

Contrôle par ultrason

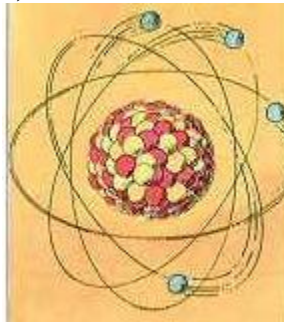
I. INTRODUCTION : C'est une méthode de contrôle qui consiste à transmettre des impulsions acoustiques de hautes fréquences (supérieures à 30 kHz) appelées « ultrasons » dans un matériau. Ces ondes se propagent dans le matériau. La présence d'une discontinuité (défaut interne) sur le trajet des ultrasons provoque la réflexion partielle des impulsions. Le signal réfléchi est recueilli par un capteur appelé « transducteur ultrasonore ». Cette méthode permet de localiser les défauts internes avec précision et d'en apprécier leur forme avec une bonne rapidité et sans précautions particulières. C'est une méthode comparative et donc tributaire du facteur humain. Les applications les plus courantes sont la mesure d'épaisseurs, la recherche de défauts internes et la mesure de couples de serrage.

II. PRINCIPES PHYSIQUES :

II.1 La matière :

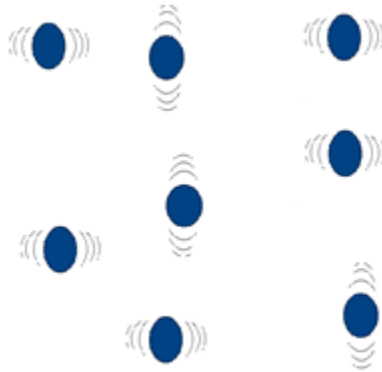
La matière est constituée d'atomes. Les atomes sont les plus petites parties des corps simples. Ceux-ci se combinent entre eux pour donner les corps composés.

Alors qu'il n'existe qu'une centaine de corps simples différents (donc d'atomes), il existe une infinité de corps composés (molécules).

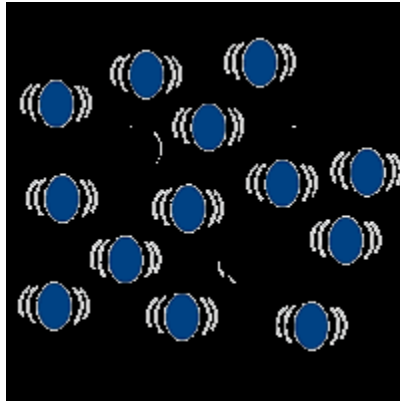


Dans la nature, on peut classer les corps en 3 catégories : les gaz, les liquides et les solides.

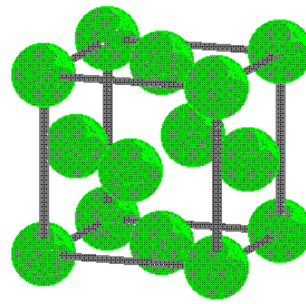
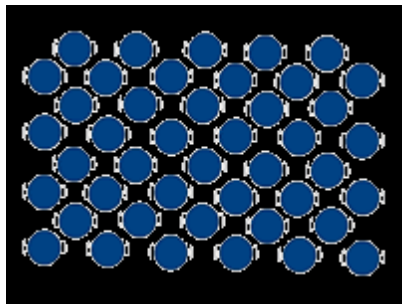
Les gaz : les molécules de gaz se trouvent très éloignées les unes des autres, ceci explique les caractéristiques particulières des gaz (ex : compressibilité).



Les liquides : les molécules sont plus rapprochées que dans les gaz. Elles sont moins mobiles car elles s'attirent réciproquement.



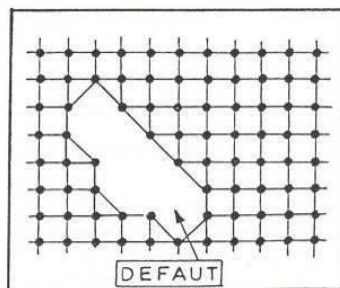
Les solides : les molécules sont très proches des unes des autres et s'attirent fortement. Dans la majorité des cas, les corps solides sont dits « cristallisés » ; c'est-à-dire que l'empilement des atomes est fait de façon ordonnée et régulière.



II.2 Les défauts des solides :

La matière telle que schématisée précédemment présente souvent des défauts (manques matières, inclusions, etc.). Les pièces, en cours de service, sont soumises à des efforts. Les défauts peuvent alors être à l'origine d'altération de la résistance du matériau et même de la rupture des assemblages. Un défaut peut se caractériser par :

- ☐ Sa nature (crique, soufflure, inclusion, etc.)
- ☐ Sa forme et son étendue,
- ☐ Sa place et son orientation dans la pièce,
- ☐ Le nombre de défaut par unité de volume.



II.3 Les vibrations :

Les ultrasons sont un phénomène vibratoire. Une vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

La fréquence F d'un phénomène est le nombre de répétitions (périodes) de ce phénomène en une seconde. La fréquence s'exprime en Hertz.

La période T (en secondes) ou cycle de ce mouvement est le temps qui s'écoule entre 2 passages du mobile dans le même sens à un endroit donné. La période est constante.

La fréquence F est l'inverse de la période :

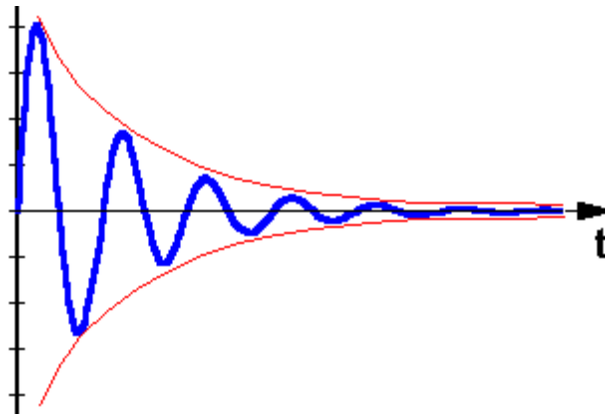
$$F = \frac{1}{T}$$

On peut aussi définir d'une autre manière les vibrations. Cette nouvelle façon de caractériser les phénomènes vibratoires est la longueur d'onde λ (lambda) qui est la distance qui sépare deux oscillations voisines.

$$\lambda = VT = \frac{V}{F}$$

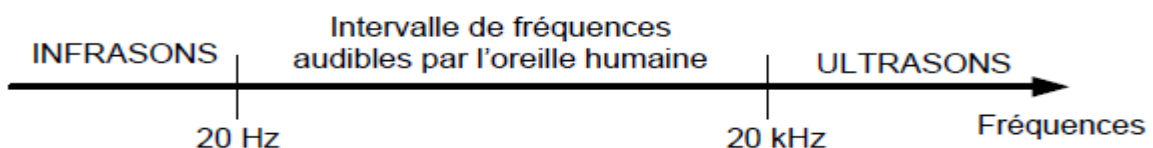


Remarque : les résultats précédents ont été décrits en faisant abstraction des phénomènes de frottement. Dans la réalité, le système « ressort + masse » va progressivement se freiner puis s'arrêter. Les courbes enregistrées auront finalement l'allure ci-a.



II.4 Sons et Ultrasons :

Les sons sont des vibrations qui peuvent avoir pour support un solide, un liquide ou un gaz. Les sons sont classés suivant leur fréquence : graves (sons de basse fréquence) ou aigus (sons de haute fréquence). L'oreille humaine permet de capter les sons de fréquences comprises entre 20Hz et 20kHz. En dessous de 20 Hz, ce sont les infrasons et au-dessus de 20 kHz, les ultrasons.



Exemples de calcul de longueur d'onde : Les sons se déplacent dans l'air à la vitesse de 340 m/s. La longueur d'onde d'un son de fréquence $F = 500$ Hz sera :

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{340}{500} = 0,68 \text{ m} = 68 \text{ cm}$$

La vitesse de propagation des ultrasons dans l'acier est de 5850 m/s. La longueur d'onde d'un ultrason de fréquence 3 MHz sera :

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{5850}{3 \cdot 10^6} = 0,00195 \text{ m} = 1,95 \text{ mm}$$

On constate que les ultrasons ont une longueur d'onde de l'ordre du millimètre. Cet ordre de grandeur des ultrasons est très important. En effet, lors de la détection de défauts par ultrasons, le plus petit défaut détecté aura en théorie comme dimension la demi ($\frac{1}{2}$) longueur d'onde.

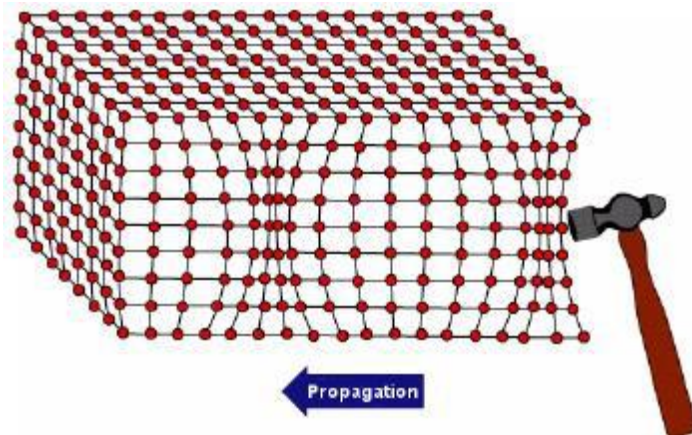
Dans l'exemple précédent, on ne pourra détecter que des défauts de dimensions supérieures à $1,95/2 \approx 1\text{mm}$. Plus la fréquence augmente et plus la sensibilité de détection augmente. Dans le contrôle industriel par ultrasons, les fréquences utilisées vont de 0,5 à 10MHz.

II.5 Propagation des ultrasons :

Un corps solide peut être assimilé à un ensemble d'atomes réunis entre eux par des forces d'attraction schématisées par des ressorts. Ceci est également vrai pour les liquides mais on considère que dans ce cas les ressorts sont plus « mous » que les pour les solides : c'est l'élasticité. Les matériaux solides sont caractérisés par les physiciens par 4 paramètres principaux :

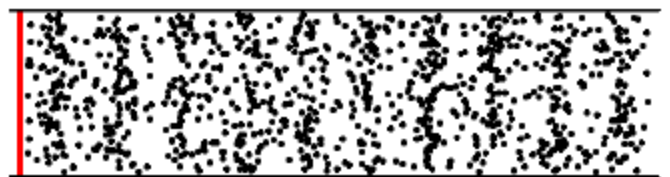
- ☐ La masse volumique ρ ,
- ☐ Le module d'élasticité (E) ou module de Young,
- ☐ Le module de rigidité (G) ou module de Coulomb,
- ☐ Le coefficient de poisson δ

Les ultrasons correspondent à un ébranlement communiqué à l'édifice « atomes + ressorts ». Un mouvement oscillatoire appliqué au premier rang des atomes sera transmis aux atomes voisins par l'intermédiaire des liaisons « ressort ». De proche en proche, la vibration se propagera au travers de la pièce. Il est intuitif de dire que, plus les ressorts seront rigides, plus le mouvement se transmettra rapidement et inversement.



Il existe différents types d'ondes ultrasonores : Les Ondes Longitudinales (OL) appelées également ondes de compression : l'oscillation engendre une vibration des particules dont le déplacement élémentaire est parallèle à la direction de propagation. La vitesse de propagation est définie par :

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



Les Ondes Transversales (OT) appelées également onde de cisaillement : le déplacement des particules est perpendiculaire à la direction de la propagation. La vitesse de propagation des ondes transversales est définie par :

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



Atténuation des ondes ultrasonores : l'amplitude d'une vibration qui se propage dans un milieu n'est pas constante durant sa progression. Elle va s'atténuer jusqu'à disparaître. Les causes de cette atténuation sont :

- ☐ La perte d'énergie par effet thermique,
- ☐ La densité du matériau qui va faciliter plus ou moins le passage de l'énergie,
- ☐ La taille des grains (structure cristalline) qui va créer une dispersion.

Ces causes sont essentiellement liées au matériau proprement dit. Cependant, la fréquence des vibrations est également un facteur qui influe sur cette atténuation. Exemple :

- ☐ 1MHz dans l'acier donne une longueur d'onde $\lambda = 6\text{mm}$.
- ☐ 10MHz dans l'acier donne une longueur d'onde $\lambda = 0,6\text{mm}$

Pour parcourir 6mm d'acier, il faudra 10 oscillations au signal de 10MHz, alors qu'il n'en faudra qu'une pour un signal de 1MHz. L'énergie consommée par l'onde de 10MHz sera donc plus importante que celle de 1MHz.

Dans l'ordre des atténuations croissantes, on trouve, parmi les matériaux utilisés industriellement l'aluminium, l'acier, les fontes, les matériaux cuivreux et les matériaux plastiques.

L'atténuation de l'onde sera fonction :

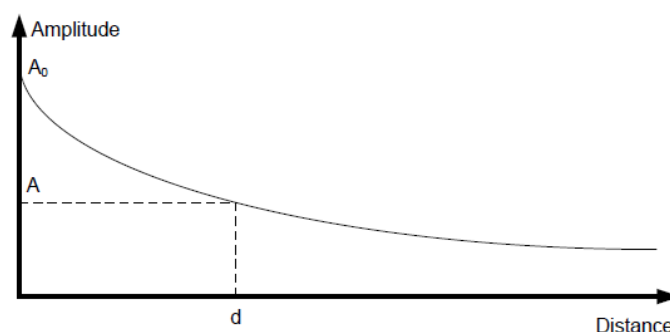
- ☐ De la fréquence de l'onde,
- ☐ Du matériau,
- ☐ De la distance parcourue par l'onde.

A un instant donné, l'onde possède une amplitude A_0 . Lorsqu'elle aura parcouru une distance d , l'amplitude restante sera A .

L'amplitude A comme équation :

$$A = A_0 e^{-\alpha d}$$

- ☐ A_0 : amplitude de la vibration émise,
- ☐ A : amplitude de la vibration qui a parcouru la distance d ,
- ☐ d : distance parcourue,
- ☐ α : coefficient dépendant du matériau et de la fréquence élevée au carré ($\alpha = KF^2$)



En résumé :

- ☐ Plus la fréquence est élevée, plus l'onde sera atténuée rapidement,
- ☐ Plus la fréquence est basse, plus elle pénétrera dans un matériau,
- ☐ Plus les grains du matériau seront importants et irréguliers, plus l'onde sera atténuée et inversement.

Impédance acoustique :

Chaque matériau est caractérisé, en ce qui concerne son action sur la propagation des ondes ultrasonores, par son impédance acoustique « Z » ; c'est à dire sa résistance au passage des ultrasons :

$$Z = \frac{P}{v} = \rho V$$

- ☐ Z : impédance acoustique
- ☐ p : pression acoustique
- ☐ v : vitesse de la particule
- ☐ ρ : densité du matériau
- ☐ V : vitesse de l'onde

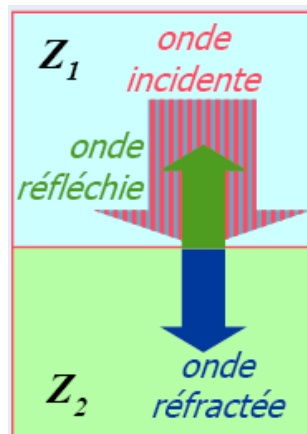
Matériau	ρ (g/cm ³)	V _L (km/s)	Z (10 ⁶ kg/m ² s)
Acier	7.7	5.90	45
Aluminium	2.7	6.32	17
Cuivre	8.9	4.70	42
Eau (20°C)	1.0	1.483	1.5
Nickel	8.8	5.63	50

Les matériaux ayant de grandes impédances acoustiques sont dits « durs » et les matériaux ayant de faibles impédances acoustiques sont dits « mous ».

Interface entre 2 matériaux : l'écho :

On considère une onde ultrasonore arrivant perpendiculairement sur l'interface entre deux matériaux caractérisés par leurs impédances Z₁ et Z₂. Il se produit au niveau de cette interface une brusque variation d'impédance. Une partie de l'onde sera transmise (ou réfractée) et une partie de l'onde sera réfléchi : c'est *l'écho ultrasonore*. On peut dire que :

ONDE INCIDENTE = ONDE REFLECHIE + ONDE REFRACTEE.



La proportion de l'onde qui sera réfléchi (donc inversement celle qui sera transmise) dépend de l'écart des valeurs d'impédances acoustiques.

Dans le cas d'une incidence droite :

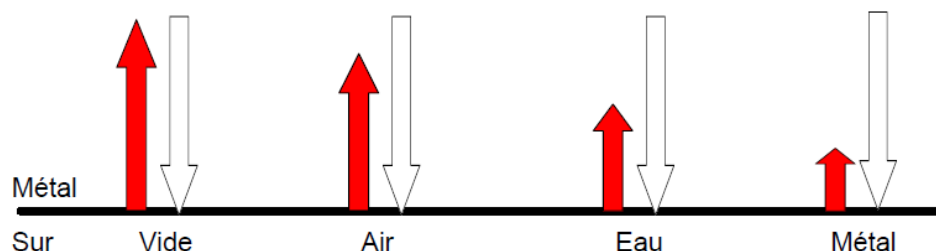
$$\square \text{ Energie réfléchi (\%)} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$$\square \text{ Energie réfractée (\%)} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

En général, on définit le coefficient de réflexion qui sera donné en % par :

$$\text{coefficient de réflexion} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot 100$$

L'écho est donc proportionnel au coefficient de réflexion. Selon les matériaux en présence, on aura apparition d'échos d'amplitudes différentes (proportionnelles aux coefficients de réflexion).



Exemple interface acier / silicate d'aluminium :

$$\text{coefficient de réflexion} = \frac{45000000 - 15000000}{45000000 + 15000000} \cdot 100$$

$$\text{coefficient de réflexion} = 50$$

50% de l'onde incidente sera réfléchi, en faisant abstraction des pertes dues à l'atténuation. On pourrait dire que l'écho aura une amplitude de moitié de l'émission.

Cas particuliers :

\square Si $Z_1 = Z_2$, onde réfléchi = 0 \implies il y a transmission totale

\square Si $Z_1 \gg Z_2$ (exemple interface acier / air), onde réfléchi = onde incidente, il y aura réflexion totale de l'onde ultrasonore.

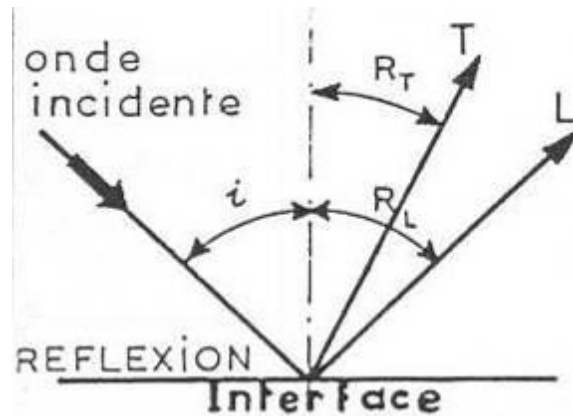
Ceci explique qu'il faille coupler acoustiquement le palpeur à une pièce à contrôler par un milieu autre que l'air (huile, eau, glycérine, etc.).

II.6 Réflexion et réfraction :

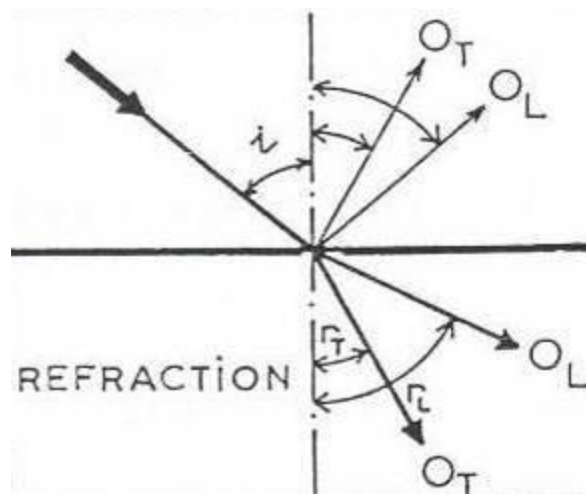
Précédemment, l'onde ultrasonore arrivait perpendiculairement à l'interface des 2 matériaux. En incidence oblique, il se produit également des phénomènes de réflexion et de réfraction (transmission)

Réflexion : soit une onde incidente longitudinale (OL) arrivant obliquement sur l'interface en faisant un angle d'incidence « i » (angle entre l'onde et la perpendiculaire à l'interface). Cette onde va se réfléchir en se dédoublant en 2 types d'ondes :

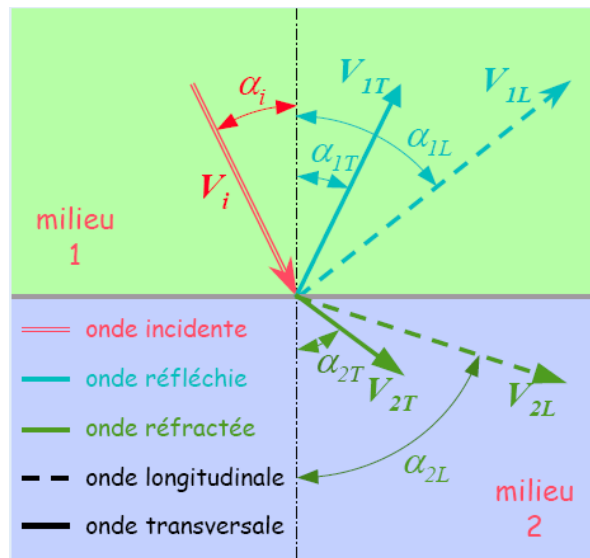
- Une onde longitudinale L faisant un angle de réflexion R_L tel que $R_L = i$
- Une onde transversale T faisant un angle R_T tel que $R_T < R_L$



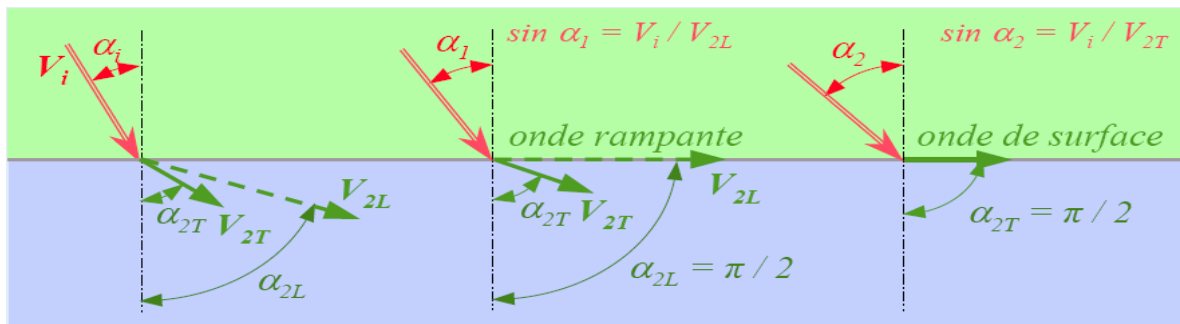
Réfraction : en plus du phénomène de réflexion, il se produit un phénomène de transmission dans le second milieu, appelé réfraction, avec dédoublement de l'onde incidente en deux ondes (L et T). De même que précédemment, l'angle de réfraction en OL : r_L sera toujours supérieur à l'angle de réfraction en OT : r_T .



La loi de SNELL - DESCARTES va permettre de relier entre elle les différentes valeurs d'angles : i , R_L , R_T , r_L , r_T et les vitesses des différentes ondes.



$$\frac{\sin(\alpha_i)}{V_i} = \frac{\sin(\alpha_{1L})}{V_{1L}} = \frac{\sin(\alpha_{1T})}{V_{1T}} = \frac{\sin(\alpha_{2L})}{V_{2L}} = \frac{\sin(\alpha_{2T})}{V_{2T}}$$



Remarques:

- Certaines composantes réfléchies ou réfractées peuvent ne pas exister, ou véhiculer une énergie négligeable.
- α_{2L} et α_{2T} augmentent avec i
- Quand $\alpha_i = \alpha_1$ (premier angle critique), et $\alpha_{2L} = \pi/2$ l'onde L réfractée suit l'interface (onde rampante).
- Quand $\alpha_i = \alpha_2$ (second angle critique), et $\alpha_{2T} = \pi/2$ l'onde L réfractée suit l'interface (onde de surface). Elle se propage à une vitesse V_s légèrement inférieure à V_{2T} .
- Si $\alpha_i > \alpha_2$, toute l'énergie incidente est réfléchie.

Milieu	ρ [kg/m ³]	V_L [m/sec]	V_T [m/sec]	V_s [m/sec]
air	1	330	-	-
eau	1 000	1 500	-	-
plexiglas	1 180	2 700	1 100	1 000
polyéthylène	900	1 960	530	480
aluminium	2 700	6 250	3 100	2 800
cuivre	8 900	4 630	2 140	1 930
acier	7 850	5 960	3 240	2 900
acier inox	7 900	5 650	3 100	2 800

III. LA PRODUCTION DES ULTRASONS :

Le but est de créer une vibration mécanique de haute fréquence. Des oscillations mécaniques rapides sont difficiles à mettre en œuvre. Par contre, des oscillations électriques sont beaucoup plus aisées à réaliser.

III.1 Le phénomène piézo-électrique :

Dans un cristal de quartz, une pression (ou une traction) exercée sur ses faces crée sur celles-ci une tension électrique. Cette tension s'inverse en polarité si la pression devient une contraction. Une des particularités du cristal de quartz est la réciprocité du phénomène. Cette réciprocité entraîne que l'application d'une tension entre deux faces du cristal va le comprimer et l'inversion de tension va le dilater.

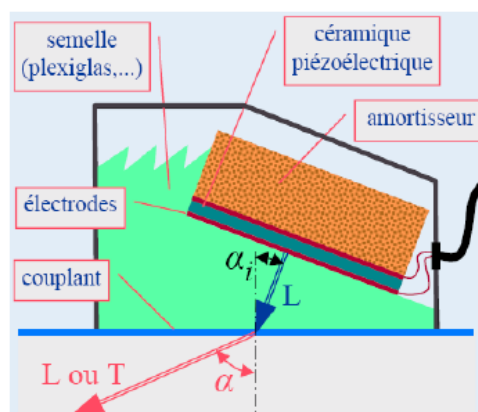
L'application d'une tension alternative va donc permettre au cristal de vibrer mécaniquement. Et si le cristal reçoit une vibration, il créera une tension qui sera l'image de cette vibration.

La lame de quartz est en fait un transducteur, puisqu'elle transforme une énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Si la fréquence du signal électrique est appropriée, la vibration mécanique engendrée sera susceptible de générer des vibrations mécaniques ultrasonores.

On aura alors un émetteur ultrasonore. Inversement le cristal recevant des ultrasons donnera un signal électrique, on aura alors un récepteur ultrasonore.

Principe :

- Les faces métallisées d'une pastille céramique piézoélectrique transforment une décharge électrique en vibration mécanique.
- L'onde se propage dans la semelle et pénètre dans le matériau à travers une couche liquide assurant le couplage acoustique.
- Transformation inverse de l'énergie en réception.

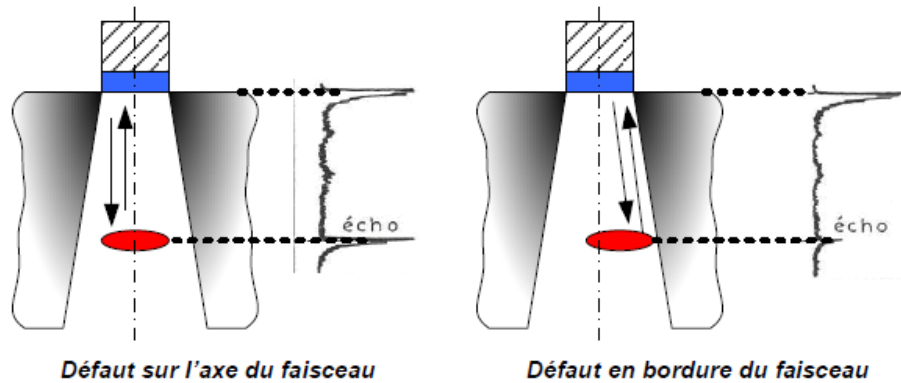


III.2 Le faisceau ultrasonore.

Les ondes ultrasonores émises par le palpeur dans un matériau sont « contenues » dans le faisceau ultrasonore. En dehors de ce faisceau, la matière n'est pas mise en vibration. Il est important de noter que le faisceau diverge au sein du matériau. Pour un palpeur circulaire, la forme du faisceau n'est pas un cylindre mais un tronc de cône.

Plus le diamètre du palpeur est important, moins le faisceau divergera.

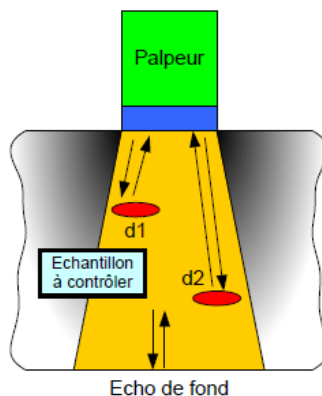
III.3 Répartition de l'intensité acoustique : Non seulement le faisceau diverge dans le matériau à contrôler, mais de plus, il n'est pas homogène. L'énergie ultrasonore contenue dans ce faisceau n'est pas uniformément répartie. C'est au centre de celui-ci que se situe l'intensité maximale. En d'autres termes, un défaut situé sur l'axe du faisceau renverra un écho plus important que s'il se trouve sur le bord de ce faisceau.



Visualisation des échos ultrasonores : Il existe plusieurs façons de visualiser les échos créés par les défauts dans une pièce. La plus employée est celle qui consiste à représenter l'écho sur un écran (type oscilloscope), en fonction du temps que mettent les ultrasons à parcourir l'aller et retour entre le palpeur et l'interface que représente le défaut en question.

Principe : Soit une pièce qui comporterait deux défauts : d1 et d2. Le processus d'examen se compose de 2 étapes : l'émission puis la réception.

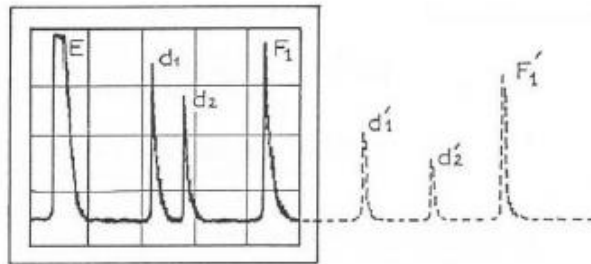
- **L'émission :** le palpeur est mis en vibration pendant un court instant. Une vibration prend naissance dans la pièce au niveau du contact avec le palpeur et va se propager vers la face opposée. Cette vibration après un certain temps de parcours, va rencontrer le défaut d1. Une réflexion d'une partie du faisceau va se produire pendant que le reste de la vibration va poursuivre son chemin pour rencontrer un peu plus tard d2 (où une seconde réflexion se produira) puis sur le fond de la pièce (où une troisième réflexion se produira).
- **La réception :** l'onde ultrasonore réfléchie par d1, d2 puis par le fond, va se propager vers le palpeur. La première vibration que le palpeur recevra sera celle provenant de d1 (puisque celle-ci a le moins de chemin à parcourir) puis suivra celle venant de d2 et puis celle venant du fond (appelé écho de fond).



Ces différentes vibrations (appelées échos) vont donc rencontrer la surface où est posé le capteur, traverser l'agent couplant (huile) et venir faire vibrer l'élément piézoélectrique qui donnera des

signaux électriques au fur et à mesure de l'arrivée des échos. La face arrière de la pièce étant une interface matériau/air, il y a réflexion totale.

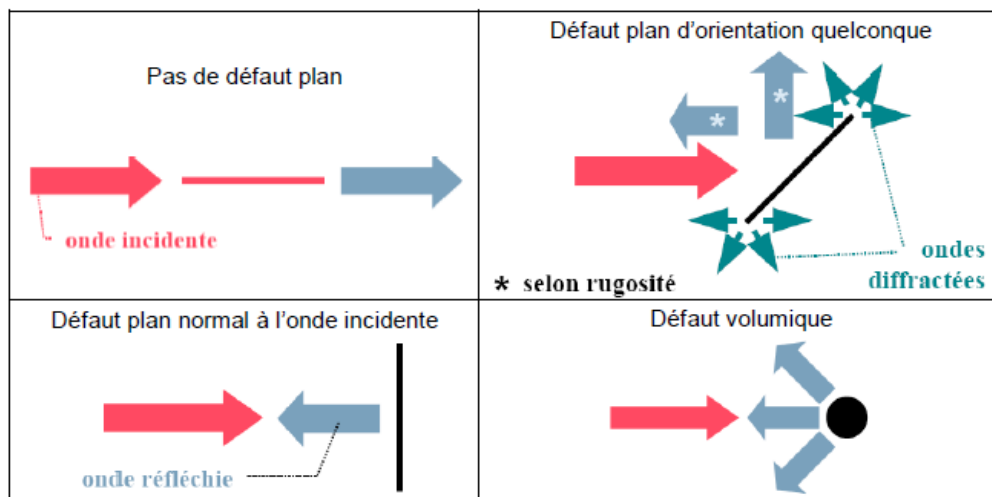
Par contre, pour les vibrations réfléchies par les défauts d1 et d2, rencontrant à leur tour l'interface pièce / palpeur, une partie de leur énergie sera renvoyée dans la pièce vers la face arrière. Un nouveau phénomène de réflexions sur d1 et d2 se produira. Leurs échos, plus faibles que les premiers, arriveront sur le palpeur après les précédents. Il y aura donc différentes réflexions provenant des mêmes défauts : ce sont des réflexions multiples. Le nombre de ces réflexions multiples dépendra bien sûr de l'atténuation due au matériau. Plus le matériau sera absorbant, moins il y aura de réflexions multiples.



IV. LES TECHNIQUES DE CONTROLE PAR ULTRASONS :

IV.1 Configuration d'examen :

Réflectivité des défauts :

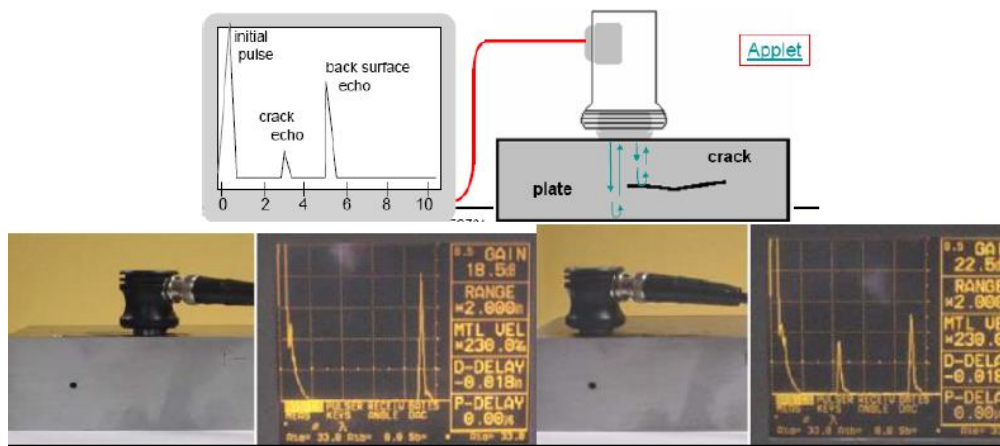


Pour pouvoir détecter des défauts plans d'orientations diverses, il faut utiliser plusieurs capteurs à différents angles.

IV.2 Le contrôle par contact :

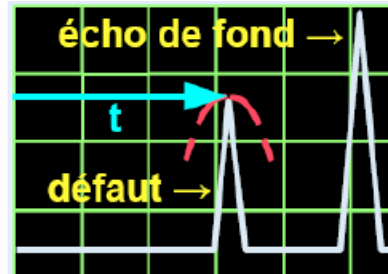
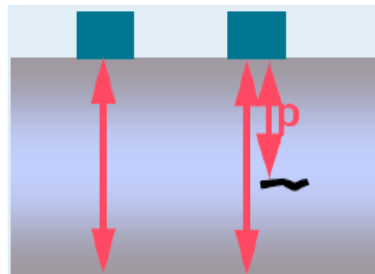
C'est la méthode la plus employée. On déplace le traducteur directement en contact avec la pièce, en assurant la transmission des ondes US par un couplant (huile, eau, etc.). Dans cette technique, on distingue 3 méthodes :

- Méthode par résonance (méthode peu utilisée et réservée à la mesure d'épaisseur)
- Méthode par réflexion,
- Méthode par transmission,



Détermination de la profondeur du défaut dans le cas d'un capteur droit à ondes longitudinales :

$$p = V_L \cdot t / 2$$

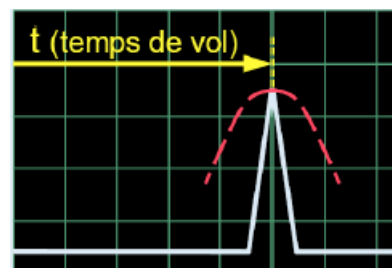
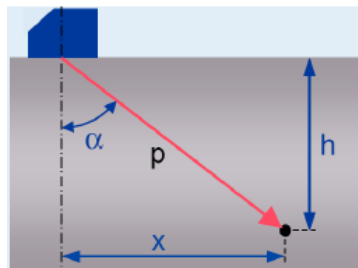


Détermination de la profondeur du défaut dans le cas d'un capteur d'angle :

$$p = V \cdot t / 2$$

$$\Rightarrow h = p \cdot \cos \alpha$$

$$\Rightarrow x = p \cdot \sin \alpha$$



Méthode par transmission :

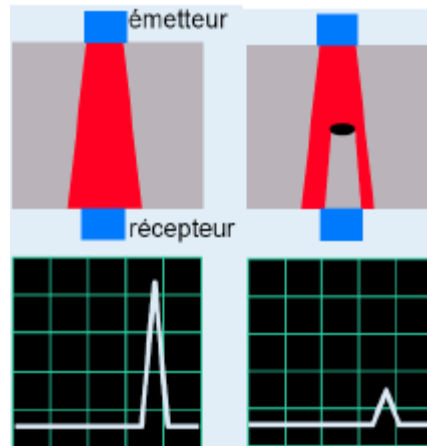
On utilise 2 palpeurs : un émetteur et un récepteur. La visualisation sur l'écran de l'amplitude de l'écho transmis permet d'avoir une indication quant à l'importance du défaut (% d'atténuation de l'écho d'émission), mais ne permet pas de positionner ce défaut dans la matière. De plus il faut avoir accès des deux côtés de la pièce.



Transmission :

La détection s'effectue par perte du signal. Il est à noter que dans ce cas, les 2 capteurs sont solidaires (E + R). Ce type de contrôle nécessite l'accès aux 2 faces de la pièce.

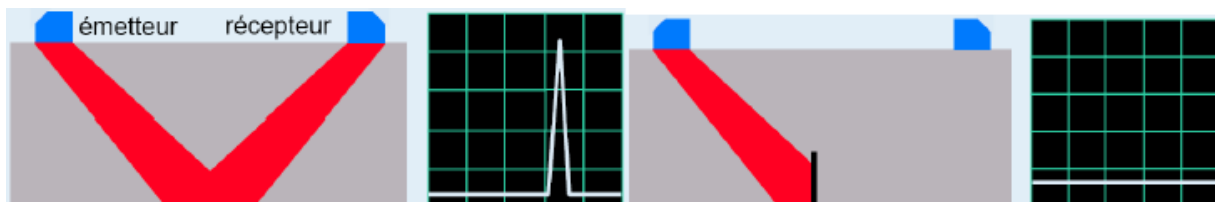
Ce type de méthode est insensible à l'orientation du défaut.



Pitch & Catch :

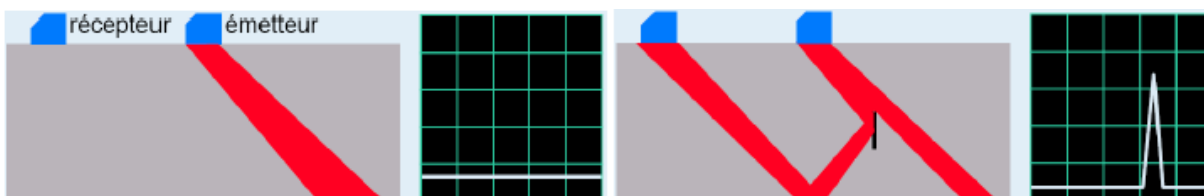
La détection s'effectue par perte du signal. Il est à noter que dans ce cas, les 2 capteurs sont solidaires (E + R).

Ce type de méthode est insensible à l'orientation du défaut.



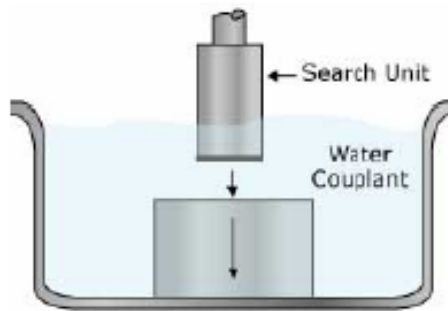
Tandem :

La détection s'effectue par apparition du signal. Il est à noter que dans ce cas, les 2 capteurs sont solidaires (E + R). Ce type de méthode est sensible à l'orientation du défaut.



IV.3 Le contrôle par immersion :

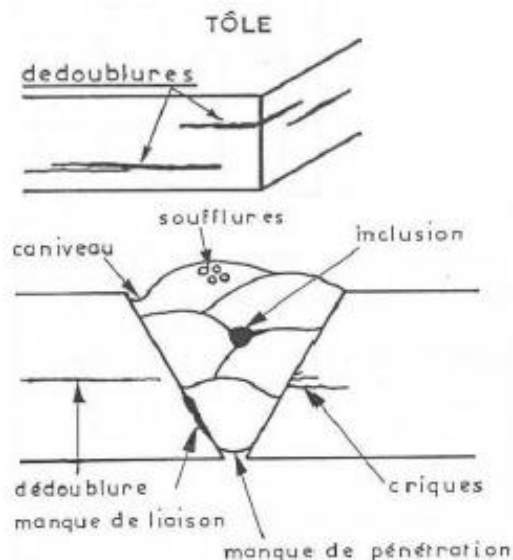
La pièce et le traducteur sont complètement immergés dans une cuve contenant un liquide de transmission. Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce. Le couplage est en général assuré par le liquide de transmission (généralement de l'eau). Ce système est réservé aux pièces de faibles dimensions et aux contrôles en série.



IV.4 Exemple de défauts recherchés par US :

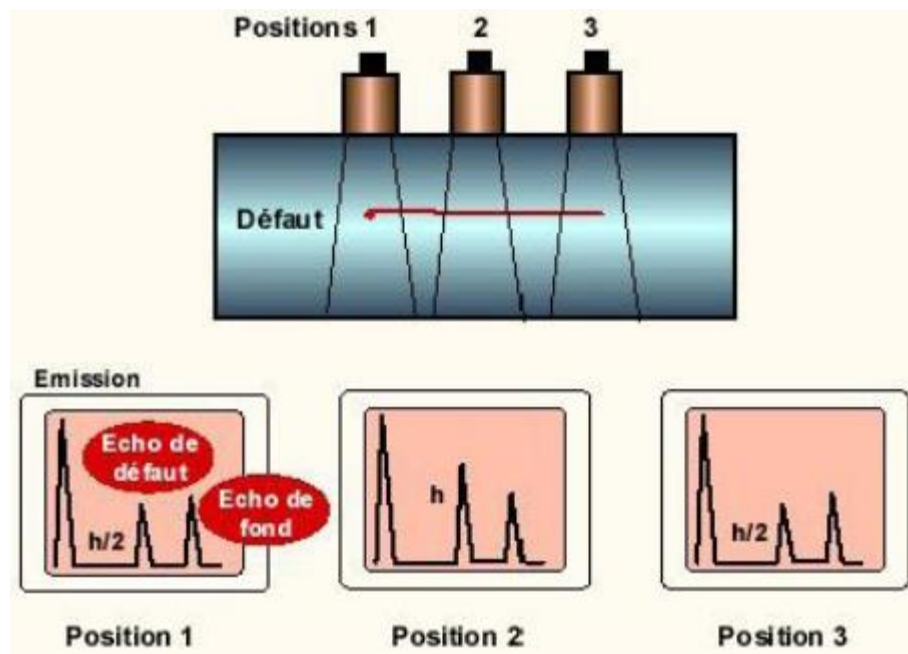
Lors de la fabrication des tôles, des défauts peuvent apparaître, ce sont généralement des dédoublements de tôles. Pour effectuer le contrôle, on utilise un traducteur droit avec pour objectifs de détecter les dédoublements de tôle et d'évaluer leurs dimensions.

Le soudage de deux tôles bout à bout entraîne l'apparition de nombreux défauts. La recherche de ces défauts permet d'assurer la fiabilité de la soudure (durée de vie et résistance). Il existe plusieurs méthodes de contrôle des soudures par US. C'est la destination de la pièce (donc les défauts non tolérables) qui imposera la méthode de contrôle.



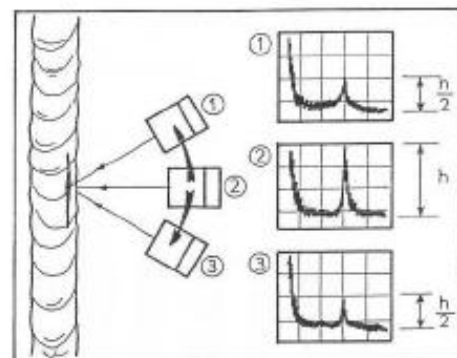
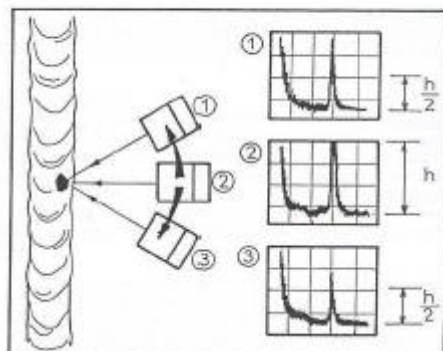
IV.5 Localisation d'un défaut :

- **Positionnement** : dès l'apparition d'un défaut, l'opérateur devra affiner la position de son palpeur pour obtenir un maximum de réflexion ; l'axe du faisceau coïncidant alors avec l'axe du réflecteur découvert. Il devra alors effectuer la lecture de la distance sur le cadran de l'écran, en mm de matière, et noter la position du palpeur sur la pièce.
- **Identification d'un défaut** : un défaut est détecté et localisé. Encore faut-il l'identifier car sa nature peut être extrêmement variable et son incidence sur la résistance de la pièce sera elle-même différente. Il s'agit là plus qu'ailleurs d'une question de métier et d'expérience. Les défauts peuvent être classés en deux familles : les défauts volumiques (inclusions, soufflures, etc.) et les défauts plans (collages, fissures, etc.)



IV.6 Détermination du type de défaut : Le défaut étant détecté et positionné, pour en déterminer sa nature, il suffira de faire effectuer au palpeur un déplacement, de part et d'autre de sa position de détection, en visant le défaut. Selon que l'écho reste à peu près constant ou au contraire, « disparaît », le défaut sera considéré comme volumique ou plan.

- **Défaut volumique :** l'écho reste à peu près constant (au moins supérieur à $h/2$).
- **Défaut plan :** l'écho disparaît (au moins inférieur à $h/2$).



V. AVANTAGES, INCONVENIENTS

V.1 Avantages

- Détection des défauts localisés dans le volume de la pièce
- Grande sensibilité, mais qui dépend de l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du signal acoustique
- Peut s'utiliser aussi bien sur des chantiers que dans un atelier
- Méthode qui se prête bien à l'automatisation

V.2 Inconvénients

- Nécessité d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le transducteur et la pièce afin d'assurer une continuité de la propagation
- Nécessité d'un personnel expérimenté et qualifié afin d'interpréter correctement la nature des défauts et leurs dimensions

- **Risque de masquage d'un défaut par un autre**
- **Coût élevé (personnel formé & équipement)**