



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

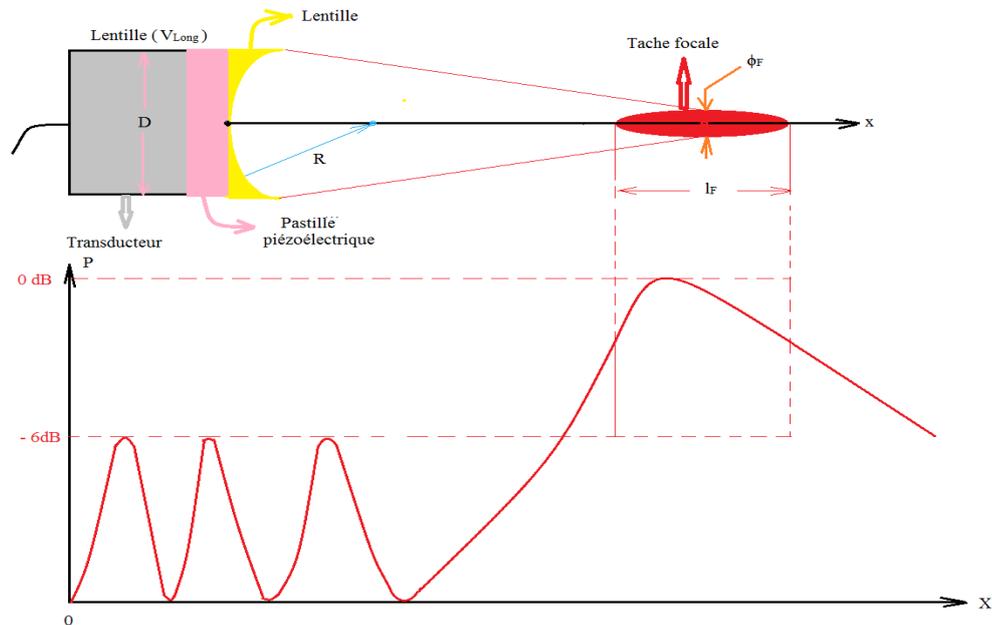
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

RESSUAGE, MAGNÉTOSCOPIE, RADIOGRAPHIE, COURANTS DE FOUCAULT ET ULTRASONS



ALI RAID

2017-2018

SOMMAIRE

I Méthodes d'essai non destructif (END)	3
I-1 Introduction.....	3
I-2 Le contrôle visuel.	3
I-3 Le contrôle par ressuage.....	4
I-4 Le contrôle par magnétoscopie.	5
I-5 Le contrôle par radiographie, RX et γ	6
I-5-1 Génération des RX.	6
I-5-2 Production des rayons γ	7
I-6 Le contrôle par courants de Foucault.....	8
II Contrôle Ultrasons	9
II-1 Introduction.	9
II-2 Fonctionnement d'un appareil à ultrasons.	10
II-2-1 Caractéristiques du bloc d'étalonnage de type B et V2.	11
II- 2-2 Ondes acoustiques.	12
II-2-4 Principe de la méthode.	13
II-2-4-1 Examen par transmission.	13
II-2-4-2 Examen par réflexion.	14
III Types d'ondes ultrasonores	15
III-1 Ondes longitudinales.	16
III-2 Ondes transversales.	17
III-3 Puissance et impédance acoustique.....	17
III-3-1 Milieux de couplage.	19
III-3-2 Vitesse de propagation des ondes longitudinales.	19
III-3-3 Ondes transversales ou de cisaillement.	21
III-4 Production des vibrations ultrasonores.	21
III-4-1 Piézo-électricité.....	21
III-4-2 Electrostriction.	23
III-4-3 Constantes piézoélectriques.	25
III-4-4 Éléments constitutifs d'un palpeur d'ondes longitudinales (Palpeur mono- élément).	26
III-5 Propagation des ondes ultrasonores.	27

III-6 Puissance ultrasonore : cas d'ondes entretenues.	28
III-7 Focalisation des faisceaux.	30
IV Phénomènes d'interfaces : dioptré.	32
IV-1 Cas d'onde dont la vitesse de propagation est perpendiculaire à l'interface de séparation de deux milieux.	32
IV-2 Cas d'une onde dont la direction de propagation fait un angle $\alpha \neq 0$ par rapport à la normale à l'interface (incidence oblique).	36
Exercices.....	38
Bibliographie.	41

I- Méthodes d'essai non destructif (END) : méthodes d'examen et de contrôle.

I-1 Introduction.

L'objectif des méthodes d'examen et de contrôle est de faire la distinction entre les méthodes d'essais destructifs et non destructifs et de décrire différentes méthodes d'essais non destructifs pour identifier les défauts.

Les méthodes d'examens non destructifs incluent les méthodes d'examen ainsi que les méthodes de contrôle. Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier la qualité du matériau (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager, soit au cours de la production, soit au cours de la maintenance.

Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est trop importante sont appelés défauts inacceptables. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé.

Les méthodes utilisées pour les essais non destructifs (END) sont :

- Le contrôle visuel.
- Le contrôle par ressuage
- Le contrôle par magnétoscopie
- Le contrôle par radiographie : rayons X (RX) et gammagraphie (γ)
- Le contrôle par courant de Foucault
- Le contrôle par ultrasons (US)
- La détection par spectromètre de masse
- Les essais d'étanchéité à l'air ou au gaz
- La tomographie et neutrographie

Certains classent la thermographie et l'holographie parmi les techniques CND.

Dans ce qui suit on traitera les premiers contrôles et on insistera sur le contrôle ultrasons.

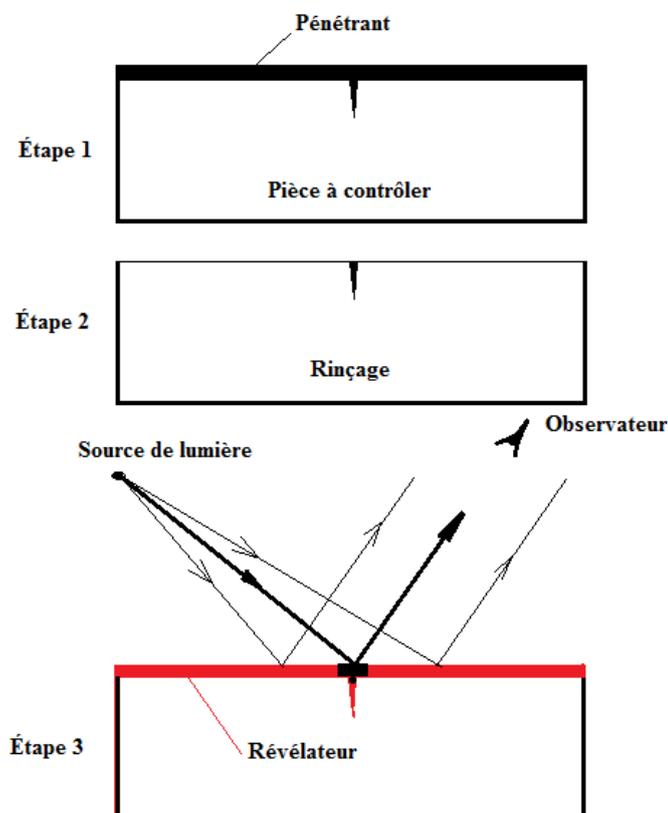
I-2 Le contrôle visuel.

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. Il est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Il implique l'utilisation de gabarits et de calibres. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées.

I-3 Le contrôle par ressuage.

La technique est très ancienne et réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. C'est une méthode globale qui autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce. Elle permet de bien apprécier la longueur des défauts indépendamment de leur orientation. On peut mettre en évidence des discontinuités débouchantes de quelques dizaines de micromètres. Le contrôle par ressuage comporte trois étapes. La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et d'appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable selon le type de pénétrant, mais se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler. Le pénétrant peut être un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent (sensibilité élevée). Le pénétrant appliqué s'infiltre dans les petits interstices débouchant en surface, un certain temps est nécessaire pour laisser « poser » le pénétrant. La deuxième étape consiste à rincer la surface de la pièce pour enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate parce qu'un rinçage excessif ou insuffisant permet de fausser le résultat final.

Dans la troisième étape on applique un révélateur, liquide ou sous forme de poudre, sur la surface rincée, puis séchée. Le liquide (pénétrant) qui s'est introduit dans les fissures « ressort » à la surface dans le révélateur et s'élargit au niveau du défaut. Il devient nettement visible par un éclairage approprié qui dépend du pénétrant utilisé. La méthode ne donne aucune indication sur le volume et donc de l'importance des défauts.

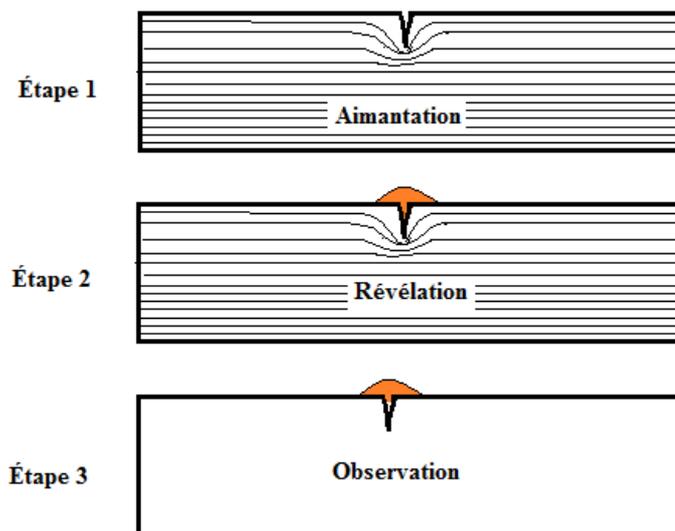


Contrôle par ressuage

I-4 Le contrôle par magnétoscopie.

C'est une méthode applicable seulement aux matériaux magnétiques pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l'instar du ressuage, la magnétoscopie complète l'examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant (les imperfections de surface restent peu visibles malgré tout le soin apporté). La pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique. En l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air). Toute discontinuité du matériau provoquera une diminution de la section de passage et donc une augmentation du champ d'induction magnétique (conservation du flux). Cette augmentation provoquera une fuite magnétique à la surface de la pièce. Des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accumulent au droit du défaut. On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté.

L'avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. On peut apprécier la longueur des défauts de surface et ceux légèrement sous-jacents ; il est possible d'automatiser le contrôle. Dans la pratique, on procède à l'aimantation des pièces suivant deux techniques principales : magnétisation par courant d'injection et par électro-aimant mobile. Les particules du produit révélateur doivent être suffisamment fines et légères pour circuler dans toute la pièce. Ainsi elles sont facilement attirées par les fuites magnétiques. Des poudres à base de produits fluorescents sont utilisées pour améliorer le contraste. Après examen le magnétisme résiduel peut causer des problèmes ultérieurs (soudage, usinage) ; il est recommandé de procéder à la démagnétisation de la pièce en la soumettant à un champ magnétique dont on diminue progressivement l'intensité et inversant à chaque fois son sens.



Les étapes du contrôle de magnétoscopie

I-5 Le contrôle par radiographie, RX et γ .

La radiographie industrielle permet l'examen interne des défauts d'un objet en lui faisant traverser un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayons X et γ) et recueillir les variations d'intensité du faisceau sous forme d'image, pour la plus part, sur un film. La quasi-totalité des matériaux peuvent être examinés en radiographie et les épaisseurs peuvent être importantes.

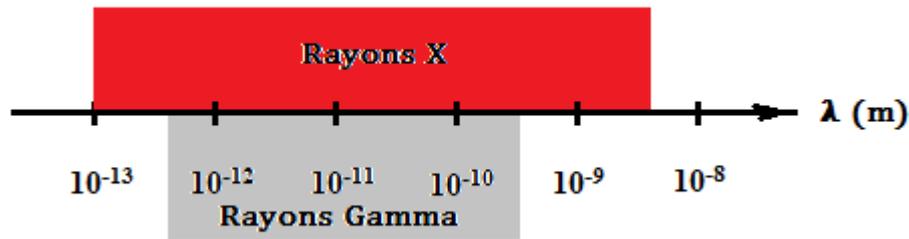
I-5-1 Génération des RX.

Les rayons X, mis en évidence Röntgen en 1895, sont créés en envoyant des électrons accélérés sur une cible en tungstène. On définit la longueur d'onde limite λ_L et la longueur d'onde maximale λ_m des rayons X qui sont reliés à la tension d'accélération des électrons V par les relations :

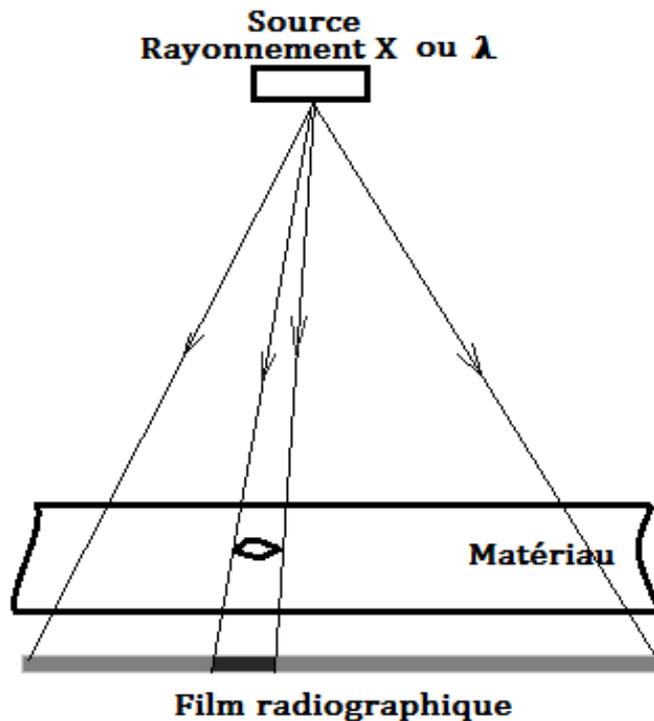
$$\lambda_L (nm) = \frac{1.24}{V (kV)} \quad ; \quad \lambda_m \approx 1.5 \lambda_L$$

Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre 10^{-7} m et 10^{-12} m ; seuls les rayons X de longueur d'onde inférieure à $2.5 \cdot 10^{-10}$ m ont un pouvoir pénétrant suffisant pour être utilisés industriellement. Les rayons X sont absorbés par la matière, l'intensité du rayonnement subit un affaiblissement en fonction de l'épaisseur. En pratique, on considère la qualité d'un rayonnement X en fonction de la tension appliquée et de l'épaisseur de demi-absorption du matériau.

Épaisseur de demi-absorption (mm)				
Matériau	Aluminium	Fer	Cuivre	Plomb
Masse volumique ρ (g/cm ³)	2.7	7.86	8.9	11.34
Énergie du rayonnement				
20 keV	0.8	0.037	0.025	0.007
100 keV	15.1	2.5	1.8	0.15
200 keV	21.7	6.4	5.3	0.6
1 MeV	42	14.7	12.7	10
2 MeV	60	20.6	18	14



Longueurs d'ondes des RX et γ



Impression de l'image du défaut sur le film radiographique

I-5-2 Production des rayons γ .

Les rayonnements λ (gamma) sont créés par la désintégration spontanée des éléments radioactifs tel l'iridium 192 de période de 74 jours (ces éléments peuvent être naturels comme le radium 226 ou l'uranium 235). En pratique, la radiographie fait appel aux radioéléments artificiels mieux adaptés et peu coûteux. Les radio-isotopes sont obtenus par irradiation neutronique comme le cobalt 60 produisant un spectre de raies d'émission λ caractérisé par deux niveaux d'énergie proches respectivement de 1.17 et 1.33 MeV. L'émission décroît de façon exponentielle dans le temps. On définit la période du radioélément (sa durée de vie) comme le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux atomiques actifs. Un facteur important est l'activité de la source radioactive, correspond au nombre d'atomes se transformant par unité de temps. Elle s'exprime en Becquerels (Bq), c'est le nombre de désintégrations par seconde et plus couramment en curies (Ci) sachant que :

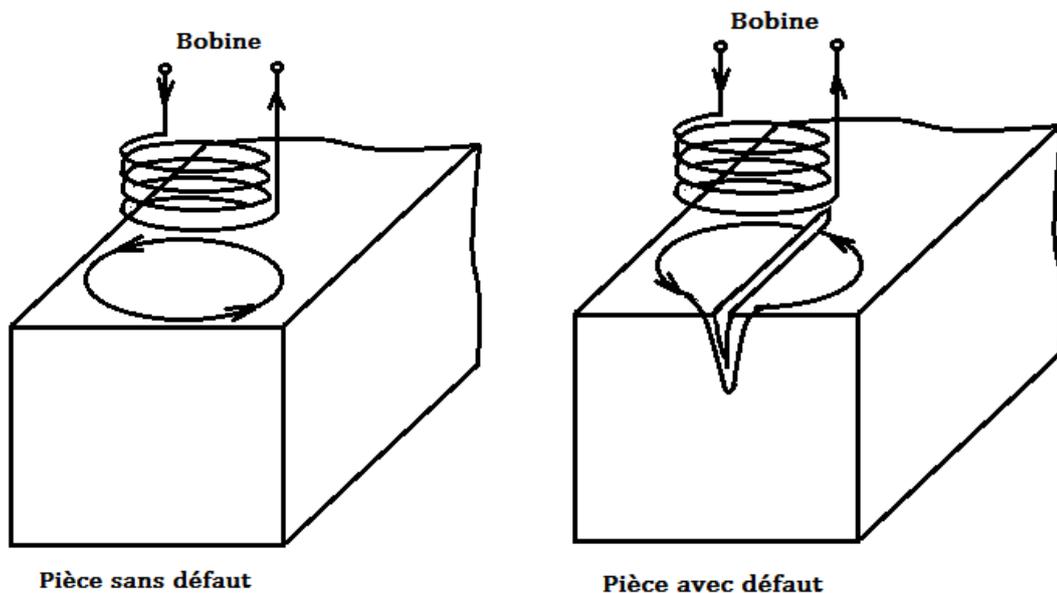
$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

En gammagraphie, il n'est pas utile de disposer d'une alimentation en eau et en électricité. La source peut se positionner dans des tubes de petits diamètre et rayonne dans toutes les directions ; ce qui permet une radiographie panoramique d'une cuve. L'utilisation des rayonnements ionisants exige des locaux spéciaux et doivent être transportés conformément au règlement de transport visant les marchandises dangereuses et les matières radioactives.

Radioéléments utilisés en gammagraphie			
Éléments	Isotope	Période	Énergie (MeV)
Cobalt	^{60}Co	5.3 ans	1.17 à 1.33
Iridium	^{192}Ir	74 jours	0.137 à 0.615
Césium	^{137}Cs	30 ans	0.66

I-6 Le contrôle par courants de Foucault.

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent à l'intérieur du matériau en circuit fermé. Une bobine parcourue par un courant alternatif, génère des courants induits qui créent eux-mêmes un flux magnétique. Ce flux magnétique, en s'opposant au flux générateur, modifie l'impédance de la bobine. La présence d'un défaut perturbe la circulation et la répartition des courants de Foucault. La variation de l'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation est utilisée pour détecter des défauts superficiels. En général, On utilise une méthode comparative qui consiste à mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine sur la pièce à étudier et l'impédance Z_0 d'une pièce de référence ne comportant pas de défaut. Cette procédure a donc recours à un étalonnage préalable. C'est ainsi que les courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours de la maintenance en aéronautique des trous à l'emplacement des rivets.



Modification du trajet des courants de Foucault

L'intensité des courants de Foucault I est maximale à la surface de la pièce et diminue suivant une loi exponentielle. Dans le cas d'un solide massif à surface plane, elle s'écrit :

$$I = I_0 \exp - \delta \sqrt{\pi f \sigma \mu}$$

La profondeur standard de pénétration δ_c (m) pour laquelle l'intensité est diminuée de 0.37 ($\approx 1/e$), c'est-à-dire :

$$I = I_0 \exp - 1 = 0.37 I_0$$

Ainsi δ_c vaut :

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

f : fréquence en Hz ; δ_c : profondeur en mètre ; σ : conductivité électrique en $\Omega.m^{-1}$ et μ : perméabilité magnétique $H.m^{-1}$.

Dans le cas des matériaux amagnétiques tels que les alliages légers, alliages cuivreux, zinc), on a :

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} H.m^{-1}$ et la profondeur standard s'écrit :

$$\delta_c = \frac{1503}{\sqrt{f \sigma}}$$

II Contrôle Ultrasons.

II-1 Introduction.

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle US consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau.

La vibration est transmise et reçue par un même capteur appelé traducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans tout le matériau et est réfléchiée par tout obstacle se trouvant sur son parcours. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique : il est directif et limité dans l'espace. Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau.

Le contrôle de toute la pièce oblige l'opérateur à déplacer le traducteur qui est un dispositif électronique appelé aussi transducteur sur toute la surface de la pièce à contrôler.

Pour effectuer un examen ultrasonore d'une pièce mécanique l'opérateur doit fournir un certain nombre de choix :

- Matériels utilisés (appareil, traducteur, bloc de référence ...)
- L'exploration (balayage du traducteur)
- Sensibilité du contrôle
- Critères d'acceptation

Le matériel utilisé en contrôle par ultrason est léger et portable. Le contrôle par ultrasons peut être facilement mis en œuvre sur le site de production.

- ✓ Les avantages du contrôle par ultrasons sont :
 - Il est rapide
 - Les résultats sont immédiats.
 - Il est utilisable sur la plus part des matériaux.
 - Il n'est pas nécessaire d'avoir accès aux deux cotés de la pièce.
- ✓ Les inconvénients du contrôle par ultrasons sont :
 - Un produit de couplage est exigé.
 - Les défauts parallèles aux ondes ultrasonores sont difficiles à déceler.
 - L'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise.
 - Le matériel doit être étalonné de façon régulière pour chaque épaisseur et chaque type de matériau.

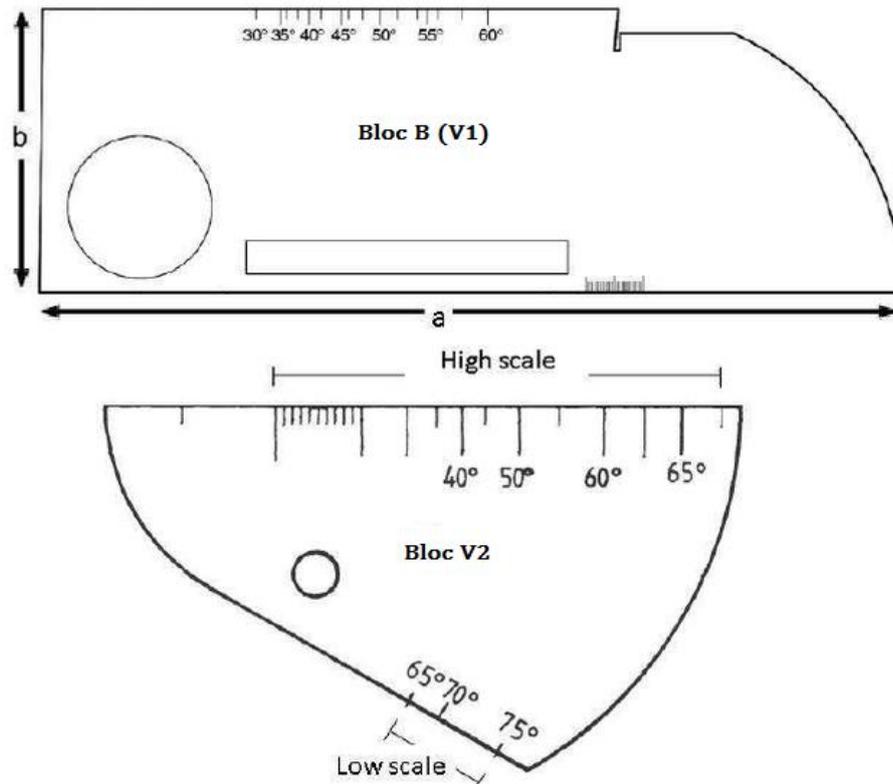
II-2 Fonctionnement d'un appareil à ultrasons.

Un générateur envoie des impulsions avec une fréquence de répétition de quelques centaines de hertz grâce à une horloge qui excite un palpeur piézoélectrique sous des tensions de plusieurs centaines de volts. La réception, signal provoqué par l'écho, est très faible (quelques millivolts) ; elle s'effectue entre deux impulsions. Le signal de l'écho de retour est visualisé sur un écran par un système d'amplification performant (gain de 100 dB) à large bande pour diminuer le bruit. L'horloge commande une base de temps synchronisée par l'émetteur. Au niveau du palpeur, le signal est instantanément transformé en une onde ultrasonore. Lorsque le faisceau ultrasonore rencontre la face opposée de la pièce, il y a réflexion si un défaut se trouve sur le parcours du faisceau ultrasonore. Une partie des ultrasons est immédiatement réfléchi vers le palpeur, avant que la partie complémentaire n'ait atteint le fond de la pièce. Sur l'écran, on observe un écho intermédiaire qui révèle sa position et dont l'amplitude est fonction de la dimension et de l'orientation du défaut.

Le contrôle par ultrasons utilise généralement les blocs d'étalonnage V1 et V2. Les normes NF A 09-310 et NF A 09-315 ont respectivement pour objet de définir les caractéristiques et de décrire les méthodes d'utilisation des blocs d'étalonnage A et B.

II-2-1 Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2.

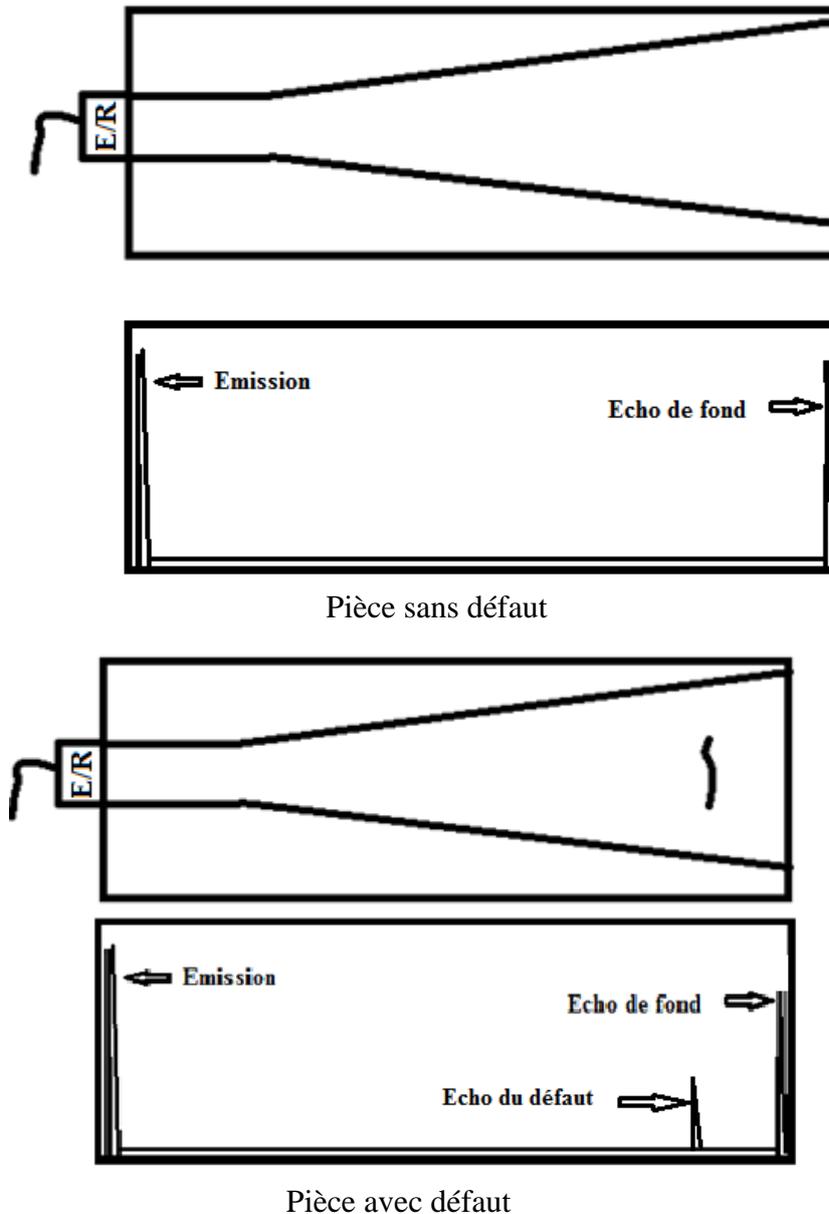
C'est un acier non allié dont la teneur en carbone est inférieure à 0.15%. L'indice de grosseur du grain ferritique G doit être supérieur ou égal à 8 et les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement de 5920 et 3255 m.s⁻¹. L'écrouissage après usinage doit être minimale et la rugosité Ra inférieure à 3.2 μ m. Le bloc d'étalonnage V1 est le plus complet. Il existe un modèle réduit et léger appelé V2 pour les applications sur chantier.



Dimensions des blocs de référence V1 et V2 (en mm)		
Épaisseur	25	12.5
Rayon de courbure	100	50
Largeur b	100	
Longueur a	300	

Avant tout contrôle d'une pièce, il est nécessaire d'étalonner la base de temps du générateur à ultrasons et les caractéristiques du palpeur. Les blocs d'étalonnage sont utilisés pour déterminer le point d'émergence du traducteur, l'angle de réfraction. Le réglage est plus précis lorsque le matériau à contrôler ne diffère pas de celui du bloc (acier ferritique faiblement allié).

Visualisation des échos réfléchis par les discontinuités dans le matériau :



Toute réflexion supplémentaire indique la présence d'un défaut.

II- 2-2 Ondes acoustiques.

Les ondes acoustiques sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux gazeux, liquides ou solides (pas de propagation dans le vide). Ces ondes résultent d'un ébranlement mécanique engendré par une source de vibration qui le communique au milieu considéré. Les ondes ultrasonores se déplacent difficilement dans l'air, un très bon contact doit être réalisé entre le transducteur et la surface de la pièce. On emploie un produit de couplage comme l'eau, l'huile ou de la glycérine.

La déformation qui accompagne ce mouvement est de nature élastique et les particules constituant le corps entrent en vibration autour de leur position d'équilibre. Les ondes ultrasonores constituent la partie supérieure du spectre des ondes acoustiques à partir du seuil d'audibilité (15 à 25 kHz) pour l'espèce humaine. Dans la pratique du contrôle des matériaux métalliques, les domaines de fréquences sont compris entre 1 et 15 MHz. Le plus petit défaut décelable est de l'ordre de la demi-longueur d'onde ; un hertz représente un cycle par seconde.

Problématique :

- Produire des vibrations.
- Mise en mouvement des particules dans le matériau.
- Propagation.
- Détection.

II-2-4 Principe de la méthode.

Il consiste à balayer une pièce par un faisceau pour déceler les défauts de discontinuité géométrique

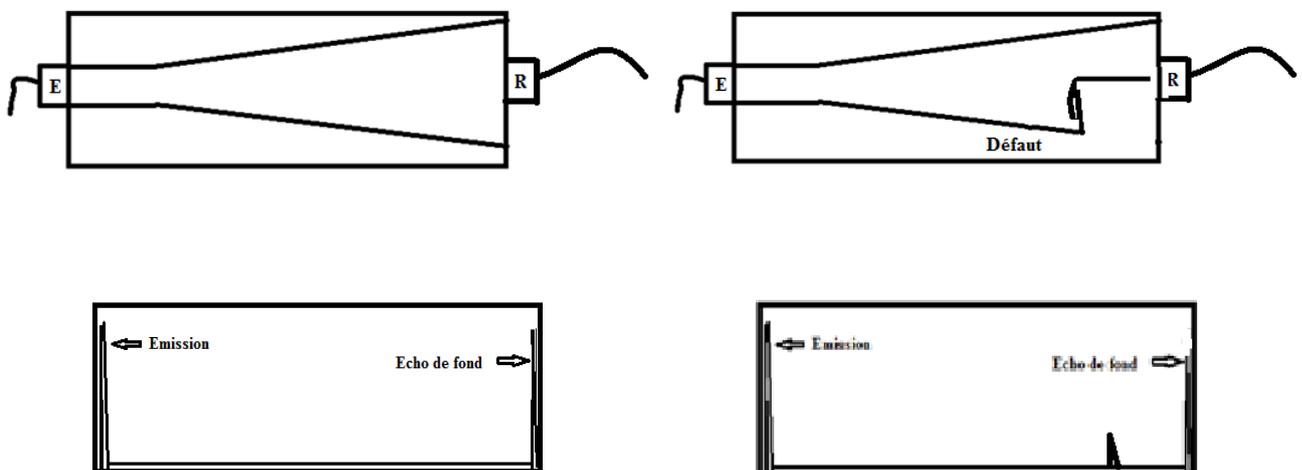
Il existe deux types de procédures d'analyse :

- Méthode par transmission
- Méthode par réflexion

II-2-4-1 Examen par transmission.

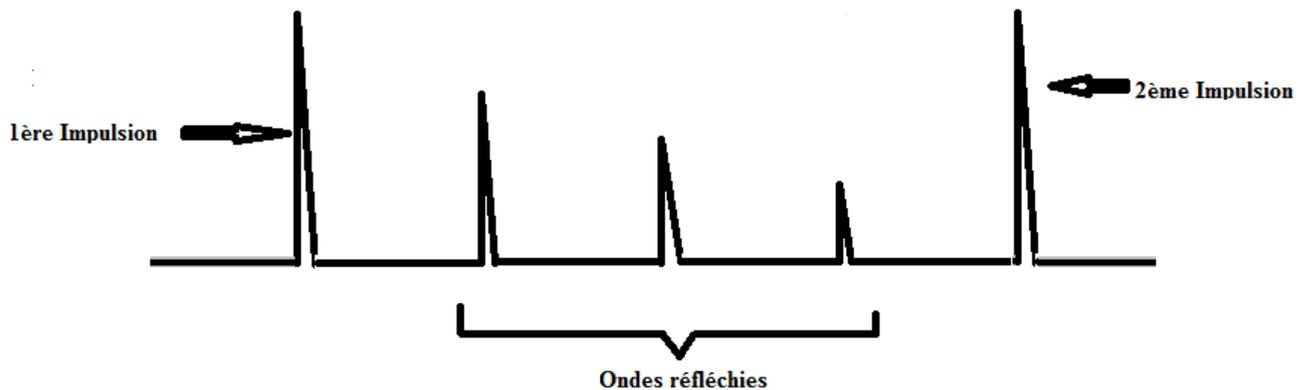
Il nécessite l'utilisation de deux palpeurs : l'un émetteur et l'autre récepteur qui reçoit la quasi-totalité de l'énergie acoustique émise.

Si un défaut se trouve dans le parcours du faisceau ultrasonore, l'énergie est partiellement ou totalement occultée.

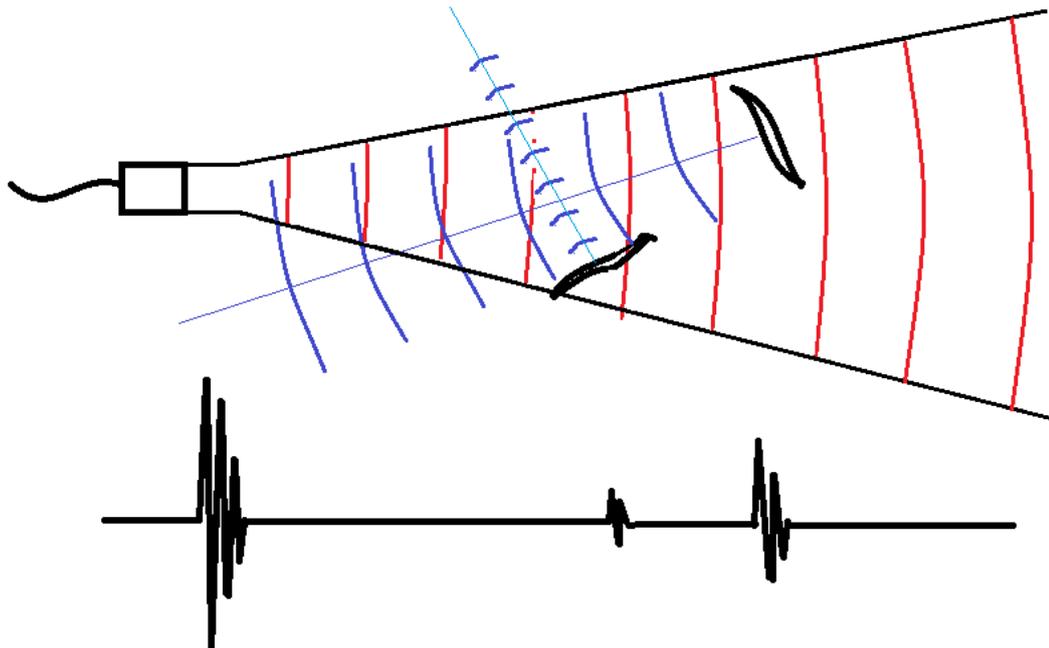


II-2-4-2 Examen par réflexion.

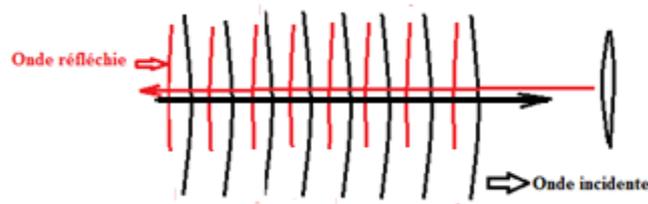
- La méthode est très utilisée, un seul palpeur joue le rôle d'émetteur et de récepteur. Les ondes ultrasonores sont émises de façon discontinue (impulsions brèves) pendant de très courtes périodes de temps comprises entre un et trois millièmes de seconde (microsecondes). Entre deux impulsions le palpeur reçoit les ondes réfléchies qui sont discriminées de l'émission dans le temps.



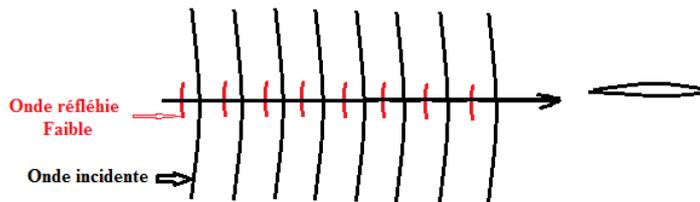
- Lorsque l'émission est modulée par impulsions, les signaux réfléchis par différents obstacles peuvent être séparés.



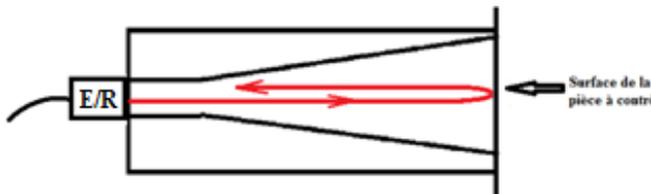
- La méthode permet de détecter un défaut à condition qu'il présente une surface réfléchissante normale au faisceau ultrasonore (réflexion spéculaire), sinon l'onde réfléchie revient au palpeur mais faiblement (l'écho n'est pas observé). L'étalonnage correct de la base de temps de l'écran de l'oscilloscope de l'appareil à ultrasons permet de déterminer la position du défaut.



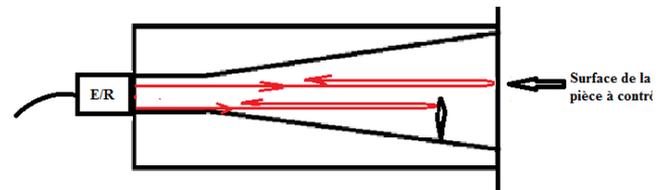
Réflexion spéculaire



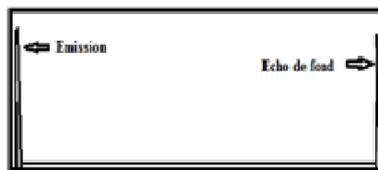
Défaut parallèle à l'onde incidente



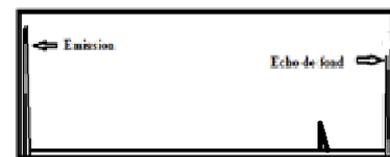
Pièce sans défaut



Pièce avec défaut



Visualisation de la pièce sans défaut



Visualisation de la pièce avec défaut

III Types d'ondes ultrasonores.

Une déformation peut se propager dans un milieu élastique. Chaque particule du milieu dans un groupe d'atome, transmet son mouvement à la particule suivante. En quittant sa position initiale, la particule est rappelée par une force contraire de rappel et le mouvement est de type oscillant.

Si l'excitation est entretenue, le mouvement ondulatoire se prolonge sinon il diminue à cause des frottements internes. On fait appel à l'équation fondamentale de la mécanique si la source de vibration est un oscillateur mécanique.

$$\sum \vec{F} - m\vec{\gamma} = 0$$

À tout écart de la position stable, il se développe une force opposée au mouvement de la forme :

$$F(x) = -kx + \alpha x^2 + \beta x^3 + \dots$$

Pour les petits mouvements (premier ordre) : $F(x) = -kx$

m et k : masse et constante élastique.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0$$

La solution est de la forme :

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

A et φ : amplitude maximale et déphasage sont déterminés par les conditions initiales.

$x(t)$: élongation, comprise entre $-A$ et $+A$.

C'est une fonction périodique de pulsation ω .

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} ; \quad T = \frac{2\pi}{\omega} ; \quad f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} ; \quad \lambda = v_{Long} \cdot T$$

T : Période (secondes).

f : fréquence en Hertz (s^{-1}) ; $f > 20 \text{ kHz}$

v_{Long} : vitesse longitudinale ultrasonore.

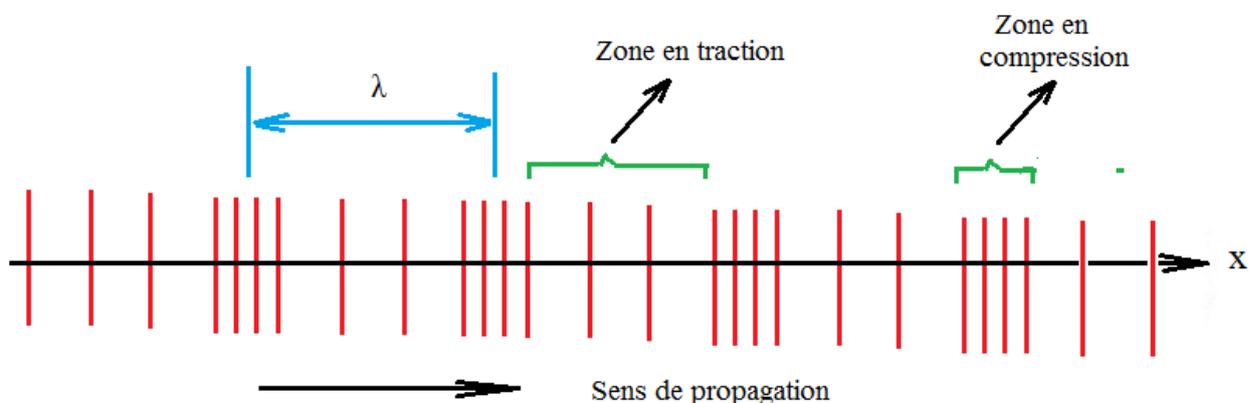
Pour les vibrations ultrasonores, les fréquences sont comprises entre 1 et 15 MHz (applications concernant le contrôle non destructif industriel).

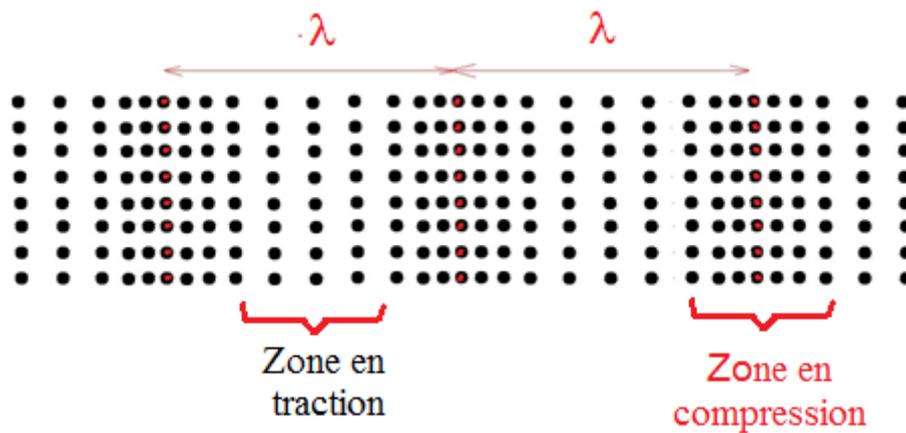
Dans les solides (milieu isotrope) il existe deux modes de déplacements des déformations avec des vitesses bien définies :

- Déplacement sans cisaillement : onde longitudinale ou de compression.
- Déplacement sans dilatation : onde transversale ou de cisaillement.

III-1 Ondes longitudinales.

Le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation (le déplacement s'accompagne d'une variation de pression).

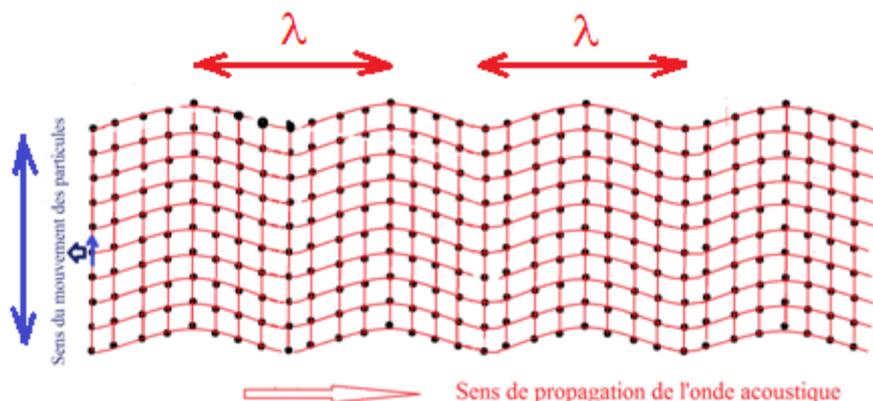




Les ondes longitudinales existent pour tous les états physiques (solide ; liquide et gazeux).

III-2 Ondes transversales.

La propagation des ondes transversales fait intervenir des contraintes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides et les liquides visqueux. D'ailleurs la propagation des ultrasons est très atténuée dans les gaz.



Onde transversale.

III-3 Puissance et impédance acoustique.

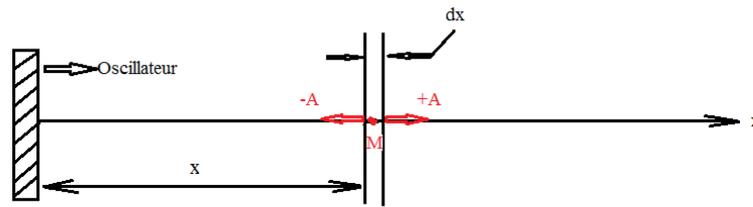
Soit un oscillateur de pulsation « ω », l'onde est sinusoïdale et son amplitude est « a » :

$$a(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

Si l'oscillateur est en contact (par l'une des faces) avec un liquide de masse spécifique « ρ » et « v » la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le milieu, le mouvement de la face de l'oscillateur est :

$$a(t) = A \cos \omega t$$

Le mouvement de la tranche dx à la distance x est : $a(x, t) = A \cos(\omega t + \frac{v}{t})$

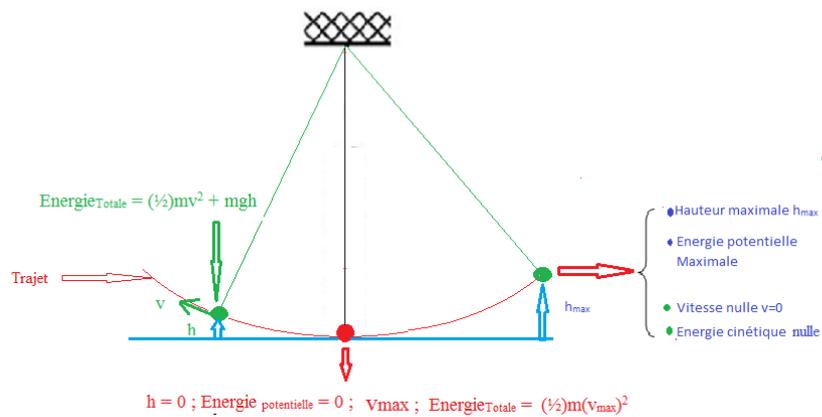


La vitesse de la tranche liquide dx s'écrit : $\frac{da}{dt} = -A\omega \left\{ \sin\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right\}$

La masse de la tranche dx , de section unitaire est : $\rho \cdot dx$

Quand la tranche passe par sa position d'équilibre :

$$E_{Totale} = E_{Cinétique} ; [E_{Potentielle} = 0]$$



$$E_{Cinétique} = \rho dx (A\omega)^2$$

L'intégration dans le cylindre de longueur « v » donne la puissance rayonnée :

$$P = \frac{1}{2} \rho V (A\omega)^2$$

$$P = \frac{1}{2} \underbrace{\rho \cdot V}_Z \underbrace{(A\omega)^2}_{\text{Termes électriques}}$$

Le liquide n'intervient que par la quantité appelée impédance acoustique : $Z = \rho V$

La puissance rayonnée dépend:

- des caractéristiques du milieu.
- des caractéristiques de l'oscillateur, de l'amplitude de l'excitation et de la fréquence.

a) ρ est faible pour les gaz et la puissance est très faiblement transmise au matériau.

L'oscillateur doit être couplé à un solide par l'intermédiaire d'un liquide pour augmenter la puissance ultrasonore.

- b) À la même abscisse x , tous les points sont dans un même état vibratoire. Ils sont dits en phase et constituent une surface d'onde qui est plane.
- c) Deux points dont la différence d'abscisse est λ sont dans le même état vibratoire.

En réalité l'onde ultrasonore utilisée en contrôle est sous forme d'impulsion.

III-3-1 Milieux de couplage.

- Pour une meilleure transmission de la puissance acoustique du transducteur dans le matériau à contrôler, les milieux de couplage doivent être mouillants, d'une densité élevée et non nocif pour le matériau étudié. Les milieux de couplage classiques sont l'eau, l'huile, la graisse et la glycérine. Le choix du milieu dépend de la rugosité de la pièce et de la position de la surface à contrôler.

Rugosité de la surface (μm)	Nature du milieu de couplage
0.1 – 2.5	SAE 10 huile moteur
1 – 5	SAE 20 huile moteur
2 – 15	Glycérine
2.5 – 20	SAE 30 huile moteur
6 – 7	SAE 40 huile moteur
17	Graisses

III-3-2 Vitesse de propagation des ondes longitudinales.

Selon les lois de l'élasticité, un ébranlement se propage dans un milieu homogène sous forme d'onde longitudinale qui obéit à l'équation de propagation :

$$(\delta + 2\mu) \frac{\delta^2 u}{dx^2} = \rho \frac{\delta^2 u}{dt^2}$$

x : direction de propagation ; ρ : masse volumique ; δ et μ : constantes élastiques de LAME ; u : amplitude de l'onde.

On peut utiliser le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν :

$$\nu = \frac{\delta}{2} (\delta + \mu) \quad ; \quad E = 2\mu (1 + \nu)$$

La vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans un solide s'écrit :

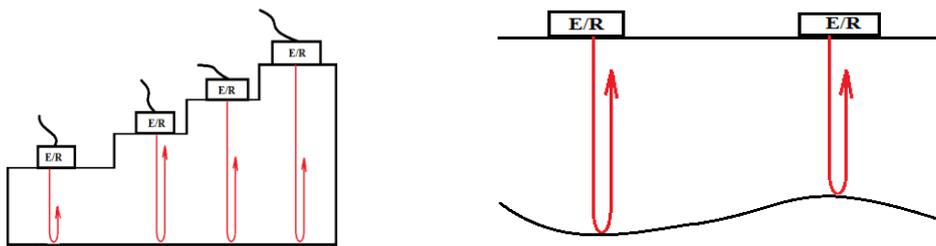
$$V_{Long} = \sqrt{\frac{\delta + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

Tableau : Vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales

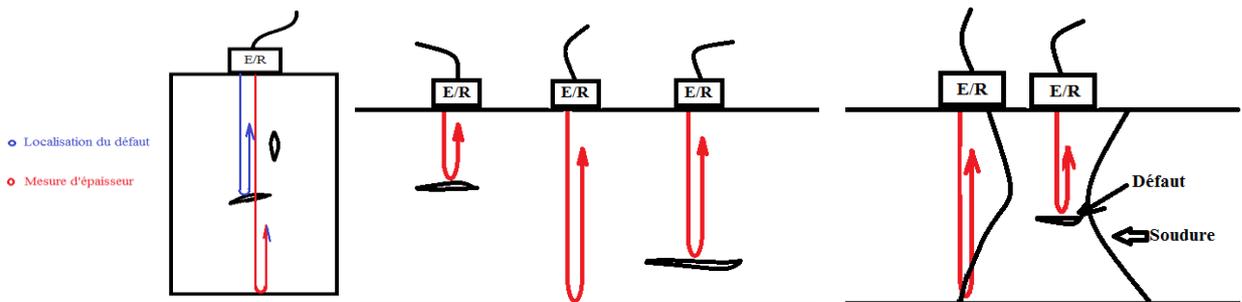
Matériau	Masse volumique (g/cm ³)	Vitesse longitudinale (m/s)	Vitesse transversale (m/s)
Acier	7,8	5900	3230
Aluminium	2,7	6320	3080
Cuivre	8,9	4700	2260
Eau (20°C)	1,0	1483	—
Fonte grise	7,2	4600	2160
Plexiglas	1,2	2730	1430

Comme la direction de propagation est perpendiculaire à la surface d'examen, les ondes longitudinales permettent de détecter des anomalies dont la surface de contact est parallèle à celle du palpeur, d'où :

- Mesure d'épaisseur.
- Recherche d'inclusions ou de manque de matière.



Mesure d'épaisseur



Mesure d'épaisseur et localisation de de défaut

Localisation de défaut dans la soudure

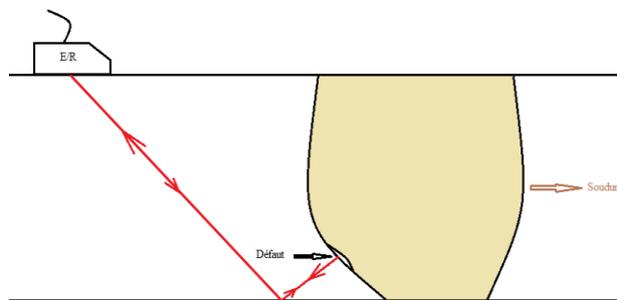
III-3-3 Ondes transversales ou de cisaillement.

Le mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation.
La vitesse de propagation de l'onde transversale s'écrit :

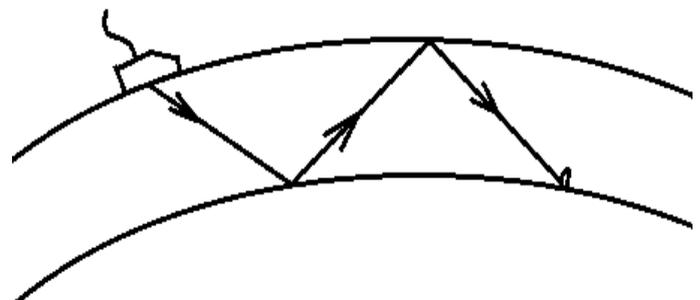
$$V_{Trans} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

Domaines d'applications : très utilisées dans les contrôles industriels.

- Examen des assemblages soudés
- Examen des pièces forgées
- Corrosion interne dans les canalisations (avec les ondes longitudinales).



Contrôle de soudure.



Fissure interne d'un tube.

III-4 Production des vibrations ultrasonores.

Les vibrations ultrasonores sont générées par des dispositifs appelés transducteurs. Ils convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique.

On exploite deux phénomènes :

- Piézo-électricité
- Ferroélectricité

- Les phénomènes sont réversibles, le même transducteur peut également recevoir l'énergie mécanique et la transformer en énergie électrique. Ces propriétés sont appliquées en contrôle par transmission mais surtout en contrôle par réflexion.

III-4-1 Piézo-électricité.

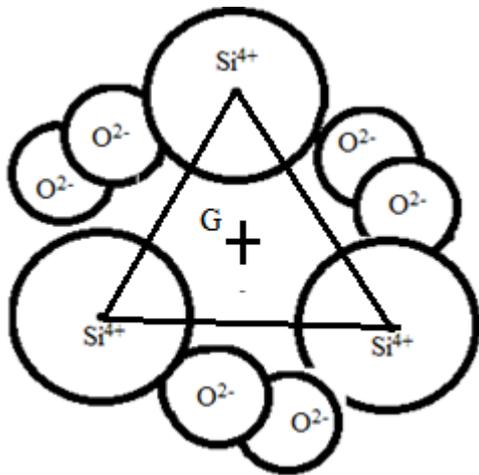
Phénomène découvert en 1880 (Pierre et Marie Curie) par l'étude d'une lame mince en quartz (taillée selon une direction particulière). L'application d'une force sur une face bien déterminée conduit à une contraction suivant l'épaisseur qui s'accompagne par l'apparition de charges électriques de signes opposées sur chacune des faces.

Réciproquement si on applique à la lame une tension alternative elle est le siège de déformations périodiques. Cet effet est très faible, l'application d'une tension de **500 V** provoque une contraction

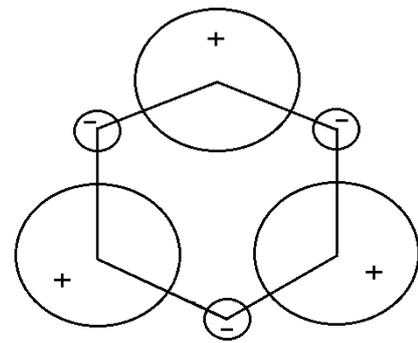
de $10^{-4} \mu\text{m}$. Ce phénomène est exploité pour la production des vibrations ultrasonores. La manifestation piézoélectrique se situe au niveau moléculaire (structure du cristal de quartz).

Le cristal de quartz SiO_2 est composé d'ions positifs Si^{4+} et d'ions négatifs O^{2-} .

Les trois ions Si^{4+} ; O^{2-} et O^{2-} possèdent un centre de symétrie.



Molécules SiO_2

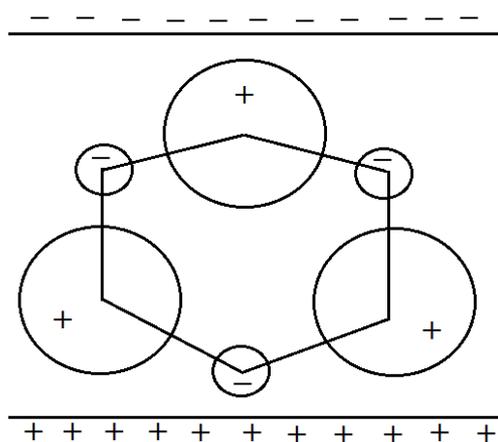


Représentation schématique des molécules SiO_2

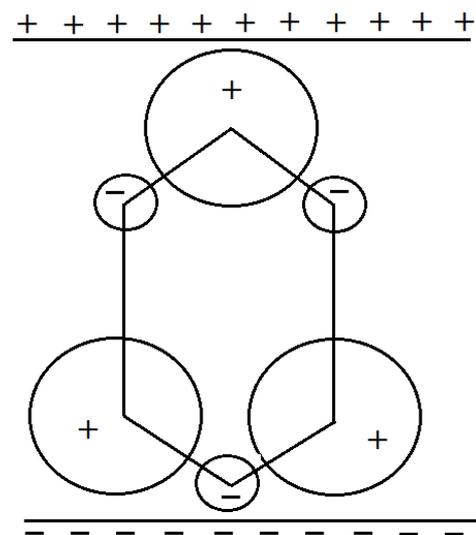
La distribution des charges positives et négatives font que les molécules SiO_2 soient globalement neutres.

Des contraintes exercées sur les faces déplacent les ions modifiant ainsi la distribution des charges positives et négatives. Cette redistribution des charges fait apparaître des charges électriques de signes contraires sur les faces.

Tableau : Polarisation d'une lame de quartz sous l'effet d'une déformation (compression ; traction).



Molécule SiO_2 en compression



Molécule SiO_2 en traction

Une lame de quartz soumise à des sollicitations mécaniques sera polarisée électriquement. Inversement si une lame de quartz placée dans un champ électrique ou soumise à une différence de potentielle (ddp); les charges électriques sur chacune des faces repoussent les ions de mêmes charges et attirent les charges de signes opposées.

Ce phénomène s'accompagne d'une déformation de la lame dans l'épaisseur (contraction ou expansion).

Substances piézoélectriques :

- Sulfate de lithium.
- Sel de Rochelle.
- Phosphate d'ammonium déshydrogéné.

Pour obtenir une conversion d'énergie optimale, on travaille à la fréquence de résonance du cristal d'où une épaisseur de lame égale à la demi-longueur d'onde :

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

Application : À quelle épaisseur faut-il tailler une lame piézoélectrique pour une fréquence de résonance de 4 MHz et une vitesse de propagation de 5760 m/s.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\omega} \quad ; \quad \lambda = v_{Long} \cdot T$$

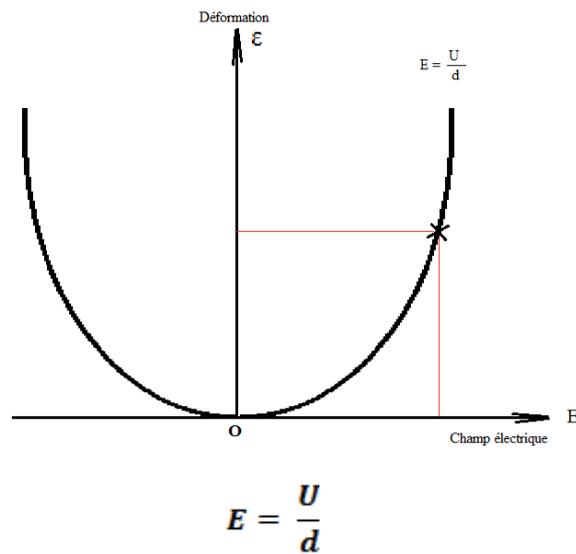
$$e = \frac{v_{Long}}{2 \cdot f} = \frac{5,76 \cdot 10^6 \frac{mm}{s}}{2 \cdot 4 \cdot 10^6 s^{-1}} = 0,72 \text{ mm}$$

Particularités :

- i) La fréquence de résonance du quartz est très stable dans le temps (surface de la lame très propre).
- ii) La taille du cristal est une opération très délicate. Il faut respecter les angles de coupe par rapport aux axes du cristal.
- iii) Épaisseur inférieure ou égale au millimètre.
- iv) Le quartz fournit une énergie acoustique relativement faible.

III-4-2 Electrostriction.

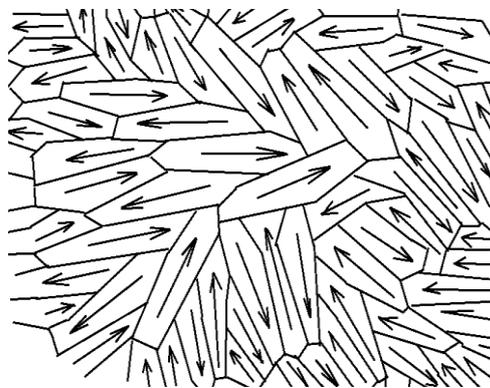
Certaines substances (titanate de baryum) appelées ferroélectriques présentent le phénomène d'électrostriction. Sous l'application d'un champ électrique intense, une pastille ferroélectrique se dilate.



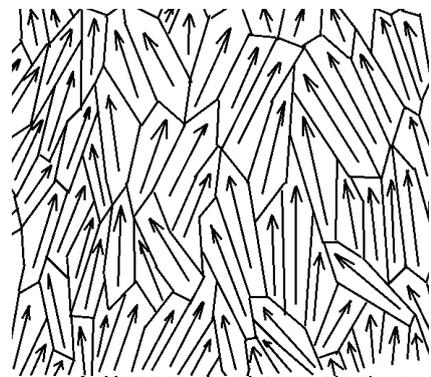
E : Champ électrique; U : tension appliquée; d : épaisseur de la pastille.

L'application d'un champ électrique tend à aligner les domaines dans le sens du champ. Si on inverse le sens du champ \vec{E} , les domaines vont s'orienter à l'opposé mais toujours dans la même direction du champ. On a donc toujours un allongement.

Les céramiques présentent un intérêt important par rapport aux cristaux naturels, ce qui exclut tout problème de taille.



État libre



Sens du champ E

Influence du champ électrique

Céramiques :

- ✓ Titanate de plomb et de baryum.
- ✓ Zirconate

La stabilité des caractéristiques piézoélectriques des céramiques ferroélectriques est moins bonne que celles du quartz.

III-4-3 Constantes piézoélectriques.

a) La température de Curie.

C'est la température au-dessus de laquelle le cristal ou la céramique perdent leurs propriétés piézoélectriques.

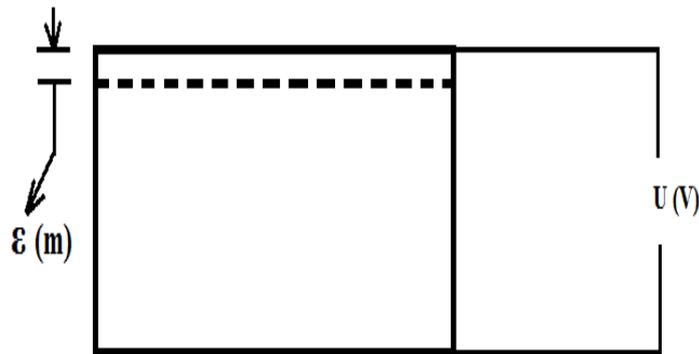
La transformation est irréversible qui est due au changement de structure (ex : structure du quartz) ou à l'ordonnement des dipôles.

b) Coefficient de transmission.

Lorsqu'elle est émettrice, la céramique est soumise à une tension U qui provoque une déformation d'amplitude ε .

Le coefficient de transmission d est défini comme :

$$\varepsilon_{(m)} = d_{\left(\frac{m}{V}\right)} \cdot V_{(V)}$$

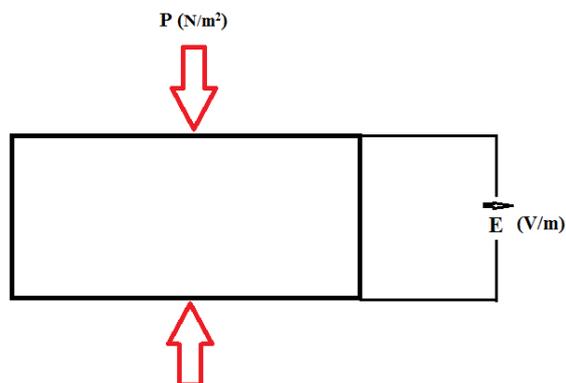


c) Coefficient de réception.

Lorsqu'ils sont récepteurs, le cristal ou la céramique sont soumis à une pression P qui induit sur les faces des charges électriques de signes opposés, d'où un champ électrique \vec{E} .

$$E_{\left(\frac{V}{m}\right)} = g_{\left(\frac{V.m}{N}\right)} \cdot P_{\left(\frac{N}{m^2}\right)}$$

g : coefficient de réception.

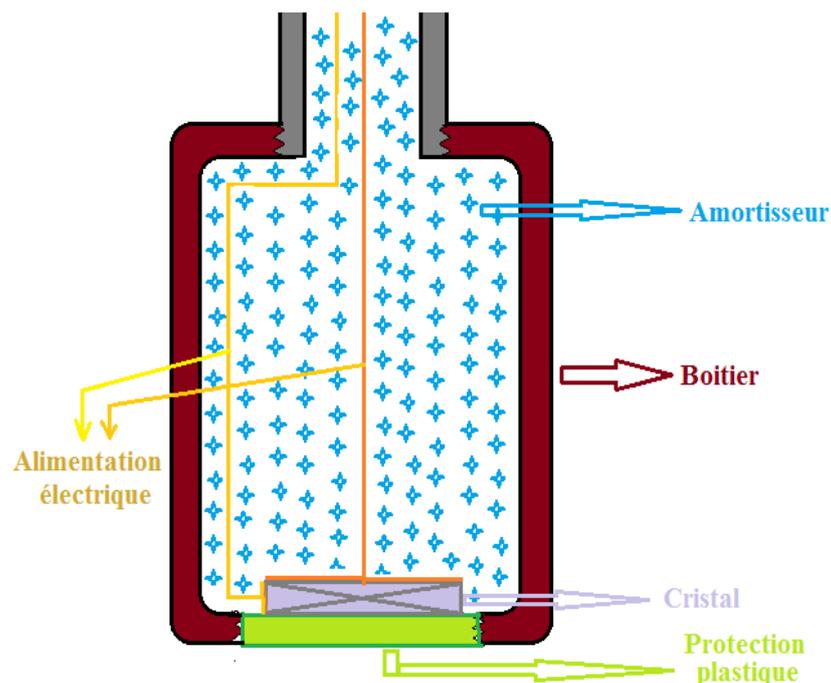


	Quartz	Sulfate de lithium	Titanate de baryum	Zirconate de plomb
Coefficient de transmission d (10^{-12} m/V)	2	16	140	260
Coefficient de réception g (10^{-3} V.m/N)	50	175	15	25
Température de Curie ($^{\circ}$ C)	573	75	120	340

III-5 Éléments constitutifs d'un palpeur d'ondes longitudinales (Palpeur mono-élément).

Il comprend les éléments suivants :

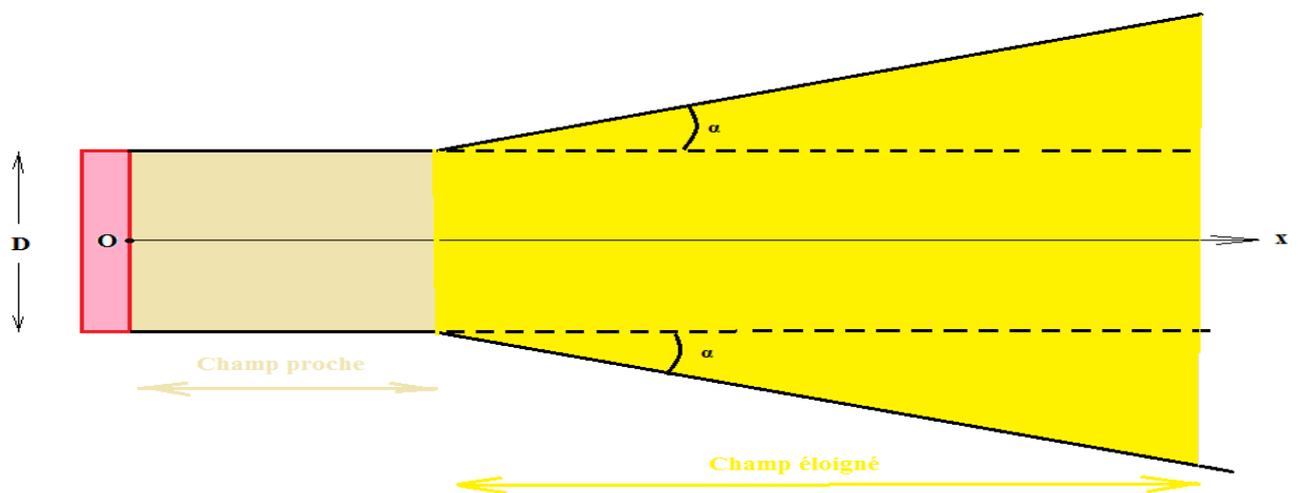
- Le cristal ou la céramique piézoélectrique dont les faces ont été métallisées pour les rendre conductrices.
- L'amortisseur (mélange de poudre de tungstène et d'araldite. Son rôle est d'absorber les vibrations de l'élément sensible (cristal ou céramique) lorsque cesse l'excitation électrique (pour réduire la zone morte du palpeur).
- La protection antérieure du cristal ou de la céramique (constituée par une lame demi-onde collée sur l'élément sensible lui-même).
- Les connexions électriques du cristal sont reliées à une fiche de type coaxiale.
- Le boîtier constitue une protection mécanique et étanche de l'ensemble.



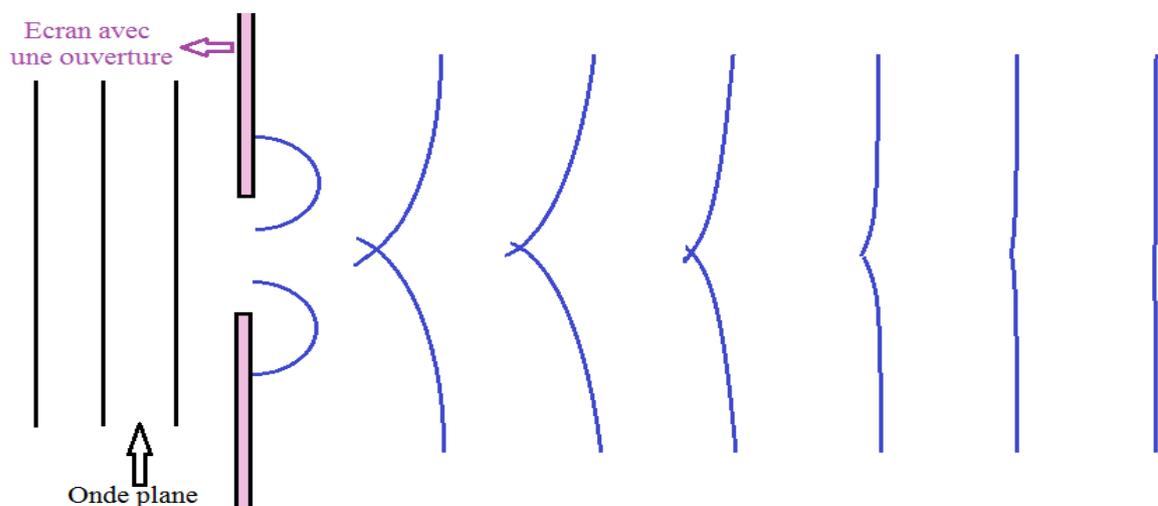
III-5 Propagation des ondes ultrasonores et forme du faisceau émis par une pastille piézoélectrique circulaire plane.

Le champ sonore créé par une pastille circulaire comprend deux zones :

- Le champ proche du transducteur (zone de Fresnel). Comme l'émetteur a des dimensions limitées, il se produit de nombreuses interférences entraînant de fortes variations d'amplitudes. Ce phénomène est analogue à une onde plane diffractée par une ouverture circulaire. Le champ acoustique est très perturbé et la pression acoustique est constituée par de nombreux maximums et minimums. La zone ne présente pas de divergence.
- Le champ éloigné situé juste au-delà du champ proche où l'intensité décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance (zone de Fraunhofer). La pression acoustique est homogène et caractérisée par une divergence du faisceau.



Coupe longitudinale d'un faisceau ultrasonore.



Onde plane diffractée par une ouverture circulaire, perturbation près de l'ouverture.

III-6 Puissance ultrasonore : cas d'ondes entretenues.

Soit un point M situé sur l'axe à la distance d'un émetteur de diamètre D, la puissance rayonnée s'écrit :

$$P = P_0 \sin^2 \left(\frac{\pi D^2}{8\lambda \cdot d} \right)$$

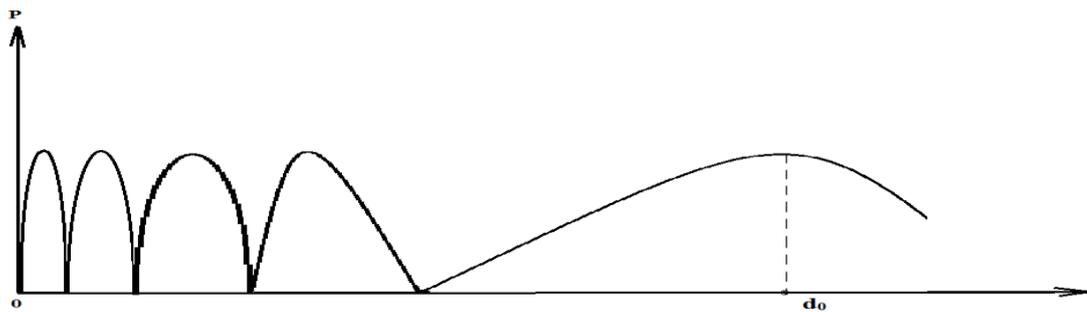
P_0 : Puissance maximale émise.

La puissance est maximale quand $P = P_0$

C'est-à-dire quand : $\sin^2 \left(\frac{\pi D^2}{8\lambda \cdot d} \right) = 1 \Rightarrow \frac{\pi D^2}{8\lambda \cdot d} = n \frac{\pi}{2} \Rightarrow d = \frac{D^2}{4n\lambda}$

Le maximum le plus éloigné est obtenu quand $n = 1$; d_0 : limite du champ proche.

$$d_0 = \frac{D^2}{4\lambda}$$



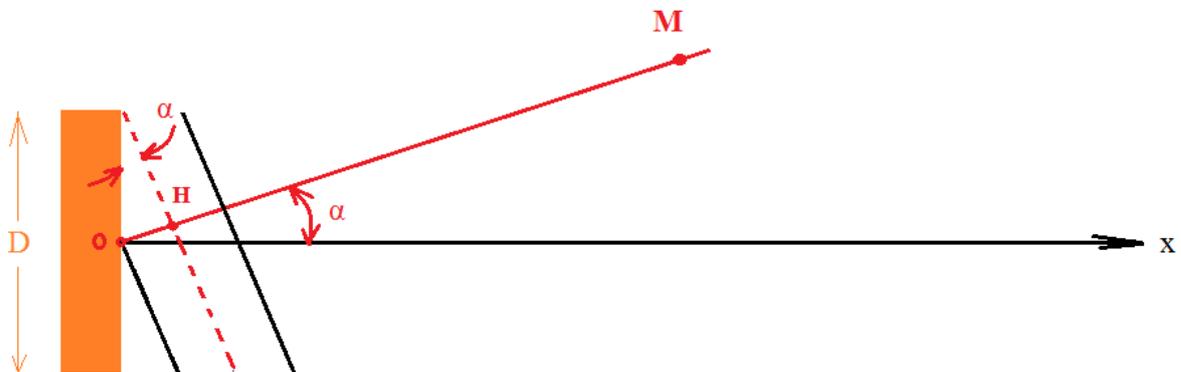
$d < d_0$: le champ proche subit des fluctuations brusques à cause des phénomènes d'interférences.

$d > d_0$: zone de Fraunhofer, l'émetteur peut être considéré comme ponctuel.

$$P = P_0 \left(\frac{\pi D^2}{8\lambda \cdot d} \right)^2$$

La puissance décroît de façon monotone quand d augmente.

Si le point M est en dehors de l'axe et loin de l'émetteur, figure :



On considère que les rayons qui arrivent en M sont parallèles et inclinés du même angle α .
La différence de marche OH entre le centre et l'un des rayons provenant du bord est égale à :

$$OH = \frac{D}{2} \sin \alpha$$

Il se produit une interférence destructive quand :

$$OH = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \frac{D}{2} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{\lambda}{D}$$

En réalité (cas pratique) le demi angle de divergence du faisceau a pour valeur :

$$\sin \alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Applications numériques :

Soit une pastille piézoélectrique de diamètre $D = 20 \text{ mm}$ et de fréquence $f = 4 \text{ MHz}$ en contact sur un acier doux ($v_{Long} = 5850 \text{ m/s}$). Calculer la limite du champ proche d_0 .

$$d_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad \text{et} \quad \lambda = v_{Long} \cdot T = \frac{v_{Long}}{f}$$

$$\lambda = \frac{5,85 \cdot 10^6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} = 1,46 \text{ mm} \Rightarrow d_0 = \frac{20^2 \text{ mm}^2}{4 \cdot 1,46 \text{ mm}} = 68,5 \text{ mm}$$

Pour une pastille de 10 mm :

$$d_0 = \frac{10^2 \text{ mm}^2}{4 \cdot 1,46 \text{ mm}} = 17 \text{ mm}$$

Le demi-angle de divergence du champ éloigné pour la pastille de diamètre $D=20 \text{ mm}$ et de fréquence $f=4\text{MHz}$ a pour expression :

$$\sin \alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 1,22 \cdot \frac{1,46 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} = 0,090 \Rightarrow \alpha = 5^\circ 09'$$

Conclusions :

Réduire la longueur du champ proche revient à :

- i. Diminuer le diamètre du palpeur
- ii. Augmenter la longueur d'onde (diminuer la fréquence).

Diminuer l'angle de divergence revient à :

- i. Diminuer la longueur d'onde λ (augmenter f).
- ii. Réaliser des diamètres important.

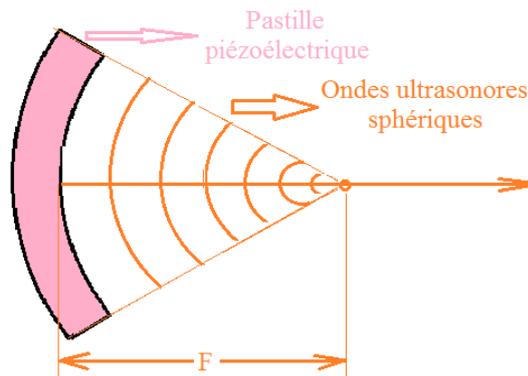
III-7 Focalisation des faisceaux.

Il est nécessaire d'augmenter l'énergie ultrasonore pour détecter certains défauts ou pour déterminer leurs contours.

On a recourt à une concentration du faisceau ultrasonore par le principe de focalisation qui consiste à engendrer des ondes sphériques convergentes au lieu d'ondes planes.

a) Pastille de forme sphérique.

Elle concentre son émission au centre de la sphère.

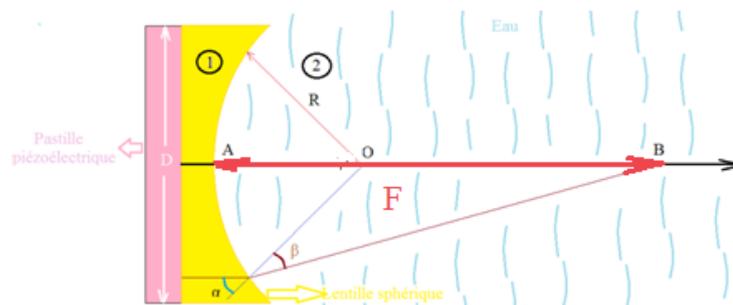


Focalisation par courbure de l'oscillateur.

Le frittage des céramiques ferroélectrique facilite la réalisation de telles pastilles.

b) Utilisation d'une lentille plan-concave.

Le procédé consiste à accoler une lentille plan-concave à une pastille piézoélectrique.



$$\frac{\sin\alpha}{v_1} = \frac{\sin\beta}{v_2}$$

La distance focale s'écrit :

$$F = \frac{R}{1 - n}$$

R : rayon de courbure de la lentille.

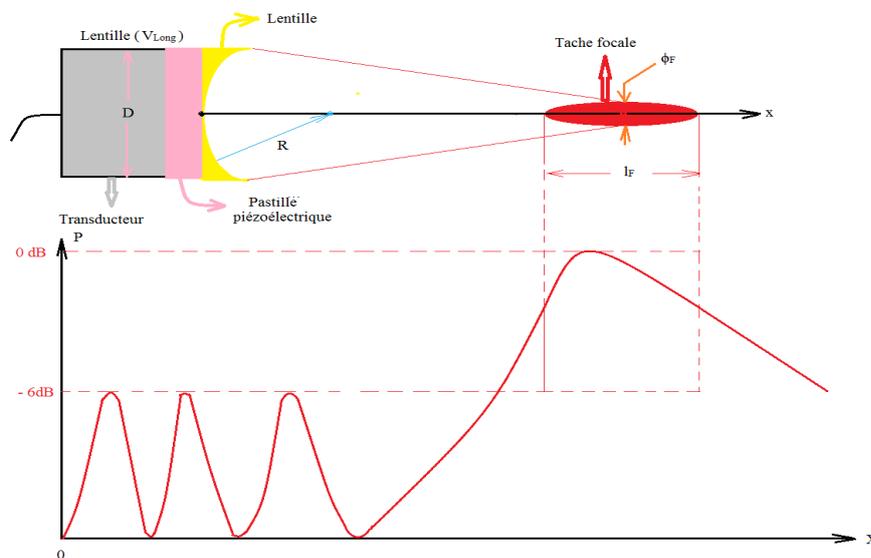
n : indice de la lentille par rapport au milieu de couplage.

c) Cas d'une lentille en contact avec de l'eau où v_{Long} est la vitesse longitudinale :

$$F = \frac{R}{1 - \frac{v_{Long}^{Eau}}{v_{Long}^{Lentille}}}$$

En réalité, le faisceau ne converge pas en un seul point mais présente une tache focale assimilée à une zone elliptique de diamètre ϕ_F et de longueur l_F .

$$l_F = 4 \cdot \lambda \frac{F^2}{D^2} \quad \text{et} \quad \phi_F = \lambda \cdot \frac{F}{D}$$



La tache focale est caractérisée par le rapport :

$$\gamma = \frac{l_F}{\phi_F} = 4 \frac{F}{D}$$

La puissance rayonnée au foyer a pour expression :

$$P_F = P_0 \frac{D^4}{4 \cdot \lambda^2 F^2}$$

Application :

À un transducteur constitué par une pastille piézoélectrique dont les caractéristiques sont : $D = 40 \text{ mm}$ et $f = 4 \text{ MHz}$; on a associé une lentille plan-concave en plexiglas dont les caractéristiques sont : $D = 40 \text{ mm}$; $R = 60 \text{ mm}$; $v_{Long}^{Plexiglas} = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; dans l'eau à 20°C avec $v_{Long}^{Eau} = 1483 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Calculer les dimensions de la tache focale et le rapport γ .

La distance focale F s'écrit :

$$F = \frac{R}{1 - \frac{v_{Long}^{Eau}}{v_{Long}^{Lentille}}} = \frac{60 \text{ mm}}{1 - \frac{1483 \text{ m/s}}{2730 \text{ m/s}}} = 131,6 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{v_{Long}^{Eau}}{f} = \frac{1,483 \cdot 10^6 \text{ mms}^{-1}}{4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} = 0,37 \text{ mm}$$

$$l_F = 4 \cdot \lambda \frac{F^2}{D^2} = 4 \cdot 0,37 \text{ mm} \cdot \frac{131,6^2 \text{ mm}^2}{40^2 \text{ mm}^2} = 16 \text{ mm}$$

$$\phi_F = \lambda \frac{F}{D} = 0,37 \text{ mm} \cdot \frac{131,6 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 1,22 \text{ mm}$$

IV Phénomènes d'interfaces : dioptre

C'est la surface de séparation entre deux milieux matériels juxtaposés.

Chaque milieu est caractérisé par son impédance acoustique z ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) qui est le produit de la masse volumique ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et de la vitesse de propagation v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) :

$$z = \rho \cdot v$$

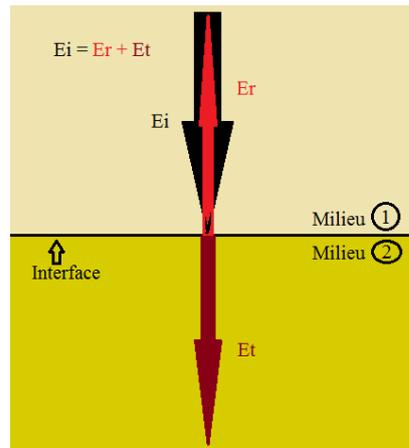
Tableau

Matériaux	Masse volumique ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Vitesse de l'onde longitudinale v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Impédance acoustique z ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Acier	$7,8 \cdot 10^3$	$5,90 \cdot 10^3$	$46 \cdot 10^6$
Aluminium	$2,7 \cdot 10^3$	$6,32 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^6$
Cuivre	$1,0 \cdot 10^3$	$4,70 \cdot 10^3$	$4,7 \cdot 10^6$
Magnésium	$1,7 \cdot 10^3$	$5,80 \cdot 10^3$	$9,9 \cdot 10^6$
Plexiglas	$1,2 \cdot 10^3$	$2,73 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^6$
Eau	$1,0 \cdot 10^3$	$1,48 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$
Air (0°C)	$1,3 \cdot 10^3$	$0,33 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^2$

V-1 Cas d'onde dont la vitesse de propagation est perpendiculaire à l'interface de séparation de deux milieux.

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau et atteint la surface de séparation avec un autre milieu de nature différente, l'énergie acoustique se répartit en deux faisceaux distincts :

- Une partie du faisceau est transmise dans le second milieu d'énergie E_t .
- Le reste du faisceau est réfléchi dans le premier milieu.



Réflexion et transmission d'une onde acoustique incidente normale à l'interface

Comme les énergies E_i , E_r et E_t respectivement énergie incidente, réfléchie et transmise sont proportionnelles au carré des amplitudes des ondes, on a :

$$E_r = E_i \cdot \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 \text{ avec } E_i = E_r + E_t$$

Le coefficient de réflexion a pour expression α_r :

$$\alpha_r = \frac{E_r}{E_i} = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$$

Cette relation est fondamentale pour la détection des interfaces matériau-défaut (discontinuité géométrique). C'est le cas de la présence d'une fissure ou d'une soufflure (lame d'air ou de gaz) dans les aciers. Comme les impédances acoustiques sont très différentes, le rapport α_r est très élevé et une grande partie de l'énergie émise sera réfléchie lors du passage du milieu d'impédance z_{acier} à celui d'impédance z_{air} :

$$z_{acier} = 46 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \quad z_{air} = 4,3 \cdot 10^2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ d'où on néglige } z_{air} \text{ par rapport à } z_{acier}$$

$$z_{acier} - z_{air} \cong z_{acier} \Rightarrow \frac{z_{acier}}{z_{air}} = \frac{46 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}}{4,3 \cdot 10^2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}} \cong 10^5$$

L'expression de α_r devient :

$$\alpha_r = \frac{E_r}{E_i} \cong \left(\frac{z_1}{z_1} \right)^2 \cong 1 \Rightarrow E_r \cong E_i$$

L'énergie acoustique est donc totalement réfléchie par l'interface acier-air, ce qui est fondamental pour la détection des défauts surtout pour les assemblages soudés (fissure, manque de pénétration). Ceci explique pourquoi il est nécessaire d'assurer le couplage du transducteur avec la surface de la

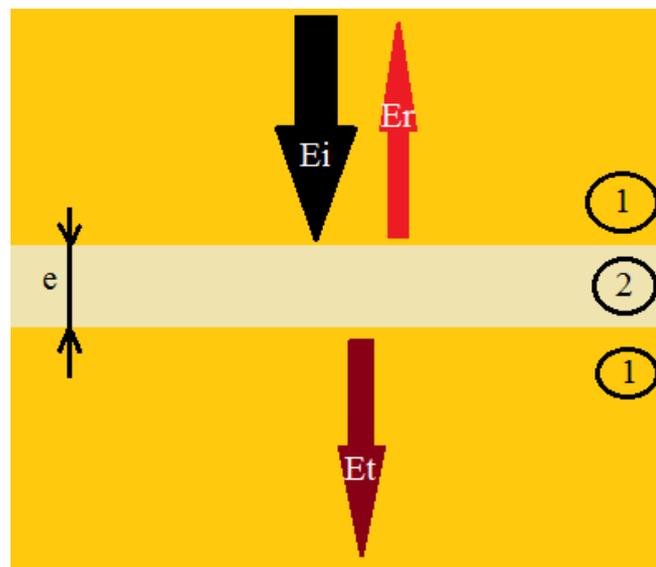
pièce à examiner à l'aide d'un liquide pour éviter de l'air et permettre en grande partie le passage du faisceau ultrasonore.

Milieu	Impédance z ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)	Pourcentage d'énergie réfléchie (%)				
		Aluminium	Acier	Mercure	Eau	Air
Aluminium	$17 \cdot 10^6$	0	21	1	72	100
Acier	$46 \cdot 10^6$		0	16	88	100
Mercure	$19 \cdot 10^6$			0	75	100
Eau	$1,5 \cdot 10^6$				0	100
Air	$4,3 \cdot 10^2$					0

De la même façon, puisque $E_i = E_r + E_t$, l'énergie transmise E_t et le coefficient de transmission α_t s'écrivent :

$$E_t = E_i \cdot \frac{4 z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} ; \alpha_t = \frac{E_t}{E_i} = \frac{4 z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} \text{ et } \alpha_t + \alpha_r = 1$$

Cas d'un milieu interposé entre deux milieux de même nature. C'est le cas de la détection d'un défaut plan de faible épaisseur qu'on assimile à une lame à faces parallèles tels que les fissures et les doublures.

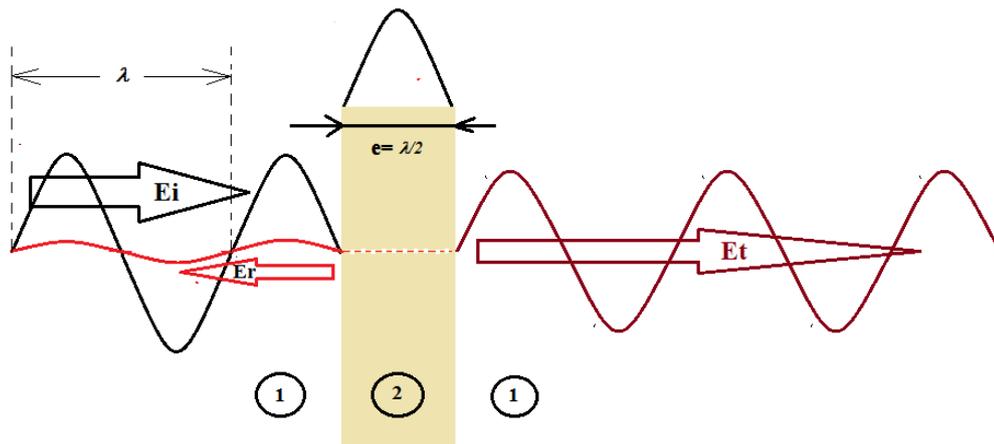


Suivant l'épaisseur e du milieu 2 d'impédance z_2 trois cas sont à considérés :

- 1) Le milieu 2 a une épaisseur e égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde de la vibration ultrasonore :

$$e = k \frac{\lambda}{2} ; k : \text{entier.}$$

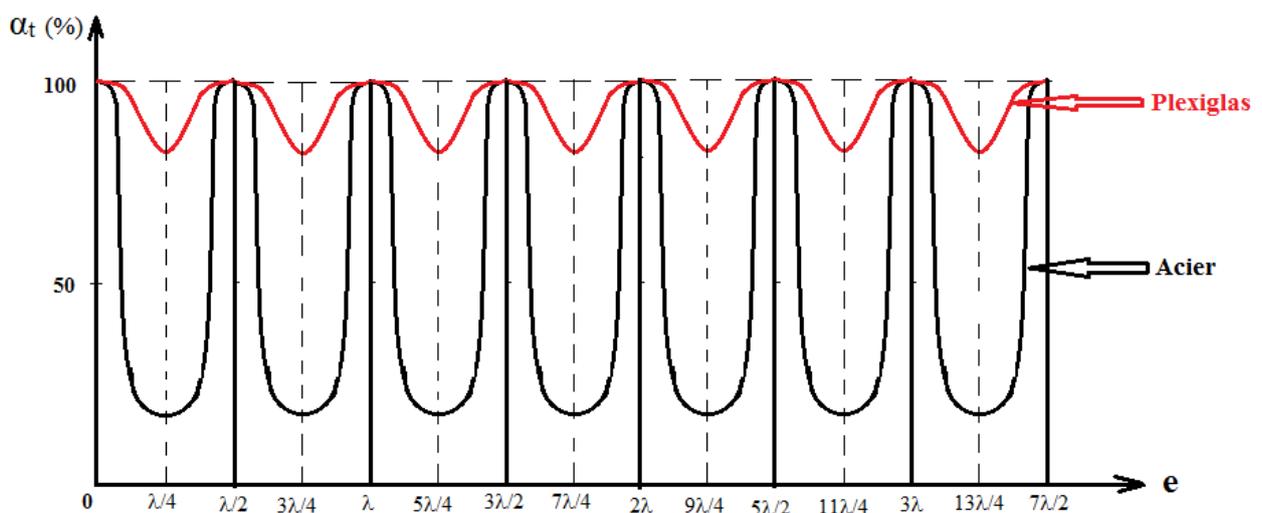
La lame d'épaisseur $k\lambda/2$ entre en résonance avec l'onde ultrasonore de longueur d'onde λ et la perméabilité du milieu 2 est maximale. C'est pourquoi une pastille piézoélectrique est toujours taillée suivant cette épaisseur dans le but de transmettre au maximum l'onde ultrasonore vers la pièce à contrôler. Comme la réflexion est minimale, un défaut d'épaisseur $e = k\lambda/2$ risque de ne pas être détecté.



Réflexion et transmission des ondes ultrasonores d'une lame d'épaisseur $e = \lambda/2$ entre deux milieux.

2) Le milieu 2 a une épaisseur : $e = (2k + 1) \frac{\lambda}{4} ; k : \text{entier.}$

L'énergie transmise passe par un minimum qui est varié suivant les matériaux et peut atteindre 10 % pour une lame d'acier plongée dans l'eau.

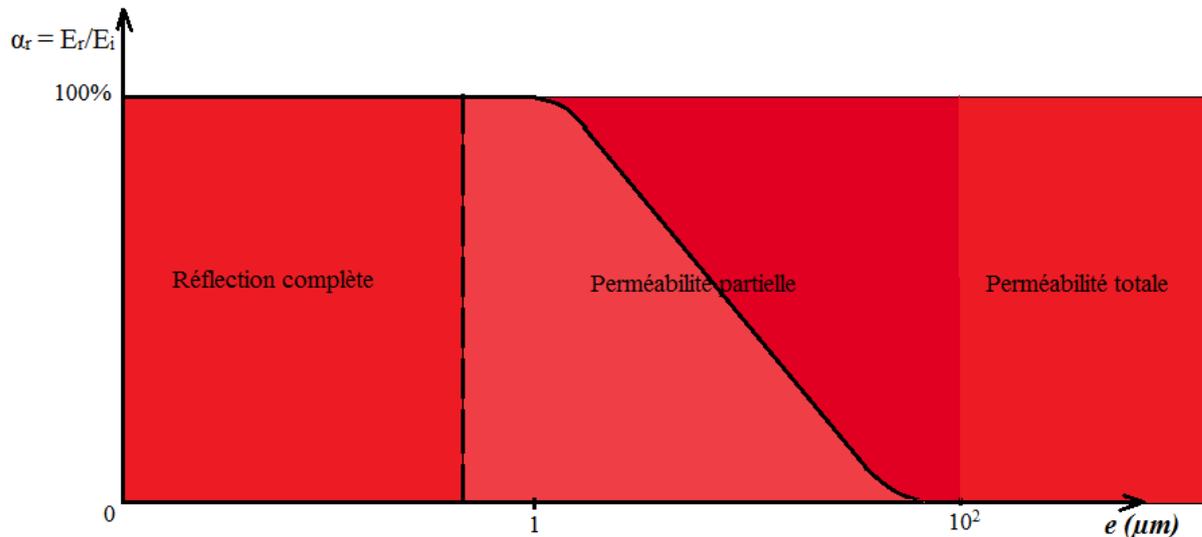


Coefficients de transmission d'une plaque en fonction de son épaisseur.

3) Le milieu 2 a une épaisseur très inférieure à $\lambda/4$ de l'ordre de quelques μm ou moins : $e < \frac{\lambda}{4}$

L'opacité diminue avec l'épaisseur et le coefficient de réflexion α_r en fonction de e s'écrit :

$$\alpha_r = \frac{\frac{z_1 - z_2}{z_2 - z_1}}{4 \cdot \cot^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\lambda}\right) + \left(\frac{z_1 + z_2}{z_2 + z_1}\right)^2}$$



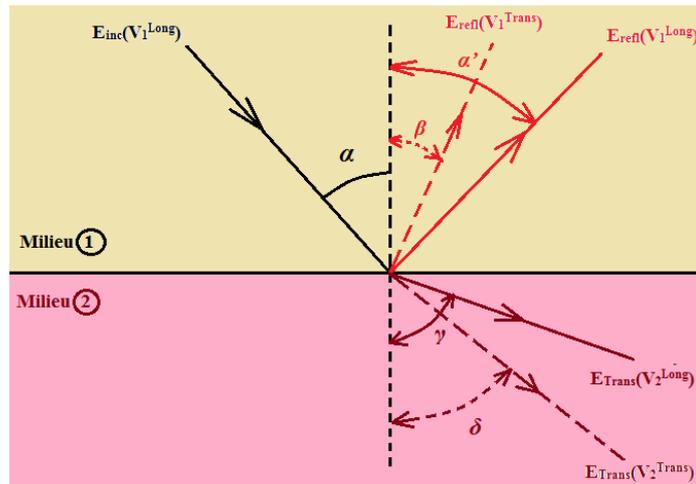
IV-2 Cas d'une onde dont la direction de propagation fait un angle $\alpha \neq 0$ par rapport à la normale à l'interface (incidence oblique).

Lorsqu'une onde plane ultrasonore, se propageant dans un milieu 1, rencontre sous une incidence oblique la surface de séparation de deux milieux 1 et 2, elle donne naissance dans un même plan à deux systèmes supplémentaires d'ondes composés de :

- Un système d'ondes réfléchies constitués de deux ondes, une transversale et l'autre longitudinale, dans le milieu 1 où se où se propage l'onde incidente.
- Un système d'onde réfracté ou transmise constitués de deux ondes, une transversale et l'autre longitudinale, dans le milieu 2 de l'autre coté où se propage l'onde incidente.

Les ondes incidentes, réfléchies et réfractés sont caractérisées par :

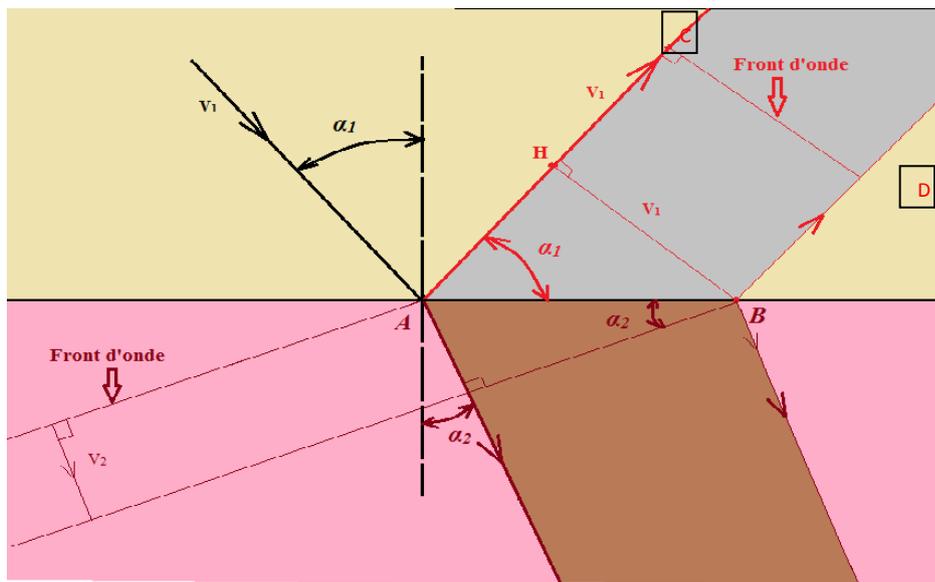
- Des vitesses qui dépendent du milieu et du mode de vibration.
- Des angles d'incidence, de réflexion et de réfraction qui sont liés aux vitesses par la loi de SNELL.



La loi de SNELL s'écrit :

$$\frac{\sin \alpha}{v_1^{Long}} = \frac{\sin \alpha'}{v_1^{Long}} = \frac{\sin \beta}{v_1^{Trans}} = \frac{\sin \gamma}{v_2^{Long}} = \frac{\sin \delta}{v_2^{Trans}}$$

Il ressort que : $\alpha = \alpha'$ (réflexion miroir).



On peut vérifier la loi de SNELL par le calcul de la distance AB à travers les sinus des angles α_1 et

$$\alpha_2 : AB = \frac{v_1}{\sin \alpha_1} = \frac{v_2}{\sin \alpha_2}$$

Corrections :

a) Utilisation d'une lentille plan-concave.

Le procédé consiste à accoler une lentille plan-concave à une pastille piézoélectrique.

Exercices.

Exercice 1 : Connaissances sur les contrôles CND.

- 1) Qu'est-ce qu'une discontinuité, un défaut ?
- 2) Quand une discontinuité, un défaut deviennent-ils un défaut inacceptable ?
- 3) Que signifient END et CND ?
- 4) Indiquez le maximum de types de CND.
- 5) Quelles sont les méthodes CND les plus répandues ?
- 6) Lors de l'exécution d'un contrôle par magnétoscopie, l'essai doit être exécuté deux fois. Au cours du second essai, à quel angle la bobine ou les touches doivent être orientées par rapport à la direction qu'elles présentaient lors du premier essai ?
- 7) Quelles sont les différentes étapes d'un contrôle par ressuage ?
- 8) Citez deux types d'essais CND qui nécessitent pas ou très peu de matériel et qui sont utilisés dans les petits ateliers.
- 9) En contrôle par ultrasons, qu'est-ce qu'un produit de couplage et quel est son rôle ? Justifiez.
- 10) Des enregistrements permanents sont souvent exigés pour les soudures critiques. Citez trois exemples d'applications ou de produits industriels pour lesquels des enregistrements permanents sont exigés.
- 11) Quelle méthode permet de détecter des fuites aussi faibles que 1 ppm (1 partie par million) ?
- 12) Les essais Charpy sont des essais de
- 13) Citez trois essais de laboratoire qui ne sont généralement pas pratiqués dans les petits ateliers ou les petites entreprises.
- 14) Quel essai est exécuté pour vérifier l'allongement et la limite élastique d'un matériau métallique ?
- 15) Le point, à partir duquel un métal s'allonge sans casser sous une charge ou une contrainte donnée et ne retourne pas à sa longueur d'origine lorsque la charge est supprimée, s'appelle
- 16) La ductilité est la capacité d'un métal à avant rupture.
- 17) Citez trois essais utilisés pour mesurer la dureté.
- 18) Quel type d'essai de dureté endommage au minimum la surface de la pièce.
- 19) Lesgraphies représentent des images obtenues sous grossissement de 10 à 40.
- 20) Quel équipement peut-on utiliser pour l'examen visuel des soudures à l'intérieur d'un tube ou d'une canalisation de faible diamètre ?

Exercice 2

On contrôle une cale en acier de 200 mm d'épaisseur avec une discontinuité importante à 150 mm de la face d'entrée, figure :

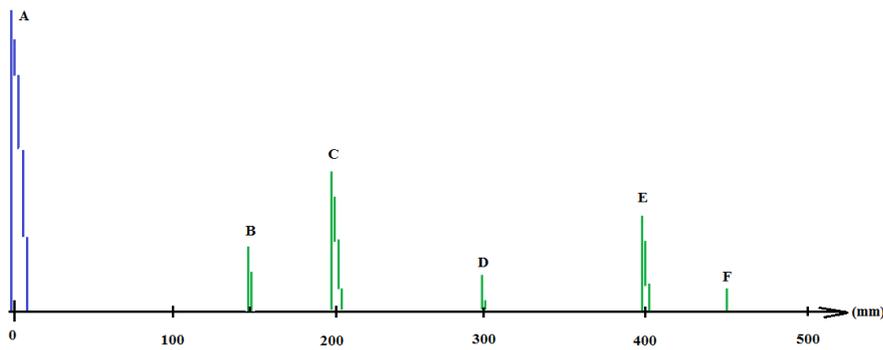


Schéma de l'enregistrement des échos

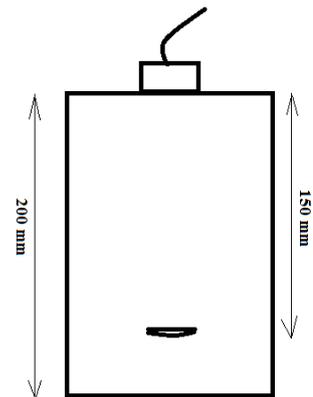


Schéma de la cale d'acier

Que représentent les échos A, B, C, E et F si D correspond au deuxième écho du défaut.

La puissance ultrasonore rayonnée s'écrit :

$$P = \frac{1}{2} \rho V (A\omega)^2$$

ρ : masse volumique; V : volume; A : Amplitude de l'oscillateur et ω : pulsation.

Commenter les différents termes de l'expression.

Conclusion.

Exercice 3

On veut réaliser une lame piézo-électrique pour un transducteur. Quelle doit être l'épaisseur de celle-ci pour une fréquence de résonance de 4 MHz pour une vitesse de propagation de 5760 m/s.

Exercice 4

Soit une pastille piézo-électrique de diamètre $D = 20\text{mm}$, $f = 4\text{MHz}$.

Calculer la limite champs proche dans l'acier doux ($V_L = 5850\text{ m/s}$).

Estimer la valeur du demi-angle α .

Exercice 5

Un traducteur est constitué d'une pastille piézo-électrique dont les caractéristiques sont les suivantes : diamètre de la pastille $D = 20\text{ mm}$; $f = 2\text{ MHz}$.

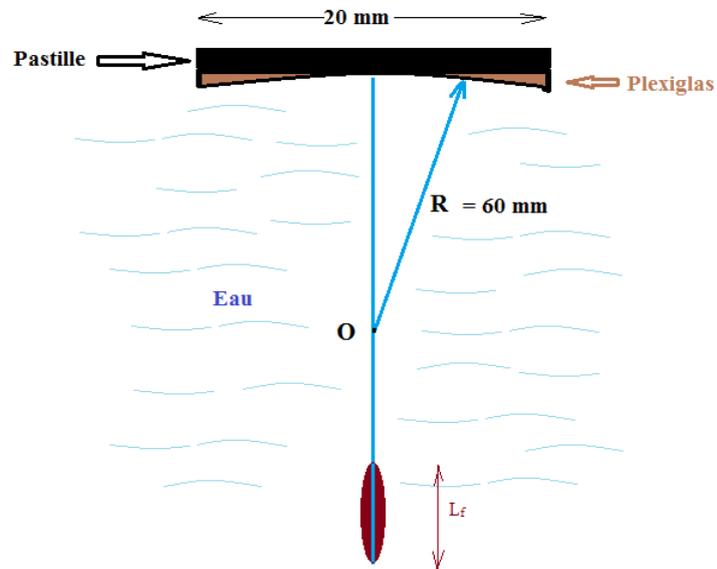
Au traducteur est associée une lentille plane concave en plexiglas en contact avec de l'eau dont le diamètre est $D = 20\text{ mm}$ et d'un rayon de courbure $R = 60\text{ mm}$.

Les vitesses longitudinales dans le plexiglas et l'eau sont respectivement $V_{Long}^{plexi} = 2730\text{ m/s}$ et

$V_{Long}^{eau} = 1483\text{ m/s}$.

a) Calculer la distance focale

b) Définir les caractéristiques de la tache focale (ϕ_F ; l_F et $\gamma = \frac{l_F}{\phi_F} = 4 \frac{F}{D}$)

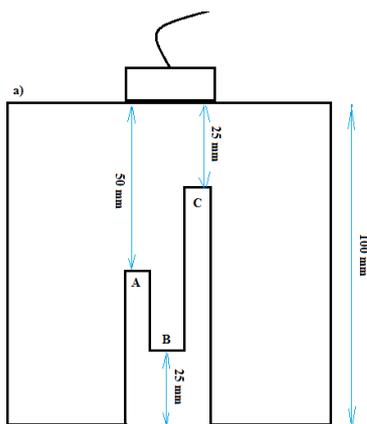


Exercice 6

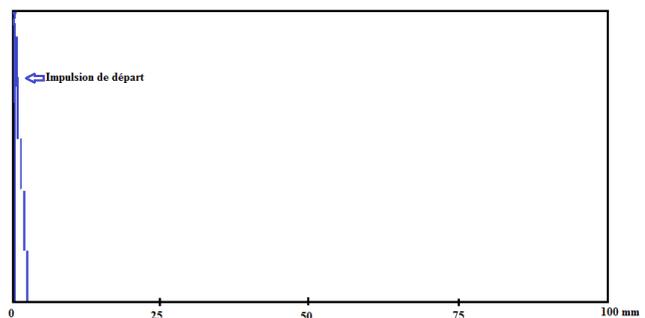
Les fréquences utilisées lors des examens ultrasons varient entre 0.5 et 12 MHz. A quoi correspond l'intervalle des longueurs d'ondes pour un solide ayant une vitesse de propagation $v=5800$ m/s.

Exercice 7

Un objet métallique est représenté par la figure ci-dessous. Représenter les différents échos des surfaces A, B et C sur l'écran b).



b)



BIBLIOGRAPHIE

Normalisation française A 09-325 Essais non destructifs Ultrason Faisceau acoustiques – Généralités Septembre 1987.

Soudage et techniques connexes, Recueil de Normes Françaises AFNOR A 09-320, contrôles et essais, Tome 3, 1984.

Des contrôles ultrasonores de joints soudés austénitiques H.W. Corsepius Krautkramer France.

Le contrôle non destructif par ultrasons, Jean Perdijon, Traité des nouvelles technologies Hermes Science Publications, 1993.

L'émission acoustique, cours de contrôle et d'inspection des constructions soudées, Institut de Soudure, ESSA 1984.

Manuel pour l'examen par ultrasons des soudures, Institut international de la soudure, Publications de la soudure Autogène, 1978.

Contrôle des constructions soudées, contrôle par ultrasons, Institut de soudure, ESSA, 1983.

Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures, Gilles Corneloup, Cécile Gueudré ; Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2016.

Guide ultrasons multiéléments, Principes et applications pour le contrôle non destructif, François Berthelot – Benoit Dupont, 2013.

Contrôle non destructif (CND) Jacques Dumont-Fillon, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesure et Contrôle.

Technologie des métaux, contrôles et essais des soudures, Michel Bramat (Mayer, Villeneuve), de boeck, 2008.

Ultrasons de haute intensité, applications industrielles, B. Brown et J.E. Goodman, Dunod, 1971.