{bmatrix} \quad (24)$$

Pour finir le calcul, nous repassons des notations contractées aux notations tensorielles :

$$\underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\underline{d}}} \underline{\underline{\underline{d}}}^t = \begin{bmatrix} C_{RR} d_R^2 + C_{RT} d_T^2 + C_{RL} d_L^2 & 2C_{66} d_R d_T & 2C_{55} d_L d_R \\ 2C_{66} d_R d_T & C_{RT} d_R^2 + C_{TT} d_T^2 + C_{TL} d_L^2 & 2C_{44} d_T d_L \\ 2C_{55} d_L d_R & 2C_{44} d_T d_L & C_{RL} d_R^2 + C_{LT} d_T^2 + C_{LL} d_L^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Comme $C(\varphi, \theta) = \underline{d}^t \left(\underline{\underline{C}} \underline{d} \underline{d}^t \right) \underline{d}$ alors :

$$C(\varphi, \theta) = d_{R,i}^4 C_{RR} + d_{T,i}^4 C_{TT} + d_{L,i}^4 C_{LL} + 2d_{T,i}^2 d_{L,i}^2 (C_{TL} + 2C_{44}) + 2d_{L,i}^2 d_{R,i}^2 (C_{LR} + 2C_{55}) + 2d_{R,i}^2 d_{T,i}^2 (C_{RT} + 2C_{66}). \quad (26)$$

Ce que nous notons de façon contractée :

$$C_d = C_{di}(\psi, \tau, \lambda) = \sum_{k=1}^6 x_{i,k} C_k, \quad (27)$$

avec $x_{i,1} = d_{R,i}^4$; $x_{i,2} = d_{T,i}^4$; $x_{i,3} = d_{L,i}^4$; $x_{i,4} = 2d_{T,i}^2 d_{L,i}^2$; $x_{i,5} = 2d_{L,i}^2 d_{R,i}^2$; $x_{i,6} = 2d_{R,i}^2 d_{T,i}^2$
 $C_1 = C_{RR}$; $C_2 = C_{TT}$; $C_3 = C_{LL}$; $C_4 = (C_{TL} + 2C_{44})$; $C_5 = (C_{LR} + 2C_{55})$, $C_6 = (C_{RT} + 2C_{66})$. Les coefficients $x_{i,j}$, dépendent des angles (ψ, τ, λ) et (θ, φ) à travers les termes $d_{R,i}$, $d_{T,i}$ et $d_{L,i}$.

La rigidité apparente est exprimée en fonction des angles définissant la direction de propagation de l'onde ultrasonore et les coefficients de la matrice de rigidité.

5.3.2 Résolution du problème inverse

5.3.2.1 Principe de la résolution par la méthode des moindres carrés

Résoudre le problème inverse c'est déterminer la matrice de rigidité du matériau dans son repère d'orthotropie $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ et les angles correspondants (ψ, τ, λ) à partir de la mesure de $C(\varphi, \theta)$ dans les 133 directions. Pour cela, nous utiliserons la méthode des moindres carrés ce qui revient à rechercher les paramètres $(\hat{\psi}, \hat{\tau}, \hat{\lambda}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_6)$ qui minimisent l'erreur :

$$E(\psi, \tau, \lambda, c_1, \dots, c_6) = \sum_{i=1}^n [C_i^* - C_i(\psi, \tau, \lambda, c_1, \dots, c_6)]^2. \quad (28)$$

La recherche du tenseur orthotrope est réalisée en deux étapes. Premièrement, nous supposons que le repère d'orthotropie est connu, (i.e., les angles (ψ, τ, λ) sont fixés) et nous cherchons les valeurs (c_1, \dots, c_6) qui minimisent l'erreur conditionnellement à ces valeurs d'angles. Cette recherche est faite par une méthode analytique dont la solution est :

$$\frac{\partial E}{\partial c_m} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial c_m} \left(C_i^* - \sum_{k=1}^6 x_{i,k} c_k \right)^2 = 2 \left(c_m \sum_{i=1}^n x_{i,m}^2 + \sum_{k \neq m} \sum_{i=1}^n x_{i,m} x_{i,k} c_k - \sum_{i=1}^n x_{i,m} C_i^* \right). \quad (29)$$

La valeur optimale de c_m est obtenue lorsque la dérivée par rapport à c_m est nulle :

$$\frac{\partial E}{\partial c_m} = 0 \Leftrightarrow c_m \sum_{i=1}^n x_{i,m}^2 + \sum_{k \neq m} c_k \sum_{i=1}^n x_{i,m} x_{i,k} = \sum_{i=1}^n x_{i,m} C_i^*. \quad (30)$$

L'annulation conjointe de toutes les dérivées implique donc :

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i,1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,m} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,6} \\ \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,m} & \sum_{i=1}^n x_{i,m}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,m}x_{i,6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,6} & \sum_{i=1}^n x_{i,m}x_{i,6} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,6}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_m \\ \dots \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i,1}C_i^* \\ \sum_{i=1}^n x_{i,m}C_i^* \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_{i,6}C_i^* \end{bmatrix} \quad (31)$$

Nous trouvons alors les valeurs $(\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_6)$ solutions des moindres carrés conditionnellement aux valeurs fixées de (ψ, τ, λ) :

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_1 \\ \hat{c}_m \\ \dots \\ \hat{c}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i,1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,m} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,6} \\ \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,m} & \sum_{i=1}^n x_{i,m}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,m}x_{i,6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n x_{i,1}x_{i,6} & \sum_{i=1}^n x_{i,m}x_{i,6} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i,6}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i,1}C_i^* \\ \sum_{i=1}^n x_{i,m}C_i^* \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_{i,6}C_i^* \end{bmatrix} \quad (32)$$

Nous cherchons ensuite les angles (ψ, τ, λ) qui minimisent E . Cette recherche se fait numériquement (pas de solution analytique des moindres carrés car les dépendances de E à (ψ, τ, λ) sont non-linéaires). Il existe plusieurs méthodes de minimisation numérique, mais puisque les temps de calcul sont rapides et que nous avons un nombre limité de paramètres $(\psi, \tau, \lambda \in [0^\circ, 90^\circ])$ nous avons choisi de parcourir toutes les valeurs d'angles en commençant au début avec un pas de 5° , et en affinant, à la fin, avec un pas de 1° ; nous retenons alors la valeur minimale.

5.3.2.2 Pondération du critère d'erreur

Les premiers essais nous ont montré que cette méthode donne trop d'importance aux directions de forte rigidité au détriment des rigidités les plus basses. Pour résoudre ce problème, nous avons choisi d'utiliser un critère d'erreur qui prend en compte une pondération :

$$E(\psi, \tau, \lambda, c_1, \dots, c_6) = \sum_{i=1}^n [C_i^* - C_i(\psi, \tau, \lambda, c_1, \dots, c_6)/C_i^*]^2 \quad (33)$$

Pour ce critère la solution des moindres carrés est :

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_1 \\ \hat{c}_2 \\ \vdots \\ \hat{c}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}^2}{C_i^{*2}} & \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}x_{i,2}}{C_i^{*2}} & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}x_{i,6}}{C_i^{*2}} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}x_{i,2}}{C_i^{*2}} & \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,2}^2}{C_i^{*2}} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}x_{i,6}}{C_i^{*2}} & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,6}^2}{C_i^{*2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,1}}{C_i^{*2}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,6}}{C_i^{*2}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Pour que l'erreur soit homogène, nous avons choisi de l'exprimer en pourcentage suivant la formule suivante :

$$\hat{E} = \sqrt{\frac{E}{n}}. \quad (35)$$

5.3.2.3 Solution analytique (unicité de la solution et séparabilité des termes)

Les valeurs $(\hat{c}_1, \hat{c}_2 \dots, \hat{c}_6)$, solutions de la méthode des moindres carrés, est unique pour un ensemble adéquat de tests ultrasoniques autour de la sphère (plus de 6 essais). La solution existe si la matrice est inversible. Cependant, cette solution que nous appelons vecteur solution de rigidité, ne donne accès qu'à 6 données de la matrice de rigidité : les 3 premiers coefficients diagonaux de la matrice de rigidité C_{RR}, C_{TT}, C_{LL} et 3 combinaisons linéaires des six autres coefficients : $(C_{TL} + 2C_{44}), (C_{LR} + 2C_{55})$ et $(C_{RT} + 2C_{66})$. Ceci ne permet pas le calculer des 9 coefficients de la matrice de rigidité. Cette combinaison linéaire nous donne une idée sur la valeurs des 2 coefficients mais ne fournit pas d'autres données exploitables, c'est pourquoi dans l'analyse des résultats, nous allons nous concentrer sur les 3 premiers coefficients de la matrice de rigidité et le vecteur solution de rigidité sera alors limité à $[C_{RR}, C_{TT}, C_{LL}]$. Pour accéder à la matrice de rigidité complète, il faudrait disposer de mesures réalisées avec des transducteurs émettant des ondes transverses (de cisaillement) toujours sur le même échantillon. Mais cette solution n'a pas été développée car la transmission d'un tel type d'onde à l'échantillon n'est pas triviale en particulier si il est sphérique.

5.4 Validation de la méthode

5.4.1 Numérique

Il s'agit ici de simuler un test ultrasonore sur un échantillon sphérique en choisissant un pas angulaire de φ et θ égal à 10° .

5.4.1.1 Matériau au comportement isotrope : alliage d'aluminium

Les paramètres d'entrée pour l'aluminium sont les suivants : $E = 69$ GPa, $\nu = 0,33$, $G = 26$ GPa et $\rho = 2700$ kg/m³. La Figure 56 représente une « cartographie directionnelle » de la rigidité de l'aluminium où la rigidité dans une direction (θ, φ) est donnée par la distance au centre de la surface.

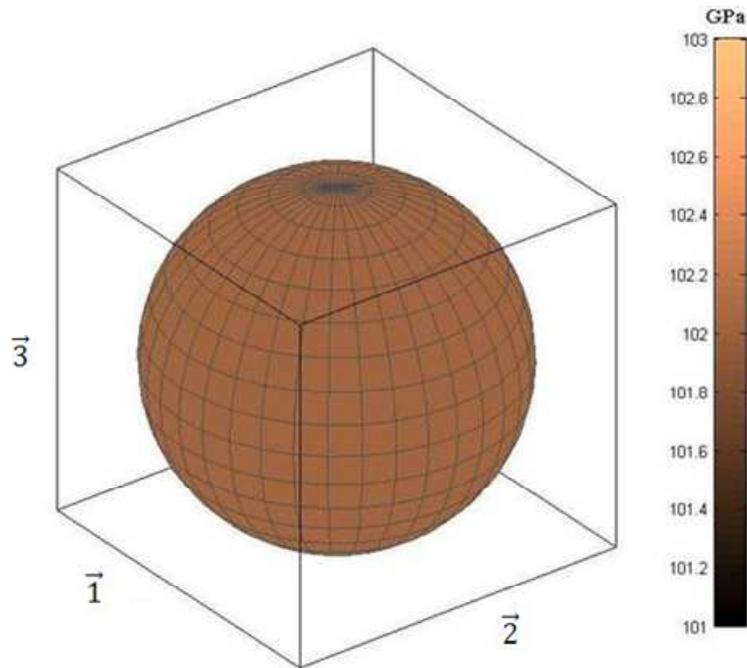


Figure 56 : Valeurs de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction des directions de mesure pour l'aluminium

Le matériau étant isotrope, la caractéristique $C(\varphi, \theta)$ est identique quelle que soit la direction d'émission-réception considérée, ce qui se traduit par une sphère, et vaut 102,4 GPa.

5.4.1.2 Matériau au comportement orthotrope : hêtre

Les rigidités dépendent principalement de la densité et de la teneur en eau. Des relations empiriques entre ces variables ont été établies sur un grand nombre d'espèces (Guitard 1987) et permettent de définir les propriétés mécaniques d'un « bois standard » (feuillus ou résineux) en fonction de la densité et de la teneur en eau (m.c.). Afin de valider numériquement la méthode, nous avons utilisé ces relations qui prédisent pour le hêtre ($\rho = 740\text{kg/m}^3$, m.c = 10,5%) la matrice de rigidité suivante :

$$C = \begin{pmatrix} 3.4 & 1.3 & 2.2 & 0 & 0 & 0 \\ 1.3 & 1.7 & 1.5 & 0 & 0 & 0 \\ 2.2 & 1.5 & 15.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Ici, le repère $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})$ coïncide avec celui $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ du matériau et les valeurs de la matrice de rigidité sont données en GPa.

La validation théorique de la méthode sur un matériau de comportement orthotrope consiste à désorienter le repère d'orthotropie (repère lié au matériau) par rapport au repère absolu (repère lié au banc ultrasonore) en appliquant 3 rotations d'Euler contrôlées (ψ, τ, λ) et de retrouver ces angles de rotation en appliquant la méthode des moindres carrés. Cette procédure a pour objectif de valider le traitement numérique des données.

La 1^{ère} simulation que nous allons effectuer correspond au cas où l'échantillon est placé suivant son repère d'orthotropie : le repère absolu lié au banc ultrasonore $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})$ coïncide avec le repère d'orthotropie $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ (les données théoriques sont calculées à partir de la matrice de rigidité donnée dans le repère d'orthotropie) : $\psi = 0^\circ, \tau = 0^\circ, \lambda = 0^\circ$

Les résultats donnés par la méthode des moindres carrés sont : l'erreur minimale, les angles de rotation et les constantes de rigidité correspondantes.

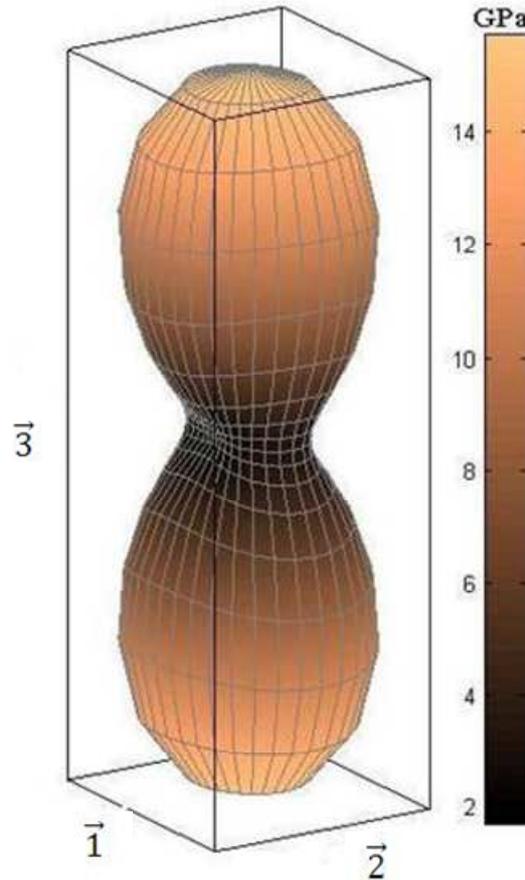


Figure 57 : Valeurs de $C(\varphi, \theta)$ (GPa) en fonction des directions de mesure pour un bois feuillu standard (m.c. = 10,5%, masse volumique $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$).

La valeur de $C(\varphi, \theta)$ varie en fonction de la direction de propagation considérée (angle φ et θ , Figure 57). Lorsque la direction de mesure est celle de l'axe $(O, \vec{3})$ la valeur de $C(\varphi, \theta)$ est égale à C_{33} , la valeur est celle de C_{22} en $(O, \vec{2})$ (axe tangentiel) et celle de C_{11} en $(O, \vec{1})$ (axe radial).

Le Tableau 9 présente les résultats trouvés par la méthode des moindres carrés lorsque l'échantillon est placé dans son repère d'orthotropie.

Erreur (%)	ψ	τ	λ	C_{RR} (MPa)	C_{TT} (MPa)	C_{LL} (MPa)	$C_{TL}+2C_{44}$ (MPa)	$C_{RL}+2C_{55}$ (MPa)	$C_{RT}+2C_{66}$ (MPa)
0,005%	0°	0°	0°	3355	1689	15727	3616	5454	2238

Tableau 9 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour les angles de rotation :
 $(\psi = 0^\circ, \tau = 0^\circ, \lambda = 0^\circ)$.

Les résultats ci-dessus montrent que les valeurs trouvées par la méthode des moindres carrés, angles de rotation et constantes de rigidité correspondantes, sont identiques aux valeurs imposées au début. La valeur quasi-nulle (0,005%) de l'erreur relative montre que la précision est très bonne.

La 2^{ème} simulation correspond au cas où l'échantillon est placé hors son repère d'orthotropie : le repère absolu $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})$ et le repère d'orthotropie $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ sont différents (les données théoriques sont calculées à partir de la matrice de rigidité donnée dans un nouveau repère déterminé après application de 3 rotations d'Euler contrôlées) : $\psi = 35^\circ, \tau = 51^\circ, \lambda = 17^\circ$.

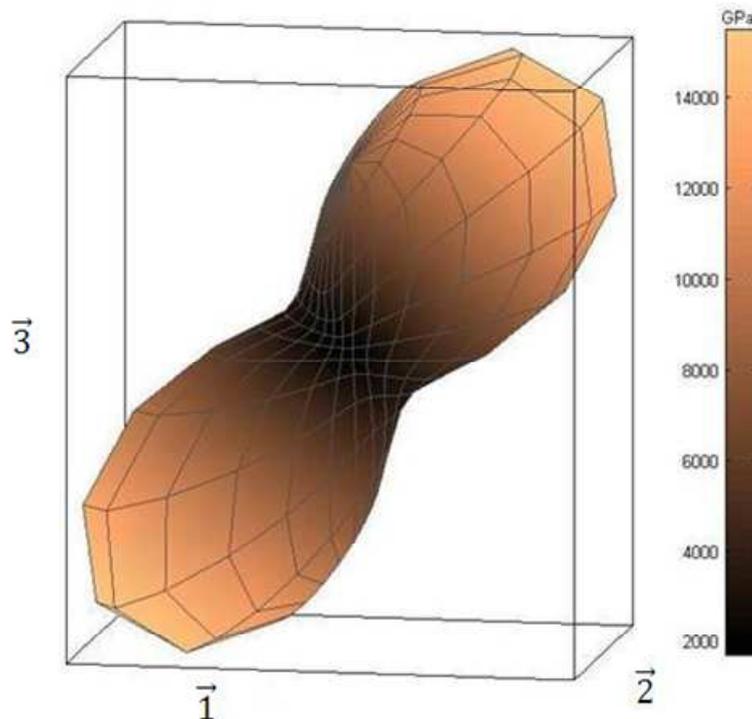


Figure 58 : Valeurs de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction des directions de mesure pour un bois feuillu standard en dehors des axes d'orthotropie (m.c. = 10,5%, masse volumique $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$).

Le Tableau 10 présente les résultats trouvés par la méthode des moindres carrés lorsque l'échantillon est placé en dehors de son repère d'orthotropie après avoir appliqué les 3 angles d'Euler suivantes $(\psi = 35^\circ, \tau = 51^\circ, \lambda = 17^\circ)$.

Erreur (%)	ψ	τ	λ	C_{RR} (MPa)	C_{TT} (MPa)	C_{LL} (MPa)	$C_{TL}+2C_{44}$ (MPa)	$C_{RL}+2C_{55}$ (MPa)	$C_{RT}+2C_{66}$ (MPa)
0,007	35°	51°	17°	3355	1689	15727	3616	5454	2238

Tableau 10 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour les angles de rotation $(\psi = 35^\circ, \tau = 51^\circ, \lambda = 17^\circ)$.

Les résultats ci-dessus montrent que les valeurs trouvées par la méthode des moindres carrés, angles de rotation et constantes de rigidité correspondantes, sont identiques aux valeurs

imposées au début. Ceci nous montre que, théoriquement, la méthode est capable de retrouver les angles qui définissent le repère d'orthotropie avec une bonne précision. Par conséquent, nous pouvons considérer que la méthode est validée de point de vue théorique.

5.4.2 Expérimentale

5.4.2.1 Mesure du temps de vol

Les valeurs expérimentales des vitesses de propagation de l'onde ultrasonore (essai sur sphère) sur la sphère de référence en alliage d'aluminium sont présentées dans le Tableau 11. La Figure 59 représente l'histogramme et la distribution gaussienne ajustée des vitesses de propagation de l'onde ultrasonore. Un test de comparaison des moyennes de ces vitesses sur des échantillons appariés a été réalisé et il s'est révélé significativement différent au seuil de 5%. Cependant le biais induit par les interfaces est de l'ordre de 8 m/s (erreur de 0,1%).

Vitesse (m/s)	Sans interface	Avec interface
Min	6138	6126
Max	6182	6190
Moy	6154	6163
Écart-type	10,6	12,2

Tableau 11 : Valeurs expérimentales minimale, maximale, moyenne, écart-type et erreur relative de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore avec et sans interfaces sur la sphère de référence en alliage d'aluminium.

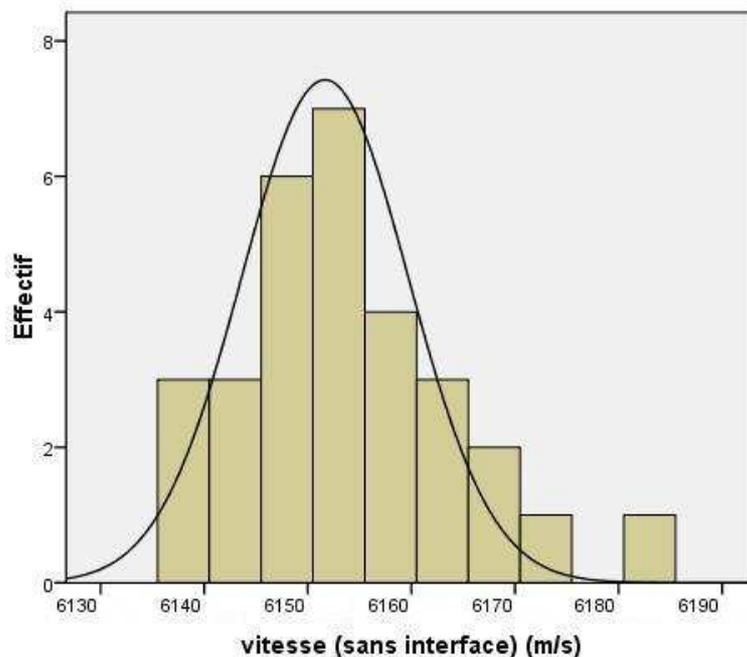


Figure 59 : Histogramme et courbe gaussienne ajustée des valeurs de vitesse ultrasonore obtenues par essai sur la sphère de référence en aluminium

Les valeurs expérimentales du module d'élasticité obtenu lors de l'essai de traction sont présentées dans le Tableau 12. La Figure 60 représente l'histogramme et la distribution gaussienne ajustée du module d'élasticité en utilisant le coefficient de Poisson déterminée par

l'essai de traction, soit $0,32 \pm 0,008$ ce qui est tout à fait usuel. Notons que le coefficient de Poisson est généralement indépendant de la vitesse de sollicitation, en particulier pour un alliage métallique qui est très peu visqueux.

Module d'élasticité (MPa)			
min	max	moy	écart-type
70606	70945	70820	96

Tableau 12 : Valeurs expérimentales : minimale, maximale, moyenne et l'écart-type du module d'élasticité obtenues par un essai de traction de l'alliage d'aluminium de référence

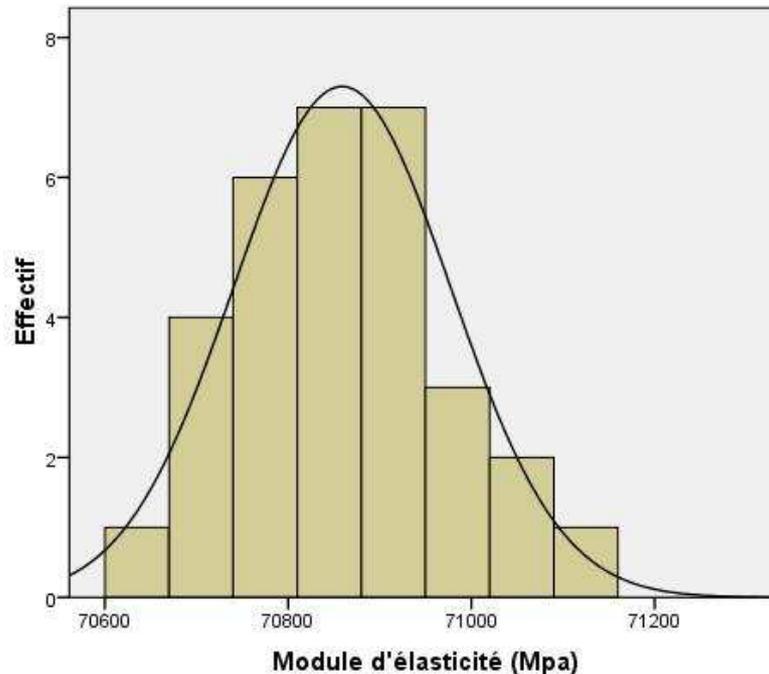


Figure 60 : Histogramme et courbe gaussienne des valeurs de module d'élasticité obtenues par essai de traction de l'alliage d'aluminium de référence

Le Tableau 13 ci-dessous présente la comparaison entre le module de rigidité de l'alliage d'aluminium déterminée à partir des essais de traction et celui obtenu par les essais ultrasonores. Nous avons réalisé un test de comparaison des moyennes sur des échantillons appariés qui s'est révélé significativement différent au seuil de 5%. Cependant le biais induit par le choix de la méthode est de l'ordre de 5000 MPa (erreur de 5%).

	Relation	C (MPa)
Essai de traction	$C = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	101300
Essai ultrasonore	$C = \rho V^2$	106300

Tableau 13 : Valeurs du coefficient de rigidité de l'alliage d'aluminium déterminées par l'essai de traction et l'essai ultrasonore

5.4.2.2 Matériau au comportement orthotrope : hêtre

Pour valider expérimentalement notre méthode, nous avons choisi 5 échantillons sphériques repérés S_{H1} , S_{H2} , S_{H3} , S_{H4} , et S_{H5} de bois de hêtre. Le traçage de chaque échantillon est réalisé

dans le repère d'orthotropie $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ identifié visuellement à l'aide des cernes. Les échantillons sont ensuite désorientés en appliquant 3 rotations suivant les angles d'Euler :

- $(\psi = 30^\circ, \tau = 45^\circ, \lambda = 15^\circ)$ pour les échantillons S_{H1}, S_{H2}, S_{H3} et S_{H4}
- $(\psi = 30^\circ, \tau = 60^\circ, \lambda = 45^\circ)$ pour l'échantillon S_{H5} .

La Figure 61 représente la cartographie directionnelle en 3D des valeurs expérimentales des rigidités apparentes du bois de hêtre pour l'échantillon S_{H1} . Pour les autres échantillons, nous avons une cartographie directionnelle en 3D similaire. Cette figure présente une forme similaire à la forme théorique de la Figure 58.

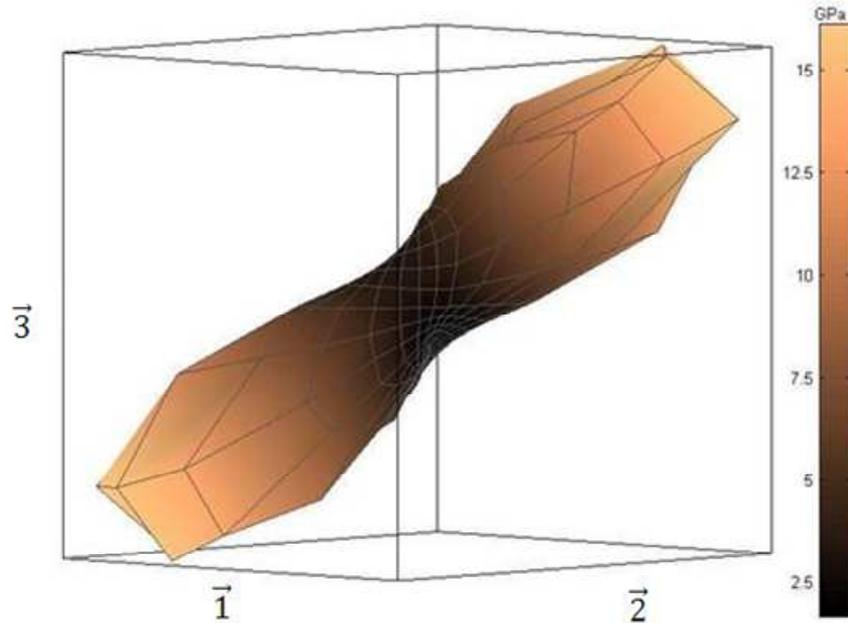


Figure 61 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction des directions de mesure pour le bois de hêtre en dehors du repère d'orthotropie pour l'échantillon S_{H1} .

Le Tableau 14 présente les résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour les deux cas où $(\psi = 30^\circ, \tau = 45^\circ, \lambda = 15^\circ)$ et $(\psi = 30^\circ, \tau = 60^\circ, \lambda = 45^\circ)$.

	Erreur (%)	ψ	τ	λ	C_{RR} (MPa)	C_{TT} (MPa)	C_{LL} (MPa)	$C_{TL+2C_{44}}$ (MPa)	$C_{RL+2C_{55}}$ (MPa)	$C_{RT+2C_{66}}$ (MPa)
S_{H1}	11	29	43	6	3258	1951	11622	1012	3145	1983
S_{H2}	10	29	43	8	3161	1872	11009	1040	3524	1983
S_{H3}	11,3	30	43	9	3207	1922	9517	840	3917	1899
S_{H4}	11,1	33	44	5	3281	1901	11354	1228	2772	1950
S_{H5}	10,4	32	55	43	3541	1935	12562	178	3573	2069

Tableau 14 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour les angles de rotation : $(\psi = 30^\circ, \tau = 45^\circ, \lambda = 15^\circ)$ pour les échantillons S_{H1}, \dots, S_{H4}) et $(\psi = 30^\circ, \tau = 60^\circ, \lambda = 45^\circ)$ pour l'échantillon S_{H5}

Nous remarquons que les résultats du Tableau 14 sont très proches pour tous les échantillons à l'exception de la valeur de $C_{TL+2C_{44}}$ de l'échantillon S_{H5} qui paraît très faible.

Il est à noter qu'il existe une différence entre les erreurs angulaires sur les 3 valeurs d'angles (ψ, τ, λ) trouvées, et les erreurs sur les directions R, T, L. En effet, les erreurs sur les angles sont calculées en faisant la différence entre les angles imposés et ceux trouvés : $\Delta\psi = |\psi - \psi'|$, $\Delta\tau = |\tau - \tau'|$ et $\Delta\lambda = |\lambda - \lambda'|$. Par contre, les erreurs absolues e_R , e_T et e_L sur les directions R, T et L sont obtenues en calculant l'angle entre les deux axes correspondant à ψ imposé et ψ' trouvé en utilisant les produits vectoriel. La relation entre des deux types d'erreurs s'explique par le fait que le passage du repère absolu $(O, \vec{1}, \vec{2}, \vec{3})_{\text{abs}}$ au repère d'orthotropie $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ en appliquant les 3 rotations successives d'Euler (ψ, τ, λ) entraîne une addition des erreurs commises $\Delta\psi$, $\Delta\tau$ et $\Delta\lambda$. Le fait que les rotations se sont faites autour des axes $\vec{3}$, $\vec{1}'$ et $\vec{3}''$ (voir 5.3) nous permet d'écrire : $e_R = f(\Delta\psi, \Delta\lambda)$, $e_T = f(\Delta\psi, \Delta\tau, \Delta\lambda)$ et $e_L = f(\Delta\tau)$.

Les erreurs angulaires sur la direction R, T et L sont présentées dans le Tableau 15.

	S _{H1}	S _{H2}	S _{H3}	S _{H4}	S _{H5}
e_R	9,7	7,7	6	8,2	4,7
e_T	9,9	8	6,3	7,9	2,6
e_L	2,1	2,1	2	2,3	5,3

Tableau 15 : Erreurs angulaires absolues (en °) sur les directions R, T et L pour les 5 échantillons de hêtre

Le Tableau 16 donne les valeurs des constantes de rigidité du bois de hêtre, mesurées et celles prédites par le modèle prévisionnel de Guitard (Guitard 1987), pour la masse volumique moyenne des échantillons, dans les axes principaux de symétrie matérielle $(O, \vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$:

	C_{RR}	C_{TT}	C_{LL}
Valeurs prédites (Guitard 1987)	3,35	1,69	15,7
Valeurs mesurées : S _{H1}	3,26	1,95	11,6
Valeurs mesurées : S _{H2}	3,16	1,87	11,0
Valeurs mesurées : S _{H3}	3,21	1,92	9,5
Valeurs mesurées : S _{H4}	3,28	1,90	11,3
Valeurs mesurées : S _{H5}	3,54	1,93	12,6

Tableau 16 : Comparaison entre les valeurs de rigidité (en GPa), dans les axes principaux, mesurées et celles prédites par le modèle de Guitard (Guitard 1987)

Les valeurs des rapports des rigidités dans les 3 axes principaux du bois de hêtre (assimilables à des coefficients d'anisotropie) sont présentées dans le Tableau 17.

	C_{LL}/C_{RR}	C_{LL}/C_{TT}	C_{RR}/C_{TT}
Valeurs prédites (Guitard 1987)	4,7	9,3	2
Valeurs mesurées : S _{H1}	3,6	6	1,7
Valeurs mesurées : S _{H2}	3,5	5,9	1,7
Valeurs mesurées : S _{H3}	3	5	1,7

Valeurs mesurées : S_{H4}	3,5	6	1,7
Valeurs mesurées : S_{H5}	3,5	6,5	1,8

Tableau 17 : Comparaison entre les coefficients d'anisotropie obtenus à partir des valeurs de rigidité mesurées et celles prédites par le modèle de Guitard (Guitard 1987) pour le bois de hêtre

À partir des résultats théoriques et expérimentaux présentés ci-dessous, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques est capable de retrouver l'orientation des directions principales des symétries matérielles avec une bonne précision, i.e., erreurs de l'ordre de 2° sur l'axe L et de l'ordre de 10° sur les deux axes R et T. La forte valeur de l'erreur sur les axes R et T s'explique par le cumul de celle-ci lors des rotations successives.
- Les erreurs angulaires sont principalement dues aux imprécisions lors du traçage et du repérage de la direction de mesure. Parmi les solutions proposées pour augmenter la précision de la méthode est l'automatisation du repérage qui va diminuer les erreurs provenant du traçage et du repérage.
- Les rigidités et les coefficients d'anisotropie trouvés sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature par le modèle phénoménologique de Guitard (Guitard 1987) qui ne donne que de bons ordres de grandeurs pour une densité donnée.

5.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté l'adaptation, la mise au point et la validation théorique et expérimentale d'une nouvelle méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques, destinée à la recherche des symétries matérielles.

Les résultats obtenus par le modèle théorique nous permettent de dire que la méthode de dépouillement des données est validée. En effet, nous avons retrouvé exactement les mêmes angles de rotation que ceux imposés ainsi que les mêmes coefficients théoriques de rigidité dans le repère d'orthotropie. D'un point de vue pratique, en traçant la cartographie des valeurs de rigidité (en 3D), il est possible de caractériser visuellement le type de comportement (isotrope, isotrope transverse et orthotrope). Les résultats expérimentaux montrent que le bois de hêtre a une cartographie de rigidité (Figure 61) de forme similaire à celle trouvée par le modèle théorique (Figure 58) suivant le modèle empirique de Guitard (Guitard 1987) pour un bois de feuillus de densité 0,7. Les résultats montrent que nous retrouverons presque les mêmes angles de rotation que ceux imposés au départ.

La différence trouvée dans ces valeurs des angles est due principalement à une imprécision du traçage manuel des latitudes et des longitudes et à l'identification des directions de mesure dont le réglage est là encore manuel. Cependant, ces erreurs trouvées sur les angles de rotations peuvent être due aussi à la concentration des points de mesure au niveau des pôles de l'échantillon sphérique. Cette concentration peut affecter l'ajustement du repère. Ce problème pourrait être résolu en appliquant une pondération proportionnelle à la surface délimitée par les points de mesure voisins.

Malgré tout, une campagne de tests de répétabilité devrait être menée pour identifier et quantifier toutes les sources d'erreurs. Les valeurs de rigidité du bois de hêtre et les coefficients d'anisotropie trouvés par cette méthode ont le même ordre de grandeur que celles trouvées dans la littérature [(Guitard 1987) ; (Grimsel 1999) ; (François 2000) ; (Thibaut, Gril, et Fournier 2001) ; (Bucur 2006)].

En considérant les faibles différences observées dans le Tableau 16 et le Tableau 17 entre les valeurs mesurées et celles prédites par le modèle empirique de Guitard (Guitard 1987), le fait que ce modèle empirique prenne seulement en compte la densité et la teneur en eau (mais pas l'angle des micro-fibrilles par exemple) et les erreurs très faibles dans la détermination des angles désorientés (Tableau 14 et Tableau 15), nous pouvons conclure que la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques est validée expérimentalement (au moins pour ce type de bois, ou un bois de cette densité). Cette méthode doit pouvoir être facilement appliquée à tout type de matériau, au comportement connu, puisque elle a été appliquée aussi avec succès sur un échantillon en alliage d'aluminium. Cette méthode est donc très utile pour obtenir une évaluation rapide de l'anisotropie élastique et des directions principales d'un matériau donné en utilisant un seul échantillon. Ceci devient très important dans le cas des études sur le bois car la variabilité d'un échantillon à un autre est souvent importante.

Cependant, si cette nouvelle technique permet de déterminer, avec une bonne précision, le type de comportement mécanique d'un matériau, elle ne permet pas d'obtenir sa matrice de rigidité complète. En effet, dans le cas d'un matériau orthotrope, cette méthode nous donne accès aux 3 coefficients C_{ii} et à 3 combinaisons linéaires des 6 autres coefficients. Une méthode alternative, et complémentaire, pour l'identification complète de la matrice de rigidité, repose sur une méthode d'analyse vibratoire : la méthode de spectroscopie ultrasonore résonante dite RUS [(Maynard, 1996) ; (Zadler et al. 2004)].

6 Caractérisation par Spectroscopie Ultrasonore Résonante

Les essais présentés dans le cadre de ce paragraphe ont été réalisés et traités par Thomas Delaunay et Didier Laux de l'équipe MIRA de l'Institut d'Electronique du Sud de l'Université de Montpellier 2 sur des échantillons préparés au LMGC.

6.1 Introduction

La spectroscopie ultrasonore résonante, dite RUS pour *Resonant Ultrasound Spectroscopy*, est l'étude des modes propres et fréquences de résonances d'un échantillon afin d'en déduire les propriétés des matériaux et plus particulièrement les composantes du tenseur d'élasticité [(Maynard, 1996) ; (Migliori et Sarrao 1997) ; (Migliori et al. 2001)]. Cette technique est basée sur le fait que la réponse vibratoire d'un objet dépend de plusieurs paramètres comme sa forme, ses dimensions mais aussi la densité et les constantes élastiques du matériau qui le compose. Il est ainsi possible d'en déduire le spectre de résonance pour des géométries simples (poutre, cube, tube, sphère) et des comportements élastiques même anisotropes. Cette méthode consiste en l'excitation vibratoire d'un échantillon à différentes fréquences et la mesure du déplacement d'un (ou plusieurs) point(s) de la surface de l'échantillon afin de déterminer ses fréquences propres de vibration. Les coefficients du tenseur d'élasticité peuvent être ensuite obtenus par identification inverse à partir du spectre de résonance sur un seul échantillon.

Cette méthode est usuellement appliquée sur les matériaux « durs » (i.e., cristaux géologiques, composites, céramiques et métaux) avec une géométrie cubique [(Demarest 1971); (Migliori et Darling 1996) ; (Leisure et al. 2004) ; (Torres et al. 2004) ; (Laux et al. 2006) ; (Delaunay, Laux, et Ferrandis 2008)]. Elle a été plus récemment appliquée à des matériaux biologiques comme l'os (Lee, Lakes, et Lal 2002) ou le bois (Schubert et al. 2006) avec des adaptations en particulier vis-à-vis du caractère plus amortissant de ces matériaux. Elle peut d'ailleurs permettre d'identifier des coefficients d'amortissement du matériau sous certaines conditions.

6.2 Matériel et méthodes

6.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est composé d'un transducteur à ultrasons muni d'un pavillon (sonotrode), d'un vibromètre laser hétérodyne (Polytech OFV-505) et d'un générateur de fréquence (Figure 62). Dans notre cas, l'excitation est effectuée par un transducteur à ultrasons positionné sur un coin de l'échantillon afin de garantir l'excitation de l'ensemble des modes. Pour obtenir de bonnes conditions de mesure, il faut éviter que la résonance propre du transducteur ultrasonore soit dans la gamme des premières résonances propres de l'échantillon afin, d'une part, de ne pas favoriser énergétiquement un mode en particulier et, d'autre part, de ne pas relever une fréquence de résonance qui ne serait pas celle de l'échantillon. Ici, vu les dimensions relativement importantes des échantillons et le module spécifique des matériaux testés, une céramique piézoélectrique ayant une fréquence propre

d'environ 25 kHz a été choisie. La mesure des vitesses à la surface de l'échantillon est effectuée en un point sur un des coins par le vibromètre laser afin de détecter le maximum de fréquences de résonance. Il est aussi possible de déplacer le point de mesure afin de déterminer et/ou vérifier l'allure du mode propre associé, ce qui facilite l'indentification. L'interféromètre laser est placé à 50 cm de l'échantillon, menant à une zone focale de 20 μm . Pour les mesures sur des matériaux texturés et peu réfléchissant comme le bois, il est possible d'ajouter une pastille réfléchissante au niveau du point de mesure. Notons que pour garantir une condition de vibration libre, l'échantillon repose en trois points sur une face seulement. La sonotrode est directement reliée à un générateur de fréquence qui réalise un balayage de fréquences afin d'exciter les différentes fréquences de résonance de cube.



Figure 62 : Dispositif expérimental

6.2.2 Préparation des échantillons

Comme pour la méthode de mesure en contact direct sur une sphère, un échantillon cubique issu du même barreau cylindrique d'alliage d'aluminium (2017A) est utilisé pour un essai de validation. De même, les échantillons sphériques de bois de hêtre et loupe de thuya sont usinés à l'aide d'une scie circulaire et d'une fraiseuse pour obtenir des cubes de 20 mm de coté suivant leur repère de symétrie matérielle déterminé à l'aide de la méthode ultrasonore sur sphère décrite au chapitre précédent (Figure 63).

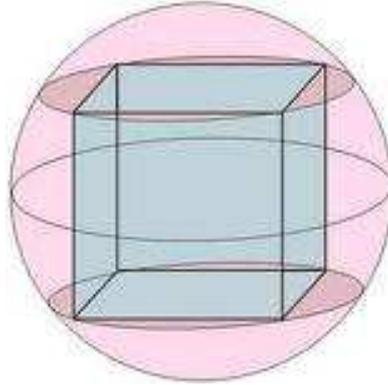


Figure 63 : Illustration de l'usinage de l'échantillon cubique à partir d'une sphère

6.2.3 Traitement des données

Deux approches sont possibles pour l'estimation des constantes élastiques du matériau d'un échantillon à partir du spectre de résonance mesuré : la résolution du problème direct ou celle du problème inverse. Le problème direct consiste à calculer les fréquences propres à partir des paramètres connus (géométrie et dimensions de l'échantillon, densité du matériau) et des valeurs initiales estimées pour les constantes élastiques, par exemple à partir des mesures en contact direct sur la sphère pour les C_{ii} et/ou en utilisant le modèle empirique de Guitard (Guitard 1987). Le problème inverse consiste à déterminer toutes les constantes élastiques indépendantes à partir du spectre obtenu expérimentalement.

Le calcul des modes et fréquences de vibration d'un échantillon réalisé dans un matériau élastique avec des conditions aux limites libres est un problème classique en mécanique et ces solutions existent pour un échantillon cubique anisotrope (Migliori et Sarrao 1997). Dans la plupart des cas, des méthodes approchées telles que la méthode des éléments finis (EF) ou la méthode de Rayleigh-Ritz doivent être utilisées pour estimer la fréquence des modes propres de vibration. La méthode EF permet de déterminer les fréquences propres d'un échantillon de forme arbitraire fabriqué dans n'importe quels matériaux (e.g., hétérogènes, anisotropes tels que les matériaux composites stratifiés). Elle nécessite généralement plus de temps de calcul que la méthode de Rayleigh-Ritz. Cette méthode est donc plus largement utilisée pour calculer les fréquences de vibration naturelle d'un système.

La détermination des constantes élastiques à partir des fréquences de résonance mesurées est l'inverse du problème direct. Le calcul direct ne peut généralement pas être inversé mathématiquement. Mais, le calcul direct et l'ajustement par une méthode itérative de minimisation peuvent être utilisés pour "inverser" le problème et ainsi identifier un jeu de constantes élastiques. Dans le cadre de cette étude, le calcul itératif a été réalisé en minimisant l'écart des fréquences calculées par rapport aux fréquences mesurées suivant le concept du simplexe (Nelder et Mead 1965).

6.3 Résultats

6.3.1 Validation de la méthode sur un échantillon de matériau isotrope (alliage d'aluminium)

La validation de la méthode s'est faite dans un premier temps en déterminant la matrice de rigidité d'un échantillon cubique de 20 mm de coté prélevé dans le même alliage d'aluminium (élastique isotrope) que pour la méthode sur la sphère.

Dans un premier temps, la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores par contact direct a été effectuée en utilisant à la fois des ondes de compression (longitudinales) et des ondes de cisaillement (transversales) avec des transducteurs plans de 5 MHz. Les vitesses ultrasonores ont été mesurées suivant les 3 directions du cube. Elles sont identiques, ce qui est en accord avec le comportement de l'échantillon supposée isotrope. Nous avons trouvé respectivement 6365 ± 5 m/s pour la vitesse longitudinale et 3135 ± 5 m/s pour la vitesse des ondes de cisaillement. Grâce à la mesure de la masse volumique (par une méthode de double pesée), les valeurs du module de Young E et de module de cisaillement G ont été calculés : $E = 73,5$ GPa et $G = 27,5$ GPa (à $\pm 0,5$ GPa).

La Figure 64 représente le spectre des fréquences de résonance ensuite obtenu par la méthode RUS sur le même échantillon ainsi que les fréquences de résonance calculée par la méthode directe en utilisant les constantes élastiques mesurées précédemment. On constate alors un excellent accord entre les mesures et les calculs.

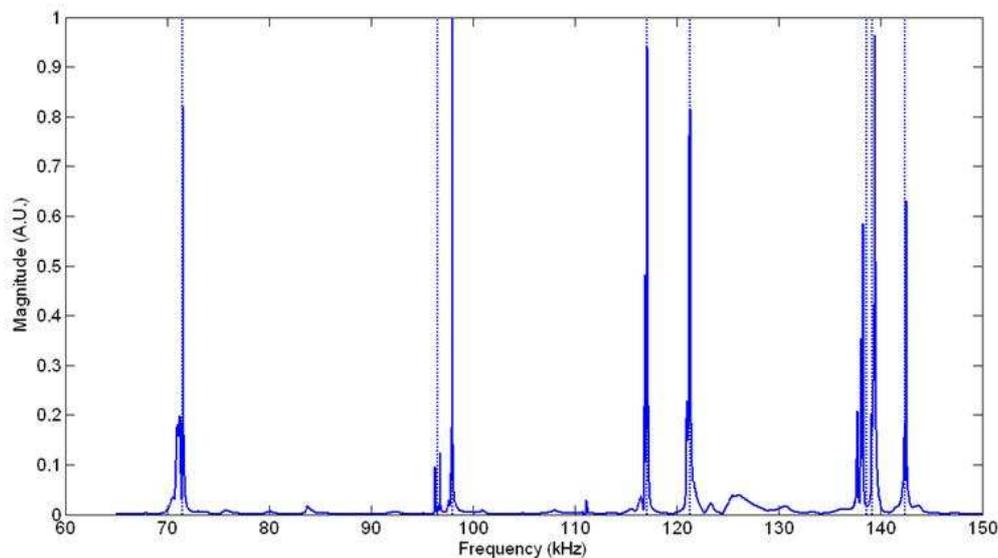


Figure 64 : Spectre de vibration libre d'un échantillon cubique de l'alliage d'aluminium (2017A) et fréquences de résonance prédites. La ligne continue représente l'amplitude des vibrations mesurées et celle en pointillé la position des fréquences de résonance calculées.

6.3.2 Validation de la méthode sur un échantillon de matériau orthotrope (bois de hêtre)

La même approche a été réalisée pour le bois de hêtre. Un échantillon cubique de 21 mm de coté a été usiné dans la sphère mesurée précédemment par contact direct, suivant les directions principales trouvées. Par conséquent, les faces de l'échantillon cubique sont toutes

normales aux axes d'orthotropie du matériau. De plus, les mesures sur la sphère nous ont déjà permis d'estimer les rigidités dans les directions principales (i.e., C_{11} , C_{22} et C_{33}) qui seront utilisées comme point de départ pour l'identification par la méthode inverse. Les coefficients de la matrice de rigidité restants ont été également déduits par ajustement des fréquences de résonance mesurées.

Fréquences mesurées (kHz)	Fréquences calculées (kHz)	Difference
20,25	20,00	-1,2%
25,60	25,15	-1,8%
27,55	27,60	+0,2%
27,85	27,85	0%
29,35	29,35	0%
30,55	30,55	0%
30,90	30,90	0%
35,50	35,40	-0,3%
37,00	36,90	-0,3%

Tableau 18 : Fréquences de résonance mesurées $f_i^{(m)}$ et calculées $f_i^{(c)}$ et la différence entre eux, pour un échantillon de bois de hêtre

Le Tableau 18 présente les fréquences de résonance mesurées $f_i^{(m)}$ et calculées $f_i^{(c)}$ ainsi que la différence entre celles-ci pour l'échantillon de bois de hêtre. Les valeurs des coefficients de la matrice de rigidité (en GPa) ainsi obtenus sont, dans le repère d'orthotropie (R,T,L) :

$$C = \begin{pmatrix} 3.5 & 1.3 & 3.3 & & & \\ 1.3 & 1.9 & 1 & & & \\ 3.3 & 1 & 12.6 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1.8 & \\ & & & & & 0.5 \end{pmatrix} \quad (37)$$

Ces valeurs sont en bon accord avec les valeurs estimées par les relations empiriques de Guitard (Guitard 1987) (voir le paragraphe 5.4.1.2).

6.4 Conclusion

L'utilisation de cette méthode était prospective. On voit bien tout le potentiel de celle-ci dans le cadre de la mécanique du bois. Dans l'état actuel, elle nécessite d'avoir une connaissance de la classe de symétrie du matériau ainsi que des faces des l'échantillon usinées suivant la normale aux directions principales du comportement élastique. C'est pourquoi il est intéressant de l'associer avec la méthode ultrasonore en contact direct sur échantillon

sphérique. Néanmoins, l'usinage du cube à partir de la sphère n'est pas aisé. Or les méthodes RUS sont aussi appliquées sur des échantillons de géométrie cylindrique [(Kumar 1965) ; (Zadler et al. 2004) ; (Jaglinski et Lakes 2011)] mais surtout sphérique (on parle alors de RST pour *Resonant Sphere Technique*) et ce depuis longtemps dans le domaine des géosciences (Lamb 1882). Cela a permis de déterminer le comportement (visco)élastique de matériaux initialement supposés isotropes [(Fraser et LeCraw 1964) ; (Soga et Anderson 1967) ; (Hsieh et Khuri-Yakub 1993)], puis anisotropes plus récemment [(Isoda, Oda, et Seya 1990) ; (Oda et al. 1992)]. Elle a été appliquée au cas de matériaux biologiques mous comme les cellules animales (Zarandi, Bonakdar, et Stiharu 2010). Une voie d'exploration serait donc de conserver la géométrie sphérique pour la méthode RUS et, le cas échéant, de se passer de la méthode ultrasonore par contact direct.

7 Application au cas du thuya à l'échelle mésoscopique

Ce chapitre a pour thème l'application des méthodes de caractérisation du comportement élastique au cas du bois et de la loupe de thuya et la mise en relation des résultats obtenus avec les observations structurales et anatomiques des Chapitres 2 et 3. D'un point de vue bibliographique, ce chapitre constitue une première contribution à l'étude de l'anisotropie et de sa relation avec la structure interne du bois de la loupe de thuya car, à notre connaissance, aucun résultat n'existe sur ce sujet.

7.1 Matériel végétal

7.1.1 Bois de thuya

Le bois de thuya (*Tetraclinis articulata*, (vahl) Masters) utilisé dans cette étude provient de la forêt de Khémisset, région de Rabat (Maroc). Les échantillons ont été recueillis sur le même arbre de 50 ans. La masse volumique du bois de thuya est de 730 kg/m^3 , sa teneur en eau est de 12%. De façon similaire au bois de hêtre, les 3 directions naturelles (i.e., longitudinale, radiale et tangentielle) du bois de thuya ont été déterminées anatomiquement, à l'œil nu, avant l'usinage des échantillons sphériques.

7.1.2 Loupe de thuya

Le bois de la loupe de thuya utilisé dans cette étude provient du même arbre. La loupe a été séchée sous abri pendant une période suffisante pour atteindre une teneur en eau de 8%. La masse volumique du bois de la loupe mesurée à cet état d'humidité est 900 kg/m^3 . Contrairement au bois de hêtre ou de thuya, les symétries matérielles de la loupe sont méconnues. Comme dans les chapitres précédents, la loupe est repérée avec la direction L correspondant à l'axe longitudinal de l'arbre (axe du tronc) et deux directions arbitraires, notées 1 et 2, dans le plan transverse.

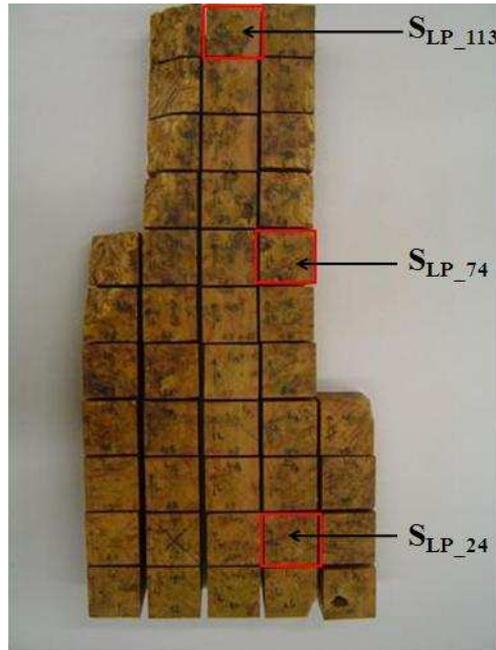


Figure 65 : Choix de la position des échantillons sphériques dans le premier plateau de loupe de thuya

Les échantillons sphériques choisis pour l'application de la méthode ultrasonore par contact direct sont usinés à partir de deux plateaux de loupe de thuya. Le premier plateau est celui étudié dans le Chapitre 4, le deuxième plateau est issu d'une deuxième loupe.

Deux séries d'échantillons ont été testées. La première série a permis de tester la méthode ultrasonore dans le cas de la loupe et de voir l'effet de la position d'extraction de l'échantillon sur le comportement élastique. A cet effet, nous avons choisi 3 échantillons, notés S_{LP_24} , S_{LP_113} et S_{LP_74} , qui se trouvent dans 3 zones différentes du premier plateau (Figure 65). La première zone se trouve au bas de plateau où il y a une forte densité d'excroissances (zone quasi-isotrope), la deuxième zone est celle du haut du plateau où il y a moins d'excroissances (zone la plus rigide) et la troisième se trouve au milieu du plateau (voir les Chapitres 2 et 4). Pour la seconde série, 4 échantillons de loupe, S_1 à S_4 , ont été pris dans le même barreau (Figure 66) extrait de la partie inférieure du deuxième plateau. L'objectif, ici, est de mettre en relation le comportement élastique et la structure interne de la loupe obtenue par tomographie X des échantillons sphériques.



Figure 66 : Confection des échantillons sphériques de loupe de thuya de la seconde série issue du deuxième plateau

7.2 Résultats

La première partie de ce paragraphe est consacrée aux résultats trouvés par la méthode ultrasonore appliquée aux échantillons sphériques de bois et de loupe de thuya. Nous présentons le tracé des valeurs de rigidité dans les 3 plans de symétrie matérielle : LR, LT et RT dans le cas du bois de thuya et L1, L2 et L3 dans le cas de la loupe.

La deuxième partie est consacrée aux résultats de la tomographie X pour les mêmes échantillons de bois et de loupe de thuya. Pour chacun des 3 plans de symétrie, les images scannées (obtenues par tomographie) vont être superposées aux tracés des valeurs de rigidité (obtenus par ultrasons).

7.2.1 Méthode ultrasonore sur échantillon sphérique

7.2.1.1 Bois de thuya

Deux essais ultrasonores ont été effectués sur l'échantillon sphérique de bois de thuya. Pour le premier essai, appelé S_{T1} , nous avons réalisé un traçage des latitudes et des longitudes dans le repère d'orthotropie (R, T, L) afin que les pôles soient suivant la direction longitudinale L. Pour le deuxième essai, appelé S_{T2} , le traçage des latitudes et des longitudes a été réalisé de façon à ce que les pôles soient suivant la direction radiale R. Ensuite nous avons procédé aux mesures ultrasonores. La Figure 67 présente la cartographie directionnelle de la rigidité du bois de thuya dans 61 directions de mesure (pas angulaire de 30° pour le tracé des latitudes).

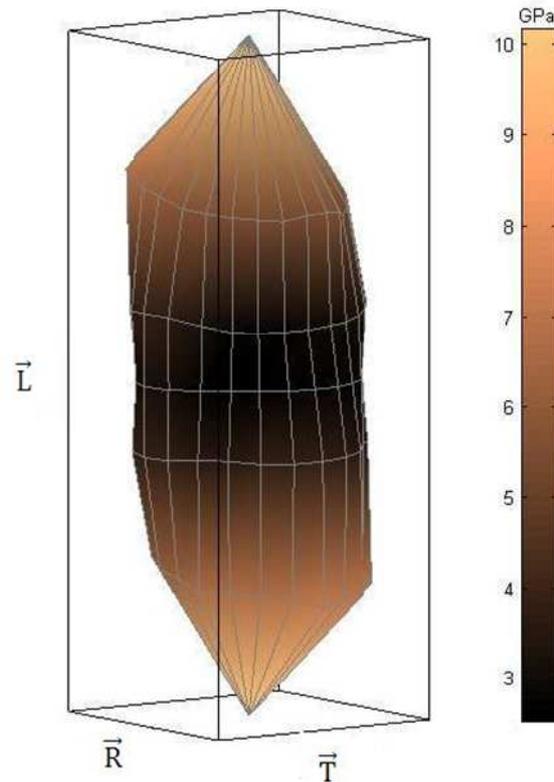


Figure 67 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction de la direction de mesure pour la mesure S_{T1} de l'échantillon de bois de thuya dans son repère d'orthotropie (pôles suivant L).

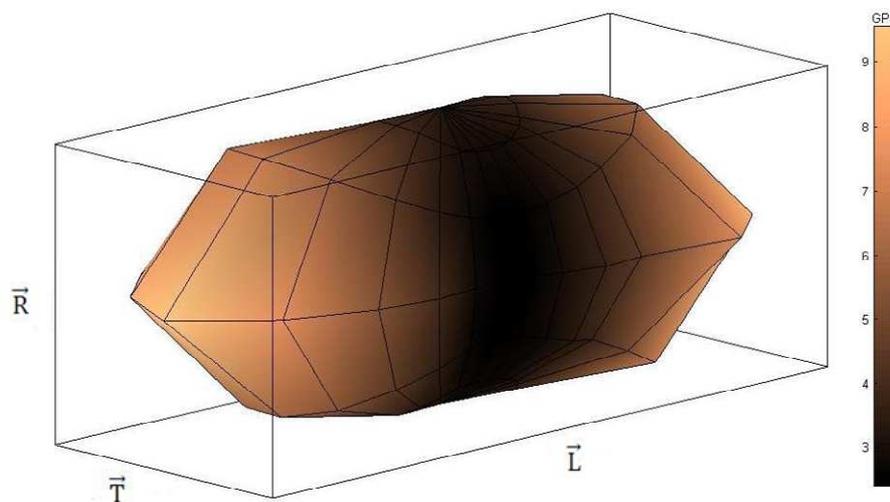


Figure 68 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (GPa) en fonction de la direction de mesure pour la mesure S_{T2} de l'échantillon de bois de thuya dans son repère d'orthotropie (pôles suivant R).

Les paramètres identifiés par la méthode des moindres carrés (angles de rotation des directions principales et rigidités) sont présentés dans le Tableau 19 et le Tableau 20.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

	Erreur (%)	ψ	τ	λ	C_{RR} (GPa)	C_{TT} (GPa)	C_{LL} (GPa)	$C_{TL}+2C_{44}$ (GPa)	$C_{RL}+2C_{55}$ (GPa)	$C_{RT}+2C_{66}$ (GPa)
S_{T1}	5,7	87°	6°	0°	4,3	3,81	10,75	3,63	3,37	3,22

Tableau 19 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour le bois de thuya pour les angles de rotation : $\psi = 90^\circ, \tau = 0^\circ, \lambda = 0^\circ$ (mesure S_{T1})

	Erreur (%)	ψ	τ	λ	C_{RR} (GPa)	C_{TT} (GPa)	C_{LL} (GPa)	$C_{TL}+2C_{44}$ (GPa)	$C_{RL}+2C_{55}$ (GPa)	$C_{RT}+2C_{66}$ (GPa)
S_{T2}	3	0°	85°	5°	4,21	3,58	9,79	3,17	3,94	4,65

Tableau 20 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour le bois de thuya pour les angles de rotation : $\psi = 0^\circ, \tau = 90^\circ, \lambda = 0^\circ$ (mesure S_{T2})

Les erreurs angulaires absolues trouvées sur les directions R, T et L, sont présentées dans le Tableau 21. On remarque que les erreurs sont toutes du même ordre de grandeur quelle que soit la direction du pôle choisie lors du tracé des latitudes et longitudes. De même les valeurs trouvées dans le Tableau 19 et le Tableau 20, pour les angles donnant les directions principales et les rigidités, sont très proches démontrant la faible sensibilité de la méthode par rapport au tracé des latitudes et longitudes dans ce cas. C'est pourquoi nous utiliserons toujours un tracé avec la direction L aux pôles pour les échantillons suivant.

	S_{T1}	S_{T2}
e_R	3	5
e_T	6,7	7
e_L	6	5

Tableau 21 : Erreurs angulaires (en °) sur les directions R, T et L

Le Tableau 22 montre la valeur (moyenne pour nos mesures) des rigidités du bois de thuya dans les 3 directions du repère naturel (R, T, L) ainsi que les coefficients d'anisotropie associés.

	C_{LL}	C_{RR}	C_{TT}	$\frac{C_{LL}}{C_{RR}}$	$\frac{C_{LL}}{C_{TT}}$	$\frac{C_{RR}}{C_{TT}}$
(Dakak 2002)	14,27	2,53	1,24	5,6	11,5	2
Moyenne des mesures	10,27	4,25	3,7	2,4	2,8	1,15

Tableau 22 : Comparaison des valeurs des rigidités (en GPa) dans les directions (R, T, L) et des coefficients d'anisotropie pour le bois de thuya

Nous remarquons que les valeurs de rigidité du plan transversal, C_{RR} et C_{TT} , du bois de thuya sont plus élevées que celles trouvées dans les travaux de Dakak (2002) alors que la valeur de rigidité selon l'axe longitudinal est légèrement plus faible. Ceci peut être vraisemblablement due à une différence d'angle des microfibrilles qui serait plus grand dans notre cas. De ce fait, les coefficients d'anisotropie $\frac{C_{LL}}{C_{RR}}$ et $\frac{C_{LL}}{C_{TT}}$ relevés présentent des valeurs plus faibles. Étant

donné que les valeurs de rigidité C_{RR} et C_{TT} sont très voisines, le coefficient d'anisotropie dans le plan transversal est très proche de 1.

7.2.1.2 Loupe de thuya

La Figure 69, la Figure 70 et la Figure 71 représentent la cartographie directionnelle de la rigidité des échantillons de loupe de thuya de la première série dans 133 directions de mesure. Le traçage des latitudes et des longitudes a été réalisé avec les pôles suivant la direction L.

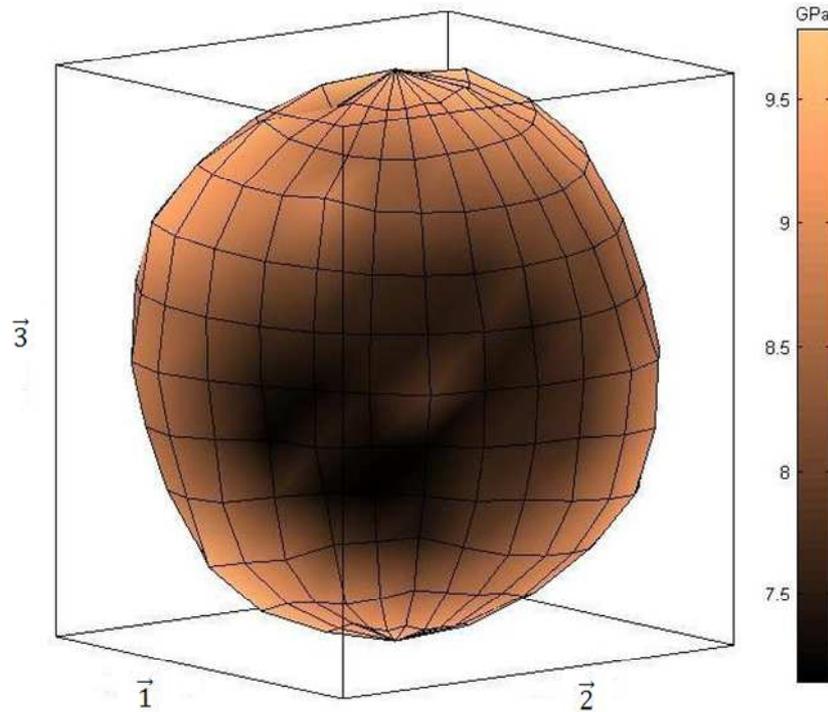


Figure 69 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction de la direction de mesure pour l'échantillon SLP_24 de loupe de thuya ($3 = L$)

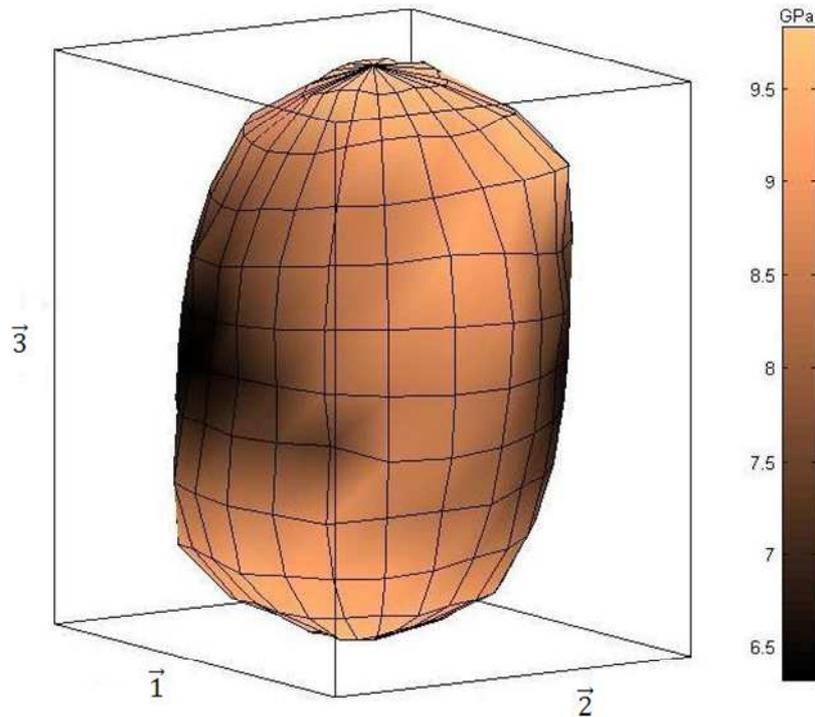


Figure 70 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction de la direction de mesure pour l'échantillon SLP_74 de loupe de thuya ($3 = L$)

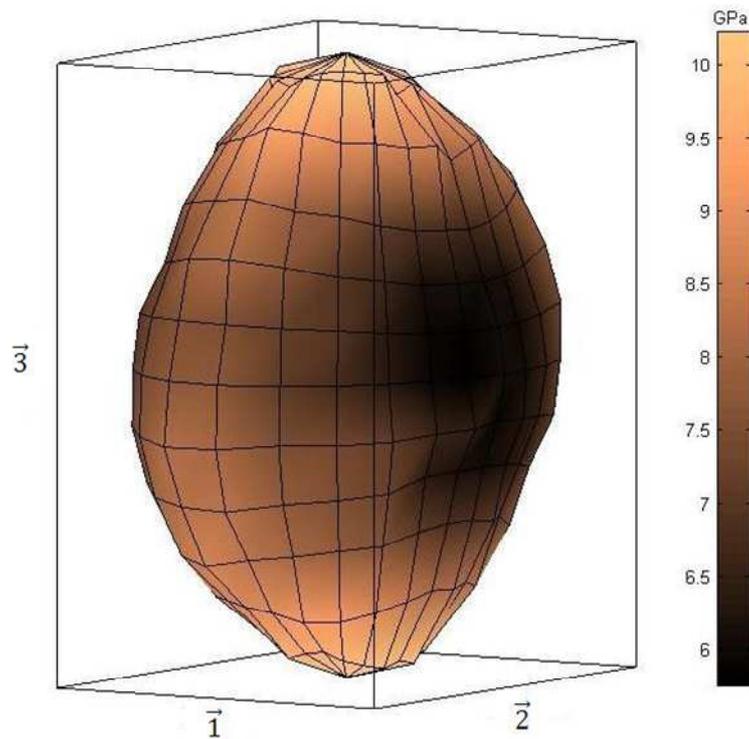


Figure 71 : Valeurs expérimentales de $C(\varphi, \theta)$ (en GPa) en fonction de la direction de mesure pour l'échantillon SLP_113 de loupe de thuya ($3 = L$)

Les résultats trouvés par la méthode des moindres carrés sont présentés dans le Tableau 23. Les valeurs des coefficients d'anisotropie, dans les 3 axes principaux sont présentées dans le Tableau 24. On remarque, sur l'ensemble des résultats, une évolution d'un comportement

quasi-isotrope au bas de la loupe vers un comportement quasi-isotrope transverse pour des échantillons plus proches du bois de thuya. On remarque aussi en parallèle que les rigidités transverses (i.e., dans les directions 1 et 2) diminuent alors que le module longitudinal augmente légèrement. Ceci confirme les résultats obtenus à l'échelle macroscopique sur le plateau entier (Chapitre 4) en apportant ici des informations supplémentaires sur le comportement hors axes (en particulier l'allure ellipsoïdale observée Figure 69 à Figure 71) qui permettent de conclure sur le comportement quasi-isotrope de la loupe, isotropie d'autant plus marquée que la densité d'excroissances est élevée.

	Erreur (%)	ψ (°)	τ (°)	λ (°)	C_{11} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{LL} (GPa)	$C_{23}+2C_{44}$ (GPa)	$C_{13}+2C_{55}$ (GPa)	$C_{12}+2C_{66}$ (GPa)
S _{LP_24}	3	5	0	25	8,65	7,47	9,41	7,23	9,38	7,19
S _{LP_74}	2,8	20	10	90	8,55	6,32	9,71	8,28	9,30	6,55
S _{LP_113}	2,9	40	0	55	7,85	5,95	10,18	5,48	7,85	6,56

Tableau 23 : Résultats trouvés par la méthode des moindres carrés pour les 3 échantillons de loupe de thuya de la première série

	C_{LL}/C_{11}	C_{LL}/C_{22}	C_{11}/C_{22}
S _{LP_24}	1,09	1,26	1,16
S _{LP_74}	1,14	1,54	1,35
S _{LP_114}	1,3	1,71	1,32

Tableau 24 : Comparaison entre les coefficients d'anisotropie pour les valeurs de rigidité mesurées pour les 3 échantillons de loupe de thuya de la première série

Le Tableau 25 regroupe les valeurs des rigidités déterminées par la méthode ultrasonore pour les 4 échantillons de loupe de thuya de la seconde série (S₁ à S₄) ainsi que les coefficients d'anisotropie associés. Pour ces échantillons, la méthode des moindres carrés, pour identifier les directions d'orthotropie et les rigidités dans ces directions, n'a pas été utilisée. Les directions reportées correspondent donc uniquement au repère macroscopique de la loupe. Ce tableau montre néanmoins que, pour les 4 échantillons, les valeurs maximales de rigidité (en gras) ne se trouvent pas systématiquement suivant la même direction (i.e., L), et il en est de même pour les valeurs minimales de rigidité. En effet, concernant l'échantillon S₁ par exemple, nous remarquons que la plus grande valeur de rigidité correspond à la direction 2, la plus faible à la direction 1. Par contre, pour l'échantillon S₃, la plus grande valeur de rigidité correspond à la direction 1 et la plus faible à la direction L. Nous verrons plus loin l'origine anatomique de ces observations.

	C_{LL}	C_{11}	C_{22}	$\frac{C_{LL}}{C_{11}}$	$\frac{C_{LL}}{C_{22}}$	$\frac{C_{11}}{C_{22}}$
S ₁	5,06	4,19	6,56	1,21	0,77	0,64
S ₂	5,77	5,02	4,73	1,15	1,22	1,06
S ₃	4,49	6,57	5,40	0,68	0,83	1,22
S ₄	5,84	4,68	4,62	1,25	1,26	1,01

Tableau 25 : Valeurs de rigidité (en GPa) et coefficients d'anisotropie pour les 4 échantillons de loupe de la seconde série

Pour les 4 échantillons, les coefficients d'anisotropie sont compris entre 0,64 et 1,26, ce qui est faible mais en accord avec la forte densité d'excroissances (Chapitre 2) et le comportement macroscopique quasi-isotrope dans la partie inférieure des loupes (Chapitre 4 et Figure 69).

7.2.2 Spectroscopie ultrasonore résonante

L'utilisation de cette technique n'est restée qu'à l'état prospectif et seul un échantillon de loupe de thuya a été testé. Le signal obtenu est moins bon que pour les échantillons de bois. L'usinage du cube est plus critique avec l'apparition de fissure ou de trous au niveau des excroissances. Pour un échantillon bien usiné, extrait dans la partie basse du plateau, le spectre obtenu est exploitable et proche de celui typique d'un comportement isotrope (Figure 72), ce qui est en accord avec les faibles coefficients d'anisotropie trouvés dans le Tableau 25. Les valeurs de rigidité obtenues par ajustement d'un modèle isotrope sont : $C_{11} = 4,5$ GPa, $C_{12} = 1,8$ GPa et $C_{44} = 1,35$ GPa. L'ordre de grandeur de la valeur obtenue pour C_{11} est en bon accord avec celles obtenues en moyenne dans le Tableau 25 pour C_{LL} , C_{11} et C_{22} (soit 5,2 GPa). Ainsi, cette méthode est pertinente pour la mesure du comportement élastique de la loupe de thuya (et du bois en général) et doit être exploitée dans le futur.

7.2.3 Discussion

Dans le cas de la loupe de thuya, pour lequel très peu de données ou informations sont disponibles dans la littérature, nos résultats expérimentaux montrent qu'il a un comportement quasi-isotrope transverse. En effet, la forme 3D est proche d'un ellipsoïde (Figure 69 à Figure 71) avec la présence d'une direction privilégiée légèrement plus rigide (au maximum 1,7 fois plus rigide que les directions transverses). De plus, le calcul des coefficients d'anisotropie de la loupe de thuya a montré que celui-ci présente une très faible anisotropie par rapport au bois « standard » (feuillus et résineux). En effet, la valeur de ces coefficients est comprise entre 0,6 et 2 alors qu'elle est comprise entre 2 et 11 d'après la littérature pour du bois « standard », et entre 1 et 3 d'après nos mesures sur le bois de thuya. Ce résultat montre que la loupe de thuya a un comportement mécanique différent du bois de thuya appartenant pourtant à la même entité. Ceci est dû à la différence de structures anatomiques comme nous l'avons vu aux Chapitres 3 et 4 et que nous allons confirmer dans le paragraphe suivant.

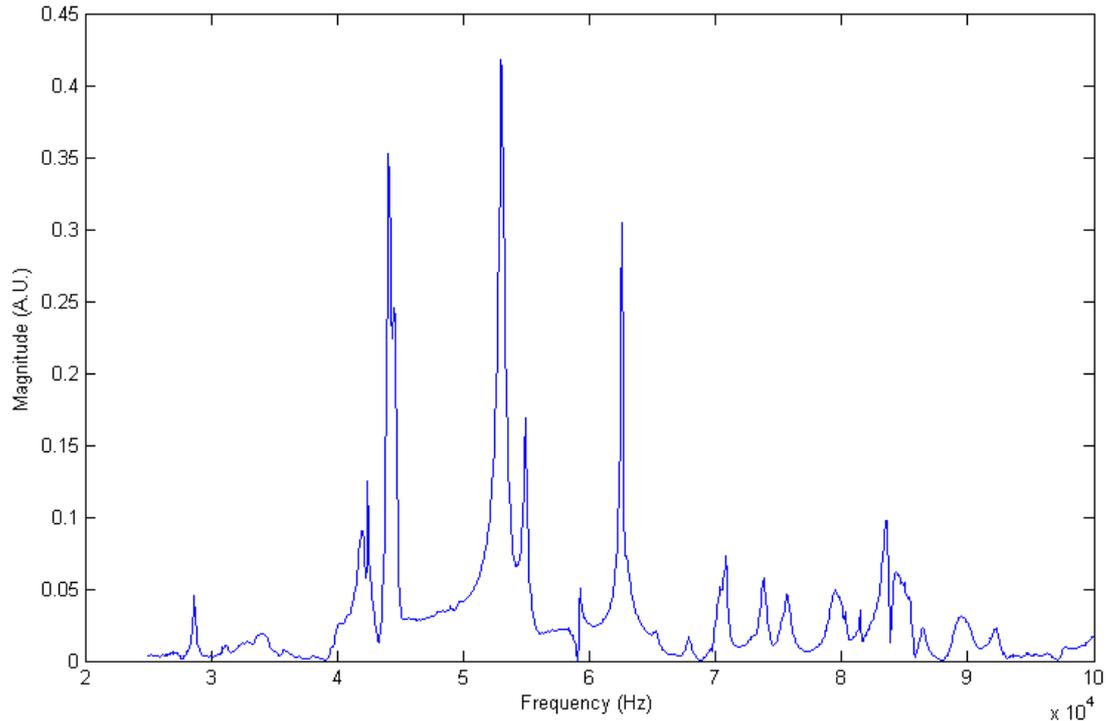


Figure 72 : Spectre de vibration libre d'un échantillon cubique (20 mm de côté) de loupe de thuya (partie basse du plateau)

7.3 Comparaison entre anatomie et anisotropie élastique

Afin d'établir une relation entre la structure interne et le comportement mécanique du bois et de la loupe de thuya, nous avons choisi de présenter les résultats des coupes tomographiques, dans différents plans médians des échantillons sphériques, directement sur le tracé 2D des rigidités dans les mêmes plans.

7.3.1 Bois de thuya

On rappelle que, sur les coupes de tomographies X, les zones de couleur noire plus foncée représentent les zones de densité les plus faibles (comme le bois initial) et les zones de couleur claire représentent les zones de densité plus élevée (comme le bois final). La première colonne du Tableau 26 représente la superposition d'une coupe médiane (2D) de la tomographie X de la sphère de bois de thuya avec le tracé des valeurs de rigidité en fonction de la direction de mesure obtenues dans le même plan (extrait de la Figure 68).

Dans le plan radial LR, nous pouvons observer les cernes de croissance distribués parallèlement et formant des couches successives usuelles de bois initial (couleur foncée) et de bois final (couleur claire) conforme à ce qui peut être observé macroscopiquement. Dans le plan tangentiel LT, nous remarquons que la coupe de la tomographie de la sphère passe par deux zones. Une zone centrale de bois initial (couleur foncée) et une zone de bois final (couleur claire) se trouvant de part et d'autre de la zone centrale. Enfin le plan transverse RT met en évidence les cernes de croissance distribués parallèlement (sous forme d'arc) et formant des couches successives usuelles de bois initial (couleur foncée) et de bois final

(couleur claire). Les coupes de la tomographie X sont tout à fait identiques à ce que l'on pourrait observer optiquement avec l'alternance des cernes. De plus, la distribution des rigidités suivant la direction de mesure est tout à fait conforme aux directions anatomiques données par les cernes de croissance.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

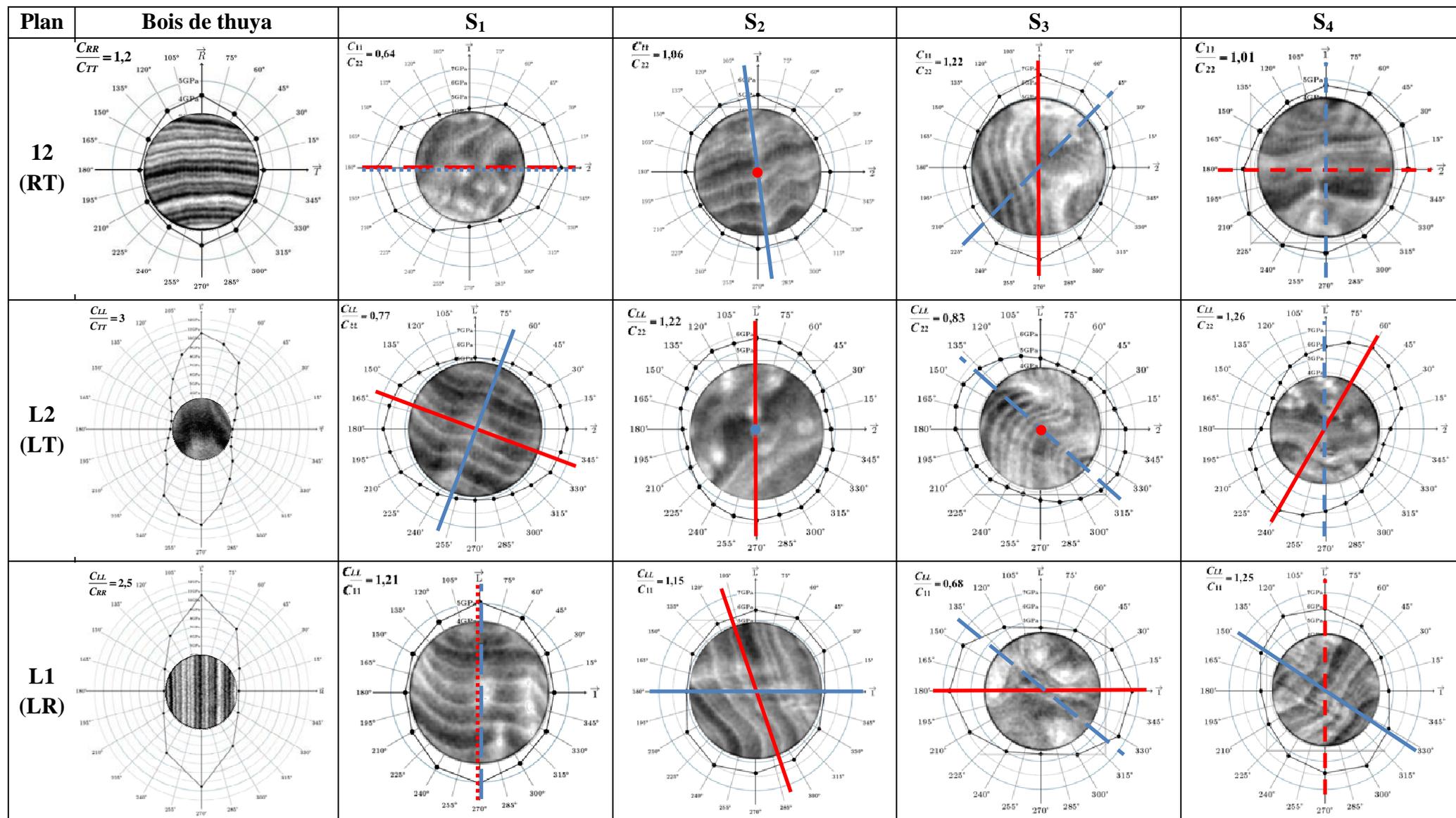


Tableau 26 : Tomographie X des échantillons de bois et de loupe de thuya dans les plans L1 (LR), L2 (LR) et 12 (RT) superposée au tracé des valeurs de rigidité suivant la direction de mesure dans les mêmes plans.

Les traits rouges représentent la direction l du bois et les bleus la direction e des excroissances : un trait fort signifie une direction contenue dans le plan, un trait

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE LA LOUPE DE THUYA

pointillé long une direction proche du plan (à moins de 45°), un trait pointillé court une direction éloignée du plan (à plus de 45°) et un point une direction perpendiculaire au plan

7.3.2 Loupe de thuya

Le Tableau 26 regroupe la superposition des différentes coupes médianes (2D) des tomographies X des 4 sphères de loupe de thuya avec le tracé des valeurs de rigidité, en fonction de la direction de mesure, obtenues dans le même plan (i.e., L1, L2 et 12). Nous remarquons que, pour tous les plans et tous les échantillons, l'allure du tracé des valeurs de rigidités en fonction de la direction de mesure est de forme elliptique plus ou moins marquée en accord avec le comportement quasi-isotrope dans cette zone de la loupe (voir le paragraphe 7.2.1.2).

Sur certaines coupes des tomographies, les profils sont semblables à ceux des coupes transversale (RT) ou radiale (LR) du bois de thuya (cf. échantillons S₂ et S₄ dans les plans 12 et L1, où l'on voit l'alternance bois initial/bois final des cernes). Les excroissances sont identifiées grâce à leur couleur plus claire en tomographie, du fait de leur densité plus élevée. On les observe presque suivant leur plus grande longueur dans le plan L2 pour l'échantillon S₁, dans les plans 12 et L1 pour l'échantillon S₂ et dans le plan L1 pour l'échantillon S₄. On observe aussi les excroissances en coupe transverse, sous forme de tâches quasi-circulaires très claires, par exemple pour l'échantillon S₁ dans le plan 12 ou encore l'échantillon S₂ dans le plan L2.

	\vec{l}	\vec{e}
S ₁	$\vec{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\vec{L} + \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{2}$
S ₂	\vec{L}	$\vec{1}$
S ₃	$\vec{1}$	$-\frac{1}{2}\vec{L} + \frac{1}{2}\vec{1} + \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{2}$
S ₄	$\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{L} + \frac{1}{2}\vec{2}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}\vec{L} + \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{1}$

Tableau 27 : Direction longitudinale *approchée* des excroissances, e , et des trachéides du bois, l (Tableau 26)

Nous remarquons aussi que l'allure des cernes est extrêmement perturbée en présence des excroissances, en particulier pour l'échantillon S₃. De même, la direction globale des trachéides du bois entourant les excroissances, notée l et représentée par un trait rouge dans le Tableau 26, ne paraît pas être systématiquement suivant la direction L de l'arbre, sauf pour l'échantillon S₂. En effet pour l'échantillon S₁, l'observation des cernes indique que la direction l doit être proche la direction 1 ou 2 (i.e., parallèles aux cernes). La direction 2 est même très probablement celle qui est proche de la direction l dans ce cas, vu que la plus grande rigidité est obtenue dans cette direction pour les 3 plans de coupe observés. De même pour l'échantillon S₃ pour lequel la direction l semble être proche de la direction 1. Enfin, pour l'échantillon S₄, la direction l semble être dans le plan L2 à environ 60° de la direction 2 (Tableau 27). Une observation plus minutieuse des tomographies en 3D (par exemple pour la sphère S₁ sur la Figure 73) permet d'estimer la direction longitudinale moyenne des

excroissances, noté e et représentée par un trait bleu dans le Tableau 26. En accord avec les observations faites aux Chapitres 2 et 3, cette direction est globalement perpendiculaire aux cernes (e.g., Figure 73 ou Tableau 26 pour la sphère S_1 dans le plan L2 ou pour la sphère S_2 dans les plans L1 et 12). La direction e a été relevée de façon approchée pour tous les échantillons dans le Tableau 27 à partir de vue 3D des tomographies. On remarque à nouveau dans ce tableau des directions très différentes des excroissances d'un échantillon à l'autre. Cette forte variabilité inter-échantillon est probablement due au faible diamètre des sphères par rapport aux dimensions des excroissances et des cernes.

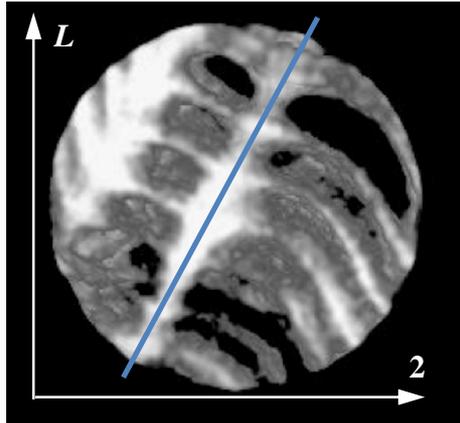


Figure 73 : vue 3D de la tomographie de la sphère de loupe de thuya S_1 , suivant une direction proche de 1, et identification de la direction longitudinale e de l'excroissance (en bleu)

Le Tableau 26 permet enfin d'expliquer les différences observées entre échantillons par rapport à l'orientation de la direction la plus rigide (Tableau 25, limité aux directions L, 1 et 2 ou Tableau 26 limité aux plans de coupe) : les échantillons sont pratiquement toujours les plus rigides dans une direction égale ou proche de celle l des trachéides du bois avec une rigidité de l'ordre de 6 à 7 GPa. Cette rigidité est inférieure à celle obtenue dans la direction L pour l'échantillon de bois de thuya (i.e., 11 GPa). La rigidité dans la direction e des excroissances est généralement légèrement plus importante que dans la direction R de l'échantillon de bois de thuya, i.e., de l'ordre de 5 GPa au lieu d'environ 4 GPa. Enfin, la rigidité dans une direction normale au plan (l , e), correspondant globalement au plan tangent aux cernes, est aussi légèrement plus importante que la rigidité dans la direction T de l'échantillon de bois de thuya, i.e., environ 4 GPa au lieu d'environ 3 GPa. Les facteurs qui permettent d'expliquer, *au premier ordre*, la rigidité du bois sont la densité (épaisseur de paroi cellulaire) et l'orientation des trachéides ainsi que leur organisation dans leur plan transverse. En se limitant aux deux premiers paramètres, nous pouvons donc corréler les directions principales de rigidité pour la loupe de thuya avec l'orientation l des cernes et l'orientation e des excroissances. La présence des excroissances accroît la rigidité de la loupe dans la direction longitudinale e de celles-ci (i.e., direction des trachéides au sein d'une excroissance) et dans la direction transverse à celles-ci par un effet de densité et de désorientation des trachéides du bois entourant l'excroissance par rapport à la direction l . Cette désorientation s'accompagne en contre partie d'une diminution de la rigidité de la loupe dans la direction l des trachéides du bois entourant les excroissances (cf. anatomie des excroissances au Chapitre 3).

7.4 Conclusion

Les résultats trouvés par la méthode ultrasonore par contact direct montrent que la distribution des valeurs de rigidité pour les échantillons de loupe dans les différents plans de coupe a une forme elliptique. Pour tous les échantillons de loupe pris dans la partie basse contenant beaucoup d'excroissances, le coefficient d'anisotropie est faible, i.e., compris entre 0,64 et 1,26. Ceci confirme les mesures effectuées à l'échelle du plateau sur la faible anisotropie de la loupe lorsqu'elle contient beaucoup d'excroissances. L'axe de plus grande rigidité, correspondant au grand axe de l'ellipse, présente une direction variable dans le repère $(\vec{1}, \vec{2}, \vec{L})$ global de la loupe mais semble rester dans la direction longitudinale des trachéides du bois entourant les excroissances. Cette direction est très variable d'un échantillon à l'autre, démontrant une forte perturbation de la croissance secondaire au sein de la loupe. Ce résultat confirme le fait que l'arrangement cellulaire dans le cas de la loupe est beaucoup plus aléatoire. De plus, la présence des excroissances plus denses, dont la direction longitudinale est principalement perpendiculaire aux cernes et à la direction de trachéides du bois les entourant (Tableau 26), renforce le comportement élastique dans le plan transverse. Cette augmentation de rigidité dans les directions transverses se fait au détriment de celle dans la direction l suite aux fortes désorientations des trachéides autour des excroissances (voir le paragraphe 3.3.2). Au final le comportement élastique est quasi-isotrope, en présence d'une forte densité d'excroissances, de part une distribution angulaire quasi-homogène de trachéides. Ces travaux prospectifs devront être complétés dans le futur par une étude plus complète et statistique sur différentes loupes et différents échantillons au sein de chaque loupe.

8 Conclusion générale

Cette étude constitue une première contribution à la caractérisation mécanique de la loupe de thuya notamment par l'identification de son comportement mécanique dont la connaissance est nécessaire pour les étapes de transformation de ce bois. Cette caractérisation a été faite en deux étapes : une première étape de caractérisation multi-échelle de la structure interne du matériau en utilisant la tomographie X et les coupes anatomiques, une seconde étape de caractérisation de l'anisotropie élastique du bois de la loupe par la recherche des symétries matérielles, en utilisant une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques, mise au point au cours de ce travail.

Les principaux résultats obtenus sur la caractérisation multi-échelle de la structure interne sont les suivants :

- L'utilisation de la tomographie X nous a permis de visualiser en 3D la structure interne d'une loupe entière et de caractériser la distribution des excroissances en son sein. Un premier résultat indique qu'il n'existe pas de symétrie axiale des cernes de croissance selon l'axe longitudinal de l'arbre, comme le cas du bois de thuya présent dans le tronc. Cette étude a mis en évidence un gradient de concentration d'excroissance le long de l'axe longitudinal de l'arbre avec un maximum dans la zone inférieure de la loupe. Ces excroissances, tiges cylindriques de faibles dimensions ne dépassant pas quelques millimètres de diamètre pour une longueur de quelques centimètres, sont, localement, dirigées radialement par rapport aux cernes de croissance. A l'échelle de la loupe, la distribution de ces excroissances apparaît globalement « sphérique » autour d'une zone centrale située au niveau de la moelle.
- À l'échelle microscopique, l'étude des coupes anatomiques a montré d'une part, que le bois de thuya possède une structure de type résineux, et d'autre part, que le bois de la loupe possède une structure différente de celle du thuya. Ce résultat s'explique par la présence des excroissances : d'abord parce qu'elles engendrent des modifications directionnelles des cellules voisines et ensuite parce que ces excroissances présentent des cellules aux parois cellulaires plus épaisses (leur densité est donc plus élevée que celle de la matière ligneuse qui les entoure). D'un point de vue pratique, une enquête menée auprès des maître-artisans des coopératives de thuya montre que parmi les paramètres de qualité de la loupe, la proportion d'excroissances contenue en son sein est l'un des plus importants. De ce fait, plus une loupe est dense et plus elle contient une fraction volumique importante d'excroissances limitant ainsi le risque d'obtenir, après découpe, un moucheté pas ou peu esthétique.

Concernant la caractérisation de l'anisotropie élastique de la loupe de thuya, le premier apport de ce travail est la mise au point d'une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques permettant l'identification des symétries matérielles du matériau. Les principaux résultats obtenus sont les suivants:

- L'étude de la dispersion des propriétés mécaniques, constantes de rigidités, au sein d'un plateau de bois de la loupe de thuya, a montré l'existence d'un gradient de rigidité dans le sens longitudinal. Les zones les plus basses de la loupe présentent une

valeur de rigidité longitudinale voisine des transversales. Par contre, la rigidité longitudinale des zones les plus hautes, proche du tronc, tend vers des valeurs voisines de celles du bois de thuya (dans la direction longitudinale). Ce résultat est à rapprocher des observations faites sur les coupes transversales du scan de la loupe entière. Les zones de la loupe se rapprochant du tronc présentent de moins en moins d'excroissances et la structure de la loupe, ou en tout cas l'organisation de la matière dans un plan transversal, tend vers celle du bois de thuya. A priori on peut dire que la forte présence des excroissances dans le bas de la loupe de thuya engendre une « homogénéisation » de la rigidité.

- Le choix de la géométrie cubique ou parallélépipédique ne permet pas de déterminer les symétries matérielles du bois de la loupe de thuya sur un seul échantillon afin de s'affranchir de la variabilité entre échantillons. Nous nous sommes donc naturellement orientés vers un échantillon de forme sphérique permettant des mesures multi-directionnelles.
- Les mesures effectuées sur des échantillons de $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ ont montré une bonne transmission des ondes ultrasonores dans les deux directions d'épaisseur 40 mm. Au-delà de 40mm, il arrive que le signal devienne trop faible pour effectuer une mesure correcte. Par conséquent, nous avons fixé la dimension des échantillons sphériques de bois de loupe de thuya à une valeur voisine de 40mm.
- La méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques a été validée théoriquement et expérimentalement. Cette validation a été conduite sur deux matériaux de référence : un alliage d'aluminium au comportement isotrope et un bois de hêtre homogène au comportement orthotrope. L'application de cette méthode à ces deux matériaux nous a permis de vérifier la robustesse de ce banc expérimental et sa capacité à retrouver leurs symétries matérielles (axes d'orthotropie pour le hêtre par exemple). Appliqué au bois de la loupe de thuya, cette méthode a révélé un matériau au comportement de type isotrope transverse, avec un faible coefficient d'anisotropie. D'un point de vue pratique, cette nature de comportement de la loupe de thuya autorise donc une découpe selon n'importe quel plan et notamment le plan présentant l'aspect le plus esthétique.
- Cependant, si cette nouvelle technique permet de déterminer, avec une bonne précision, le type de comportement mécanique d'un matériau, elle ne permet pas d'obtenir sa matrice de rigidité complète. En effet, dans le cas d'un matériau orthotrope, cette méthode nous donne accès aux 3 termes diagonaux de la matrice de rigidité et à 3 combinaisons linéaires des 6 autres.

Nous avons présenté une méthode complémentaire à méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques, destinée à l'identification complète de la matrice de rigidité. Cette méthode d'analyse vibratoire est la Spectroscopie Ultrasonore Résonante (RUS). L'application de cette méthode à des échantillons cubiques de bois de hêtre et de loupe, taillés dans les sphères de bois testés par la méthode ultrasonore par contact direct, a permis d'identifier complètement la matrice de rigidité du hêtre et de la loupe de thuya. Cependant, cette méthode RUS est nécessairement complémentaire à la méthode ultrasonore car l'usage des cubes ne peut se faire qu'en ayant la connaissance du réseau de symétries matérielles donc

du comportement (isotrope, cubique, orthotrope, ...) du matériau. Les faces du cube sont alors usinées perpendiculairement aux directions principales trouvées et l'ordre de grandeur des valeurs de rigidité selon les axes de symétrie trouvées par la méthode ultrasonore servent ensuite de valeurs de départ dans la routine de post-traitement des données expérimentales.

La méthode RUS est aussi appliquée sur des échantillons de géométrie sphérique (RST). Par ailleurs, il serait intéressant de coupler la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques avec la méthode RST afin de ne plus avoir à usiner le cube dans l'échantillon sphérique.

Perspectives

Nous proposons ci-dessous quelques perspectives de poursuite de ce travail :

1. Amélioration de la méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques :
 - Utiliser des transducteurs d'ondes de cisaillement, toujours sur le même échantillon, pour compléter les mesures et permettre ainsi de bénéficier d'un outil expérimental rapide et fiable de caractérisation des symétries matérielles et de la matrice de rigidité.
 - Afin de minimiser les sources d'erreurs dues notamment au traçage et au repérage des directions de mesure, il serait intéressant d'utiliser un repérage de contrôle automatique des directions de mesure.
 - La concentration des points de mesure au niveau des pôles, peut avoir un effet sur l'ajustement du repère de symétries matérielles recherché, et par conséquent sur les résultats trouvés des angles de rotations. Ce problème pourrait être résolu en appliquant une pondération proportionnelle à la surface délimitée par les points de mesure voisins.
2. L'étude de la loupe de thuya pourrait être poursuivie sur les points suivants :
 - D'expérience, les artisans marqueteurs et ébénistes préfèrent travailler des loupes provenant de la région d'Essaouira plutôt que celles provenant d'autres régions. Il serait intéressant de faire une étude comparative entre les loupes de différentes provenances (Rif, Maroc oriental, Moyen Atlas occidental (Essaouira), Plateau central, ...) afin d'expliquer sur quels critères objectifs se fondent ces choix.
 - Connaissant, les symétries matérielles du bois de la loupe de thuya, il serait intéressant de réaliser des essais de tranchage, suivant les plans de symétries en faisant varier les épaisseurs de 3/10mm à 2 ou 3 millimètres et d'étudier le rendement d'usinage.
3. Connaissant maintenant les symétries matérielles du bois de la loupe de thuya, il est intéressant de réaliser un essai de sciage et de tranchage, suivant les axes de symétries, à différentes épaisseurs allant de 3/10 mm jusqu'à 2 ou 3 mm. La faisabilité de ces essais va nous permettre de réduire considérablement les pertes obtenues durant les différentes étapes de transformation du bois de la loupe et par conséquent une meilleure utilisation de ce bois précieux.

9 Références bibliographiques

- Ben Abid, A. 1976. Etude écologique, phytosocio-écologique et sylvo-pastorale de la tétraclinaie de l'Amsitten (Essaouira). Aix-Marseille III.
- Bérard, P. 2003. Valorisation des taillis de châtaignier en bois rond pour usage extérieur : étude et optimisation d'un traitement oléothermique pour améliorer l'aspect et la durée de vie du produit. Université Montpellier.
- Boudy, P. 1950. *Économie forestière Nord africaine: II, Fasc1: monographie des essences forestières*. Paris: Larousse.
- . 1952. *Guide du forestier en Afrique du Nord*. La maison rustique.
- Bucur, V. 1985. « Ultrasonic velocity, stiffness matrix and elastic constants of wood ». *Journal of the Acoustical Society*: 23–28.
- . 2006. *Acoustics of wood*. Vol. 1431. 8563. Springer Verlag.
- Bucur, V., et P.N.J. Rasolofosaon. 1998. « Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock ». *Ultrasonics* 36 (7): 813–824.
- Bulletin d'artisan. 2007. Artisanat du Maroc à Essaouira. <http://seca.artesnet.gov.ma/essaouira/pages/Marq.php>.
- Dakak, Jamal Eddine. 2002. La qualité du bois de Thuya de Maghreb (*Tetraclinis articulata*) et ses conditions de développement sur ses principaux sites phytoécologiques de son bloc méridional au Maroc. Nancy, France: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
- Degallaix, S., et B. Ilschner, B. 2007. *Caractérisation expérimentale des matériaux: Propriétés physiques, thermiques et mécaniques*. Vol. 2. PUR presses polytechniques.
- Delaunay, T., D. Laux, et J.Y. Ferrandis. 2008. « Elastic constants identification of anisotropic composite rectangular parallelepipeds ». *J. acoust. Soc. Am.*, 123 (5): 3406.
- Demarest, H.J. 1971. « Cube-resonance method to determine the elastic constants of solids ». *J. acoust. Soc. Am.*, 49 (3): 768-775.
- Dieulesaint, E., et D. Royer. 1974. *Ondes élastiques dans les solides: application au traitement du signal*. Vol. 13. Masson.
- Fennane, M. 1982. Analyse phytogéographique et phytoécologique des tétraclinaies marocaines.
- . 1984. « Le thuya de Berberie au Maroc: aperçu phytoécologique et écologique ». *Bulletin de l'Institut Scientifique* 8: 115–134.
- . 1987. Etude phytoécologique des tétraclinaies marocaines. Aix-Marseille III.
- François, M. 2000. « Vers une mesure non destructive de la qualité des bois de lutherie ». *Revue des composites et des matériaux avancés* 19 (3): 261-279.
- François, M. 1995. Identification des symétries matérielles de matériaux anisotropes. Paris, France: Paris 6.
- François, M., G. Geymonat, et Y. Berthaud. 1998. « Determination of the symmetries of an experimentally determined stiffness tensor: application to acoustic measurements ». *International journal of solids and structures* 35 (31-32): 4091–4106.
- Fraser, DB, et RC LeCraw. 1964. « Novel method of measuring elastic and anelastic properties of solids ». *Review of Scientific Instruments* 35 (9): 1113–1115.
- Grimsel, M. 1999. Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes. Technische Universität Dresden.

- Guitard, D. 1987. *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépaduès éditions.
- Hatimi, M. 1994. Approvisionnement du secteur artisanal en souches et bois de thuya dans la province d'Essaouira. Salé, Maroc: École Nationale Forestière d'Ingénieurs.
- Hosten, B., et M Deschamps. 1983. *Mesure des coefficients élastiques complexes des matériaux anisotropes à l'aide d'un interféromètre ultrasonore assisté par ordinateur*.
- Hosten, B., et B. Castagnède. 1983. « Mesures des constantes élastiques du bois à l'aide d'un interféromètre ultrasonore numérique et leur optimisation ». *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre* 296 (23): 1761–1764.
- Hsieh, C.P, et B.Y Khuri-Yakub. 1993. « One-point contact measurement of spherical resonances ». *Appl. Phys. Lett* 62 (24): 3091-3093.
- Isoda, S., H. Oda, et K. Seya. 1990. « Displacement distribution of a freely oscillating rutile sphere ». *Tôhoku Geophysical Journal* 32 (3-4): 55-76.
- Jaglinski, T., et R.S. Lakes. 2011. « Resonant ultrasound spectroscopy of cylinders over the full range of Poisson's ratio ». *Review of Scientific Instruments* 82: 035105.
- Keunecke, D., W. Sonderegger, K. Pereteanu, T. Lüthi, et P. Niemz. 2007. « Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves ». *Wood Science and Technology* 41 (4): 309–327.
- Khotbi, N. 2004. Comportement, productivité et modèles de croissance des principales tétraclinaies (*Tetraclinis articulata* Vahl) au Maroc. Salé, Maroc: Ecole Nationale Forestière des Ingénieurs.
- Koch, P. 1985. *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites*. Vol. 1. 601. US Dept. of Agriculture, Forest Service.
- Kohlhauser, C., C. Hellmich, C. Vitale-Brovarone, AR Boccaccini, A. Rota, et J. Eberhardsteiner. 2009. « Ultrasonic characterisation of porous biomaterials across different frequencies ». *Strain* 45 (1): 34–44.
- Kumar, R. 1965. « Axially symmetric vibrations of a finite, isotropic cylinder ». *J. Appl. Mech* 27: 145-151.
- Lamb, H. 1882. « On the vibrations of an elastic sphere ». *London Mathematical Society* 13: 189-212.
- Laux, D., JY Ferrandis, G. Leveque, et JM Gatt. 2006. « Elastic properties of composites: Periodical homogenisation technique and experimental comparison using acoustic microscopy and resonant ultrasonic spectroscopy ». *Ultrasonics* 45: 104–112.
- Lee, T., RS Lakes, et A. Lal. 2002. « Investigation of bovine bone by resonant ultrasound spectroscopy and transmission ultrasound ». *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 1 (2): 165–175.
- Leisure, R.G., K. Foster, J.E. Hightower, et D.S. Agosta. 2004. « Internal friction studies by resonant ultrasound spectroscopy ». *Materials Science and Engineering A* 370: 34-40.
- Longuetaud, F. 2005. Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'Épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) par tomographie à rayons X. Nancy: ENGREF.
- Markam, MF. 1970. « Measurement of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics ». *Composites* 1 (3): 145–149.
- Maynard, J. 1996. « Resonant ultrasound spectroscopy ». *Physics Today* 49: 26-31.
- Migliori, A., TW Darling, JP Baiardo, et F. Freibert. 2001. « Resonant ultrasound spectroscopy (RUS) ». *Experimental Methods in the Physical Sciences* 39: 189–220.

- Migliori, A., et T. Darling. 1996. « Resonant ultrasound spectroscopy for materials studies and non-destructive testing, Ultrasonics ». *Ultrasonics* 34 (473-476).
- Migliori, A., et J.L Sarrao. 1997. *Resonant ultrasound spectroscopy: applications to physics, material measurements, and non-destructive evaluation*. New York: John Wiley & Sons.
- Navi, P., et F Heger. 2005. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois*. Presses polytechniques universitaires romandes.
- Nelder, J.A., et R. Mead. 1965. « A simplex method for function minimization ». *The computer journal* 7 (4): 308.
- Oda, H., O.L. Anderson, D.G. Isaak, et I. Suzuki. 1992. « Measurement of elastic properties of single-crystal CaO up to 1200 K ». *Physics and Chemistry of Minerals* 19 (2): 96–105.
- Panshin, A.J, et C De Zeeuw. 1970. *Textbook of wood technology, vol. 1, Mc Graw-Hill, 705 p.* Mc Graw-Hill. Vol. 1.
- Preziosa, C, M Mudry, J Launay, et F Giletta. 1981. « Détermination des constantes élastiques du bois par une méthode acoustique goniométrique ». *Compte Rendu Academie des Sciences*, sect. Série II.
- Salmen, L. 2004. « Micromechanical understanding of the cell-wall structure ». *Comptes Rendus Biologies* 327 (9-10): 873–880.
- Schubert, S.I., D. Gsell, J. Dual, M. Motavalli, et P. Niemz. 2006. « Rolling shear modulus and damping factor of spruce and decayed spruce estimated by modal analysis ». *Holzforschung* 60 (1): 78–84.
- Smith, I., E. Landis, et M. Gong. 2003. *Fracture and fatigue in wood*. Wiley.
- Soga, N., et O.L. Anderson. 1967. « Elastic properties of tektites measured by resonant sphere technique ». *Journal of Geophysical Research* 72 (6): 1733–1739.
- Soma, T., S. Shida, et T. Arima. 2002. « Calculation of grain angle and verification with spherical wood specimens using ultrasonic waves ». *Journal-Japan Wood Research Society* 48 (6): 407–412.
- Taoufik. 1993. Cartographie des types de peuplements et productivité du Thuya dans les forêts de Haha Sud dans le but d'un aménagement. Rabat-Maroc.
- Terre et Vie. Thuya: Importance écologique et économique. En ligne. <http://terrevie.ovh.org/53.htm>.
- Thibaut, B. 1988. Le processus de coupe du bois par déroulage. Montpellier: Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Thibaut, B., J. Gril, et M. Fournier. 2001. « Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics* 329 (9): 701–716.
- Torres, F., Y. Benino, T. Fujiwara, et T. Komatsu. 2004. « Evaluation of elastic/mechanical properties of some glasses and nanocrystallized glass by cube resonance and nanoindentation methods ». *Materials Research Bulletin* 39 (10): 1431–1443.
- Vinh, T. 1981. « Mesures ultrasonores de constantes élastiques des matériaux composites ». *Sciences et techniques de l'armement, 2ème fascicule*: 261–289.
- Zadler, B.J., J.H.L. Le Rousseau, J.A. Scales, et M.L. Smith. 2004. « Resonant Ultrasound Spectroscopy: theory and application ». *Geophysical Journal International* 156: 154–169.
- Zarandi, M.M., A. Bonakdar, et I. Stiharu. 2010. Investigations on Natural Frequencies of Individual Spherical and Ellipsoidal Bakery Yeast Cells. Dans , 6. Boston.

Résumé

La loupe de thuya joue un rôle économique et social important pour le secteur artisanal marocain. Ces dernières décennies, pour répondre à une forte demande, le bois de la loupe de thuya a été surexploité entraînant une dégradation importante des forêts de thuya marocaines. Une réponse possible à cette problématique, à court terme, consiste à limiter les déchets d'usinage. Cette voie d'investigation passe par la caractérisation du matériau et notamment l'identification de son réseau de symétries matérielles. L'objectif de ce travail est donc de caractériser le bois de la loupe de thuya (*Tetraclinis articulata* (vahl) Masters) dont le comportement mécanique n'a pas été étudié jusqu'à présent. Pour atteindre cet objectif, on passe tout d'abord par une caractérisation multi-échelle. A l'échelle globale, la caractérisation est réalisée en étudiant la structure interne d'une loupe entière par tomographie X, et plus particulièrement la distribution des excroissances foncées caractéristiques de la loupe. Cette étude macroscopique est complétée, à l'échelle microscopique, par une analyse comparative de coupes anatomiques de bois de thuya et de loupe. À l'échelle du matériau, le bois de la loupe est caractérisé en étudiant la dispersion de sa rigidité par une méthode ultrasonore par contact direct. L'étude plus approfondie du comportement mécanique a nécessité la mise au point d'une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques afin d'identifier les symétries matérielles d'un matériau. Cette méthode, appliquée au bois de la loupe de thuya, montre que la loupe a un comportement isotrope transverse. Par conséquent, il ne présente pas les mêmes symétries naturelles que le bois présent dans le tronc du même arbre. Cette méthode ne permet pas d'obtenir la matrice de rigidité complète : dans le cas d'un matériau orthotrope, elle donne accès aux 3 termes diagonaux de la matrice et à 3 combinaisons linéaires des 6 autres termes. Pour identifier complètement la matrice de rigidité, nous proposons, en perspective, l'utilisation de la Spectroscopie Ultrasonore Résonante (RUS). Le couplage de la méthode ultrasonore par contact direct développée et de la méthode RUS permettra de déterminer les symétries matérielles et la matrice de rigidité sur le même échantillon. Enfin, des coupes obtenues par tomographie X peuvent être superposées aux graphes de rigidité pour analyser la relation entre la structure interne et le comportement élastique de la loupe de thuya.

Mots clés : Loupe de thuya, caractérisation multi-échelle, anisotropie élastique, symétries matérielles, méthode ultrasonore par contact direct, sphère, tomographie X, anatomie.

Abstract

The wood of thuja burr plays an important economic and social role for the Moroccan artisanal sector. In last decades, as demand increased, thuja burr was overexploited resulting in an important degradation of Moroccan thuja forests. One possible solution, in the short term, consists in limiting waste machining. This approach requires the characterization of the material, especially of its material symmetries. This work aims thus at characterizing the wood of thuja burr (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters), that was little studied up to now. First, a multi-scale characterization is proposed. At the global scale, the internal structure of an entire thuja is observed using X ray tomography, especially the distribution of dark growth elements typical of thuja burr. This macroscopic characterization is completed, at the microscopic scale, by a comparative analysis of anatomical microsections of thuja wood and thuja burr. At the material scale, the dispersion of the thuja burr stiffness is observed using a direct contact ultrasonic method. In order to progress further in the study of the mechanical anisotropy, a direct contact ultrasonic method for spherical samples is developed allowing to identify material symmetries. By applying this method to the thuja burr wood, a transverse isotropic behaviour is observed. Hence thuja burr wood does not exhibit the same natural symmetries as what is found in the trunk of the same tree. However, this method does not yield the complete stiffness matrix. In the case of an orthotropic material, it gives the access to 3 diagonal terms of the matrix and 3 linear combinations of the six other terms. The use of Resonance Ultrasound Spectroscopy (RUS) is proposed to identify the stiffness matrix completely: the coupling of the direct contact ultrasonic method developed and RUS method allows to determine the symmetries and stiffness matrix on the same sample. Finally, scanned images obtained by X-ray tomography can be superimposed on stiffness graphs to analyze the relationship between the internal structure and the elastic behavior of thuja burr.

Keys words: Thuja burr, wood, multi-scale characterization, elastic anisotropy, material symmetries, direct contact ultrasonic method, sphere, tomography X, anatomy.