

1. Introduction

Le contrôle par ultrasons est un procédé de contrôle non destructif semblable aux techniques RADAR ou SONOR qui a envoyé une impulsion ultrasonore dans le matériau et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées.

La connaissance de ce procédé implique les analyses suivantes :

- Etude de la propagation des ondes ultrasonores
- Etude de l'appareillage permettant l'émission d'impulsions ultrasonores, la réception et l'observation des échos
- Etudes des principes généraux du contrôle par ultrasons et des méthodes d'application

2. Système oscillants

L'acoustique est la science qui décrit les phénomènes d'oscillations mécaniques et de propagation de ces oscillations dans les matériaux solide, liquide et gazeux.

L'émission d'une onde acoustique est réalisée par l'intermédiaire d'un système oscillant. L'exemple le plus simple de système oscillant est le pendule constitué d'une massa suspendue à l'extrémité d'une barre montée sur un axe, au repos le pendule est en verticale. Écarté de cette position d'équilibre, il oscille en décrivant un mouvement schématisé figure 1.

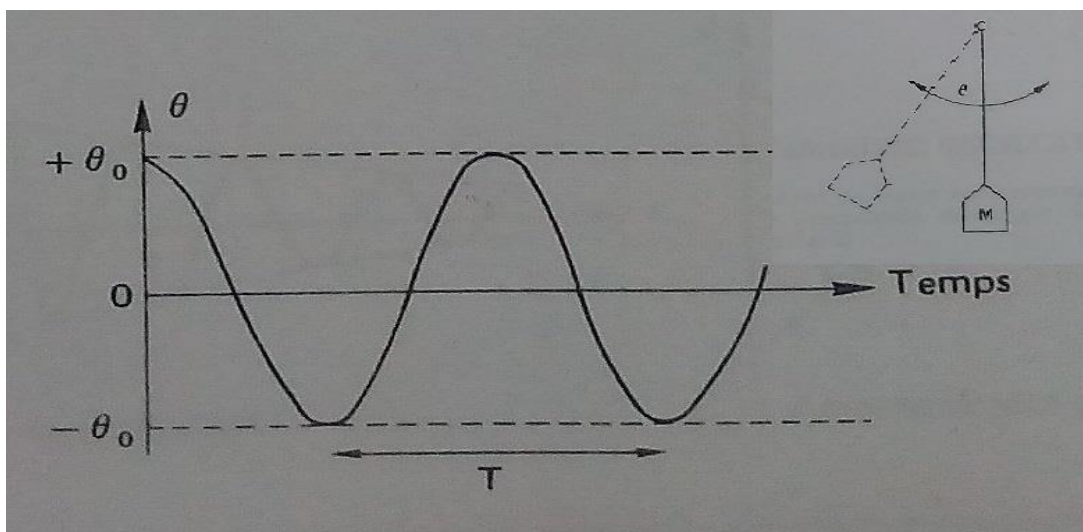


Figure 4-1 : mouvement du pendule

2.1 Période et fréquence

Le mouvement peut être caractérisé par sa période T ou sa fréquence f et son amplitude maximale θ_0 . La période T est la durée d'une oscillation complète c'est à dire le temps séparant deux instant.

- La période s'exprime en secondes (s), en millisecondes ($1\text{ms} = 10^{-3} \text{ s} = 0,0001 \text{ s}$), ou en microsecondes ($1\mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s} = 0,000001 \text{ s}$).
- La fréquence f est le nombre d'oscillations effectuées pendant une seconde. La fréquence s'exprime en hertz (Hz), en kilohertz ($1\text{kHz} = 10^3\text{Hz} = 1000 \text{ Hz}$) ou en mégahertz ($1\text{MHz} = 10^6\text{Hz} = 1000000 \text{ Hz}$).
- L'amplitude de l'oscillation est la valeur maximale (positive ou négative) que peut atteindre l'oscillation, c'est-à-dire dans le cas du pendule l'angle maximale θ_0 de déviation du pendule au cours de son oscillation

2.2 Oscillation amortie, oscillation entretenue

Si on examine pendant un temps suffisamment long le mouvement du pendule on remarque que l'amplitude maximale de l'oscillation décroît, c'est une oscillation amortie

Cet amortissement est principalement dû aux frottements existant au niveau de l'axe du pendule et en seconde lieu aux frottements avec le milieu ambiant (air).

Pour éviter cet amortissement, on peut comme dans le cas d'une horloge relancer le mouvement à chaque oscillation entretenue ou continue.

2.3 Propagation d'une oscillation

Pour schématiser simplement le phénomène de propagation d'une vibration, on se limite dans un premier temps à la propagation suivant une direction donnée.

On considère l'ensemble constitué par un pendule et une série de masses mobiles, reliées par des ressorts.

Lorsque le pendule oscille il transmet à la première masse par l'intermédiaire du ressort, son mouvement puis de proche en proche ce mouvement est transmis à chaque des masses avec un d'autant plus grand que les masses sont éloignées du pendule.

Les ressorts seront périodiquement en compression et en extension. Si on observe les zones où

les ressorts sont comprimés et les zones se déplacent régulièrement en s'éloignant de la source, c'est-à-dire du pendule. En réalité chaque masse oscille autour de sa position de repos, il n'y a pas de transfert de matière, seule l'onde se déplace.

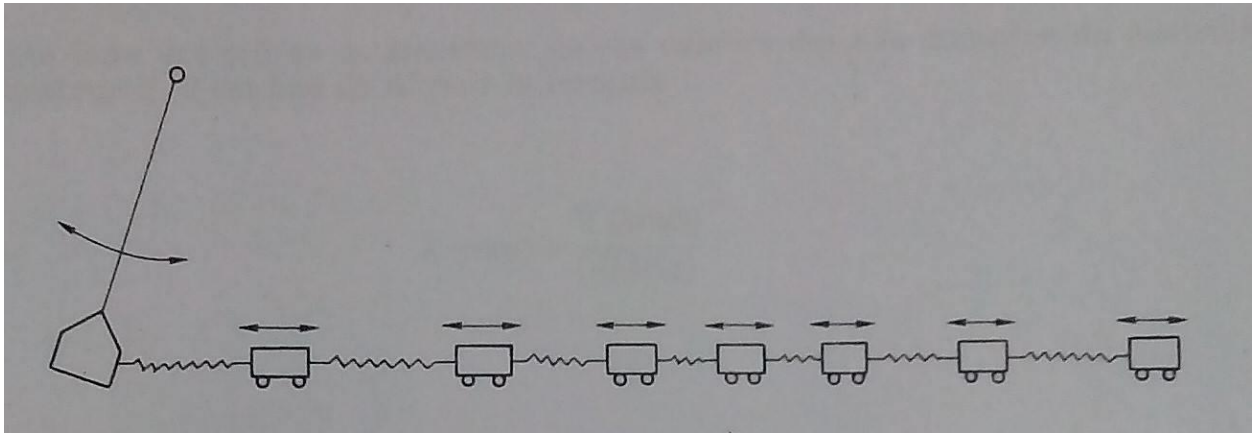


Figure 4-2 : propagation d'une vibration

2.4 Vitesse de propagation – longueur d'onde

La vitesse V à laquelle l'onde se déplace est appelée vitesse de propagation ou célérité, elle s'exprime généralement en mètre par seconde (m/s).

On retrouve régulièrement le long du système des zones où les ressorts sont étirés. Cette périodicité dans l'espace est caractérisée par la distance séparant deux zones identiques (par exemple ressorts comprimés) consécutives, c'est la longueur d'onde notée λ et exprimée en mètres (m).

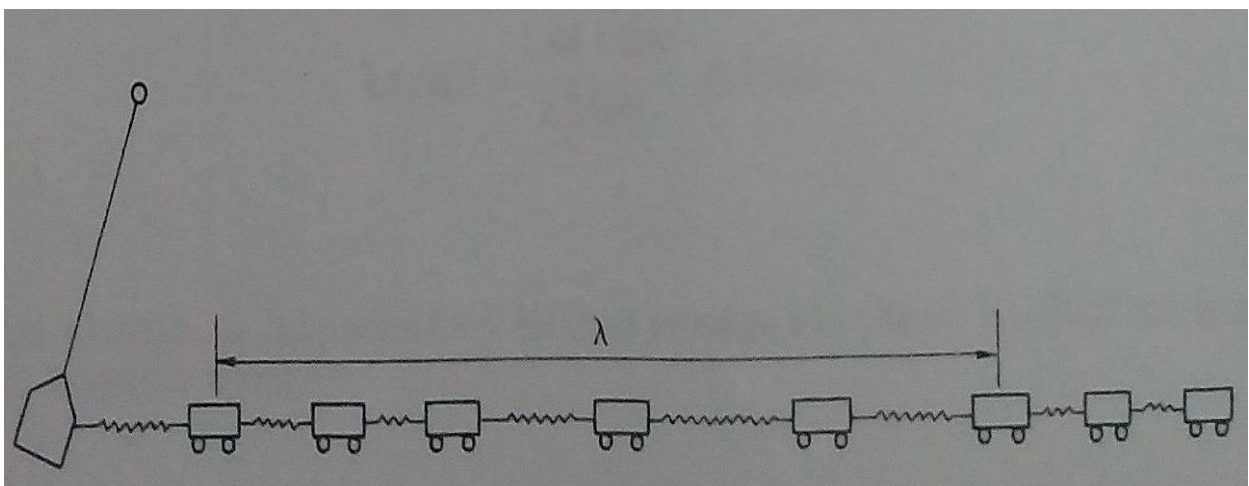


Figure 4-3 : longueur d'onde

Donc la longueur λ est en relation directe avec la fréquence f et la vitesse V comme suite :

$$\lambda(m) = \frac{V(\frac{m}{s})}{f(Hz)}$$

Compte tenu des ordres de grandeur de ces valeurs dans le domaine du contrôle non destructif, il est bon de retenir la formule :

$$\lambda(mm) = \frac{V(\frac{km}{s})}{f(MHz)}$$

Exemple de calcul :

- Une vibration de fréquence $f = 2$ MHz se propage à la vitesse $V = 5940$ m/s, quelle est sa longueur d'onde ?

$$\lambda(mm) = \frac{5,940(\frac{km}{s})}{2(MHz)} = 3mm$$

2.5 Atténuation d'une oscillation au cours de sa propagation

Si on reprend l'exemple du pendule relié à des masses par l'intermédiaire de ressorts, on s'aperçoit que l'amplitude maximale du mouvement des petites masses est d'autant plus faible que ces masses sont éloignées du pendule exciteur, on dit qu'il y a atténuation de l'oscillation en fonction de l'éloignement à l'excitateur.

A une distance x de la source d'excitation l'amplitude de l'oscillation est donnée par :

$$A(x) = A_0 e^{-ax}$$

A_0 représente l'amplitude de l'oscillation de la source et a le coefficient d'atténuation.

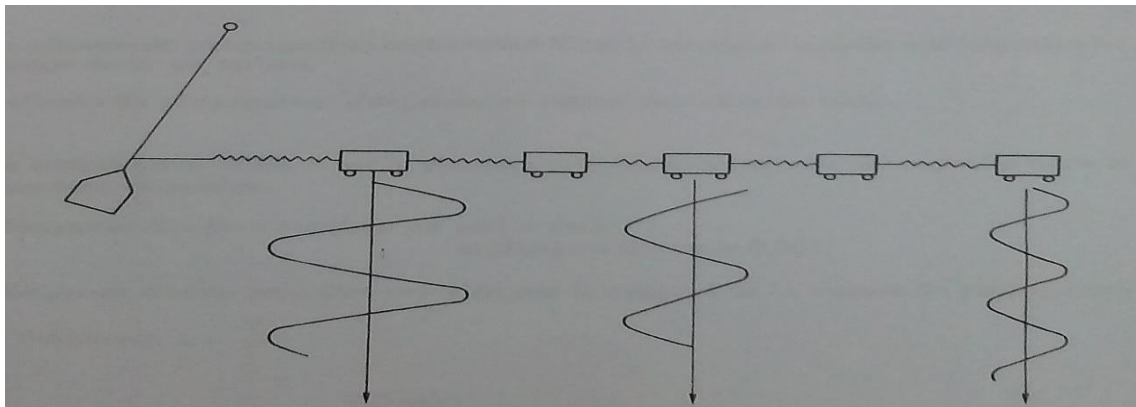


Figure 4-4 : Atténuation du mouvement

3. Vibration acoustique

Une vibration acoustique correspond à un ébranlement de ces particules de matière. Chaque particule oscille et transmet à ses le mouvement.

Ainsi, comme dans le cas du pendule et des masses, il peut y avoir propagation de cette vibration acoustique.

Les ondes ultrasonores sont des vibrations acoustique de hautes fréquences $f > 20 \text{ kHz}$.

Dans le domaine de CND, le fréquence utilisé pour les ondes ultrasonores s'étend généralement de **1 MHz à 10 MHz**.

les ondes ultrasonores peuvent être de différents types suivent le mode de vibration des particules de la matière.

3.1 Ondes longitudinales

Une onde ultrasonore est dite longitudinale ou de compression lorsque la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

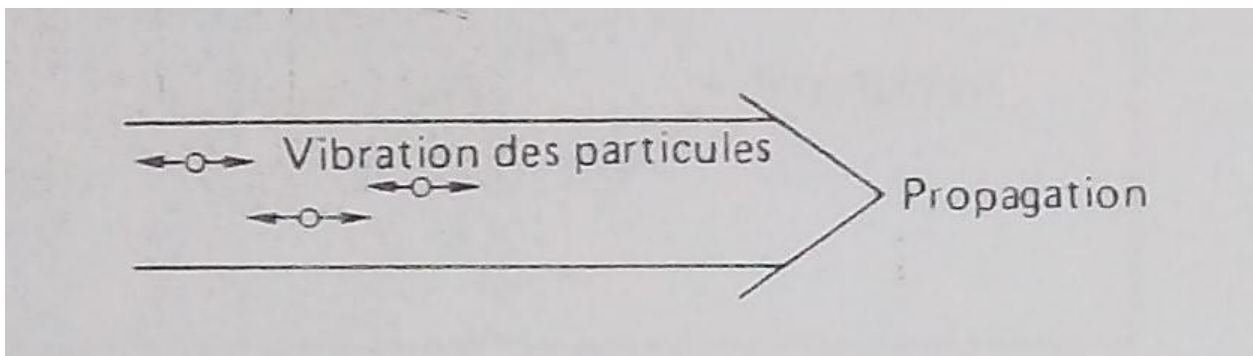


Figure 4-5 : Onde longitudinal

L'émission et la propagation d'une onde longitudinale peuvent être schématisée par l'ensemble constitué par un pendule et des masses reliés entre eux par des ressorts.

3.2 Ondes transversales

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

3.3 Vitesse de propagation des ondes ultrasonores

La vitesse de propagation des ondes dépendent du mode de vibration des particules.

Les vitesses du propagation des ondes longitudinales et transversales dans les milieux les plus usuelles sont données tableau 1.

MATERIAU	VITESSE ONDES LONGITUDINALES $V_L(\frac{m}{s})$	VITESSE ONDES TRANSVERSALES $V_T(\frac{m}{s})$
Eau (20°)	1480	-
Huile légère	1340	-
Acier (1% C)	5940	3220
Aluminium	6300	3100

Tableau 4-1 : vitesse de propagation du défèrent métiers

3.4 Longueur d'onde

En se rappelant la formule $\lambda(mm) = \frac{v(\frac{km}{s})}{f(MHz)}$, on veut à partir du tableau 1 calculer quelques-unes des valeurs des longueurs d'onde d'acier (1% C), fréquences usuelles.

ACIER (1 % C)	VITESSE PROPAGATION (m/s)	LONGUEUR D'ONDE (mm)			
		f = 1MHz	f = 2 MHz	f = 5MHz	f = 10MHz
ONDE L	5940	5,9	3	1,2	0,6
ONDE T	3220	3,2	1,6	0,6	0,3

Tableau 4-2 : longueur d'onde

4. Le faisceau ultrasonore

Dans un milieu infini et homogène, le faisceau ultrasonore se propage en ligne droit. Lorsqu'il rencontre une interface (frontière) entre deux milieux son parcours et sa nature peuvent être modifiés.

4.1 Lois de Descartes

Quand un faisceau ultrasonore rencontre une interface entre deux milieux une partie de son énergie est transmis, l'autre partie est réfléchi ont des directions déterminées par les lois de Descartes. Les angles de réflexion et de réfraction sont déterminées par la relation :

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin i'}{V_1} = \frac{\sin r}{V_2}$$

$$i' = i \Rightarrow \sin r = \frac{V_2}{V_1} \sin i$$

avec :

- **i = angle d'incidence**
- **i' = angle de réflexion**
- **r = angle de réfraction**
- **V₁ = vitesse de propagation dans le milieu 1**
- **V₂ = vitesse de propagation dans le milieu 2**

Exemple :

Considérons l'interface eau-acier pour des ondes longitudinales le faisceau incident dans l'eau fait un angle de 5° avec la normale à la pièce , l'angle de réfraction **r** des ondes longitudinales dans l'acier est donné par : $\sin r = \frac{5940}{1480} \sin 5^\circ = 0.35 \Rightarrow r = 20^\circ$

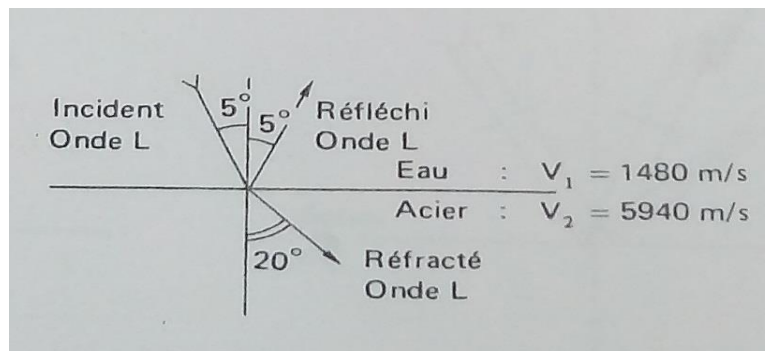


Figure 4-6 : Exemple de réflexion et réfraction des ondes longitudinales

4.2 Changement de mode vibratoire à une interface

Au moment où un faisceau rencontre une interface sous incidence, il ne se transforme pas uniquement en faisceau réfléchi et un faisceau réfracté, mais généralement en deux faisceaux réfléchis et deux autres réfractés. Au passage d'une interface, il y a possibilité de changement de mode vibratoire, c'est-à-dire de générer des faisceaux réfléchis et réfractés aussi bien sous forme d'ondes longitudinales que d'ondes transversales.

L'angle de chaque faisceau réfléchi et réfracté est toujours déterminé par les lois de Descartes en prenant en compte la vitesse de propagation des ondes considérées.

Exemple :

A l'interface eau-acier, un faisceau d'ondes longitudinales a une incidence de 10° , quels sont les angles des faisceaux réfléchis et réfractés ?

- **Faisceau réfléchi : $i' = i = 10^\circ$**
- **Faisceau réfracté ondes L : $\sin r_T = \frac{V_{2T}}{V_{1L}} \sin i = \frac{3220}{1480} \sin 10^\circ \Rightarrow r_T = 22^\circ$**
- **Faisceau réfracté ondes T : $\sin r_L = \frac{V_{2L}}{V_{1L}} \sin i = \frac{5940}{1480} \sin 10^\circ \Rightarrow r_L = 44^\circ$**

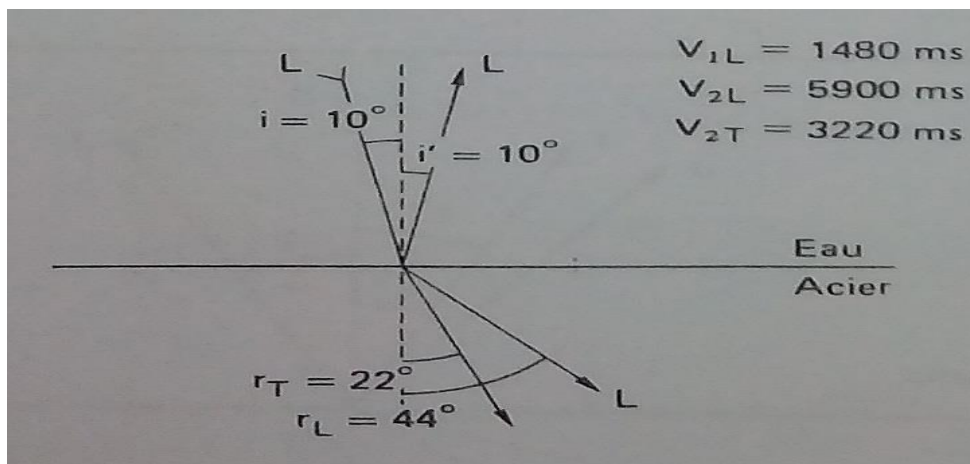


Figure 4-7 : Exemple de détermination de l'orientation des faisceaux réfléchis et réfractés

4.3 Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z caractérise la qualité du matériau à transmettre les ondes ultrasonores. Dans le cas des ondes plans, l'impédance acoustique Z est égale au produit de la masse volumique ρ du matériau par la vitesse de propagation V des ondes ultrasonores dans ce

matériau.

$$Z = \rho \cdot V$$

Généralement Z est exprimée $10^6 \text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}$

$$Z (10^6 \text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}) = \rho (g/cm^2) \cdot V (km/s)$$

MATERIAU	Z_L $10^6 \text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}$	Z_T $10^6 \text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}$
Acier (1 % C)	46,6	25,3

Tableau 4-3 : Ordre de grandeur des impédances acoustiques

5. L'atténuation

L'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Cette atténuation de l'onde est due principalement à deux phénomènes qui se superposent l'absorption et la diffusion.

5.1 Absorption

Est la conversion directe de l'énergie ultrasonore en chaleur à cause des frottements internes au sein du matériau.

Cette phénomène se traduit uniquement par une atténuation de l'onde en fonction de sa propagation.

5.2 Diffusion

La diffusion de l'onde ultrasonore est analogue au phénomène observé avec un faisceau lumineux par temps de brouillard. Cette diffusion se traduit donc par une atténuation de l'onde en fonction de sa propagation et aussi par une dissipation de l'énergie sous forme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace.

L'affaiblissement d'une onde ultrasonore au cours de sa propagation peut être du à :

- La divergence du faisceau.
- L'atténuation causée par le matériau, principalement la diffusion.

Elle se traduit par une décroissance de l'amplitude de la vibration.

6. Conclusion

Le contrôle par ultrasons est un procédé de contrôle non destructif, qui consiste à envoyer une impulsion ultrasonore dans le matériau et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées.

La connaissance de e procédé implique les analyses suivantes :

- Etude de la propagation des ondes ultrasonores.
- La formulation mathématique des phénomènes physiques, qui a été volontairement réduite ici à sa plus simple expression.