REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université de Jijel



Faculté des Sciences & de la Technologie

Département d'Électronique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme Master en Electronique

Option

Electronique Et Optoelectronique

Thème

Effet de la pression et de la température sur les vitesses ultrasonores

Encadré par:

Mr: Toufik BENKEDIDAH

Réalisé par:

Mr: Abd allah BOUDAB

Promotion Juin 2014

Remerciement

Avant tout, nous remercions le bon Dieu qui nous a donné la force et le courage pour arriver à ce stade-là.

Notre première pensée va tout naturellement à nôtre encadreur Mr. Benkdidah Toufik qui suit fidèlement notre travail.

Nous tenons à le remercier pour leur encadrement et leur soutien.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants de département d'électronique qu'ils n'ont pas épargné d'efforts pour notre formation on tient à exprimer.

Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

A mes chers parents

A tous mes frères et sœurs

A tous ceux qui me sont chère

Merci, Abd Allah

SOMMAIRE

I

P

ľ

I.4.4.1 Répartition de l'énergie ultrasonore émise	17
I.4.4.2 Atténuation des ondes ultrasonores	17
I.5 Conclusion	19

Chapitre II

L'acoustoélasticité et l'effet de la température

II.1 Introduction	20
II.2 généralité sur les vitesses des ultrasons	20
II.2.1 Etude du comportement des ultrasons dans différents milieux	20
II.2.2 Détermination et mesure des vitesses longitudinales	22
II.2.3 conversion de mode	22
II.2.4 Essai de compression	23
II.2.4.1 Mesure des vitesses par la méthode de contact direct	23
II.2.4.2Mesure des vitesses par immersion	23
II.2.5 Théorie de l'acoustoélasticité	23
II.3 la vitesse d'onde ultrasonore dans l'eau en incidence normale	27
II.3.1 Principe de mesure	27
II.3.2 Correction de l'effet de la température	27
II.3.3 Calcul du temps de vol	28
II.3.3.1 Inter corrélation	29
II.4 Conclusion	29

Chapitre III

Système de mesure

III.1 L'effet de la contrainte en substance solide	30
III.1.1 Exploitation du banc de mesures	30
III.1.1.1 Test par immersion	32
III.1.1.2 Test par contact	32
III.1.2 Mesure du temps de vol d'une impulsion	33
III.1.2.1 Variation du temps de vol en fonction de la contrainte	33
III.1.2.2 variation de la vitesse en fonction de la contrainte	34

III.2 Effet de la température en substance liquide	34
III.2.1 Principe de mesure	35
III.2.2 Mesure du temps de vol d'une impulsion	36
III.3 Conclusion	37

I

Chapitre IV

Résultats et discutions

IV Résultats et discussion	38
IV.1Variation du temps de vol en fonction de la contrainte	38
IV.1.1 Variation de la vitesse en fonction de la contrainte (test par immersion).	39
IV.1.2. Variation de la vitesse en fonction de la contrainte (test par contact)	41
IV.1.3 Application de l'intercorrélation	42
IV.2 interprétations sur l'effet thermique	43
IV.2.1 Décalage du temps de vol en fonction de la température	43
IV.2.2 Variation de la vitesse en fonction de la température	44
IV.2.3 Résultats d'intercorrélation entre échos pour différentes T°	45
IV.4 Conclusion	46
Conclusion générale	47

LISTS DES TABLEAUX

ET DES FIGURE

Liste des figures

Figure 1.1: Propagation et polarisation des ondes longitudinales (a) et transversales (b)	3
Figure I.2: Schéma synoptique de CND	5
Figure I.3: Méthode impulsion-écho	6
Figure I.4: contrôle par contact	6
Figure I.5: Contrôle par immersion	6
Figure 1.6: Onde Longitudinale	10
Figure I.7: Onde transversale	10
Figure I.8:L'onde plane	11
Figure. I.9:L'onde sphérique	11
Figure. I.10: Transducteurs piézoélectriques résonnant à 1.5 MHz, 250 kHz	12
Figure I.11: Principe d'un élément piézoélectrique	13
Figure I.12 : déformation d'un milieu élastique sous l'action d'une force	14
Figure I.13. Transmission entre deux milieux	17
Figure 1.14: Transmission et réflexion d'onde	17
Figure I.15: Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction	18
Figure II.1: La propagation de l'onde ultrasonore à travers deux milieux	21
Figure II.2: suite d'échos due à la réflexion entre deux milieux	21
Figure II.3: phénomènes de réflexion, réfraction et conversion de mode	22
Figure II 4:Dispositif expérimental de mesure des vitesses en fonction de la Température	28
Figure III.1: synoptique du système de mesure par immersion	30
Figure III.2: Synoptique illustrant la technique de prisme	31
Figure III.3: Rapport d'amplitude entre ondes transversales ondes Incidentes (deuxième angle	31
critique)	
Figure .III.4: Conversion de mode par arrangement d'immersion	32
Figure. III.5: Arrangement de transmission directe	33
Figure.III.6: mesure du temps de vol	33
Figure.III.7: synoptique du système de mesure	34
Figure III.8: photographie de montage utilisé	36
Figure III.9: Principe de mesure du temps de vol	37
Figure IV.1 évolution des ondes longitudinales en fonction de la contrainte	40
Figure IV.2 évolution des ondes transversale en fonction de la contrainte (test par immersion)	40
Figure IV.3 évolution des vitesses longitudinales en fonction des contraintes	41

Figure IV.4 évolution des vitesses transversales en fonction des contraintes (test par imm)	41
Figure IV.5 évolution des ondes transversale en fonction de la contrainte (test par contact)	41
Figure. IV.6 variation des vitesses transversales en fonction des contraintes (test par contact)	42
Figure. IV.7 décalage temporel entre échos (à gauche) et leurs intercorrélations (à droite)	43
Figure IV.8 évolution des ondes ultrasonores en fonction de la température (éch1)	44
Figure IV.9 évolution des ondes ultrasonores en fonction de la température (éch2)	44
Figure IV.10 évolution des ondes ultrasonores en fonction de la température (éch3)	44
Figure IV.11 : variation de la vitesse en fonction de la température	45
Figure. IV.12 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) 'Ech1	45
Figure. IV.13 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) 'Ech2	46
Figure. IV.14 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) 'Ech3	46

I

Listes de tableaux

Tableau I.1Classification des sons selon les fréquences	7
Tableau I.2 différences de vitesse de plusieurs substances	7
Tableau I.3 Exemple d'impédances acoustiques	8
Tableau I.4 atténuation dans quelque matériau (onde longitudinal à 2MHz)	19
Tableaux III.1 évolution de la densité d'acide	35
Tableau IV.1 variation du temps de vol en fonction de la contrainte pour lesdeux types de tests	38
Tableau IV.2 variation des vitesses en fonction de la contrainte pour les deux types de tests	39
Tableau IV.3 Variation de la vitesse en fonction de la température	45

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nos jours, les méthodes du contrôle non destructif sont devenues nombreuses. Parmi ces méthodes le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente plusieurs avantages tels que la facilité de mise en œuvre, la possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler, et la capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence de travail. De plus, l'existence de relations entre la propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau permet sa caractérisation. L'utilisation des ultrasons offre donc la possibilité sans aucune détérioration de caractériser des matériaux afin d'en connaître les propriétés élastiques.

Les techniques de mesures dans le domaine du CND ne sont pas universelles malgré ses intérêts. Elles varient d'une application à l'autre selon le besoin. Chaque méthode a des avantages et des inconvénients une fois comparés à d'autres méthodes pour une même application. Ces méthodes ont pour but de détecter les défauts et de caractérises les matériaux.

Les ultrasons, comme les sons, les infrasons, ou les hypersons, sont des vibrations mécaniques, leur propagation ne peut se faire qu'en présence d'un support matériel. Ils sont devenus l'outil privilégié pour le control non destructif qui a pris une place croissante dans le domaine industriel, biologique et médicale et se trouve de plus en plus intégré aux cycles de fabrication (nettoyage, usinage, soudage,...).

L'objectif de notre travail consiste à étudier l'influence de la pression uniaxiale et la température sur les vitesses d'ondes ultrasonores pour deux substances de natures différentes. Un matériau solide homogène et isotrope sera exposé dans ce cas à plusieurs valeurs de contraintes afin de quantifier l'impact résultant. Par contre, trois échantillons liquides de densités différentes subiront un traitement thermique lors d'une deuxième expérience. Le manuscrit s'organise autour de quatre chapitres.

Ainsi, dans le premier chapitre nous traitons du contrôle non destructif et de ces implications sur la propagation des ondes acoustiques. Puis, nous rappelons les principes et lois qui régissent le contrôle non destructif en général. Nous présentons ensuite, les ultrasons en décrivant leurs techniques, ainsi que leurs caractéristiques. La propagation des ondes ultrasonores est ensuite abordée, plus particulièrement les vitesses de propagation et les phénomènes qui les affectent.

Dans une deuxième partie, nous quantifions l'influence des contraintes statiques sur les vitesses ultrasonores en exposons ainsi la théorie de l'acoustoélasticité et ses avantages en régime linéaire. L'effet thermique sur les substances à examiner fera l'objet de la suite de ce chapitre pour enfin terminer avec une méthode d'évaluation du paramètre essentiel de la mesure à savoir le temps de vol d'impulsions ultrasonores fondée sur l'intercorrélation afin de tirer le maximum de la fonction décrivant le décalage temporel entre deux échos successifs.

Le troisième chapitre a été entièrement consacré aux dispositifs expérimentaux qui serviront comme outils de formation de la base de données. L'un des deux bancs de mesure est destiné à l'effet acoustoélastique, et le deuxième nous permettra le suivie de l'évolution des vitesses en fonction de la température.

Finalement, le dernier chapitre dévoile les résultats ainsi obtenus accompagnés des discussions et interprétations pour l'ensemble des cas traités. Enfin, nous terminons par une conclusion générale et quelques recommandations pour des travaux futurs.

2

CHAPITRE I

Contrôle non destructif et les ultrasons

I.1 Introduction

Les ultrasons sont des vibrations élastiques, de fréquence comprise entre 20 kHz et quelques centaines de Mégahertz, qui se propagent dans des milieux fluides ou solides. L'onde ultrasonore subit plusieurs phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'interférence. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde, c'est-à-dire la distance parcourue par l'onde pendant une période. Une onde ultrasonore se propageant dans un milieu déterminé peut aussi être caractérisée d'une part par sa célérité, d'autre part par la perte d'énergie qu'elle subit par unité de longueur de milieu traversé, c'est-à-dire par un coefficient d'absorption [1].

Les ondes ultrasonores les plus couramment utilisées pour la caractérisation et le contrôle sont les ondes longitudinales (de compression) et les ondes transversales (ou de cisaillement). Selon le sens de vibrations des particules (leur polarisation) formants les ondes ultrasonores, nous distinguons les deux types d'ondes citées auparavant (figure I.1) [2].



Figure 1.1 Propagation et polarisation des ondes longitudinales (a) et transversales (b)

I.2 Historique

La découverte en 1880, de la piézo-électricité, par les frères Pierre et Jacques Curie, permis après 1883 de produire facilement des ultrasons et de les utiliser. Paul Langevin en 1915, mit au point la détection des sous-marins au moyen des ultrasons, ouvrant ainsi un champ d'applications à ces vibrations non audibles, il utilisa des ultrasons plus directifs dans l'eau générés par de quartz piézo-électriques. Pierre Curie avait en effet découvert que ce quartz vibre en émettant des ultrasons quand ils sont soumis à un champ électromagnétique [3].

I.3 Contrôle Non Destructif

Les techniques de fabrication des matériaux ainsi que la qualité exigée, montrent l'importance du contrôle non destructif en milieu industriel. Le contrôle par ultrasons est l'un des procédés les plus utilisés en contrôle non destructif à l'heure actuelle, glâce à son innocuité et à ses qualités intrinsèques.

Les principales méthodes CND, relèvent de la détection, de l'estimation, de la classification, de la reconnaissance des formes, de la résolution des problèmes inverses, de la reconstruction d'images et de la fusion des données. De nos jours, le CND trouve son utilité dans une variété de domaines industriels [4].

On peut dire que l'objectif principal des essais non destructifs, est la détection des défauts (inhomogénéité) dans les matériaux par des techniques qui n'endommagent pas le produit contrôlé.

I.3.1 Principe général du contrôle non destructif

Peut importe la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure I.17.

Quelle que soit la nature de la cible (pièce à tester) magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres, que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité.



Figure I.2 Schéma synoptique de CND

Le système de contrôle non destructif, illustré dans la figure précédente, représente l'une des méthodes de CND (ces méthodes seront détaillées par la suite) ressuage, ultrasons, contrôle par courant de Foucault, ...etc. Elle est utilisée pour déterminer l'état de la cible. Le système d'adaptation et de récupération de l'information est un système d'acquisition, dont le rôle est de concrétiser les résultats du contrôle. Les moyens utilisés dans l'étape d'acquisition, se différent suivant le type de procédé, on peut trouver une impédance mètre, un microscope, un micro-ordinateur [5].

I.3.2 Les méthodes du contrôle non destructif

Il existe plusieurs méthodes de contrôle non destructif telles que l'impulsion Écho, l'impact Écho, la transmission directe et la plaque tournante.

I.3.2.1 La méthode de pulse écho

C'est la méthode la plus classique de la détection des défauts par les ondes ultrasonores. Elle consiste à détecter un écho provoqué par la réflexion de l'onde sur une interface crée par un défaut. Dans cette méthode on utilise un transducteur placé perpendiculairement à la surface du matériau à tester qui convertie l'énergie acoustique en énergie électrique et inversement. La détection faite par un appareil se compose d'un émetteur et d'un récepteur à ultrason et un oscilloscope pour afficher les résultats. Le traducteur émet et reçoit des ondes ultrasonores qui se réfléchissent soit sur le fond de la pièce, soit sur un défaut [6].



Figure I.3 Méthode impulsion écho

Selon le couplage de traducteur avec l'élément sous test, on distingue deux types de contrôle.

I.3.2.2 Contrôle par contact :

C'est le contrôle ou le capteur est appliqué directement sur l'élément sous test, par l'intermédiaire d'un couplant.



Figure I.4 contrôle par contact

I.3.2.3 Contrôle par immersion

Dans le contrôle par immersion le couplage est obtenu en immergeant localement ou totalement l'élément contrôlé dans un liquide (figure I.5).



Figure I.5 Contrôle par immersion

I.4 les ultrasons

I.4.1 Paramètres de l'onde ultrasonore

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser l'onde ultrasonore dans un milieu donné, tel que la célérité et l'impédance acoustique, la fréquence et la longueur d'onde, la pression et l'intensité de l'onde.

Le terme ultrasons vient de ce que la fréquence des ondes ultrasonores est située audelà la gamme audible, c'est à dire au-delà de 20KHz jus qu'a 1GHz, ce qui les différenciés des sons qui sont également des ondes acoustiques.

Infrasons Sons		Ultrasons	Hyper sons	
0 a20Hz	20Hz a 20 KHz	20kHz a 1GHz	1GHz	

Tableau I.1 Classification des sons selon les fréquences

On définit la longueur d'onde λ comme la distance suivant la direction de propagation entre deux points consécutifs du milieu qui vibrent en phase. Ces caractéristiques permettent de déterminer la vitesse de propagation (v) dans le milieu :

 $v = \lambda \times f$

(I.1)

I.4.1.1 Célérité et impédance acoustique

La célérité de l'onde acoustique est la vitesse de propagation de la vibration de pression dans le milieu traversé. Elle n'est pas la même pour les ondes longitudinales que les ondes transversales.

Milieu	VL [m/s](ondes longitudinales)	v _T [m /s](ondes transversales)		
Air	340	-		
Eau	1480	-		
Aluminium	6300	3080		
Fer et aciers	5900	3220		
Laiton	4400	2120		
Béton	3100	-		
Verre	5300	-		
Glace	3200	-		
Christallier	1620	-		

Tableau I.2 différences de vitesse de plusieurs substances

Dans les solides, La vitesse des ondes transversales est approximativement la moitié de celle des ondes longitudinales. Le tableau ci-dessus donne quelques valeurs. Notons les grandes différences entre les gazes, les liquides et les solides.

Le son se propage à travers les matériaux sous l'influence de la pression acoustique, parce que les molécules où les atomes d'un milieu élastique sont liées les unes aux autres. L'impédance acoustique (=) d'un matériau est définie comme étant le produit de sa masse volumique (ρ) par la vitesse du son dans ce matériau (C) [7].

Le tableau suivant présente les impédances acoustiques de quelques milieux.

Matériau	Impédance acoustique (kg/m²/s)				
Aluminium	1.5×10^{7}				
Eau	$1.5 imes 10^{6}$				
Air	430				

Tableau I.3 Exemple d'impédances acoustiques

 \mathbf{C} : la célérité (m/s).

 ρ : Masse volumique (kg/m^3) .

Z: L'impédance acoustique $(kg/m^2/s)$.

Aussi l'impédance acoustique dépend de la masse volumique et la compressibilité du milieu, c'est-à-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation:

$$Z = \sqrt{\frac{\rho}{x}}$$
(1.2)

Avec : x est la compressibilité du milieu.

Donc, l'impédance acoustique permet :

• La détermination de la transmission et de la réflexion acoustique à la limite de deux matériaux ayant des impédances acoustiques différentes.

La conception de transducteurs à ultrasons évaluer l'absorption du son dans un milieu

I.4.1.2 Pression et intensité

En chaque point, la pression acoustique (P) varie selon la fréquence de I 'onde ultrasonore. L'énergie délivrée au milieu dépend de ces variations de pression, qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires. On appelle intensité ultrasonore I, l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface pendant l'unité de temps [8]. Elle est reliée à la pression acoustique par la Relation:

$$I = \frac{P^2}{2C\rho} \tag{1.2}$$

P = pression acoustique, ρ : masse volumique et C: célérité.

Les différences d'intensité s'expriment en décibels les deux ondes ultrasonores ont des intensités absolues I1 et I2, on dit que la différence de leurs niveaux d'intensité est :

$$Db = 10 \log(\frac{I_1}{I_2})$$
(I.3)

La distance séparant à un instant donné deux points du trajet de l'onde où la pression est la même (tout en variant dans le même sens), correspond à la longueur d'onde λ .

I.4.2 Modes de propagation

I.4.2.1 Ondes Longitudinales et transversales

Les deux modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou ondes de dilatation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement [6].

Dans les milieux élastiques, les vitesses des ondes transversales et longitudinales sont liées aux caractéristiques mécaniques du matériau, par exemple le module d'Young e et le coefficient de poisson σ [4].

$$VL = \sqrt{\frac{e(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$
(I.4)

$$VT = \sqrt{\frac{e}{2\rho(1+\sigma)}}$$
(I.5)

a- Ondes Longitudinales (de compression)

Pour les ondes longitudinales ou de compression, le déplacement des particules se fait par dilatations et compressions successives parallèlement à la direction de propagation de l'onde.



Figure 1.6 Onde Longitudinale



b- Ondes transversales (de cisaillement)

Une onde est transversale ou de cisaillement lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.



Figure 1.7 Onde transversale

Dans les milieux solides, il se forme en plus une vibration transversale (déplacements de cisaillement) perpendiculairement à l'axe de propagation des ultrasons.

I.4.2.2 Ondes Progressives et stationnaires

Une onde progressive résulte de la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel sans transport de matière, mais avec transport d'énergie comme les ondes à la surface de l'eau, les ondes sonores, ou les ondes électromagnétiques. On appelle onde stationnaire le phénomène vibratoire résultant de la superposition de deux ondes progressives sinusoïdales de même fréquence se propageant en sens contraire. Par exemple, la superposition d'une onde incidente et de son onde réfléchie sur un obstacle fixe [4].

Au lieu de voir une onde qui se propage, on constate une vibration stationnaire mais d'intensité différente, en chaque point observé. Les points fixes caractéristiques sont appelés des Nœuds de vibration. Le nombre des ventres dépend directement du nombre des nœuds.

I.4.2.3 Ondes planes et ondes sphériques

L'onde ultrasonore est caractérisée par sa propagation dans le milieu. On utilise la notion de surface d'onde, qui est la surface constituée par l'ensemble de toutes les particules qui sont dans le même état vibratoire (en phase). Les ondes planes se propagent suivant une direction unique et les surfaces d'ondes forment des plans parallèles entre eux. Une onde plane est donc générée par une surface plane vibrante de dimension importante.



Figure I.8 L'onde plane

Les ondes sphériques se propagent suivant toutes les directions de l'espace et les surfaces d'ondes sont alors des sphères. Une onde sphérique est générée par un point ou une sphère dont la surface vibre uniformément. L'amplitude de vibration d'une onde sphérique décroît en fonction de sa distance par rapport à la source [9].



Figure. I.9 L'onde sphérique

I.4.3 Génération des ultrasons

Il y a deux voies pour générer des ultrasons dans les pièces à contrôler:

• Les méthodes avec contact, utilisant un transducteur électroacoustique, générateur de vibrations mécaniques, qui seront transmises à la pièce par couplage acoustique.

• les méthodes dites sans contact, pour lesquelles la génération des ultrasons se fait à la surface de la pièce elle-même, par tout moyen susceptible d'activer les particules du milieu considéré.

Dans ce dernier cas, on utilise les propriétés des matériaux piézoélectriques pour convertir l'énergie éclectique en une énergie mécanique ultrasonore.

I.4.3.1 Le Transducteur

Un transducteur est un appareil produisant des ultrasons et communément appelé traducteur ou convertisseur d'ultrasons. La technologie des transducteurs peut être basée sur des générateurs pneumatiques (sifflets, sirène,...), électrodynamiques (haut-parleur) ou électriques. Dans ce dernier cas (qui est le cadre de notre travail), on utilise les propriétés des matériaux piézoélectriques pour convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique ultrasonore. En général, un transducteur est un élément qui transforme une forme d'énergie en une autre [10].



Figure. I.10 Transducteurs piézoélectriques résonnant à 1.5 MHz, 250 kHz.

I.4.3.2 Effet piézoélectrique

Dans certains cas, la loi de Hooke ne permet pas de décrire complètement la réponse d'un solide sous l'effet d'une contrainte. Certains matériaux se polarisent électriquement quand ils sont soumis à une contrainte mécanique, c'est l'effet piézoélectrique, qui a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

Les matériaux les plus utilisés actuellement sont les matériaux piézoélectriques. Ces derniers ont l'avantage par rapport aux autres de présenter de bonnes performances et d'être disponibles dans diverses géométries. Ces matériaux se présentent le plus souvent sous la forme d'un disque sur les faces duquel sont déposées deux électrodes métalliques. Lorsqu'une tension électrique est appliquée sur ces deux électrodes, le matériau se dilate ou se comprime selon l'orientation de la tension par rapport à la polarisation de la céramique [10].



Figure 1.11: Principe d'un élément piézoélectrique

En appliquant un courant alternatif sur un cristal piézoélectrique, ce dernier se comprime et se décomprime alternativement et émet donc un son. Dans une sonde d'échographie, l'excitation de cristal piézoélectrique est réalisée par une impulsion électrique, à la manière d'une cloche que l'on frappe. Le cristal entre alors en résonance et émet des ultrasons dont la fréquence dépend de l'épaisseur du cristal. La fréquence est d'autant plus élevée que le cristal est plus mince [10].

On accroît considérablement l'effet piézoélectrique vibratoire en excitant le cristal sur un mode de résonance mécanique. Cela revient à utiliser une lame piézoélectrique d'épaisseur *Ep*:

$$f = \frac{V}{2E_p} \tag{I.6}$$

I.4.4 Propagation des ondes

I.4.4.1 Définition

On appelle une onde tout phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière mais avec transport d'énergie, à une vitesse qui dépend des propriétés élastiques du milieu. Les perturbations et les milieux peuvent être différents:

• Onde électromagnétique: le milieu est la matière ou le vide, La perturbation correspond à une variation du champ électromagnétique, la cause de cette perturbation étant due à I 'accélération des charges électriques (la lumière, les ondes radio, micro-ondes,... etc.).

• Onde ultrasonore: le milieu est un solide, liquide ou gaz, la perturbation est une variation de pression.

• Onde ultrasonore: le milieu est un solide, liquide ou gaz, la perturbation est une variation de pression.

I.4.4.2 Propagation des ondes ultrasonores

Tout corps (gaz, liquide, solide) possède une certaine élasticité, c'est-à-dire qu'il peut se déformer sous l'action d'une force et reprendre sa forme lorsque la force disparaît. Un milieu élastique peut être schématisé sous la forme d'un ensemble de particules élémentaires, réparties régulièrement dans l'espace, reliées entre elles par des ressorts assurant leurs cohésions. Chaque particule oscille et transmet de proche en proche son mouvement vibratoire à ses voisines dans tout le milieu est la propagation de l'onde sonore.



Figure 1.12 déformation d'un milieu élastique sous l'action d'une force

On peut classer les ondes selon leur propagation en deux catégories:

- Propagation dans l'espace libre (vide, air, milieu massif...etc.).
- Propagation guidée (l'onde optique, guide d'onde,... etc.) [9].

I.4.4.3 Lois de propagation d'une onde ultrasonore

Une déformation produite en un point d'un milieu élastique, homogène et isotrope, se transmet de proche en proche dans ce milieu à une vitesse finie. Ce mouvement ondulatoire est régi par une équation aux dérivées partielles, qui s'écrit dans le cas d'une onde plane U:

$$\nabla^2 \, \vec{U} = \frac{\partial^2 \, \vec{U}}{\partial t^2} \tag{I.7}$$

 \overline{U} Décrit à la fois l'amplitude de l'onde, et sa polarisation (par son caractère Vectoriel). C'est assimilable à la vitesse de propagation de l'onde, comme nous le verrons plus bas. Si on s'intéresse à se qui se passe pour chacune des composantes \hat{U} nous obtenons une équation, appelée équation d'Alembert:

$$\nabla^2 U = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$
(I.8)

Par exemple, si on s'intéresse à la propagation selon la seule direction x, il vient que:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$
(I.9)

Pour une onde plane, la solution générale de cette équation est la somme de deux fonctions:

$$U(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$
 (I.10)

Le premier terme décrit une onde qui se propage vers les x croissants, et le deuxième terme vers les x décroissants.

I.4.4.3.1 Vitesse de propagation

Il est intéressant de voir qu'en réalité, l'onde U(x, t) ne dépend pas simplement de x et de t, mais des quantités x-ct et x+ct. Pour comprendre ce que cela signifie, considérons le cas d'une onde plane progressive vers les x croissants:

$$U(z,t) = f(x - ct)$$
 (1.11)

Regardons la structure de l'onde au point x + Ax:

$$U(x + \Delta x, t) = f(x + \Delta x - ct) = f\left(x - c\left(t - \frac{\Delta x}{c}\right)\right)$$
(I.12)

L'expression ci-dessus nous montre que la structure de l'onde au point $x + \Delta x$ est la même Qu'au point x â l'instant t + Δt , avec $\Delta t = \Delta x/V$ Ce raisonnement nous permet de comprendre pourquoi une dépendance en (x -+ ct) de l'onde signifie que celle-ci se déplace sans déformation, C'est-à-dire, qu'il s'agit d'une onde progressive. Nous pouvons alors définir la vitesse de propagation fondée par [9]:

$$\Delta \mathbf{x} / \Delta \mathbf{t} = \mathbf{V} \tag{I.13}$$

I.4.3.2 Propagation dans un milieu liquide

Un liquide est un milieu isotrope et homogène, c'est-à-dire, que toutes ses propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions (toutes les directions sont donc équivalentes). Nous allons ici considérer des liquides parfaits, c'est-à-dire il n'existe aucune contrainte de cisaillement. L'absence de cisaillement fait que dans un fluide parfait on ne peut propager que des ondes longitudinales, et aucune onde transversale.

L'équation différentielle de propagation de l'onde acoustique est donnée par:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} = \rho x \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$
(I.14)

L'onde solution de cette équation se propage à la vitesse V= $\frac{1}{\sqrt{\rho x}}$ appelée aussi vitesse de phase ou célérité.

I.4.4 Phénomènes affectant la propagation des ondes

Lorsque le faisceau ultrasonore rencontre une interface, une partie de l'énergie incidente est transmise (elle traverse l'interface) tandis que l'autre partie est réfléchie. Les directions de la transmission et de la réflexion seront fonction de l'angle d'incidence de l'onde sonore. Si l'incidence est directe (perpendiculaire à l'interface), la transmission se fait dans la même direction et le même sens que l'onde sonore, tandis que la réflexion se fait dans la même direction et dans le sens inverse. Si l'incidence n'est pas perpendiculaire à l'interface, l'onde transmise subit une déviation avec un angle qui dépend de la vitesse de propagation des deux milieux concernés, il s'agit du phénomène de réfraction. L'onde réfléchie est également déviée d'un angle égal à celui de l'onde incidence par rapport à l'interface [4].

La propagation des énergies transmises et réfléchies ainsi que l'angle de réfraction est fonction de la différence d'impédance entre les deux milieux. Plus La différence d'impédance sera importante, plus la réflexion sera élevée.

Il existe également un phénomène de diffusion lorsque la taille de l'interface est inferieure à la longueur d'onde de l'ultrason. La diffusion est l'envoi de l'onde incidence dans toutes directions de l'espace. Il existe enfin un phénomène d'absorption de l'énergie par les milieux traversés, qui transforment l'énergie acoustique en énergie calorique [6].



Figure I.13 Transmission entre deux milieux

I.4.4.1 Répartition de l'énergie ultrasonore émise

Suivant l'angle d'incidence de l'onde, on peut distinguer deux cas à savoir, l'incidence normale et l'incidence oblique [7]. Dans le cas d'incidence normale (directe), il y'a deux phénomènes qui agissent sur l'atténuation de leur énergie, la réflexion et la réfraction.



Figure 1.14 Transmission et réflexion d'onde

I.4.4.2 Atténuation des ondes ultrasonores

Au fur et à mesure qu'une onde traverse un milieu, son intensité diminue en fonction de la distance traversée. Ce phénomène de perte d'intensité est appelé atténuation de l'onde ultrasonore. Plusieurs facteurs contribuent à l'atténuation des ondes ultrasonores dont on cite:

La déviation du faisceau parallèle et donc la diminution de l'énergie par unité de surface (réflexion).

La propagation de l'onde suivant des modes autres que le longitudinal (transversal, normal, ondes de surface ...etc.) et l'absorption ou conversion de l'énergie ultrasonore en chaleur. Pour une onde plane et pour un milieu homogène, la décroissance progressive de l'intensité de l'onde en fonction de la distance parcourue est donnée par l'équation (lois de Lambert):

$$I_{\alpha c} = I_{\alpha c0} e^{-\mu d} \tag{I.15}$$

Où $I_{\alpha c0}$ est l'intensité initiale, μ est le coefficient d'atténuation, (m^{-1}) et d la distance ou l'épaisseur traversée (m).

On observe cette perte d'énergie en enregistrant les échos successifs par une mesure en écho. L'enveloppe d'une séquence d'échos de fond de la pièce, présente alors une décroissance exponentielle de l'amplitude de la forme $e^{(-\mu d)}$:

$$A = A_0 e^{(-\mu d)} \tag{I.16}$$

Avec: A_0 est l'amplitude initiale.



Figure I.15 : Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction

Où la pression acoustique et l'intensité sont liées par la relation suivante:

$$I_{\alpha c} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z}$$
(I.17)

La pression acoustique diminue avec la distance : $p = p_0 exp(-\mu d)$. L'atténuation s'exprime par le rapport p/p_0 .

Le coefficient d'atténuation est la somme de deux termes : $\mu = \mu_{\alpha tt} = \mu_{\alpha bs} + \mu_{dif}$

 $\mu_{\alpha bs}$ Coefficient d'absorption proportionnel à la fréquence.

 μ_{dif} Coefficient de diffusion qui dépend de l'anisotropie et de la structure du matériau. Le tableau ci-dessous donne un ordre de grandeur des coefficients d'atténuation dans quelques matériaux, pour des ondes longitudinales à 2 Mhz [11].

Matériau	Acier	Aluminium	Fonte	Eau	Laiton	Plexiglas
$\mu_{(dB/m)}$	5-50	1-5	20-200	1	50-200	500

 Tableau 1.4 atténuation dans quelque matériau (onde longitudinal à 2MHz)

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé quelques notions sur les contrôles non destructifs, leur principe et leurs techniques, et plus particulièrement les méthodes ultrasonores dont on a évoqué leurs nombreux avantages, suivies d'une définition d'ultrasons, leurs paramètres (la longueur et la fréquence d'onde, la célérité, l'impédance acoustique...etc.), leurs types, ainsi que quelques phénomènes liés à la propagation.

CHAPITRE II

L'acoustoélasticité et l'effet de la température

II.1 introduction

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle déprendra des propriétés mécaniques, la résistance, la dureté et la ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques. L'essai de traction est le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique [12]. La détermination de l'influence de la contrainte sur les vitesses des ondes ultrasonores dans les matériaux solides est basée sur la nature du matériau et le mode de propagation des ondes ultrasonores. Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, on constate une variation de la vitesse de l'onde ultrasonore. Cette fluctuation est due à des effets élastiques non linéaires formalisés par Murnaghan [13].

Dans notre cas on étudiera l'influence de la température sur les vitesses des ondes ultrasonores dans un liquide. Il faut que le milieu de propagation soit atténuant et non dispersif pour éviter les difficultés de mesure. On peut mesurer la vitesse de phase et la vitesse de groupe en fonction du temps. Le milieu que nous considérons ici est l'eau, caractérisée par sa faible dispersion d'origine intrinsèque, d'où la confusion des vitesses de groupe et celles de phase.

II.2.1 Etude du comportement des ultrasons dans différents milieux

La technique de pulse-écho est basée sur la propagation des ultrasons et notamment de leur comportement lors de leur passage d'un milieu à un autre. Soient un faisceau d'ultrasons issu d'un émetteur avec une inclinaison de θ_i , et une suite de milieux, tout

comme pour les ondes optiques, on observe à chaque changement de milieu une séparation du faisceau en deux parties, la première réfléchie et la seconde transmise [1].



Figure II.1 La propagation de l'onde ultrasonore à travers deux milieux

La vitesse de l'onde dépend des différents milieux utilisés, chose qui va permettre de caractériser plusieurs matériaux par l'analyse des ondes réfléchies. Ces analyses sont permises si l'émetteur envoie un signal sous forme de pulsations alors retransmises à l'oscilloscope une fois récupérées par un capteur. On observe alors des suites d'échos correspondantes aux phénomènes suivants:



Figure II.2 suite d'échos due à la réflexion entre deux milieux

Pour un faisceau d'ultrasons émis, il y aura pour chaque transmission une réflexion consécutive et donc un écho représenté. On définit donc un écho comme la réflexion d'une onde. L'atténuation de son amplitude s'explique du fait de la division du faisceau à chaque interface en ondes transmises et réfléchies. Lorsque le faisceau arrive avec une inclinaison normale à l'interface de séparation des deux milieux, la direction des ondes transmises et celles réfléchies est identique à celle du rayon incident. Les échos sont toujours observables à condition que le capteur fonctionne comme émetteur et récepteur en même temps, ce qui explique le principe de l'échographie [4].

II.2.2 Détermination des vitesses longitudinales et transversales

Afin de pouvoir déterminer expérimentalement les vitesses des ondes longitudinales dans différents matériaux grâce à des transducteurs ultrasonores, nous aurons besoin d'un système de mesure adapté aux objectifs fixés. Nous ajoutons un élément de couplage à l'interface transducteur matériau dans le but de maximiser le contact et de ce fait les espaces d'airs deviennent minimes voir inexistants. Puis, nous procédons à la mesure de la position temporelle sur l'oscilloscope pour plusieurs échos. Chaque temps de parcours ainsi mesuré correspond à une vitesse ultrasonore.

II.2.3 Conversion de mode

Les ondes transversales ne se propagent pas dans les liquides. De plus, et pour chasser l'air à l'interface transducteur/matériau, il faut choisir un couplant visqueux où liquide. En effet, l'eau tout comme la graisse, ne permet pas la propagation d'ondes autres que longitudinales. De manière générale, il est préférable de générer des ondes longitudinales par conversion de mode. Cette dernière apparait sur une interface solide/liquide lorsque deux composantes orthogonales polarisées d'ondes transversales où longitudinales se converties en ondes longitudinales dans le liquide. De ce fait, les propriétés mécaniques et l'état de contraintes influencent directement la polarisation des ondes d'une part, et leurs vitesses d'autre part tout en provoquant des changements au niveau du temps de parcours.





II.2.4 Essai de compression

L'essai de compression détermine l'aptitude d'un matériau soumis à un effort variable à se déformer. Ce type d'essai est nécessaire pour prévoir le comportement du matériau dans des conditions réelles d'utilisation.

La compression consiste à appliquer sur un échantillon normalisé du matériau à examiner un effort F et à mesurer la déformation correspondante ε ou inversement d'imposer une déformation ε et à mesurer l'effort F. ε et F sont des grandeurs physiques liées à la structure ici à l'échantillon. Afin de les interpréter et ainsi de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau à savoir la contrainte σ et la déformation ε [1].

II.2.4.1 Mesure des vitesses par la méthode de contact direct

La technique par contact, à l'instar des méthodes mécaniques, nécessite des échantillons prélevés suivant plusieurs orientations. Cette méthode est peu précise et le nombre de vitesses mesurables est limité. Elle est aussi peu reproductible car on utilise un couplant pour chaque mode de propagation.

II.2.4.2 Mesure des vitesses par immersion

Les méthodes par immersion sont basées sur l'étude de la transmission ultrasonore directe où d'impulsion/écho au travers d'un échantillon immergé dans l'eau. Elles présentent l'avantage majeur d'obtenir à partir d'un seul échantillon des vitesses de propagation dans toutes les directions, ce qui est le cas de la technique du prisme caractérisée par la forme du spécimen. Les mesures de vitesses ultrasonores en immersion permettent d'une part d'avoir une bonne précision et une reproductibilité des mesures et d'autre part, de générer avec un seul capteur plusieurs types d'ondes dans le matériau à caractériser. Cette configuration est particulièrement utile pour la caractérisation d'un matériau [4].

II.2.5 Théorie de l'acoustoélasticité

F. Murnaghan a développé la théorie de l'acoustoélasticité au début des années 1930. Il explicite comment les changements des paramètres élastiques d'un milieu sous contrainte unidirectionnelle peuvent conduire aux coefficients non linéaires. D. Hugues et J. Kelly reprennent ces calculs et arrivent à un système de trois équations sur la célérité des ondes

élastiques en fonction des coefficients du deuxième et du troisième ordre. Les différentes étapes permettant d'arriver à ce résultat sont résumées dans ce chapitre. Dans la suite de cette démonstration, il est nécessaire, en toute rigueur, de distinguer les coefficients élastiques adiabatique et isothermes. Ces derniers étant sensiblement égaux nous n'en ferons pas la distinction et $C_{ijkl}^T \approx C_{ijkl}^s$ sera noté C_{ijkl} L'équation du mouvement est la suivante [13].

$$\rho_0 \, \mathbf{u}_{\mathbf{i}} = \frac{\partial \mathbf{p}_{\mathbf{i}\mathbf{j}}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{j}}} \tag{II.2}$$

e désigne l'energie élastique de déformatin qui peut s'écrire sous la forme d'un dévelepement au troisiéme ordre en fonction des déformation S_{kl} sous la forme:

$$e = \frac{1}{2} C_{ijkl} S_{ij} S_{kl} + \frac{1}{6} C_{ijklmn} S_{ij} S_{kl} S_{mn}$$
(II.3)

C_{ijkl} Et C_{ijklmn} désignent respectivement les modules élastiques du deuxième et du troisième ordre. Dans l'équation (II.3), les composantes du tenseur des déformations en coordonnées Lagrangienne sont données par:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$$
(II. 4)

En introduisant l'expression du tenseur du piola-Kirchhoff (II.2) et l'expression de l'énergie interne (II.3) Dans l'équation du mouvement (II.1) et en tenant compte du tenseur des déformations (II.4), l'équation générale non linéaire élastique devient [14]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_j x_i} \left[C_{ijkl} + \left(C_{ijklmn} + C_{ijln} \delta_{km} + C_{jnkl} \delta_{in} + C_{jlmn} \delta_{ik} \right) \right] \frac{\partial U_m}{\partial x_n}$$
(II.5)

Lors de l'application d'une contrainte statique au matériau, nous devons alors distinguer trois états: naturel (\vec{x}) relatif à la position au repos, contraint (\vec{X}) et courant (\vec{y}) lié à la propagation de l'onde. Pour simplifier, la contrainte initiale et les déformations sont supposées uniformes et définies par les déplacements statiques \vec{U}^s [14].

$$\vec{X} = \vec{x} + \vec{U}^{s} \tag{II.6}$$

Soit \vec{U}^{p} le déplacement dynamique dû à la propagation d'une onde de faible amplitude dans le solide statiquement contraint :

$$\vec{y} = \vec{X} + \vec{U}^{D} = \vec{x} + \vec{U}^{s} + \vec{U}^{D} = \vec{X} + \vec{U}$$
 (II.7)

U est alors le nouveau déplacement à introduire dans l'équation de mouvement. Sous l'hypothèse que le milieu est homogène, que les déformations statiques induites sont uniformes et que les déformations dynamiques sont faibles, l'équation du mouvement (II.5) devient [13].

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i^{\rm D}}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k^{\rm D}}{\partial x_j \partial x_i} + \left(C_{ijklmn} + C_{ijln} \delta_{km} + C_{jnkl} \delta_{im} + C_{jlnm} \delta_{ik} \right) \frac{\partial^2 U_k^{\rm D}}{\partial x_j \partial x_i} \frac{\partial^2 U_m^{\rm S}}{\partial x_n}$$
(II.8)

Maintenant, en procédant au changement de variables suivant : $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{X}$, l'équation de Propagation portant sur U^D peut être exprimée dans l'état contraint. Les coordonnées de ce dernier peuvent être assimilées au repère du laboratoire car la propagation de l'onde est de faible amplitude. L'équation (II.8) devient alors :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i^D}{\partial t^2} = B_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k^D}{\partial X_j X_i}$$
(II. 9)

$$B_{ijkl} = C_{ijkl} + \delta_{ik}C_{jlqr}\left(\frac{\partial U_q^s}{\partial X_r}\right) + C_{rjkl}\left(\frac{\partial U_i^s}{\partial X_r}\right) + C_{ijrl}\left(\frac{\partial U_k^s}{\partial X_r}\right) + C_{irkl}\left(\frac{\partial U_j^s}{\partial X_r}\right) + C_{ijkr}\left(\frac{\partial U_i^s}{\partial X_r}\right) + C_{ijklmn}\left(\frac{\partial U_k^s}{\partial X_n}\right)$$
(II. 10)

Si nous considérons une onde plane se propageant à la vitesse V dans la direction du vecteur unitaire \vec{n} . $U^D = U^{D0} sin(\omega(t - \frac{\vec{n}\vec{X}}{v}))$ obtenons alors l'équation de Christoffel modifiée.

$$\rho_0 V^2 U_i^{D0} = B_{ijkl} n_j n_i U_k^{D0}$$
(II. 11)

Où U_i^{D0} est le vecteur propre du tenseur $B_{ijkl}n_jn_i$ ayant pour valeur propre $\rho_0 V^2$. Si le solide est considéré comme isotrope dans son état initial, l'équation aux valeurs propres prévoit une onde quasi-longitudinale (L) pour une direction donnée, et deux ondes quasitransverse (T). Les axes de coordonnées de l'expérience doivent être choisis de manière à ce qu'ils coïncident avec les axes principaux des déformations et ceux des contraintes statiques $T_{ii}^s = C_{iikl} S_{kl}^s$ tels que [13].

$$S_{ij}^{s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_{i}^{s}}{\partial X_{j}} + \frac{\partial U_{j}^{s}}{\partial X_{i}} \right)$$
(II. 12)

En choisissant une direction de propagation (i=1 où i=2), et les directions de polarisation (j=1, j=2 où j=3) nous obtenons trois modes purs, dont un longitudinal et deux autres transverses, et donc les vitesses peuvent être données par le système d'équations suivant:

$$\rho v_{11}^2 = \lambda + \mu + \frac{\sigma}{3k} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \tag{II.13}$$

$$\rho v_{12}^2 = \rho v_{13}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3k} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right]$$
(II.14)

$$\rho v_{21}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3k} \left[m + \frac{\lambda}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \tag{II.15}$$

$$\rho v_{22}^2 = \lambda + \mu + \frac{\sigma}{3k} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \tag{II.16}$$

$$\rho v_{23}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3k} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \tag{II.17}$$

Le choix des équations permettant l'évaluation des constantes élastiques est basé sur l'expérience elle même. Donc, chaque expérience génère une équation bien définie:

Le test par immersion en mode longitudinale génère l'équation (II. 13) par contre les deux autres tests en mode transversale (par immersion et par contact) produisent respectivement les équations (II. 15) et (II. 17).

Dans la suite de ce travail, nous exprimons les vitesses en fonction dès coefficients dits de Landau l, m et n. Ces derniers proviennent du développement des invariants de l'énergie interne élastique au troisième ordre d'un solide isotrope, équation (II.3), qui s'exprime également sous la forme:

$$e = \mu U_{ik}^2 + \frac{\lambda}{2} U_T^2 + \frac{l}{3} U_{ik} U_{il} U_{kl} + m U_{ik}^2 U_T + \frac{n}{3} U_T^3$$
(II.18)

A. Norris a écrit les relations liant les coefficients élastiques C_{ijk} du troisième ordre notation de Voigt, aux coefficients de Landau l, m, n tels que: $l = c_{456} m = c_{144}$ et $n = c_{123}$.

$$\left(\frac{\Delta v_l}{v_{l_0}}\right)_{\perp} = \left[\frac{v_1}{2} + v_2 - \mu - (5\mu + 2\lambda + 2v_2 + 4v_3)\frac{\lambda}{2\mu}\right]\frac{\sigma}{(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)}$$
(11.19)

$$\left(\frac{\Delta v_t}{v_{t_0}}\right)_{\perp} = \left[v_2 + 2v_3 - 2\lambda - \mu - 2v_3\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)\right] \frac{\sigma}{(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \tag{II.20}$$

$$\left(\frac{\Delta v_t}{v_{t_0}}\right)_{//} = \left[\frac{4\mu(\lambda + \mu + v_2 + 2v_3) + 4\lambda v_3}{8\mu^2(3\lambda + 2\mu)} + \frac{1}{2\mu}\right]\sigma$$
(II.21)

La vitesse de chaque onde est fonction de la contrainte appliquée σ . De plus, si la contrainte appliquée est nulle ($\sigma = 0$), nous retrouvons les expressions des vitesses de compression et de cisaillement dans un milieu élastique homogène (Eq. II.8). Ainsi, en mesurant la vitesse de chaque onde en fonction de la contrainte, il est possible de déterminer les coefficients non linéaires de Landau l, m et n.

II.3 la vitesse d'onde ultrasonore dans l'eau en incidence normale

D'une plaque viscoélastique immergée dans un fluide considéré comme un milieu atténuant et non dispersif, fait intervenir deux grandeurs liées à la propagation dans le fluide de référence: l'impédance acoustique Z_f et la constante de propagation γ_f toutes deux complexes. Ces deux quantités dépendent de trois paramètres physiques du fluide: ρ_f , α_f et V_f . La masse volumique ρ_f et l'évolution de la constante d'atténuation α_f avec la fréquence sont supposées connues. Quant à la vitesse de propagation dans l'eau V_f , elle dépend de la température de l'eau. Nous parviendrons donc, dans un premier temps, la mesure de la vitesse dans l'eau à différentes températures [15].

II.3.1 Principe de mesure

La vitesse est le rapport de la distance d parcourue par l'onde sur le temps de parcours (aller/retour) t, telles que V = 2d/t. Selon la procédure de la mesure de ce temps, on accédera à la vitesse de phase ou à la vitesse de groupe.

La vitesse de phase est la distance parcourue par unité de temps, par un point de phase constante de la surface d'onde (par exemple un maximum ou un minimum).

La vitesse de groupe est la vitesse de propagation de l'enveloppe du train d'ondes.

II.3.2 Correction de l'effet de la température

Une difficulté de mesure de la variation du temps de parcours du train d'ondes lorsqu'on écarte les capteurs ultrasonores d'une distance connue, est qu'au moment de l'expérience, la température de l'eau change entre deux enregistrements. Toutefois, la vitesse des ultrasons dans l'eau est très sensible à la température. À titre indicatif, à température ambiante, une élévation de 1°C entraîne une augmentation de vitesse de 2, 5 m/s (variation $de\frac{1}{500}$). Par conséquent, il n'est pas possible de comparer les signaux concernés pour la

même vitesse dans l'eau, c'est-à-dire à la même température, ce qui conduit à des erreurs non négligeables puisqu'elles sont systématiques [15].





En supposant que l'eau n'est pas un milieu dispersif, une des techniques les plus fiables pour mesurer la vitesse des ultrasons dans l'eau consiste à calculer le décalage temporel de propagation entre deux signaux considérés $x_1(t)$ et $x_2(t)$. Alors que le premier signal parcourt l'eau pendant un temps t_1 à la température ϑ_1 , le second signal traverse la même distance d en un temps t_2 à la température ϑ_2 . Le décalage temporel Δt est le retard de propagation correspondant à la différence de température.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{d}{v_{\vartheta_2}} - \frac{d}{v_{\vartheta_1}} = \frac{d(v_{\vartheta_1} - v_{\vartheta_2})}{v_{\vartheta_1}v_{\vartheta_2}}$$
(11.22)

II.3.3 Calcul du temps de vol

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer le temps de vol d'une impulsion ultrasonore. Le choix de la méthode est guidé par la qualité des signaux, nous pouvons citer la méthode d'intercorrélation entre deux signaux, la méthode de la résonance et la méthode dite du signal analytique [1].

II.3.3.1 Intercorrélation

Si le matériau à étudier est peu dispersif, les échos obtenus après transmission à travers l'échantillon sont très peu déformés [DUB 1996], [PLO 2006]. On peut alors estimer la différence de temps de vol entre deux signaux en recherchant le maximum de la fonction d'intercorrélation. Cette méthode mesure le degré de similitude de forme et de position en régime impulsion de deux signaux. La fonction d'intercorrélation de deux signaux est donnée par la relation suivante [1].

$$r_{x_1x_2}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(\tau) \cdot x_2(\tau - t) d\tau$$
 (II.23)

La transformée de Fourier de la relation d'intercorrélation est:

$$R_{x_1x_2}(\omega) = X_1(\omega)X_2(\omega)$$
(II. 24)

Où $X_1(\omega)$ et $X_2(\omega)$ sont les transformées de Fourier de $x_1(t)$ et $x_2(t)$ respectivement, et $R_{x_1x_2}(\omega)$ la transformée de Fourier d'intercorrélation. Autrement dit, l'intercorrélation dans le domaine temporel devient une simple multiplication dans le domaine fréquentiel. Ainsi, on effectue la transformée de Fourier pour chaque écho, puis on calcule le produit de ces deux transformées. Ensuite, on établit la transformée de Fourier inverse TF⁻¹ du produit résultant:

$$R_{x_1x_2}(t) = TF^{-1}[X_1(\omega)X_2(\omega)]$$
(II. 25)

Le maximum de la fonction d'Intercorrélation est obtenu pour un temps $t = \tau$ correspondant au décalage temporel entre les signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ supposés de formes comparables. Cette dernière technique est la plus appropriée afin de déterminer le temps de vol des ondes en incidence quelconque pour les matériaux métalliques à examiner, dont ils sont caractérisés par leur faible dispersion.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a essayé de faire exposé comment mesurer les vitesses de propagation du mode longitudinal et transversal. Ainsi que l'effet acoustoélasticité, et d'autre part la détermination de paramètres mécaniques, après avoir, comment mesurer les vitesses des ultrasons dans un liquide.

CHAPITRE III

Systèmes des mesures

III Systèmes de mesures

III.1 Système de mesure en substance solide

Le diagramme schématique du système complet de mesure est montré sur la figure (III.1). il se compose d'un générateur d'impulsions ultrasonores portant la référence (paramétriques 5077PR), d'un capteur d'immersion de 2.25 mégahertz (paramétriques V306SU), d'un oscilloscope numérique (Tektronics TDS 1002), d'un ordinateur doté du logiciel Wavestar qui nous permettra l'acquisition des données et l'affichage des courbes faisant référence aux échos et finalement, de la cellule à transducteur.



Figure III.1: synoptique du système de mesure par immersion

III.1.1 Exploitation du banc de mesure

Installé sur le support porte-échantillons, le matériau sous forme de prisme suit la même rotation du moteur. Il est très important de signaler que le choix du sens et de l'angle de rotation revient toujours à l'opérateur. Le transducteur émet un faisceau d'ondes ultrasonores qui traverse le liquide puis l'échantillon pour revenir à la source. Le capteur cylindrique focalisé aide à concentrer l'énergie des ondes ultrasonores au centre de la face principale du prisme. Lorsque le moteur est en position initiale ; état de repos ; la majeure partie de l'énergie incidente est reflétée vers la source, et l'écho relatif exprime le temps de transit dans le milieu liquide.



Figure III.2: Synoptique illustrant la technique de prisme

En augmentant l'angle d'incidence lentement, le premier écho disparaît de l'écran, puis un deuxième écho lié aux ondes longitudinales se manifeste à nouveau et reste ainsi jusqu'à ce que l'angle d'incidence atteigne la valeur de 13.56°. Cet angle d'incidence est le prétendu premier angle critique de l'onde longitudinale parce que c'est à partir duquel l'écho relatif disparait de l'écran.

Si l'on continu à augmenter l'angle d'incidence, et juste après 13.56°, une onde transversale plus forte apparaît et reste même avec l'augmentation de la pression acoustique environ 30° à 90° (figure III.3), alors que l'angle d'incidence atteint la valeur de 29.2°. Ce point là est le deuxième angle critique lié aux ondes transversales. Donc, nous sommes devant le cas d'une conversion de mode longitudinal vers le mode transversal, et le rapport d'amplitude atteint son maximum de 47% pour un angle d'incidence de 17°.



Figure III.3: Rapport d'amplitude entre ondes transversales ondes

Incidentes (deuxième angle critique)

D'après la (figure III.1), nous pouvons calculer les deux vitesses de propagation à partir de la formule (III.1). La vitesse est dérivée de la trajectoire traversée au temps pris par l'impulsion pour dépasser l'interface séparant le liquide et l'échantillon.

$$C_{l,l} = \frac{a}{t_{l,l} - t_1}$$

(III.1)

Avec L2 = a/2.

 $t_{l,t}$: Temps de vol des modes longitudinale et transversale.

 t_1 : Temps de vol de mode principale.

III.1.1.1 Test par immersion

Installé dans une cuve à immersion, l'échantillon sous forme de prisme est soumit à plusieurs valeurs de contraintes à l'aide d'une machine de compression allants jusqu'à 50kn, échelonnées avec un pas de 5kn. L'échantillon immergé est parcourue par un faisceau ultrasonore issu du transducteur (émetteur/récepteur).

En variant l'angle d'incidence autour de l'échantillon, nous obtiendrons les deux modes de propagation longitudinale et transversale.



Figure .III.4: Conversion de mode par arrangement d'immersion

III.1.1.2 Test par contact

Cette fois-ci, le transducteur est installé sous l'échantillon de manière à ce qu'il soit dans la même direction des contraintes et non pas perpendiculaire, chose qui nous permet d'obtenir la troisième équation nécessaire au calcul des constantes élastiques du troisième

III.2.1 Principe de mesure

Le capteur fixé est séparé d'une distance L qui varie entre 2 et 3cm par rapport à la cuve en verre. Cette dernière placée sur la trajectoire du faisceau ultrasonore. Le transducteur est relié à un générateur d'impulsions ultrasonore, lui-même raccordé à un oscilloscope numérique TEKTRONICS TDS1002. Les signaux acquis par l'oscilloscope seront transférés vers l'ordinateur par le biais d'un logiciel appelé wavestar.



Figure III.8: photographie de montage utilisé.

Pour commencer, on chauffe la substance liquides à examiner jusqu'à une température au de 60 °c ensuite, ou verse cette substance à l'intérieur de la cuve en verre. Cette dernière est dotée d'un thermomètre à mercure qui permettra le contrôle des différentes valeurs de températures. Nous observons la décroissance en T° du liquide assez lentement, chose qui nous permettra par la suite de faire le prélèvement séquentiel avec des pas de 5°c.

C'est à -dire, la première acquisition ne commence qu'à la température T=50°c puis les autre points de prélèvement (mesure) serrant échelonnés avec un pas de 5°C Donc la deuxième acquisition ne sera effectuée que à la température T=45°C, puis à T=40°c, ainsi de suite jusqu'à atteindre la valeur de 30°c.

III.2.2 Mesure du temps de vol d'une impulsion

L'onde ultrasonore émise se propage à une vitesse qui dépend des caractéristiques du milieu. A l'interface de deux milieux d'impédances acoustiques différentes, une partie de l'énergie de l'onde se réfléchie et l'autre partie est transmise. La durée qui sépare le

contrainte. Parmi les cinq équations nous choisissons uniquement les trois qui correspondent aux modes inspirés de l'expérience (d'une part un mode longitudinale et un autre transversale pendant le test par immersion et d'autre part seulement le mode transversale lors du test par contact).



Figure. III.5 Arrangement de transmission directe

III.1.2 Mesure du temps de vol d'une impulsion

L'onde ultrasonore émise se propage à une vitesse qui dépend des caractéristiques du milieu. A l'interface de deux milieux d'impédances acoustiques différentes, une partie de l'énergie de l'onde se réfléchie et l'autre partie est transmise. La durée qui sépare le moment de l'émission et celui de la réception de l'écho est appelé temps de vol (TV) de l'onde ultrasonore dans le milieu considéré.



Figure.III.6 : mesure du temps de vol

III.1.2.1 Variation du temps de vol en fonction de la contrainte

Nous présentons les résultats obtenus pour les variations des vitesses (longitudinales et transversales) du milieu sous contraintes par rapport à la vitesse du milieu à contraintes

nulle. Commençant par les temps de vol des deux modes de propagation longitudinale où transversale correspondants au deux types de tests.

III.1.2.2 variation de la vitesse en fonction de la contrainte

L'allure de la variation des vitesses ultrasonores en fonction de la contrainte prend une tendance presque linéaire. Initialement on remarque que le changement brusque des vitesses entre des deux premières valeurs de σ (c'est-à-dire entre 0 *et* 3.42×10^6) au delà de la charge (6.84×10^6) la vitesse a tendance à se stabiliser. Bien que la contrainte augmente d'une manière significative, la vitesse suit presque la même tendance.

III.2 Effet de la température en substance liquide

Le système de mesure proposé peut être schématisé selon la (figure III.7). Il est constitué d'un transducteur double élément de basse fréquence 2.25Mhz. Un double élément est un transducteur qui fonctionne comme émetteur et récepteur à la fois. D'une cuve en plastique remplie d'eau. Ce dernier servira comme couplant entre le transducteur d'une part et la cuvette en verre comprenant le liquide à examiner d'autre part.

Le choix du verre pour la conception de la cuvette n'était pas aléatoire, mais c'est pour éviter toutes réactions chimiques entre le liquide (l'acide dilué) et la matière avec laquelle est fabriquée la cuvette.



Figure III.7 Synoptique du système de mesure

Pendant toute l'opération de mesure l'effet de dispersion est considéré comme étant nul. En générant une impulsion d'attaque du générateur d'impulsions paramétrique 5077PR, celle-ci parcourt le couplant eau pour atteindre la première interface formée entre l'eau et l'acide dilué. Cette interface est réalisée par une feuille mince en plastique transparent. Elle permet ainsi un double usage, la transmission des ondes entre les deux milieux et la séparation pour éviter d'éventuel écoulement de l'acide vers l'eau. Donc, une partie de l'énergie ainsi générée sera transmise à travers cette interface, par contre l'autre partie se reflète et revient à la source sous forme d'écho. La densité de l'eau est considérée constante de valeur 998kg/m³.

On applique la formule suivant pour calculer la densité d'échantillons:

Echantillon	Rapport du volume : acide /eau	Volume en %	Densité en kg/m³	
Echantillon 1	1.5L/0.0L	100/0.0	1270	
Echantillon 2	1.5L/0.3L	83.33/16.67	1225	
Echantillon 3	1.5L/0.5L	75/25	1202	

 $\rho_i = (\%)_{acide} * (\rho_{init})_{acide} + (\%)_{eau} * (\rho_{init})_{eau} (III.1) \ltimes$

Tableaux III.1 Préparation des échantillons

III.2.1 Principe de mesure

Le capteur fixé est séparé d'une distance L qui varie entre 2 et 3cm par rapport à la cuve en verre. Cette dernière placée sur la trajectoire du faisceau ultrasonore. Le transducteur est relié à un générateur d'impulsions ultrasonore, lui-même raccordé à un oscilloscope numérique TEKTRONICS TDS1002. Les signaux acquis par l'oscilloscope seront transférés vers l'ordinateur par le biais d'un logiciel appelé wavestar.



Figure III.8 photographie de montage utilisé.

pour

Par commencer, ou chauffe la substance liquides à examiner jusqu'à une température au de 60 °c ensuite, ou verse cette substance à l'intérieur de la cuve en verre. Cette dernière est dotée d'un thermomètre à mercure qui permettra le contrôle des différentes valeurs de températures. Nous observons la décroissance en T° du liquide assez lentement, chose qui nous permettra par la suite de faire le prélèvement séquentiel avec des pas de 5°c.

C'est à -dire, la première β acquisition ne commence qu'à la température T=50°c puis les autre points de prélèvement (mesure) serrant échelonnés avec un pas de $\Delta T = 5$ °C. Donc la deuxième acquisition ne sera effectuée quirà la température T=45°C, puis à T=40°c, ainsi de suite jusqu'à attendre la valeur de 30°c.

III.2.2 Mesure du temps de vol d'une impulsion

L'onde ultrasonore émise se propage à une vitesse qui dépend des caractéristiques du milieu. A l'interface de deux milieux d'impédances acoustiques différentes, une partie de l'énergie de l'onde se réfléchie et l'autre partie est transmise. La durée qui sépare le moment de l'émission et celui de la réception de l'écho est appelé temps de vol (Tv) de l'onde ultrasonore dans le milieu considéré.



Figure III.9 Principe de mesure du temps de vol.

La vitesse de propagation dans le milieu 1 peut être calculée à partir du temps de vol entre l'impulsion $A_T(t)$ et l'écho $A_1(t)$ et la vitesse de propagation dans le milieu 2 (acide) est calculée à partir du temps de vol séparant les deux échos $A_1(t)$ et $A_2(t)$ tout en prenant en considération les distances L et D. L sépare l'interface I₁ au transducteur, et D est la distance entre les deux interfaces I₁ et I₂.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit les synoptiques des systèmes de mesure nécessaires à l'acquisition et les principes de mesure du temps de vol ainsi que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans chaque substance (solide, liquide). De même, la préparation des échantillons a fait l'objet de ce chapitre.

CHPITRE IV

Résultats et discussion

IV Résultats et discussion

IV.1Variation du temps de vol en fonction de la contrainte

Nous présentons les résultats obtenus pour les variations des vitesses longitudinales et transversales du milieu contraint par rapport à la vitesse du milieu à contrainte nulle. Commençant par les temps de vol des deux modes de propagation correspondants aux deux types de tests, les résultats sont résumés dans le tableau (IV.1). Vu le nombre important des résultats obtenus expérimentalement nous nous sommes contentés uniquement de la première expérience.

	Temps de vol (us)									
Contrainte (pa)	mode L.imm			mode T.imm			mode T.con			
	Exp(1)	Exp(2)	Exp(3)	Exp(1)	Exp(2)	Exp(3)	Exp(1)	Exp(2)	Exp(3)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3,42 10 ⁶	35	27.5	24.16	27.5	24.16	13.3	37.5	8.33	44.66	
6,85 1 0 6	42	59.36	47.5	59.36	47.5	40.06	56.16	33.33	55.56	
1,02 1 0 7	51	73	63.63	65	63.63	53.3	75	45.83	66.85	
1,37 1 0 7	59	77.5	69.16	70.5	69.16	58.33	96	58.33	72.16	
1,71 1 0 7	70.83	78.33	73.33	74.33	73.33	59.16	112.5	75	83.5	
2,05 1 0 7	78.16	79.16	75.83	79.16	75.83	60.83	129.16	87.5	94.44	
2,4 10 ⁷	87.66	80.83	79.16	81.83	79.16	66	141.33	104.16	105.55	
2,74 1 0 7	93.33	81.66	83.3	85.66	83.33	70.5	154.16	112.5	122.22	
3.08 1 0 7	95	88.33	85	88.33	85	74.16	170.8	125	138.88	
3,42 1 0 7	99.16	93.33	89.16	93.33	89.16	77.5	180	129	140.5	

 Tableau (IV.1)
 variation du temps de vol en fonction de la contrainte pour les deux types de tests

Lors du test par immersion, on remarque que le décalage en temps de vol a un comportement quasi-linéaire. C'est-à-dire l'augmentation de la contrainte engendre une

croissance positive du temps de vol correspondant aux deux modes longitudinale et transversale lors du test par immersion.

IV.1.1 Variation de la vitesse en fonction de la contrainte (test par immersion)

L'allure de la variation des vitesses ultrasonores en fonction de la contrainte prend une tendance presque linéaire. Initialement nous constatons le changement brusque des vitesses entre les deux premières valeurs de σ c'est-à-dire entre 0 et 3.4210^6 . Au delà de la charge $\sigma = 6,8410^6$ la vitesse a tendance à se stabiliser. Bien que la contrainte augmente d'une manière significative, la vitesse suit presque la même tendance durant la première expérience (voire le tableau IV 2), la vitesse initiale du mode longitudinal sans contrainte avait comme valeur 6228m/s, et celle du mode transversale est de 3000m/s.

Contrainte	vitesse (m/s)								
(pa)		mode L		mode T.imm			mode T.con		
	Exp(1) Exp(2) Exp(3)			Exp(1)	Exp(2)	Exp(3)	Exp(1)	Exp(2)	Exp(3)
0	6228	6136	6081	3000	3057	3090	3191	3191	3192
3,42 10 ⁶	6203	6120	6065	2993	2997	2995	3198	3192	3199
6,85 1 0⁶	6197	6103	6049	2991	2993	2991	3201	3197	3201
1,02 1 0 7	6191	6092	6043	2989	2991	2988	3204	3199	3203
1,37 1 0 7	6185	6088	6042	2987.5	2990	2987	3207	3201	3204
1,71 1 0 7	6179	6086	6040	2986	2990	2986.5	3210	3204	3206
2,05 1 0 7	6173	6084	6039	2985	2989	2986	3213	3206	3208
2,4 1 0 7	6167	6082	6038	2983.5	2989	2986	3215	3209	3209
2,74 1 0 7	6161	60788	6035	2982	2988	2985	3218	3211	3212
3,08 1 0 7	6155	6078	6033	2980	2986	2985	3221	3213	3215
3,42 1 0 7	6151	6075	6032	2978	2987	2984	3223	3214	3215

Tableau (IV.2) variation des vitesses en fonction de la contrainte pour les deux types de tests

En augmentant la charge, la vitesse longitudinale passe de 6203m/s (correspondant à une première charge de 5KN) à une nouvelle valeur de 6151m/s pour une charge équivalente à 50KN. C'est-à-dire, une diminution maximale de 52m/s.

En examinant les résultats du tableau2 (expérience1) et en prenant l'exemple du mode transversal par immersion, nous constatons une décroissance rapide de la vitesse dèsque la force exercée passe de 0KN à5KN. Ce changement important s'explique par le contact brusque entre l'échantillon et les bras de la machine de la compression.

Chapitre IV

La croissance en temps devient moins importante lorsqu'on dépasse le seuil de 20KN pour la force exercée.



Figure IV.1 évolution des ondes longitudinales en fonction de la contrainte

Par contre, la vitesse transversale avait comme valeur initiale 3000m/s. Elle passe donc de 2993m/s (valeur correspondante à une charge de 5kn) à la valeur de 2978 m/s lorsque la force atteint 50KN. D'où la variation de 15m/s uniquement.



Figure IV.2 évolution des ondes transversale en fonction de la contrainte (test par *immersion*)

L'importante variation de la vitesse longitudinale justifie la sensibilité de cette dernière à la contrainte pendant le test par immersion. Donc, le retard enregistré positivement en temps de vol explique la diminution des vitesses correspondantes au test.

Chapitre IV



Figure IV.3 évolution des vitesses longitudinales en fonction des contraintes)



Figure IV.4 : évolution des vitesses transversales en fonction des contraintes (test par immersion)

IV.1.2.Variation de la vitesse en fonction de la contrainte (test par contact)

Contrairement au premier test, et lors l'expérience par contact, le temps de vol est inversement proportionnel à la contrainte. Donc, en augmentant la charge le temps diminue, et par la suite entraîne une remarquable croissance de la vitesse transversale.



Figure IV.5 évolution des ondes transversale en fonction de la contrainte (test par contact)

Cela s'explique par le fait que l'onde transversale se propage dans la même direction de la contrainte (compression du matériau).

La vitesse initiale sans charge était de 3191m/s. en augmentant la charge avec un pas de 5KN, nous constatons que la vitesse passe de 3198m/s (valeur correspondante à une charge de 5KN) à 3223m/s pour une valeur qui correspond à une charge de 50KN. Donc, une faible croissance de 25m/s.



Figure. IV.6 variation des vitesses transversales en fonction des contraintes (test par contact)

IV.1.3 Application de l'intercorrélation

Il est nécessaire de comparer des échos entre eux, en particulier pour déterminer un degré de ressemblance ou pour différencier deux échos successifs. Pour résoudre ce problème d'une façon directe, nous avons fait recours au calcul du produit d'intercorrélation. On peut démontrer que ce produit d'intercorrélation passe par un maximum quand les deux échos sont identiques et parfaitement synchronisés (*Figure*. *IV*.7).







Figure. IV.7 variation des vitesses transversales en fonction des contraintes (test par contact)

IV.2 interprétations sur l'effet thermique

IV.2.1 Décalage du temps de vol en fonction de la température

Nous prenons les trois échantillons examinés sous l'effet de la température. Lorsqu'on augmente la température, les temps de vol croient et par la suite les vitesses diminuent.



Figure IV.9 évolution des ondes ultrasonores en fonction de la température (éch2).



Figure IV.10 évolution des ondes ultrasonores en fonction de la température (éch3).

IV.2.2 Variation de la vitesse en fonction de la température

Pour les mesures qui suivent, nous considérons que la densité du couplant eau est fixe. On chauffe les différents échantillons constitués à partir d'un mélange eau/acide. Le principe de mesure du temps de vol reste le même. En partant de l'équation 3.1 nous calculons les différentes valeurs de la vitesse de propagation, les résultats seront donnés par le Tableau IV.3.

\square	T=50°		T=45°		T=40°		T=35°		T=30°	
	t	v	Т	V	t	v	t	V	t	V
0%	301.5	1533.5	302.6	1527,06	303.6	1521,25	305	1513,2	307.2	1500,71
Ech 1	297.1	1559.8	296.4	1564,08	296.2	1565,31	296	1566,5	295.8	1567.8
Ech 2	297.1	1559,81	296.8	1561,64	296.5	1563,47	296.2	1565,3	296.1	1565,92
Ech 3	297.7	1556,17	297.5	1557,38	297.4	1557,99	297.5	1557,8	297.6	1556,78

Tableau IV.3 Variation de la vitesse en fonction de la température



Figure IV.11 : variation de la vitesse en fonction de la température

IV.4 Résultats d'intercorrélation entre échos pour différentes T°



Figure. IV.12 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) d'Ech1



Figure. IV.13 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) d'Ech2



Figure. IV.14 Décalage temporel entre échos (à gauche) et son intercorrélation (à droite) d'Ech3

IV.5 Conclusion

Le dispositif expérimental basé sur la technique du prisme nous a permis de suivre de prés l'évolution des vitesses ultrasonores longitudinales et transversales en fonction de la contrainte uniaxiale appliquée au matériau. Les résultats obtenus montrent que les ondes les plus sensibles aux contraintes sont les ondes longitudinales en premier lieu et les ondes transversales polarisées dans la direction de chargement en second lieu.

D'autre part on a appliqué la fonction d'intercorrélation sur des échos réels obtenus expérimentalement pour déterminer le décalage temporel entre échos lors de la variation de la température. **CONCLUSION GENERALE**

Conclusion générale

Nous nous sommes attachés le long de ce modeste travail à suivre une démarche cherchant à examiner point par point les effets de la pression uniaxiale et la température sur les vitesses ultrasonores. Pour cela l'exploitation de deux bancs de mesure par ultrasons s'est avérée largement nécessaire, et les deux dernières expériences ont été basées sur la technique du prisme accompagnée d'une série de mesures. Donc, ce travail à été défini pour tenter de répondre aux déférents besoins de caractérisation non destructive des substances solides et liquides, notamment l'influence des contraintes statiques et l'effet thermique.

Dans un premier temps on à exploité la théorie de l'acoustoélasticité qui traduit l'évolution de la vitesse ultrasonore avec une contrainte statique dans un matériau solide, l'aluminium dans notre cas.

Lors de la deuxième phase de l'expérience, nous avons examinés la sensibilité linéaire des substances liquides à un effet thermique progressif que nous avons comparé à celle décrite en théorie.

Les résultats obtenus montrent que les ondes les plus sensibles aux contraintes sont les ondes longitudinales en premier lieu et les ondes transversales polarisées dans la direction de chargement en second lieu. D'autre part nous avons constaté que l'évolution des vitesses d'ondes ultrasonores en fonction de la température prend une allure quasi linéaire, chose qui est en accord avec la théorie.

Enfin, nous recommandons aux futurs travaux de recherches d'aller plus loin en matière de contraintes pour en arriver à des centaines de KN car à ce stade les variations en temps deviennent très faibles et ne permettent aucunement de distinguer le décalage temporel par aspect visuel. Par conséquent, le recours à des outils d'estimation du décalage entre échos devient indispensable.

REFIRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

I

I

Références

[1] Pape Arago BODIAN. "Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope", thèse de doctorat .L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon .2011 .

[2] Marie. Aude PLOIX "étude de l'atténuation des ondes ultrasonore. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique" thèse de doctorat.
 L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.2006

[3] R.Harhout. " dispersion et atténuation des ondes ultrasonores dans des matériaux métallique soumis aux contraint es ", thèse de magistère en génie mécanique, canada 2004.

[4] K.boubaa. "calcul analytique et numérique des propriétés élastiques d'un matériau solide par ultrasons "projet de Master en électronique. Juin 2012.

[5] N.benhadda. "modélisation des Capteurs Inductifs à Courant de Foucault ", thèse de magister en électronique option "Matériaux électrotechnique ", université de El Hadj Lakhdar Batna 2006.

[6].M. Aude Ploix. "Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores ". Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique, Ecole doctorale : MEGA, 2006.

[7] B.Ibtissem, L.Mowloud, "contrôle par détraction du temps de vol (T.O.F.D)".

[8] F.Tafnine. " Caractérisation de matériaux par analyse des signaux ultrasonores ".Thèse de magister en électronique, université de houari Boumediene d'Alger 2002.

[9].L.Zaghba . " Technique de traitement de signal pour la caractérisation par ultrason des matériaux complexes ", thèse de magister en électronique, université de Jijel 2001.

[10].C.H.Chen. "Ultrasonic and advanced methods for non distractive testing and material, characterizations", "Fundamental models and measurements for ultrasonic non-distractive evaluation systems", PP.33, Universities de Massachusetts Darthmouth, U.S.A.2007.

[11] T. Baldeweck, " Mesure de l'atténuation ultrasonore dans les milieux biologiques fortement atténuant application à la caractérisation de la peau ", Thèse du doctorat, 24 mai 1995.

[12] S. CANTOURNET "Bases physiques quantitatives des lois de comportement mécanique "

[13] Murnaghan. D "Finite Deformation of an Elastic solid", John Willey, New York, (1953).

[14] Hughes D.S, Kelly J.L, "Second-Order Deformation of Solids, Physical Review", Vol.92, No.5, 1953, pp.1145. 1149.

[15] A. El Mouhtadi. " Caractérisation Ultrasonore de Plaques Viscoélastiques Homogènes et Composites ", Thèse de Doctorat en Acoustique, Université du Havre, France.2011.