

## D. LES ULTRASONS



### I- INTRODUCTION AUX ONDES ULTRASONS

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

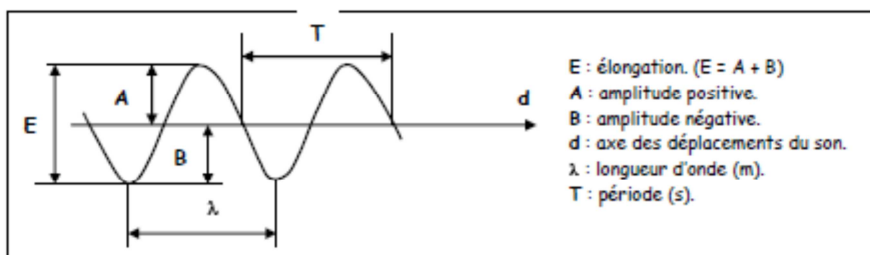
Le phénomène initial du son ou d'un ultrason est toujours produit par un corps élastique animé de vibrations mécaniques dues par exemple à un choc (diapason), à une impulsion électrique (tonnerre) ou à un jet gazeux interrompu (sirène).

Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques. Elles ne se différencient entre eux que par leurs fréquences.

0 à 16 Hz	16 Hz à $16 \cdot 10^3$ Hz	$16 \cdot 10^3$ Hz à $150 \cdot 10^6$ Hz	$> 150 \cdot 10^6$ Hz
Infrasons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 10<sup>5</sup> Hz et 20.10<sup>6</sup> Hz.

On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période.



### Représentation des vibrations du son (sinusoïde).

- La fréquence **f** (nombre de cycles par seconde) de réapparition du phénomène est donc donnée par l'inverse du temps :

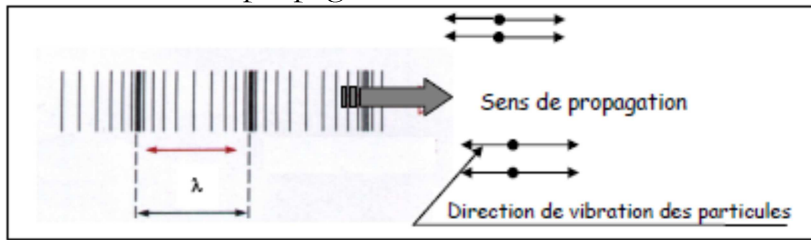
$$f = 1/T \text{ (f en Hz et T en s)}$$

- L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde :

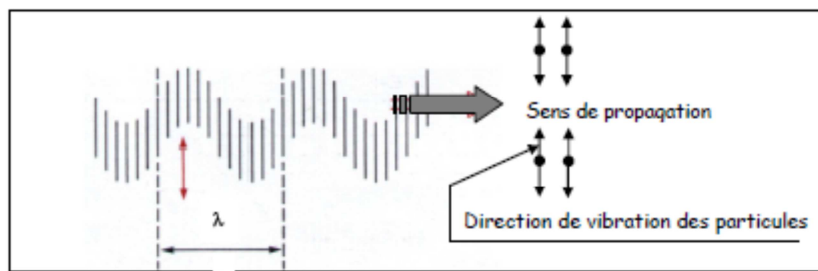
$$\lambda = v T = v / f \text{ (λ en m, v en m/s et f en Hz)}$$

On distingue trois types d'onde :

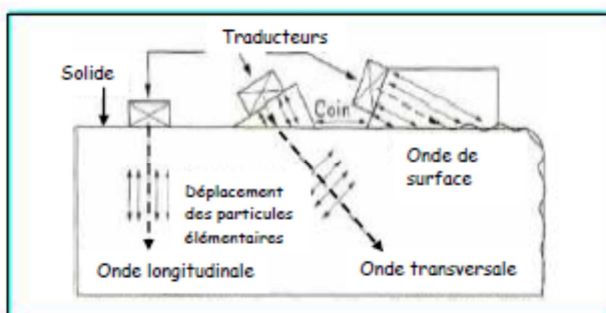
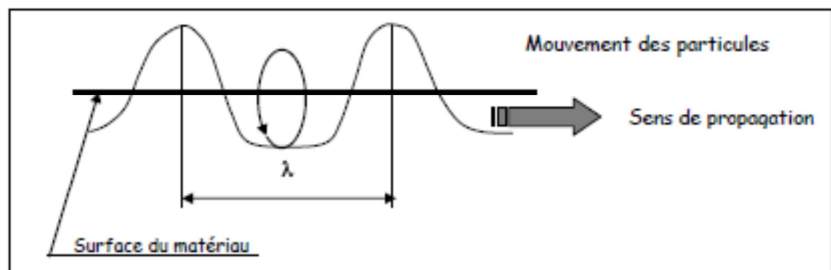
**a- Onde longitudinale ou de compression** : la direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde ;



**b- Onde transversale ou de cisaillement** : la direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.



**c- Onde de surface** : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide.



## Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide

## II- VITESSE DE PROPAGATION

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type d'hétérogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions.

La vitesse de l'onde dépend de la nature de matériaux que la transporte et de type d'onde :

– **Onde longitudinale :**

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

- E : Module d'Young du matériau N/m<sup>2</sup> ;
- ρ : masse spécifique du matériau (Kg/m<sup>3</sup>) ;
- ν : coefficient de Poisson.

– **Onde transversale :**

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

– **Onde de surface :**

$$V_S = 0,9 V_T$$

**Exemples de vitesses des ultrasons (ondes longitudinales) dans la matière**

Vitesses et impédances acoustiques				
Matériau	Masse volumique (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique (10 <sup>6</sup> Kg/m <sup>2</sup> s)
Aciers	7.8	5 900	3 250	46
Fontes	7.2	4 600	2 150	33
Aluminium	2.7	6 300	3 100	17
Cuivre	8.9	4 700	2 250	42
Laiton	8.5	4 500	2 100	38
Béton	2.5	4 500		11
Muscle	1.0	1 600		1.6
Araldite	1.2	2 500	1 050	3
Plexiglas	1.2	2 700	1 100	3.2
Verre	2.6	5 650	3 400	14
Huile	0.8	1 500		1.2
Glycérine	1.3	1 900		2.5
Eau	1.0	1 480		1.5
Mercure	13.6	1 450		20
Quartz	2.7	5 750		15
Titane de baryum	5.7	4 400		35
Air	1.3 10 <sup>-3</sup>	330		4 10 <sup>-4</sup>

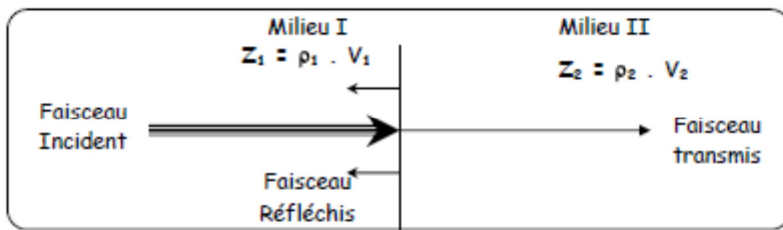
### III- TRANSMISSION ET REFLEXION DES ONDES

#### III.1- Impédance acoustique

C'est la propriété qui détermine la transmission des ultrasons à travers la ligne adjacente à deux milieux. Elle correspond à la masse ébranlée par un faisceau ultrasonore de 1 m<sup>2</sup> de section pendant une seconde. Pour un matériau donné elle est égale au produit de la masse spécifique du matériau par la vitesse de l'onde (**Z= ρ.V**).

##### III.1.1- Réflexion – réfraction

**d- Incidence normale :**



- 1<sup>er</sup> cas :  $Z_1 = Z_2$  transmission totale ;
- 2<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \cong Z_2$  transmission partielle ;
- 3<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \gg \gg \gg Z_2$  réflexion totale.

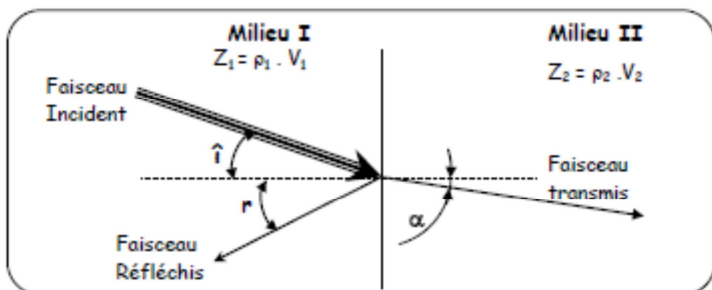
On note par :

- $A_r$  : l'amplitude de l'onde réfléchie ;
- $A_i$  : l'amplitude de l'onde incidente ;
- $A_t$  : l'amplitude de l'onde transmise.

Alors on a : 
$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{et} \quad \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

### b- Incidence oblique :

Une onde incidente arrive à la surface de séparation de deux milieux sous un angle  $\hat{i}$  autre que l'angle droit, l'onde réfléchie forme un angle  $r$  par rapport à la normale est égal à  $\hat{i}$ .



Lorsqu'une onde incidente franchie obliquement une interface séparant les deux milieux elle subit un changement brusque de direction si la vitesse de propagation des ongles est différente dans les deux milieux. L'onde réfractée dans le milieu II, forme un angle  $\alpha$  par rapport à la normale cet angle est appelé angle de réfraction.

La loi de Descartes est : 
$$\frac{\sin(i)}{V1} = \frac{\sin(\alpha)}{V2}$$

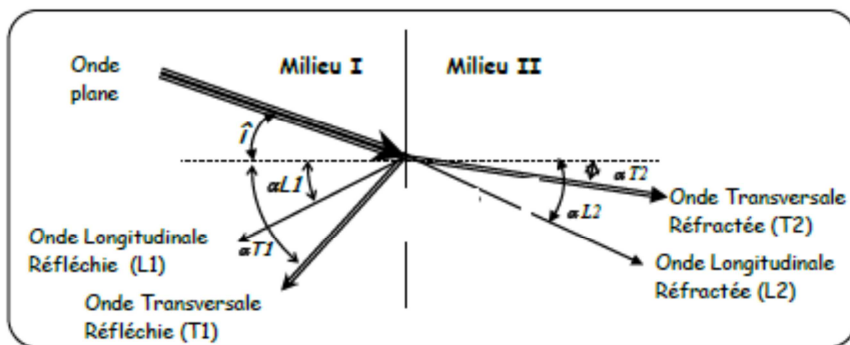
### c- Double réflexion – double réfraction

Lorsqu'une onde plane longitudinale ou transversale rencontre sous incidence oblique une surface de deux milieux I et II, il apparaît les ondes suivantes :

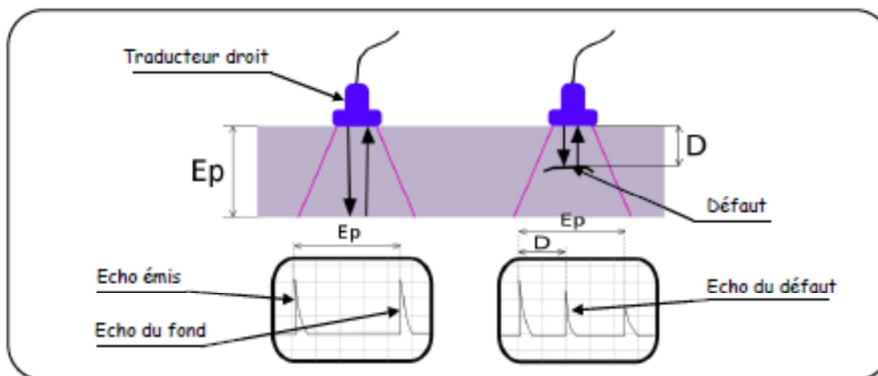
- L1 : une onde longitudinale réfléchiée ;
- T1 : une onde transversale réfléchiée ;
- L2 une onde longitudinale réfractée ;
- T2 : une onde transversale réfractée.

La relation qui relie ses différentes grandeurs est connue sous la loi de sinus ou la loi de Snell, on a alors :

$$\frac{\sin(i)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha L1)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha T1)}{VT1} = \frac{\sin(\alpha L2)}{VL2} = \frac{\sin(\alpha T2)}{VT2}$$



#### IV- PRINCIPE DE CONTROLE PAR ULTRASONS



La vibration mécanique engendrée par l'élément piézo-électrique du traducteur se propage dans la section de la pièce en se réfléchissant sur les faces. Une partie du faisceau acoustique est interceptée par le défaut et renvoyée vers le traducteur qui convertit la vibration en signal électrique.

L'oeil observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps.

Il est alors possible de détecter la présence du défaut, d'évaluer sa position et son étendu. L'amplitude de l'écho reçue dépend de l'étendu et de l'orientation de la surface réfléchissante.

On peut distinguer deux types de méthodes par Ultrasons:

1. Les Ultrasons dit « classiques » permettant de déceler des indications au coeur de la matière en utilisant des traducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes inclinées.
2. Les mesures d'épaisseurs qui permettent de vérifier l'épaisseur restante d'un matériel (on peut établir une cartographie des zones examinées et étudier son évolution dans le temps).

### Remarque :

Les fréquences utilisées pour le contrôle des métaux sont de l'ordre de 1 à 10 MHz.

## V- MATERIEL MIS EN ŒUVRE

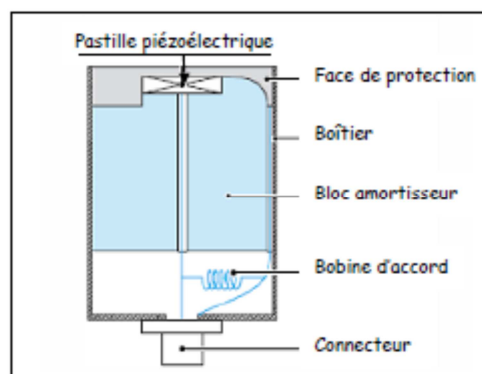
- Postes U.S. analogiques ou numériques ;
- Traducteurs OL, OT et à angles variables ;
- Mesureurs d'épaisseurs ;
- Logiciels de saisi et de suivi des mesures d'épaisseurs.



Appareil de contrôle par US    Traducteurs    Mesureur d'épaisseur

### Palpeurs piézoélectriques :

En règle générale, un palpeur est constitué autour d'une pastille piézoélectrique circulaire ou rectangulaire taillée dans le matériau piézoélectrique choisi, dont les faces parallèles sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est placée sur un bloc amortisseur dense et très absorbant. L'ensemble de ces deux éléments et une bobine d'accord sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique et une face de protection devant la pastille piézoélectrique. Cette face avant joue le double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité. Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résine, carbures non métalliques...). L'épaisseur de cette face de protection n'a pas d'influence sur l'énergie transmise si elle multiple entier de la demi-longueur d'onde dans ce matériau.



Structure d'un palpeur ultrasonore

## VI- EXEMPLES D'APPLICATIONS

### VI.1-Déterminations des défauts internes

- Défaut de soudage : porosité, manque de fusion, défaut de pénétration, inclusions de laitier, fissures sur les bords, fissures en racines.
- Contrôle des pièces moulées.
- Mesures d'épaisseurs...
- Recherche de fissures sur les installations en service.

### VI.2- Contrôle de serrage

Il consiste à mesurer l'allongement des vis ou des goujons sous l'effet de la tension de serrage. Le traducteur ultrasonore posé sur la tête de la vis ou du goujon agit comme émetteur d'ondes ultrasonores qui se propagent longitudinalement dans le matériau et comme un récepteur qui recueille l'onde réfléchi sur le fond de la vis. Cette opération est répétée plusieurs centaines de milliers de fois par seconde.

- $L_i$  : longueur de la vis au repos (mesurée par les ultrasons) ;
- $L_f$  : longueur de la vis après serrage (mesuré par ultrasons) ;
- $L_f - L_i$  : allongement ultrasonore : due à l'allongement mécanique de la vis et à la diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores due à la tension induite dans le matériau. (Généralement l'effet de la vitesse est dominant).

Ces deux effets sont proportionnels à la tension, ainsi que leur combinaison.

**$T \text{ (daN)} = K \times \text{Allongement ultrasonores (ns)}$ .**

### Exemples d'application

Grues, engins lourds (travaux publics), ponts et ouvrages d'art, téléphériques, industrie lourde (laminoirs), centrales électriques, aéronautique, navires (sections boulonnerie), ferroviaire...

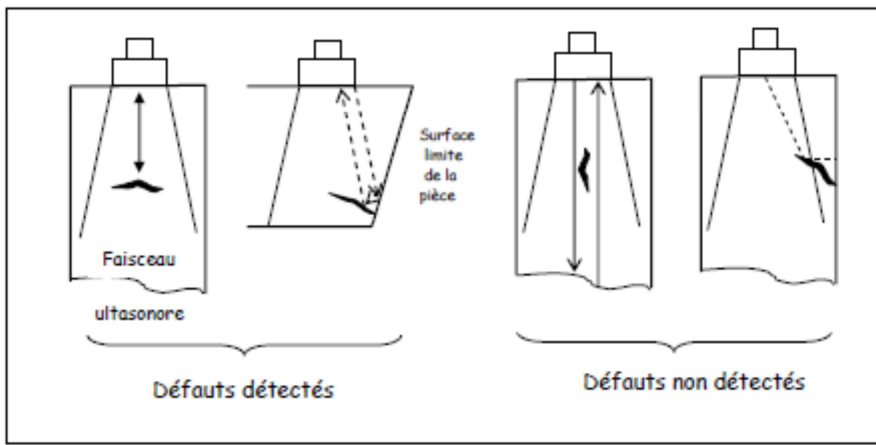
## VII- CARACTERISTIQUES

### VII.1- Avantages

- La méthode se prête bien à la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et elle présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche de défauts plans.
- Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers.
- Epaisseurs contrôlables trop importantes.
- Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête bien à l'automatisation.

### VII.2- Inconvénients

La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.



- Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire « couplant » entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.
- L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience.
- La mise en oeuvre est difficile sur certains matériaux.