

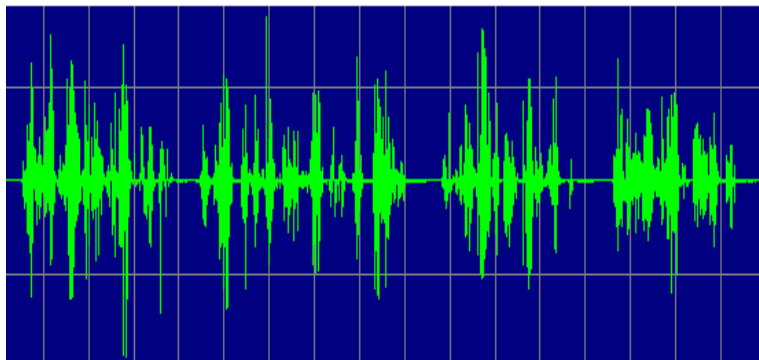
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE ORAN (MB)

FACULTE GENIE ELECTRIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

THEORIE ET PRATIQUE DES ULTRASONS



Dr. S. SOUDANI

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. LA PIEZOELECTRICITE : ANALYSE ET APPLICATIONS	
1.1 Definition.....	1
1.2 Aspect Physique	1
1.3 Matériaux Piézo-électriques.....	4
2. THEORIE DES ULTRASONS.....	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Propriétés des ultrasons.....	7
2.2.1 Propagation d'une onde acoustique.....	7
2.2.2 Différents types d'ondes acoustiques.....	15
2.2.3 Propagation dans les gaz et les liquides.....	17
2.2.4 Propagation dans les solides.....	23
2.2.5 Propagation des ultrasons d'un milieu à un autre.....	26
3. PRODUCTION DES ULTRASONS :.....	34
3.1 Piézo-électricité :.....	34
3.2	
L'Electrostriction :.....	37
3.2.1 Description du phénomène :.....	37
3.2.2 Application du phénomène :.....	38
3.2.3 Application à la production des ultrasons :.....	39
3.3 La	
Magnétostriction :.....	40
3.3.1 Description du phénomène:.....	40
3.3.2 Application à la production des ultrasons :.....	41
3.4 Notion de coefficient de piézoélectricité :.....	42
3.4.1 Coefficient de piézoélectricité de Transmission :.....	42
3.4.2 Coefficient de piézoélectricité de Réception :.....	42
4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL	
A ULTRASONS :.....	44
4.1 Synoptique d'un appareil à ultrasons :.....	44
4.1.1 L'horloge :.....	45
4.1.2 Le Générateur :.....	45
4.1.2 L'Atténuateur :.....	47
4.1.3 Le Filtre(1) :.....	47
4.1.4 Le Palpeur :.....	48
4.1.5 Le Limiteur :.....	49
4.1.6 L'Amplificateur :.....	49
4.1.7 Le Redresseur :.....	49

4.1.8 Le Filtre (2) :.....	49
4.1.9 Le Seuil :.....	50
4.1.10 La Visualisation :.....	51
5. APPLICATIONS DES ULTRASONS :.....	
5.1 Les principales Techniques de Contrôles par Ultrasons :.....	52
5.1.1 Technique par Contact Direct :.....	52
5.1.2 Technique par Immersion :.....	53
5.1.3 Technique par Irrigation :.....	53
5.2 Les Procèdes de Contrôle par Ultrasons :.....	56
5.2.1 Procède par Echo :.....	56
5.2.2 Procède par Transparence :.....	56
5.2.3 Procède par Résonance :.....	58
6. LES PROBLEMES LIES AU CONTROLE PAR ULTRASONS :.....	59
6.1 Le Passage des Ultrasons du Palpeur au Milieu :.....	60
6.2 Réflexion sur un Défaut :.....	60
6.3 L'Effet de Bord :.....	61
6.4 Propagation des Ultrasons dans le Milieu :.....	62
6.5 Réflexion sur le fond :.....	62
6.6 Autres problèmes liés au contrôle par ultrasons :.....	62
6.6.1 Corrosion :.....	62
6.6.2 Etat de la Surface du Milieu :.....	62
6.6.3 Environnement du Milieu de Contrôle :.....	63
7. LES DIFFERENTS TYPES DE REPRESENTATION DU CONTROLE PAR ULTRASONS	64
7.1 Représentation de Type A :.....	64
7.2 Représentation de Type B :.....	66
7.3 Représentation de type C :.....	67
8. LES TRANSDUCTEURS ULTRASONORES :.....	70
8.1 Transducteurs et Palpeurs :.....	70
8.1.1 Le Transducteur :.....	70
8.1.2 Le Palpeur :.....	70
8.1.2.1 Pastille Piézoélectrique :.....	70
8.1.2.2 L'Amortisseur :.....	70
8.1.2.3 Le Câble Coaxial :.....	71
8.1.2.4 Le Boitier :.....	71
8.1.3 Les Différents Types de Palpeurs :.....	73
8.1.3.1 Les Palpeurs Droits :.....	74
8.1.3.2 Les palpeurs Obliques :.....	74
8.1.3.3 Les Palpeurs focalisés :.....	78
8.1.4 Détérioration et Entretien des Palpeurs.....	79

9. BIBLIOGRAPHIE.....	80
-----------------------	----

INTRODUCTION

Ce polycopé pédagogique est destiné aux étudiants en Master option : Informatique Industrielle, Electronique Biomédicale et Physique Radiologie dans le but de les familiariser à une notion physique essentielle dans leur formation académique, et un outil de control indispensable dans leur carrière professionnelle. Cette notion, c'est la notion des ultrasons.

Pour atteindre ces objectifs, la chronologie de ce travail c'est faite en quatre étapes :

Etape 1 : Analyse du Phénomène

Etape 2 : Propriétés Physiques et Propagation des Ultrasons

Etape 3 : Applications et Principe de Fonctionnement des Appareils à Ultrasons

Etape 4 : Technologie des Transducteurs à Ultrasons

Chapitre - I. La Piézo-électricité "Analyse et Application"

Le chapitre se propose d'expliquer le phénomène piézo-électrique et présente ensuite deux applications piézo-électriques: Les capteurs et Les Filtrés

-I. Définition

1°) Effet direct

Si on applique à un échantillon de corps piézo-électrique une force mécanique, il se produit dans la masse de l'échantillon une polarisation électrique, et à sa surface des charges électriques.

2°) Effet inverse

Si on soumet à un champ électrique un échantillon piézo-électrique, celui-ci se déforme sous l'action de forces internes.

Cette déformation change de sens en même temps que l'on inverse le sens du champ électrique.

-II. Aspects physiques de la piézo-électricité

1°) ~~Modèles~~ Modes Piézo-électriques.

Modes d'utilisation d'un parallélépipède de matériaux Piézo-électriques.

Il y a ~~un~~ nombre de trois.

- Le mode Longitudinal Fig 1-a
- Le mode Transversal Fig 1-b
- Le mode Hydrostatique Fig 1-c

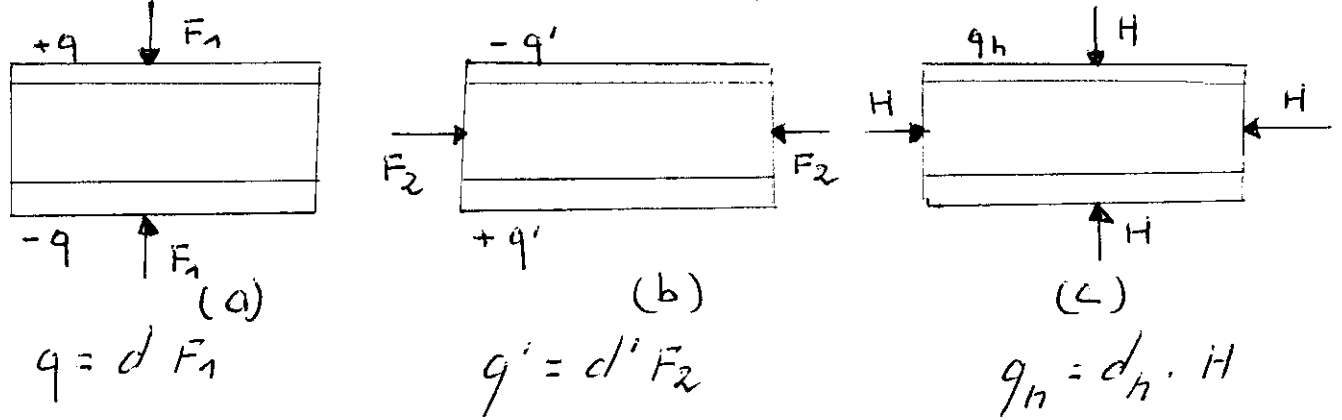


Fig-1. les 3 modes d'utilisation d'un matériau piezo-électrique

où q, q', q_h : charges apparaissant sur les faces du matériau (Coulomb)

d, d', d_h : modules piezo-électriques (Coulomb/Newton) ou (

F_1, F_2, H : Forces appliquées au matériau.

2^o) Relations entre Forces et Charges

Pour exprimer ces relations, prenons l'exemple d'un matériau piezo-électrique bien connu qui est le quartz

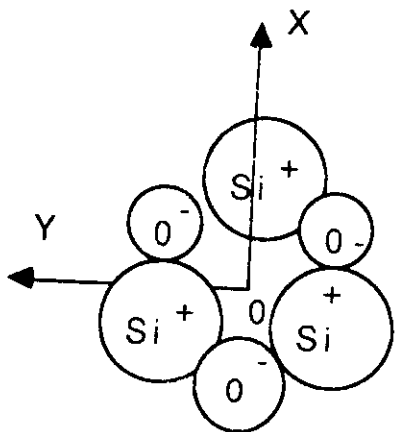
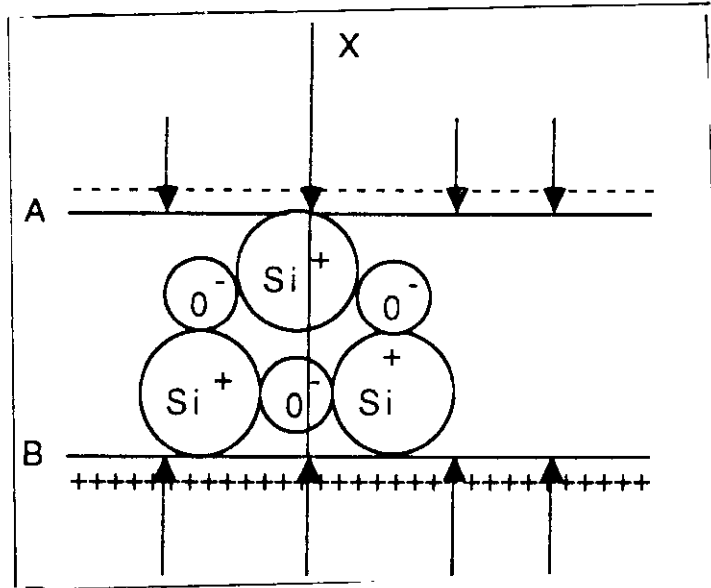


Fig-2. Cellule de quartz électriquement neutre.

Une force appliquée, suivant l'axe électrique Ox déforme la cellule et des charges négatives apparaissent sur la face A alors que des charges négatives apparaissent sur la face B.

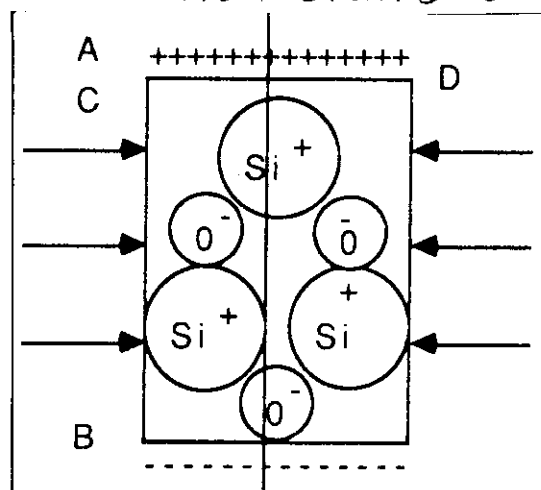
c'est le mode d'utilisation longitudinal



Dans ce cas, la charge globale est proportionnelle à la force appliquée

$$Q_x = K \cdot F_x$$

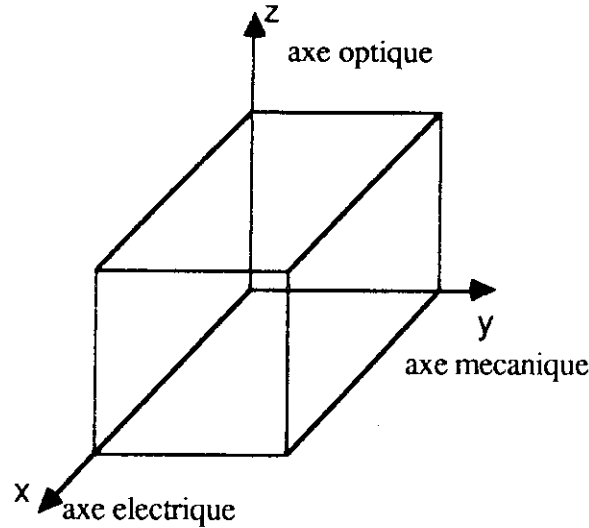
Alors qu'une force appliquée suivant l'axe mécanique Oy déforme la cellule et des charges de signes opposés à celles du cas précédent apparaissent sur les faces A et B: c'est le mode d'utilisation transversal.



Dans ce cas, la charge globale est proportionnelle à la force et au rapport des dimensions des faces A etc

$$Q_y = K \cdot \frac{L}{t} \cdot F_y$$

Du fait de la symétrie du quartz, il n'y a pas de polarisation quand on applique une force dans la direction de l'axe optique



L'effet inverse fait que si on applique une tension V_x entre les faces A et B, non initialement chargées, il se crée une déformation Δz sur la face C telle que

$$\Delta z = k \cdot V_x \quad (m)$$

et une déformation ΔL sur la face A telle que

$$\Delta L = k \cdot \frac{L}{z} \cdot V_x \quad (m)$$

Remarque:

La déformation Δz crée des ondes transversales quand à ΔL , elle crée des ondes longitudinales.

- III - Matériaux Piezo-Electriques

- 1 - le Quartz:

le quartz est un cristal de silice (SiO_2), il existe sous forme naturelle mais peut aussi être synthétisé.

- 2 - La Tourmaline

Elle n'est pas très utilisée à cause de son prix élevé et de sa faible sensibilité.

- 3 - Sel de Rochelle

Le plus utilisé industriellement pour les têtes de lecture de tourne disques et les microphones.

- 4 - Les céramiques

on peut donner à un matériau céramique polycristallin, une réponse piézo-électrique permanente, comparable à celle obtenue d'un cristal de quartz, en le soumettant à un champ électrique de l'ordre de 20 kV/cm pendant 15 minutes.

Pendant cette période, l'élément est maintenu à une température supérieure de 120°C au point de Curie (Température à laquelle la céramique perd ses propriétés piézo-électrique de façon irréversible).

- A - Comportement à la résonance

À la fréquence de résonance mécanique, propre à la lame piézo-électrique, l'amplitude de la vibration prend une valeur considérable plus forte que la déformation en statique.

Le rapport entre les deux est appelé coefficient de surtension,

Il est compris entre 25000 et 2.000.000 suivant les matériaux, leur qualité et leur coupe.

cette Fréquence est égale à :

$$F = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{e}}$$

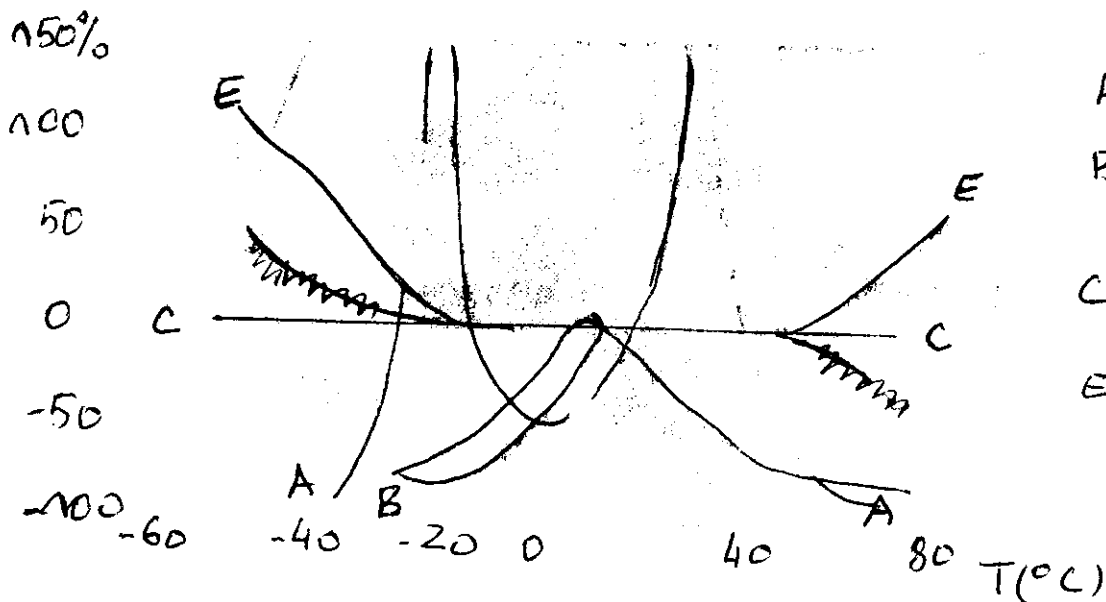
avec L = Longueur de la lame
 E = module d'élasticité
 e = masse volumique.

- B. Comportement en fonction de la température et de l'humidité

La résistance d'isolement de tous les matériaux piézo-électriques diminue lorsqu'ils sont dans une atmosphère humide.

Certains sont solubles dans l'eau et, s'ils ne sont pas protégés, il faut alors surveiller le taux d'humidité ambiante.

Les variations de température affectent le facteur de sensibilité, la permittivité, le facteur de dissipation et la résistance volumique des ~~matériaux~~ matériaux piézo-électriques.



A = Sel de Rochelle
 B = Titanate de Barium - m "A"
 C = Quartz
 E = Titanate de Barium - 10 m "B"

- Variation de la constante diélectrique avec la température de quelques matériaux piézo-électriques.

Chapitre - II - Les ultrasons.

- I - Introduction

Les ultrasons sont des ondes acoustiques dont les fréquences sont supérieures à 20 KHz. Ils sont de même nature que les ondes sonores; leur propagation et leur absorption dans les divers milieux sont régies par les mêmes lois que celles qui s'appliquent à la transmission des sons.

- II - Propriétés des ultrasons

- 1 - Propagation:

Dans un milieu déterminé, de dimensions infinies, les ultrasons se propagent comme des ondes acoustiques. Le type d'onde qui se propage dépend du milieu.

La vitesse v avec laquelle les ultrasons se propagent dans un milieu dépend de l'élasticité " k " et de la densité " e " du milieu. Elle est donnée par l'équation

$$v = \sqrt{\frac{k}{e}}$$

où k est la constante élastique appropriée du milieu
 e " " densité du milieu (g/cm^3)

Dans le cas des gaz et des liquides, " k " est le module d'élasticité. Mais pour les solides, le coefficient de rigidité " μ " doit être pris en considération et " k " est remplacée par " k' "

$$\text{avec } k' = k + \frac{4}{3} \mu$$

et K' devient l'élasticité volumique.

La longueur d'onde λ d'une onde ultrasonore dans un milieu est liée à la fréquence f par la relation

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Quand des ondes sonores se propagent dans un milieu infini, elles peuvent le faire, soit avec une symétrie sphérique dans toutes les directions, soit sous forme de faisceaux parallèles d'ondes planes : ceci dépend de la nature de la source de vibration.

D'une manière idéale, si celle-ci est ponctuelle, elle produit une onde sphérique. Comme cette condition est impossible à réaliser en pratique, on résonne alors sur la longueur d'onde par rapport au rayon de la source.

- Si le rayon de la source est petit par rapport à la longueur d'onde du son émis, c'est alors une onde sphérique qui se propage.

- Par contre si le rayon de la source est grand devant la longueur d'onde du son émis c'est une onde plane qui se propage.

A une grande distance de la source un front d'onde sphérique se rapproche de plus en plus de la forme plane et on peut considérer qu'à cette distance l'onde est plane.

Quand le son se propage, les particules du milieu oscillent autour d'une position d'équilibre avec une certaine vitesse qu'on appelle "vitesse de la particule"

Considérons une onde plane progressive sinusoïdale se propageant dans une direction qui sera celle de l'axe Ox . Le déplacement " b " à l'instant " t " d'une particule dont la position d'équilibre est " x " sera donnée par

$$b = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$b = a \sin 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right)$$

où a : est l'amplitude du déplacement de la particule

T : " La période

f : " La fréquence

λ : " La longueur d'onde.

Puisque $v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$ et en posant $\omega = 2\pi f$ on a alors

$$b = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (vt - x)$$

$$(2-6) \quad b = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = a \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right)$$

on remarque donc que la particule vibre à la même pulsation que l'onde sonore mais avec un déphasage

$$\phi = \omega \cdot \frac{x}{v}$$

En différentiant l'équation (2-6) on obtient la vitesse de vibration de la particule

$$\frac{db}{dt} = a\omega \cos(\omega t - \phi)$$

considérons une couche d'un milieu d'épaisseur dx
sa masse est alors $\rho \cdot dx$ où ρ est la densité
du milieu.

L'énergie cinétique de cette couche est alors
donnée par la relation.

$$dE = \frac{1}{2} \rho dx \cdot \left(\frac{db}{dt}\right)^2$$

$$\text{comme } b = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) \Rightarrow dE = \frac{1}{2} \rho dx a^2 \omega^2 \left[\cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) \right]^2$$

L'énergie cinétique est donnée par intégration

$$E = \int dE = \frac{1}{2} \rho \cdot a^2 \omega^2$$

cette énergie est l'énergie totale par unité de volume
qu'on appelle également : "densité d'énergie"

et l'énergie transmise par seconde et par unité
de surface d'un front d'onde est :

$$J = \frac{1}{2} \rho \cdot a^2 \cdot \omega^2 \cdot v$$

qu'on appelle également "Intensité de l'onde
acoustique" ou intensité acoustique tout court.

où : ρ : La densité du milieu

a : L'amplitude du déplacement de la particule

ω : La pulsation de l'onde sonore

v : La vitesse de l'onde sonore.

Les oscillations des particules du milieu pendant la propagation d'une onde forment des régions de compression et de dépression.

La pression acoustique alternative "p" en un point donné est reliée à la vitesse de la particule dans le milieu par l'équation.

$$p = \rho \cdot v \cdot \frac{db}{dt}$$

Et le rapport de la pression acoustique à la vitesse de la particule en un point donné est égale au produit de la densité du milieu par la vitesse de l'onde est une quantité constante.

$$\frac{p}{\frac{db}{dt}} = \rho \cdot v = \text{constante}$$

on appelle souvent cette équation "La loi d'ohm en acoustique". Et le rapport précédent est appelé Impédance Acoustique Z .

$$\frac{p}{\frac{db}{dt}} = \rho \cdot v = Z$$

Pour la vitesse maximale de la particule c'est-à-dire pour $db/dt = a \omega = \mu$. L'amplitude P de la pression alternative est alors

$$P = \mu \cdot Z = Z \cdot a \cdot \omega$$

Et l'intensité de l'onde peut être exprimée sous différentes formes.

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \rho \cdot a^2 \cdot \omega^2 \cdot v \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot u^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot u^2 \\ &= \frac{1}{2} Z \cdot u^2 \\ &= \frac{1}{2} P \cdot u \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{\rho \cdot v} \end{aligned}$$

Pour mesurer l'intensité sonore ou "intensité acoustique" il faut avoir les valeurs de ρ , v , ω et mesurer :

- soit l'amplitude, a , du déplacement de la particule
- soit la vitesse, v , de l'onde
- soit l'amplitude, P , de la pression acoustique.

Exemple-1. considérons une onde sonore se propageant dans l'eau avec une intensité acoustique $J = 2 \text{ W/cm}^2 = 2 \cdot 10^7 \text{ erg/cm}^2$ sachant que la densité de l'eau est, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ et la vitesse du son dans l'eau est : $v = 1500 \text{ m/s}$

En utilisant la relation $J = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{\rho \cdot v}$

L'amplitude de la pression alternative est égale à

$$P = \sqrt{2 J \cdot \rho \cdot v}$$

$$= \sqrt{2 \cdot 2 \cdot 10^7 \cdot 1,5 \cdot 10^5 \cdot 1} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

Comme $10^6 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ atm}$

$$P = 2,5 \text{ atm.}$$

La pression dans le milieu (l'eau) oscille donc périodiquement entre une compression de 2,5 atm et une dépression de 2,5 atm.

Pour déterminer la vitesse ^{maximale} d'oscillation de la particule d'eau on utilise l'équation

$$u = \sqrt{\frac{2J}{\rho \cdot v}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^7}{1 \cdot 1,5 \cdot 10^5}}$$

$$u = 16 \text{ cm/s}$$

Exemple - 2 - considérons une sirène fonctionnant dans l'air sachant que :

L'amplitude de la pression $P = 3000 \text{ dyn/cm}^2$
 $= 3 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$

La densité de l'air est $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

La vitesse du son dans l'air est $v = 3,32 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$

La vitesse maximale des particules d'air est alors

$$u = \frac{P}{e \cdot v} = \frac{3000}{3,32 \cdot 10^4 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}$$

$$u = 70 \text{ cm/s}$$

Et l'intensité sonore est :

$$J = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{e \cdot v} = \frac{(3000)^2}{2 \cdot 3,32 \cdot 10^4 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}} = 10^5 \text{ erg/cm}^2$$

$$J = 10^{-3} \text{ W/cm}^2$$

Les sirènes sont des sources très puissantes dans l'air, où les intensités normales sont considérablement inférieures à celles qu'elles produisent :

Ceci est dû au fait que le son en se propageant s'atténue.

Il y a donc perte d'intensité à mesure que l'on s'éloigne de la source.

Cette perte est due à différents facteurs tels :

- La viscosité du milieu.
- La conduction thermique du milieu.
- Au fait que le son se propage habituellement, non pas dans un milieu infini, mais dans un milieu fini. Les ondes doivent donc, à un moment ou à un autre, passer d'un milieu à un autre : d'où perte d'énergie lors de ce passage.

II-2 Paramètres de l'onde ultrasonore : [6]

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser cette onde ultrasonore.

II.2.1. Célérité et impédance

La célérité de l'onde acoustique est la vitesse de propagation de la variation de pression dans le milieu : elle dépend uniquement du milieu. Le comportement d'un milieu matériel vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique, Z .

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

$$Z = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}}$$

Avec Z = impédance acoustique
 χ = compressibilité du milieu
 ρ = masse volumique

Elle est d'autant plus grande que la densité est importante et que la compressibilité est faible.

Elle traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons et s'exprime en $\text{kg/m}^2/\text{s}$. Elle est faible pour l'air et très élevée pour l'os :

milieu	z en $10^6 \text{ Kg/m}^2/\text{S}$
air	0,0004
Tissus mous	1,63
os	3,65 à 7,09

Tableau 1: quelque valeur d'impédance.

II.2.2 Compressibilité : [7]

La compressibilité est une caractéristique d'un corps, définissant sa variation relative de volume sous l'effet d'une pression appliquée. C'est une valeur très grande pour les gaz, faible pour les liquides et très faible pour les solides usuels.

Elle se définit comme $\chi = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}$ où V est le volume du corps et P la pression appliquée. La variation de volume avec la pression étant le plus souvent négative, cette définition rend la compressibilité χ positive.

Cette définition est le plus souvent insuffisante : sous l'effet d'une compression, les corps ont tendance à s'échauffer, et donc on définit une compressibilité isotherme pour un corps restant à température constante :

$$\chi_i = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}, \text{ la dérivée étant prise à température constante.}$$

On remarquera que le coefficient de compressibilité est l'inverse du coefficient d'élasticité du milieu. Cette impédance conditionne avec la masse volumique la célérité de l'onde ultrasonore :

$$c = \frac{Z}{\rho}, \quad Z = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}} \quad \Rightarrow \quad c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi}}$$

Avec Z = impédance acoustique
 c = célérité

ρ = masse volumique

Plus l'impédance est grande, plus la célérité de l'onde ultrasonore, exprimée en m/s , est grande.

milieu	Célérité en m/s
air	343
graisse	1410---1470
foie	1535---1580
muscle	1545---1631
os	2100---4080

Tableau 2 : quelque valeur

de célérité.

Dans les tissus mous, la célérité variant peu, on considère qu'elle a une valeur moyenne de $1540 m/s$: les faibles différences ne sont pas utilisées pour l'imagerie. Au niveau de l'os, la charge calcique modifie grandement la célérité ce qui autorise une approche densitométrique.

II.2.5 Atténuation des ondes ultrasonores : [8]

Dans un matériau idéal, une onde ultrasonore n'est atténuée que du fait de sa divergence. Les matériaux naturels produisent une atténuation plus ou moins prononcée des ondes ultrasonores. Cette atténuation est d'autant plus importante que la fréquence des ultrasons est élevée.

L'atténuation des ondes ultrasonores est due principalement à deux phénomènes qui se superposent : l'absorption et la diffusion

$$\alpha = \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{diffusion}}$$

Où α est le coefficient d'atténuation du milieu.

II.2.5.1 L'absorption :

L'absorption se traduit par une atténuation de l'onde en fonction de sa propagation. Elle est prédominante dans les matières plastiques et synthétiques.

II.2.5.2 La diffusion :

Les matériaux dans lesquels les ondes ultrasonores se propagent ne sont pas strictement homogènes. Cette hétérogénéité peut correspondre aux grains d'un milieu poly cristallin par exemple.

Toutes ces hétérogénéités se traduisent comme des minis interfaces au passage des ondes ultrasonores qui pourraient être légèrement déviées et qui vont provoquer la réflexion d'une partie de l'énergie transmise.

Cette réflexion se traduit par une dissipation d'énergie sous forme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace.

La diffusion est d'autant plus importante que les hétérogénéités sont grandes, comme dans la fonte, c'est-à-dire que la diffusion augmente lorsque la fréquence augmente (la longueur d'onde diminue).

- > Revenir
à p. 8

1-1. Différents types d'ondes

- a. ondes Longitudinales ou de compression

La trajectoire des éléments est la même que la direction de propagation des ondes.

Ces ondes, désignées par le symbole O. L., sont faciles à produire et à détecter; ce sont les plus utilisées dans le contrôle industriel.

La notion d'ondes Longitudinales est mise en évidence par l'expérience d'un ressort à boudin à spires non jointives est fixé à ses deux extrémités.

Près d'une attache, on pince plusieurs spires, puis on les lâche. D'abord comprimées, elles se relâchent, puis compriment les spires suivantes qui se relâchent à leur tour.

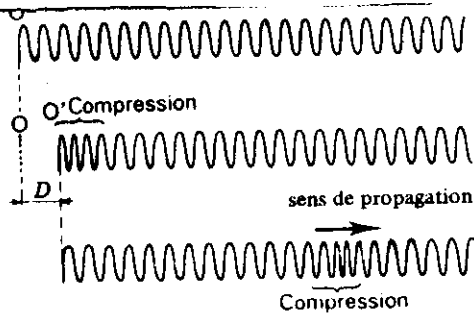


Fig. 12

Les vibrations se font donc dans le même sens que la propagation.

- b. ondes transversales ou de cisaillement

La trajectoire des éléments est perpendiculaire à la direction de propagation

Les ondes sont désignées par le symbole O.T, elles ne se propagent que dans les solides, alors que les O.L. se propagent dans tous les milieux, solides, liquides et gaz.

La notion d'ondes transversales est donnée par l'une des expériences suivantes.

* on donne un choc perpendiculaire à l'axe d'une corde posée sur le sol.

La déformation de la corde se fait verticalement, en cisaillement, et se propage tout le long de la corde d'où une image des ondes transversales.

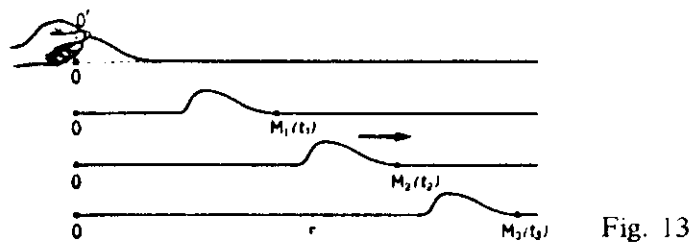
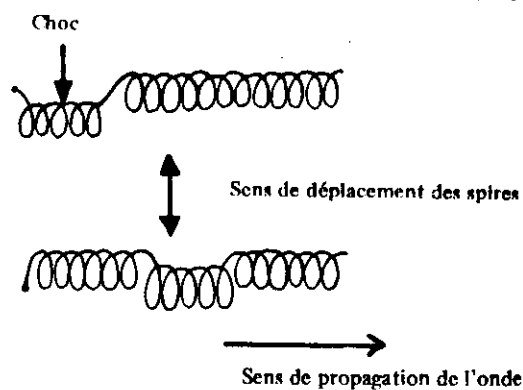


Fig. 13

* on peut faire la même expérience avec un ressort.



Ces expériences nous montrent un transfert d'énergie analogue à celui d'une onde.

Le milieu transmet simplement le mouvement aux constituants élémentaires voisins, et retombe

inerte après le passage de l'onde : c'est une transmission d'énergie et non de matière.

- c - ondes de surface

Les ondes de surface, ou de Rayleigh sont une composition des deux types précédents, elles suivent la surface de la pièce.

Elles ne se propagent que dans les corps solides.

- 2 - Propagation des u.s. dans les gaz et les liquides

Dans ces milieux, les ondes sonores se propagent sous forme d'ondes longitudinales, peu sensibles à la dispersion et à l'atténuation.

Les particules du milieu vibrent donc suivant la direction de propagation et se propagent suivant les rayons d'une sphère (ou d'une portion de sphère) dont l'émetteur ultrasonore est le centre.

La vitesse des u.s. dans ces milieux est donnée par

$$c = \sqrt{\frac{K'}{\rho}}$$

où K' : est le module d'élasticité et est égale

$$K' = \frac{dP}{dV/V_0} = \rho_0 \frac{dP}{d\rho}$$

où dP est la contrainte produisant une déformation correspondante.

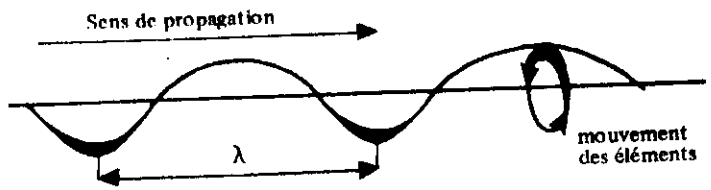


Fig. 15

dV : élément de volume

V_0 : volume initial

$d\rho$: différentielle de la densité

ρ_0 : densité originelle

or les compressions et les dépressions qui résultent des ondes sonores se propageant dans ces milieux s'établissent si rapidement que, ni la chaleur qui prend naissance dans les régions de compression, ni le refroidissement dans les régions de dépression, n'ont le temps d'être transférés au milieu environnant.

Cela veut dire que les changements se font de manière adiabatique (sans échange d'énergie d'où la température constante)

Les relations entre la pression et le volume ou la densité s'expriment alors sous la forme

$$P \cdot V^\gamma = \frac{P}{\rho^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} = \text{constante}$$

où γ = rapport des chaleurs spécifiques à pression et volume constants.

d'où
$$P = \rho^\gamma \cdot \frac{P_0}{\rho_0^\gamma}$$

$$\frac{dP}{d\rho} = \gamma \cdot \rho^{\gamma-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0^\gamma}$$

$$\text{et } K = \rho_0 \frac{dP}{d\rho} = \gamma \cdot \rho_0^{\gamma-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} \cdot \rho_0$$

$$= \gamma \cdot \rho_0^{\gamma-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0^{\gamma-1}}$$

comme $\rho_0^{\gamma-1} = \rho_0^{\gamma-1}$

on aura donc $K = \gamma \cdot P_0$ et $P = P_0$

et la vitesse des u.s dans les liquides et les gaz ~~est~~ devient

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_0}{\rho_0}}$$

P_0 : est aussi appelé module de compressibilité :

A température constante, dans le cas des gaz, le rapport P/ρ est constant, la vitesse du son dans les gaz est donc indépendante de la pression.

Cependant, à très haute pression, ceci n'est plus vrai : car il y a échange d'énergie entre les ondes u.s et le milieu : la température du milieu varie alors et sa densité devient variable de telle sorte que.

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \alpha T}$$

α : coefficient de dilatation volumique à pression constante.

T : température en °C.

La vitesse du son dans les gaz à une température T est alors.

$$v_T = \frac{e_T}{\rho_T} =$$

$$v_T = \sqrt{\frac{k}{\rho_T}} = \sqrt{\frac{\delta P_0}{\rho_T}} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha T) \delta P_0}{\rho_0}}$$

comme soit

$$v_T = \sqrt{\frac{\delta P_0 (1 + \alpha T)}{\rho_0}}$$

en posant $v_0 = \sqrt{\frac{\delta \cdot P_0}{\rho_0}}$ on aura donc

$$v_T = v_0 \sqrt{(1 + \alpha T)}$$

comme pour les gaz $\alpha = \frac{1}{273}$ par °C

$$\text{d'où } v_T = v_0 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{273} T(^{\circ}\text{C})\right)} = v_0 \sqrt{\left(\frac{273 + T(^{\circ}\text{C})}{273}\right)}$$

$$= v_0 \sqrt{\left(\frac{T(^{\circ}\text{K})}{273}\right)}$$

soit
$$v_T = v_0 \sqrt{\frac{\theta}{273}}$$

où θ est la température absolue du gaz

Le tableau suivant donne Les valeurs de La vitesse du son dans Les gaz. ainsi que Leur densité et Leur impédance acoustique spécifique ($Z_s = \rho \cdot v$)

gaz	Temp (C)	v cm/s.10	ρ g/cm ³ . 10	Imp Ac Sp
air	0	0.331	1.293	42.8
	20	0.343	1.205	41.3
Argon	0	0.319	1.781	56.8
Azote	0	0.334	1.251	56.8
Chlore	0	0.206	3.214	66.2
Dioxyde de Carbone	0	0.269	1.917	51.2
Ethylene	0	0.317	1.26	39.9
Hydrogene	0	1.28	0.09	11.5
Helium	0	0.97	0.179	17.4
Methane	0	0.43	0.717	30.8
Neon	0	0.435	0.90	39.2
Oxygene	0	0.316	1.429	45.2
Vapeur d'eau	100	0.405	0.596	24.1
	0	0.401	0.00485	0.19

Remarques.

* L'équation $v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$ s'applique aussi bien aux Liquides qu'aux gaz.

* Dans Les liquides, La vitesse du son croit à peu près linéairement en fonction de La pression.

* La vitesse du son varie avec La température du liquide. Dans tous Les liquides La vitesse décroît quand La température augmente sauf dans L'eau ou La vitesse croit avec La température pour atteindre un maximum à environ 80°C.

Cette accroissement est d'environ 250 cm/s.°C.

Le tableau suivant donne la vitesse du son, la densité et l'impédance acoustique spécifique de divers liquides.

Liquide	Temperature $^{\circ}\text{C}$	Vitesse $\text{cm/s} \cdot 10^5$	Densité g/cm^3	Impédance acoustique Spécifique $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ e.v 10^5
Benzene	20	1,32	0,879	1,16
eau douce	17	1,43	1,0	1,43
Eau de mer	17	1,51	1,025	1,55
Ethanol	20	1,17	0,789	0,923
Glycerine	20	1,92	1,260	2,42
Mercure	20	1,45	13,55	19,7
Petrole	15	1,33	0,7	0,931

Tableau 2.2- Vitesse du son, densité et impédance spécifique des liquides

3. Propagation des ultrasons dans les solides

Dans les solides il y a non seulement la propagation des forces de compression, (ondes longitudinales) mais également des forces de cisaillement (ondes transversales) et des forces de torsions (ondes de surface).

La nature des ondes excitées dans un milieu dépend beaucoup de la forme et des dimensions de ce milieu.

Si on s'intéresse à un solide de dimensions finies, c.-à-d. limité dans deux de ses dimensions de manière à former un barreau.

La vitesse des ondes longitudinales est alors donnée par

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

où E : est le module de Young du matériau
 ρ : " La densité du matériau

De manière analogue, la vitesse des ondes transversales est donnée par :

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

où : μ : est le module d'élasticité transverse
 ρ : La densité

Les deux grandeurs E et μ sont liées par l'équation

$$E = 2\mu(1 + \nu)$$

ou ν : est le coefficient de poisson.

Par contre si l'on s'intéresse à un milieu solide illimité (infini), c.-à-d. de dimensions grandes devant la longueur d'onde du son qui se propage, la vitesse des ondes longitudinales devient

$$v_{L,\infty} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{2(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Dans beaucoup de cas

$$\nu = \frac{1}{4}$$

-d'où
$$v_{L,\infty} = 1,1 \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

on remarque donc que la vitesse des ondes longitudinales est plus grande dans un solide illimité que dans un barreau.

Par contre la vitesse des ondes transversales reste la même car l'élasticité est la même pour les ondes de cisaillement qu'elles soient dans les solides limités ou dans les solides illimités.

En plus des ondes longitudinales et transversales, il est aussi possible, dans des conditions convenables, d'obtenir des ondes de surface qui se propagent le long de la surface d'un solide sans pénétrer dans le volume.

De telles ondes résultent de la combinaison de déplacements à la fois longitudinaux et transversaux. Leur vitesse est donnée par:

$$v_s = \frac{0,87 + 1,125}{1 + \nu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Le tableau ci-dessous représente des valeurs moyennes de la vitesse de propagation du son dans certains solides.

Matériau	Vitesse des O.L.	Vitesse des O.T.
acier	5 850 m/s	3 230 m/s
air	330 m/s	
plexiglass	2 700 m/s	1 400 m/s
eau	1 480 m/s	
nickel	4 660 m/s	2 960 m/s

- 4- Propagation des ultrasons d'un milieu à un autre

A la frontière entre deux milieux différents, une onde sonore est partiellement réfléchie et partiellement transmise.

L'onde réfléchie se propage alors dans une direction négative dans le premier milieu, avec la vitesse originelle.

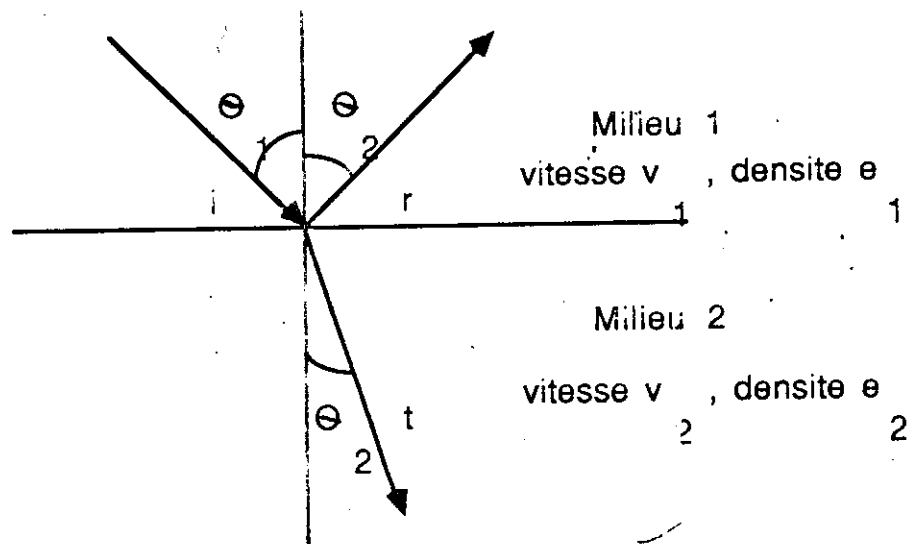


Fig 2-5 Propagation d'un milieu à un autre

A la frontière entre les deux milieux, on doit vérifier que la composante normale à la surface (db/dt) de la vitesse de la particule doit être continue et que la variation de pression P doit être aussi continue:

$$\frac{db}{dt}_i \cos \theta_1 + \frac{db}{dt}_r \cos \theta_2 = \frac{db}{dt}_t \cos \theta_2 \quad (2-39)$$

et $P_i + P_r = P_t$

comme $P = e \cdot v \cdot \frac{db}{dt}$ donc

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot \frac{db}{dt_i} - \rho_1 \cdot v_1 \cdot \frac{db}{dt_r} = \rho_2 \cdot v_2 \cdot \frac{db}{dt_t} \quad (2.41)$$

Le signe négatif du second terme indique que la direction de propagation de l'onde réfléchie est inversée.

on obtient des deux équations (2.39) et (2.41) et en éliminant le terme $(\frac{db}{dt})_i$ on aura.

$$\frac{(db/dt)_r}{(db/dt)_i} = \frac{\rho_2 \cdot v_2 \cdot \cos \theta_1 - \rho_1 \cdot v_1 \cdot \cos \theta_2}{\rho_2 \cdot v_2 \cdot \cos \theta_1 + \rho_1 \cdot v_1 \cdot \cos \theta_1} = r \quad (2.42)$$

r : est le coefficient de réflexion

et en éliminant le terme $(\frac{db}{dt})_r$ on aura

$$\frac{(db/dt)_t}{(db/dt)_i} = \frac{2 \rho_1 \cdot v_1 \cdot \cos \theta_1}{\rho_2 \cdot v_2 \cdot \cos \theta_1 + \rho_1 \cdot v_1 \cdot \cos \theta_2} = t_{12} \quad (2.43)$$

t_{12} : coefficient de ~~refl~~ transmission du milieu (1) au milieu (2)

cas où l'incidence est normale. donc $\theta_1 = \theta_2 = 0$ et si on pose :

$Z_1 = \rho_1 \cdot v_1$: impédance acoustique spécifique du milieu (1)

$Z_2 = \rho_2 \cdot v_2$: impédance acoustique spécifique du milieu (2)

d'après le principe de continuité on a également

$$J_i = J_r + J_t$$

où J_i , J_r et J_t sont les énergies sonores des ondes incidente, réfléchie et transmise

or comme

$$J = \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot \left(\frac{db}{dt} \right)^2$$

$$\text{on aura donc : } \rho_1 \cdot v_1 \cdot \left(\frac{db}{dt} \right)_i^2 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot \left(\frac{db}{dt} \right)_r^2 + \rho_2 \cdot v_2 \cdot \left(\frac{db}{dt} \right)_t^2$$

ce qui donne finalement

$$\left(\frac{db}{dt} \right)_i^2 = \left(\frac{db}{dt} \right)_r^2 + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \left(\frac{db}{dt} \right)_t^2$$

soit en divisant le tout par $\left(\frac{db}{dt} \right)_i^2$ et d'après (2.42) et (2.43)

$$1 = r^2 + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot t_{12}^2$$

r^2 = coefficient de réflexion normale

$\frac{Z_2}{Z_1} \cdot t_{12}^2$: coefficient de transmission normale

La perte d'énergie à l'interface, due à la réflexion est donnée par

$$dJ = \frac{J_r}{J_i}$$

qui dans le cas simple d'une incidence normale devient

on aura donc

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} *$$

et

$$t_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

et si l'onde se propage du milieu (2) au milieu (1)

on aura

$$t_{21} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

r s'exprime en général en pourcentage de l'onde incidente.

$$r(\%) = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \times 100$$

Exemple. milieu (1) Acier où $Z_1 = Z_{\text{Acier}} = 456 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$
milieu (2) Air où $Z_2 = Z_{\text{Air}} = 426 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

$$\text{d'où } r(\%) = \frac{456 \cdot 10^5 - 426}{456 \cdot 10^5 + 426} \cdot 100 = 100\%$$

Cet exemple montre que pratiquement, l'énergie ultrasonore qui se propage dans l'acier est réfléchié totalement par une surface de séparation avec l'air.

* si Z_1 (du milieu 1) $<$ Z_2 (milieu 2) on fera alors $(Z_2 - Z_1)$

$$dJ = \frac{\frac{Z_1}{2} \cdot (db/dt)_r^2}{\frac{Z_1}{2} \cdot (db/dt)_i^2} = r^2$$

or comme $r^2 = 1 - \frac{Z_2}{Z_1} \cdot t_{12}^2 = dJ$

et $t_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$

on aura donc

$$dJ = 1 - \frac{4Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

De cette equation on voit que :

+ Si $Z_1 = Z_2$ (même milieu), il n'y a pas d'onde réfléchie :

La transmission est donc complète.

+ il est évident que la perte d'énergie, due à la réflexion, d'onde sonore incidente, normales à l'interface de deux milieux, dépend uniquement des impédances acoustiques spécifiques des deux milieux.

Le tableau suivant donne les valeurs de perte d'énergie dJ , dues à la réflexion des ondes sonores d'un milieu à un autre.

Milieu -1-	Milieu -2-	perte d'énergie dJ (o/o)
Acier	Quartz	28,5
Acier	eau	88,0
Acier	Alcool	90,5
Acier	Air	99,96
Quartz	Aluminium	0,64
Quartz	Eau	66,0
Quartz	Huile	9,0
Quartz	Alcool	78,0
Titanate de baryum	acier	4,0
Titanate de baryum	eau	82,5
Titanate de baryum	aluminium	9,0
Titanate de baryum	alcool	89,0

- 5 - Propagation des u.s dans les solides ^{interfaciale} - solide

Dans les solides, la propagation des u.s est plus complexe. En effet si la source se trouve dans un milieu solide, une onde incidente longitudinale sera réfléchiée et réfractée à la frontière pour donner dans chacun des milieux une onde longitudinale et une onde transversale.

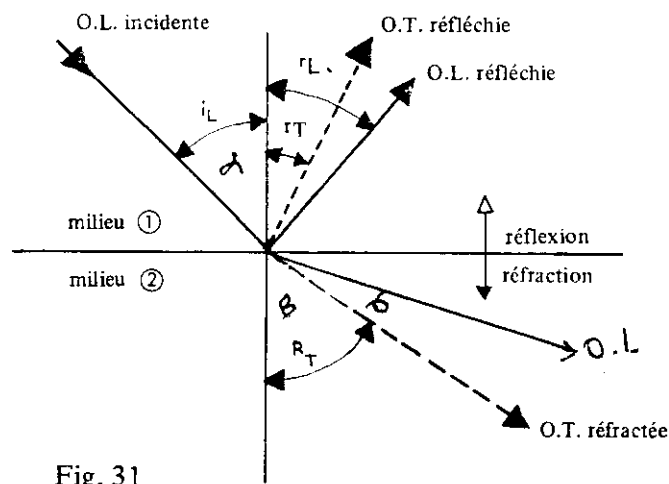


Fig. 31

Dans ce cas donc, une onde incidente longitudinale sera réfléchiée et réfractée à la frontière pour donner dans chacun des milieux une onde longitudinale L_r et une onde transversale T_r , après réfraction elle donne une onde longitudinale L_T et une onde transversale T_T .

Si les vitesses des ondes longitudinales dans le milieu ① et des ondes longitudinales et transversales dans le milieu ② sont respectivement v_{L_1} , v_{L_2} et v_{T_2}

$$\frac{v_{L1}}{\sin \alpha} = \frac{v_{L2}}{\sin \gamma} = \frac{v_{T2}}{\sin \beta} \quad (\text{Formule de Descartes})$$

où α , γ et β sont les angles d'incidence et de réfraction des ondes Longitudinales et transversales.

Nous remarquons que γ est toujours supérieur à β car la vitesse des O.L est toujours supérieure à celle des O.T.

Si le milieu 1. est plus dense acoustiquement que le milieu 2. et si on augmente suffisamment l'angle d'incidence α , l'onde L. se réfléchit totalement et seule O.T se propage dans le second milieu. Pour que ceci se produise il faut que $\sin \gamma = 1$ d'où

$$\frac{v_{L1}}{v_{L2}} = \sin \alpha_{cL}$$

où α_{cL} : est l'angle critique longitudinal pour une O.L

Si l'on augmente encore α_{cL} , c'est autour de l'O.T d'être totalement réfléchi. Ceci se produit quand $\sin \beta = 1$ de telle sorte que

$$\sin \alpha_{cT} = \frac{v_{L1}}{v_{T2}}$$

où α_{cT} : l'angle critique pour une O.T

Exemple : Considérons le passage d'une onde sonore du plomb (milieu-1) vers l'acier (milieu-2) et pour laquelle

$$v_{L1} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$$

$$v_{L2} = 6,1 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$$

$$v_{T2} = 3,3 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$$

$$\sin \alpha_{CL} = \frac{v_{L1}}{v_{L2}} = \frac{2,16 \cdot 10^5}{6,1 \cdot 10^5} = 0,35$$

$$\sin \alpha_{CT} = \frac{v_{L1}}{v_{T2}} = \frac{2,16 \cdot 10^5}{3,3 \cdot 10^5} = 0,65$$

d'où $\alpha_{CL} = 20^\circ 44'$ et $\alpha_{CT} = 40^\circ 54'$

En C.H.D on cherche donc l'angle d'inclinaison du faisceau incident qui permet d'éliminer la majorité des ondes réfractées au bénéfice d'une seule onde : l'onde Transversale.

- III - Production des U.S

D'une manière générale, on appelle Transducteur tout système qui permet de convertir une forme d'énergie sous une autre forme d'énergie.

Dans certains transducteurs, le phénomène est réversible, c.-à-d. que la conversion d'énergie peut s'effectuer dans les deux sens.

Aussi, les transducteurs ultrasonores permettent de transformer l'énergie électrique, fournie par un générateur, en énergie acoustique : d'où production d'ultrasons.

Les transducteurs utilisent trois principaux phénomènes pour transformer l'énergie électrique en énergie acoustique.

- * Phénomène Piezo-électrique
- * " " d'Electrostriction
- * " " Magnetostriction.

- A - Piezo-Électricité' (voir chapitre - I -)

Le quartz (qui a des propriétés piezo-électriques) transforme le courant alternatif auquel il est soumis en une vibration mécanique de même fréquence.

V PRODUCTION D'ULTRASONS PAR PIÉZOELECTRICITÉ

Piézo : du grec piezein : presser.

Piézoélectricité : électricité par pression.

V.1 Phénomène de piézoélectricité (cristal de quartz)

Une lame convenablement taillée dans un cristal de quartz produit de l'électricité quand elle est soumise à une traction ou à une compression.

La même lame soumise à un courant électrique s'allonge ou se rétrécit suivant le sens du courant. (Fig. 21).

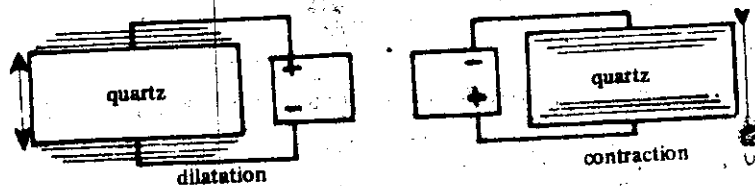


Fig. 21

Si l'on intercale un cristal de quartz dans un circuit alternatif de fréquence élevée (circuit oscillant), des variations d'épaisseur du cristal se produisent au même rythme que les oscillations électriques du circuit.

Le quartz transforme le courant alternatif auquel il est soumis en une vibration mécanique de même fréquence. (Fig. 22).

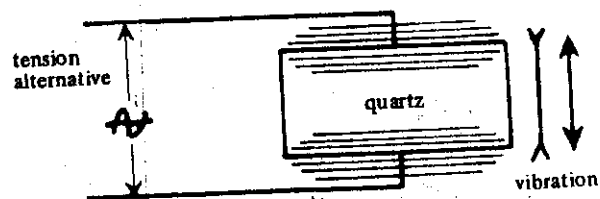


Fig. 22

il faut remarquer, que cet effet est très faible en general; ainsi pour une lame de quartz, l'application d'une tension de 500 volts ne provoque qu'une contraction de $1/1000 \mu.m$.

En conséquence, pour produire des vibrations ayant une amplitude convenable, il faudra choisir judicieusement l'épaisseur de la lame de quartz (ou la fréquence du signal électrique d'excitation) de manière à travailler à la résonance du cristal de sorte à avoir

$$e = \frac{\lambda}{2}$$

e : épaisseur de la lame de quartz

λ : longueur d'onde des ultrasons dans le quartz.

- 1 - Faisceau ultrasonore

Les ondes émises par le palpeur se propagent à travers un matériau en un faisceau peu divergent (comme le faisceau d'un phare d'automobile)

Pour une surface d'émission plane, la plus grande partie de l'énergie u.s est localisée dans un cône dont le demi-angle d'ouverture est donné par la formule de Fresnel:

$$\sin \theta = k \cdot \frac{\lambda}{D} \quad \text{avec } k = 1,2 \text{ (valeur pratique)}$$

où D : diamètre de l'élément sensible

λ : longueur d'onde dans le matériau

II.2 Diverses sources d'ondes

Les sons se propagent en ligne droite.

Quand une personne parle au milieu d'un champ et qu'elle est entourée d'arbres très loin autour d'elle, tout le monde ne l'entend pas. Ceci veut dire que le son émis dans ce cas est presque directif. Seules les personnes qui sont face à elle entendent bien.

Suivant la source, les ondes sonores peuvent être canalisées dans un espace très étroit, ou au contraire se propager dans toutes les directions.



Fig. 2

Un exemple d'onde canalisée est une onde émise par une antenne

Lo

So
de

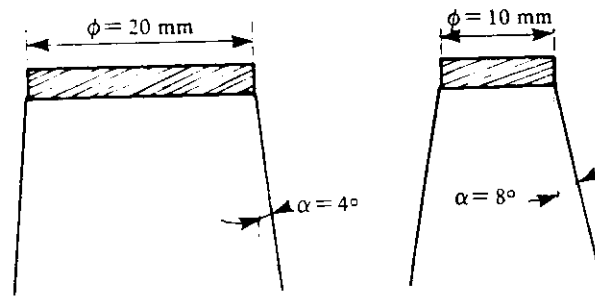
II
Tr

Les
les

II.
La
on
dés

La
va
Di
Fr

Exemple



$$V_L \text{ acier} = 5850 \text{ m/s}$$

Pour une fréquence d'excitation de 5 MHz

$$\lambda = \frac{c}{F} = \frac{5850}{5 \cdot 10^6} = 1,17 \text{ mm}$$

les demi-angles d'ouverture sont donc

- Element sensible $D = 20 \text{ mm}$ $k = 1,2$

$$\sin \alpha = 1,2 \frac{1,17}{20} = 0,07 \text{ donc } \alpha = 4^\circ$$

- Element sensible $D = 10 \text{ mm}$ toujours $k = 1,2$

$$\sin \alpha = 1,2 \frac{1,17}{10} = 0,14 \text{ donc } \alpha = 8^\circ$$

même dans ce cône, l'énergie u.s n'est pas uniformément répartie, contrairement à la théorie de l'onde plane, c'est sur l'axe du faisceau que se situe l'intensité maximale.

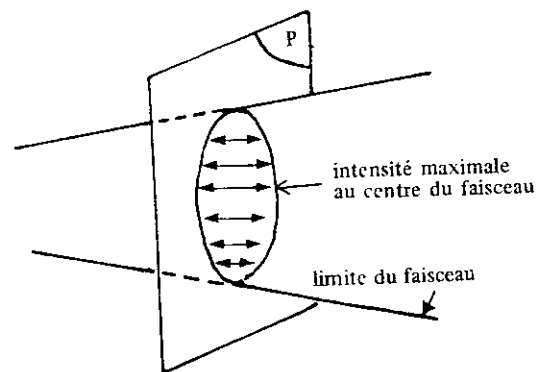


Fig. - 36.

Fig. 24

L'amplitude des vibrations est moins grande en s'approchant du pourtour du faisceau

- B. Electrostriction

1. Description du Phénomène
certains corps appelés Ferroélectriques présentent un phénomène tout particulier.

Sous un champ électrique* intense, la pastille Ferroélectrique se dilate.

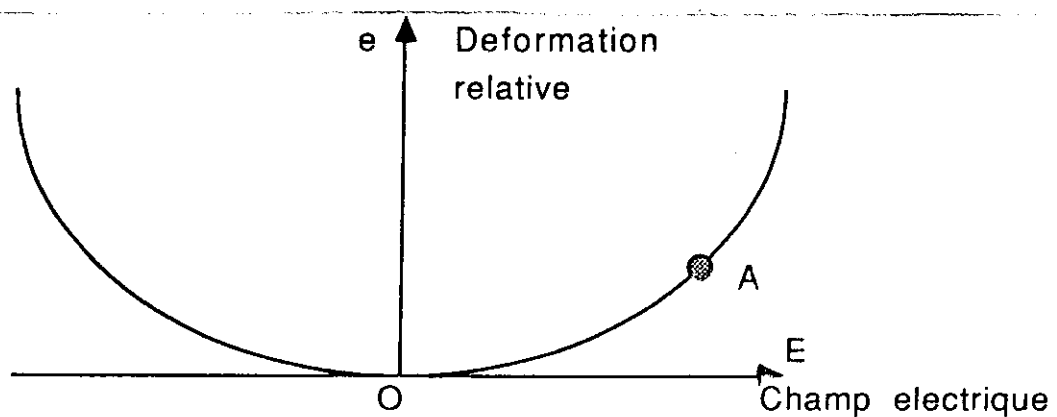


Fig- 5 - Deformation d'un matériau Ferro-électrique par électrostriction lors de l'application d'un champ électrique intense.

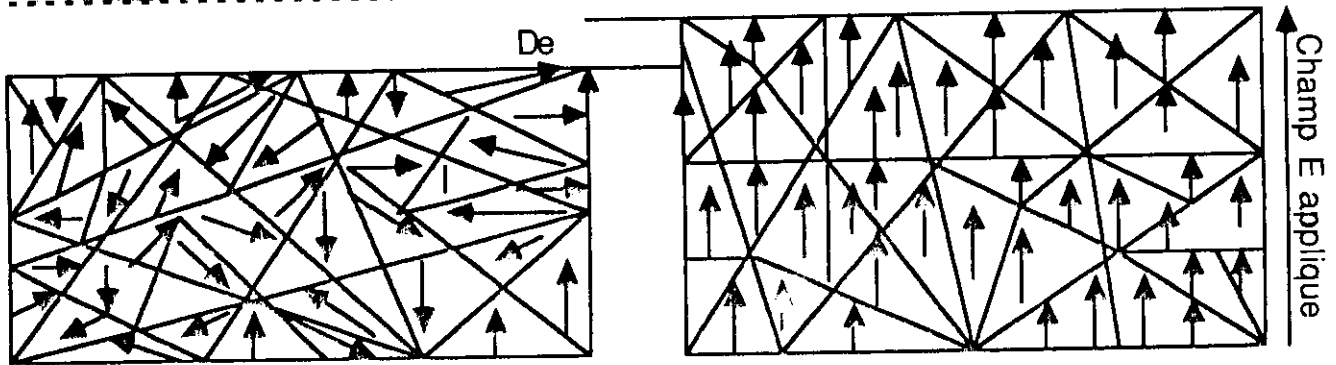
Le phénomène présente à l'origine deux différences fondamentales avec la piézo-électricité :

- d'une part la déformation relative n'est pas proportionnelle au champ électrique
- d'autre part on a toujours une dilatation même si on inverse la tension appliquée

$$* \text{ Champ Electrique} = \text{Tension électrique} / \text{Epaisseur de la lame}$$

- 2 - Explication du phénomène

Une pastille Ferroélectrique de titanate de baryum par exemple, est un polycristal. Les grains sont subdivisés en domaines dont les dimensions dépendent du sens des dipôles électriques (représentés par des flèches)



(a) Etat libre

(b) Influence du champ électrique très intense provoquant la reorientation des dipôles

A l'état libre les domaines sont orientés au hasard dans toutes les directions.

L'application d'un champ électrique tend à orienter les dipôles dans le sens du champ; donc conduisent à un allongement des domaines dans la direction du champ et provoquent ainsi une dilatation de la cellule.

Si on change le sens du champ, les domaines essaient de s'orienter à l'opposé; mais on a toujours un allongement.

- 3. Application à La production des u.s

Le problème consiste à obtenir un matériau possédant des propriétés analogues à la piézoélectricité (dilatation proportionnelle au champ).

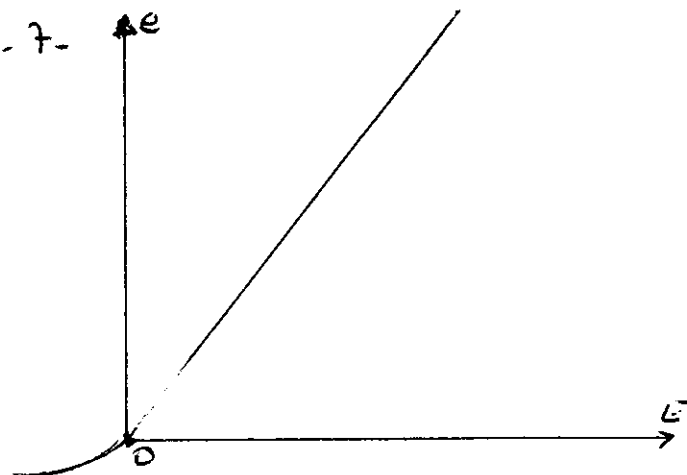
Pour y parvenir on utilise le processus suivant.

On maintient la céramique à haute température (120°C pour le titanate de baryum) pendant qu'on applique entre ses faces métallisées un champ électrique intense, les domaines s'orientent ainsi ~~suivant cette direction préférentielle~~ dans le sens du champ.

On refroidit lentement en maintenant le champ électrique, ce qui gèle de nombreux domaines suivant cette orientation préférentielle.

Le titanate de baryum est alors dit polarisé. L'origine O du graphique de la Fig-5. est maintenant déplacé au point A et la partie intéressante de la courbe de réponse est celle de la Fig-7.

Fig-7. Déformation d'une céramique polarisée



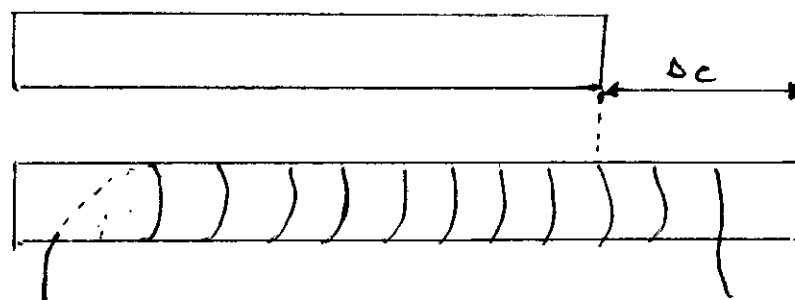
les propriétés du titanate de baryum deviennent alors tout à fait analogues à celles d'un matériau piezoelectrique et il peut être utilisé directement pour la production d'ultrasons dans les mêmes conditions que celui-ci

- C - Magnétostriction

- 1 - Description du phénomène

L'effet magnétostriction est tout à fait analogue à celui de l'électrostriction.

Un matériau magnétostrictif placé dans un champ magnétique se dilate, ~~ne en moins on rencontre aussi des matériaux qui se contractent.~~



Dilatation d'un matériau magnétostrictif
Placé dans un champ créé par une bobine.

Les domaines magnétiques orientés au hasard dans l'état naturel tendent à s'aligner sous l'effet du champ et déforment le matériau.

- 2 - Application à la production d'U.S

Comme dans le cas de l'électriction, le phénomène ne dépend pas du sens du champ; il faut donc polariser le matériau pour obtenir une réponse quasiment linéaire.

on peut obtenir cette polarisation de deux manières.

+ soit en plaçant un aimant permanent dans le transducteur

+ soit plus couramment en produisant le champ polarisant avec un courant continu; on superpose ensuite un courant alternatif qui mettant en vibration le transducteur permet de produire les U.S

Conclusion : les différents modes de production d'U.S que nous venons de décrire, présentent tous des avantages et des inconvénients; il faut donc les utiliser en fonction des qualités particulières qui leur sont propres.

- Prix de revient
- Puissance disponible
- Qualité des signaux émis
- Sensibilité à la réception (Quartz)
- " " " " l'émission (Quartz)
- Température d'utilisation (Céramique)

- IV - Notion de coefficients Piezoélectriques

- 1 - Coefficient Piezoélectrique de Transmission

Ce coefficient donne l'allongement relatif de la pastille en fonction du champ électrique appliqué.

$$\epsilon = d \cdot E$$

ϵ : allongement relatif

d : coefficient piezoélectrique de transmission (m/V)

E : Champ électrique

- 2 - Coefficient Piezoélectrique de Réception "g"

Ce coefficient donne le champ électrique produit par la pression mécanique appliquée à la pastille.

$$E = g \cdot P$$

E : champ électrique

g : coefficient Piezoélectrique de réception V/m.N

P : Pression (N/m²)

	Quartz	Sulfate de lithium	Titanate de Baryum	Titanate et Zirconate de Plomb
" d " 10^{-12} m/v	2	16	140	260
" g " 10^{-3} v.m/N	50	175	15	25
Temperature de CURIE	573	75	120	340

Ce tableau montre la supériorité des céramiques sur le quartz pour la production des ultrasons.

Pour la réception, le sulfate de lithium est extrêmement sensible, mais il présente un point de CURIE très bas et très fragile.

I-5 Applications des ultrasons :

Les applications des ultrasons sont généralement classifiées en deux catégories :

1-Les ultrasons de faible puissance

2-Les ultrasons de forte puissance

1-Ultrasons de faible puissance :

Dans cette catégorie d'applications, les ultrasons sont utilisés pour leurs propriétés de propagation dans les milieux. Le principe général consiste à émettre une impulsion dans le milieu à étudier, puis, grâce à un ou plusieurs récepteurs de capter le ou les échos de cette impulsion produite par le milieu ou à la frontière du milieu.

Les Caractéristiques principales qui sont exploitées sont :

- La vitesse de propagation dans le milieu: cette vitesse est associée à la densité du milieu et à sa compressibilité ou son module d'élasticité.
- L'atténuation dans le milieu: Cette atténuation est liée à la viscosité du milieu, à son homogénéité ...
- Le temps de parcours dans le milieu qui permet de déterminer les éventuelles inclusions dans le milieu.

Ces techniques sont très largement mises en oeuvre dans:

- le contrôle non destructif ultrasonore ou l'échographie médicale (échographie prénatale, échographie Doppler, ...).
- la mesure de distance (télémétrie).
- la transmission d'informations (acoustique sous-marine).

De nombreuses publications explorent les possibilités d'applications en contrôle pour de nombreux types de produits alimentaires, chimiques:

Exemples :

- évaluation du pourcentage d'huile dans une émulsion par une mesure de vitesse.
- évaluation du pourcentage de sucre dans les jus de fruits par une mesure de vitesse.
- détection de la cristallisation par mesure d'atténuation de l'onde sonore.

2-Ultrasons de forte puissance

Les ultrasons se propagent dans les milieux liquides, solides et gazeux.

Les ultrasons de forte puissance sont considérés comme tels lorsqu'ils modifient le milieu dans lequel ils se propagent. Leur action dépend de la nature des milieux dans ou sur lesquels ils se propagent. Les principales actions essentielles des ultrasons de forte puissance sont de type mécanique, thermique et/ou chimique.

Milieu solide :

L'application d'ultrasons sur les milieux solides peut produire un échauffement, une vibration, induisant la modification du coefficient de frottement apparent ou le dé colmatage de tamis.

Milieu liquide :

Dans les milieux liquides, la cavitation est le phénomène prépondérant induit par les ultrasons. La cavitation est produite en émettant des ondes ultrasonores dans le liquide qui créent des zones alternativement comprimées et dilatées. Lorsque ces ondes sont suffisamment intenses, elles provoquent dans les zones dilatées une pression locale inférieure à la pression ambiante, créant des microcavités dont le diamètre peut atteindre 100 micromètres. Quand la pression redevient positive, ces cavités implosent en moins d'une microseconde, induisant localement une température de plusieurs milliers de degrés et une onde de pression de plusieurs milliers de fois la pression atmosphérique. C'est la cavitation qui permet de réaliser le nettoyage de pièces, d'accroître la réactivité de poudres métalliques en contribuant à l'érosion des surfaces, d'induire la sono chimie...

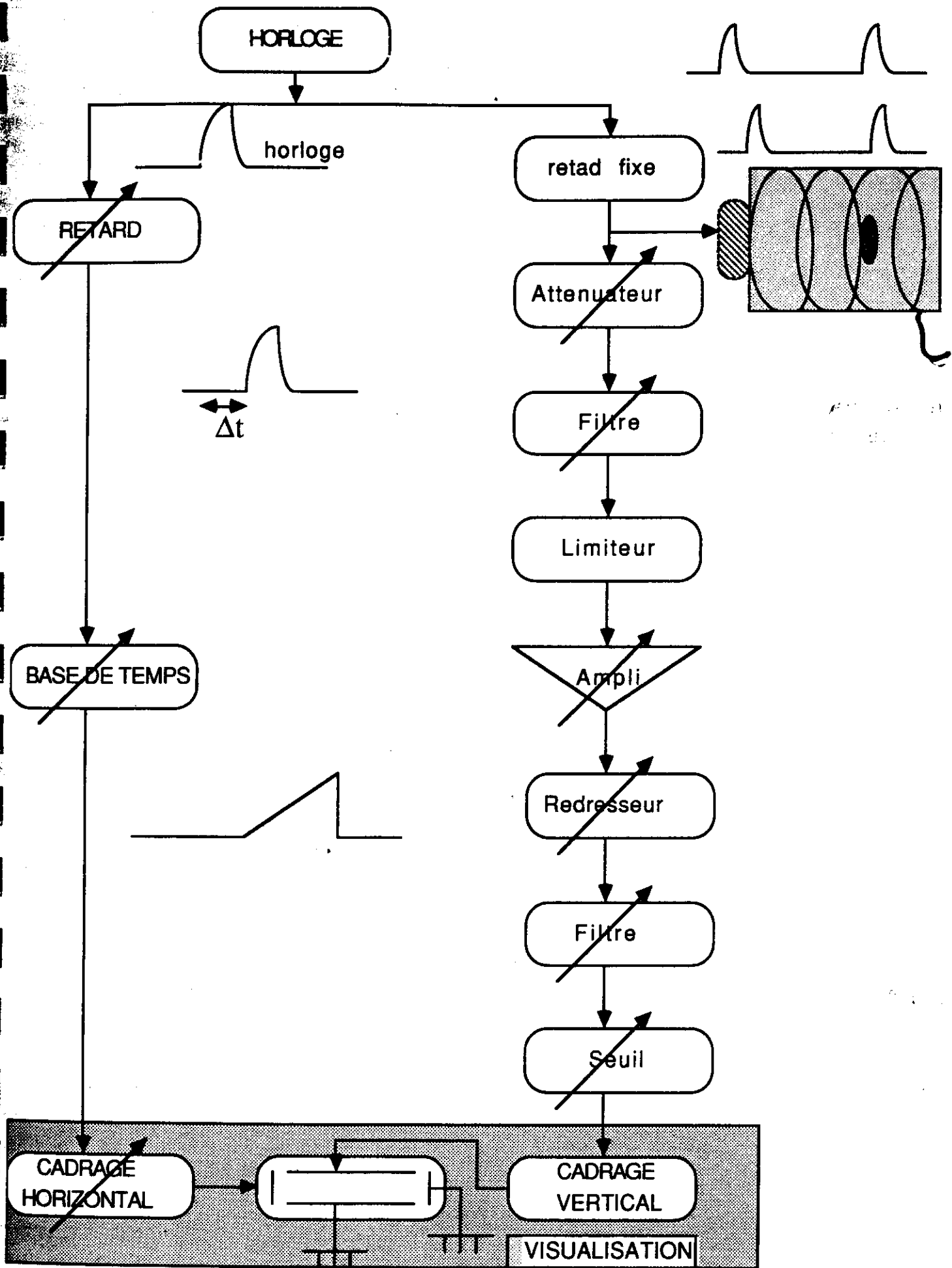
Milieu gazeux :

Les ultrasons sont rapidement atténués dans les milieux gazeux. Sur de faibles distances, il est cependant possible de réaliser des champs acoustiques très intenses qui permettent de pulvériser des liquides ou de désagglomérer des poudres, de réaliser le compactage et l'agglomération de particules en suspension ...

- IV - Principe de Fonctionnement des Appareils à ultrasons

Introduction

Un appareil à ultrasons est constitué d'un ensemble de Fonctions représentées dans Le diagramme bloc suivant.



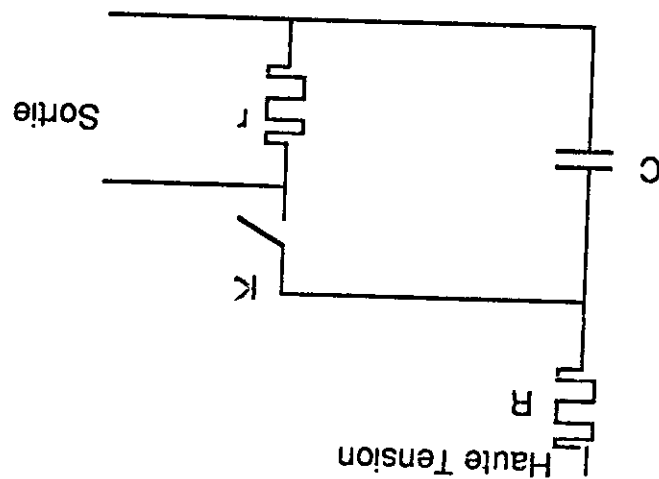
- 1 - L'Horloge

C'est un simple générateur d'impulsions électriques qui délivre des impulsions électriques très brèves à intervalles réguliers.

Ces impulsions commandent simultanément deux branches distinctes et vont déclencher du côté droit le processus d'excitation et du côté gauche, le processus de visualisation.

- 2 - Le générateur

Le générateur d'impulsions électriques est étudié pour exciter le transducteur ultrasonore. Il est de conception relativement simple.



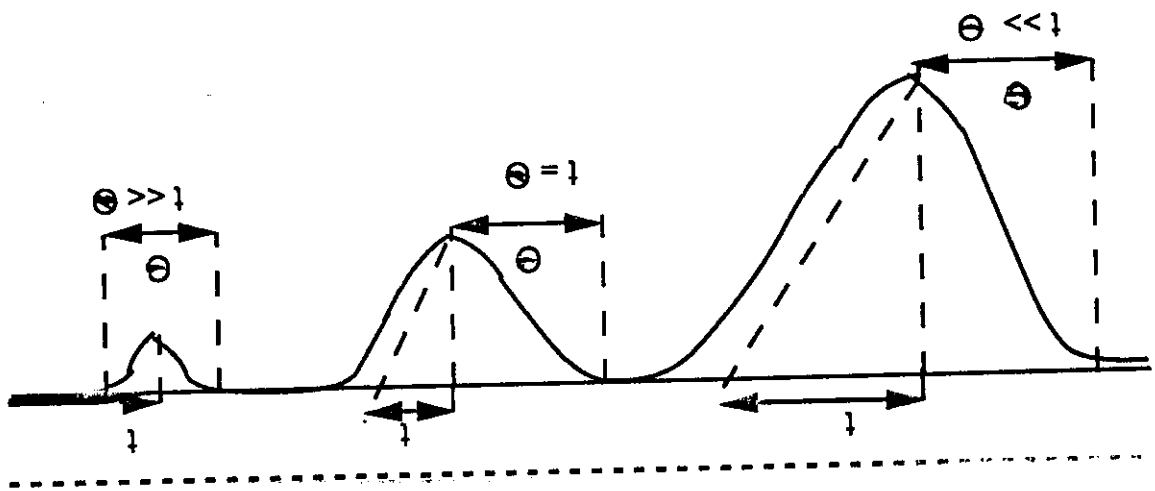
L'impulsion électrique est obtenue par la décharge rapide d'un condensateur.

Le condensateur C étant chargé, le signal d'horloge commande la fermeture instantanée de l'interrupteur. Le condensateur se décharge très rapidement à travers la faible résistance r .

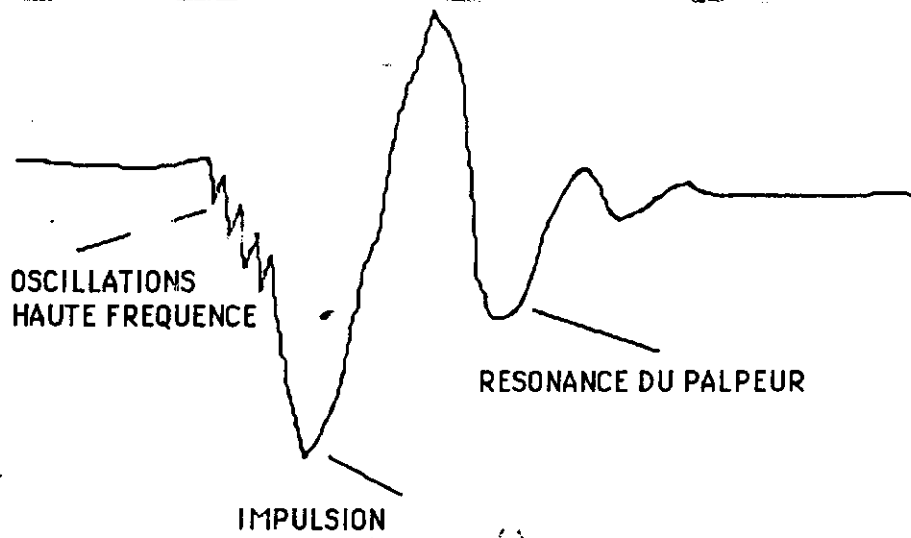
Le palpeur sera branché aux bornes de r .
 Une fois la décharge terminée, l'interrupteur K
 s'ouvre et le condensateur se recharge lentement
 à travers la grande résistance R .

La largeur de l'impulsion d'excitation est détermi-
 -née par la somme du temps de réponse τ de
 l'interrupteur K électronique et la constante
 du temps $t = r \cdot c$ de la décharge du condensateur.

La Figure suivante montre trois formes d'impulsions
 suivant les valeurs comparatives de τ et t sans
 branchement du palpeur.



Quand t diminue, la largeur de l'impulsion tend vers τ ,
 son amplitude décroît pour des valeurs de t inférieur
 ou égale à τ .



Sous l'effet de l'excitation électrique une onde ultrasonore part du palpeur.

La rencontre d'obstacles sur le parcours ultrasonore provoque la réflexion d'une partie du faisceau et l'écho résultant sera de nouveau capté par le palpeur traduit en signal électrique et acheminé vers l'atténuateur.

- 4. Atténuateur

L'atténuateur variable sert à régler la sensibilité électronique.

- 5. Filtre

Dans les appareils simples ce filtre est non réglable. Il rejette les fréquences inférieures à 500 kHz et supérieures à 15 ou 20 MHz.

Pour les palpeurs amortis, il va éliminer les oscillations dues aux résonances radiales, les oscillations hautes fréquences et va mettre en forme l'impulsion.

La bobine intégrée au palpeur résonnant joue approximativement le même rôle de filtrage.

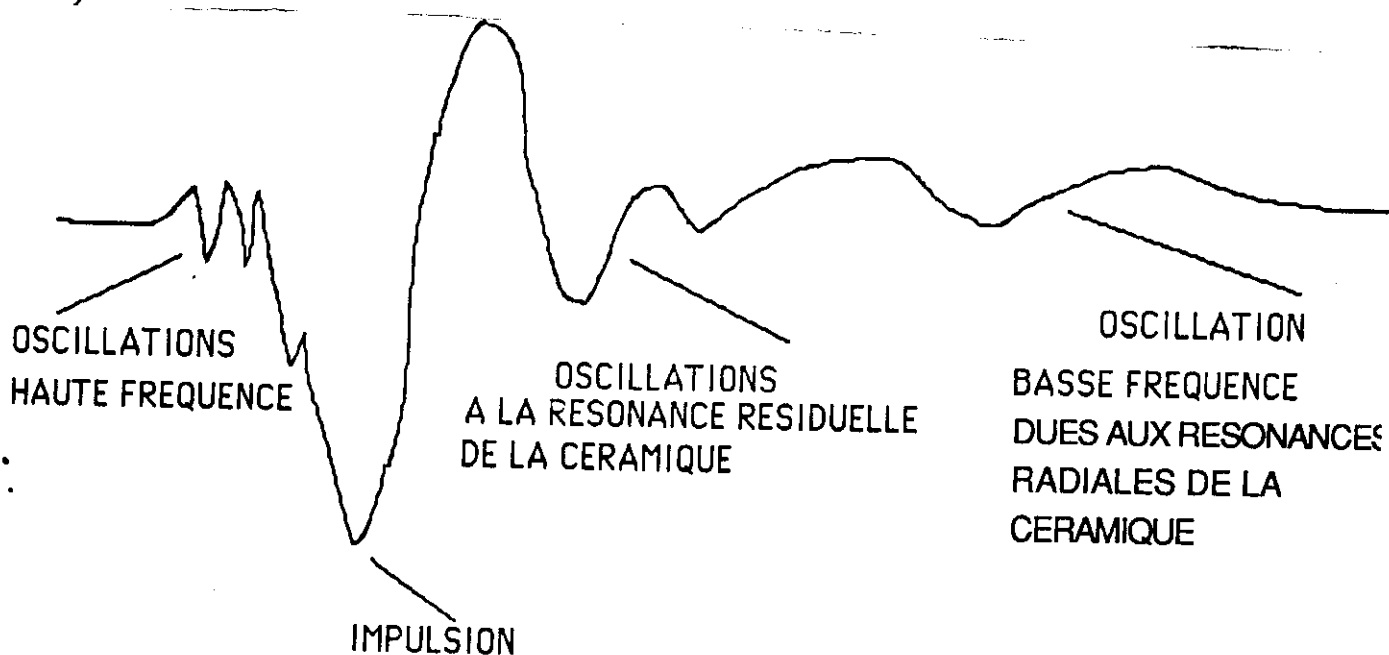
Dans les appareils plus complexes, ce filtre a une bande passante plus étroite et il est variable pour être adapté aux différents palpeurs.

-3- Le palpeur le branchement du palpeur déforme l'impulsion. Ceci est dû à l'impédance propre du câble de liaison et de la céromique

Au point de vue de l'impédance électrique les palpeurs peuvent être classés en deux catégories :

- Les palpeurs à large bande sans bobine d'accord
- Les palpeurs résonnants avec bobine d'accord

Après branchement du palpeur, l'impulsion prend la forme suivante.



Les palpeurs résonnants possèdent presque tous une bobine d'accord branchée en parallèle sur la céromique

Le rôle de la bobine est double :

* D'une part elle doit entrer en résonance avec la capacité de la céromique à une fréquence toute proche de la résonance propre de la céromique (Ceci dans le but d'élargir la zone de fréquence où l'impédance de l'ensemble est presque réelle, proche d'une résistance pure, pour augmenter la sensibilité et la bande passante)

* Par ailleurs elle a un rôle de filtre; sa présence empêche l'excitation de résonance radiales de la céromique et réduit la durée d'impulsion

- 6. Le Limiteur

Pour ne pas aveugler l'amplificateur, un Limiteur va écrêter les signaux d'amplitude supérieure à un seuil.

La zone où le signal électrique de l'émission est supérieure à ce seuil est dite zone d'obscurité après l'émission. Le filtre et l'atténuateur se trouvent avant le limiteur justement pour "affiner" préalablement l'impulsion électrique : il réduit cette zone morte !

- 7. L'amplificateur

Dans certains appareils le gain de l'amplificateur est aussi réglable.

C'est la combinaison du gain et de l'atténuation qui détermine l'amplification totale.

Quand l'atténuateur est faible, l'impulsion électrique est très forte au niveau du limiteur et la zone morte est plus large : cette disposition est intéressante quand on veut sonder des zones lointaines où la largeur de la zone morte n'est pas un facteur important.

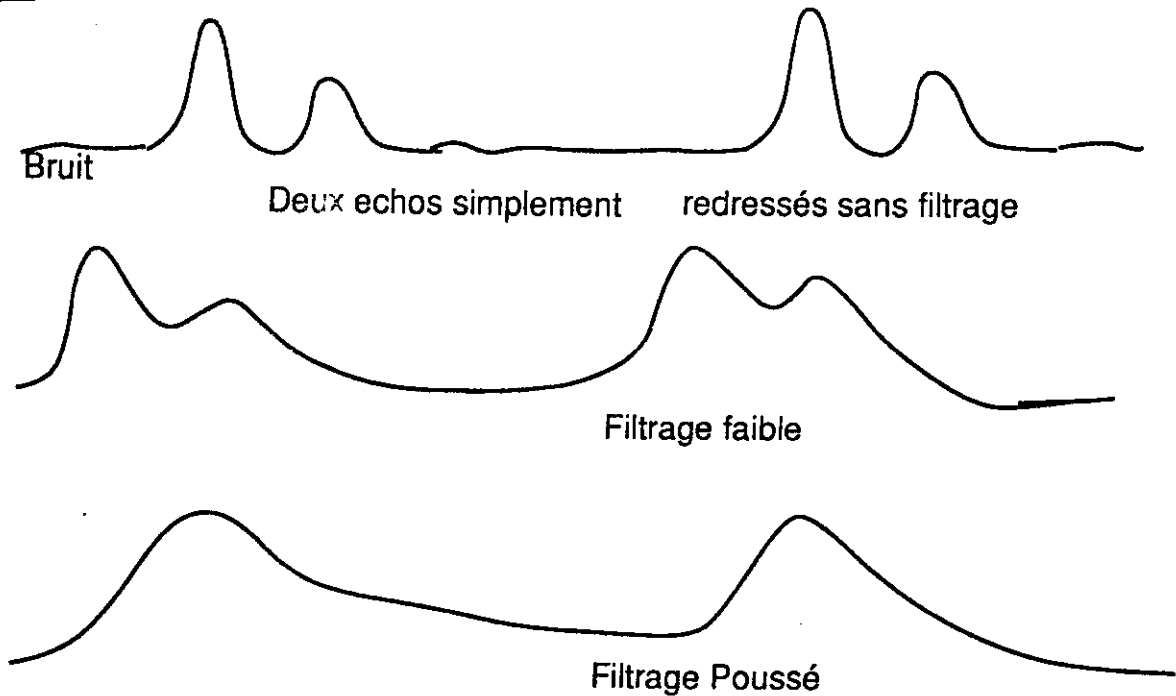
La deuxième disposition (atténuation forte) convient mieux par contre pour le sondage des zones proches du palpeur.

- 8. Le redresseur

il supprime la partie négative du signal.

- 9. Le Filtre

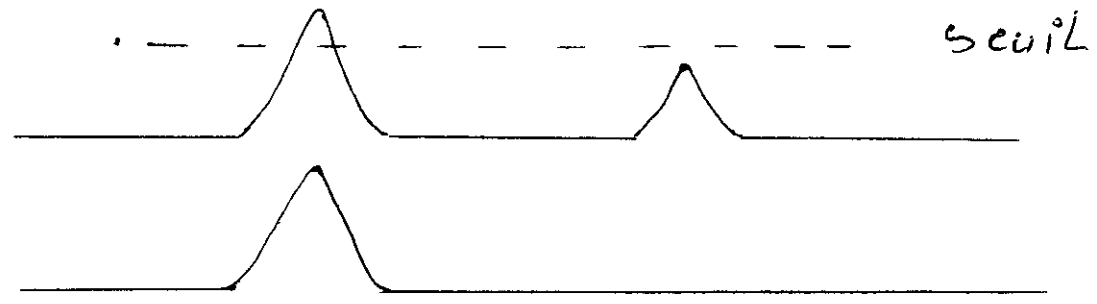
Ce deuxième filtre a pour rôle de lisser les échos



- a) sans filtrage: La résolution est grande. on distingue deux défauts très proches l'un de l'autre
- b) Filtrage Faible: Les oscillations sont peu visibles mais on distingue toujours les deux echos proches l'un de l'autre. Le bruit est ~~important~~ réduit
- c) Filtrage poussé: Le bruit à presque disparu mais les deux reflexeurs donnent lieu à un echo quasiment unique, large et bien visible.

Dans la pratique on choisira un compromis entre la résolution et la sensibilité

10. Seuil La partie basse du signal est supprimée dans le but de repérage des echos d'amplitude supérieure au seuil.



11. Visualisation cathodique et base de Temps

a) Principe La visualisation du signal s'effectue après les différents traitements vus précédemment

b) Retard variable Dans les contrôles par immersion, ou d'une zone particulière, les ultrasons traversent un espace qu'il n'est pas nécessaire de visualiser avant d'atteindre la zone de contrôle. Ce retard permet de déclencher la visualisation uniquement pour cette zone.

- II - Applications des ultrasons

- I - Les principales Techniques et Méthodes de contrôle non destructifs par ultrasons.

Le contrôle non destructif par ultrasons présente par rapport aux autres techniques les avantages suivants :

- Grande sensibilité
- Pouvoir de pénétration important
- Précision dans la localisation des défauts
- Rapidité de l'essai
- Possibilité de n'utiliser qu'une face de l'objet
- Aucune précaution particulière sur les plans sécurité électrique

La limitation de son emploi, provient généralement d'une difficulté d'interprétation des résultats lorsque la pièce à tester a une configuration géométrique compliquée ou de la présence d'une cristallisation trop grosse.

1-1 Méthode par résonance

1-1-1 Techniques de contrôle

Il existe trois techniques de contrôle par u.s

- Par contact ~~directe~~
- Par immersion
- Par irrigation

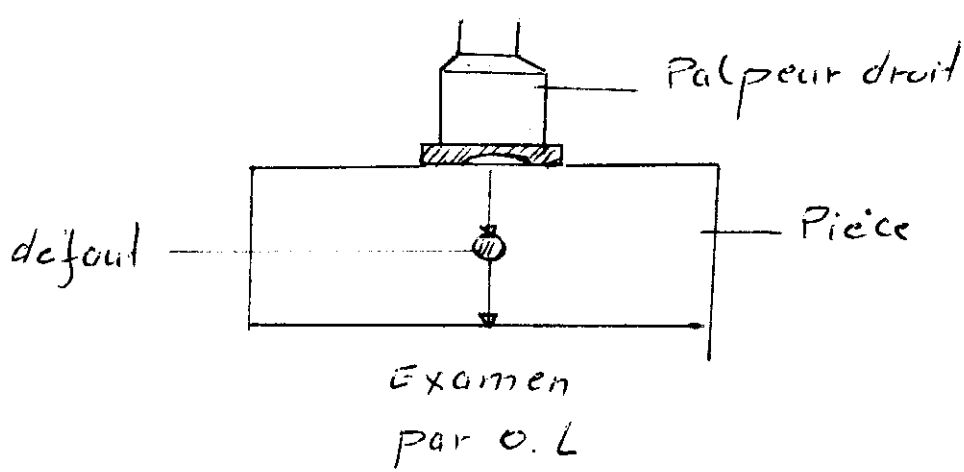
C'est la liaison entre la pièce et le palpeur qui les différencie.

1-1-1-1 Technique par contact

- a - Mise en œuvre

Le palpeur est appliqué directement sur la pièce à examiner. Un liquide de couplage est interposé entre le palpeur et la pièce.

Pour examiner l'ensemble de la pièce, il faut déplacer le palpeur par balayage manuel ou automatique.



1.2 - Précautions

il faut chercher à avoir la plus petite épaisseur possible de liquide de couplage pour un meilleur rendement

il faut veiller à ce que le contact entre le palpeur et la pièce s'effectue sur la totalité de la surface du palpeur.

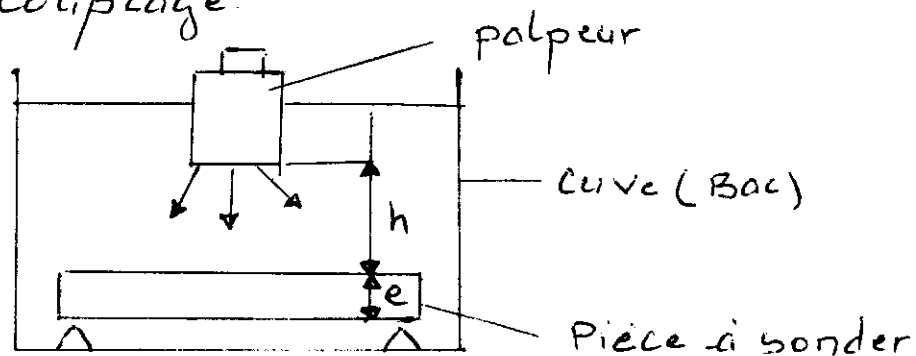
il faut maintenir sur le palpeur un effort constant pour assurer le contact.

Pour ne pas détériorer la semelle du palpeur, les surfaces sondées doivent être nettoyées en éliminant toutes les croûtes étrangères provenant des traitements de la pièce ou d'une oxydation. De même que les peintures éventuelles doivent être éliminées.

1.2 - Technique par immersion

- 0 - Mise en œuvre

La pièce à sonder est immergée complètement dans le liquide de couplage.

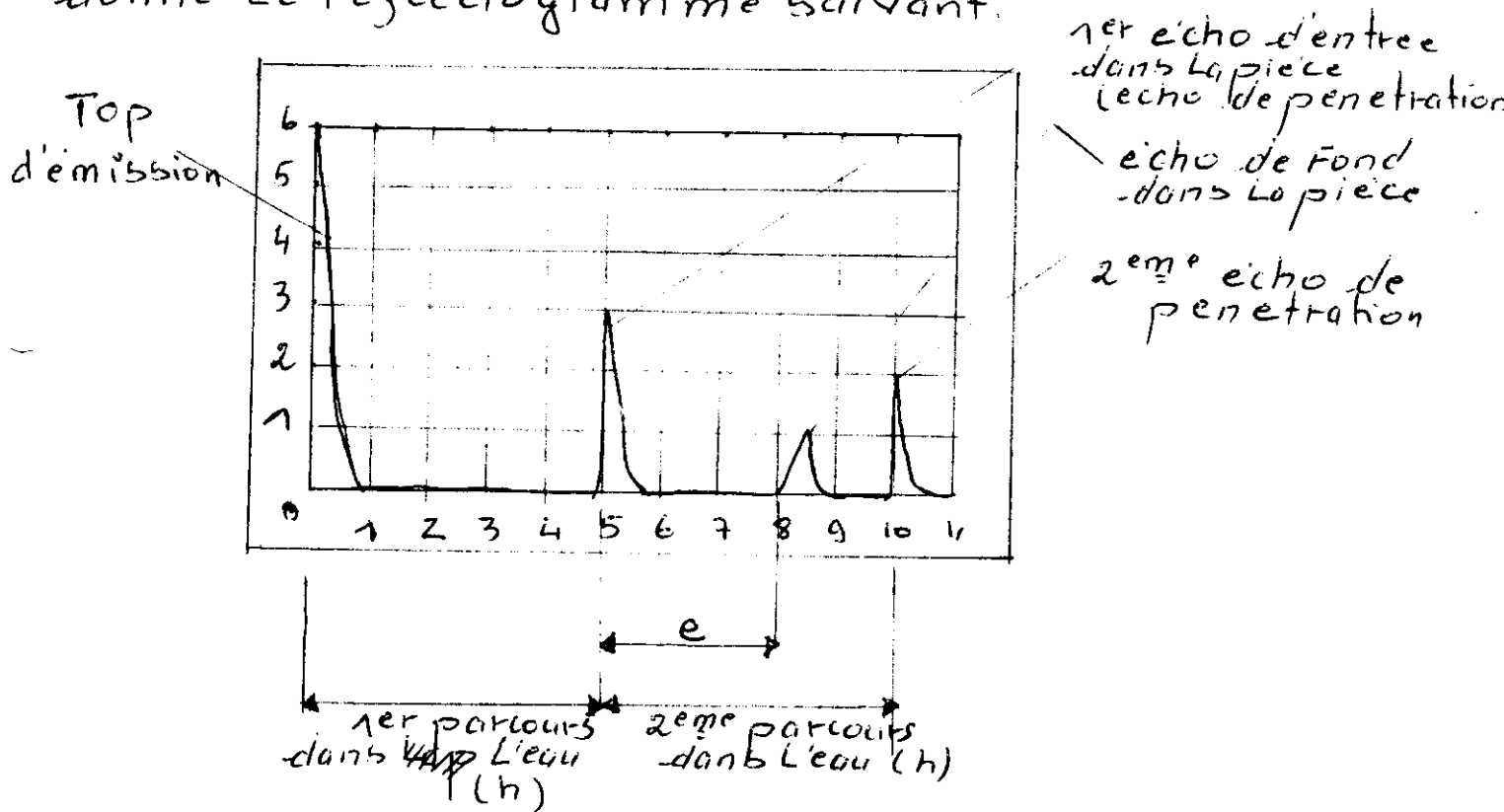


le palpeur et la pièce ne sont plus directement en contact. Le sondage peut être manuel mais dans la plupart des cas, il est automatique.

- b. Precautions

* Hauteur de liquide minimale en contrôle droit

Le sondage de la pièce dans une cuve à immersion donne le reflectogramme suivant.



Il est donc nécessaire de connaître et de régler la distance h (hauteur d'eau comprise entre le palpeur et la pièce) de façon à obtenir un écho de fond de la pièce nettement séparé du second écho de pénétration.

Avec les matériaux métalliques courants, la hauteur minimale admissible est donnée par la relation

$$h = \frac{e}{4} \quad . \quad e : \text{étant l'épaisseur de la pièce}$$

exemple : Pour une pièce d'épaisseur 100 mm, il faut une hauteur minimale de 25 mm.

Avec une hauteur plus petite, Les échos s'intercalent dans la zone explorée et rendent la lecture difficile, même impossible.

* Notion de zone perturbée

A la sortie de tout palpeur, il existe une zone perturbée (ou zone proche) dans laquelle tout sondage est impossible.

cette zone proche a une longueur N donnée par

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

où D : est le diamètre du palpeur

λ : longueur d'onde des u.s dans le liquide.

Exemple: Pour l'eau et a une fréquence de 4 MHz

$$\lambda = \frac{c}{F} = \frac{1480.000 \text{ m/s}}{4.000.000 \text{ Hz}} = 0,37 \text{ mm.}$$

donc pour un palpeur de diamètre $D = 70 \text{ mm}$

$$N = \frac{700}{4 \times 0,37} = 68 \text{ mm}$$

N.B: si la longueur de la zone proche (N) est plus importante que celle trouvée pour la hauteur minimale du liquide de couplage, c'est cette valeur qui est impérative.

-2. Procédés de contrôle

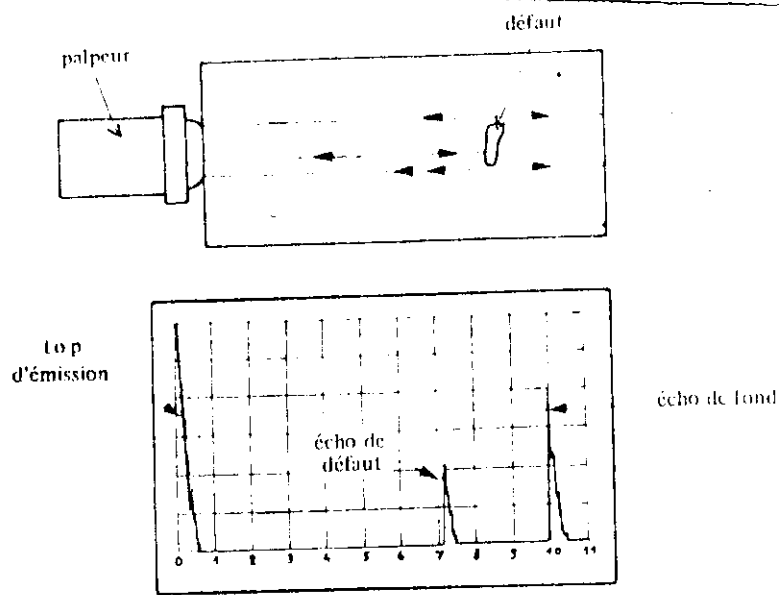
il existe trois procédés de contrôle différents

- contrôle par écho
- " " par transparence
- " " résonance.

2-1. Procédé par écho.

- a - Principe : L'élément sensible émet une impulsion ultrasonore et écoute la réponse ou écho, ceci permet la mesure du temps mis par l'impulsion initiale pour atteindre le fond ou le défaut.

- b - Pratique c'est la méthode la plus utilisée en contrôle. Un seul palpeur est appliqué sur la pièce.



Réflectogramme d'un défaut par le procédé par «écho».

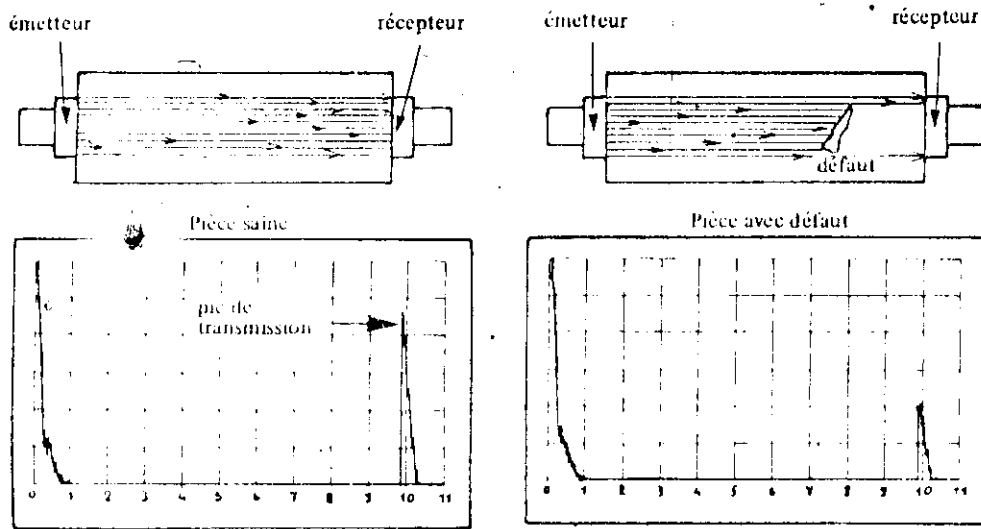
-2-2. Procédé par transparence

- a - Principe. Deux palpeurs sont utilisés, l'un est émetteur, l'autre est récepteur. L'émetteur envoie régulièrement des impulsions dans la pièce et le récepteur écoute.

L'atténuation anormale de l'amplitude des impulsions ultrasonores à travers le matériau traduit la présence de défaut ou d'hétérogénéité dans la pièce.

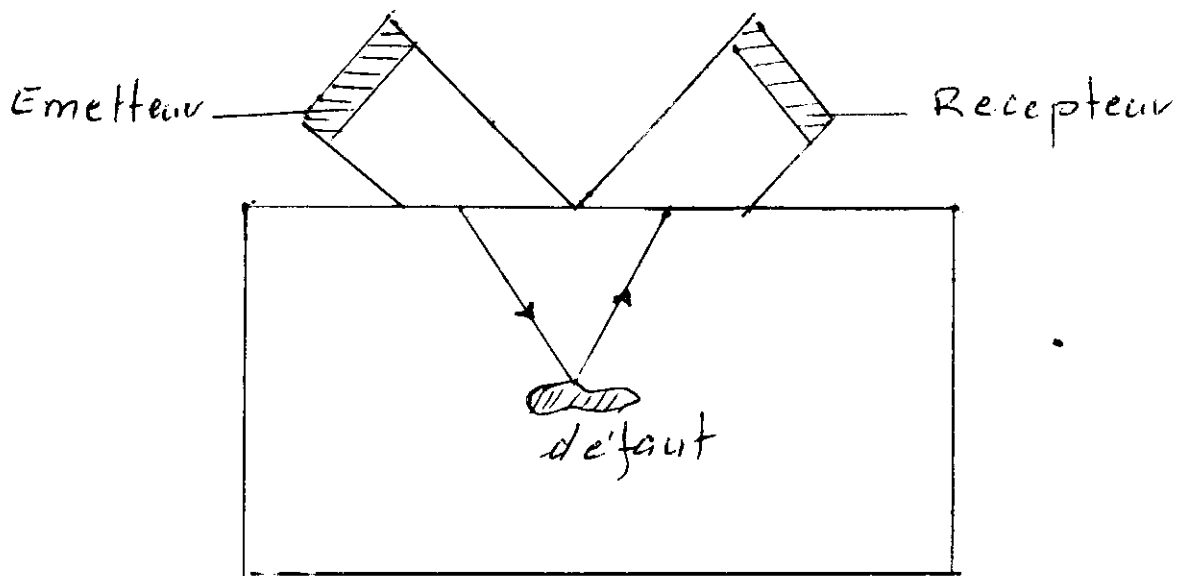
- b - Pratique on place l'émetteur sur une face de la pièce à sonder et le récepteur sur la face opposée, Les axes des deux palpeurs doivent être confondus.

Les U.S n'effectuent que des parcours simples et non des allers et retours.



En sondage manuel, le procédé pose le problème de couplage et de positionnement constant entre les deux palpeurs.

C'est pourquoi on a créé un procédé mixte écho-transparence où on combine les méthodes par écho et transparence.



Le palpeur récepteur n'écoute pas directement l'impulsion de l'émetteur mais perçoit les réflexions sur les défauts éventuels. Les deux palpeurs sont appliqués

- 3. Procédé par Résonance

il est surtout utilisé en mesure d'épaisseur, mais il permet aussi de détecter la présence de défauts.

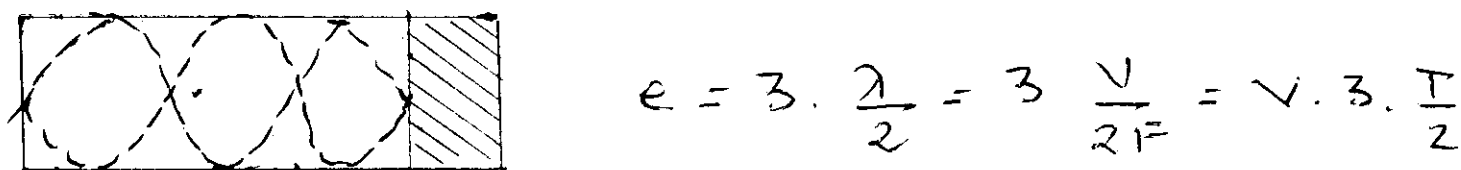
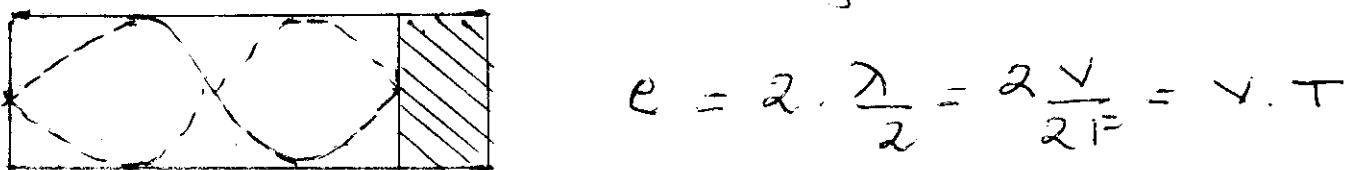
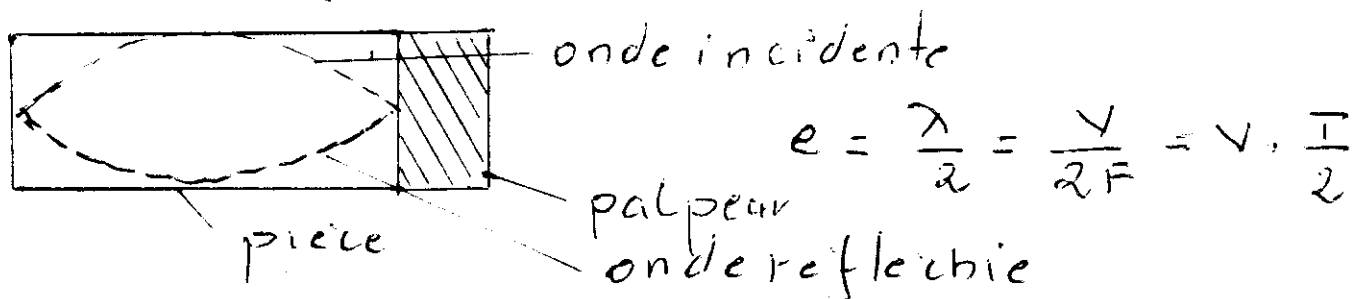
- a. Principe

Le procédé est basé sur la différence de résonance entre l'onde incidente envoyée par le palpateur et l'onde réfléchie envoyée par le fond de la pièce (pour la mesure d'épaisseur) ou par le défaut (pour la détection de défaut).

on excite donc le palpateur avec une fréquence variable d'une manière continue.

Lorsque la pièce a une épaisseur qui correspond à un nombre entier de demi-longueurs d'onde $\frac{\lambda}{2}, 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, 3 \cdot \frac{\lambda}{2}, \dots, n \cdot \frac{\lambda}{2}$ la pièce

se met alors à résonner.



Dans la détection de défaut, toute anomalie située dans la pièce affecte son épaisseur et perturbe ainsi sa propre fréquence de résonance.

- 2-3. Procédé par Résonance

il est surtout utilisé en mesure d'épaisseur, mais il permet aussi de détecter la présence de défauts.

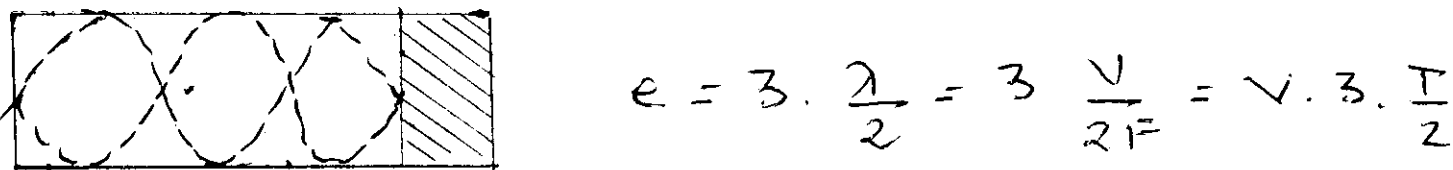
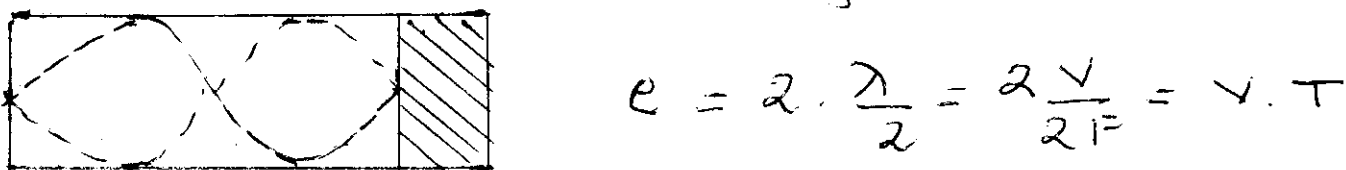
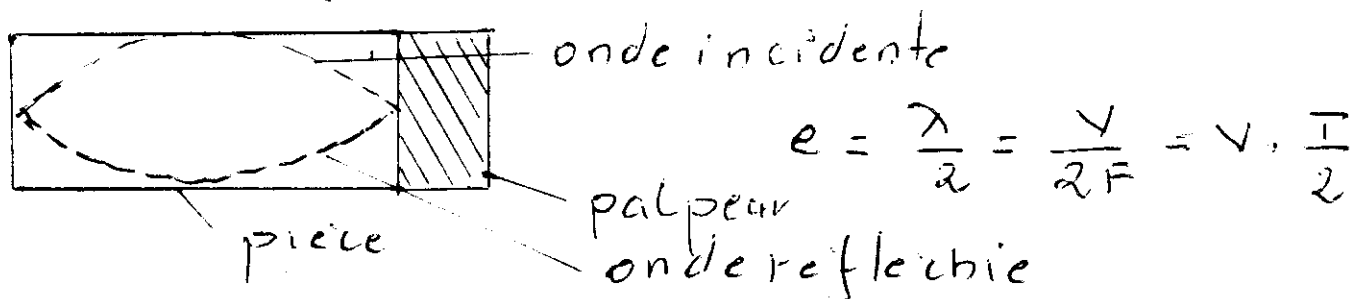
- a - Principe

Le procédé est basé sur la différence de résonance entre l'onde incidente envoyée par le palpéur et l'onde réfléchie envoyée par le fond de la pièce (pour la mesure d'épaisseur) ou par le défaut (pour la détection de défaut).

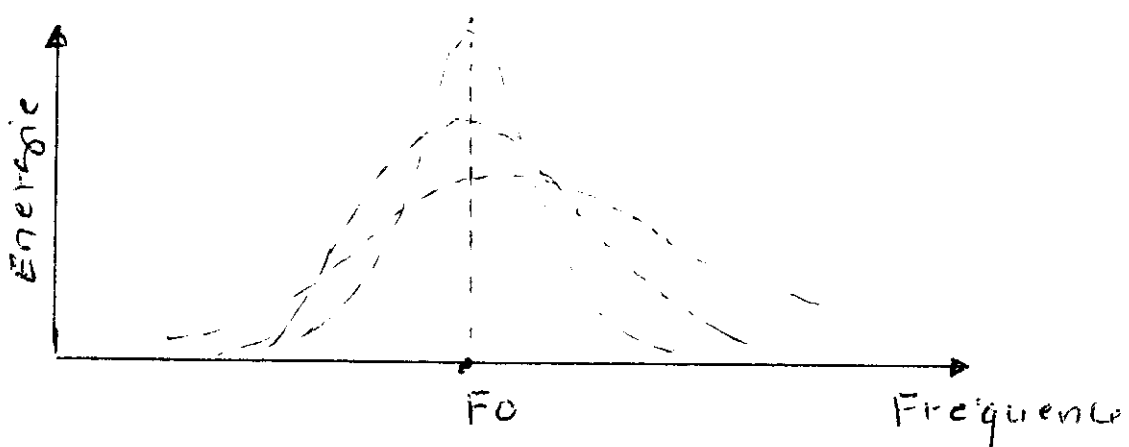
on excite donc le palpéur avec une fréquence variable d'une manière continue.

Lorsque la pièce a une épaisseur qui correspond à un nombre entier de demi-longueurs d'onde $\frac{\lambda}{2}, 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, 3 \cdot \frac{\lambda}{2}, \dots, n \cdot \frac{\lambda}{2}$ la pièce

se met alors à résonner.



Dans la détection de défaut, toute anomalie située dans la pièce affecte son épaisseur et perturbe ainsi sa propre fréquence de résonance.



Energie rayonnée par la pièce en fonction de la fréquence d'excitation.

- 3 - Problèmes liés aux contrôles

quelle que soit la technique et le procédé d'investigation sélectionnée et le type de procédé d'exploitation retenu, le trajet du faisceau ultrasonore peut se décomposer en cinq parties, pendant lesquelles il se heurte à des phénomènes qui rendent l'obtention et la lecture des résultats plus délicates.

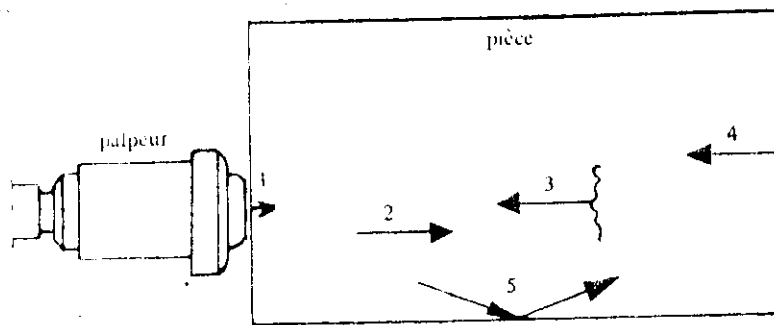


Fig. 14 - Le trajet du faisceau U.S. depuis sa sortie jusqu'à sa réflexion sur le fond se décompose en 5 périodes repérées ici.

- 1 - Emission du faisceau
- 2 - Trajet " "
- 3 - Réflexion due à un défaut
- 4 - " " au fond de la pièce
- 5 - " " sur un bord de la pièce

3.4. Problème lié à l'émission du

- 3-1- Probleme du Passage des u.s émis par le palpéur dans la pièce

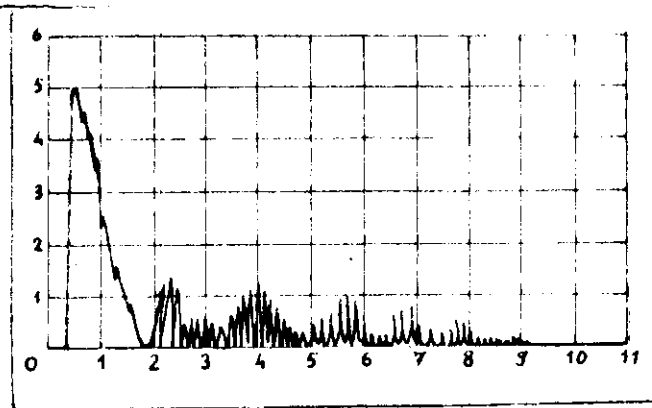
Le couplage acoustique entre la face du palpéur et celle de la pièce peut être toujours améliorée, quelle que soit la nature de la surface inspectée.

L'air doit être éliminé entre la face du palpéur et la pièce; on y parvient en utilisant un liquide de couplage (huile, eau ou autre).

Le couplage acoustique dépend essentiellement

- de l'état de surface de la pièce
- " " " " " " " " du palpéur
- du liquide de couplage ou couplant (eau, huile, graisse)
- du rapport d'impédance acoustique (couplant/matériau)

Les défauts du couplage acoustique entraînent sur le reflectogramme la formation d'échos parasites appelés couramment « herbes »



- 3-3- Réflexion sur un défaut

La réflexion sur un défaut résulte

- * de l'impédance acoustique du défaut suivant sa nature (vide ou plein)
- * du faciès du défaut
- * de l'orientation du défaut (\perp au faisceau ou autre orientation)
- * de la dimension de la surface effectivement réfléchissante et de la distance à laquelle se trouve le défaut

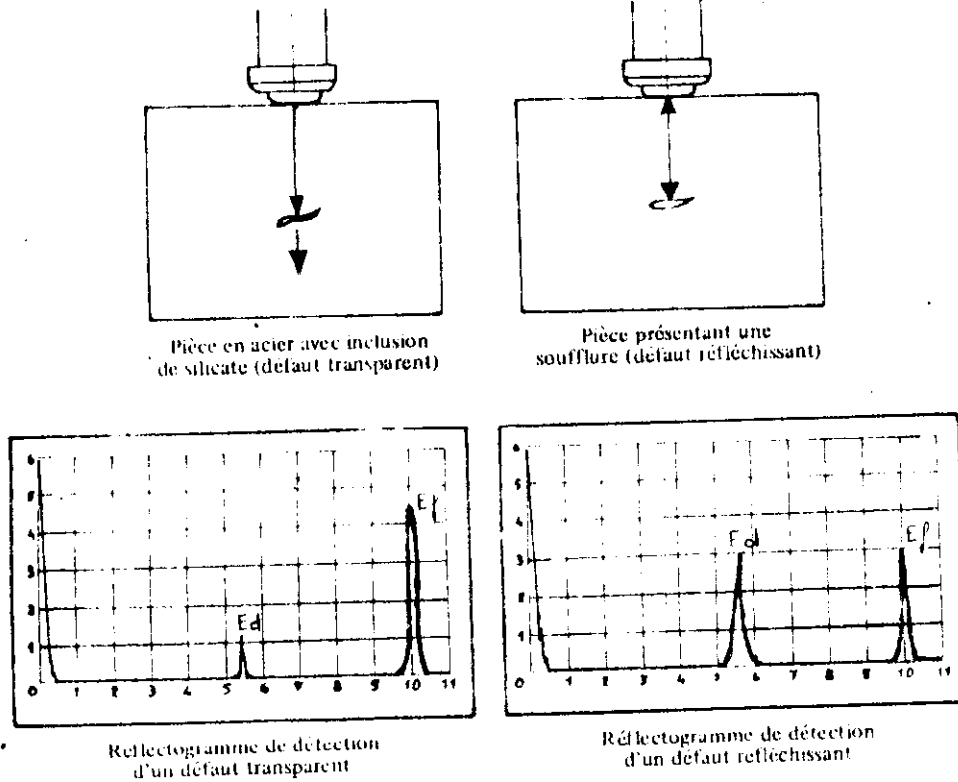


Fig. 16

3-5. effet de bord.

Compte tenu de sa divergence, une partie de ce faisceau est réfléchi par des bords de la pièce.
 Suivant le matériau et les états des surfaces, les échos dus aux effets de bord peuvent avoir différentes allures et des niveaux très différents.

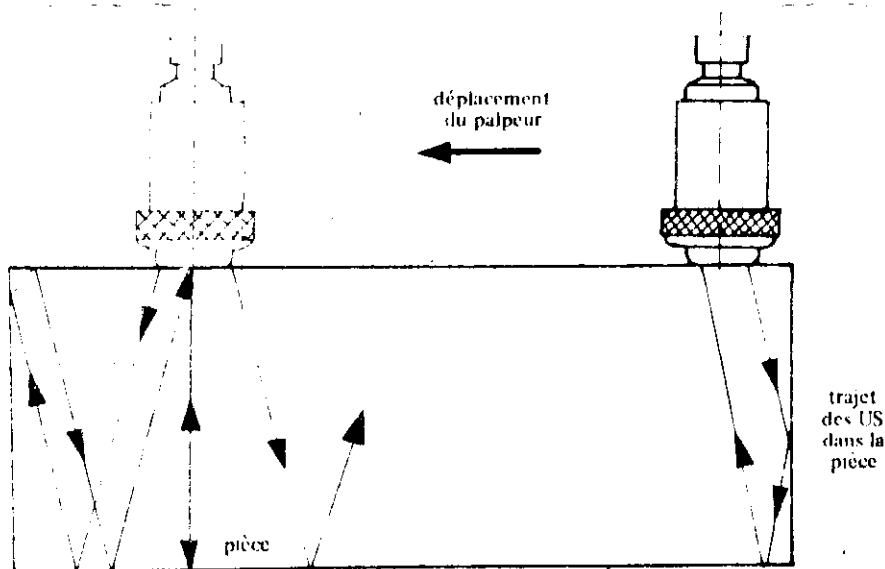


Fig. 17 - Une partie du faisceau est réfléchi par les bords de la pièce et revient au palpeur

Un des côtés de la pièce renvoie le faisceau une première fois et le fond le réfléchit à nouveau vers le palpeur. Si la section de la pièce était plus importante, cette part

- 3.2. Propagation des US dans la pièce

Le faisceau ultrasonore parcourt une distance d'autant plus grande que la pièce est plus transparente (ou moins absorbante)

Cette notion de transparence dépend.

- de la nature du matériau
- de la grosseur du grain (état structural de la pièce)
- de la présence de défauts
- de la fréquence d'émission

- 3.4. Reflexion sur le fond

La réflexion sur le fond est essentiellement liée

- à l'état de la surface de réflexion (rugosité)
- aux qualités géométriques (planéité, parallélisme)
- à l'impédance acoustique du fluide baignant la face arrière de la pièce (air, eau, huile)

- 3.6. Autres problèmes liés aux ultrasons

1°) Corrosion

Le fluide de couplage ne doit pas avoir une action corrosive sur la pièce. Pour cette même raison il convient d'ajouter un inhibiteur à l'eau des cuves à immersion. Pour cette raison l'huile et la graisse sont très employées lors de contrôles par contact ce qui pose le problème de leur élimination après contrôle, pour la manipulation de la pièce et sa propreté.

2°) État de surface

Les états de surfaces rugueux détériorent rapidement les palpeurs. Les protections souples doivent être fréquemment changées

Les protections rigides conviennent mal au contrôle de pièce à mauvais état de surface

3°) Environnement de la pièce Autant que possible, Les pièces doivent être facilement accessibles à l'opérateur afin de limiter la fatigue physique.

Les câbles de liaison doivent être suffisamment longs pour permettre l'examen de la totalité de la pièce.

Suivant le profil de la pièce, il faut parfois concevoir et réaliser un relais qui s'adapte au palpeur et épouse la forme de celle-ci.

Pour le contrôle en immersion, Les dimensions de la cuve doivent être telles qu'on puisse établir entre le palpeur et la pièce une hauteur de couplage convenable.

Des moyens de levage sont nécessaires pour manipuler les lourdes pièces.

En contrôle automatique, notamment par immersion, la recherche de défauts de plus en plus petits, et la volonté de pouvoir renouveler des contrôles très sévères conduisent à élaborer des machines de plus en plus précises.

III Différents types de Représentations

il existe trois types de représentations des résultats.

- 1 - Représentation de type A
- 2 - " " " B
- 3 - " " " C

1^o) Représentation de type A

Cette représentation permet de détecter la présence d'un défaut, de déterminer sa position et d'évaluer son pouvoir réflecteur.

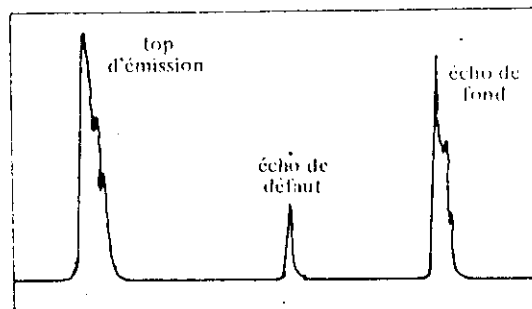
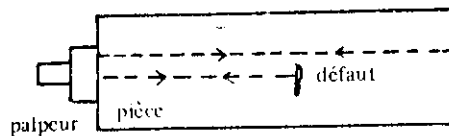
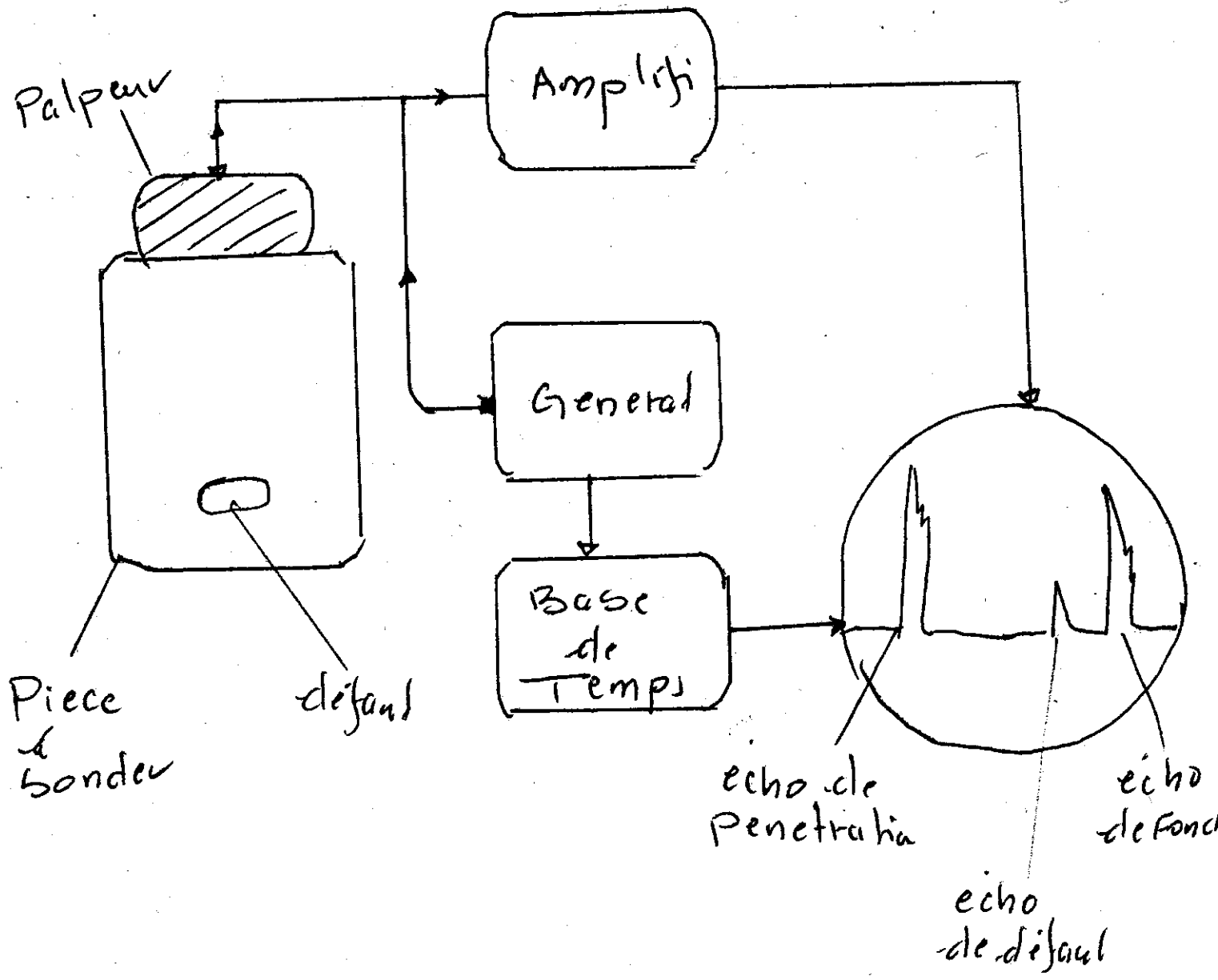


Fig. 11 - Représentation de type « A »

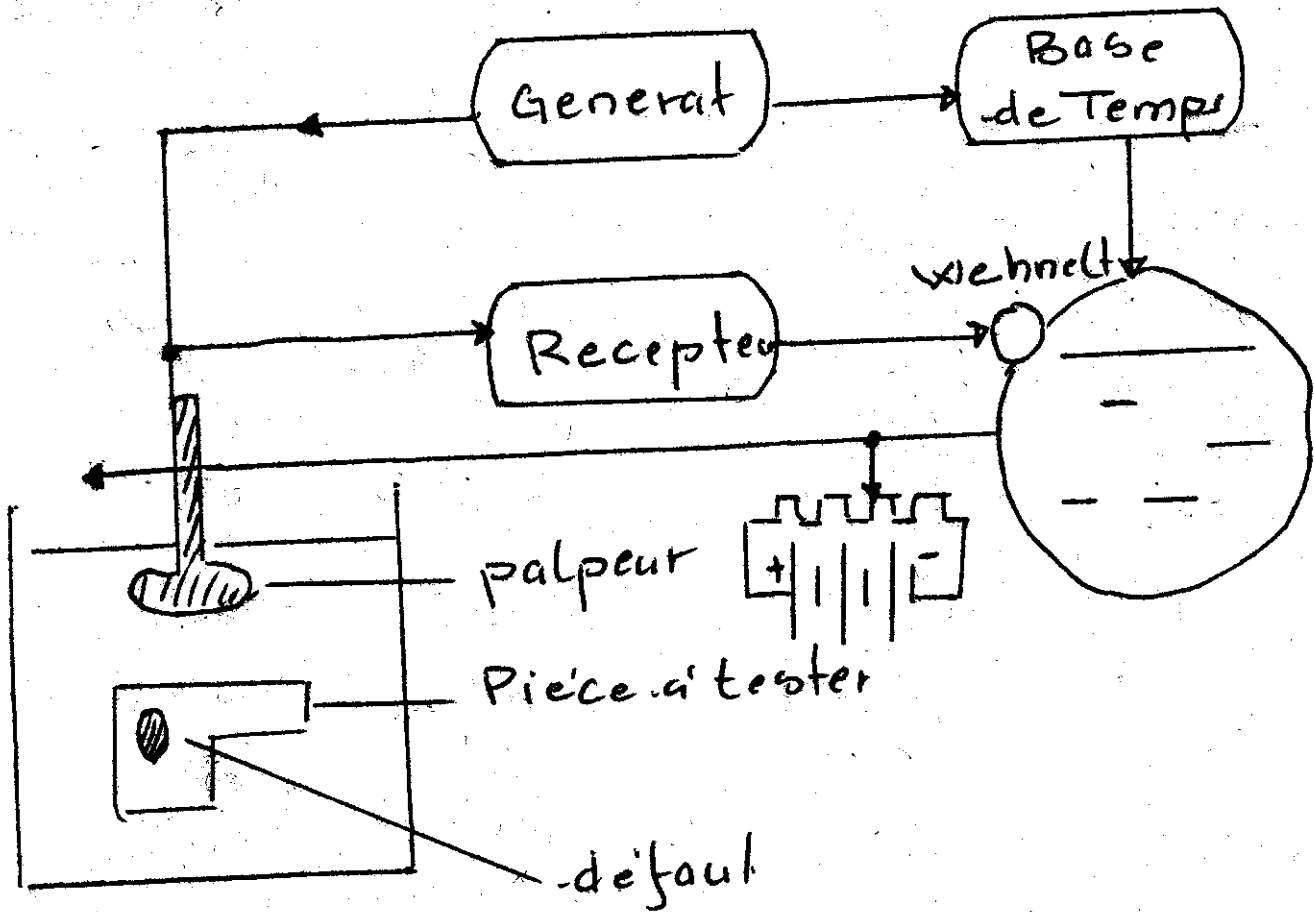
sur l'écran cathodique, la distance entre l'impulsion initiale et l'écho dû au défaut, est proportionnelle au temps que met l'impulsion pour parcourir la distance entre l'émetteur et le défaut à déceler. Ce temps est déterminé par la connaissance de la vitesse de balayage du spot (donc de la vitesse des u.s. dans la pièce à sonder).



Représentation de type A

2°) Représentation de type - B

Cette représentation fournit une coupe du défaut dans un plan passant par la direction de propagation des u.s.; elle permet d'avoir une coupe indication du défaut avec sa distance à la surface de contrôle et son étendue latérale



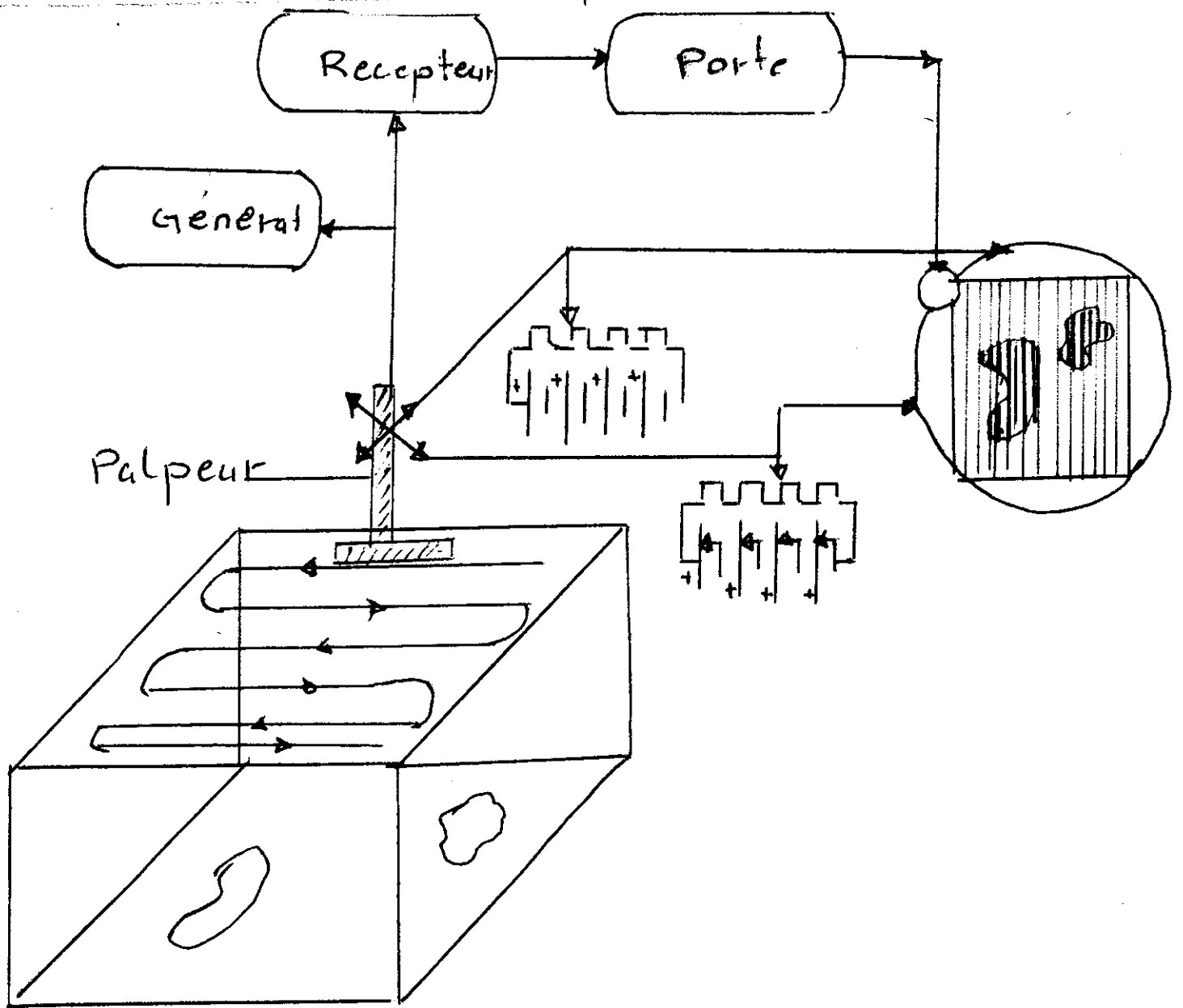
Représentation type - B.

- La déviation verticale du spot est proportionnelle au temps de parcours dans le matériau et la déviation horizontale est liée au déplacement du palpeur.

on a donc par cette représentation une image de la section plane définie par la droite de déplacement du palpeur et la direction de propagation du faisceau.

3°) Représentation de type-c

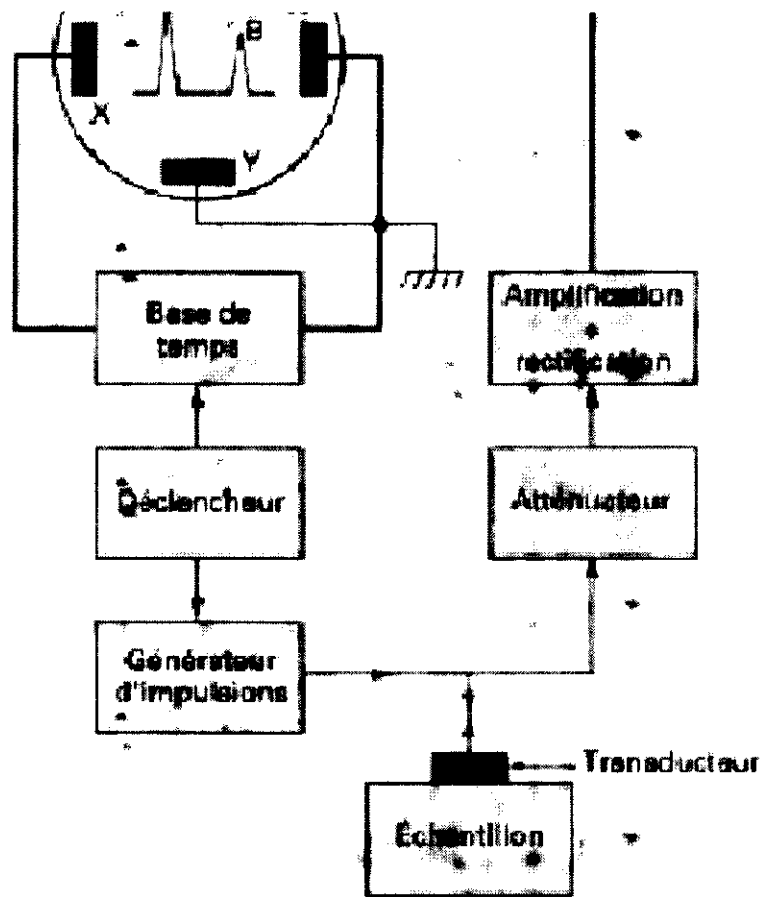
Assez souvent les deux représentations précédentes sont combinées pour donner une autre représentation qui est la représentation de type-c.



- Représentation de type - c -

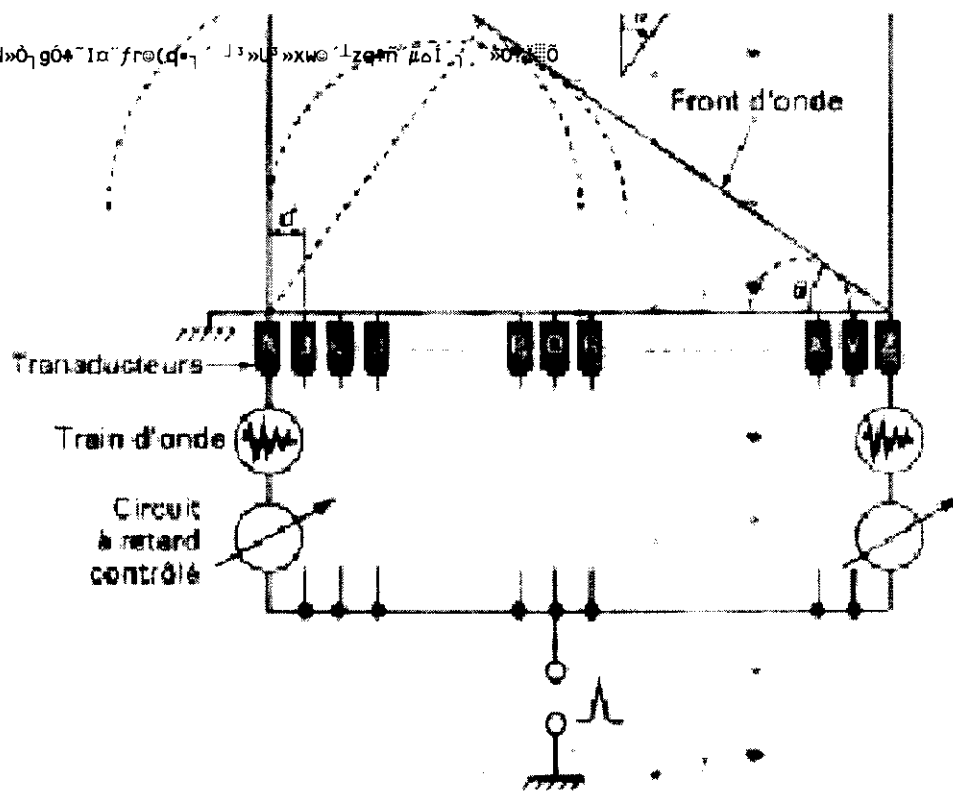
cette représentation fournit une image de la projection du défaut dans un plan.

Le palpeur se déplace horizontalement dans deux directions perpendiculaires. Les déviations verticales et horizontales du spot sont liées à ces déplacements. - 61 -



- A. impulsion électrique de départ
- B. écho de l'impulsion après réflexion sur la surface libre de l'échantillon

Figure 24 - Montage expérimental simplifié correspondant à la technique d'écho d'impulsion ultrasonore



Tous les transducteurs élémentaires sont distants de d
 $d = \lambda/2$

Figure 25 - Schéma descriptif du principe utilisé pour la génération d'un faisceau ultrasonore se propageant dans une direction θ variable (d'après J. C. Sowerl)

I. Transducteurs et palpeurs

1^o Transducteur on appelle transducteur un système permettant de transformer une forme d'énergie en une autre forme d'énergie

2^o Palpeur : on appelle palpeur la partie de l'appareil ultrasonore qui permet d'émettre et de recevoir les u.s. Il est composé de 4 parties.

- La pastille piézo-électrique
- L'amortisseur
- Le câble coaxial
- Le boîtier

2.1. La pastille piézo-électrique ou transducteur.

Comme on l'a déjà indiqué, le rôle de la pastille piézoélectrique est de transformer la tension électrique qui lui est appliquée en vibrations mécaniques, qui sont transmises par l'intermédiaire du milieu de couplage à la pièce à contrôler. Elle transforme les vibrations mécaniques renvoyées par la pièce en tension électrique.

D'un point de vue dimensionnel, on notera que la pastille vibrante est d'autant plus mince et par conséquent plus fragile que sa fréquence de vibration est plus grande, ce qui conduit à une limite dans l'obtention des vibrations de très hautes fréquences.

2.2. L'amortisseur il a pour rôle d'une part d'empêcher la transmission des vibrations émises par la face arrière du transducteur, d'autre part, empêcher la pastille de continuer à vibrer lorsque la tension électrique d'excitation, très brève (quelques micro-secondes) est coupée.

L'amortisseur est souvent constitué par un mélange de poudre de tungstène, de caoutchouc synthétique et d'araldite. Ce mélange doit être collé au dos de la pastille vibrante et doit se prolonger jusqu'aux côtés du cristal pour empêcher les vibrations radiales qui sont particulièrement sensibles dans le cas d'une pastille faite de titanate de baryum.

2-3. Câble coaxial on utilise toujours un câble coaxial pour relier le palpeur à l'appareil.

Le câble remplit deux fonctions; il transmet le signal haute fréquence avec un minimum de perte et il protège le faible signal de réception des interférences extérieures.

N.B: il convient d'employer des câbles coaxiaux de qualité supérieure, de façon à réduire les pertes par effet de capacité électrique et d'éviter l'emploi de câbles de grandes longueurs. A cette égard des longueurs inférieures à 3 mètres paraissent convenables.

2-4. Boîtier - le boîtier constitue l'habillage et la protection extérieure du palpeur. Il existe de nombreuses formes de boîtiers qui dépendent du type de palpeur.

- 3 - Épaisseur des pastilles piézoélectriques on peut démontrer théoriquement que les vibrations mécaniques par une pastille ont une amplitude maximale lorsque l'épaisseur de cette pastille est réglée à une valeur égale à une demi-longueur d'onde ou à un multiple.

$$e = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

or la longueur d'onde dépend de la fréquence que l'on veut engendrer et de la vitesse longitudinale des u.s dans le matériau avec lequel la pastille est faite.

Par exemple si on considère un palpeur à 10 MHz fait en titanate de baryum dans lequel la vitesse longitudinale des u.s est de 5500 m/s. La longueur d'onde des u.s dans la pastille utilisée est alors

L'épaisseur de la pastille permettant d'obtenir une amplitude maximale à la fréquence de 10 MHz est donc

$$e = \frac{\lambda}{2} = 0,27 \text{ mm.}$$

Pour un palpeur de 1 MHz l'épaisseur serait dix fois plus grande

$$e = \frac{\lambda}{2} = \frac{v_L}{2f} = \frac{5500 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6} = 2,7 \text{ mm}$$

I - les différents types de Palpeurs

Les différents types de palpeurs se caractérisent par le type d'onde qu'ils engendrent et par l'angle d'incidence.

- Les palpeurs droits : qui émettent des ondes longitudinales perpendiculaires à la surface d'application.
- Les palpeurs obliques : qui émettent des ondes transversales sous un angle d'incidence généralement supérieur à 30° . Parmi les palpeurs obliques on y trouve :
 - * des palpeurs à angle d'incidence fixe
 - * " " " " " " " " variable
- Les palpeurs doubles combinés comportant un palpeur émetteur et un palpeur récepteur tous les deux dans le même boîtier.
- Les palpeurs à relais : qui sont des palpeurs droits avec une interposition dans le boîtier d'une pièce intermédiaire en matière plastique (en plus de l'élément protecteur) entre le transducteur et la pièce à contrôler.
- Les palpeurs à immersion : qui sont des palpeurs droits dont le boîtier est parfaitement étanche. Ils peuvent émettre un faisceau u.s normal ou un faisceau focalisé. La focalisation est obtenue soit par une lentille acoustique, soit avec une pastille en céramique dont la forme est obtenue par moulage.
- Les palpeurs droits avec prisme adaptable : qui sont des palpeurs droits auxquels on a ajouté un prisme en plexiglas permettant de diriger le faisceau u.s avec un angle d'incidence relativement faible.

II - 1. Les palpeurs droits

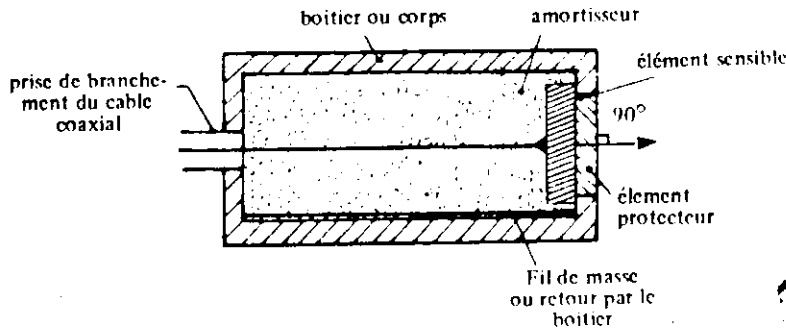


Fig. 22 - Palpeur droit

L'axe de leur faisceau est \perp à la surface d'émission.
 Il n'y a pas de transformation d'onde au niveau des surfaces de séparation palpeur-couplant-échantillon; l'onde reste toujours une onde longitudinale (onde de compression).

Dans le cas de palpeurs à quartz, on effectue parfois une protection extérieure du cristal par un revêtement en chrome dur de 1/10 mm d'épaisseur.

Les pastilles en titanate de baryum, ~~sont~~ elles, sont protégées, elles, par une coiffe en matière plastique qui présente, en outre, l'avantage de faciliter un bon contact entre le palpeur et la pièce.

II - 2. Palpeurs ~~droits~~ obliques

Avec ce type de palpeurs, on travaille avec un faisceau dont l'axe est incliné d'un angle α déterminé avec la ~~surface~~ surface d'application.

Schéma d'un palpeur oblique normal monobloc :

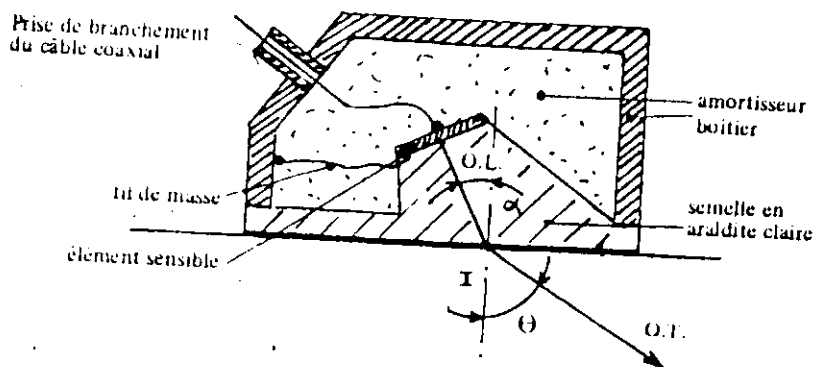


Fig. 30 - Palpeur oblique monobloc

α = Angle d'incidence des O.L

θ = " de refraction des O.T

Un faisceau d'ondes Longitudinales frappant obliquement la surface de la piece engendre un faisceau refracte d'ondes transversales qui penetrent dans la piece sous une incidence connue.

Le point d'Emergent du faisceau (indique sur le palpeur par un trait sur ses flancs)

α = Angle d'incidence des O.L

θ = " de refraction des O.T

Tableau p. 93

Ces valeurs d'angles indiquées sur le palpeur ne sont habituellement valables que pour l'acier ordinaire.

si l'on effectue un controle sur un autre materiaux, il convient de calculer l'angle de refraction du faisceau par la loi de Descartes ou de la mesurer experimentalement

$$\frac{\sin \theta_{\text{acier}}}{C_{\text{acier}}} = \frac{\sin \theta_x}{C_x}$$

où θ_a = Angle de refraction dans l'acier

C_a = ~~xxx~~ célérité des u.s " "

θ_x = Angle de refraction dans le materiaux

C_x = célérité des u.s dans le materiaux.

Exemple : Acier - Aluminium

$$\theta_a = 70^\circ \quad C_a = 3250 \text{ m/s} \quad C_x = 3080 \text{ m/s}$$

$$\text{donc } \sin \theta_x = 0,890 \Rightarrow \boxed{\theta_x = 63^\circ}$$

III * Les palpeurs doubles obliques à angle variable

ils sont utilisés pour la mise au point de certaines méthodes d'essais et pour des contrôles pratiques.

Il existe trois ~~manières~~ manières de faire varier l'angle d'incidence suivant la nature ou la forme du relais.

+ Relais Fluide

Fig. 32

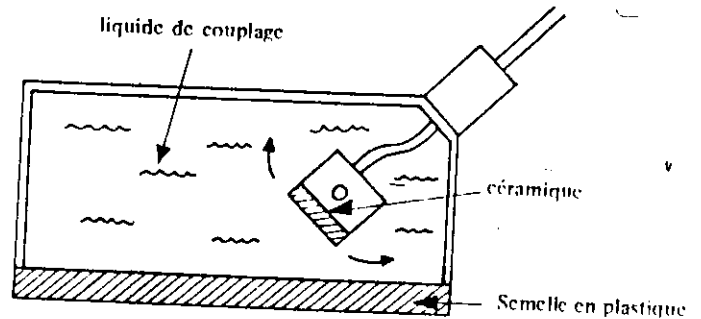
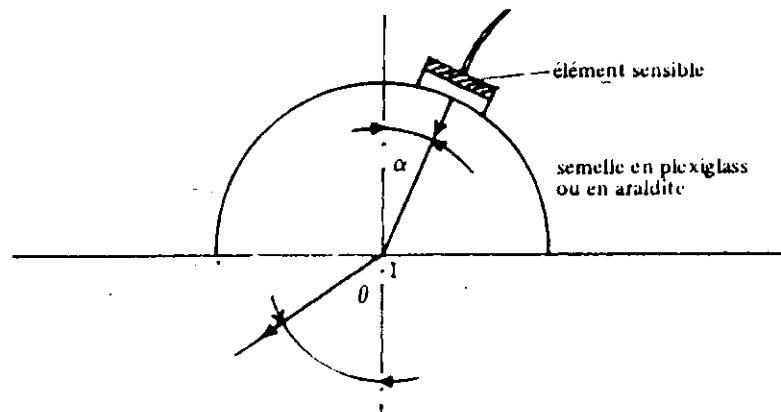


Fig. 32 - Schéma d'un palpeur à angle variable

La commande de l'angle d'inclinaison est extérieur au palpeur.
La position du point d'émergence et la distance de parcours dans le relais varient avec l'inclinaison.

+ Relais solide convexe cylindrique



la position de la ligne d'émergence est fixe ainsi que le parcours des u.s. dans le relais.

+ Relais Solide concave cylindrique

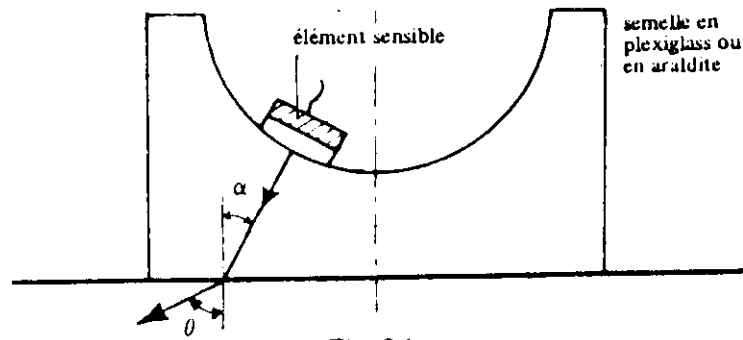


Fig. 34

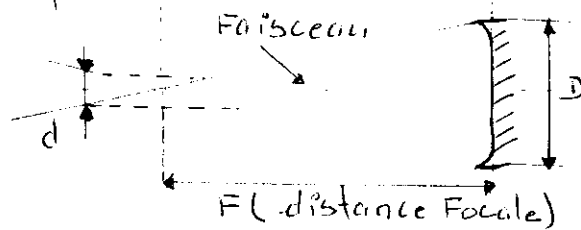
Les angles de la position de la ligne d'émergence et le parcours dans la semelle varient avec l'angle d'incidence.

3. Palpeur focalisé

La détection des petits défauts peut être facilitée par l'emploi de palpeurs focalisés.

Le faisceau obtenu par focalisation est conique et convergent.

* Principe de la focalisation



A une distance F (distance focale), tous les rayons du faisceau sont réunis. Il y a donc en ce point concentration d'ondes et d'énergie considérable; elle peut être cent fois supérieure à celle mesurée sur la surface de la céramique émettrice: cette concentration est égale au rapport des surfaces (pastille - Tache focale) ou au rapport des diamètres.

Carte du

Exemple: Pastille céramique $\phi = 10 \text{ mm} \Rightarrow S_c = 78,5 \text{ mm}^2$
on veut une tache focale de $\phi = 2 \text{ mm} \Rightarrow S_f = 3,14 \text{ mm}^2$

donc Le rapport des Energies = $\frac{78,5}{3,14} = 25$

ou encore

$$= \left(\frac{10}{2}\right)^2 = 5^2 = 25$$

a) Focalisation par élément sensible concave

Les éléments piézoélectriques couramment utilisés sont grillés. En leur donnant une forme sphérique concave au moment de la fabrication, on obtient directement la focalisation du faisceau.

La distance focale est alors égale au rayon de courbure de l'élément sensible.

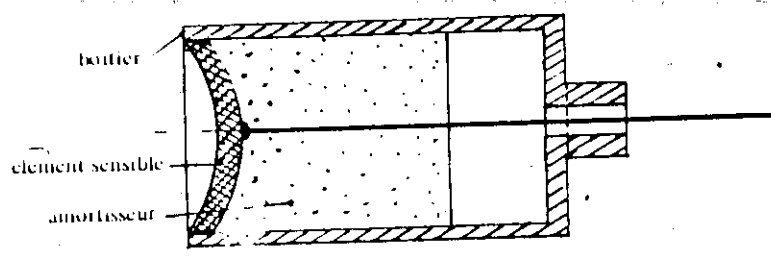
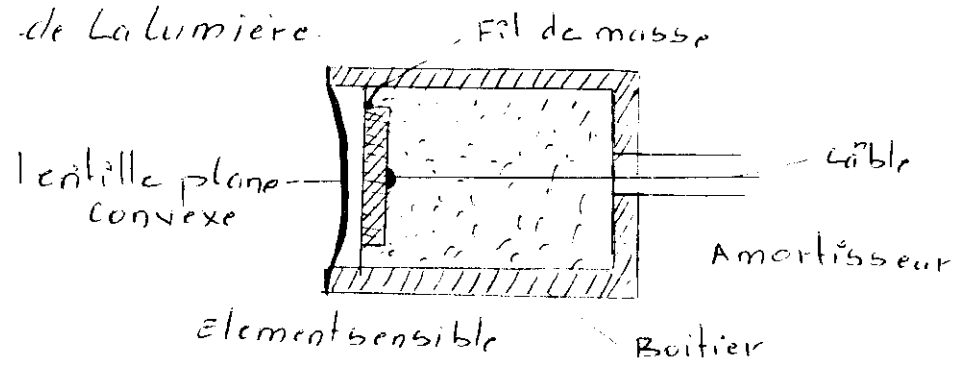


Fig. 26

b) Focalisation par Lentille

on peut obtenir aussi la focalisation en accolant à la céramique plane une lentille concave. on calcule la distance focale en utilisant les formules de la focalisation de la lumière.



Calcul de la distance focale d'une lentille utilisée en immersion

$$F = \frac{R}{1 - \frac{C_e}{C_m}}$$

- F : distance focale
- R : Rayon de courbure de la lentille
- C_e = vitesse des O.L. dans le liquide d'immersion
- C_m = vitesse des O.L. dans le matériau constituant la lentille
- (C_e est toujours $< C_m$)

Remarque : Cette liste de palpeurs n'est pas limitative, il est possible de rencontrer des palpeurs spéciaux, conçus pour répondre à un problème de contrôle bien particulier

II. 4. Détérioration et Entretien des palpeurs

Un palpeur peut avoir une durée de vie relativement longue si on prend certaines précautions notamment

- * ~~Il faut~~ remplacer la seuille plastique de protection en cas de usure

- * La détérioration du palpeur peut provenir du décollement de l'amortisseur ou de l'existence de bulles d'air entre l'élément sensible et la semelle de protection.

Ces ~~deux~~ détériorations provoquent un élargissement important de l'écho d'émission.

- * les pannes proviennent aussi très souvent de mauvais contact au niveau des câbles de liaison qu'il est nécessaire de vérifier fréquemment à l'aide d'un ohmmètre

--- Détermination de La Forme des défauts Par analyse Fréquentielle. ---

- I - Introduction

Le principe du contrôle non destructif par u.s repose sur le fait que tout défaut recevant une onde ultrasonore, la réfléchit totalement ou partiellement.

La méthode par écho, très couramment employée, permet donc à l'aide de matériels classique de :

- * Localiser les défauts en connaissant le temps de transit de l'onde et sa vitesse de propagation dans le milieu considéré
- * d'estimer l'importance du défaut en analysant l'amplitude de l'écho reçu.

Mais on conçoit que les ondes incidentes et réfléchies sont différentes cette modification est due aux caractéristiques du défaut (dimensions, forme, orientation par rapport à l'axe du faisceau)

Par exemple, la modification est différente suivant que le défaut est plan ou sphérique.

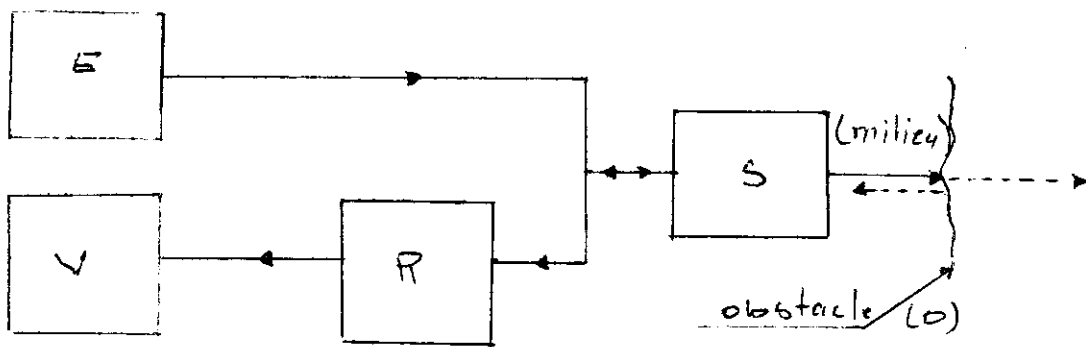
Dans ce chapitre, nous étudierons uniquement cette modification au niveau des fréquences: d'où 'Analyse Fréquentielle'

- II - Etude Théorique

- 1 - Présentation du phénomène

considérons une sonde émettrice - réceptrice (S) associée à :

- un émetteur (E)
- un récepteur (R)
- un dispositif de visualisation (V)



suite au signal d'émission, la sonde transmet dans le milieu à étudier une onde u.s dont les caractéristiques dépendent de l'émetteur, de la sonde, du couplage éventuellement et du milieu proprement dit

cette onde en se propageant dans le milieu atteint l'obstacle (O) et son énergie se scinde en deux parties : une partie est réfléchié, l'autre est transmise.

Le but de ce chapitre est donc de déterminer la modification en fréquence de l'onde réfléchié par rapport à l'onde incidente (au niveau de l'obstacle).

Désignons par :

$E(\omega)$: La transformée de Fourier de l'émission

$S(\omega)$: La fonction de transfert de la sonde à l'émission

$S'(\omega)$ " " " " " " " " à la réception

$M(\omega)$ Le comportement fréquentiel du milieu de propagation (trajet aller-retour)

$D(\omega)$: La fonction de transfert de l'obstacle

$A(\omega)$: " " " " du récepteur

La transformée de Fourier du signal reçu en sortie du récepteur s'écrit :

$$G(\omega) = E(\omega) \cdot S(\omega) \cdot M(\omega) \cdot D(\omega) \cdot S'(\omega) \cdot A(\omega) \quad (1)$$

Si nous disposons, non plus d'un obstacle quelconque, mais d'un réflecteur plan de grandes dimensions (par rapport à la longueur d'onde du faisceau u.s) et disposé perpendiculairement au trajet u.s, la fonction de transfert de l'obstacle est alors constante : $D(\omega) = k$ et égale à l'unité si la réflexion est totale.

On conçoit qu'un tel type de réflecteur n'affecte pas le spectre de l'onde incidente.

Dans ce cas, le signal reçu en sortie du récepteur a pour fonction de transfert

$$G'(\omega) = E(\omega) \cdot S(\omega) \cdot M(\omega) \cdot k \cdot S'(\omega) \cdot A(\omega) \quad (2)$$

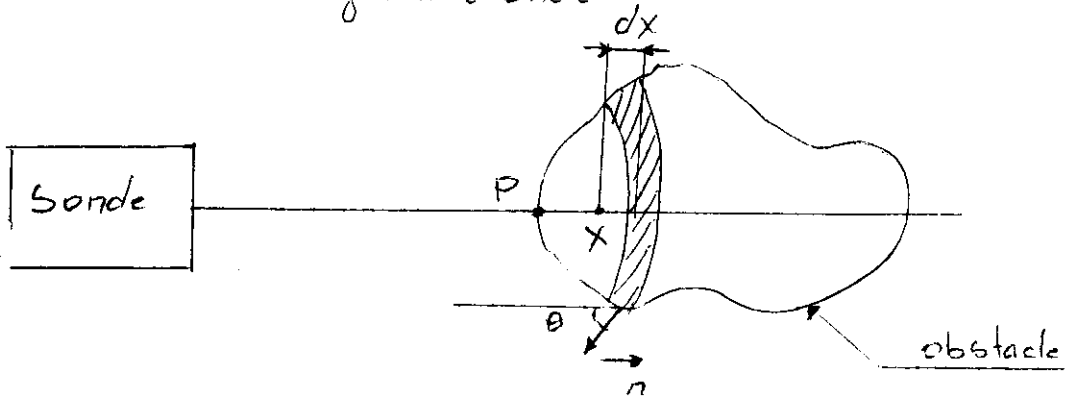
Le rapport des deux relations conduit à une constante près à la fonction de transfert de l'obstacle.

$$D(\omega) = k \cdot \frac{G(\omega)}{G'(\omega)} \quad (3)$$

-2. Etude Théorique

-a. Hypothèses

- 1°) L'obstacle doit être situé sur l'axe du faisceau ultra-sonore, à une distance suffisante pour que l'onde soit considérée comme plane et d'intensité uniforme, dans la limite du volume de l'obstacle.
- 2°) Le principe de Huyghens est respecté, c'est-à-dire que les dimensions des particules de l'obstacle sont grandes devant la longueur d'onde.



Alors chaque élément de surface ds de l'obstacle réfléchit une énergie proportionnelle à $\frac{ds \cdot w \cdot \cos \theta}{d \cdot c}$

avec :

d : La distance séparant la sonde d'un point P situé sur l'obstacle.

θ : Angle entre la normale à la surface et la direction de propagation.

w : Pulsation de l'onde incidente.

c : Vitesse de propagation des ondes dans le milieu.

soit ds la surface totale des éléments de l'obstacle situés entre les points d'abscisse x et $(x+dx)$

à l'abscisse

$$ds = s'(x) \cdot dx$$

Soit $I(\omega)$, la fonction de transformée de Fourier de l'onde incidente. Cette dernière peut être considérée comme la somme d'ondes sinusoïdales de fréquence $f = \omega/2\pi$ et d'amplitude $|I(\omega)|$.

Donc chaque élément de surface ds renvoie en direction de la source une pression sonore.

$$\Delta P_r = \frac{I(\omega) \cdot \omega}{(x+d) \cdot c} \cdot s'(x) \cdot \cos \theta \cdot e^{j\omega \left(t - \frac{2(x+d)}{c} \right)} \cdot dx$$

x étant petit devant d

$$\Delta P_r = \frac{I(\omega) \cdot \omega}{d \cdot c} \cdot s'(x) \cdot \cos \theta \cdot e^{j\omega \left(t - \frac{2d}{c} \right) - 2j \frac{\omega \cdot x}{c}} \cdot dx$$

La transformée de Fourier de l'onde réfléchie est égale à :

$$P_r(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\omega) \cdot \frac{\omega}{d \cdot c} \cdot s'(x) \cdot \cos \theta \cdot e^{-2j \frac{\omega \cdot x}{c}} \cdot dx$$

$$= I(\omega) \cdot \frac{\omega}{d \cdot c} \int_{-\infty}^{+\infty} s'(x) \cdot \cos \theta \cdot e^{-2j \frac{\omega \cdot x}{c}} \cdot dx$$

La fonction de transfert de l'obstacle étant $D(\omega) = \frac{P_r(\omega)}{I(\omega)}$

on obtient donc
$$D(\omega) = \frac{\omega}{d \cdot c} \int_{-\infty}^{+\infty} s'(x) \cdot \cos \theta \cdot e^{-2j \frac{\omega \cdot x}{c}} \cdot dx$$

* Notion de profil réflecteur

Le terme $s'(x) \cdot \cos \theta$, qui ne fait intervenir que la forme de l'obstacle, est désigné par "Profil réflecteur de l'obstacle" et est noté par $P(x)$.

$$P(x) = s'(x) \cdot \cos \theta$$

BIBLIOGRAPHIE

- M. Soutif**, vibration, propagation, diffusion, Dunod, Paris, (1970)
- J.P. Mathieu**, vibration, et phénomènes de propagation, Masson, Paris, (1974)
- M. Jessel**, propagation, des ondes en milieu homogène infini, C.R.Ph., Marseille
- B.Banks, G.E.Oldfield et H.rawding**, la détection ultrasonique des défauts les métaux, Eyrolles, Paris (1966)
- J.L.Pelletier**, la pratique du contrôle industriel par ultrasons, communications actives ,Paris (1980)
- M. Jessel**, Acoustique theorique, Masson et Cie (1973)
- B. Brown, J.E. Goldman**, Ultrasonn de haute intensité Dunod, Paris (1971)
- J. Perdijon**, L'echographie, Dunod Paris (1981)
- P. Linerard, P.Francois**, acoustique industriel et environnement, Eyrolles, Paris (1983)
- M.Rossi**, Electroacoustique, P.P. Romandes Lausanne, (1986)
- Contrôle Non Destructif par ultrasons, C.A.S.T. ,Lyon

SOMMAIRE

Chapitre - I - La piezoelectricite
" analyse et application

Chapitre - II - Les ultrasons

Chapitre -III - Production des ultrasons

Chapitre - IV - Principe de fonctionnement
des appareils a ultrasons

Chapitre -V - Applications des ultrasons

Chapitre -VI - Les transducteurs

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *A.D. Pierce*: Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill Book CO.,NewYork 1981
- [2] *L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B.Coppers and J.B. Sanders* . Fundamentals of Acoustics (3rd edn) Wiley and Sons, New York, 1981.
- [3] *P.M.Morse and K.U. Ingrad* : Theoretical Acoustics: McGraw-Hill Book CO.,NewYork 1968
- [4] *A.B. Bhatia*: Ultrasonic Absorption. Clarendon Press Oxford,1967
- [5] *Y. Kikuchi* :Ultrasonic Transducers Coron Publ. Co Ltd,Tokyo,1969
- [6] *O.E. Mattiat*: Ultrasonic transducer Materials; Plenum Press New York 1971
- [7] *P.D. Edmonds*: Ultrasonics Methods of Experimental Physics, L.Marton and C. Marton Academic Press, New York,1981