

RESUe

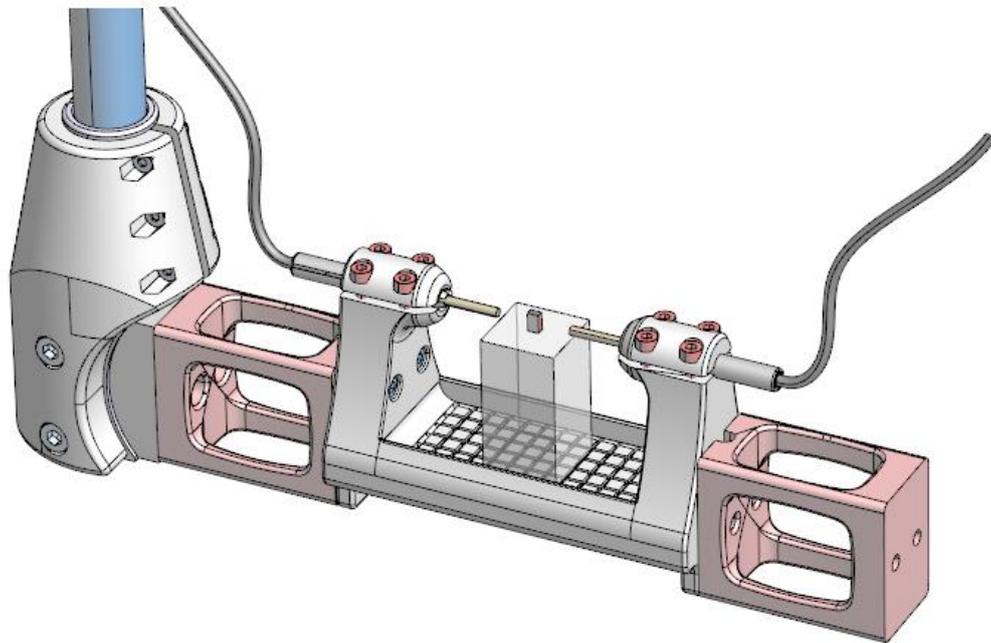
DUT Mesures Physiques
Deuxième année – Techniques d'instrumentations

21/06/2014

IUT Saint Jérôme / CNRS- Laboratoire de mécanique et d'acoustique

LOUBET Marine

Caractérisation ultrasonore des propriétés élastiques de petits échantillons d'os cortical bovin.



Tuteurs de stage : M.Philippe LASAYGUES (LMA)
Encadrante : Mme.Cécile BARON (ISM)
Tuteurs IUT : Mme.Valérie KAZARIAN

Soutenance de stage le lundi 23 juin 2014

REMERCIEMENTS

Au terme de ce projet, je tiens à exprimer mes remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce stage.

Je tiens tout particulièrement à remercier mes maîtres de stage, M. Philippe LASAYGUES et Mlle Cécile BARON pour m'avoir accueillie au sein de leurs équipes et pour m'avoir encadrée et orientée durant tout mon stage.

Je remercie également Vincent LONG pour la réalisation des pièces du nouveau dispositif.

Mes remerciements s'adressent aussi à toute l'équipe ondes et imagerie médicale pour toute l'aide et la bonne humeur qu'ils m'ont apportées tout au long de mon travail.

L'objectif de ce stage est de mettre en place une procédure efficace de caractérisation ultrasonore des propriétés élastiques de petits échantillons d'os bovin. Ce travail s'inscrit dans le projet **ANR*** Malice qui a pour objectif de mieux comprendre le comportement élastique des os enfants.

Tout d'abord, mon travail a consisté à faire des recherches bibliographiques sur la caractérisation ultrasonore des os bovins, ainsi l'os est **anisotrope**** et est caractérisé par trois directions. Ensuite, il m'a fallu résoudre différents verrous technologiques liés premièrement à la petite taille des échantillons, et deuxièmement aux limites du dispositif expérimental existant.

Premièrement en sélectionnant le dispositif d'émission et de réception des ondes ultrasonores. Puis en estimant grâce à la littérature des paramètres inaccessible expérimentalement (coefficient de Poisson), permettant par la suite d'établir les propriétés élastiques (module d'Young) des os bovins.

De plus, la réalisation d'un nouveau porte échantillon assurant l'alignement des pinducers (émetteur et récepteur), nous a permis de diviser par 10 le temps de manipulation pour un échantillon (25 min à 3 min), tout en étant plus précis dans nos mesures. Ainsi, nous avons caractérisé trois échantillons d'os cortical de fémur bovin mesurant de deux à sept millimètre d'épaisseur, selon les trois axes caractéristiques, avec six couples de pinducers et dans trois positions différentes. Les résultats obtenus sur la moyenne de 162 mesures sont cohérent avec la littérature.

Directions caractéristiques	Célérités des ondes longitudinales ($m.s^{-1}$)	Module d'Young moyen littérature (GPa)	Estimation coefficient de Poisson	Module d'Young moyen expérimental (GPa)
Longitudinale	4200	22,2	0,344	21,1
Transversale	3680	20,3	0,27	21,7
Radiale	3480	20,6	0,255	19,3

Tableau 1: Résultats expérimentaux

Le but de cette étude est donc atteint : le dispositif et le protocole expérimental sont optimisés et fonctionnent. Cette technique de caractérisation ultrasonore est validée sur des échantillons d'os de quelques millimètres d'épaisseur.

***ANR** : Agence Nationale de la Recherche

** **Anisotropie** : matériau présentant plusieurs propriétés selon différentes directions.

Mots clés : Caractérisation ultrasonore, Module d'Young, Coefficient de Poisson, anisotropie, os cortical.

The aim of the internship is to propose an efficient and approved procedure for the ultrasound characterization of small samples of bovine bone. This work falls within the framework of the **ANR** * MALICE project which aims to gain insight into the elastic behavior of children bone.

First of all, I made a bibliographic research on the ultrasonic characterization of bovine bone. Bovine bone is **anisotropic****, consequently the measurement of elastic properties has to be made along the three directions. Afterwards, I had to solve several technological bottlenecks linked to the small sizes samples and to the limitations of the current experimental device.

Firstly, I chose ultrasonic transducers adapted to the smallness of the samples and measured the longitudinal waves velocities. Then, I made an estimation of the parameters which cannot be experimentally determined (Poisson's ratios) using literature references. Finally I deduced the elastic properties (Young's modulus) of bovine bone. Moreover the realization of a new sample holder, ensuring the alignment of the emitter and receiver divided by 10 the handling time of a sample (25 minutes to 3 minutes equivalent to three measures), while improving the accuracy of the measurements. In this way, three samples of bovine femur cortical bone were characterized, along the three characteristics axes. The results obtained by averaging 54 measurements per direction are consistent with the literature.

Directions characteristics	Velocities of longitudinal waves ($m.s^{-1}$)	Modulus of Young literature average (GPa)	Estimate Poisson's ratios	Average Young's Modulus (GPa)
Longitudinale	4200	22.2	0.344	21.1
Transversale	3680	20.3	0.27	21.7
Radial	3480	20.6	0.255	19.3

Tableau 2:

The purpose of this study is reached, the device and the experimental protocol are optimized and works. This technique is validated on ultrasonic characterization of several millimeters thick bone samples.

* ANR: National Research Agency.

**Anisotropy: material with several properties in many directions.

Key words: Ultrasonic characterization, Anisotropy, Young's modulus, Poisson's ratio, Cortical bone.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	P.6
I. Cadre de travail:	
1. <i>CNRS</i>	P.7
2. <i>LMA</i>	P.8
3. <i>Le projet ANR Malice</i>	P.10
II. Etat de l'art & principes mis en jeux:	
1. L'os	
a) Structure de l'os	P.11
b) L'os un matériau vivant	P.12
2. <i>Caractérisation par ultrasons</i>	
a) Contexte clinique	P.13
b) Principe	P.13
c) Caractérisation non-destructive par ultrasons de l'os bovin	P.14
III. Matériels et méthodes :	
1. <i>Analyse de l'existant :</i>	
a) Préparation des échantillons	P.17
b) Dispositif initial	P.18
c) Verrous technologiques	P.19
2. <i>Dispositif et protocole proposé:</i>	
a) Résolutions des verrous technologiques	P.20
b) Matériels & Mesures	P.24
c) Acquisitions	P.26
IV. Résultats & Discussion :	
1. <i>Résultats</i>	P.28
2. <i>Discussion</i>	P.29
CONCLUSION	P.30
BIBLIOGRAPHIE	P.31
ANNEXES	P.33

INTRODUCTION

I. Cadre de travail:

1. CNRS

Le **Centre national de la recherche scientifique** est un organisme public de recherche (Etablissement public à caractère scientifique et technologique, placé sous la tutelle du Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche).

Le but du CNRS est de produire du savoir puis le mettre au service de la société. Créé par un décret du Président de la République Albert Lebrun, le 19 octobre 1939, alors que la France est déjà entrée dans la deuxième guerre mondiale, le CNRS a pour vocation, à cette époque, de regrouper tous les organismes d'État, non spécialisés, de recherche fondamentale ou appliquée, et de coordonner les recherches à l'échelon national.

Avec près de 33 000 personnes (dont 24 955 statutaires - 11 204 chercheurs et 13 751 ingénieurs, techniciens et administratifs), un budget pour 2013 de 3,415 milliards d'euros dont 802 millions d'euros de ressources propres, une implantation sur l'ensemble du territoire national, le CNRS exerce son activité dans tous les champs de la connaissance, en s'appuyant sur plus de 1100 unités de recherche et de service.

Des chercheurs éminents ont travaillé, à un moment ou à un autre de leur carrière, dans des laboratoires du CNRS. Avec 19 lauréats du prix Nobel et 11 de la Médaille Fields, le CNRS a une longue tradition d'excellence.

Le CNRS mène des recherches dans l'ensemble des domaines scientifiques, technologiques et sociétaux, c'est le principal organisme de recherches pluridisciplinaire en France. Cet organisme couvre l'ensemble des champs scientifiques, que ce soit les mathématiques, la physique, la communication, la chimie, la physique nucléaire, les sciences du vivant, les sciences de l'ingénierie. Ces disciplines sont regroupées en dix instituts :

Institut des sciences biologiques (INSB)

Institut de chimie (INC)

Institut écologie et environnement (INEE)

Institut des sciences humaines et sociales (INSHS)

Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I)

Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) → LMA

Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (INSMI)

Institut de physique (INP)

Institut national de physique nucléaire et physique des particules (IN2P3)

Institut national des sciences de l'univers (INSU)

Le CNRS développe, de façon privilégiée, des collaborations entre spécialistes de différentes disciplines, ouvrant ainsi de nouveaux champs d'investigations qui permettent de répondre aux besoins de l'économie et de la société. Des actions interdisciplinaires de recherche sont notamment menées dans les domaines suivants : «Le Vivant et ses enjeux sociaux», «Information, communication et connaissance», «Environnement, énergie et développement durable», «Nanosciences, nanotechnologies, matériaux», «Astroparticules : des particules à l'Univers».

2. Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) :

Le **LMA** est une **Unité Propre de Recherche du CNRS** (UPR 7051) rattachée à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS).

Le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique a pour objectif d'assurer dans les domaines qui sont les siens, l'Acoustique et la Mécanique des Solides, le **continuum Recherche fondamentale-Ingénierie-Technologie** tout en privilégiant l'approche système.

Le Laboratoire développe une recherche originale qui va de la compréhension des phénomènes à l'élaboration de systèmes à fort enjeu technologique ou sociétal, en passant par leur conception ou par le développement des concepts et technologies de base.

Il regroupe environ 140 personnes, dont 90 personnels permanents (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, assistants-ingénieurs et techniciens) et une quarantaine de doctorants.

Le LMA a des compétences reconnues nationalement et internationalement dans les domaines de la **Mécanique des Solides** et de l'**Acoustique**. Il est structuré en trois équipes de recherche de taille comparable :

« **Matériaux et Structures** », « **Sons** » et « **Ondes et Imagerie** ».

Fort de son implantation locale (en particulier à travers ses partenaires, les pôles de compétitivité et les plateformes technologiques), de ses **nombreuses collaborations académiques nationales et internationales** et de son **partenariat industriel** très diversifié, le LMA développe des recherches originales qui couvrent un **large spectre d'applications** allant de l'aéronautique et du spatial à l'énergie et l'environnement, en passant par le génie civil, les transports terrestres, le nucléaire, la santé, la culture, les NTIC, ...

Le LMA est actuellement situé principalement sur le Campus CNRS de Joseph-Aiguier, avec deux antennes, à Château-Gombert (Centrale Marseille) et à Aix (IUT GMP). A l'horizon début-2015, le Laboratoire intégrera un nouveau bâtiment sur le Technopôle de Château-Gombert dans le cadre de la création d'un campus d'ingénierie ayant une réelle visibilité internationale.

Equipe Ondes et Imagerie

L'équipe Ondes et Imagerie est spécialisée dans la propagation des ondes mécaniques dans les milieux fluides et solides complexes. Elle développe des recherches visant à imager, caractériser et contrôler de manière non invasive au moyen des ondes les milieux naturels, biologiques et manufacturés. Le spectre de ses activités de recherche est très large, allant de la modélisation phénoménologique à l'étude expérimentale, en passant par le développement de codes de simulation numérique et le calcul haute performance.

Thématiques scientifiques :

Modélisation pour les ondes : modélisations physiques, mathématiques et numériques, codes de calcul, calcul haute performance pour la propagation en milieux complexes.

Acoustique Sous-Marine, Sismique, Sismologie : performances des antennes sonar, sédiments et objets enfouis, caractérisation et imagerie de structures géologiques complexes par la sismique réflexion.

Contrôle Non-Destructif : caractérisation ultrasonore de structures dans le domaine du génie civil (béton, plâtre), de l'aéronautique (composites, collages), et de l'énergie (soudures, aciers), suivi du comportement mécanique de combustibles nucléaires sous compression via l'émission acoustique.

Ultrasons Médicaux : tomographie ultrasonore pour la détection du cancer du sein et pour les milieux en croissance (os, bois), optimisation positions source/objet pour l'imagerie, caractérisation ultrasonore de l'agrégation érythrocytaire pour les maladies circulatoires, acoustique non-linéaire pour la prévention des accidents de désaturation, contrôle ultrasonore de la génération des micro-bulles.

➔ **Applications biomédicales** : cancer du sein, pathologies osseuses, agrégation érythrocytaire, microbulles circulantes dans le sang.

3. *Projet ANR MALICE:*

Le projet ANR Malice est un projet ambitieux et multidisciplinaire. Il regroupe différentes équipes de recherches spécialisées dans la propagation des ondes ultrasonores, de la biomécanique expérimentale et numérique, ainsi que des équipes cliniques. Le LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique) et l'ISM (Institut des Sciences du Mouvement) font partie des laboratoires participants.

Le projet Malice a pour objectif de progresser dans la connaissance qualitative des mécanismes de la croissance de l'os enfant, dans un premier temps, en établissant expérimentalement une base de valeurs de référence biomécaniques, puis dans un second temps en construisant un modèle numérique de l'os enfant, qui pourra évoluer selon l'âge du sujet allant du nouveau-né à l'adolescent.

La caractérisation et l'analyse de l'évolution des os enfants est encore une question ouverte et cruciale pour de multiples applications. Il est important de progresser dans la connaissance du métabolisme des os lors de la croissance afin de comprendre son évolution et ainsi améliorer le diagnostic et le traitement des pathologies associées comme l'ostéoporose.

Actuellement, le critère le plus utilisé pour diagnostiquer la fragilité osseuse est la mesure de la densité minérale osseuse (DMO), déterminée conventionnellement par rayons X à l'aide de scanner. Cependant, cette technique nécessite des protocoles particuliers adaptés à la pratique pédiatrique (anesthésie, dose de radiation). Par ailleurs, la DMO reste un paramètre sujet à controverse. En effet il existe une problématique dans l'interprétation des résultats en fonction de l'âge osseux et lorsque la taille de l'os varie. De plus la mesure de la DMO donne accès exclusivement à la teneur en minéraux de l'os (donnée quantitative) et ne fournit aucune information sur la microstructure ou les propriétés mécaniques de l'os qui refléterait la qualité de l'os.

Des études ont montré que dans le cas de femmes âgées, les échographies quantitatives permettent d'atteindre des niveaux d'information plus élevés sur la structure de l'os que la mesure de DMO. Il n'y a actuellement pas de stratégie de développement et d'utilisation des ultrasons pour une application pédiatrique. Dans la littérature, les valeurs de référence en fonction de l'âge manquent en ce qui concerne les jeunes patients.

Il est donc évident que la première étape est de déterminer ces valeurs de référence concernant la caractérisation ultrasonore des os enfants. C'est dans cet objectif qu'intervient mon stage, en établissant une procédure de caractérisation ultrasonore de petits échantillons d'os bovin. En définissant un protocole adapté au traitement des petits échantillons, on se place dans le cadre de la caractérisation des os enfants dont les échantillons proviennent de déchets chirurgicaux et sont donc de faibles dimensions (quelques millimètres). On valide d'abord le dispositif sur des échantillons animaux plus aisés à se procurer pour ensuite passer au test sur de l'os humain.

Le but est de déterminer les propriétés mécaniques de l'os notamment son module d'Young selon les 3 directions de l'espace, l'os étant supposé anisotrope. Mon stage porte sur une caractérisation non-destructive in vitro, mais le projet MALICE a pour but de développer un outil de caractérisation in-vivo.

Ce projet permettra de progresser dans la compréhension, le diagnostic, le traitement, ainsi que la prévention des maladies ou des lésions liées à l'os quel que soit l'âge du patient.

II. Etat de l'art & principes mis en jeu :

1. L'os :

a) Structure de l'os long :

Notre squelette est constitué d'os, d'articulations et de ligaments, la fonction première de ces os et de supporter le reste de notre corps (muscles, organes, ...) tout en nous permettant de bouger, mais il assure également une fonction de protection notamment des organes vitaux, et du système nerveux.

Les os sont classés en trois catégories :

- Les os longs (tibia, fémur, péroné, ...)
- Les os plats ou larges (côtes, omoplates,...)
- Les os courts (ceux du carpe et du tarse, petit os de la main ou du pieds, ...)

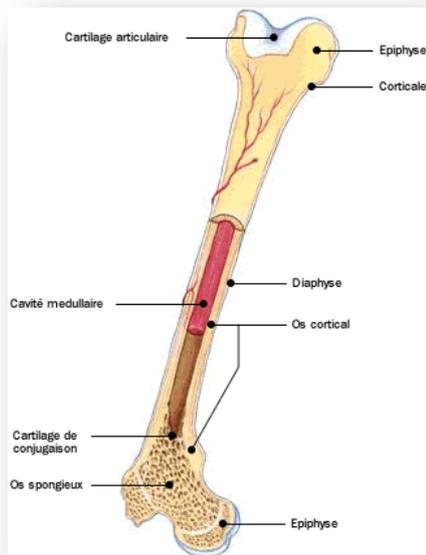


Figure 1: Structure d'un os long

Un os est composé de:

- . 5 à 10% d'eau
- . 60 à 70% de minéraux (phase inorganique : calcium, phosphore, fer, sodium...).
- . Puis le reste correspond à la phase organique essentiellement composée de collagène.

Un os long est divisé en 2 grandes parties : l'épiphyse et la diaphyse.

Les **épiphyse**: formées de tissu spongieux comblé de moelle osseuse rouge. Elles ont des surfaces articulaires cartilagineuses qui permettent de s'articuler les unes aux autres.

La **diaphyse** : formée de tissu osseux compact.

L'os recense 2 types de tissus osseux :

- Le **tissu compact**, ou **cortical**, est une partie osseuse dense, dure et très résistante formant un manchon plus ou moins épais. Il est principalement constitué d'ostéons et de lamelles osseuses cylindriques. Il résiste à la pression et aux chocs, et protège le tissu spongieux. Il constitue notamment la diaphyse des os longs.

- **Le tissu spongieux** présente une structure en éponge car il est constitué de travées osseuses creusées de petites cavités. Cette structure donne sa légèreté à l'os. Il est présent dans les os courts, plats et dans les épiphyses des os longs auxquels ils confèrent une grande résistance à l'écrasement.

b) L'os : un matériau vivant.

La plupart des os apparaissent d'abord sous la forme d'une ébauche cartilagineuse qui s'ossifie ensuite au cours de la croissance. Les os sont majoritairement constitués par du tissu osseux mais ils contiennent également des tissus hématopoïétiques cartilagineux et conjonctifs, des vaisseaux et des nerfs.

L'os est un tissu dynamique, en perpétuel renouvellement sous l'effet des pressions mécaniques des muscles et des sollicitations extérieures, entraînant ainsi le stockage ou la libération de sels minéraux. C'est ce qu'on appelle le phénomène de remodelage. Il y a donc constamment construction de nouveaux tissus et destruction des vieux tissus. C'est un déséquilibre dans ce phénomène de remodelage qui peut entraîner des maladies comme l'ostéoporose.

2. Caractérisation par ultrasons :

a) Contexte clinique :

L'imagerie médicale offre plusieurs outils d'imagerie utilisant soit les rayons X (radio scanner) soit les ondes magnétiques (IRM). Ces outils nous donnent des informations qualitatives (par exemple quantité des tissus anormaux), en nous donnant des informations comme la densité pour les rayons X et la quantité d'eau pour l'IRM. Comme on peut le voir ci-dessous.



Figure 2: Radiographie (gauche) et IRM (droite) d'un fémur atteint d'un fibrome

Un des intérêts majeur des ultrasons est qu'ils permettent d'avoir des informations qualitatives, de déterminer les paramètres élastiques d'un matériau. Les ultrasons présentent également d'autres avantages: c'est une technique non-ionisante et peu onéreuse. Leur intérêt réside dans leur caractère non-destructif (évitant l'endommagement du matériau en cours d'essai) et donc la REPETABILITE des mesures.

b) Principe :

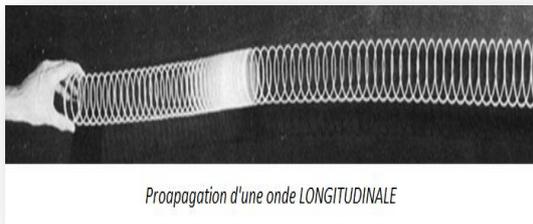
Les ondes acoustiques sont des ondes mécaniques, c'est-à-dire des ondes qui ont besoin de milieux matériels pour se propager contrairement aux ondes lumineuses par exemple.

Dans un solide, les ondes ultrasonores qui peuvent se propager sont de deux types : les ondes longitudinales et les ondes transversales également appelées ondes de compression et ondes de cisaillement.

ONDES LONGITUDINALES

. Quand le milieu le permet, l'onde se déplace par compression de proche en proche du milieu qui l'héberge, formant une onde longitudinale.

. Le lombric se déplace comme une onde longitudinale. La compression se fait dans la même direction que la propagation de l'onde, dans la continuité du mouvement initial.

**ONDES TRANSVERSALES**

. La vague sur la corde correspond à une onde transversale, c'est-à-dire que les mouvements du support se font perpendiculairement à la direction du déplacement de l'onde.

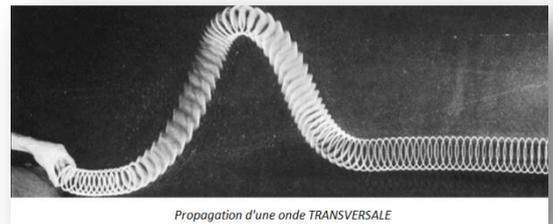


Figure 3: Onde longitudinale et onde transversale

Les vitesses des ondes longitudinales et transversales dépendent du milieu de propagation.

- Importance du mouvement initiateur de l'onde.

Si le milieu le supporte, c'est le mouvement initiateur de l'onde qui déterminera si cette onde est longitudinale ou transversale.

Pour un même support, il est possible d'obtenir une onde transversale ou longitudinale en faisant varier le mouvement initial.

D'après la littérature, on sait que le module d'Young et le coefficient de Poisson d'un matériau sont reliés aux célérités des ondes longitudinales et transversales (C_L et C_T) des ondes ultrasonores se propageant au travers de ce même matériau.

$$C_L = \frac{e_{os}}{\Delta t + \frac{e_{eau}}{C_{eau}}} \quad C_T = \sqrt{\frac{C_L^2(2\nu-1)}{2(\nu-1)}} \quad E = \frac{\rho C_T^2(3C_L^2 - 4C_T^2)}{C_L^2 - C_T^2}$$

C_L : Célérité de l'onde longitudinale ($m.s^{-1}$)

e_i : épaisseur (m)

Δt : Différence de temps de vol (s)

C_{eau} : Célérité de l'onde longitudinale dans l'eau ($m.s^{-1}$)

C_T : Célérité de l'onde transversale ($m.s^{-1}$)

ν : Coefficient de Poisson

E : Module d'Young (Pa)

ρ : masse volumique en $Kg.m^{-3}$

c) Caractérisation non-destructive par ultrasons de l'os bovin :

La première étape dans mon travail a été de réaliser des recherches bibliographiques, d'une part pour comprendre le travail de recherche déjà effectué sur le fonctionnement d'os humain et animal et d'autre part pour connaître les différentes méthodes qui ont déjà été utilisés pour caractériser les os. Mes recherches se sont ensuite concentrées sur les méthodes de caractérisation ultrasonore d'os cortical bovin, ainsi j'ai réalisé une base de données grâce aux valeurs de la littérature qui m'ont servi de référence pour la suite de mon projet.

Les valeurs moyennes de la littérature obtenues grâce à la méthode ultrasonore sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3: Valeurs moyennes de la littérature obtenues par caractérisation ultrasonore de l'os cortical bovin

Directions	Célérités ondes Longitudinales ($m.s^{-1}$)	Coefficient de Poisson	Module d'Young moyen de la littérature (GPa)
Longitudinale	4208	0,34	22,2
Transversale	3680	0,26	20,6
Radiale	3480	0,2575	20,3

Il est essentiel de retenir que l'os est caractérisé par 3 directions longitudinale, radiale et transversale(Figure 4), que chacune de ces directions possède une valeur de célérité et de module d'Young qui lui est propre.

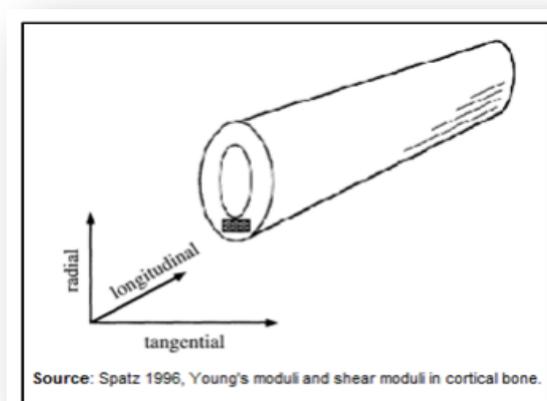


Figure 4 : Directions caractéristiques de l'os

Le projet Malice s'étale sur plusieurs années de recherche .Il est évident que pour un stage durant 11 semaines, le travail effectué constitue une étape parmi beaucoup d'autres dans ce projet. Le rôle du laboratoire de Mécanique et d'Acoustique dans cette étude est de caractériser les propriétés des os enfants grâce aux ultrasons.

Une des questions importantes est de déterminer si la caractérisation ultrasonore des propriétés mécaniques est toujours valable sur des petits échantillons d'os. Pour cela, il m'a fallu faire un travail de bibliographie et d'une part pour me familiariser avec les différentes études déjà menées dans différentes conditions expérimentales et pour comprendre le fonctionnement et la constitution des os chez l'enfant et l'adulte.

Ensuite il y a eu un temps de compréhension des principes mis en jeux et des techniques que je devrai utiliser durant le stage : la structure de l'os, les ondes longitudinales et transversales, la caractérisation ultrasonore et le dispositif d'émission et de réception.

La seconde étape a consisté à cerner les problèmes et les limites du dispositif ultrasonore existant, pour ensuite proposer des solutions pertinentes et enfin réaliser les manipulations sur les os bovins permettant de valider le dispositif ultrasonore et d'exploiter les résultats.

III. Matériels et méthodes :

1. Analyse de l'existant :

a) Préparation des échantillons :

Nos échantillons proviennent d'un fémur bovin venant d'une boucherie, les morceaux d'os provenant de ce fémur sont conservés au congélateur. L'objectif est d'étudier l'os cortical bovin, pour cela on ne garde que la diaphyse de l'os, pour ensuite extraire des échantillons d'os cortical.

C'est à l'hôpital de la Timône à Marseille qu'ont lieu les découpes, car on utilise une disqueuse particulière.

En effet, nous utilisons une disqueuse munie d'une lame en diamant qui tourne à faible vitesse, le tout avec un système de refroidissement dirigé sur le site de découpe, toutes ces particularités permettent de ne pas altérer l'os lors de la découpe (détérioration due à la chaleur de la découpe).

Concernant la méthode de découpe :

Il est essentiel de comprendre qu'un os n'est pas isotrope, c'est-à-dire qu'il ne possède pas les mêmes propriétés mécaniques selon au moins deux directions. Dans le cas de l'os cortical bovin on considère qu'il existe 3 directions possédant des propriétés mécaniques différentes. Cette particularité s'explique par son adaptation à des conditions de sollicitation physiologiques différentes selon les directions.

Par exemple on remarque que dans les os longs de la jambe (tibia et fémur) la direction qui possède un module d'Young plus élevé est celle qui supporte notre poids, cette direction est appelée axe longitudinal.

La découpe des échantillons est délicate, pour plusieurs raisons. Premièrement il faut repérer ces directions pour orienter notre découpe et obtenir des faces perpendiculaires à ces directions, deuxièmement il faudrait obtenir des faces parallèles car les équations page 14, repose sur l'hypothèse de lame à faces parallèles. Concernant cette deuxième difficulté, c'est en optimisant le porte-échantillon de la scie que l'on va pouvoir éventuellement améliorer le parallélisme des faces.

Ce facteur est très déterminant dans notre manipulation, car source de mesures et de résultats moins précis.

De plus nous voulons travailler sur des petits échantillons entre 2 et 10 millimètres de dimension, ce qui rend la découpe des échantillons encore plus difficile.

Nous voulons valider la méthode de caractérisation ultrasonore sur des petits échantillons d'os bovin, car le but de la mise en place de ce dispositif de caractérisation est de pouvoir déterminer les propriétés élastiques sur des os enfant. Or les échantillons d'os enfant qui seront par la suite étudiés, sont des déchets opératoires et sont donc de petites dimensions.

b) Dispositif initial

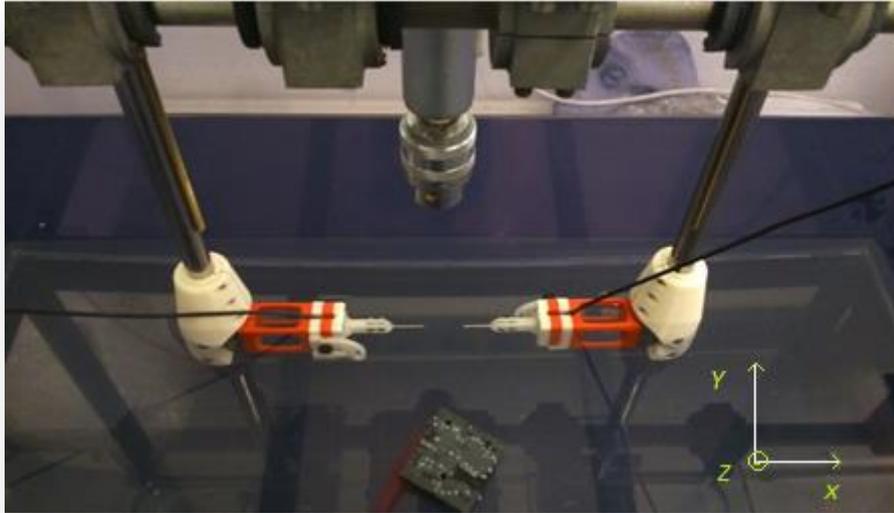


Figure 5 : Dispositif ultrasonore initial

Le dispositif de caractérisation ultrasonore initial représenté ci-contre (Figure 7) est composé de :

- Un émetteur et un récepteur ultrasonore.
- Deux portes pinducers (pièces blanche et rouge): fabriqués par imprimante 3D
- Deux axes sur lesquels sont fixés les porte- pinducers, ces axes peuvent se déplacer selon les axes (x,y,z), grâce à des vis micrométriques
- Une cuve d'eau de 1 m de long ; 50 cm de haut et de large.

Le reste du dispositif comprend :

- Un boîtier Eurosonic UTC 110, qui gère l'émission et l'acquisition des signaux ultrasonores.
- Un ordinateur, avec lequel ; on visualise et enregistre les signaux grâce au logiciel fourni par Eurosonic ,puis on traite les résultats grâce au logiciel Excel.

Cette configuration expérimentale présente plusieurs verrous technologiques, il était essentiel de résoudre certains de ces verrous pour atteindre les objectifs attendus.

c) Verrous technologiques :

• Echantillons :

1- Parallélisme des faces des échantillons.

Il est ardu de déterminer l'orientation des axes étudiés (Radial, Longitudinal et Transversal), et de découper précisément selon ces axes, il faudrait idéalement que l'on obtienne un échantillon parallélépipédique. Le porte échantillon actuel de la disqueuse ne permet pas un contrôle rigoureux du parallélisme des faces des échantillons.

• Dispositif :

2- Choix de l'émetteur et du récepteur ultrasonore.

3- Alignement de l'émetteur et du récepteur : le dispositif permet des réglages assez précis pour aligner les deux pinducers mais cette étape de la manipulation est fastidieuse et prend un certain temps (20 à 30 minutes). De plus, c'est à l'œil que l'on détermine si l'émetteur et le récepteur sont alignés ce qui induit un alignement variable entre plusieurs manipulations.

4- Mesures au contact : Manipulation ne favorisant pas la reproductibilité des mesures (longue, fastidieuse...). En effet dans le dispositif initial il faut coincer l'échantillon entre l'émetteur et le récepteur pour réaliser une mesure au contact et ensuite conserver cette distance pour faire une mesure de la célérité de l'onde longitudinale dans l'eau, très délicat car il faudrait conserver exactement la même distance entre les deux pinducers lors de ces deux mesures pour obtenir les résultats les plus fidèles.

Position de l'échantillon (contact, distance fixe de l'émetteur et du récepteur, ...), il est important de se demander si la position de l'échantillon a un effet sur les mesures car le dispositif ultrasonore montre différents comportements selon les distances entre émetteur et récepteur.

5- Ce dispositif ne donne accès qu'aux célérités des ondes longitudinales, il faut donc estimer les coefficients de Poisson pour déterminer les modules d'Young pour chaque direction caractéristiques des os.

2. Dispositif et protocole proposé :

a) Résolution des verrous technologiques

- 1- Le parallélisme des faces est encore un verrou non résolution, cependant un nouveau porte-échantillon adapté à nos petits échantillons pour la disqueuse est en cours de fabrication
- 2- Emetteur & Récepteur :

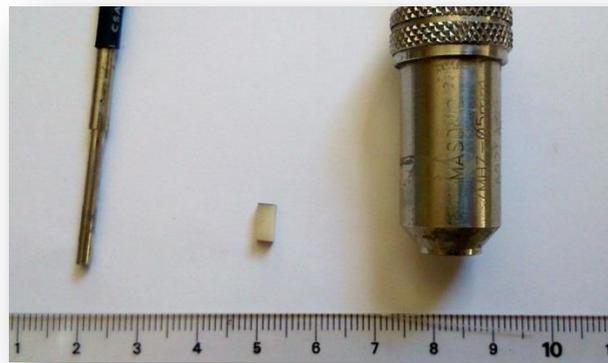


Figure 6 : Pinducer, échantillon et transducteur
échelle en cm

Transducteur :

Un transducteur possède une pastille assez grande par rapport à nos échantillons, plus de sept millimètres de diamètre pour la plus petite membrane parmi les transducteurs disponibles au laboratoire. De plus un transducteur possède une fréquence centrale, c'est à dire qu'il émet dans une bande de fréquence entre 1 et 10 MHz pour les transducteurs disponibles au LMA, mais il va émettre avec plus d'intensité (meilleure amplitude) autour d'une fréquence.

Pinducer :

Les pinducers possèdent une pastille de moins de deux millimètres de diamètre et qui est donc adaptée à nos échantillons. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'utiliser un dispositif utilisant des pinducers en émission et en réception. Il est important de savoir qu'un pinducer n'a pas vraiment de fréquence centrale d'émission. On a observé que lorsque les pinducers sont trop près l'un de l'autre de quelques millimètres les signaux obtenus sont de moins bonne qualité et donc difficile à exploiter, alors que lorsqu'ils sont espacés de quelques centimètres les signaux sont de bien meilleure qualité. C'est pour cette raison que nous avons choisi de conserver une distance fixe entre l'émetteur et le récepteur d'environ 2 centimètres.

3 - Fabrications d'une nouvelle pièce conçue avec l'imprimante 3D assurant l'alignement des pinducers, et le support de l'échantillon, rendant la manipulation 10 fois plus rapide de 25 à 2-3 minutes pour caractériser un échantillon dans les trois directions caractéristique.

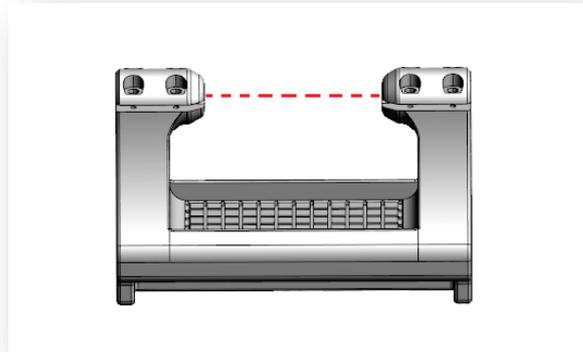


Figure 7: Porte-pinducers / Porte-échantillon

4- Position de l'échantillon : on a réalisé les mesures dans 3 positions (figure 9) pour conclure sur l'influence de la position de l'échantillon.

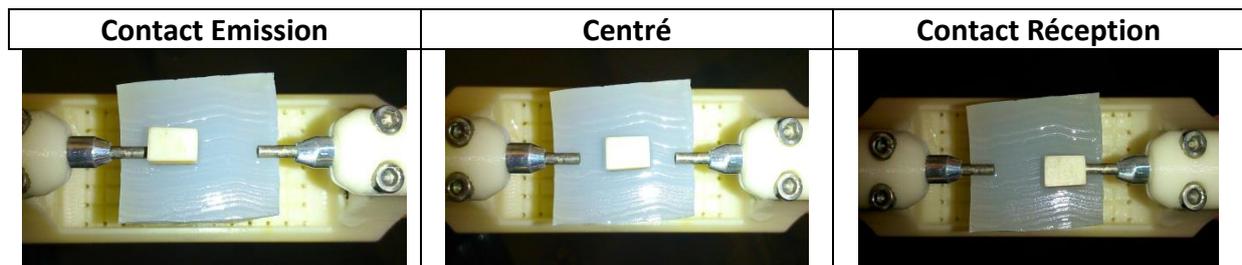


Figure 8: Les trois positions testées

5- Estimation du coefficient de Poisson :

Une des difficultés de ce projet c'est que nous avons accès seulement à la vitesse des ondes longitudinales or il nous faut aussi la vitesse des ondes transversales (ou de cisaillement) pour déterminer le module d'Young. Pour résoudre cette inconnue nous avons construit une méthode d'estimation du coefficient de Poisson .

C'est dans cet objectif que j'ai réalisé des recherches bibliographiques sur la caractérisation ultrasonore des propriétés élastiques de l'os cortical de fémur bovin. Ainsi on obtient :

- 3 articles donnant le module d'Young pour chaque direction de l'os.
- 6 articles donnant uniquement la célérité des ondes longitudinales dans l'os cortical bovin.

→ Ainsi j'ai calculé les modules d'Young moyen pour chaque direction grâce aux valeurs issues des 3 articles comportant cette donnée. Obtenant un module d'Young moyen pour chaque direction.

Ensuite, j'ai calculé la marge d'erreur concernant ces moyennes, et l'écart type pour chaque module d'Young moyen. J'en ai ensuite déduit une plage de tolérance.

E_L moy en GPa	E_R moy en GPa	E_T moy en GPa	Ecart-type L	Ecart-type R	Ecart-type T	Tolérance L	Tolérance R	Tolérance T
22,2	20,6	20,3	2,03E+09	2,45E+09	7,08E+09	9,14%	11,88%	34,86%

Figure 9: Extrait du tableau d'estimation du coefficient de Poisson

→ Puis grâce au 6 articles ayant pour données principales les célérités des ondes longitudinales, j'ai fait varier le rapport de Poisson pour obtenir des modules d'Young estimés (E_{th}), pour qu'ils rentrent dans la marge d'erreur.

Mais pas seulement, j'ai optimisé les coefficients de Poisson de manière à obtenir un seul coefficient de Poisson pour chaque direction osseuse, tout en obtenant des modules d'Young estimé dans les limites imposées par les marges d'erreur.

J'ai pu estimer les coefficients de Poisson en m'appuyant sur les formules suivantes :

$$C_L = \frac{e_{os}}{\Delta t + \frac{e_{eau}}{C_{eau}}} \quad C_T = \sqrt{\frac{C_L^2(2\nu-1)}{2(\nu-1)}} \quad E = \frac{\rho C_T^2(3C_L^2 - 4C_T^2)}{C_L^2 - C_T^2}$$

Pour vérifier que le module d'Young estimé rentre dans les limites imposées par les marges d'erreur j'ai utilisé la formule suivante :

$$\text{Erreur (\%)} = \left\| \left(\frac{\text{Valeur littérature} - \text{Valeur théorique}}{\text{Valeur littérature}} \right) \right\| \times 100$$

Axes	ρ (Kg/m ³)	CL(m/s) litt	CT(m/s) litt	E(GPa) litt	Coeff P litt	CT(m/s) th	Coeff P th	E th (Pa)	Erreur E_{moy} / E_{th} en %
Longitudinal1	2040	4290				2092,03	0,344	2,40E+10	9,00%
Longitudinal2	2060	4247				2071,06	0,344	2,38E+10	7,87%
Longitudinal3	2070	4254				2074,47	0,344	2,39E+10	8,75%
Radial1	2040	3434				1969,27	0,255	1,99E+10	8,01%
Radial2	2060	3449				1977,87	0,255	2,02E+10	6,29%
Radial3	2070	3475				1992,78	0,255	2,06E+10	4,41%
Transversale1	2040	3673				2061,69	0,27	2,20E+10	9,30%
Transversale2	2060	3650				2048,78	0,27	2,20E+10	9,56%
Transversale3	2070	3709				2081,90	0,27	2,28E+10	6,16%

Figure 10: Extrait du tableau d'estimation des coefficients de Poisson

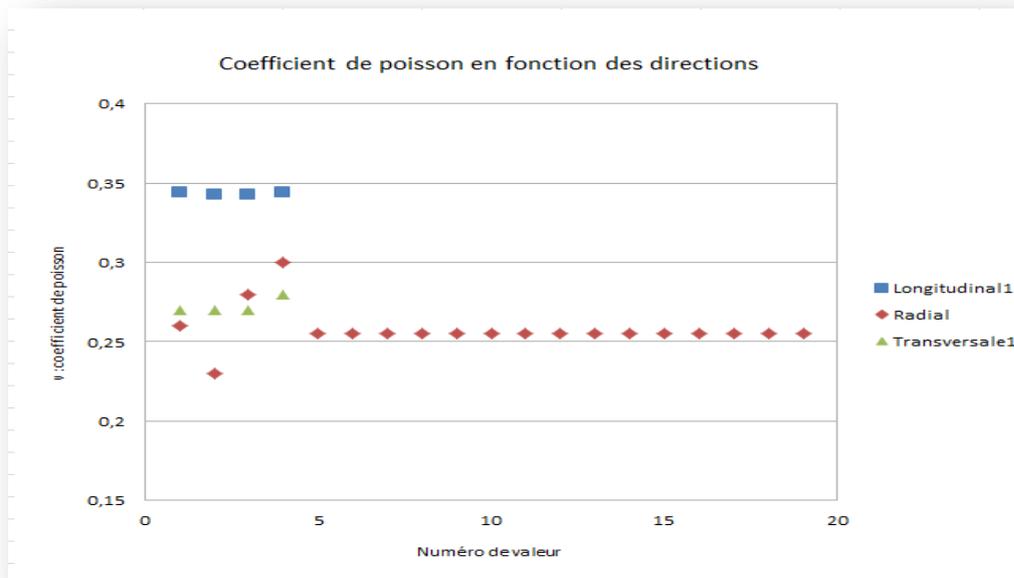


Figure 11 : Graphique résultats des estimations des coefficients de Poisson selon chaque direction

Direction	Célérités ondes Longitudinales ($m.s^{-1}$)	Coefficient de Poisson estimé	Tolérance littérature en %	Erreur moyenne entre E litt et E th en %
Longitudinale	4208	0,344	9,14 %	8,96%
Transversale	3680	0,27	34,86 %	7,3%
Radiale	3480	0,255	11,88 %	6,94%

Tableau 4: Récapitulatif de l'estimation du coefficient de Poisson

b) Matériels

Pour cette expérimentation nous avons découpé 3 échantillons à partir du même os bovin, Les découpes sont réalisées de façon à étudier les propriétés de petits échantillons d'os bovin selon trois axes différents : longitudinal, transversal et radial.

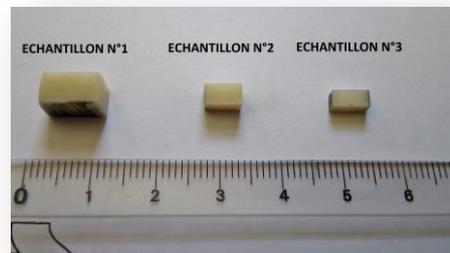


Figure 12: Echantillons étudiés échelle en cm

- Ensuite on mesure les dimensions de l'échantillon grâce à un micromètre. Puis sa masse volumique en g.m^{-3} avec une balance à principe d'Archimède : on commence par peser l'échantillon dans l'air puis on pèse l'échantillon dans l'eau, la balance fait automatiquement le calcul grâce à ces deux mesures.



Figure 8 : Balance à principe d'Archimède et micromètre

- Boîtier EuroSonic :



- . Générateur de signaux
- . Acquisition de signaux
- . Mode disponible : Réflexion/ Transmission

Figure 13: Boîtier UTC 110 EuroSonic

- Plot en agar-agar :



Figure 14 : Agar-agar sous en poudre

L'agar-agar est une algue qui une fois diluée dans l'eau puis chauffée devient solide (sorte de gelée). Nous avons utilisé un plot en agar-agar comme support pour l'échantillon d'os lors de nos mesures. L'agar-agar a des vitesses de propagation d'ondes acoustiques très proches de l'eau ; Nous voulions nous assurer que le support de l'échantillon n'interfèrerait pas nos mesures.

- Thermomètre :

Permet de mesurer la température de l'eau, pour déterminer la célérité des ondes longitudinales dans l'eau grâce à un tableau de valeurs (voir annexe 1).

- Dispositif final :

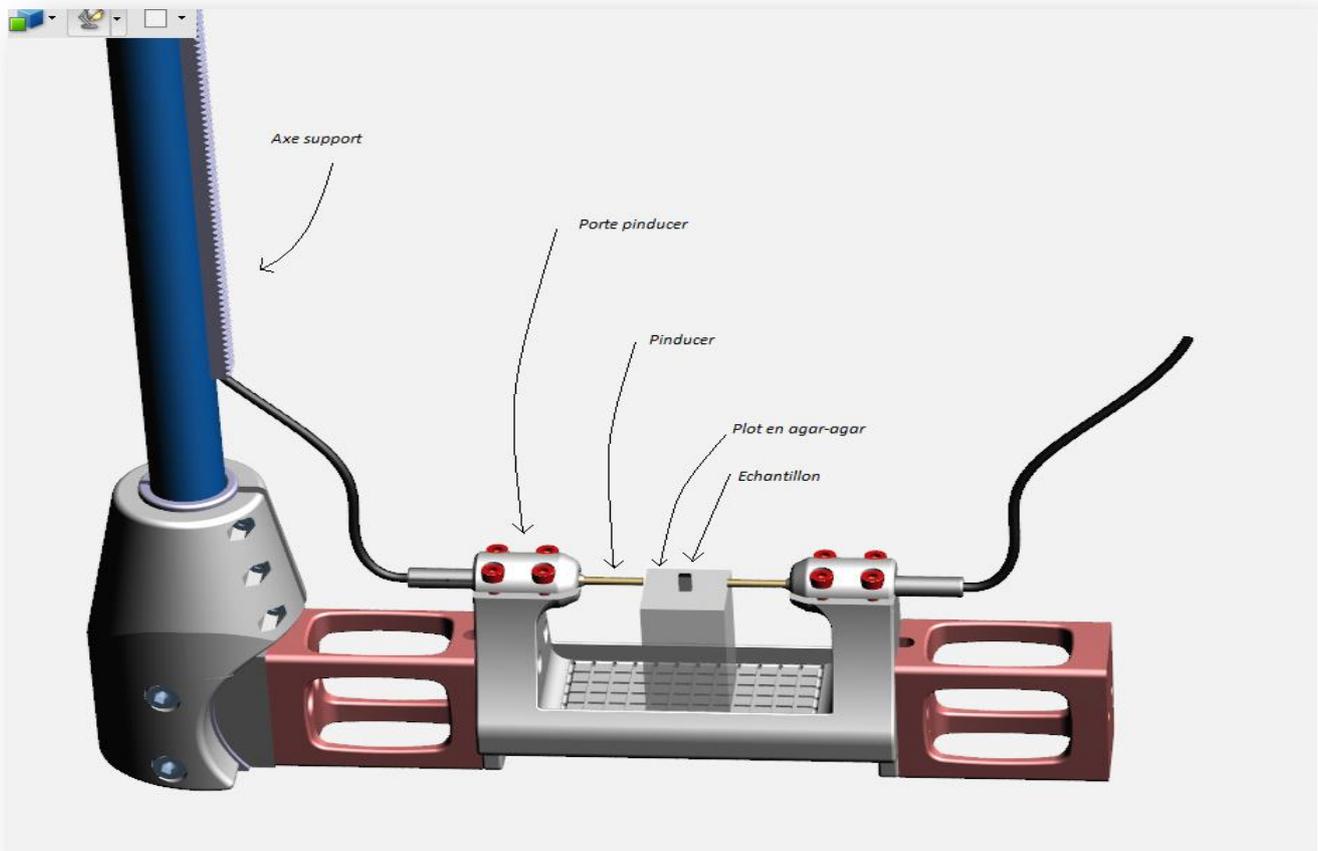


Figure 15 : Dispositif amélioré

c) Acquisitions

La manipulation est maintenant optimisée, grâce à un support de pinducers formé d'une seule pièce ; l'alignement est assuré et une fois que les pinducers sont installés on n'a plus besoin de les repositionner.

On place le plot d'agar-agar qui est lesté car cette gélatine à une densité proche de l'eau et a tendance à flotter.

Remarque : on travaille dans l'eau, pour des raisons d'adaptation d'impédance car la vitesse de l'air est de 345 m/s, l'eau 1480 m/s et entre 3000 et 4200 m/s pour les os bovins.

On allume le dispositif d'émission et d'acquisition relié à l'ordinateur.

On réalise une première acquisition sans échantillon, pour obtenir le front d'onde dans l'eau, on place le curseur sur le premier maximum du signal reçu.

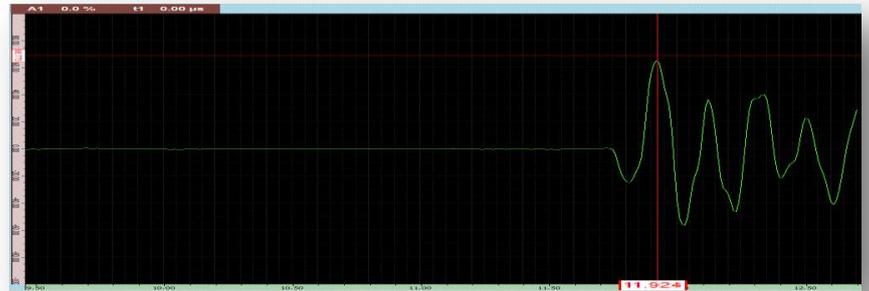
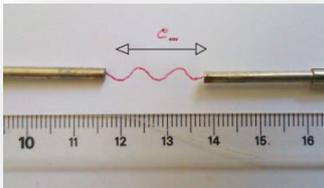


Figure 16: Signal dans l'eau amplitude en (dB) en fonction du temps en (μ s).

Puis on place l'échantillon, entre les deux pinducers. On oriente l'échantillon selon la direction que l'on veut analyser, et de manière à ce que les faces soient le plus parallèle possible par rapport aux surfaces des pinducers,

On réalise une seconde acquisition, on place le deuxième curseur sur le premier maximum du signal reçu.

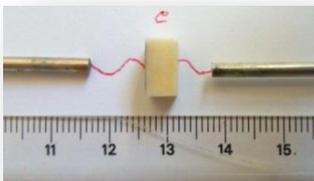


Figure 17: Signal dans l'os amplitude en (dB) en fonction du temps en (μ s).

Il est primordial de conserver la position du premier curseur (référence du temps sans échantillon) pour pouvoir obtenir une différence de temps (Δt) avec le deuxième curseur qui lui va se déplacer pour chaque mesure.

$$C_L = \frac{e_{os}}{\Delta t + \frac{e_{eau}}{C_{eau}}}$$

Ensuite on reporte au fur et à mesure pour chaque mesure les différences de temps d'arrivée du premier maximum, dans un tableau récapitulatif préalablement construit pour calculer directement la vitesse des ondes longitudinales dans l'échantillon (C_L en m.s^{-1}), la vitesse des ondes transversales (C_T en m.s^{-1}) et en déduire le module d'Young (E en GPa) .

Les signaux sont à chaque fois enregistrés grâce à un A-Scan et un B-Scan, qui par la suite peuvent être exploités par le logiciel MatLab à fin de réaliser des analyses de traitement du signal. Lors du stage nous avons changé de boîtier d'acquisition Eurosonic pour un modèle plus récent, l'inconvénient est que les formats des fichiers ont changé donc tous les programmes élaborés sur de précédentes manipulations ne sont plus utilisables, nous sommes donc en attente d'une réponse du constructeur du boîtier Eurosonic pour adapter nos formats de fichier et donc nos programmes. Pour chaque échantillon, la caractérisation est réalisée dans 3 positions différentes : Centré, contact avec le pinducer émetteur et contact avec le pinducer récepteur voir figure .

Au total on a réalisé 162 mesures :

3 Echantillons x 3 Directions x 3 Positions x 6 Mesures = 162 mesures

IV. Résultats & Discussions :

1. Résultats :

POSITION	FACE	EPAISSEUR	DISTANCE	TEMPERATURE	VITESSE EAU (m/s)	Dt (µs)	VITESSE (m/s)	Coeff Poisson	Ct	Module d'Y	ERREUR
C-Emission	Rouge	3,1	20	20,3	1483,26	1,146	3283,93	0,255	1883,21	1,83E+10	11,16%
	Noire	6,21	20	20,3	1483,26	2,638	4009,75	0,344	1955,37	2,11E+10	4,82%
	Blanche	3,65	20	20,3	1483,26	1,478	3713,89	0,27	2084,64	2,27E+10	11,80%
C-Réception	Blanche	3,65	20	20,3	1483,26	1,47	3683,91	0,27	2067,81	2,23E+10	10,00%
	Noire	6,21	20	20,3	1483,26	2,635	4002,00	0,344	1951,59	2,10E+10	5,19%
	Rouge	3,1	20	20,3	1483,26	1,149	3294,40	0,255	1889,21	1,84E+10	10,59%
C-Centré	Rouge	3,1	20	20,3	1483,26	1,148	3290,90	0,255	1887,21	1,84E+10	10,78%
	Noire	6,21	20	20,3	1483,26	2,643	4022,74	0,344	1961,70	2,13E+10	4,20%
	Blanche	3,65	20	20,3	1483,26	1,481	3725,27	0,27	2091,03	2,28E+10	12,48%

Figure 18: Tableau de mesures représentant 1 échantillon pour 1 mesure dans chaque conditions

Tableau 5: Mesures vitesses des ondes longitudinales

Direction	Célérités ondes longitudinales en $m.s^{-1}$	Déviations standard	Déviations standard en %
Longitudinale	3999,5	31,6 m/s	0,79%
Transversale	3637,8	91,5 m/s	1,95%
Radiale	3375,4	65,7 m/s	2,51%

Tableau 6: Résultats et comparatifs des valeurs

Direction	Célérités ondes longitudinales en $m.s^{-1}$	Coefficient de Poisson	Module d'Young expérimental	Module d'Young littérature	Erreur en %	Erreur de référence %
Longitudinale	3999,5	0,344	21,1	22,2	4,99%	9,14%
Transversale	3637,8	0,27	21,7	20,3	6,89%	15%
Radiale	3375,4	0,255	19,3	20,6	6,31%	11,8 %

L'objectif de cette manipulation était de vérifier que la technique de caractérisation ultrasonore des propriétés mécaniques de l'os est valide pour des échantillons de petite taille, tout en vérifiant que les estimations des coefficients de Poisson sont cohérente.

Ces valeurs sont conformes à celles trouvées dans la littérature en ce qui concerne la caractérisation ultrasonore entre 1 et 10 MHz en mode transmission sur des échantillons d'os cortical de fémur bovin. On observe également que la position de l'échantillon n'a pas d'impact sur les résultats, il est donc plus facile de placer l'échantillon en position centré.

Nous pouvons donc estimer que le montage expérimental utilisé est adapté pour la caractérisation non destructive de l'os cortical sur des échantillons osseux de **petites tailles**.

2. Discussion :

Cependant il est évident qu'il faut garder à l'esprit que le parallélisme des faces des échantillons n'est pas encore optimisé, et que l'on peut améliorer la mesure du Δt grâce au traitement des signaux et que l'estimation des coefficients de Poisson reste une estimation. Par la suite il serait intéressant de pouvoir faire une caractérisation sur ces même petits échantillons d'os avec des transducteurs cisaillement pour obtenir la vitesse de propagation des ondes transversales, le coefficient de Poisson correspondant et son module d'Young. Ce qui permettrait d'appuyer davantage la validation de cette technique de caractérisation.

Bibliographie :

- Jae-Young Rho a, Liisa Kuhn-Spearing b, Peter Zioupos c 1997, Mechanical properties and the hierarchical structure of bone.

- Ekaterina Novitskaya a, Po-Yu Chen a, Steve Lee a, Ana Castro-Ceseña b, Gustavo Hirata c,
Vlado A. Lubarda a,d, Joanna McKittrick a,d . 2004 Anisotropy in the compressive mechanical properties of bovine cortical bone and the mineral and protein constituents

- Dynamic mechanical properties of cortical bone:
The effect of mineral content
Ting Wanga, Zude Fenga,b,* 2004

- Determinants of ovine compact bone viscoelastic properties:
effects of architecture, mineralization, and remodeling
C.M. Les,a,* C.A. Spence,a J.L. Vance,a G.T. Christopherson,a B. Patel,a
A.S. Turner,b G.W. Divine,c and D.P. Fyhriea * 2004

- Characterization of the mechanical properties of bovine
cortical bone treated with a novel tissue sterilization process
Nathan Kemper • Noel Davison •
Daniel Fitzpatrick • Rebecca Marshall •
Albert Lin • Katherine Mundy • Ronald R. Cobb
2010

- CONTINUOUS WAVE TECHNIQUE FOR THE
MEASUREMENT OF THE ELASTIC PROPERTIES OF
CORTICAL BONE
R. B. ASHMAN*. S. C. COWIN*. W. C. VAN BUSKIRK * and J. C. RICE

- A CONTINUOUS WAVE TECHNIQUE FOR THE
MEASUREMENT OF THE ELASTIC PROPERTIES OF
CORTICAL BONE
R. B. ASHMAN*. S. C. COWIN*. W. C. VAN BUSKIRK * and J. C. RICE+

- ELASTIC PROPERTIES OF CANCELLOUS BONE:
MEASUREMENT BY AN ULTRASONIC TECHNIQUE
RICHARD B. ASHMAN*, JAMES D. CORIN and CHARLES H. TURNERS

- PROPRIETES MECANIKES ET ACOUSTIQUES
DE L'OS CORTICAL FEMORAL HUMAIN
S. Bensamoun, M.C Ho Ba Tho

- Spatial distribution of acoustic and elastic properties of human
femoral cortical bone

Sabine Bensamouna, Marie-Christine Ho Ba Thoa,*, Son Luua, Jean-Marc Gherbezzab,
Jean-Fran@ois de Bellevalb
2003

An alternative ultrasonic method for measuring the elastic properties
of cortical bone

M. Pithioux*, P. Lasaygues, P. Chabrand

ULTRASONIC WAVE PROPAGATION IN HUMAN
CORTICAL BONE-II. MEASUREMENTS OF ELASTIC
PROPERTIES AND MICROHARDNESS*t
HYO SUB YOON: and J. LAWRENCE KA'IZ



LABORATOIRE DE MECANIQUE ET D'ACOUSTIQUE – MARSEILLE

ORGANIGRAMME 2014

CHARGES DE MISSIONS

Europe : Kergomard J.
 Château Gombert : Raous M.
 Séminaires : Sarrout E.
 Démarche Qualité : Pinhède C., Scotti T.
 Vie du Laboratoire : Fornacciari A., Franceschini E.

GROUPES DE TRAVAIL

Expérimentation : Pachebat M.
 Mécanique/Acoustique : Cochelin B.
 Informatique : Vincendon B.
 Calcul Scientifique : Eyheramendy D.
 Formation : Payan J.
 Gestion-Administration : Bunel A.

Lebon F. (Directeur)
 Favretto-Cristini N. (Directrice Adjointe)

Morano M.M. (AI)
 (Attachée Direction)
 Bouanane J. (AI CDD)
 (Assistante Direction)

Bunel A. (IE)
 (Secr. Générale)

Comité de Direction
 Commission Scientifique
 Commission Château-Gombert
 Conseil de Laboratoire
 Comité Hygiène & Sécurité
 Assistant de Prévention : Rimeymeille A.
 Corresp. Communication : Rimeymeille A.
 Corresp. Formation Permanente : Winninger M.

SERVICES COMMUNS

Equipes de Service
Informatique : Loit L. (I), Pariegua E. (AI, Vincendon B. (IE, Res),
 Morano M.M. (gestion)
Etudes & Réalisations Mécaniques : Long V. (I, AI), Pot O. (AI, Res),
 Morano M.M. (gestion)
Documentation : Rosu E. (AI, AIU), Morano M.M. (gestion)
Communication : Loit L. (I), Rimeymeille A. (AI), Rosu E. (AI, AIU)
Logistique : Rimeymeille A. (AI)
Centres de Ressources
Vibro-Acoustique : Pinhède C. (AI), Laurent M. (gestion)
Mécanique Expérimentale : Mazerolle F. (IE),
 Fornacciari A. (gestion)

Equipe Matériaux et Structures

Responsable: **Ballard P.** (CR)
 Ch./Enst. Ch.
 Bellis C. (CR) Bourgeois S. (MC-ECM) Boussaa D. (CR) Bousaa D. (CR)
 Charles J.P. (P, AI, AIU) *Cochelin B. (P, EC, M) Cocou M. (P, AIU) Cocou M. (P, AIU)
 Débordès O. (P, EC, M) Désoyer Th. (P, EC, M) Eyheramendy D. (P, EC, M) Eyheramendy D. (P, EC, M)
 Hochard C. (P, AIU) Lahellec N. (MC-AIU) Lebon F. (P, AIU) Lebon F. (P, AIU)
 Léger A. Maurel A. (MC-AIU) Michel J.C. (CR) Michel J.C. (CR)
 Montagnier O. (P, AI) Payan J. (P, AIU) Pratt E. (MC-AIU) Pratt E. (MC-AIU)
 Raous M. (P, EC, M) Sarrout E. (MC-ECM) Suquet P. (CR) Suquet P. (CR)
 Tenkes M.H. (CR, AIU)
 I.T.
 Lejeunes S. (IR) Mazerolle F. (IE) Moulinec H. (IR)
 Rosu I. (IR)

Assistante Gestion : Fornacciari A. (AI)

10 Doctorants, 2 Post Doc, 1 Ater, 1 CDD, 1 Ch Associé

Thèmes :

- ✓ Changement d'échelles
- ✓ Contact, frottement, interfaces
- ✓ Couplages multiphysiques
- ✓ Structures

Equipe Sons

Responsable: **Verges Ch.** (CR)

Ch./Enst. Ch.
 Aramaki M. (CR) Bellizzi S. (CR) Bouc R. (P, EC, M)
 Côte R. (MC-AIU) Derrien O. (MC-U, Touben) Gonot A. (MC-AIU)
 Guillemain P. (CR) Habault D. (CR) Herzog Ph. (CR)
 Kergomard J. (CR) Kronland R. (CR) Macheroy O. (CR)
 Maitei P.O. (CR) Maury C. (P, EC, M) Mazzoni D. (MC-ECM)
 Meunier S. (CR) Risset J.C. (P, EC, M) Savet S. (CR)
 Ystad S. (CR)
 I.T.
 Chalton J. (IE) Pachebat M. (IR) Pinhède C. (AI)
 *Rabau G. (IR) Sanchez P. (IR) Scotti Th. (IR)
 Voinier Th. (IR) Winninger M. (IR)

Assistante Gestion : Laurent M. (I, CR)

13 Doctorants, 1 Post Doc, 1 CDD

Thèmes :

- ✓ Environnement et nuisances sonores
- ✓ Perception auditive
- ✓ Sons et musique

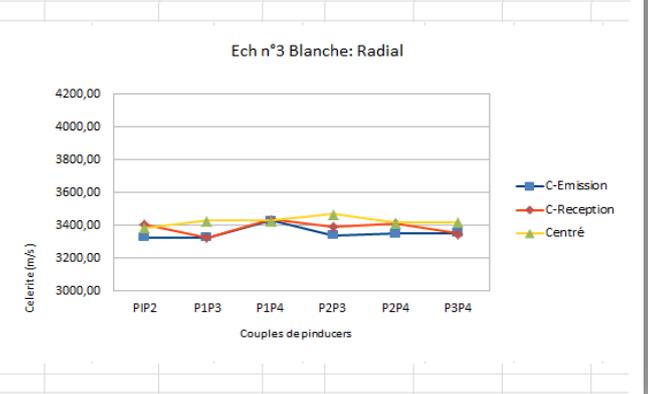
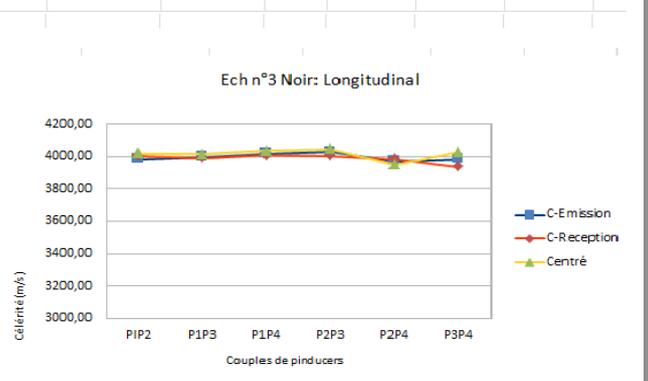
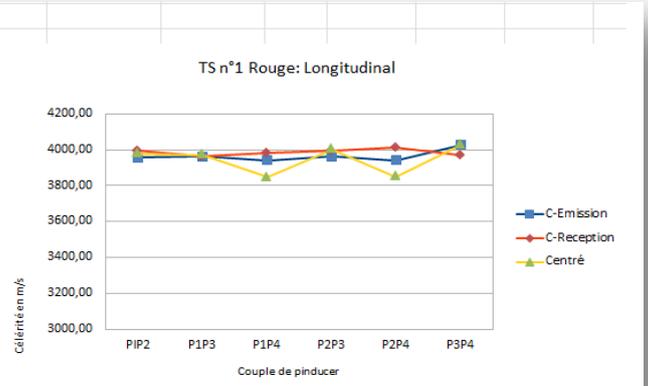
(*) Co-Responsable de l'Equipe

VITESSE DU SON DANS L'EAU PURE

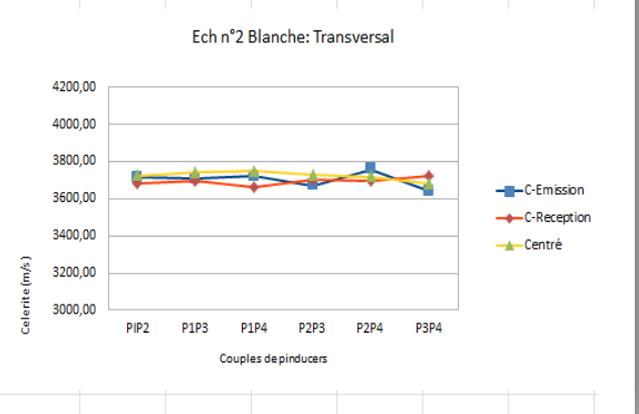
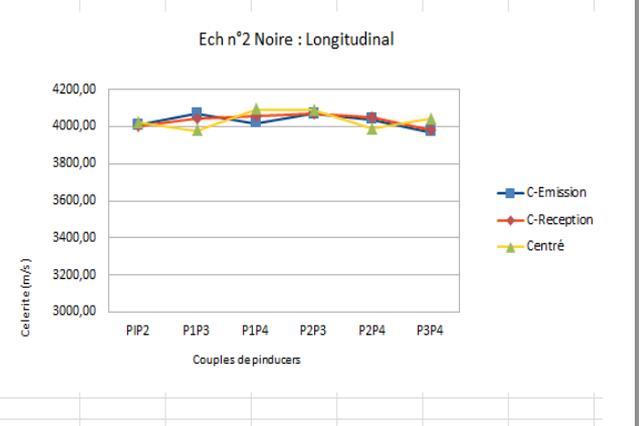
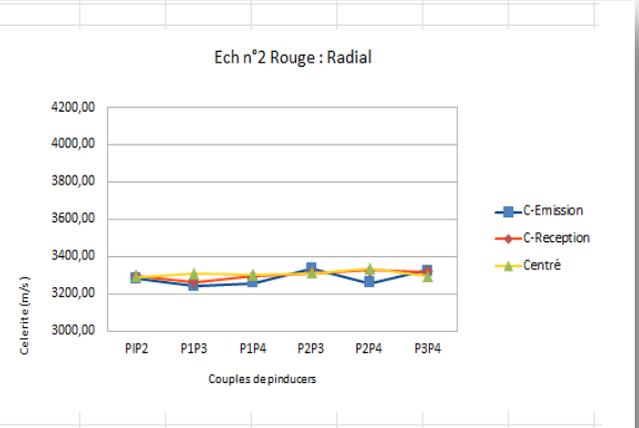
T °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	1447.270	1447.666	1448.062	1448.456	1448.850	1449.243	1449.634	1450.025	1450.415	1450.803
11	1451.191	1451.578	1451.964	1452.349	1452.733	1453.116	1453.498	1453.879	1454.259	1454.638
12	1455.016	1455.394	1455.770	1456.145	1456.520	1456.893	1457.266	1457.637	1458.008	1458.378
13	1458.747	1459.115	1459.482	1459.848	1460.213	1460.577	1460.940	1461.303	1461.664	1462.025
14	1462.384	1462.743	1463.101	1463.458	1463.814	1464.169	1464.523	1464.876	1465.229	1465.580
15	1465.931	1466.280	1466.629	1466.977	1467.324	1467.670	1468.015	1468.359	1468.703	1469.045
16	1469.387	1469.728	1470.067	1470.406	1470.745	1471.082	1471.418	1471.754	1472.088	1472.422
17	1472.755	1473.087	1473.418	1473.748	1474.078	1474.406	1474.734	1475.061	1475.386	1475.712
18	1476.036	1476.359	1476.682	1477.003	1477.324	1477.644	1477.963	1478.282	1478.599	1478.916
19	1479.231	1479.546	1479.860	1480.174	1480.486	1480.798	1481.108	1481.418	1481.727	1482.035
20	1482.343	1482.649	1482.955	1483.260	1483.564	1483.868	1484.170	1484.472	1484.772	1485.073
21	1485.372	1485.670	1485.968	1486.264	1486.560	1486.856	1487.150	1487.443	1487.736	1488.028
22	1488.319	1488.610	1488.899	1489.188	1489.476	1489.763	1490.049	1490.335	1490.620	1490.904
23	1491.187	1491.469	1491.751	1492.032	1492.312	1492.591	1492.870	1493.147	1493.424	1493.700
24	1493.976	1494.250	1494.524	1494.797	1495.070	1495.341	1495.612	1495.882	1496.151	1496.420
25	1496.687	1496.954	1497.220	1497.486	1497.751	1498.014	1498.278	1498.540	1498.802	1499.063
26	1499.323	1499.582	1499.841	1500.099	1500.356	1500.612	1500.868	1501.123	1501.377	1501.630
27	1501.883	1502.135	1502.386	1502.637	1502.887	1503.136	1503.384	1503.632	1503.878	1504.124
28	1504.370	1504.615	1504.858	1505.102	1505.344	1505.586	1505.827	1506.067	1506.307	1506.546
29	1506.784	1507.022	1507.258	1507.494	1507.730	1507.964	1508.198	1508.431	1508.664	1508.896
30	1509.127	1509.357	1509.587	1509.816	1510.044	1510.272	1510.499	1510.725	1510.950	1511.175
31	1511.399	1511.623	1511.845	1512.068	1512.289	1512.510	1512.730	1512.949	1513.167	1513.385
32	1513.603	1513.819	1514.035	1514.250	1514.465	1514.679	1514.892	1515.104	1515.316	1515.527
33	1515.738	1515.948	1516.157	1516.365	1516.573	1516.780	1516.987	1517.193	1517.398	1517.602
34	1517.806	1518.009	1518.212	1518.414	1518.615	1518.815	1519.015	1519.214	1519.413	1519.611
35	1519.808	1520.005	1520.201	1520.396	1520.591	1520.785	1520.978	1521.171	1521.363	1521.554
36	1521.745	1521.935	1522.125	1522.314	1522.502	1522.690	1522.877	1523.063	1523.249	1523.434
37	1523.618	1523.802	1523.985	1524.168	1524.350	1524.531	1524.712	1524.892	1525.071	1525.250
38	1525.428	1525.606	1525.783	1525.959	1526.135	1526.310	1526.484	1526.658	1526.832	1527.004
39	1527.176	1527.348	1527.518	1527.689	1527.858	1528.027	1528.195	1528.363	1528.530	1528.697

Extrait de "Speed of Sound in Pure Water", V. A. Del Grosso and C.W. Mader
 1972 J.A.S.A. V 52 n° 5 2me partie page 1443.

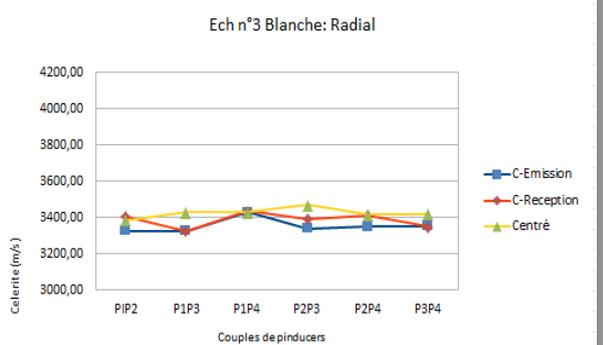
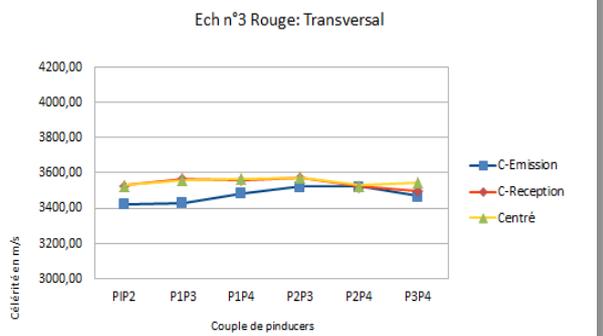
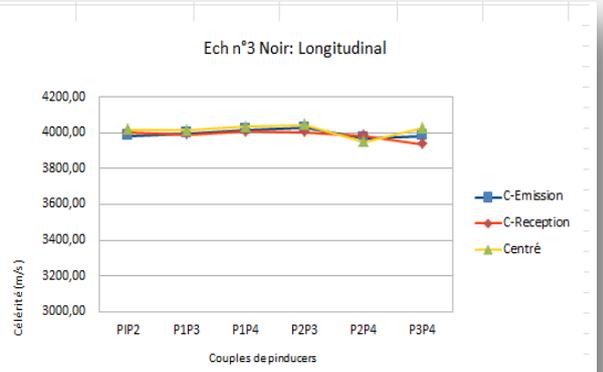
	Positions	Pinducers	C _L (m/s)	v	C _T (m/s)	E _{exp}	Erreur en %
Moyenne Vitesse Rouge	C-Emission	PIP2	3958,53	0,344	1811,97	1,76E+10	20,69%
		P1P3	3961,61				
		P1P4	3942,87				
		P2P3	3963,78				
		P2P4	3942,87				
		P3P4	4027,86				
	Moy ER	3715,70					
	C-Reception	PIP2	3992,90				
		P1P3	3961,61				
		P1P4	3982,26				
		P2P3	3992,90				
		P2P4	4011,65				
		P3P4	3969,04				
	Moy RR	3985,06					
	Centré	PIP2	3979,61				
P1P3		3972,13					
P1P4		3846,50					
P2P3		4003,59					
P2P4		3848,98					
P3P4		4027,86					
Moy CR	3946,44						
Moyenne Vitesse Noire	C-Emission	PIP2	3404,97	0,255	1970,70	1,94E+10	5,60%
		P1P3	3460,19				
		P1P4	3466,49				
		P2P3	3441,16				
		P2P4	3443,44				
		P3P4	3402,73				
	Moy EN	3436,50					
	C-Reception	PIP2	3427,50				
		P1P3	3460,19				
		P1P4	3461,86				
		P2P3	3425,23				
		P2P4	3473,46				
		P3P4	3396,04				
	Moy RN	3440,71					
	Centré	PIP2	3422,97				
P1P3		3450,97					
P1P4		3438,87					
P2P3		3454,93					
P2P4		3438,87					
P3P4		3445,74					
Moy CN	3442,06						
Moyenne Vitesse Blanche	C-Emission	PIP2	3647,10	0,27	2063,85	2,16E+10	6,32%
		P1P3	3656,86				
		P1P4	3775,97				
		P2P3	3695,49				
		P2P4	3655,80				
		P3P4	3629,81				
	Moy EB	3676,84					
	C-Reception	PIP2	3647,10				
		P1P3	3626,55				
		P1P4	3719,43				
		P2P3	3676,28				
		P2P4	3655,80				
		P3P4	3629,81				
	Moy RB	3659,16					
	Centré	PIP2	3716,42				
P1P3		3699,55					
P1P4		3726,97					
P2P3		3725,46					
P2P4		3682,17					
P3P4		3743,67					
Moy CB	3715,70						



Moyenne Vitesse	C-Emission	PIP2	3283,93	1882,62	1,83E+10	11,21%
		P1P3	3241,25			
		P1P4	3256,33			
		P2P3	3333,37			
		P2P4	3256,33			
	P3P4	3326,21				
	Moy ER	3282,90				
	C-Reception	PIP2	3294,40	1892,83	1,85E+10	10,25%
		P1P3	3261,71			
		P1P4	3294,40			
P2P3		3308,46				
P2P4		3326,21				
P3P4	3319,09					
Moy RR	3300,71					
Centré	PIP2	3290,90	1967,36	2,14E+10	3,65%	
	P1P3	3306,95				
	P1P4	3301,42				
	P2P3	3312,00				
	P2P4	3333,37				
P3P4	3294,40					
Moyenne Vitesse Noire	C-Emission	PIP2	4009,75	1964,84	2,13E+10	3,89%
		P1P3	4070,57			
		P1P4	4020,14			
		P2P3	4067,53			
		P2P4	4035,81			
	P3P4	3971,29				
	Moy EN	4029,18				
	C-Reception	PIP2	4002,00	1967,36	2,14E+10	3,65%
		P1P3	4046,70			
		P1P4	4056,90			
P2P3		4067,53				
P2P4		4048,97				
P3P4	3984,03					
Moy RN	4034,36					
Centré	PIP2	4022,74	1968,54	2,14E+10	3,53%	
	P1P3	3979,28				
	P1P4	4091,65				
	P2P3	4088,96				
	P2P4	3991,71				
P3P4	4046,33					
Moy CN	4036,78					
Moyenne Vitesse Blanche	C-Emission	PIP2	3713,89	2078,34	2,26E+10	11,12%
		P1P3	3708,21			
		P1P4	3721,47			
		P2P3	3672,79			
		P2P4	3759,80			
	P3P4	3639,82				
	Moy EB	3702,66				
	C-Reception	PIP2	3683,91	2073,62	2,25E+10	10,62%
		P1P3	3696,94			
		P1P4	3661,73			
P2P3		3702,59				
P2P4		3698,84				
P3P4	3721,47					
Moy RB	3694,25					
Centré	PIP2	3725,27	2091,28	2,28E+10	12,51%	
	P1P3	3746,27				
	P1P4	3752,07				
	P2P3	3729,07				
	P2P4	3717,68				
P3P4	3683,91					
Moy CB	3725,71					



Moyenne Vitesse Noire	C-Emission	PIP2	3981,40	0,344	1948,96	2,14E+10	3,55%
		P1P3	3996,05				
		P1P4	4018,67				
		P2P3	4028,81				
		P2P4	3971,22				
		P3P4	3983,60				
	Moy EN	3996,62					
	C-Reception	PIP2	4003,85				
		P1P3	3988,57				
		P1P4	4006,07				
		P2P3	4001,06				
		P2P4	3983,60				
P3P4		3936,96					
Moy RN	3986,68						
Centré	PIP2	4018,96					
	P1P3	4013,62					
	P1P4	4033,89					
	P2P3	4041,55					
	P2P4	3949,13					
	P3P4	4026,27					
Moy CN	4013,90						
Moyenne Vitesse Rouge	C-Emission	PIP2	3418,67	0,27	1949,81	2,02E+10	0,25%
		P1P3	3425,37				
		P1P4	3482,17				
		P2P3	3524,67				
		P2P4	3524,67				
		P3P4	3466,49				
	Moy ER	3473,67					
	C-Reception	PIP2	3528,33				
		P1P3	3568,23				
		P1P4	3557,24				
		P2P3	3573,75				
		P2P4	3524,67				
P3P4		3497,98					
Moy RR	3541,70						
Centré	PIP2	3528,33					
	P1P3	3567,24					
	P1P4	3568,23					
	P2P3	3573,75					
	P2P4	3530,06					
	P3P4	3546,32					
Moy CR	3550,65						
Moyenne Vitesse Blanche	C-Emission	PIP2	3326,18	0,255	1923,84	1,95E+10	5,43%
		P1P3	3327,72				
		P1P4	3432,94				
		P2P3	3338,68				
		P2P4	3349,72				
		P3P4	3353,41				
	Moy EB	3354,77					
	C-Reception	PIP2	3408,22				
		P1P3	3327,72				
		P1P4	3436,82				
		P2P3	3390,82				
		P2P4	3413,66				
P3P4		3349,72					
Moy RB	3387,82						
Centré	PIP2	3385,45					
	P1P3	3432,94					
	P1P4	3432,94					
	P2P3	3472,14					
	P2P4	3417,50					
	P3P4	3421,34					
Moy CB	3427,05						



ECHANTILLON N°	MASSE VOLUMIQUE en g/m ³	FACE	EPAISSEUR (mm)	POSITION	C _L en m/s	Coefficient de Poisson	C _T en m/s	Module d'YOUNG en GPa
1	1995	ROUGE LONGITUDINALE	5,98	Centré	3946,44	0,344	1924,49	19,9
				Emission	3715,7		1811,97	17,6
				Réception	3985,06		1943,32	20,3
		NOIRE RADIAL	5,18	Centré	3442,06	0,255	1973,89	19,5
				Emission	3436,5		1970,70	19,4
				Réception	3440,71		1973,12	19,5
		BLANCHE TRANSVERSAL	9,19	Centré	3715,7	0,27	2085,66	22
				Emission	3676,84		2063,85	21,6
				Réception	3659,16		2053,92	21,4
2	2056	ROUGE RADIAL	3,1	Centré	3306,5	0,255	1896,15	18,6
				Emission	3282,9		1882,62	18,3
				Réception	3300,71		1892,83	18,5
		NOIRE LONGITUDINALE	6,21	Centré	4036,78	0,344	1968,55	21,4
				Emission	4029,18		1964,84	21,3
				Réception	4034,36		1967,37	21,4
		BLANCHE TRANSVERSAL	3,65	Centré	3725,71	0,27	2091,28	22,8
				Emission	3702,66		2078,34	22,6
				Réception	3694,25		2073,62	22,5
3	2097	ROUGE TRANSVERSALE	2,31	Centré	3550,65	0,27	1993,01	21,2
				Emission	3473,67		1949,80	20,2
				Réception	3541,7		1987,99	21,1
		NOIRE LONGITUDINALE	6,39	Centré	4013,9	0,344	1957,39	21,6
				Emission	3996,62		1948,96	21,4
				Réception	3986,68		1944,11	21,3
		BLANCHE RADIAL	3,04	Centré	3427,05	0,255	1965,28	20,3
				Emission	3354,77		1923,83	19,5
				Réception	3387,82		1942,79	19,9