الجمـــهوريـــة الجـــزائريـــة الديـمقراطيـــــــة الشـعبيـــــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعـلـيـم الـعـالـــي والـبـحـث الـعـلـمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جـامـعـة عمّـــار ثـلـيـــجـــي بالأغـــواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كـلـيـــــة الـعـلـــــوم
FACULTE DES SCIENCES

قسم علوم المادة

DEPARTEMENT SCIENCES DE LA MATIERE

# *Mémoire de Master*

**Domaine : Sciences de la matière**
**Filière : Physique**
**Option : Physique appliquée**

**Par** :
Khadidja Chine

**THEME**

# Caractérisation des Matériaux par ultrason

# Cas (acier x70 ,aluminium (ALMg0.5))

Soutenu publiquement devant le jury composé de *:*

| | |
|---|---|
| *Bachir HALIFA* | *Président* |
| *Ahmed BENBELGHIT* | *Examinateur* |
| *Abdelouhab ABDALLAH* | *Examinateur* |
| *Ismail NOUIOUA* | *Rapporteur* |

***Année Universitaire 2018- 2019***

# Remerciements:

Je remercie d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force pour achever ce travail.

Je remercie mon encadreur Mr NOUIOUA ISMAÏL pour avoir encadré mon projet, et pour le soutient, le suivis, et l'aide sans oublier sa disponibilité et ses conseils précieux, tout au long de ce travail et pour son aide tout le temps et dans toutes les étapes de ce travail

Je remercie également le jury de bien vouloir examiner mon projet.

En fin...un grand merci pour mes parents qu'ils m'ont encouragé toujours dans ma vie et mes études moralement .

# Dédicace :

*Au nom d'Allah le Miséricordieux le très Miséricordieux*

*Je dédie ce travail :*

*mes parents qui m'ont aidé toujours*

*mes sœurs: soumai Fatima Karima Fatiha*

*mon seul frère: kouider.*

*Je dédie aussi ce travail à mes très chères amies assia, adila, hajer*

# Table de matière:

Liste des figures ..... VI

Liste des tableaux ..... VIII

Liste des Symboles ..... IX

Introduction générale ..... 1

**Chapitre 1: Introduction à la physique des ultrasons**.....

1.Théorie ..... 3

1.1.Introduction ..... 3

1.1.1.Caractéristiques des ondes ultrasonores ..... 3

1.1.2.Propagation des ondes ultrasonore ..... 6

1.2.Système de test ultrasonique ..... 9

1.2.1..L'émetteur/récepteur ..... 9

1.2.2.Transducteur ..... 9

1.3.Ondes ultrasonique dans la matière ..... 15

1.3.1..Equations du mouvement ..... 15

1.3.1.1..Equation d'onde ultrasonique dans un fluide homogène ..... 15

1.3.1.2.Fonction d'onde ultrasonore ..... 15

1.3.1.3. Equation d'onde dans les solides homogènes ..... 16

1.4. Réflexions et transmission des ondes sonores ..... 17

1.4.1. Réflexions et Transmission à incidence normale ..... 17

1.4.2. Réflexions et Transmission à incidence oblique ..... 18

1.4.3. Atténuation des ultrasons ..... 19

## Chapitre 2 : Les propriétés élastique de la matière

2. Les propriétés élastiques de la matière …….21

2.1.Loi de Hooke ..... 21

2.2.Module d' Young ..... 22

2. 3.Module de cisaillement ..... 24

2.4. Coefficient de poisson ..... 24

2.5. Module compression ..... 25

2.6. Limites d'élasticité ..... 25

## Chapitre 3: Etude Expérimentale

3. Etude Expérimentale ..... 28

3.1.Introduction ..... 28

3.2.Montage expérimental ..... 29

3.3. Mesure de la vitesse ..... 32

3.4.Mesure de l'atténuation ..... 40

3.5.Détermination des coefficients d'élasticité ..... 41

3.6.Conclusion ..... 43

3.7.Conclusion générale ..... 44

**Références** ..... 45

Annexe A ..... 47

Annexe B ..... 49

# Liste des Figures

**Figure (1.1)** : Représentation de l'onde ultrasonore en fonction du temps et de la distance. .4.
**Figure(1.2)**:Les ondes longitudinales ..... 7
**Figure(1.3):**Les ondes transversales ..... 7
**Figure.(1.4)** :Propagation d'une onde de surface ..... 8
**Figure(1.5):**Les ondes de Love ..... 8
**Figure (1.6**): Propagation d'une onde de plaque symétrique ..... 9
**Figure(1.7):** Propagation d'une onde de plaque antisymétrique1 ..... 9
**Figure (1.8):** Transducteur ultrasonore (Source acoustique , type SH10) ..... 9
**Figure (1.9):** Schéma représentant les éléments essentiels d'un transducteur ultrasonore ..... 10
**Figure. (1.10)** :Effet piézoélectrique direct dans l'exemple du quartz ..... 10
**Figure.( 1.11)** : Effets piézoélectriques direct ((a), (b) et (c)) et inverse ((d), (e) et (f)) pour un cylindre de céramique piézoélectrique polarisé suivant son axe..... 11
**Figure(1.12):** Transducteur d'angle ..... 12
**Figure(1.13):** Transducteur focalisant ..... 12
**Figure.( 1.14):**Les zones du faisceau acoustique ..... 13
**Figure(1.15):** Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (a). Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore, en différents points de l'axe (b) ..... 14
**Figure(1.16):** Divergence du faisceau d'ultrasons ..... 14
**Figure( 1.17)** :Onde ultrasonore ..... 15
**Figure(1.18):** Incidence normal..... 17
**Figure.(1.19):** Incidence oblique ..... 18
**Figure(1.20):** Phénomène de Diffusion ..... 20
**Figure (2.1):** Forces appliquées à un ressort ..... 21
**Figure(2.2)** :La contrainte de traction-compression ..... 23
**Figure(2.3)** :Cas du glissement simple ..... 24
**Figure(2.4):** La courbe contrainte-déformation..... 26
**Figure (3.1 ) :** Représentation de la méthode d'inter corrélation ..... 29
**Figure(3.2)**: Schéma du montage expérimental ..... 30
**Figure(3.3):**Variable Ultrasonic Scanner "VariUS" ..... 30
**Figure( 3.4 )** :Echantillon pour test par ultrasons ..... 32
**Figure (3.5 ) :** $R_1$ et $R_2$ signaux de 1ere réflexion sur la face avant de l'échantillon ayant une différence de parcourus 2mm dans l'eau ..... 32

**Figure (3.6) :** $R_1$ et $R_2$ signaux de la 1ere réflexion sur la face avant du grand et petit échantillons ..... 35
**Figure (3.7 )** :Signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l'acier x70 (grand échantillon) ..... 36
**Figure (3.8) :** Signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l'acier x70 (petit échantillon) ..... 37
**Figure (3.9) :** signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l'aluminium ..... 37
**Figure( 3.10 ):**Réflexion avec échos successifs ..... 38
**Figure ( 3.11)** :Evolution des échos dans le grand (rouge) et le petit (bleu) échantillons et leurs spectres ..... 40
**Figure( 3.12 )** :Courbe représentant la variation de l'atténuation en fonction de la fréquence avec la courbe de fit en bleu. ..... 41
**Figure( 3.13 ) :** Relation entre les différentes vitesses des modes, pour un ensemble de matériaux homogènes et isotropes.$V_s = f(V_l)$ ..... 48
**Figure ( 3.14 )** :Logiciel de numérisation ..... 50

# Liste des tableaux

**Tableau(1.1):**Gamme de fréquence acoustique.....3
**Tableau( 1.2)** :Valeurs de la masse volumique , de la vitesse et de l'impédance de quelques matériaux.....5
**Tableau (2.1)** : Sont rassemblées des valeurs indicatives du module de Young E.....23
**Tableau(2.2)**: Le valeur de module compressibilité volumique.....25
**Tableau (2.3):**Propriétés de quelque matériaux.....27
**Tableau (3.1):**Tableau représentant l'épaisseur (acier X70 et Aluminium).....31
**Tableau (3.2 )** : Données disponibles des échantillons.....32
**Tableau (3.3)** : La valeur expérimentales de la vitesse de l'eau.....33
**Tableau (3.4)** : La valeur expérimentales de La différence de hauteur entre le grand et le petit échantillon.....36
**Tableau (3.5 )** : Les vitesses longitudinales, transversales et les différences de temps mesuré par Matlab.....39
**Tableau(3.6 )** :Les constantes d'élasticité du acier X70 et du aluminium.....42
**Tableau (3.7)** :Modules d'élasticité mesurés.....42
**Tableau (3.8 ):** Densités, vitesses du son et impédances acoustiques de certains matériaux communs.....47
**Tableau (3.9 ):** Résultat du programme Matlab.....48

# Liste des Symboles

| | |
|---|---|
| **$\chi$**: | la compressibilité du milieu |
| **$\rho$**: | La masse volumique [kg/$m^3$] |
| **Z :** | l'impédance acoustique[kg/$m^2$/s] |
| **I** : | l'intensité |
| **$\alpha$** : | le coefficient d'atténuation [Neper/cm] |
| **L**: | diamètre du cristal. |
| **$\lambda$** : | Longueur d'onde. [m] |
| **K** : | constante dépend de la géométrie de la source. |
| **$\theta$:** | demi-angle du cône |
| **U** : | élongation instantané |
| **A** : | l'amplitude |
| **t** : | temps [s] |
| **$\omega$** : | Pulsation de mouvement |
| **C** : | Vitesse de propagation de l'onde [m/s] |
| ƒ : | Fréquence d'oscillation [Hz] |
| **K**: | Le vecteur d'onde. |
| **$\lambda$** et **$\mu$**, | sont les constantes de Lamé [PA]. |
| $\overrightarrow{\mathbf{u}}$ : | Le vecteur déplacement |
| **$\varphi$** : | la phase globale de l'onde |
| **t**: | coefficient de transmission. |
| **r**: | coefficient de réflexion. |
| **K**: | la constante de raideur. |
| **F** : | la force exercée |
| **$\sigma$** : | La contrainte [N $m^{-2}$] |
| **$\varepsilon$** : | La deformation |
| **E**: | module d'Young |
| $\sigma_{ij}$ : | le tenseur des contraintes |
| $\varepsilon_{kl}$ : | tenseur des déformations |
| $C_{ijkl}$: | un tenseur d'élasticité |
| **G** : | est le module de cisaillement ou module de coulomb. [N $m^{-2}$] |
| **$\nu$**: | coefficient de poisson |
| **K**: | le module de compressibilité volumique |
| $R_m$: | résistance à la traction. |
| **R e**: | limite d'élasticité |
| **T**: | Période |
| $V_L$: | vitesse longitudinale |
| $V_T$: | vitesse transversale |
| $c_{11}$: | la constante élastique de rigidité du milieu |
| **US** | Ultrasonore |

# Introduction générale :

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes visant à contrôler l'intégrité d'une pièce mécanique sans l'altérer. Le domaine d'application de ces méthodes est très large, incluant des secteurs critiques tels que le transport, l'aérospatial, l'énergie ou la construction. Les phénomènes physiques exploités pour le contrôle non destructif font notamment intervenir des ondes mécaniques (ultrasons) et électromagnétiques (rayon X, rayons $\gamma$, courants de Foucault...). L'émission et la réception de telles ondes permettent, au moyen d'outils d'analyse, de déduire des informations sur la structure interne des pièces contrôlées grâce aux phénomènes d'interaction des ondes avec la matière**[1].** Les méthodes de contrôle non destructif sont nombreuses. Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages : facilité de mise en œuvre, possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler (pas besoin d'un accès à la deuxième face), et 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**[2].**

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche des défauts dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités en impédance mécanique à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle US consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau. La vibration est transmise et reçue par un même capteur appelé transducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans tout le matériau et est réfléchie par tout obstacle se trouvant sur son parcours. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique : il est directif et limité dans l'espace. Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau**[3].**

Les ondes ultrasonores constituent un moyen privilégie d'investigation dans l'étude du comportement mécanique des matériaux, ainsi que l'analyse et la caractérisation des propriétés mécaniques de ces matériaux. **[4].**

Ce mémoire est consacré à l'apprentissage de ce domaine de la physique très lié à l'engineering. Il est divisé en deux parties et une conclusion.

**Le première chapitre** est une présentation générale des Introduction à la physique des ultrasons.

**Le deuxième chapitre** de cette thèse est consacré à la présentation de quelques notions sur les propriétés élastique de la matière.

**Le troisième chapitre** est une étude expérimentale du phénomène de propagation des ondes ultrasonores dans les milieux. Plusieurs techniques peuvent être utilisées La méthode par réflexion utilisée dans ce mémoire permet la détermination des propriétés des ondes de volume ( vitesse de phase et atténuation ) liées aux propriétés mécaniques du milieu.L'estimation des vitesses de phase et des atténuations permettra de déterminer les constantes élastiques.

# Chapitre 1
# Introduction à la physique des ultrasons

# 1. Théorie:

## 1.1. Introduction

L'ultrason est une onde mécanique, qui se propage au travers des supports, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 20 kHz et 1 GHz, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine **[8].** Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques **[3]**

### 1.1.1. Caractéristiques des ondes ultrasonores

Cette section présente les différents paramètres nécessaires à la caractérisation de l'onde ultrasonore **[5]**

**Période(T):** est l'intervalle de temps nécessaire pour effecteur une oscillation complète Elle mesure donc la périodicité temporelle du phénomène .elle se mesure en seconde (s) et correspond à l'inverse de la fréquence f (T=1/f)**[6]** .

- **Fréquence**

Elle est définie comme le nombre de vibrations de la source émettrice par unité de temps. Elle correspond au nombre de cycles observés par seconde.

$$f = \frac{1}{T} \qquad (1.1)$$

Les sons sont classés en quatre catégories selon leur fréquence ( $f$ ) (1 Hz = 1 cycle/s)**[7]** :

**Tableau (1.1):**gamme de fréquence acoustique.

| Sons | Fréquence |
|---|---|
| **Infrasons** | 0 à 20 Hz |
| **sons audibleS** | 20 Hz à 20 kHz |
| **ultra sons** | 20 kHz à 1 GHz |
| **hyper sons** | > 1 GHz |

- **La longueur d'onde (λ)**

Elle caractérise à la fois l'onde et le milieu de propagation. Elle mesure l'étendue spatiale d'un cycle de vibration. Elle correspond à la distance parcourue par l'onde au cours d'un cycle de vibration.

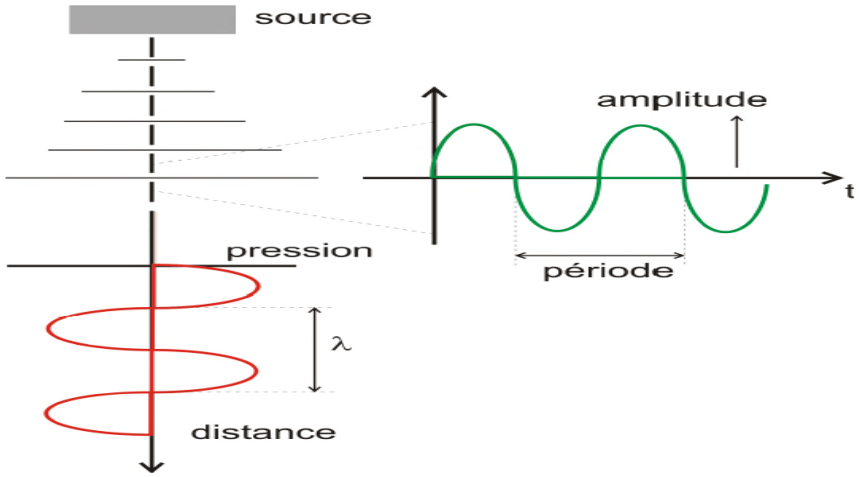



Figure (1.1) : Représentation de l'onde ultrasonore en fonction du temps et de la distance.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (1.2)$$

Avec :

λ : longueur d'onde

c : Vitesse des ultrasons dans le milieu de propagation.

$f$ : fréquence

- **L'impédance acoustique**

Les ultrasons pénètrent plus ou moins dans les différents milieux qu'ils traversent. La résistance à la propagation d'une onde acoustique s'appelle l'impédance acoustique. Elle Exprime le comportement d'un milieu vis-à-vis des ondes ultrasonores **[5]** :

$$z = \rho . c \qquad (1.3)$$

Avec:

ρ: La masse volumique.

c : la célérité de l'onde.

- **Célérité de l'onde acoustique**

La célérité est la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le milieu étudié. La célérité de l'onde dépend des caractéristiques du milieu matériel traversé qui sont son élasticité et sa densité ainsi que du mode de propagation [5].

Le tableau (1.2) donne les caractéristiques de quelques matériaux.

$$c = z/\rho \ \text{(m/s)} \qquad (1.4)$$

Avec :

z : l'impédance acoustique

ρ: la masse volumique .

c : la célérité de l'onde.

**Tableau ( 1.2)** : Valeurs de la masse volumique, de la vitesse et de l'impédance de quelques matériaux.

| **Matériau** | **Masse volumique(Kg/m$^3$)** | **Vitesse de propagation m/s** | **Impedance (Z) Acoustique**. |
|---|---|---|---|
| Air (à 20°c) | 1.2 | 340 | **410** |
| Eau | 1000 | 1500 | **1.5.10$^6$** |
| Acier | 8000 | 5100 | **40.10$^6$** |
| Verre | 2500 | 5300 | **13.10$^6$** |
| Béton | 2200 | 4000 | **9.10$^6$** |

.

- **Intensité**

On appelle intensité ultrasonore l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface pendant l'unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule suivante [5] :

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} \qquad (1.5$$

Avec :

p: pression acoustique

ρ: Masse volumique

c: la célérité

L'intensité acoustique *I* (*z*) décroît exponentiellement avec la profondeur *z* de pénétration des ultrasons dans le milieu. Elle est exprimée par la relation:

$$I = I_0 \exp^{(-\alpha z)} \qquad (1.6)$$

Où α désigne le coefficient d'atténuation. Les unités du coefficient d'atténuation sont les (Neper/cm). Bien que ces unités soient parfaitement adéquates pour la comparaison des coefficients d'atténuation, les unités logarithmiques (dB/cm) sont les plus citées dans la littérature. Pour une onde d'intensité *I*, le décibel est défini comme:

$$\alpha(\mathrm{dB/cm}) = \frac{10}{z} \times \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad (1.7)$$

$$\alpha(\mathrm{dB/cm}) = \frac{20}{z} \times \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad (1.8)$$

Où *I* est l'intensité d'onde mesurée et $I_0$ est l'intensité de référence.

- **La pression**

En chaque point, la pression acoustique **p** varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée au milieu de propagation dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires **[5].**

## 1.1. 2.Propagation des ondes ultrasonores

Le mode de propagation des ondes acoustiques se détermine par les propriétés élastique du milieu et par le type d'impulsion, on peut motionner cinq types de propagation des ondes ultrasonores **[8]**

- **Onde longitudinale (ou de compression)**

Une onde est dite longitudinale lorsque la direction de propagation est parallèle à la direction de vibration des particules **[8].**

La vitesse de propagation de l'onde longitudinal « $V_L$ » :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \qquad (1.9)$$

$\lambda$ ,$\mu$ : Constantes de lame [PA].

$\rho$ : Masse volumique [kg/m$^3$].

$C_{11}$: constante élastique de rigidité du milieu.

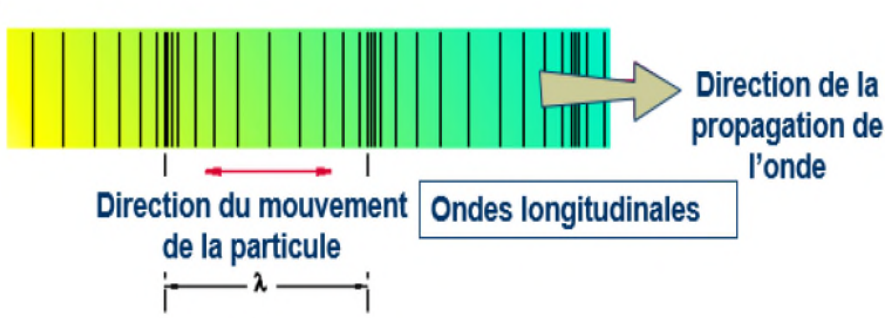



**Figure (1.2)**:les ondes longitudinales**.**

- **Onde transversale (ou de cisaillement)**

Une onde est dite transversale lorsque la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire au sens de vibration des particules **[8].**

La vitesse de l'onde transversale « $V_T$ » :

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{11}-C_{12}}{2\rho}} \qquad (1.10)$$

$\mu$ :Constantes de lame [PA].

$\rho$ : Masse volumique [kg/m$^3$].

$C_{11}, C_{12}$ : constantes élastiques de rigidité du milieu.

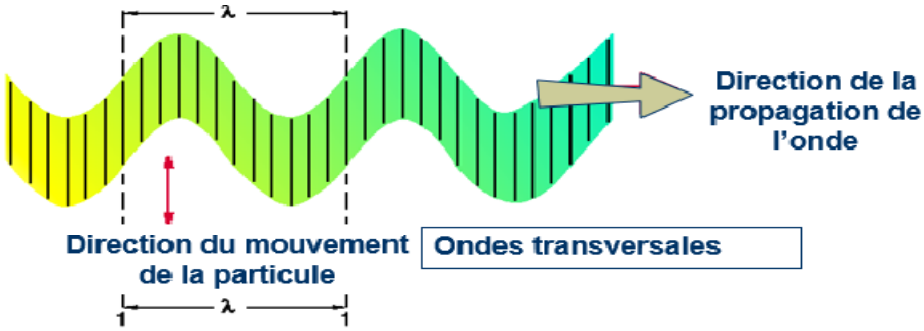



**Figure (1.3):**les ondes transversales.

- **Onde de surface (ou de Rayleigh) :**

On obtient une onde de surface lorsque on superpose une onde de mode longitudinale et une onde de mode transversale de même direction parallèle a la surface d'un solide **[8].**

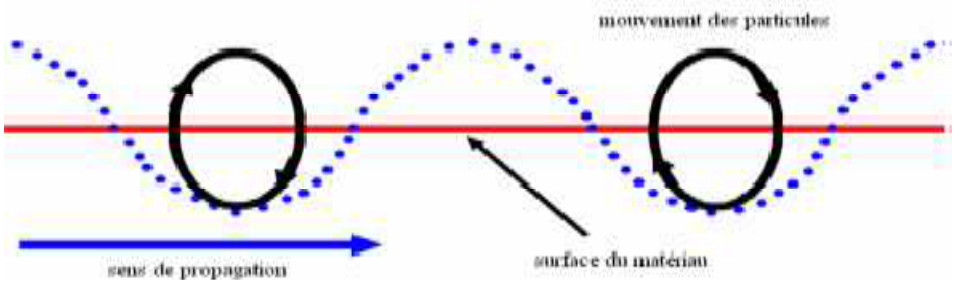



**Figure (1.4)** propagation d'une onde de surface.

- **Les ondes de Love**

Lorsque les ondes de surface se propagent dans un matériau (substrat) recouvert d'une couche telle que la vitesse transversale y est inférieure à celle dans le substrat, elles deviennent purement transversales et dispersives. Ces ondes sont appelées ondes de Love**[9].**

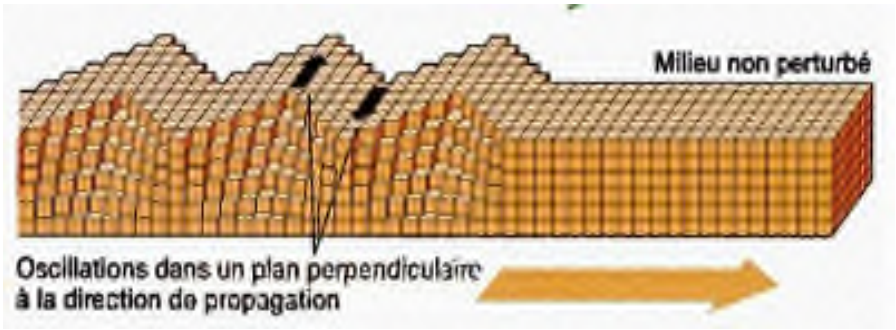



**Figure (1.5):**les ondes de Love.

- **Onde de plaque (ou de Lamb)**

Lorsqu'une plaque d'épaisseur voisine de la longueur d'onde est soumise à une onde de surface, cette dernière disparait en faisant apparaitre deux type d'ondes plaque appelées onde de Lamb symétrique et antisymétrique.

Dans le mode symétrique, les particules sure les deux faces de la pièce vibrent en opposition de phase en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque le mouvement vibratoire des particules est longitudinal.

Dans le mode antisymétrique, les particules sur les deux faces de la pièce vibrent en phase, en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque, le mouvement vibratoire des particules est transversal **[8]**

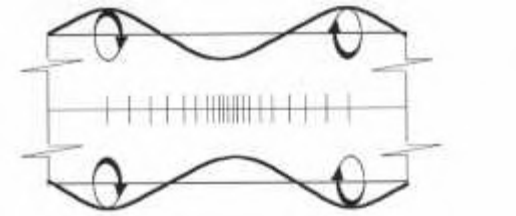
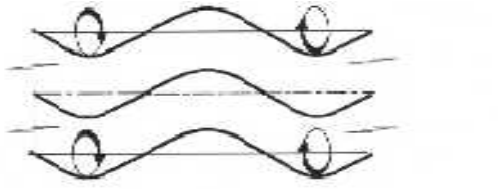


Figure.(1.6 )propagation d'une onde De plaque symétrique



Figure(1.7) propagation d'une onde De plaque antisymétrique

## 1.2. Système de test ultrasonore

### 1.2.1. L'émetteur/récepteur

L'émetteur récepteur à ultrasons est un appareil qui permet non seulement l'excitation électrique du transducteur émetteur, mais aussi le traitement des signaux captés par le transducteur récepteur.

### 1.2.2. Transducteur ultrasonore

Un transducteur ultrasonore (Figure1.8) est un émetteur ou un capteur ponctuel à contact (il existe également des transducteurs immergés ou air-matériau-air). La majorité des transducteurs utilisent l'effet piézoélectrique pour transformer une onde mécanique en tension électrique (et inversement). En appliquant une tension électrique (signal d'émission) sur un cristal piézoélectrique, le cristal se comprime et se décomprime alternativement et émet une vibration dont la fréquence dépend des caractéristiques du cristal. Le même élément est utilisé pour transformer en tension électrique les ultrasons qui reviennent vers la sonde **[10].**



Figure (1.8): Transducteur ultrasonore (Source acoustique , type SH10).

Les principaux éléments d'un transducteur, sont l'élément actif, les électrodes pour l'excitation et la réception du signal, le milieu arrière qui joue le rôle d'amortisseur (amélioration de la bande passante) et la face avant d'adaptation d'impédance. Dans le cas d'un transducteur focalisé celui-ci peut avoir une forme de coupelle sphérique ou être associé à une lentille convergente. La figure représente un transducteur avec ses différents éléments **[11].**

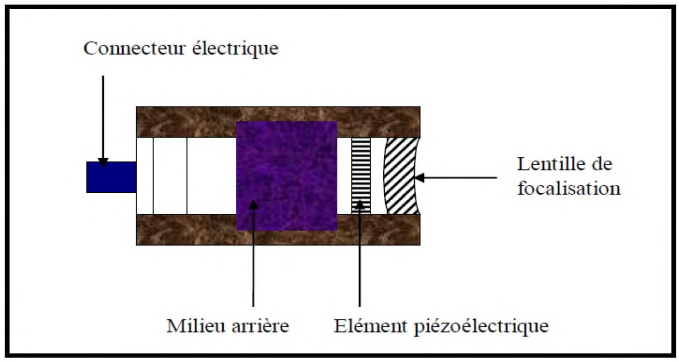



Figure.(1.9).schéma représentant les éléments essentiels d'un transducteur ultrasonore.

- **Effet piezoelectrique**

La piézoélectricité a été découverte par Jacques et Pierre Curie en 1880. La piézoélectricité est la propriété que présentent certains corps de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ce comportement, spontané dans le cas de plusieurs cristaux tels que le quartz, est dû à la structure cristalline. Une action mécanique provoque l'apparition d'un dipôle électrique dans chaque maille cristalline du matériau, par déplacement des centres des charges positives et négatives. L'équilibre électrostatique est rompu et une polarisation apparaît à la surface du cristal. C'est l'effet piézoélectrique direct, illustré sur la figure (1.10). Dans le cas du quartz **[12]**

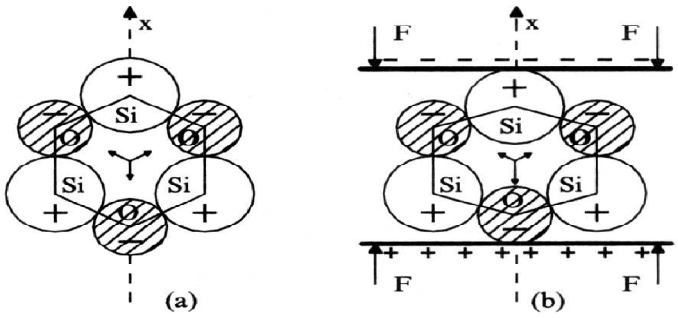



**Figure (1.10)** : Effet piézoélectrique direct dans l'exemple du quartz.

Réciproquement, l'application d'un champ électrique provoque une déformation mécanique du matériau. C'est l'effet piézoélectrique inverse. Notons que l'absence de centre de symétrie dans la maille élémentaire est nécessaire à l'apparition de l'effet piézoélectrique **[12].**

Les effets piézoélectriques direct et inverse sont illustrés sur la figure (1. 11)

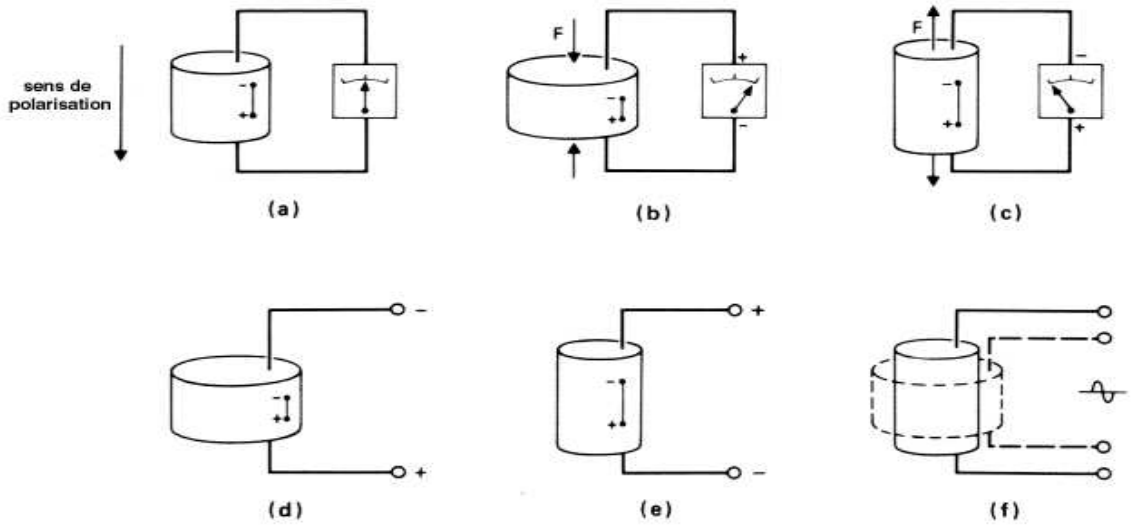



**figure (1.11)** : Effets piézoélectriques direct ((a), (b) et (c)) et inverse ((d), (e) et (f)) pour un cylindre de céramique piézoélectrique polarisé suivant son axe**.**

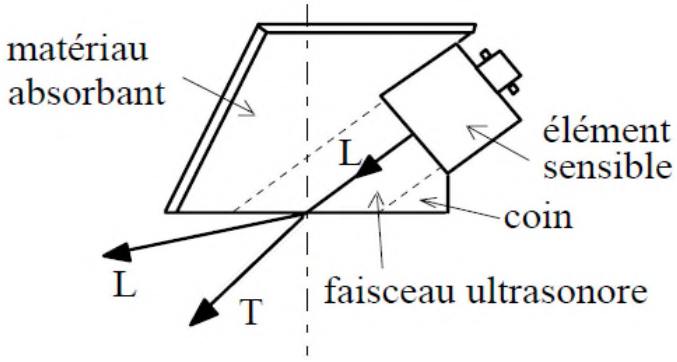
### 1.2.2.1. Types de transducteurs

**Les transducteurs de contact**: sont des capteurs piézoélectriques qui sont collés par l'intermédiaire d'un couplant a la surface d'un matériau a sonder. Du fait des irrégularités de surface du capteur et de l'échantillon a sondé, le couplant dépend de la nature des ondes à générer. Si les capteurs sont des transducteurs a ondes de cisaillement, le gel doit être très visqueux, tel le miel par exemple, afin d'assurer la continuité des efforts de cisaillement entre le capteur et l'échantillon. Si les capteurs sont des transducteurs a ondes longitudinales, le gel doit être aqueux et donc peu visqueux, afin d'assurer la continuité des efforts de compression entre le capteur et l'échantillon. **[13].**

**Les transducteurs d'angle***:*

Permettent un contrôle sous incidence oblique (voir Fig1.12.) l'interaction d'une onde incidente longitudinale avec une interface séparant deux milieux solides génère, dans le cas isotrope et suivant l'angle d'incidence, soit deux ondes propagatives (une onde longitudinale et une onde transversale) soit une seule onde propagative (onde transversale) dans le milieu de transmission.

C'est ce que l'on appelle la conversion de mode. Lorsque ces transducteurs sont à angle fixe, ils sont adaptés à un matériau donné. La dénomination courante de "transducteur en OT à 45°" ne signifie donc pas que ce transducteur génère des ondes transversales faisant un angle de 45° avec la normale à l'interface dans tous les cas, mais seulement pour un matériau particulier **[14].**




**Figure(1.12):** Transducteur d'angle.

**Le transducteur à immersion** :est un transducteur d'ondes longitudinales à un seul élément avec une couche de 1/4 de longueur d'onde qui est adaptée acoustiquement à l'eau.

Il est conçu pour la transmission d'ultrasons dans des applications avec des pièces d'essai qui sont entièrement ou partiellement immergées dans l'eau. Il fournit un accouplement rapide et uniforme pour le balayage rapide des pièces. Les performances et la sensibilité du transducteur dans une zone spécifique peuvent être augmentées en ajoutant une lentille de mise au point. Le foyer du transducteur à immersion peut être cylindrique ou sphérique en fonction de la demande dans la plage focale autorisée d'une taille d'élément et d'une fréquence données**[15].**

**Les transducteurs focalisés**:

Sont utilisés afin d'augmenter la finesse de résolution du contrôle, et concentrent le faisceau ultrasonore autour d'un point. La focalisation est obtenue soit au moyen d'une lame piézoélectrique incurvée, soit par focalisation électronique ou encore grâce à une lentille acoustique **[13][14].**



**Figure(1.13):** Transducteur focalisant**.**

**Les transducteurs à couplage par air** : permettent de s'affranchir de la nécessité d'un couplant entre le transducteur et la pièce à contrôler. Toute la difficulté réside dans la très grande différence d'impédance acoustique entre l'air et les matériaux couramment utilisés.

Dans ce type de configuration, l'amplitude reçue par le transducteur récepteur est réduite d'un facteur très important par rapport à un couplant classique **[13][14].**

**Les transducteurs droits ou plans***:* fonctionnent suivant le principe décrit précédemment. L'onde se propage perpendiculairement à la face avant du transducteur.

**Les transducteurs doubles***:* séparent la fonction d'émission de la fonction de réception et comportent donc deux éléments sensibles **[14].**

**Les transducteurs à ondes transversales**: nécessitent l'utilisation d'un couplant visqueux. 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 transversales par conversion de mode **[14].**

**Les barrettes linéaires de transducteurs**: sont constituées de multiples transducteurs élémentaires alignés, ce sont de véritables antennes qui permettent de focaliser le faisceau et/ou de faire des balayages électroniques très rapides (linéaires ou sectoriels) **[13][14].**

### 1.2.2.2. Le faisceau ultrasonore (acoustique) :

Les sources ultrasonores présentent une caractéristique directionnelle fortement marquée, les valeurs nominales des amplitudes de pression ne peuvent être détectées que dans un faible secteur de l'espace.

La partie la plus importante du champ acoustique, présentant une signification pour le contrôle, se limite à un faible secteur du champ que l'on décrit par le faisceau acoustique. On peut décomposer ce faisceau en deux zones **[8]:**

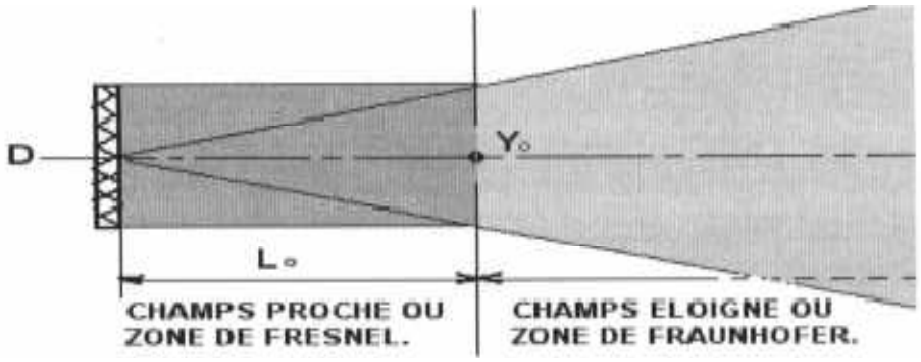



**Figure ( 1.14):**les zones du faisceau acoustique**.**

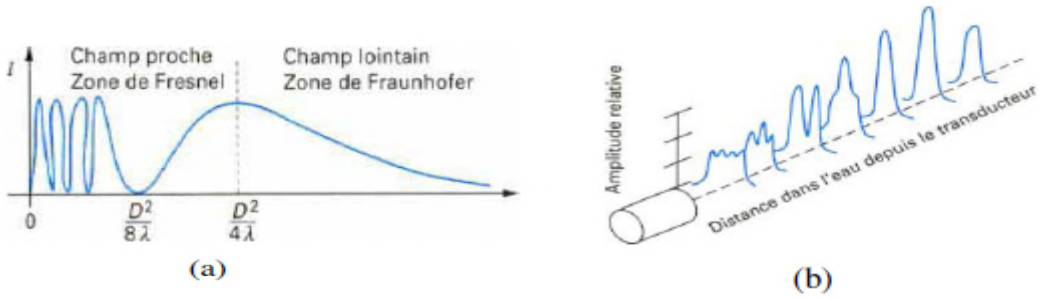
- **le champ proche (ou zone de Fresnel) :**

Le champ proche est la zone près de la sonde où la pression acoustique passe par une série de maximums et de minimums. Il se termine au dernier maximum sur l'axe à une distance $L_0$ de la face de la sonde. La distance $L_0$ du champ proche représente le centre naturel de la sonde.

$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \qquad (1.11)$$

D: diamètre du cristal piézoélectrique.

λ:Longueur d'onde dans le matériau.




**Figure(1.15):** Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (a). Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore, en différents points de l'axe (b).

- **Champ éloigné (zone de Fraunhofer):**

Le champ éloigné est la zone au-delà de la valeur $L_0$ où la pression sonore diminue progressivement jusqu'à zéro à mesure que le diamètre du faisceau se dilate et que son énergie se dissipe **8]**.

$$\sin\theta = \frac{k\lambda}{L_0} = \frac{kc}{fD} \qquad (1.12)$$

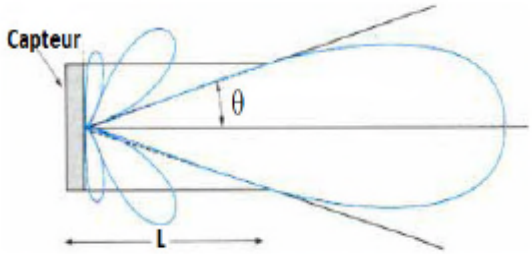
Avec :

$L_0$: diamètre du cristal.

λ : Longueur d'onde.

K : constante dépend de la géométrie de la source.

$\theta$: demi-angle du cône.




**Figure(1.16)** :Divergence du faisceau d'ultrasons.

## 1.3. Ondes ultrasonique dans la matière

### 1.3.1. Equation du mouvement

#### 1.3.1.1. Equation d'onde ultrasonique dans un fluide homogène

Dans un milieu fluide les ondes élastiques satisfont à l'équation des ondes :

$$\Delta p - \frac{1}{V^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.13)$$

où $p = p(\vec{r}, t)$ est une représentation scalaire décrivant le champ au point $\vec{r}$ et au temps t, qui peut être la pression acoustique par exemple, et v est la vitesse de propagation dans le milieu considéré **[9][16].**

#### 1.3.1.2. Fonction d'onde ultrasonore

- Une onde est le lieu géométrique des particules dans le même état vibratoire **[8].**
- onde progressive harmonique se propageant selon Ox est définie par **[17]:**

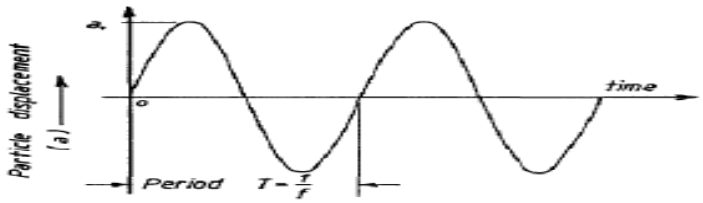



Figure (1.17):onde ultrasonore.

$$U = A\cos(\omega t - kx) \qquad (1.14)$$

Avec
U : élongation instantané.
ω :Pulsation de mouvement.
A : l'amplitude.
t : temps.
k : la vecteur d'onde.
C : Vitesse de propagation de l'onde [m/s]
$f$ : Fréquence d'oscillation [Hz].

- appelons φ la phase globale de l'onde:

$$\varphi = (\omega t - k x)$$

- représentation complexe des fonctions sinusoïdales:

$$U = Ae^{i(\omega t - kx)} \qquad (1.15)$$

### 1.3.1.3. Equation d'onde dans les solides homogènes

Dans un milieu solide isotrope, homogène et en l'absence de forces extérieures, le champ de déplacement $\vec{u}$ des particules du solide vérifie l'équation:

$$(\lambda + \mu)\overrightarrow{\nabla}\overrightarrow{\nabla}.\vec{u} + \mu\nabla^2\vec{u} = p\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2} \qquad (1.16)$$

$\lambda$ et $\mu$, sont les constantes de Lamé.

où $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t)$ désigne le déplacement de matière au point $\vec{r}$ et au temps t.

En exprimant les coefficients $\lambda$ et $\mu$ en fonction des vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales la relation (1.19) devient :

$$v_T^2\,\Delta\vec{u} + (v_L^2 - v_T^2)\,\overrightarrow{\nabla}\overrightarrow{\nabla}.\vec{u} = \frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2} \qquad (1.17)$$

Le vecteur déplacement $\overrightarrow{u}$ peut être décomposé en une somme de deux vecteurs $\vec{u}_L$ et $\overrightarrow{u}_T$ :

$$\vec{u} = \vec{u}_T + \vec{u}_L \qquad (1.18)$$

tels que les vecteurs $\overrightarrow{u_L}$ et $\overrightarrow{u_T}$ vérifient les relations suivantes :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\nabla} \wedge \vec{u}_L = 0 & (1.19) \\ \overrightarrow{\nabla}.\vec{u}_T = 0 & (1.20) \end{cases}$$

Dans ce cas on montre que la relation (1.16) conduit à:

- Onde de compression se propageant a la vitesse: $V_L = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$

$$\Delta\overrightarrow{u_L} - \frac{1}{V_L^2}\frac{\partial^2\overrightarrow{u_L}}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.21)$$

- Onde de cisaillement se propageant a la vitesse : $V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

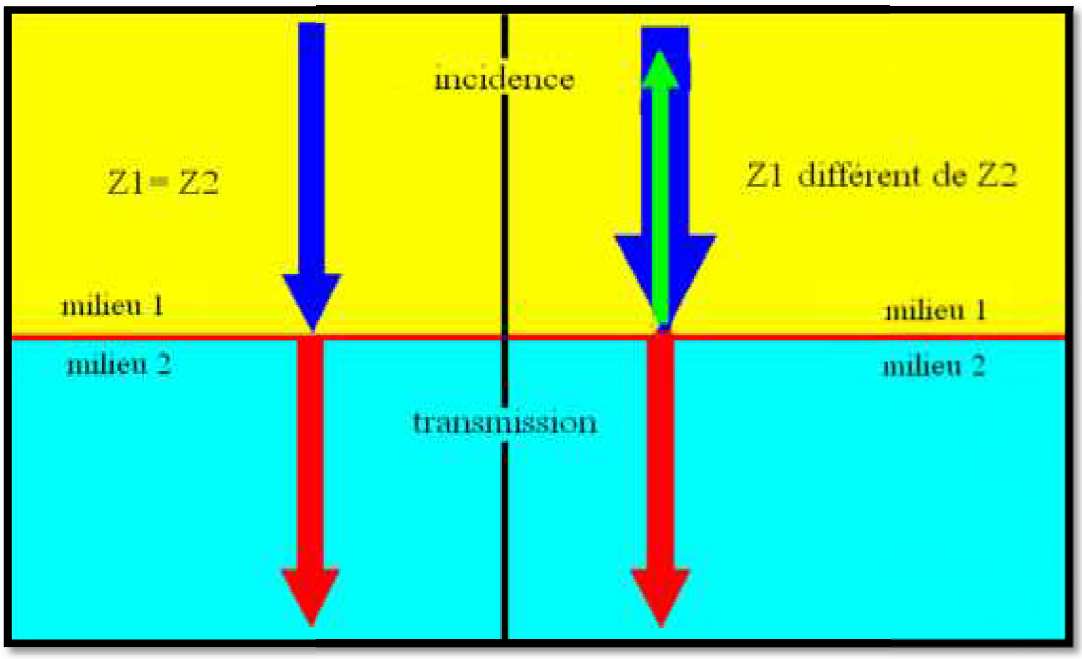
$$\Delta\vec{u}_T - \frac{1}{V_T^2}\frac{\partial^2\vec{u}_T}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.22)$$

Les équations (1.21) et (1.22) décrivent respectivement la propagation des ondes longitudinales et transversales**[9][16]**.

## 1.4. Réflexion et transmission des ondes sonores

### 1.4.1. Réflexion et Transmission à incidence normale

Lorsqu'une onde longitudinale $U_i$arrive perpendiculairement à l'interface de deux milieux (1) et (2) d'impédance acoustique $Z_1$ et $Z_2$, avec une vitesse $V_1$, une partie $U_r$ de l'onde incidente est réfléchie vers le milieu (1) avec une vitesse $V_1$ l'autre partie $U_t$ est transmisse dans le milieu (2) avec une vitesse $V_2$. (Figure.1.18). incidence normal **[8].**




**Figure(1.18):** incidence normal.

Le rapport entre la pression acoustique de l'onde réfléchi $P_r$. et la pression acoustique de l'onde incidente $P_i$ est appelé le coefficient de réflexion r.

avec:

$Z_1$ : impédance acoustique du milieu 1

$Z_2$ : impédance acoustique du milieu 2

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad (1.23)$$

Le rapport entre la pression acoustique de l'onde transmise $P_t$ et celle de l'onde incidente Pi est appelé coefficient de transmission t.

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \qquad (1.24)$$

Les intensités acoustiques réfléchies (Ir) et transmises (It), relativement a l'intensité initiale $I_i$, sont données par les relations suivantes [18] :

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2 \qquad (1.25)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = 1 - R = \frac{4z_2z_1}{(z_2+z_1)^2} \qquad (1.26)$$

### 1.4.2. Réflexion et transmission à Incidence oblique :

Lorsqu'une onde ultrasonore incidente arrive obliquement sur l'interface de deux milieux, trois phénomènes apparaissent : réflexion, réfraction et transformation de mode.

La réflexion est la partie d'énergie réfléchie par le milieu 2 dans le milieu 1, ainsi l'onde transmise subit des changements brusques de direction si les vitesses de propagation sont différentes dans les deux milieux, c'est la réfraction.

Selon la nature des deux milieux et de l'angle d'incidence, l'onde incidente peut subir une transformation de mode en onde longitudinale, transversale ou de surface[8].

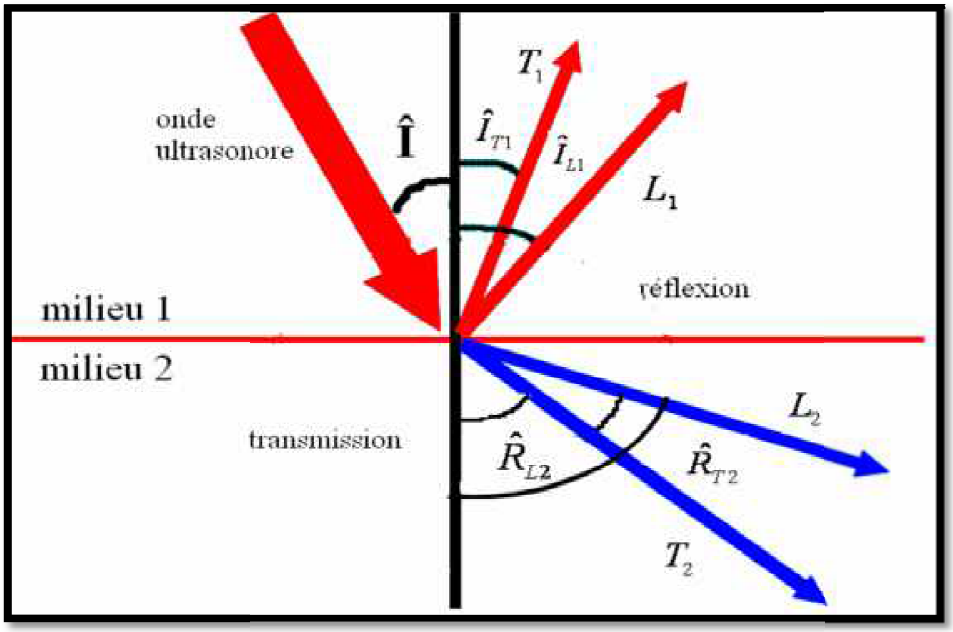



**Figure (1.19):** incidence oblique.

Les angles de réflexion et de réfraction de chaque mode d'onde peuvent se déterminer par la loi de Snell –Descartes :

$$\frac{\sin \hat{I}}{V_{L1}} = \frac{\sin \hat{I}_{L1}}{V_{L1}} = \frac{\sin T_1}{V_{T1}} = \frac{\sin \hat{R}_{L2}}{V_{L2}} = \frac{\sin \hat{R}_{T2}}{V_{T2}} \qquad (1.27)$$

$\hat{\mathbf{I}}$ : Angle d'incidence de l'onde longitudinale.

$\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{L1}}$ : Angle de réflexion de l'onde longitudinale.

$\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{T1}}$: Angle de réflexion de l'onde transversale.

$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{L2}}$: Angle de réfraction de l'onde longitudinale.

$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{T2}}$:Angle de réfraction de l'onde transversale.

$V_{L1,2}$ et $V_{T1,2}$ Vitesses de propagation des ondes Longitudinales et transversales dans le milieu 1 et 2.

Dans ce mode d'incidence il est important de citer les deux angles d'incidence limites existant qui sont : un angle limite d'onde longitudinale et un angle limite d'onde transversale.

Le premier angle limite est calculé en mettant :

$\sin \hat{R}_{L2} = 1$ (à la disparition de l'onde longitudinale) ce qui donne :

$$I_{C1} = \arcsin\left(\frac{V_{L_1}}{V_{L_2}}\right) \qquad (1.29)$$

L'angle critique peut être trouvé par la loi de Snell, en mettant la valeur 90° pour l'angle du rayon réfracte. Pour n'importe quel angle d'incidence plus grand que l'angle critique, la loi de Snell ne pourra pas être résolue pour l'angle de réfraction. Pour l'angle d'incidence critique, une grande partie de l'énergie acoustique est transformée en onde de Rayleigh (de surface). Le deuxième angle critique se produit quand les extensions transversales (ou cisaillement) des rayons réfractes sont de 90° **[18].**

### 1.4.3. Atténuation des ultrasons

Atténuation est une perte d'énergie en fonction des milieux dans lesquelles se propage l'onde, la décroissance d'énergie émise suit une loi exponentielle de la forme **[8]:**

$$U = U_0\, exp^{(-\alpha z)} \qquad (1.30)$$

Avec :

U : énergie à la distance z.

$U_0$ : énergie initiale émise.

z: épaisseur traversée.

$\alpha$: Coefficient d'atténuation.

- **L'absorption de l'onde ultrasonore:**

Toute onde se propageant dans un matériau cède de son énergie à celui-ci cette énergie est transformée en chaleur par le milieu **[8].**

- **Diffusion de l'onde ultrasonore :**

Ce phénomène se produit Lorsque les dimensions de l'interface rencontrée sont petites en comparaison avec la longueur d'onde, l'onde ultrasonore est absorbée dans ce cas puis réfléchies dans toutes les directions **[5].** (figure1.20)

Avec: d dimension de l'interface.

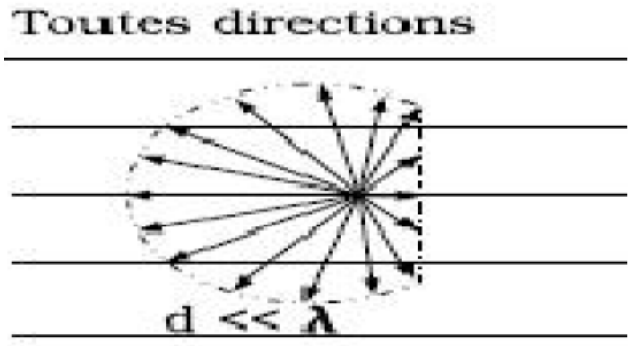



**Figure (1.20):** Phénomène de Diffusion.

# Chapitre2
# Les propriétés élastiques de la matiére

## 2. Les propriétés élastiques de la matière :

### 2.1. Loi de Hooke:

Robert Hooke a introduit en 1678 une loi permettant de relier la déformation d'un ressort à la force exercée. Cette formulation pour le moins littéraire est à l'origine de la notion de raideur des ressorts.

$$F = K.(d - d_0) \qquad (2.1)$$

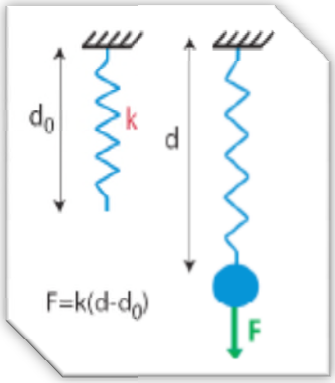



Figure (2.1): Forces appliquées à un ressort.

$d$ : la longueur du ressort.

$d_0$: la longueur à vide du ressort.

K: la constante de raideur

F : l'intensité de la force exercée

- La loi de Hooke est une loi de comportement des solides soumis à une déformation élastique de faible amplitude. Elle a été énoncée par Robert Hooke comme l'allongement est proportionnel à la force. Hooke a considère que la phase élastique est linéaire, donc proportionnelle à la déformation et réversible. La forme la plus simple de la loi de Hooke est **[19]:**

$$\sigma = E.\varepsilon \qquad (2.2)$$

σ :La contrainte

La déformation ε est l'allongement ΔL sur la longueur initiale de l'éprouvette L**. [20]**

E: module d'Young.

- La loi de Hooke peut être étendue au milieu continu tridimensionnel. Cette loi permet de milieu comprendre le lien existant entre les déformations d'un milieu et les contraintes existant au sein de ce milieu. Dans le cas d'un problème tridimensionnelle et en considérant un volume élémentaire, la loi de Hooke permet, dans l'approximation des petites déformations, de relier le tenseur des contraintes $\sigma_{ij}$ au tenseur des déformations $\varepsilon_{kl}$ grâce à un tenseur d'élasticité $C_{ijkl}$ **[21].**

$$\sigma_{ij}=C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad (2.3)$$

**Le tenseur des contraintes** est une représentation utilisée en mécanique des milieux continus pour représenter l'état de contrainte, c'est-a-dire les forces surfaciques (parfois appelées efforts) mises en jeu au sein d'une portion déformée du milieu. Le tenseur est défini en chaque point du solide. L'état de contrainte du solide est donc représenté par un champ de tenseur. On parle aussi de ce fait de champ de contrainte, qui est relie au champ de déformation par la loi de Hooke .Le tenseur des contraintes est symétrique dans un solide quant il est en équilibre (les contraintes et déformations restent constantes dans le temps) [19] :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

$C_{ijkl}$: représente les raideurs élastiques. Ces éléments vérifient les relations**:**

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{jilk} = C_{klij}$$

Ainsi, dans le cas le plus général, seulement 21 des 81 composantes du tenseur $C_{ijkl}$ sont indépendantes **[22].**

**2.2.Module d' Young:**

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinal est un rapport entre la contrainte de traction appliquée a un matériau, et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) il est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte.

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100% de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte. Il ne faut pas confondre élasticité et rigidité puisque la rigidité d'une poutre par exemple dépend de son module de Young mais aussi du moment d'inertie de sa section

Traction-Compression : la contrainte de traction-compression est donnée par **[19]** :

$$\sigma_{\text{traction}}=\frac{F}{S} \qquad (2.4)$$

Le rapport entre l'allongement et la longueur initiale définit la déformation relative qui s'écrit:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \qquad (2.5)$$

La relation qui relie la contrainte $\sigma_{traction}$ et la déformation relative:

$$\sigma_{Traction} = E\ \varepsilon \qquad (2.6)$$

La loi de Hooke (relation contrainte-déformation) se réécrit de la manière suivante **[23]:**

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta L}{L} \qquad (2.7)$$

Module d 'Young :

$$E = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{FL}{S\Delta L} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad (2.8)$$

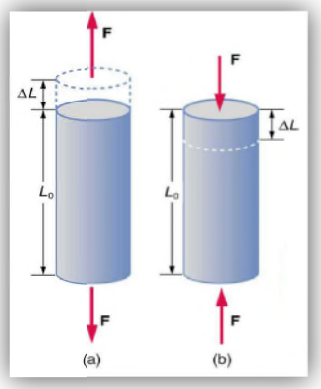



Figure (2.2) la contrainte de traction-compression.

**Tableau (2.1) .**sont rassemblées des valeurs indicatives du module de Young **E.**

| **Matériau** | **Module de Young E (GPa)** |
|---|---|
| **Carbure de silicium , (SiC)** | 426 |
| **Acier** | 210 |
| **Cuivre** | 125 |
| **Aluminium** | 70 |
| **Silicium** | 107 |
| **Pb** | 14 |
| **Ti** | 120 |

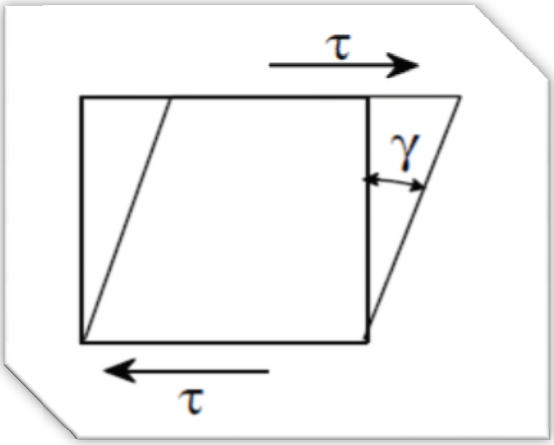
### 2.3. Module de cisaillement:

Le module de cisaillement ou module de glissement est une constante qui relie la contrainte de cisaillement ou encore module de traction ou encore module de Coulomb et la déformation pour un matériau élastique isotrope **[24].**

La déformation produite par les tensions τ résultant d'un couple de forces tangentielles est le cisaillement pur. Elle se traduit par une déformation angulaire dont l'angle $\gamma$ est proportionnel à τ ; c'est le second aspect de la loi de Hooke **[25]** :

$$\tau = G \cdot \gamma \qquad (2.9)$$

G est le module de cisaillement ou module de coulomb. [G] = N $m^{-2}$

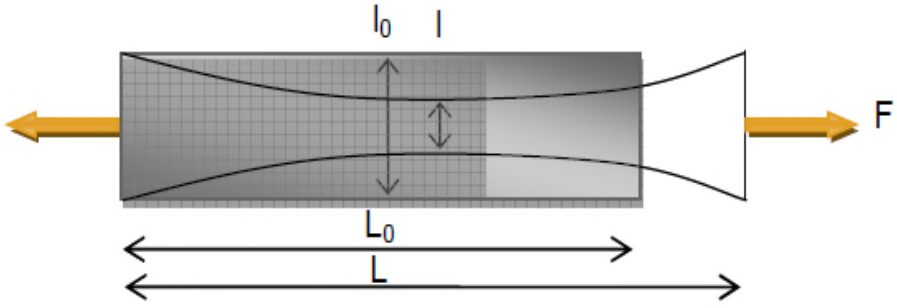



**Figure(2.3)** :Cas du glissement simple.

### 2.4. Coefficient de Poisson :

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué **[24].**

$$\nu = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L_0 - L)/L_0} \qquad (2.10)$$



Les trois constante E,G, et ν ne sont pas indépendantes, mais sont reliés par[24] :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (2.11)$$

E: module d' Young

G: module de cisaillement

ν: coefficient de poisson

**2.5.Module de compression** :

Le dernier type de déformation simple que nous allons envisager est une compression sous l'effet d'une pression $P$ , nous observons une variation de volume $\Delta = \Delta V / V$.

Il existe alors une relation simple entre la pression $p$ et la variation relative du volume donnée par **[4]:**

$$p = -K\,\Delta \qquad (2.12)$$

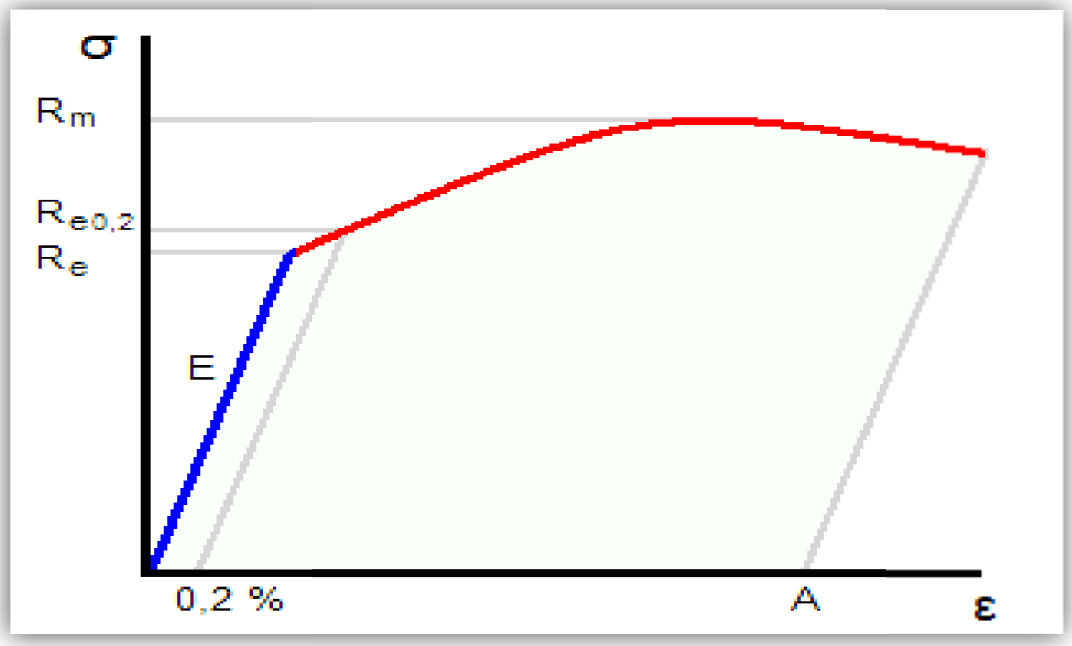
ou: $K$ est le module de compressibilité volumique**.**

**Tableau(2.2)** le valeur de module compressibilité volumique.

| **Matériau** | **K (Gpa)** |
|---|---|
| Acier | **160 Gpa** |
| Eau | **2.2 Gpa** |
| Air | **0.0001 Gpa** |

**2.6. Limites d'élasticité:**

Expérimentalement, on défini pour chaque matériau une contrainte limite admissible au-delà de laquelle la pièce subit des détériorations de ses caractéristiques mécaniques, dimensionnelles, voire une rupture. Donc il faut vérifier que les contraintes engendrées par les sollicitations extérieures ne dépassent pas la contrainte limite admissible par le matériau. Le calcul des contraintes sert a évaluer la tension dans la matière.




**Figure(2.4):** La courbe contrainte-déformation.

Avec: σ :contrainte , ε :déformation

La résistance à la traction $R_m$, contrainte maximale observée (avant la striction) la limite d'élasticité conventionnelle $Re_{0.2}$, donnent la contrainte nécessaire pour la déformation plastique de 0,2%(on utilise également avec la même convention la quantité $R_{0,1}$ pour les matériau) . La limite d'élasticité $R_e$, marque le début de la déformation plastique (irréversible) du matériau. L'allongement à la rupture A est déformation maximale admissible par le matériau avant la rupture**[26].**

La limite d'élasticité est la contrainte a partir de laquelle un matériau commence à se déformer de manière irréversible. C'est la zone en rouge sur le graphique dans la figure (2.4), au-delà du domaine élastique représenté en bleu. Les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction **[19]**

**La déformation élastique** est une déformation réversible, c'est-a-dire lorsque on supprime les sollicitations le milieu retourne à son état initial. L'élasticité linéaire concerne les petites déformations proportionnelles à la sollicitation. Dans cette gamme, l'allongement est proportionnel à la force dans le cas d'un étirement, et l'angle est proportionnel au couple dans le cas d'une torsion. Aux plus grandes déformations, l'élasticité devient non linéaire pour certains matériaux.

Pour d'autres, la fracture ou le fluage interviennent. La déformation élastique intervient pour les faibles sollicitations. Si l'on augmente les sollicitations, on change le mode de déformation **[19].**

**La déformation plastique** La déformation plastique se caractérise par une modification de la position des atomes du matériau auquel on applique une force. Lorsque cette force cesse, les atomes ne retrouvent pas leur position d'origine : la déformation est irréversible.

**Tableau (2.3):** quelques propriétés mécaniques de quelques matériaux.

| **Matériau** | **$R_e$ en MPa** | **$R_m$ en MPa** | **AR en o/o** |
|---|---|---|---|
| **Aciers inoxydable austénitiques** | 286-500 | 760-1280 | 45-65 |
| **Aciers au carbone (traités)** | 260-1300 | 500-1880 | 20-30 |
| **Aciers faiblement allies** | 500-1980 | 680-1400 | 2-30 |
| **Aciers doux** | 220 | 430 | 18-25 |
| **Fer** | 50 | 200 | 30 |
| **Aluminium** | 40 | 200 | 50 |
| **cuivre** | 60 | 400 | 55 |

# Chapitre 3
# Etude Expérimentale

# 3. Etude Expérimentale

## 3.1.Introduction:

La caractérisation des matériaux par les ondes ultrasonores consiste en la détermination de la vitesse de propagation de ces ondes et leur atténuation lors de leur propagation dans ces matériaux. Deux techniques sont habituellement utilisées, la technique par transmission et la technique par réflexion. La technique par transmission utilise deux transducteurs placés sur deux faces parallèles du matériau à étudier, tandis que la méthode par réflexion n'utilise qu'un seul transducteur qui joue le rôle d'émetteur – récepteur. Le principe des méthodes de caractérisation ultrasonore réside, en la génération des ondes ultrasonores dans le milieu à étudier et la détection des signaux réfléchis ou diffusés **[27]**.

Ces signaux sont caractérisés par leurs amplitudes et leurs instants d'arrivée. Lors de sa propagation à travers un milieu, le signal acoustique subit un retard et une atténuation due à son interaction avec ce dernier. La vitesse est déterminée à partir de la mesure du temps de propagation pour une longueur donnée de l'échantillon à caractériser.

Les méthodes impulsionnelles offrent l'avantage d'être rapides, souples et efficaces car, contrairement aux méthodes harmoniques, une seule mesure permet d'exploiter une large gamme de fréquences.

La méthode par réflexion a été choisie car elle offre les avantages suivants.

- ✓ L'utilisation d'une seule face de l'échantillon.
- ✓ Il n'y a pas de problème d'alignement pouvant entraîner une difficulté particulière d'alignement des transducteurs.
- ✓ Elle est de mise en œuvre plus facile.

Cette méthode permet la détermination des caractéristiques de propagation des ondes de volume (vitesse de phase et atténuation) liées aux propriétés mécaniques du milieu. La mesure de la vitesse de phase et de l'atténuation permet de déduire les propriétés mécaniques du milieu de propagation telle que le module de Young, le coefficient de Poisson et les constantes d'élasticité des matériaux ainsi que la détermination de la différence d'épaisseur entre deux échantillon par la méthode ultrasonore .

- La mesure de ces caractéristiques nécessite le calcul de la différence de temps de vol (le temps que fait l'onde pour aller de l'émetteur au récepteur). Sa détermination est possible grâce à trois méthodes :

- Mesure de l'intervalle de temps par lecture directe des instants d'arrivée des différents échos.

- Utilisation de la transformée de Hilbert.

- Utilisation de la méthode d'inter corrélation.

cette dernière est basée sur le calcul de la fonction d'inter-corrélation entre deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ définie par**[27]:**

$$C_{s1\,s2}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\tau)\, S_2(t+\tau) d\tau \qquad (3.1)$$

Si $\Delta t$ est le temps de vol entre ces deux signaux et si on suppose que le signal garde la même forme au retard $\Delta t$ près, la fonction d'inter corrélation présentera alors un maximum à $t = \Delta t$.

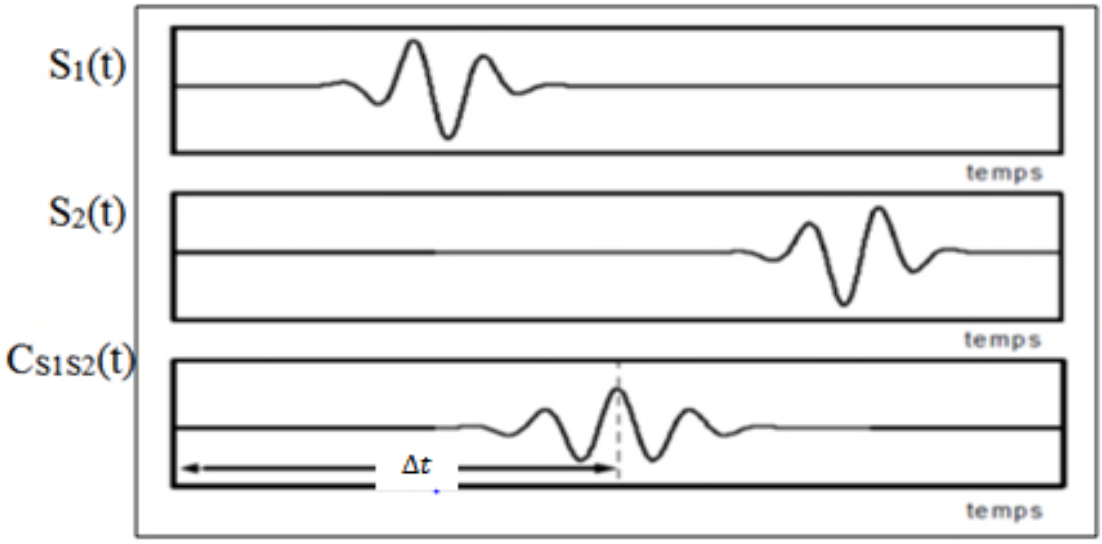
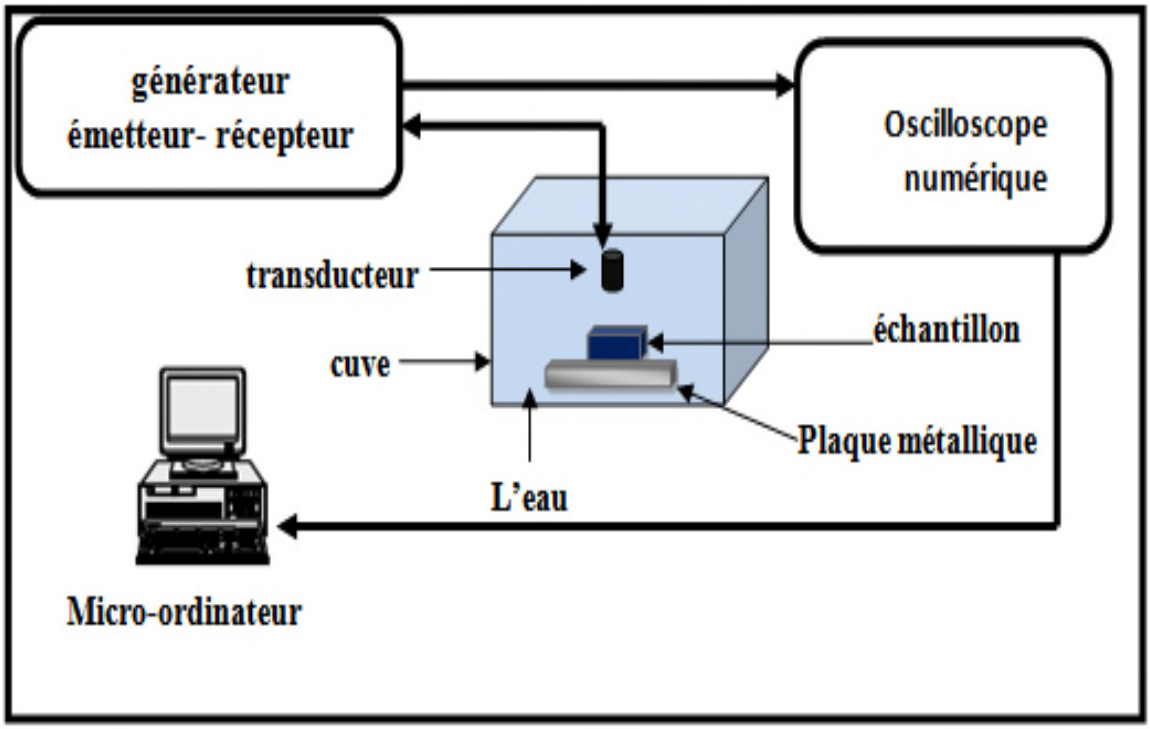



**Figure (3.1 ) :** Représentation de la méthode d'intercorrélation.

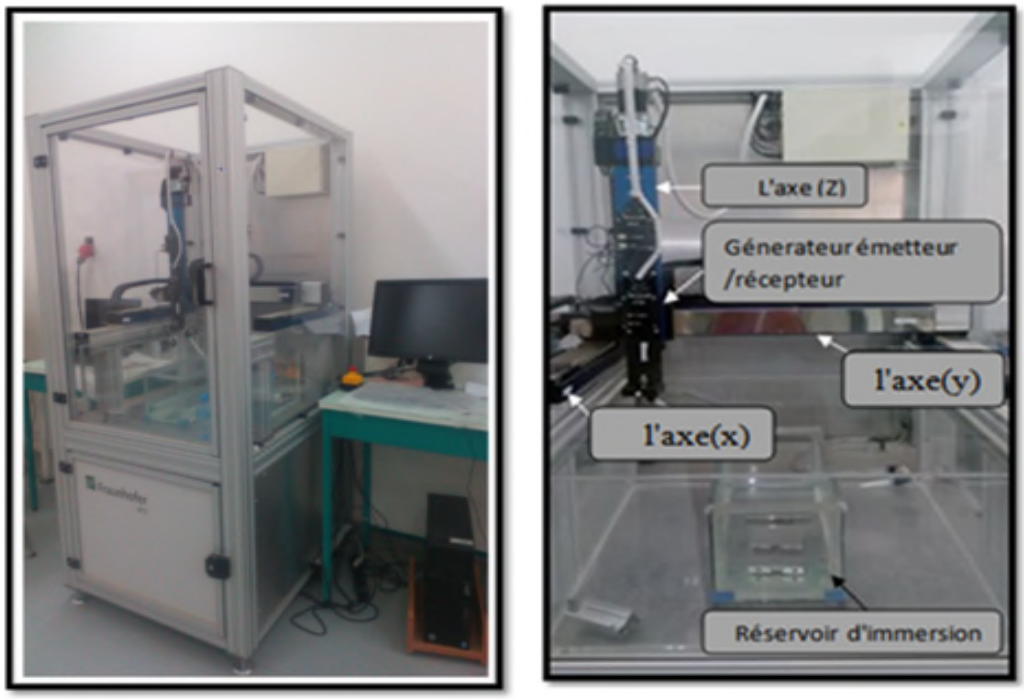
## 3.2. Montage expérimental :

La figure (3.2) représente le dispositif expérimental. Il est composé d'une cuve remplie d'eau, au fond de laquelle nous plaçons une plaque métallique, supportant les deux échantillons. Des transducteurs de marque, plans, circulaires, et de fréquences nominales 3.5Mhz. Le transducteur ultrasonore est suspendu au dessus des échantillons par un axe fixé coulissant sur des rails. Il est relié à un générateur émetteur-récepteur. Le générateur transmet le signal reçu du transducteur vers un oscilloscope numérique contrôlé par un micro- ordinateur permet de visualiser et d'échantillonner les différents échos qui seront traités à l'aide de programmes développés sous MATLAB.




**Figure(3.2 )**: Schéma du montage expérimental.

### 3.2.1.Composants du dispositif expérimental :




Figure(3.3):Variable Ultrasonic Scanner “VariUS”.

Le scanner à ultrasons «VariUS» est un outil de laboratoire destiné à l'évaluation d'échantillons, de pièces de construction ou d'objets solides similaires, par ondes ultrasonores dans une cuve d'immersion. Il est possible de monter et de connecter différents types de transducteurs ultrasonores sur le scanner à trois axes et de scanner un objet dans les trois plans possibles (plan XY, plan XZ, plan YZ).

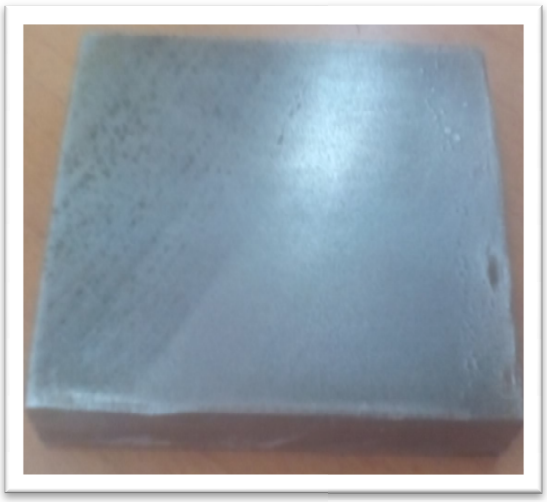
Le scanner, le récepteur d'impulsions et le numériseur sont contrôlés par le logiciel «Ultrasonic Scanner Controller», installé sur le poste de travail. Avec le logiciel, il est possible d'effectuer tout le paramétrage du matériel et la numérisation, d'afficher en direct scans A et l'analyse du spectre, d'effectuer des scans B et C avec affichage des résultats et également de stocker des données brutes pour le traitement du signal par le logiciel désiré.

**3.2.2.échantillons étudiés:** nous avons utilisés deux échantillons du même matériau (acier x70) mais de différents épaisseurs et un échantillon d'aluminium.

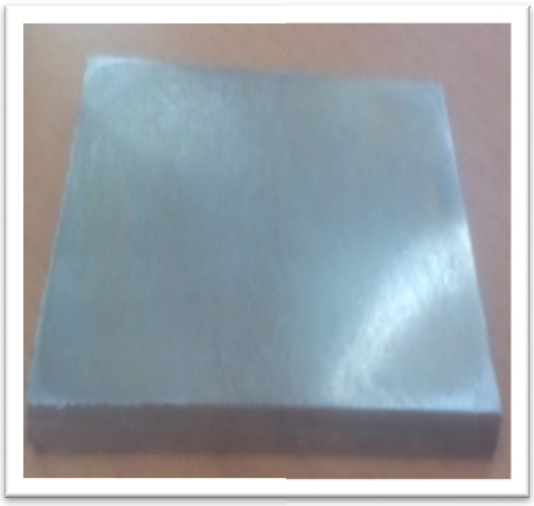
les épaisseurs des différents échantillons, mesurées par pied à coulisse sont données dans le tableau suivant:

**Tableau (3.1):** représentant l'épaisseur (acier X70 et Aluminium).

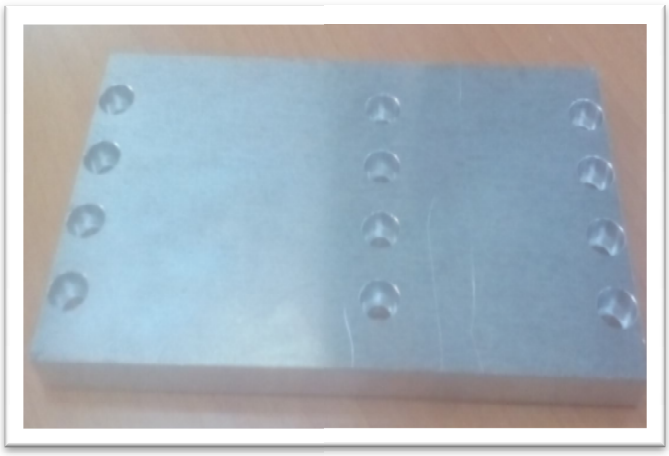
| Echantillon | Acier X70 | Aluminium |
|---|---|---|
| **(1)** | 10.15 mm | 15mm |
| **(2)** | 14.65 mm | / |



a) acier x70(grand échantillon )



b) acier x70 (petite échantillon)



c) aluminium (AlMg0.5)

figure( 3.4 ) :échantillon pour test par ultrasons.

**Tableau (3.2)** : données disponibles des échantillons.

| | **Densité (kg/m$^3$)** | **$C_L$(m/s)** | **$C_S$(m/s)** | **E(GPa)** | **ν** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Aluminium(ALMg0.5)** | 2700[ii] | 6420[iii] | 3040[iii] | 69[ii] | 0.34[iii] |
| **Acier X70** | 7800 | 5980[iii] | 3297[iii] | 200[i] | / |

## 3.3. Mesure des vitesses

### 3.3.1. Mesure de la vitesse dans l'eau

La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans l'eau est déterminée en mesurant le temps de vol de l'onde ultrasonore.

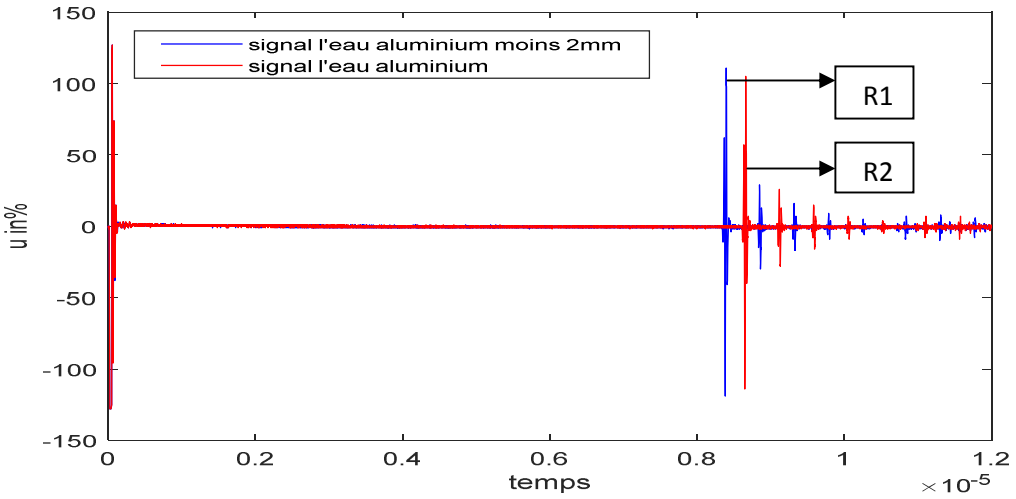



Figure (3.5) : $R_1$ et $R_2$ signaux de la 1ere réflexion sur la face avant de l'échantillon ayant une différence de parcours de 2mm dans l'eau.

En supposant que la vitesse de propagation dans l'eau $C_{eau}$ est constante, elle peut être obtenue par la différence du temps de vol $\Delta t_{vol}$ entre les deux signaux reçus ayant une différence de parcours L dans l'eau à partir d'un même signal émetteur :

$$C_{eau} = \frac{l}{\Delta t_{vol}} \tag{3.2}$$

où $C_{eau}$ les vitesses de propagation des ultrasons dans l'eau.

$\Delta t_{vol}$: différence de temps entre le signal dans l'eau + aluminium et le signal dans l'eau + aluminium moins 2mm.

L'erreur de calcule est déterminé par :

$$C_{eau} = \frac{l}{\Delta t} \tag{3.3}$$

$$\log C_{eau} = \log l - \log \Delta t \tag{3.4}$$

$$\frac{dC_{eau}}{C_{eau}} = \frac{dl}{l} - \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} \tag{3.5}$$

$$\frac{\Delta C_{eau}}{C_{eau}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} \tag{3.6}$$

$$\Delta C_{eau} = C_{eau}\left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t}\right) \tag{3.7}$$

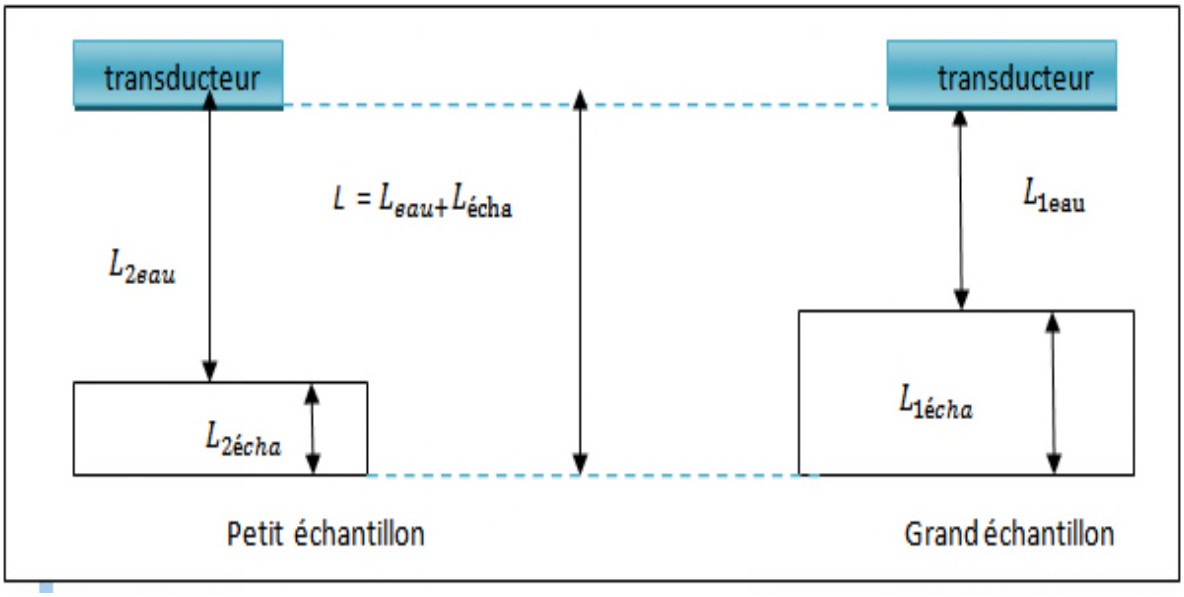
Le tableau suivant montre la valeur expérimentale de vitesse dans l'eau.

**Tableau (3.3)** : représente la valeur expérimentale de la vitesse des ultrasons dans l'eau.

| **La distance (2mm)** | **La vitesse de l'eau (m/s)** |
|---|---|
| **Valeur expérimentales** | 1498 |
| **Valeur référence (27c°)** | 1480 |
| **L'erreur $\Delta c_{eau}$** | 15.27 |

## 3.3.2. Mesure de la différence de hauteur entre les deux échantillons :

Soient les temps de vol du premier signal réfléchi sur la face arrière du petit et du grand échantillon respectivement correspondant à un parcours aller-retour dans l'eau et l'echantillon.




On considère la distance $L$ parcourue par le signal reçu par le transducteur. où $L_{1eau}$et $L_{2eau}$ sont les distances parcourues par l'onde dans l'eau, $L_{1écha}$et $L_{2écha}$celles parcourues dans les échantillons.

$$L = L_{1eau} + L_{1écha} = L_{2eau} + L_{2écha} \quad (3.8)$$

$$L_{2eau} - L_{1eau} = L_{1écha} - L_{2écha} = \Delta L \quad (3.9)$$

Pour acier x70, nous utilisons le premier signal réfléchi de chaque échantillon.

$$t_1 = \frac{2L_{1eau}}{c_{eau}} + \frac{2L_{1écha}}{c_{écha}} \quad (3.10)$$

$$t_2 = \frac{2L_{2eau}}{c_{eau}} + \frac{2L_{2écha}}{c_{écha}} \quad (3.11)$$

$t_2$ et $t_1$ les temps de vol du signal réfléchi sur la face arrière du grand et du petit échantillon respectivement.

où $C_{eau}$ et $C_{écha}$ sont les vitesses de propagation des ultrasons dans l'eau et dans le l'échantillon respectivement.

La différence entre ces temps de vols est :

$$\Delta t = \frac{2(L_{1écha} - L_{2écha})}{C_{eau}} \quad (3.12)$$

La différence de hauteur entre les deux échantillons est alors :

$$L_{1écha} - L_{2écha} = C_{eau}\frac{\Delta t}{2} \quad (3.13)$$

l'erreur calculé est déterminé par :

$$log\Delta l = logC_{eau} + log\frac{\Delta t}{2} \tag{3.14}$$

$$log\Delta l = logC_{eau} + log\Delta t - \log(2) \tag{3.15}$$

$$\frac{d(\Delta l)}{\Delta l} = \frac{dC_{eau}}{C_{eau}} + \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} \tag{3.16}$$

$$\frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} = \frac{\Delta(C_{eau})}{C_{eau}} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} \tag{3.17}$$

$$\Delta(\Delta l) = \Delta l\left(\frac{\Delta(C_{eau})}{C_{eau}} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t}\right) \tag{3.18}$$

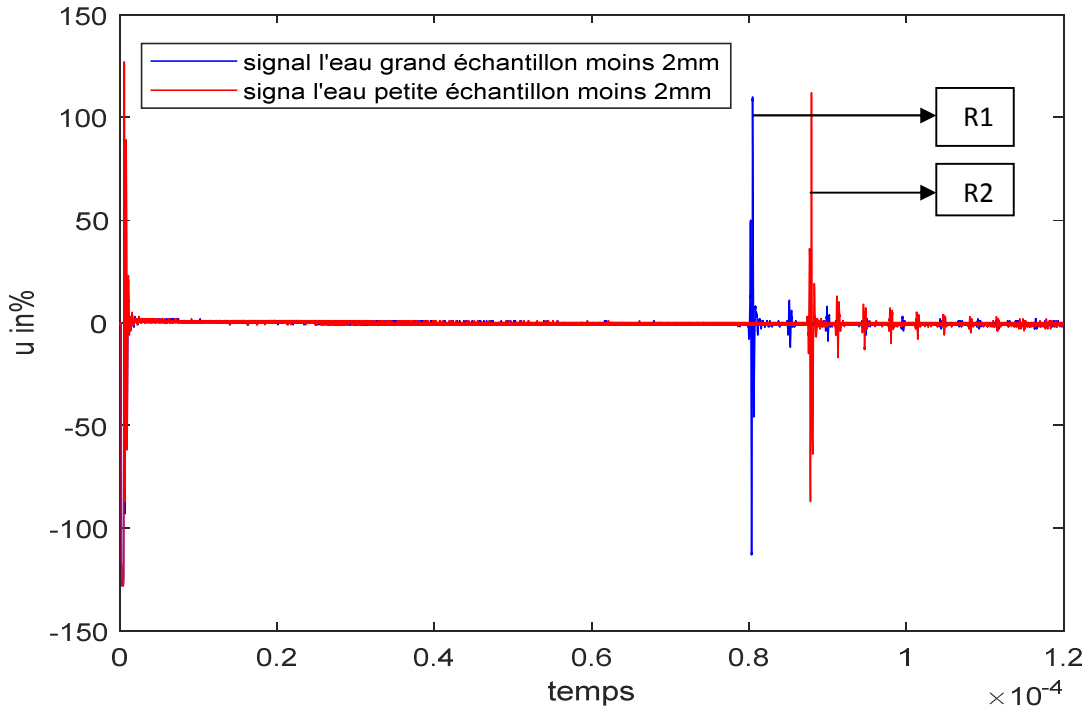



Figure (3.6). $R_1$ et $R_2$ signaux de la 1ere réflexion sur la face avant du grand et du petit échantillon.

L'onde US se propageant dans l'eau, arrive à la première face de l'échantillon. Une partie de cette onde se réfléchit, donnant lieu au signal permettant le calcul de la hauteur d'échantillon.

**Tableau (3.4)** : valeur expérimentales de La différence de hauteur entre le grand et le petit échantillon.

| | La différence de temps $\Delta t$ (µs) | La différence de hauteur d'échantillon (mm) |
|---|---|---|
| **Valeur expérimentales** | 6.668 | 4.90 |
| **Valeur référence (Mesurée par pied à coulisse)** | / | 4.50 |
| **L'erreur $\Delta(\Delta l)$** | / | 0.05 |

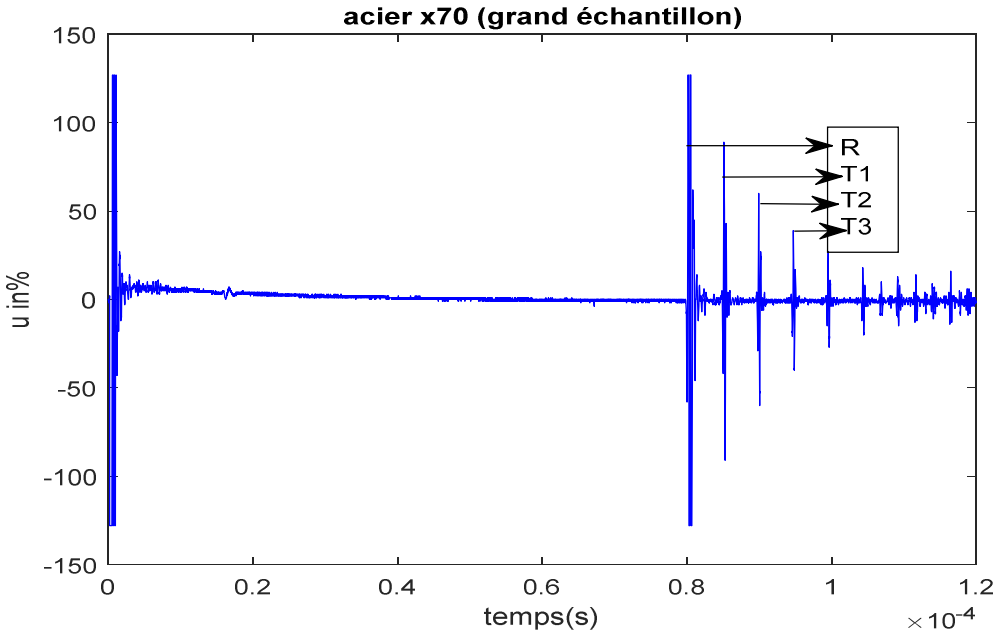



Figure (3.7): signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l'acier x70 (grand échantillon).

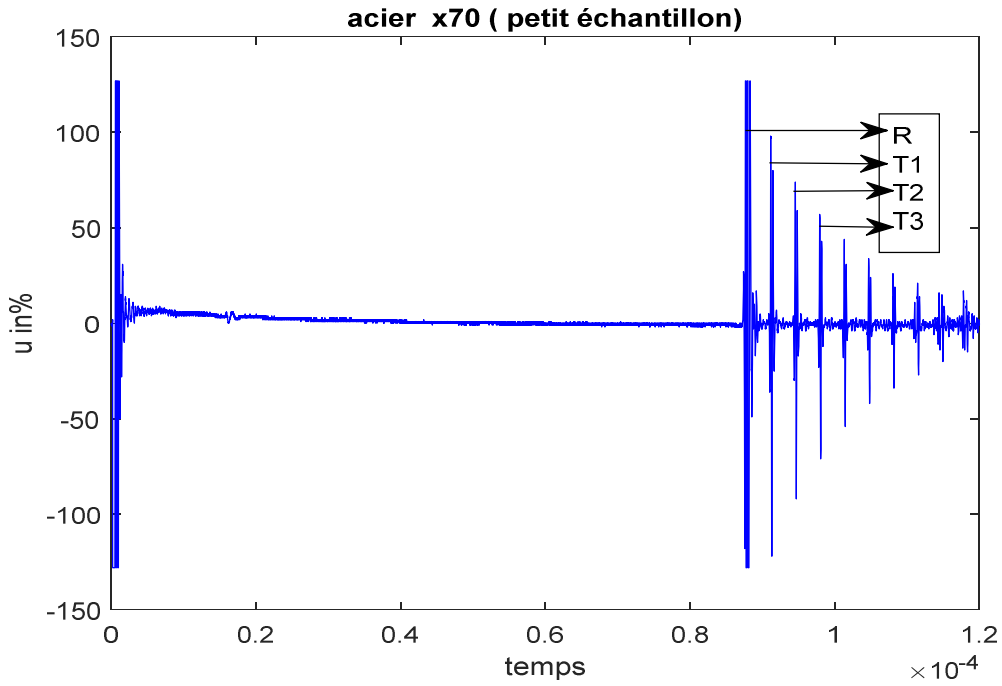



Figure (3.8) : signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l' acier x70 (petit

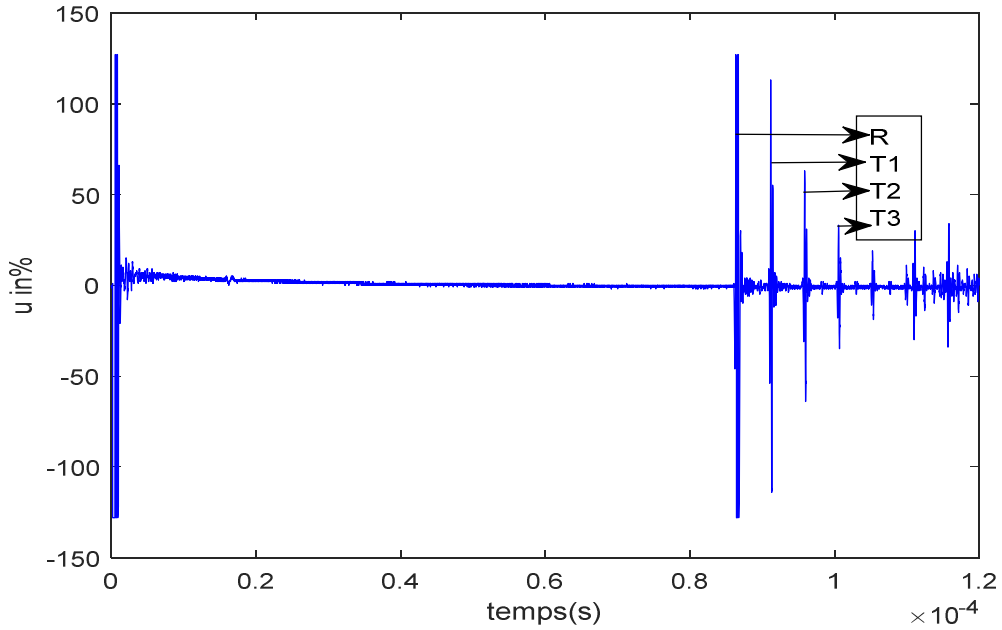



Figure (3.9) : signaux temporels des échos de l'onde ultrasonore en immersion dans l'aluminium.

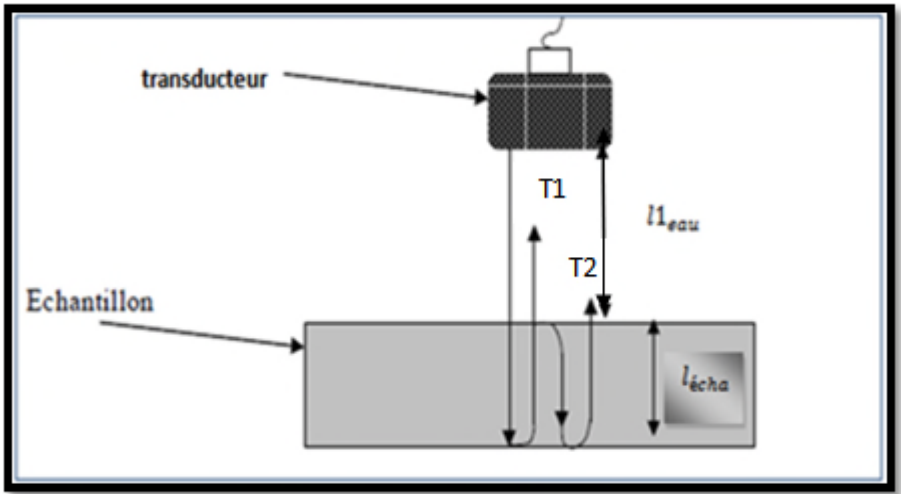
$T_n$: $n^{iéme}$ signal transmis après plusieurs réflexion dans l'échantillon ; n=1,2,3….

R :signal réfléchie par la première limite de l'échantillon.

L'onde ultrasonore émise se propage à une vitesse qui dépend des caractéristiques de la plaque. Pour mesurer la vitesse de propagation d'une telle onde au sein de la plaque, on peut

mesurer la durée entre le début de l'écho T1 et le début de l'écho T2. Cette durée correspond à un aller-retour de l'onde ultrasonore au sein de la plaque d'épaisseur L.D'où, on en déduit la vitesse de, propagation en appliquant la relation.

$$C = \frac{2l}{\Delta t} \tag{3.19}$$




**Figure( 3.10 ):**réflexion avec échos successifs.

$$t_1 = \frac{2l_{1eau}}{C_{eau}} + \frac{2l_{écha}}{C_{écha}} \tag{3.20}$$

$$t_2 = \frac{2l_{1eau}}{C_{eau}} + \frac{4l_{écha}}{C_{écha}} \tag{3.21}$$

où $l_{écha}$ représente l'épaisseur de l'échantillon en mm.

$l_{\mathbf{1eau}}$ la distance entre le transducteur et l'échantillon.

$t_1$ et $t_2$ les temps de vol du signale réfléchi

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l_{écha}}{C_{écha}} \tag{3.22}$$

$\Delta t$ la différence entre les temps de vol du signale réfléchi.

$$C_{écha} = \frac{2l_{écha}}{\Delta t} \tag{3.23}$$

$C_{écha}$ est la vitesse de propagation des ultrasons dans l'échantillon.

Nous avons créé un ensemble de scripte dans Matlab pour calculer la différence de temps,les vitesses longitudinales et transversales. Les résultats sont résumés dans les tableaux.

**Tableau (3.5 )** : les vitesses longitudinales, transversales et les différences de temps mesuré par Matlab..

| **acier X70 (petite échantillon 10.15mm )** | | | |
|---|---|---|---|
| | Différence de temps (µs) | Vitesse longitudinal (m/s) | Vitesse Transversale* (m/s) |
| **T1-T2** | 3.37 | 6011.8 | 3412.3 |
| **T2-T3** | 3.37 | 6007.1 | 3409 |
| **T1-T3** | 6.75 | 6009.5 | 3401.7 |
| **Valeur moyenne** | / | 6009.5 | 3407 |
| **Valeur référence** | / | 5980 | 3297 |
| **e %** | / | 0.49 | 3.35 |
| **acier X70 (grand échantillon 14.65mm )** | | | |
| **T1-T2** | 4.79 | 6110 | 3481 |
| **T2-T3** | 4.8 | 6104 | 3477.3 |
| **T1-T3** | 9.59 | 6108 | 3480.1 |
| **Valeur moyenne** | / | 6107 | 3479.46 |
| **Valeur référence** | / | 5980 | 3297 |
| **e %** | / | 2.13 | 5.5 |
| **Aluminium(ALMg0.5)** | | | |
| **T1-T2** | 4.682 | 6406.6 | 3690.6 |
| **T2-T3** | 4.689 | 6397.5 | 3684.2 |
| **T1-T3** | 9.37 | 6401.6 | 3687 |
| **Valeur moyenne** | / | 6401.9 | 3687.2 |
| **Valeur référence** | / | 6420 | 3040 |
| **e %** | / | 0.28 | / |

***Remarque**: Pour le calcul de la vitesse transversale voir ( l'annexe A).

## 3.4.Mesure de l'atténuation :

Soit la 2ème amplitude du spectre (obtenu par transformée de Fourier du signal temporel) la pression réfléchie sur la face arrière du petit et du grand échantillon. L'atténuation des ondes ultrasonores a été mesurée par division des spectres. Cette méthode consiste à calculer les spectres de deux échos puis à faire leur division. Elle permet d'obtenir les atténuations dans une gamme de fréquence au voisinage de la fréquence du transducteur.

le coefficient d'atténuation dans cette dernière s'écrit :

$$\alpha_g(neper/m) = \frac{1}{2\Delta L} ln\left(\frac{|P_1|}{|p_2|}\right) \quad (3.24)$$

$$\alpha_g(db/m) = \frac{1}{2\Delta L} 20log_{10}\left(\frac{|P_1|}{|p_2|}\right) \quad (3.25)$$

Ou $P_1$ et $P_2$ sont les spectres du petit et du grand échantillons respectivement.

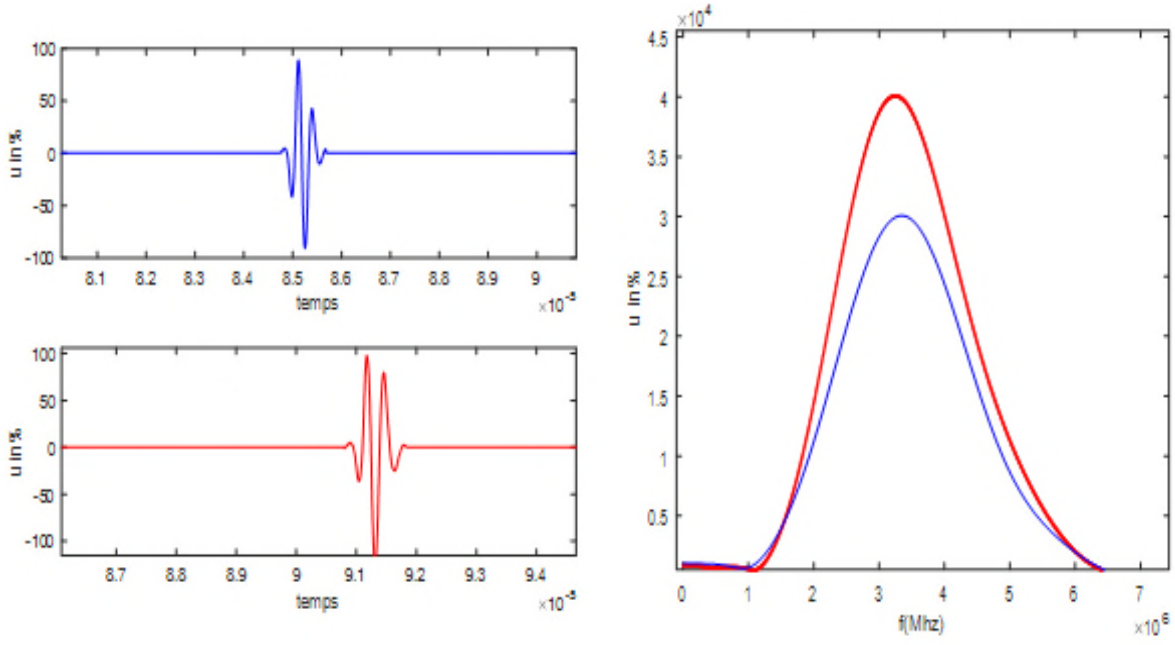
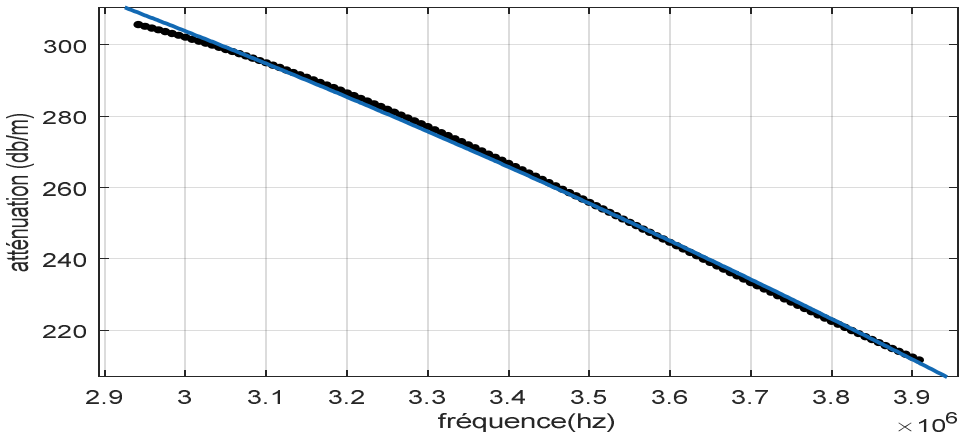



Figure ( 3.11) :evolution des échos dans le grand (rouge) et le petit (bleu) échantillons et leurs spectres .




Figure( 3.12 ) .courbe représentant la variation de l'atténaution en fonction de la fréquence avec la courbe de fit en bleu.

Le résultat du fit avec l'équation : $f(x) = \alpha x^b + c$ donne la loi empirique de l'atténuation en fonction de la fréquence suivante :

$$\alpha(dB/m) = -2.99 * 10^{-11} f^{1.95} + 441$$

Avec un coefficient de régression égal à 0.9987.

Cette loi donne une atténuation décroissante avec la fréquence. Ce résultat ne correspond pas aux résultats de la littérature, à savoir une atténuation croissante avec la fréquence. L'investigation de la source d'erreur rest notre préocupation**[27][28].**

## 3.5.Détermination des coefficients d'élasticité :

Pour les solides isotropes, le tenseur c est indépendant de la direction de propagation, donc la relation entre lui et les vitesses d'ondes acoustiques $V_l$ et $V_s$ sont données par **[2][28][29]** :

La vitesse de l'onde transversale « $V_s$ » :

$$V_S = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{2\rho}} \quad (3.26)$$

La vitesse de propagation de l'onde longitudinal « $V_L$ » :

$$V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (3.27)$$

$C_{11}$: la constante élastique de rigidité du milieu.

Les valeurs calculées du tenseur C sont résumés dans le tableau suivant :

$\rho$ : Masse volumique [kg/m$^3$]

$\rho_{\text{acier x70}}$ =7800 kg/m$^{3.}$

$\rho_{\text{aluminium}}$ =2700 kg/m$^3$

**Tableau(3.6 )** :les constantes d'élasticite du acier X70 et du aluminium.

| **Echantillon** | $\mathbf{C_{11}(Gpa)}$ | $\boldsymbol{C_{44}(Gpa)}$ | $\mathbf{C_{12}(Gpa)}$ |
|---|---|---|---|
| Acier X70 | 319 | 103 | **-7.2** |
| Aluminium | 113 | 38 | **-2.74** |

le module d' young de cisaillement et le coefficient de poisson peuvent être calculés à partir des vitesses longitudinale et transversale en appliquant les relations suivants:

le module d'young $$E = \frac{\rho V_s^2(3V_l^2 - 4V_s^2)}{V_l^2 - V_s^2} \quad (3.28)$$

le coefficient de poisson $$\nu = \frac{V_l^2 - 2V_s^2}{2(V_l^2 - V_s^2)} \quad (3.29)$$

le module de cisaillement $$G = \rho V_s^2 \quad (3.30)$$

**Tableau (3.7)** :modules d'elasticite mesurés.

| Module Elastique | E(Gpa) | | | G(Gpa) | | | ν | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reference | mesurée | e (%) | reference | mesurée | e (%) | Reference | mesurée | e (%) |
| Acier X70 (petite échantillon) | 200[i] | 228 | 14 | / | 90 | / | / | 0.26 | / |
| Acier X70 (grand échantillon) | 200[i] | 237 | 18 | / | 94 | / | / | 0.25 | / |
| Aluminium(AlMg0.5) | 69[ii] | 91 | 31 | 26[ii] | 36 | 38 | 0.34[iii] | 0.25 | 26 |

i [32] [29]

ii [30] [29] , iii [31] [29]

## 3.7.Conclusion

Les propriétés mécaniques des deux matériaux (acier X70 et aluminium) ont été étudiées à la température normale du laboratoire. Nous avons determinés la vitesse des ultrasons expérimentale dans l'eau, X70 et L'aluminium. Aussi, la différence d'épaisseur entre les deux échantillons de X70 est déterminée après extraction des informations nécessaires à partir des signaux obtenues par l'expérience. Les résultats obtenus de la vitesse longitudinale nous ont permis de calculer la vitesse transversale et les constantes d'élasticité des échantillons étudiés. Pour vérifier, ces résultats sont comparés à d'autres résultats expérimentaux. Les résultats obtenus sont entachés d'erreurs. Ceci est dû à l'état de surface des échantillons,l'état du transducteur, le calcul empirique de la vitesse transversale. le cacul de l'atténuation a donné un résultat ne correspondant pas au résultats connus, à savoir une atténaution croissante avec la fréquence. l'investigation de la source d'erreur reste notre préoccupation.

.

# Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons effectué une étude théorique et expérimentale du phénomène de propagation des ondes ultrasonores dans les matériaux solides.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelés quelque notions sur le contrôle non destructif par ultrasons, en commençant par une introduction à la physique des ultrasons. Un aperçu du système de test est donné, à savoir comment générer et détecter les ultrasons. Un résumé sur le comportement des ondes mécaniques, en particulier dans les matériaux solides, est exposé. Ce résumé s'est concentré sur le comportement linéaire des ondes ultrasonores dans les matériaux isotropes et homogènes. Le deuxième chapitre a donnée un aperçu sur le phénomène d'élasticité dans les solides avec les relations entre les constantes élastiques et les caractéristiques de l'onde ultrasonore.

Dans le troisiéme chapitre nous avons présentés le travail expérimental. Les méthodes de mesure et de calcul utilisées avec les étapes suivis exposées. Les résultats des vitesses des ultrasons obtenus dans l'eau, l'acier X70 et dans l'aluminium (AlMg0.5) sont comparable aux résultats de référence. Ainsi que le module de Young. L'atténuation donne une courbe décroissante avec la fréquence Les erreurs de calculs sur les vitesses sont lié à l'état des échantillons et du transducteur. De même pour le comportement de l'atténuation qui est contraire aux résultats connus, à savoir une atténuation croissante avec la fréquence. L'investigation de la source d'erreur reste notre préoccupation. Ce travail ne pouvait pas se faire sans avoir utiliser les notions du traitement de signal en utilisant la programmation sous Matlab.

# Référence:


[1] **Hamza Chouh** , Simulations interactives de champ ultrasonore pour des configurations complexes de contrôle non destructif, thèse de doctorat de l'université de Lyon ,Soutenue publiquement le 22/11/2016,

[2] **Florence** élasticité 'notre de cours2017-2018

[3] **ALI RAID** ,contrôle non destructif ressuage, magnétoscopie, radiographie, courants de Foucault et ultrasons **2017-2018**.

[4] **Houria grimed,** Modélisation et séparation des signaux ultrasonores transmis à travers les différents matériaux **,**université badji mokhtar Annaba**.**

[5] **TEKFI Karima et YAHYABEY Naima** ,MESURE DE DISTANCE PAR ULTRASON, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Soutenu le 15 juin 2016 .

[6] chapitre 2 notions d'acoustique physique.

[7]**OTHMANI MARABOUT Mohamed Sadek** , Propagation des ondes ultrasonore dans les milieux solides hétérogènes- Application au cas du béton ,Université Mohamed Khi der – Biskra ,Soutenu publiquement le 29 Avril 2013

[8] **Belacel bahe Eddine, Bouchria soufyane.** Contrôle des joints de soudure des pipelines par ultrasons, Université m'Hamed bougara boumer des 2016/2017**.**

[9]**Mostafa el amrani** , étude de différentes méthodes de focalisation ultrasonore appliquées au contrôle non destructif. Thèse de doctorat de l'université paris VII soutenue le 17 Novembre 1995**.**

[10] **Loïc Brancheriau** , caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites ,université Montpellier 2,Dossier de synthèse. Habilitation à diriger des recherché ,22 janvier 2013.

[11] **Naamane REMITA**, Caractérisation Ultrasonore de la Fibrose Hépatique par l'étude de la Taille Moyenne des Diffuseurs Mémoire de Magister de l'Université 20 Août 1955 de Skikda.

[12] **Mikael WILM,** Etude et réalisation de transducteurs composites pour l'imagerie acoustique et le contrôle non-destructif. Université de Franche-Comté présentée et soutenue publiquement le 26 novembre 2004**.**

[13] **Tony valier-brasier,** Ondes élastiques dans les solides isotropes, Notes de cours Université Pierre et Marie Curie – Paris.

[14] L'acoustique ultrasonore et ses applications,1ère partie Acoustique et Techniques, n° 36, 4-11, (2004)

[15]Transducteur à immersion ,OLYMPUS, http://www.directindustry.fr/prod/olympus/product-17434-1331957.html

[16] **Sylvain Chatillon**, Etude d'un système de contrôle par ultrasons des pièces de géométrie complexe à l'aide de traducteurs contacts intelligents, université paris 7 - dénis Diderot, thèse, le 6 décembre 1999.

[17] **Hakim djelouah** professeur ,USTHB ,vibration &ondes ,cours, exercices corrigés.
[18] **Soudani Salah,** contrôle non destructif par ultrasons analyse et diagnostic, université cheikh el-arbi tébessi-tébessa,LE 15//07//2009.
[19] **Bendjaballah Lynda** ,thème calcul numérique du module d'Young d'un matériau homogène et isotrope base sur la théorie des poutres 02/06/2010.
[20] Partie V: Propriétés mécaniques des matériaux.
[21] **Benjamin Robert**, Etude des Propriétés Viscoélastiques des Tissus Mous par Elastographie IRM. Une Approche Multi-Echelle. Université Paris VII – Déni Diderot.
[22] **Pascal cuxac**, propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes, thèse Soutenue publiquement le 13 février 1991.
[23] Acoustique des matériaux (4P062) ,Simon AYRINHAC, Sorbonne Université
[24] sciences et technologies de l'industrie et du développement durable ,ET232:choix des matériaux http://www.xr6805.fr/sti2d/courses/0data/et232_pack/STI2D_et236_proprietes_mecanique
[25] $m_1$élasticité ,http://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/PDF/M1.pdf
[26] Comportement mécanique des matériaux ,Roland Fortunier ,Ecole nationale supérieure des mines.
[27 ] **Nouioua Ismail**, contribution a l'étude de l'absorbtion des ultrasons dan les matériaux imitant les tissus biologiques mous .Alger2010 ,université des sciences et de la technologie houari Boumediene.
[28] **Oum kelthoum Nbeg,**caractérisation des matériaux par ultrasons.Cas des polyméres,ecole nationale superieure de laghouat,2015-2019.
[29] **Mohamed El Said Sarhani,** Determination of mechanical properties by ultrasonic Method, université Amar telidji Laghouat,2017-2018.
[30]aluminco.com, *Aluminium Alloy EN-AW 6060 (AlMgSi0,5)*. Inofita Viotia, 32011, Greece.
[31]H. Coelho-Mandes. Microscopie acoustique, influence des ondes latérales sur la signature acoustique. Thèse de doctorat de l'université de Montpellier II, 1990,
[32]API5L-X70 برروي تنشهاي علي حيدرى محمد رضا فروزان بروسي تأثير فرانيدهاي هيدروتست و كوننجينك لولة هاي بسماند حاصل از جوشكاري زيروبردري به كمك روش اجزاى محدود طهران 1 شهر يور شركة لوله وتجهيزات سديد

# Annexe A:

## Annexe A :

| Propriétés mécaniques des matériaux | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Material** | Density (kg/m3) | $V_l$ (m/s) | $V_s$ (m/s) | Z /$10^3$(kg.$m^2$/s) |
| **Aluminum** | 2700 | 6320 | 3130 | 17064 |
| **Copper** | 8900 | 4700 | 2260 | 41830 |
| **Quartz melted** | 2200 | 5970 | 3765 | 13134 |
| **Steel** | 7850 | 5940 | 3250 | 46629 |
| **Nylon** | 1100 | 2620 | 1080 | 2882 |
| **Beryllium** | 1846 | 12890 | 8880 | 23794.94 |
| **Chrome** | 7194 | 6608 | 4005 | 47537.95 |
| **Copper** | 8933 | 4759 | 2325 | 42512.15 |
| **Indium** | 7290 | 2560 | | 18662.4 |
| **Lead** | 11343 | 2160 | 700 | 24500.88 |
| **Pure Nickel** | 8800 | 6530 | 2960 | 57464 |
| **Platinum** | 21450 | 3260 | 1730 | 69927 |
| **Silver** | 10500 | 3704 | 1628 | 38892 |
| **Thorium** | 11725 | 2400 | 1560 | 28140 |
| **Uranium** | 19050 | 3370 | 1940 | 64198.5 |
| **Zirconium** | 6507 | 4650 | 2250 | 30257.55 |
| **Silicon carbide** | 3210 | 12099 | 7485 | 38837.79 |
| **Tungsten carbona** | 15000 | 6655 | 3984 | 99825 |
| **Water** | 1000 | 1480 | - | 1480 |
| **Gold** | 19300 | 3240 | 1200 | 62532 |

**Tableau (3.8 ):** Densités, vitesses du son et impédances acoustiques de certains matériaux communs

* Y. Bar-Cohen, A. K. Mal. Ultrasonic inspection. In: ASM Handbook, 1996, vol. 17, pp. 231-277.

Calcul de la Vitesse transversale $V_s$ :

Premièrement, et à partir des données disponibles dans le manuel des matériaux.

(tableau 3.8. ) Concernant les vitesses des ondes acoustiques dans les matériaux, nous avons déterminé par courbe une relation empirique, entre $V_l$ et $V_s$, sur un ensemble de 20 matériaux de différentes classes (métaux, verres, céramiques, polymères, ...). Le calcul des coefficients de régression de différents ajustements (linéaire, quadratique, ...) permet d'accepter l'approximation linéaire (coefficient de régression égal à 0.9681

pour la relation Vs - Vl et (figure 3.13) .

Ces relations empiriques sont exprimées comme suit

suit : $V_s = 0.7048V_l\text{-}824.8$ A.1

fitresult =

Linear model Poly1:

fitresult(x) = p1*x + p2

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 0.7048 (0.637, 0.7725)

p2 = -824.8 (-1243, -407.1)

Goodness of fit

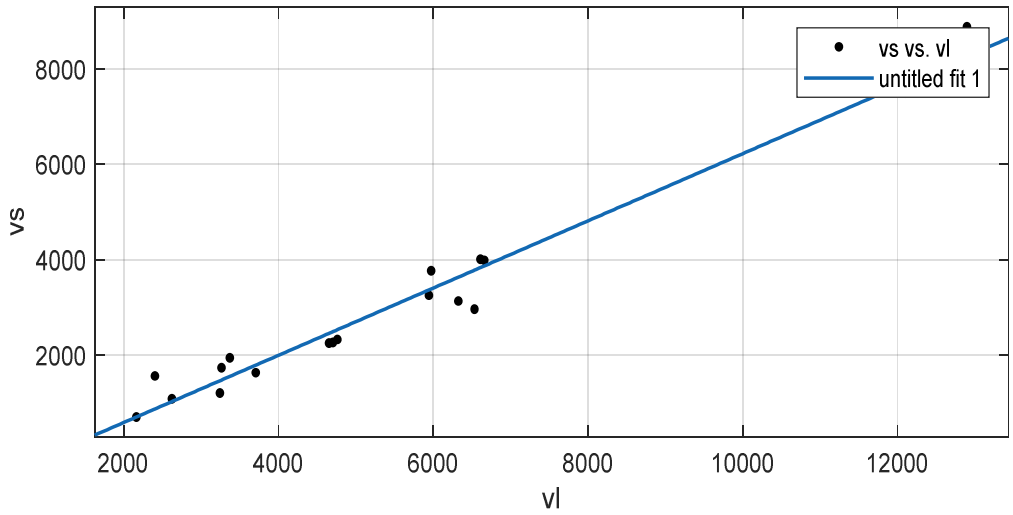
SSE=2.48 e+6

R-square:0.9681

Adjusted R-squre:0.9661

RMSE=393.7

**Tableau (3.9 ):** Résultat du programme Matlab




Figure( 3.13 ): Relation entre les différentes vitesses des modes, pour un ensemble de matériaux homogènes et isotropes.$V_s = f(V_l)$

# Annéxe B:

## Programme de mesure de vitesse :

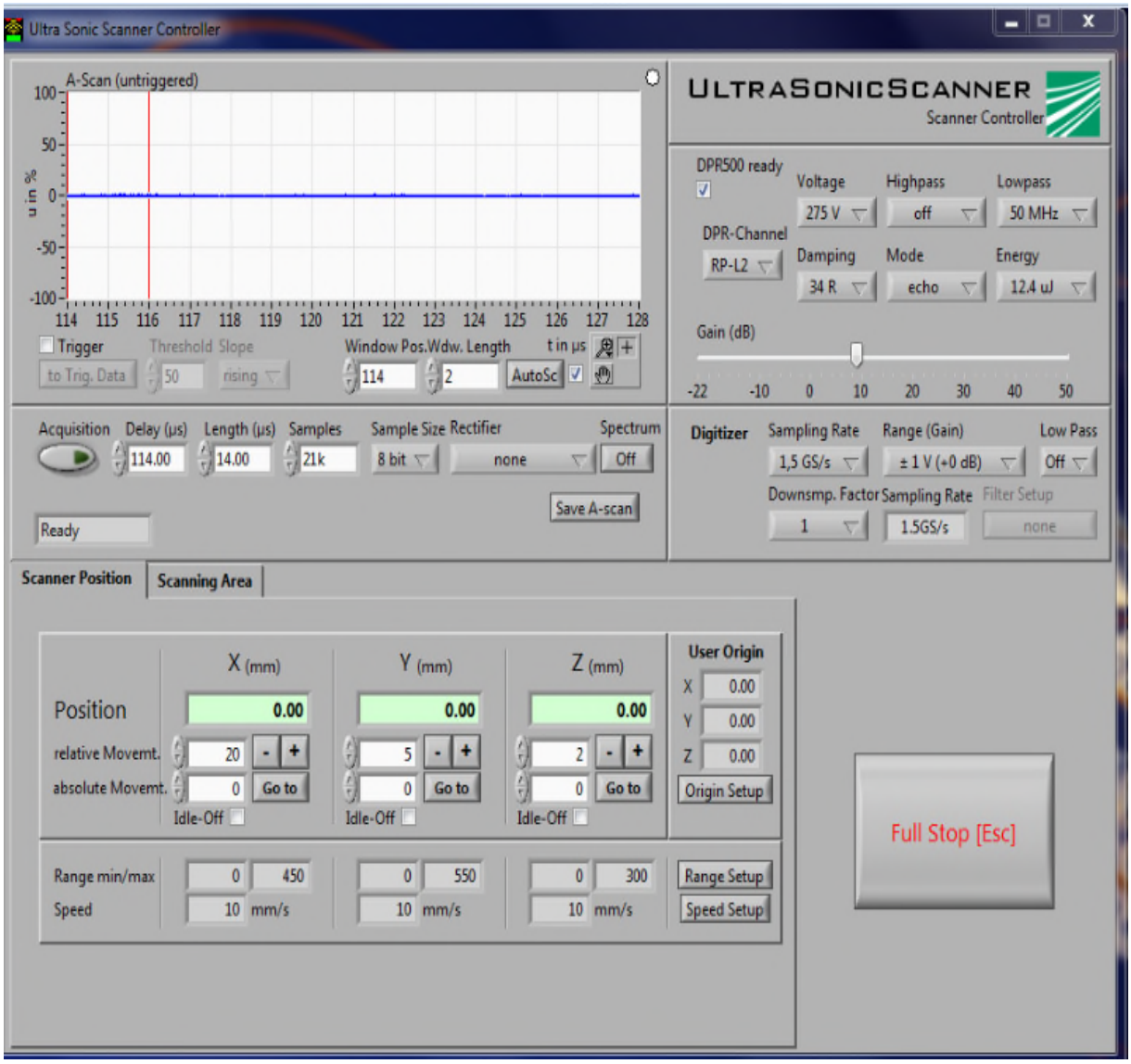



Figure ( 3.14 ) Logiciel de numérisation

# ملخص

تطرقنا في هذا العمل الى الدراسة التجريبية لثلاث عينات ( قطعتين من الفولاذ الكربوني x70 مختلفتين في السمك وسبيكة المنيوم ) من اجل معرفة الخواص الميكانيكية للعينات المدروسة باستخدام الامواج الصوتية .بالاعتماد على نتائج محاكاة الاشارة الصوتية المستقبلة, تمكننا من استغلال الاشارة التى تحصلنا عليها تجريبيا واستخدمنا العلاقات السرعة الطولية والعرضية التى تربطها بمعاملات المرونة, تمكننا من حساب معامل يونغ ,نسبة بواسون,معامل قص , للعينات المدروسة .

**الكلمات المفتاحية :** الامواج الصوتية, اختبارغير مدمرة, سرعة طولية , سرعة عرضي, معامل يونغ, معامل القص.

**Résume :**.

Dans ce travail ,nous avons discuté de l'étude expérimentale de trois échantillons (deux pieces d'acier au carbone d'une épaisseur différente de X70 et un alliage d'aluminium )afin de connaître les propriétés mécaniques des échantillon études par ultrasons. sur la base des signaux acoustiques reçuent ,nous avons obtenus les vitesses de son longitudinale dans les échantillons étudiés. Le calcul de la vitesse de cisaillement de maniére empirique , nous a permis de trouver les constantes élastiques des échantillos. Nous avons pu,ainsi, calculer le module de young ,le coefficient poisson et le coefficient de cisaillement des échantillon étudiés.

**Mots clé** : CND, control non destructif, ondes elastique, ondes acoustique, vitesse longitudinale, vitesse transversale, module de young, coefficient de cisaillement.

**Abstract:**

In this work, we discussed the experimental study of three samples (two pieces of carbon steel with a thickness different from X70 and an aluminum alloy) in order to know their mechanical properties, studied by ultrasound. On the basis of acoustic signals received, we obtained longitudinal sound velocities in the samples studied. The calculation of the shear velocity empirically allowed us to find the elastic constants of the samples. We were able to calculate the Young's modulus, the Poisson coefficient and the shear coefficient of the samples studied.

**Keywords :**NDT,non-destructive testing, elastic wave, acoustic wave, longitudinal velocity, transversal velocity, youngs modulus.