



TECHNIQUE DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR

ULTRASONS



Pr. B. Boubeker

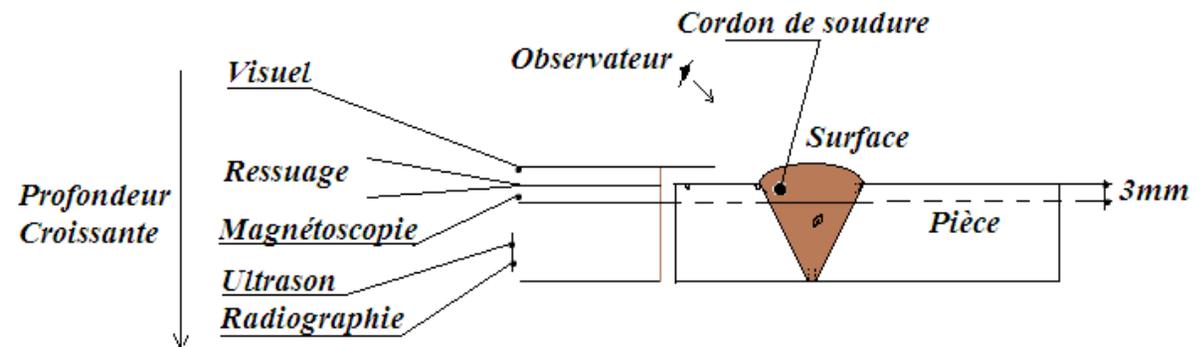
contrôle par ultrason

- RAPPEL CND

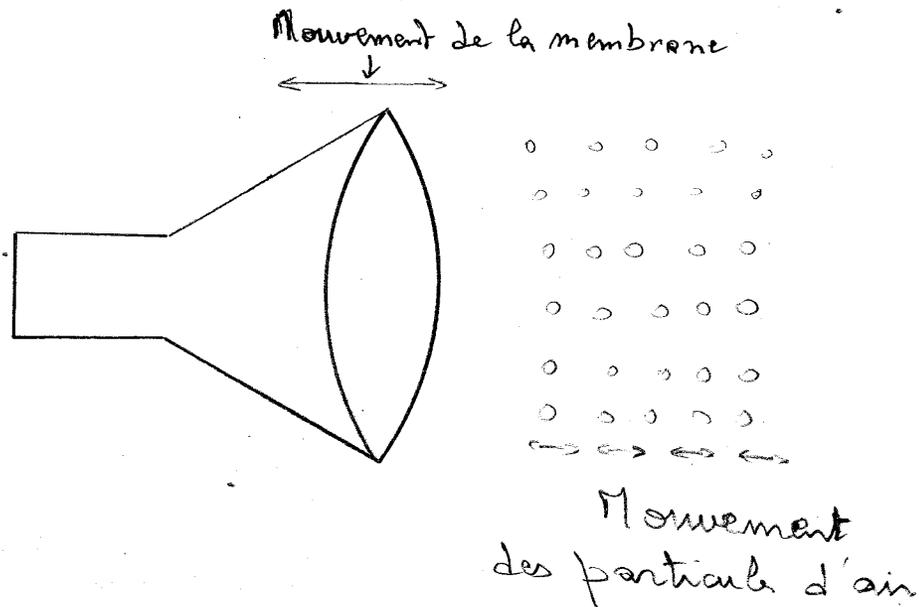
Les techniques de contrôle non destructif sont **complémentaires**. Le choix de la technique est en fonction de la pièce, de la forme de la pièce, et de la qualité visée.

Les contrôles non destructifs usuels sont :

1. Visuel
2. Ressuage
3. Magnétoscopie
4. Ultrason
5. Radiographie



complémentarités des technique des contrôle non destructif



* Mouvement d'aller-retour de la membrane autour de sa position d'équilibre.

EMISSION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE

* Mouvement analogue des particules d'air voisines qui transmettent le mouvement aux autres particules d'air.

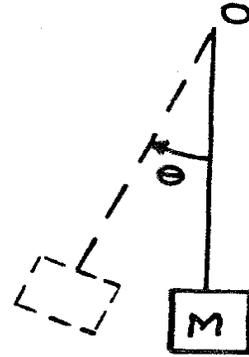
PROPAGATION DE L'ONDE ACOUSTIQUE

LE CONTROLE PAR U.S. EST UN PROCEDURE DE C.N.D. QUI CONSISTE A
ENGENDRER UNE IMPULSION U.S. DANS LE MATERIAU ET A OBSERVER
LES ECHOS REFLECHIS.

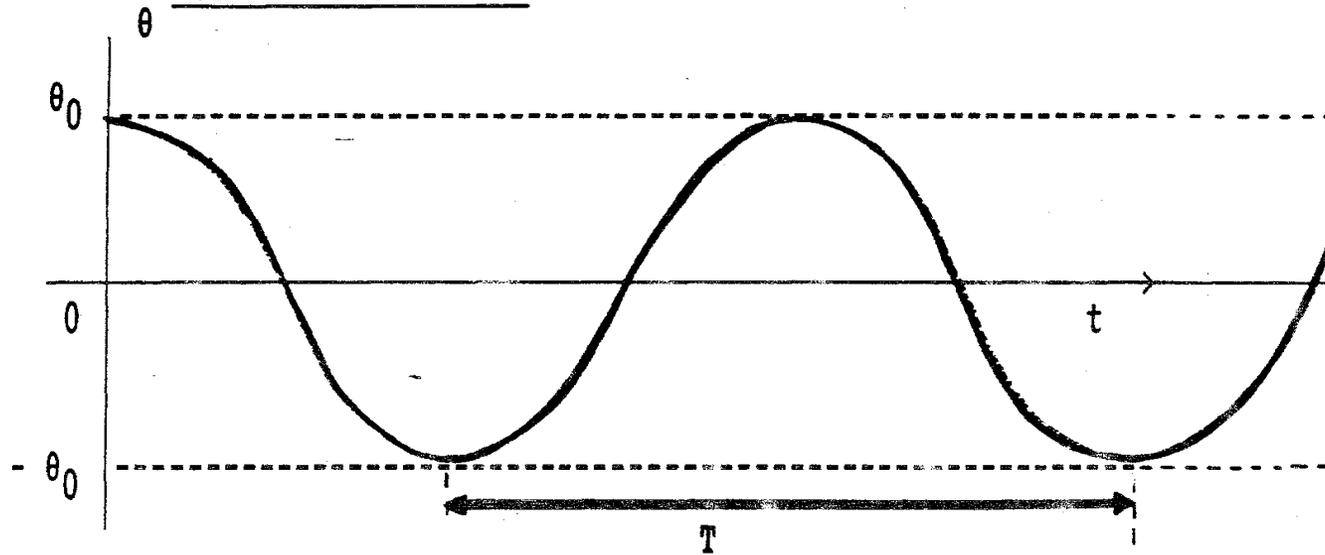
LA CONNAISSANCE DE CE PROCEDURE IMPLIQUE :

- L'ETUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES U.S.,
 - LES ETUDES DE L'APPAREILLAGE : EMISSION - RECEPTION
OBSERVATION DES ECHOS,
 - L'ETUDE DES PRINCIPES GENERAUX DU CONTROLE PAR U.S.
-

LE PENDULE



MOUVEMENT DU PENDULE

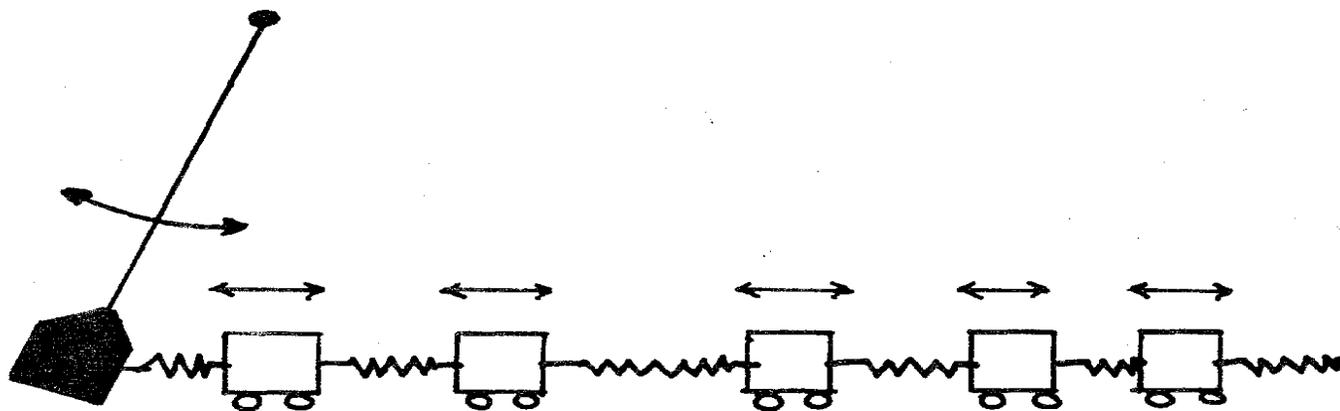


EQUATION DU MOUVEMENT

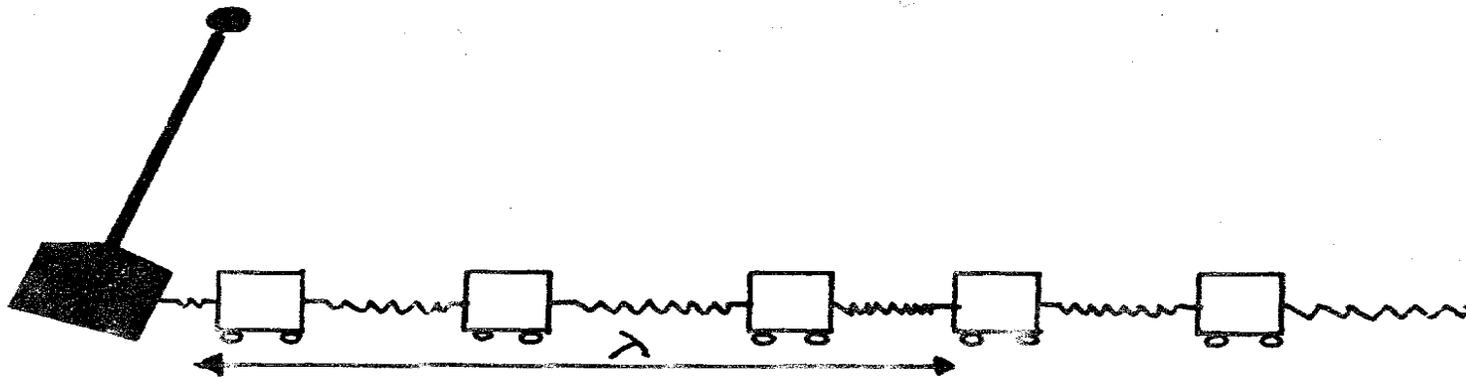
$$\theta = \theta_0 \sin (\omega t + \phi)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

PROPAGATION D'UNE OSCILLATION



V : VITESSE DE PROPAGATION DE L'ONDE OU CELERITE



LONGUEUR D'ONDE

λ : LONGUEUR SEPARANT DEUX ZONES CONSECUTIVES DANS LE MEME ETAT VIBRATOIRE

RELATIONS ENTRE :

λ : LONGUEUR D'ONDE

V : CELERITE

T : PERIODE

F : FREQUENCE

$$\lambda = V.T$$

$$\overset{\text{m}}{\lambda} = \frac{V}{F} \begin{matrix} \text{m/s} \\ \text{Hz} \end{matrix}$$

EN C.N.D.

UNITES PRATIQUES

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

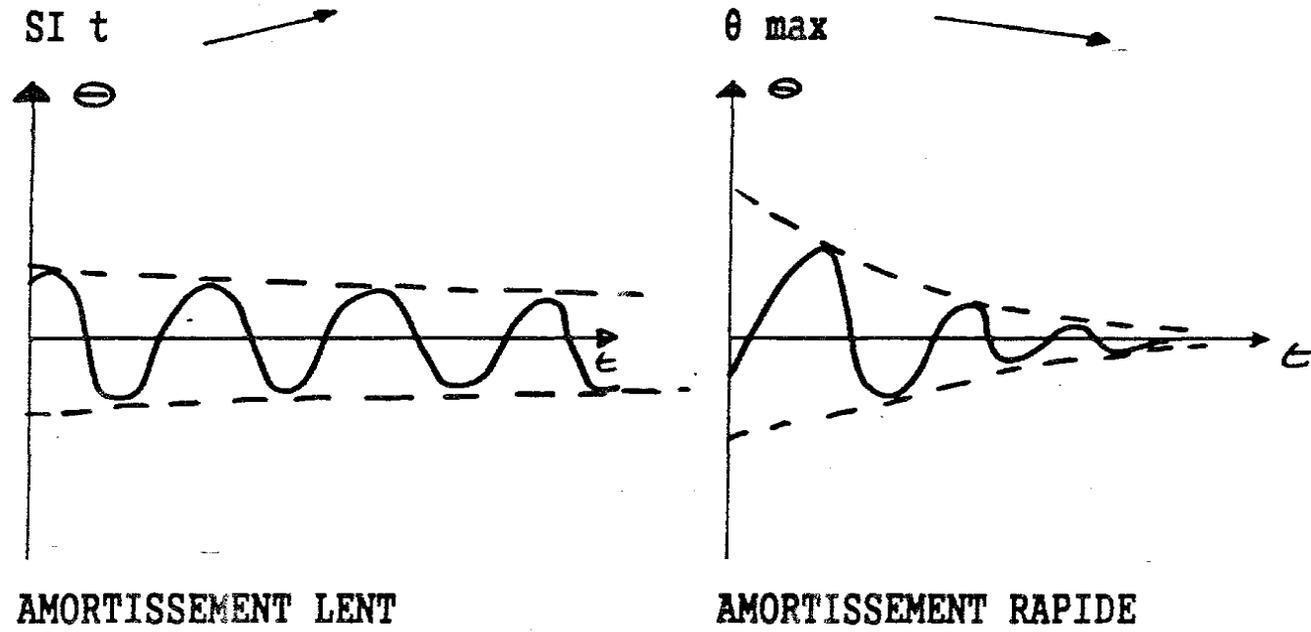
λ : mm

V : Km/s

F : MHz

OSCILLATION AMORTIE

CAS DU PENDULE LIBRE



OSCILLATIONS ENTRETENUES

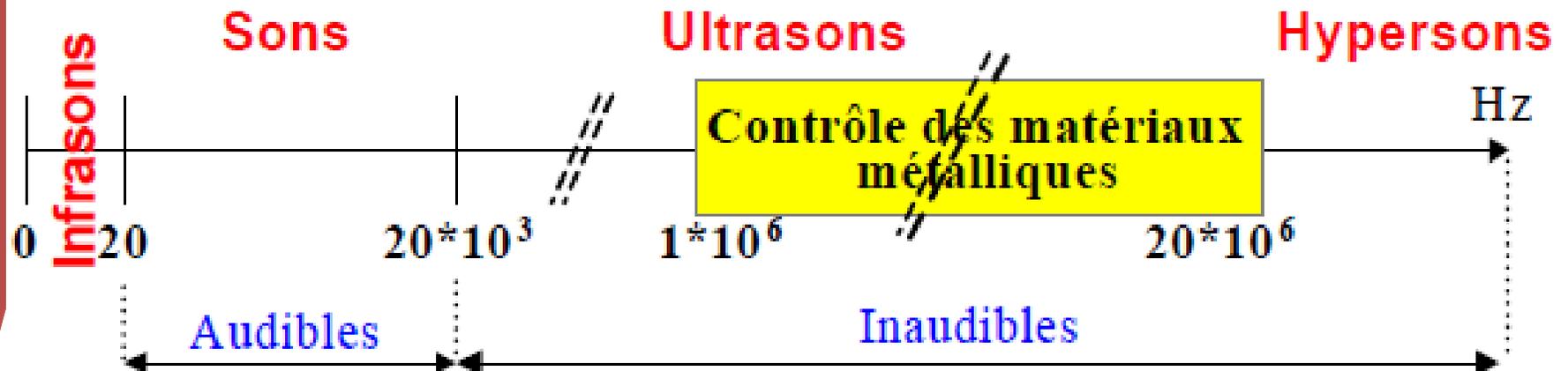
EXEMPLE : CAS DU RESSORT DE L'HORLOGE

SOURCE D'ENERGIE EXTERIEURE

Ondes ultrasonores

Les ultrasons sont un faisceau directif d'ondes élastiques d'origine mécanique de même nature que les sons mais de fréquence supérieure. Ce faisceau met en vibration les particules constitutives du matériau analysé.

La recherche des défauts par ultrasons consiste alors à analyser les Perturbations créées par des hétérogénéités existant au sein d'un matériau sur un faisceau d'ultrasons qui s'y propage.



$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f}$$

λ : longueur d'onde en m.

f : fréquence de l'onde, en hertz (Hz)

T : période de l'onde, en seconde (s) et $T = 1 / f$.

C : célérité de l'onde, en m/s.

Les valeurs de célérité des US dans les matériaux les plus courants sont consignées dans le tableau 1

- En contrôle non destructif, pour qu'on puisse détecter un défaut, il faut que celui-ci ait une taille au moins égal à $\lambda/2$. C'est pourquoi, on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 1 et 20 MHz.

$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f}$$

A.N : Calculer l'ordre de grandeur du plus petit défaut décelable dans un morceau d'acier pour ces 2 fréquences. Données : $C_{\text{acier}} = 5900 \text{ m.s}^{-1}$

Réponses :

Pour $f = 1 \text{ MHz}$,

Pour $f = 20 \text{ MHz}$,

- En contrôle non destructif, pour qu'on puisse détecter un défaut, il faut que celui-ci ait une taille au moins égale à $\lambda/2$. C'est pourquoi, on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 1 et 20 MHz.

	1 MHz	2 MHz	3 MHz	5 MHz
Air	0,331	0,166	0,110	0,066
Acier	5.85	2,93	1,95	1,16
Aluminium	6,22	3,11	2,07	1,24
Cuivre	4,70	2,35	1,57	0,94
Plexiglass	2,7	1,35	0,90	0,54
Fonte grise	4,60	2,30	1,53	0,92

Tableau 40 : Influence de la fréquence sur la longueur d'onde (en mm) dans différents milieux.

Les différentes mode de propagation des ondes ultrason

1. Contrôle en ondes longitudinal (Ondes de COMPRESSION): Elles se propagent parallèlement à la direction de vibration.
2. Contrôle en ondes transversal (*Ondes de cisaillement*)
3. Contrôle en ondes de surface

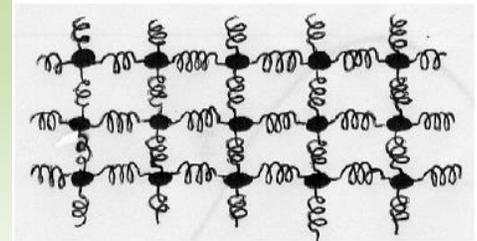
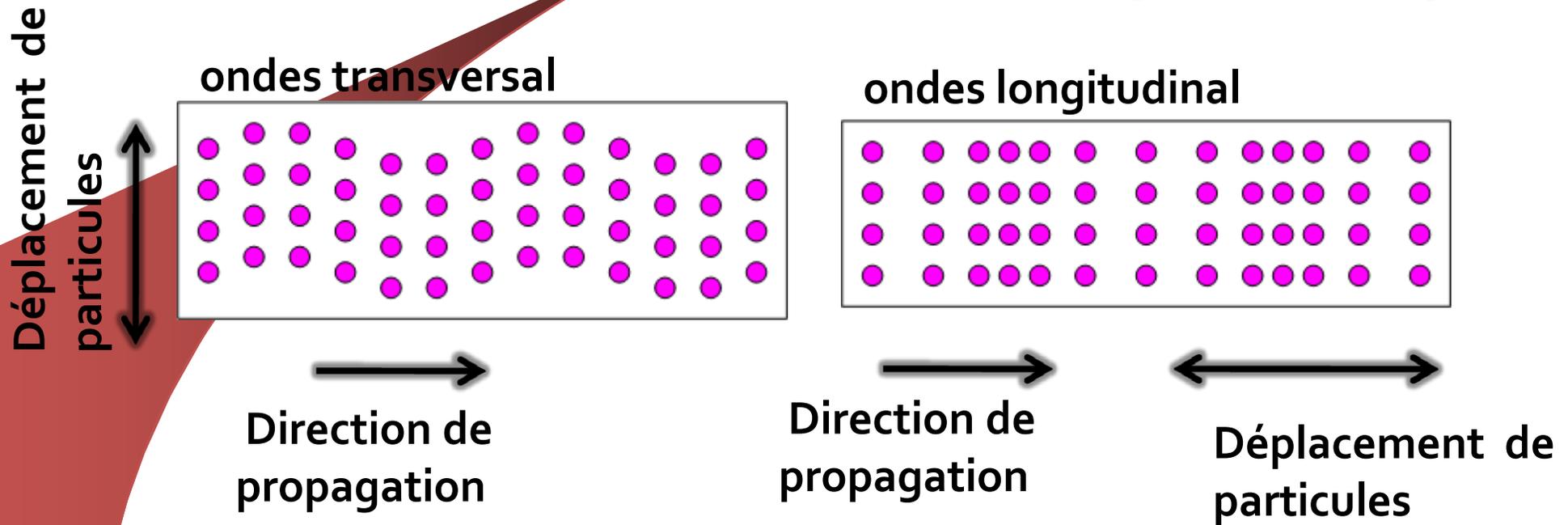


Figure 2 : Modèle élastique d'un solide.



Coefficients ρ , E et V

PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX

MASSE VOLUMIQUE ρ

Elle est définie comme étant le rapport de la masse d'un corps par son volume.

$$\rho = m/V$$

avec ρ en kg/m^3

m en kg

V en m^3

MODULE DE YOUNG E (ou module d'élasticité longitudinale)

Dans le domaine élastique, la contrainte est proportionnelle à l'allongement (Loi de Hooke). Pour les forces de traction et de compression, la constante de proportionnalité s'appelle module d'élasticité longitudinale (ou module d'YOUNG), avec $E = \sigma/\epsilon$

avec σ : contrainte principale

ϵ : dilatation lineique correspondante

Le module d'YOUNG s'exprime en N/mm^2 ou en Pascal (Pa).

Les valeurs de E sont très peu affectées par la composition des aciers. En revanche, la température affecte sensiblement les valeurs de E.

On suppose que le rapport $E(\theta) / E(20^\circ\text{C}) = f(\theta)$

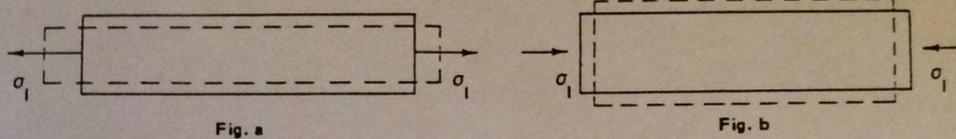
avec $f(\theta) = 1$ à 20°C

94% E 0,948 à 200°C

87% E 0,875 à 400°C

77% E 0,775 à 600°C

NOMBRE DE POISSON ν



Lorsqu'une barre est en traction, elle s'allonge dans le sens longitudinal et se contracte dans le sens transversal (fig. a).

De même, une charge compressive produit une diminution de la longueur et une dilatation de la section transversale (fig. b).

L'expérience a montré que, dans le domaine élastique, l'allongement (ou le retrait) latéral est proportionnel au retrait (ou à l'allongement) longitudinal.

Le nombre de Poisson se définit comme suit :

$$\nu = \frac{e_2}{e_1}$$

avec e_2 : dilatation linéique transversale
 e_1 : dilatation linéique longitudinale

D'une manière générale, la composition chimique d'un acier affecte très peu le nombre de Poisson.

Par contre, le nombre de Poisson augmente avec la température : par exemple, un acier E24 voit son nombre de Poisson varier de 0,284 à 0,314 lorsque la température s'élève de 0° à 600°c.

VITESSES DES ONDES US

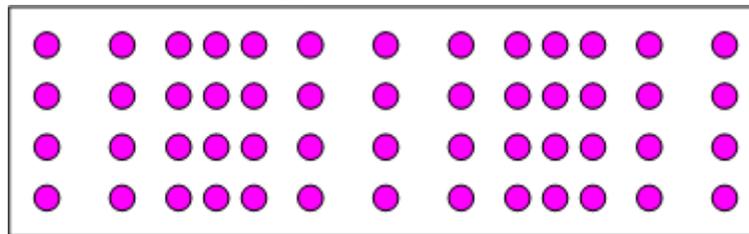
1. Les ondes longitudinal (Ondes de COMPRESSION):

$$V_{OL} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu).(1-2\nu)}}$$

Avec E(Pa) module d'Young, ν coefficient de poisson (sans dimension) et ρ (Kg /m³) masse volumique.

Applications: recherche de défauts
mesure d'épaisseur
échographie médicale
microscopie acoustique (très hautes fréquences)
mesure de vitesse
mesure du couple de serrage (mesure d'allongement)

ondes longitudinal



Direction de
propagation

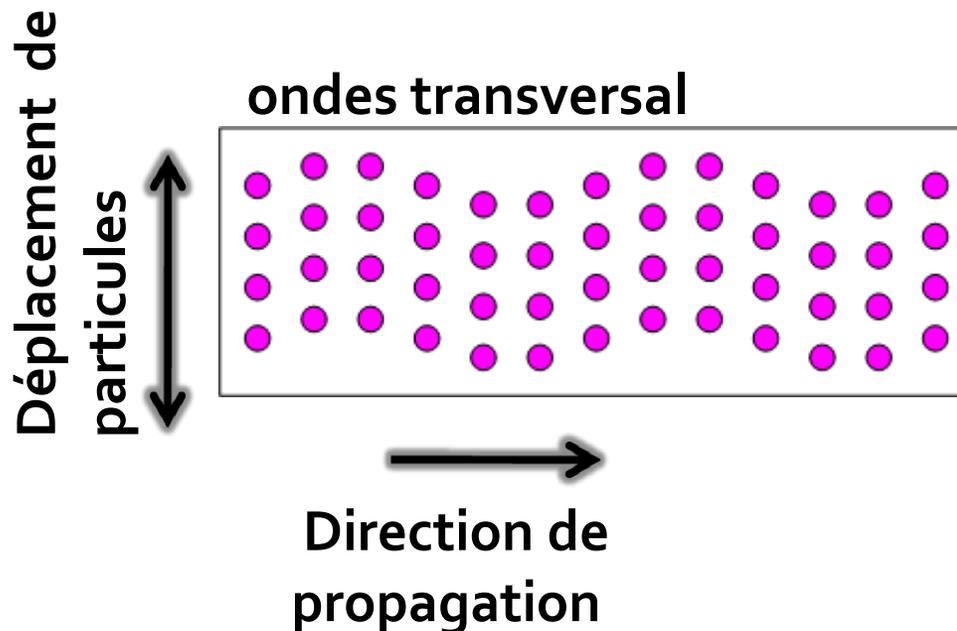
Déplacement de
particules

2. Les ondes transversal (*Ondes de cisaillement*)

$$V_{OT} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx \frac{V_{OL}}{2}$$

Applications

recherche de défauts dans les tubes
recherche de défauts dans les soudures
recherche de criques sous les têtes de rivets
recherche de fissures dans les alésages



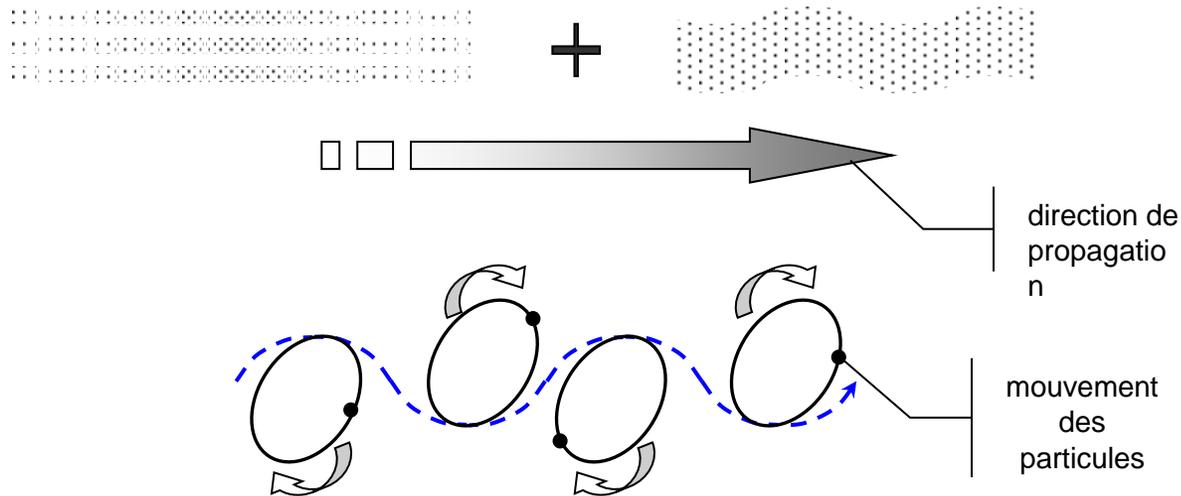
3. Les ondes de surface

les ondes de surface ou ondes de Rayleigh qui n'affectent que la surface du solide sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde. Pour la plupart des matériaux

$$V_{OS} \approx 0.9 \times V_{OT}$$

Applications

recherche de défauts débouchants ou défauts de surface
(nécessite des conditions particulières de propreté et d'état de surface)
recherche de défauts à l'interface (décollement)



COMMENT OBTENIR DES ONDES DE SURFACE ?

(Indication : faire appel aux relations
de snell-Descartes en optique :

$$\sin i_1 / v_1 = \sin i_2 / v_2)$$

Vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans quelques milieux

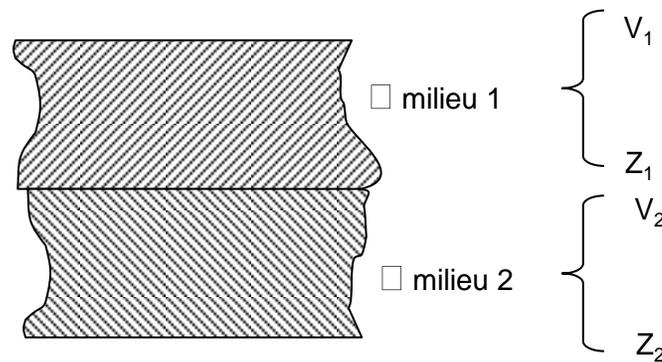
Matériau	Vitesse de propagation des ondes longitudinales	Vitesse de propagation des ondes transversales
	V_L en m/s	V_T en m/s
Aluminium	6 200	3 100
Laiton (suivant composition)	4 700	2 140
Acier non allié	5920	3255
Acier à 1% de carbone normalisé	5940	3220
Acier à 1% de carbone trempé	5850	3150
Acier Inoxydable austénitique	5650	3020
Air	330	-
Aluminium	6300	3100
Argent	3650	1600

PHENOMENES AUX INTERFACES

LOIS DE PROPAGATION

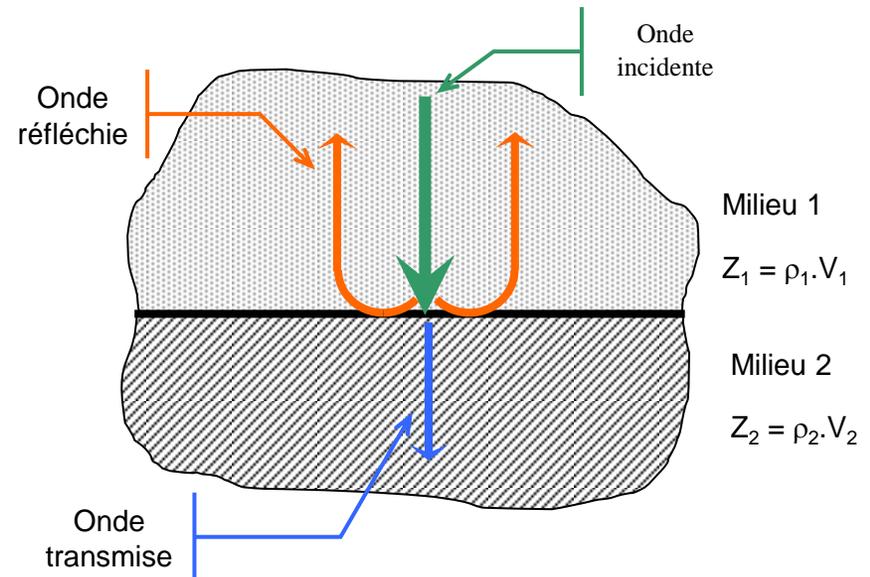
PHÉNOMÈNES AUX INTERFACES - LES LOIS DE PROPAGATION

L'interface est la surface qui sépare deux milieux différents (impédances acoustiques différentes)



Incidence normale

L'axe du faisceau ultrasonore est perpendiculaire à l'interface:



Impédance acoustique = C'est une grandeur, symbolisée par la lettre Z , égale au produit de la masse volumique du matériau par la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans ce matériau.

$$Z = r \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot V \text{ (m/s)}$$

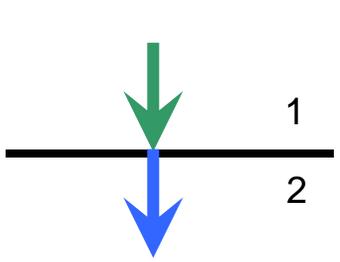
Z s'exprime en $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ c'est la masse ébranlée par une section de 1 m^2 de faisceau ultrasonore pendant une seconde.

Cette grandeur dépend du matériau et de la nature de l'onde ultrasonore. Elle est particulièrement importante pour déterminer les phénomènes qui se produisent lorsque l'onde arrive à l'interface de milieux.

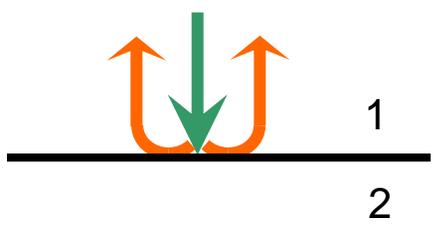
Coefficient de réflexion: $R = \frac{\text{Pression Réfléchié}}{\text{Pression Incidente}}$

Coefficient de transmission: $T = \frac{\text{Pression Transmise}}{\text{Pression Incidente}}$

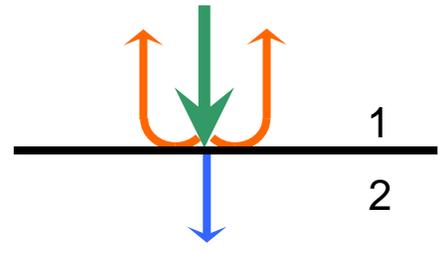
	en Amplitude	en Energie
Coefficient de réflexion R	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$	$\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$
Coefficient de transmission T	$\frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$	$\frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$



Si $Z_1 = Z_2$ transmission totale



Si $Z_1 \gg Z_2$ réflexion totale



Si $Z_1 \neq Z_2$ transmission partielle + réflexion partielle

Matériau	Masse volumique ρ (Kg /m ³)	Vitesse des ondes longitudinales V_L	Vitesse des ondes transversales V_T	Impédance acoustique (Kg.m ⁻² .S ⁻¹)10 ⁶
Aciers	7,8	5900	3230	46
Aluminium	2,7	6320	3080	17
Cuivre	8,9	4700	2260	42
Laiton	8,5	3830	2050	38
Béton	2	4500		11
Plexiglas	1,2	2730	1430	3,2
Verre	2,5	5660	3420	14
Huile	0,8	1500	(1)	1,2
Glycérine	1,3	1920	(1)	2,5
Eau ()	1	1480	(1)	1,5
Quartz	2,7	5750		15
Titanate de baryum	5,7	4400		35
Air	10 ⁻³	340	(1)	4.10 ⁻⁴

Application :

- DETERMINER R% ET T% DANS LE CAS DES
INTERFACES :

eau / acier , eau / aluminium
acier / air , composite / titane

Z_1 / Z_2	R%	T%
eau / acier	88 %	12 %
eau / aluminium	70 %	30 %
acier / air	100 %	0 %
composite / titane	20 %	80 %

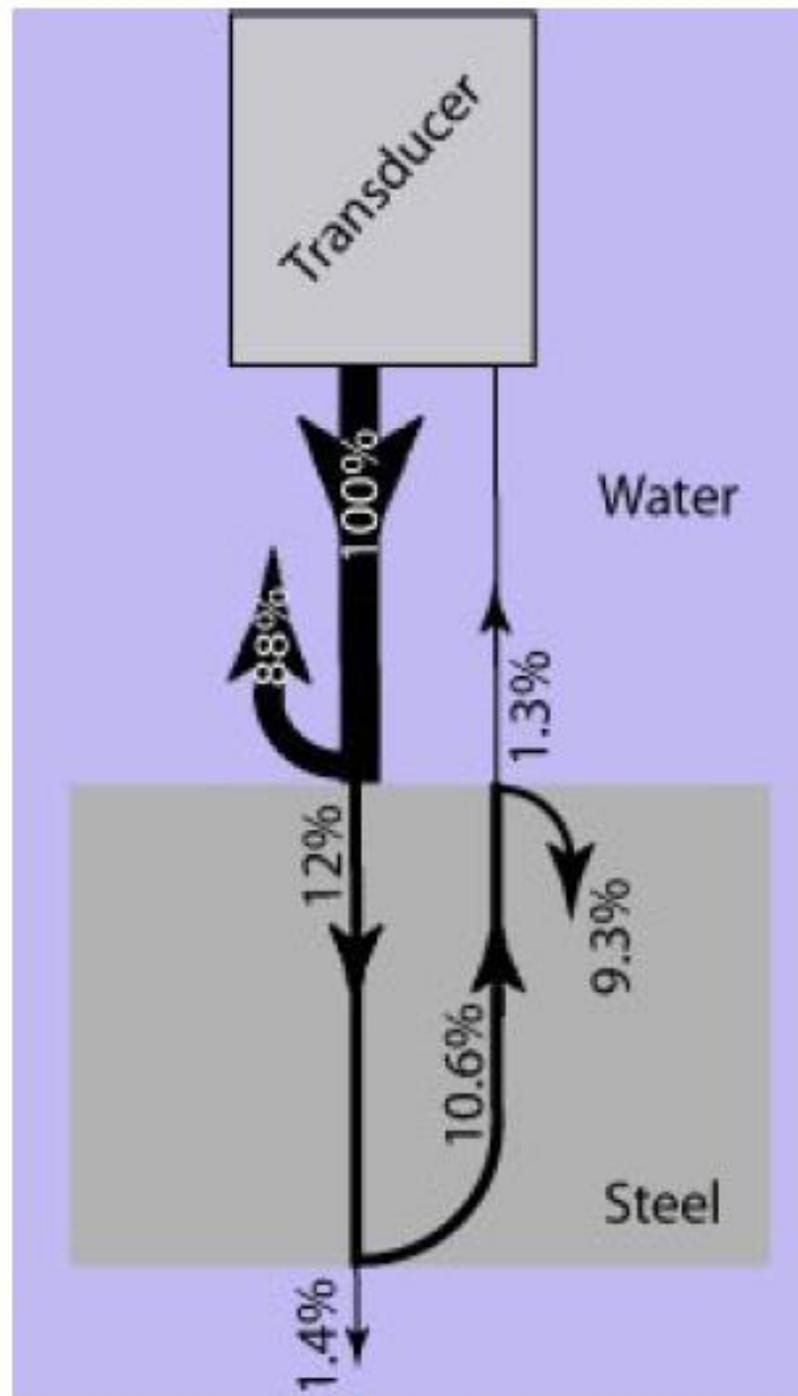
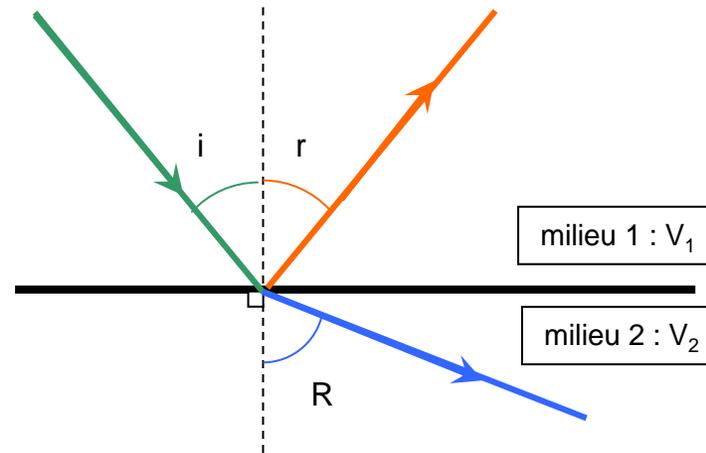


Figure 13

Sous incidence oblique

Cas simplifié:

Lorsque une onde parvient à l'interface de deux milieux avec angle d'incidence i différent de l'angle droit, il se produit deux phénomènes:



Une réflexion : l'onde réfléchie forme avec la normale à l'interface un angle r égal à l'angle d'incidence i .

Une réfraction : l'onde transmise dans le deuxième milieu forme avec la normale à l'interface un angle R qui peut être différent de l'angle d'incidence, si les vitesses de propagation des ultrasons sont différentes dans les deux milieux. L'onde change de direction.

La valeur de l'angle R est donné par la **loi de Descartes** :

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} = \frac{V_1}{V_2}$$

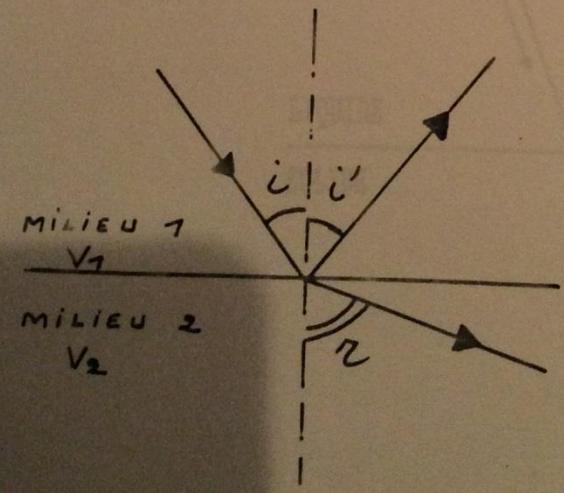
LOIS DE DESCARTES

- LES FAISCEAUX REFLECHIS ET REFRACTES SONT SITUES DANS LE PLAN D'INCIDENCE. (Plan formé par le faisceau incident et la normale à l'interface).

- LES ANGLES DE REFLEXION ET DE REFRACTION SONT DONNES PAR :

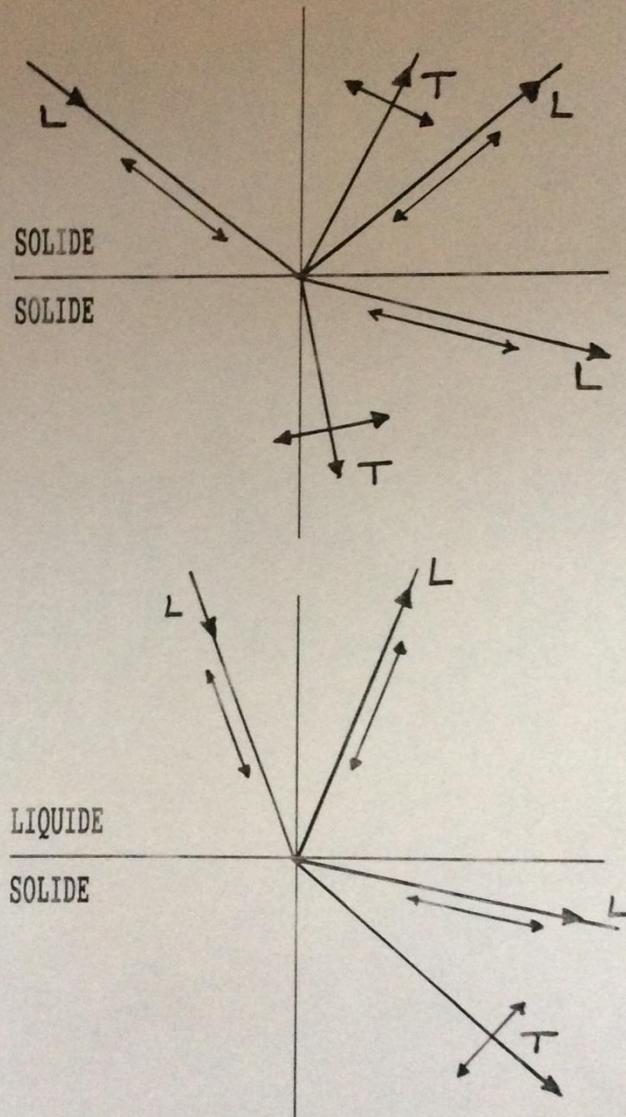
$$\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin i'}{v_1} = \frac{\sin r}{v_2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i = i' \\ \sin r = \frac{v_2}{v_1} \sin i \end{cases}$$



- i : ANGLE D'INCIDENCE
- i' : ANGLE DE REFLEXION
- r : ANGLE RE REFRACTION
- v1 : CELERITE DANS LE MILIEU 1
- v2 : CELERITE DANS LE MILIEU 2

CHANGEMENT DE MODE VIBRATOIRE
A UNE INTERFACE



Exercices :

- Réflexion et réfraction
sous incidences obliques

ETUDE DE LA PRODUCTION DES ONDES ULTRASONORES

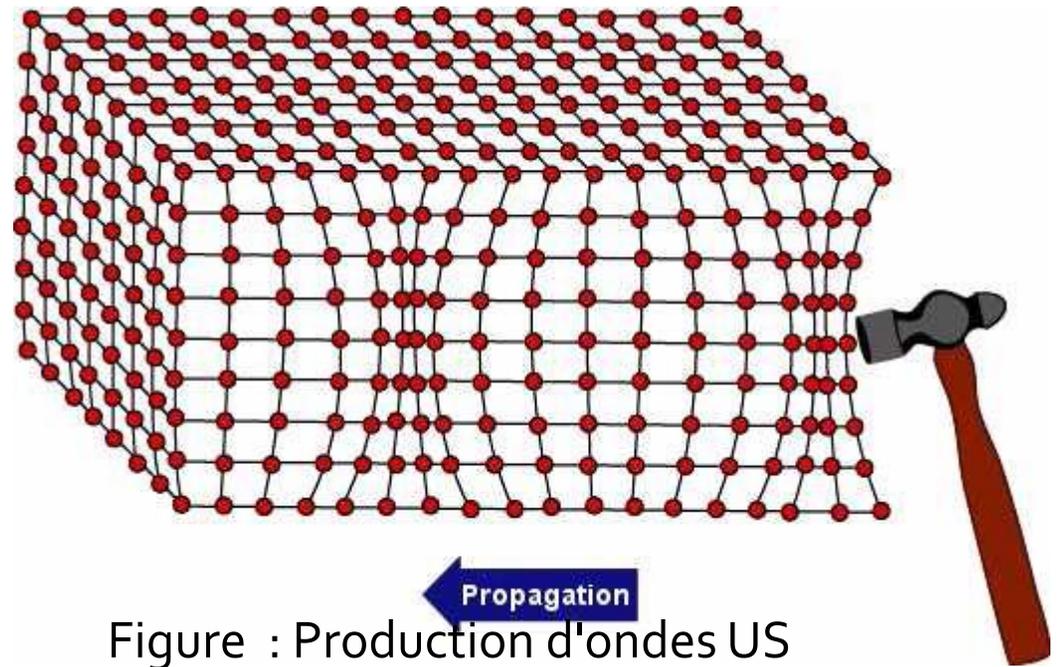
Transducteur = dispositif qui transforme une grandeur physique en une autre grandeur physique, fonction de la précédente.

Dans le cas des ultrasons on utilise des dispositifs (transducteurs) qui transforment une énergie électrique en énergie acoustique, et inversement.

Ces dispositifs fonctionnent dans la plupart des cas suivant le principe de la piezoélectricité.

Production des US.

Pour créer une onde mécanique il faut une excitation mécanique : L'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. L'onde se propage ensuite de proche en proche grâce à l'oscillation des particules autour de leur position au repos.



Plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes US.

Le plus utilisé est la piézo-électricité.

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse).

L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

LE PRINCIPE DE LA PIEZO-ÉLECTRICITÉ

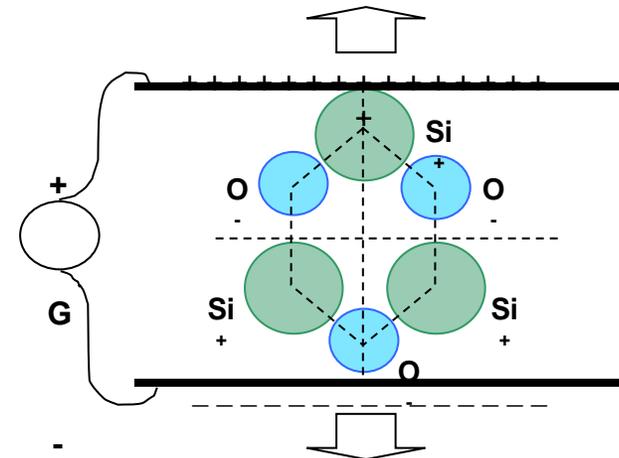
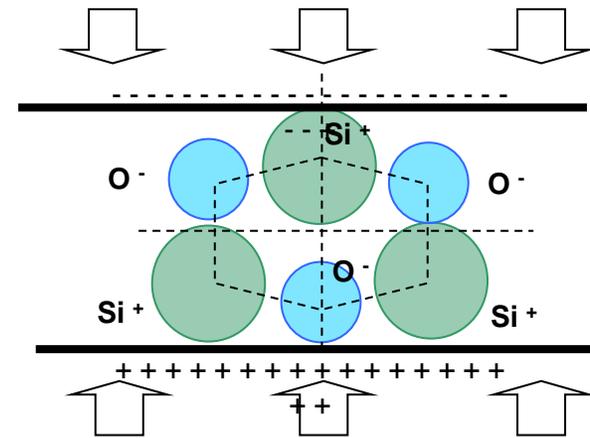
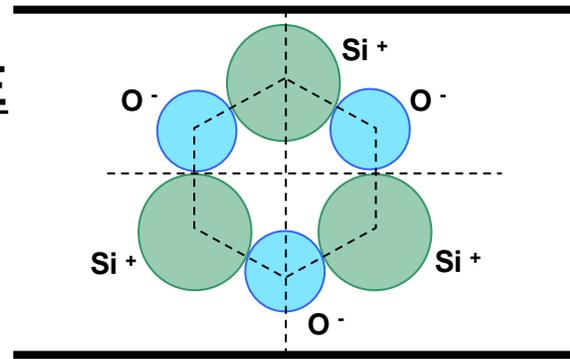
Le quartz (3SiO) est constitué d'ions Silicium positifs et d'ions Oxygène négatif
Au repos, en l'absence de sollicitation, les charges positives et négatives s'équilibrent.

Le phénomène direct (découvert en 1880 par les frères Curie)

Sous l'action d'une pression mécanique, le système se déforme et les charges sont déséquilibrées.
Une différence de potentiel apparaît entre les deux faces de la lame. C'est l'effet direct.

Le phénomène inverse (découvert en 1881 par Lipmann)

Si on applique une tension électrique sur les faces de la lame, le cristal se déforme. C'est l'effet inverse.
Si cette tension est alternative, on va générer une oscillation autour de la position d'équilibre, à une fréquence donnée.



Les matériaux piezo-électriques sont caractérisés par:

- leur pouvoir d'émission
- leur pouvoir de réception
- leur point de Curie.

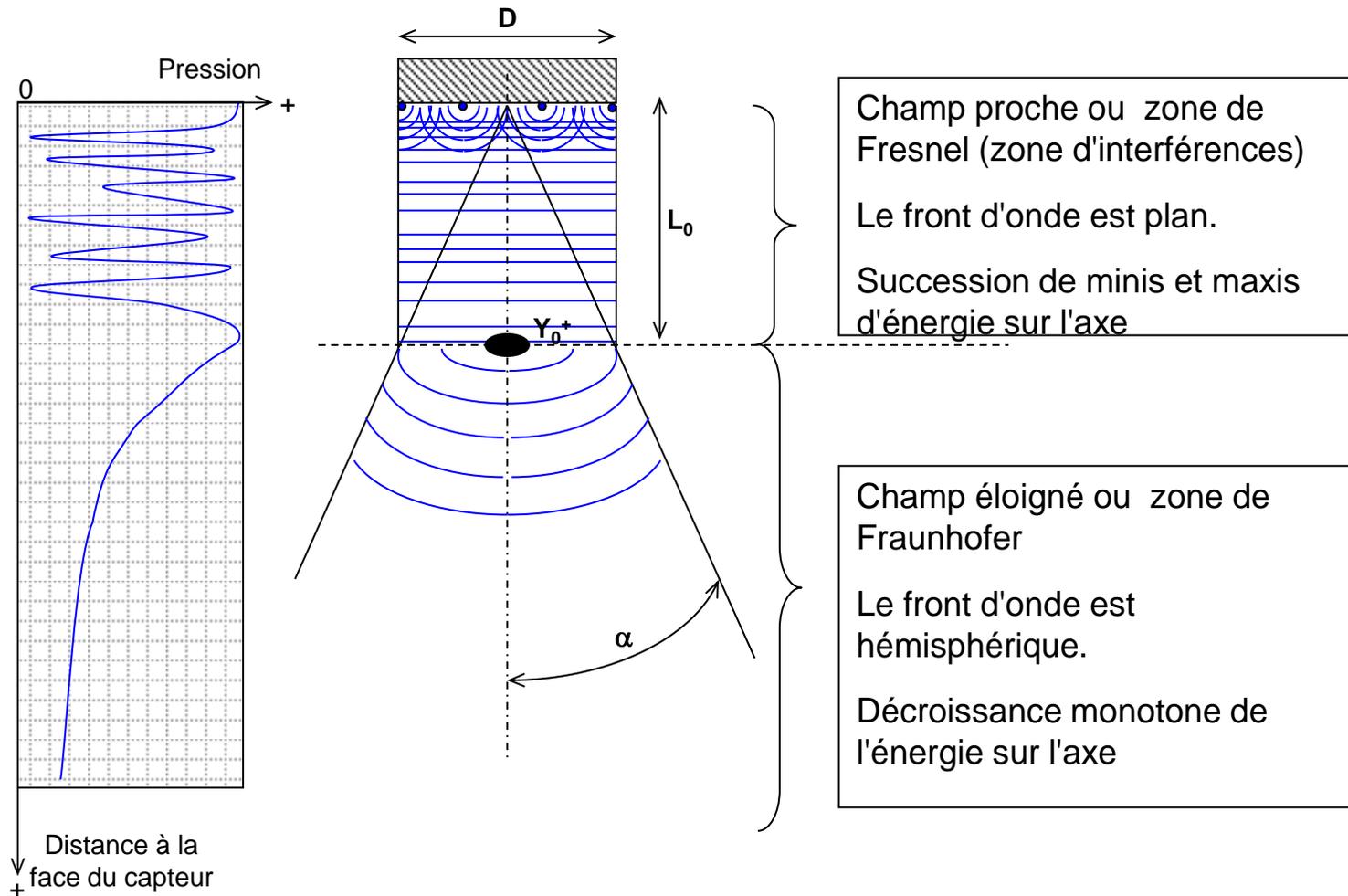
Les différents matériaux (éléments naturels, composés chimiques, éléments artificiels) servant à la réalisation des capteurs sont choisis en fonction de la caractéristique (émission, réception, amortissement, forme)qu'on souhaite privilégier ou des contraintes d'utilisation (milieu, température).

	Quartz	Sulfate de Lithium	Titanate de Baryum	zirconate de plomb
d (10^{-12} .m/v)	2	16	140	260
g (10^{-3} .v.m/N)	50	175	15	25
Point de Curie (°C)	573	75	120	340

LE FAISCEAU ULTRASONORE

Représentation conventionnelle du faisceau

avec D = diamètre du capteur
 λ = longueur d'onde
 f = fréquence ultrasonore
 V = vitesse des ultrasons dans le matériau



Le champ proche ou zone de Fresnel:

Dans cette zone la pression acoustique est perturbée.

"Vu de près", chaque point de la pastille peut être considéré comme une source émettant des ondes et déphasée par rapport aux points voisins. Chaque source interfère avec les sources voisines et, sur l'axe du capteur, la pression acoustique passe par une succession de minima et de maxima.

L_0 est la longueur de la zone de Fresnel:

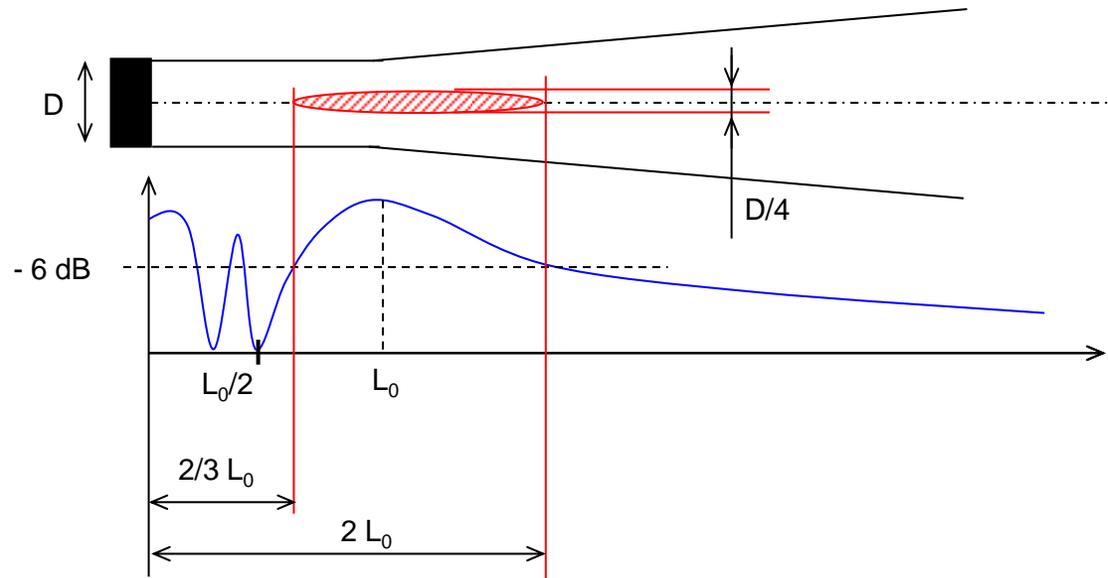
$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot V}$$

Plus on s'éloigne du capteur, plus la pastille est "vue" comme un seul point vibrant en phase.

Au delà de Y_0^+ la pression acoustique décroît de façon uniforme.

On entre alors dans le champ lointain ou zone de Fraunhofer.

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{D} = k \frac{V}{f \cdot D}$$



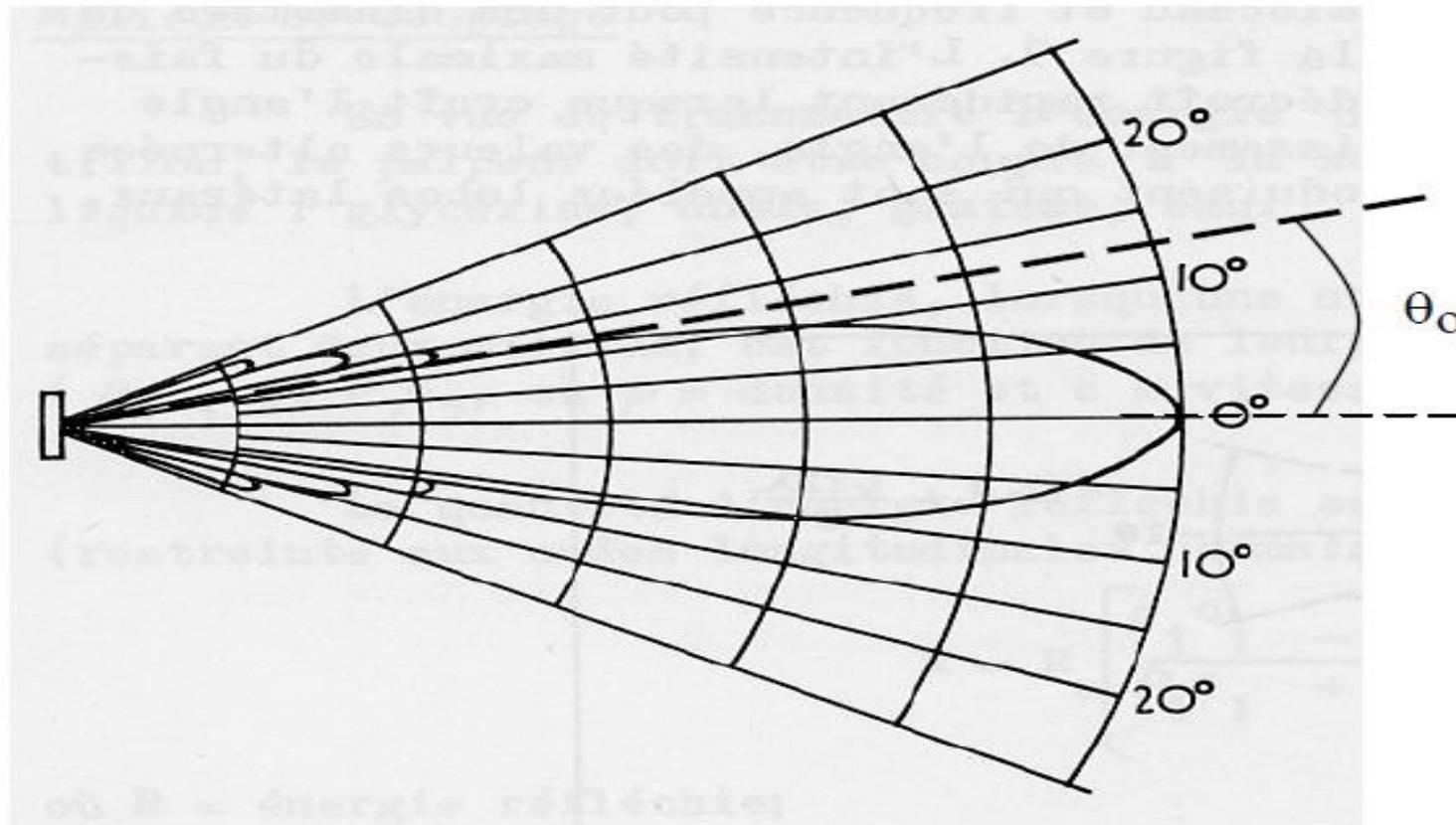


Figure 10 : Diagramme de rayonnement d'un palpeur US

- θ_0 : angle de divergence.
= angle de demi-ouverture du lobe principal (les lobes secondaires sont de très faibles intensités : pas détectables en TP).

On montre que

$$\sin \theta_0 = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

D : diamètre du palpeur

Exemple : Palpeur 5 MHz D = 13 mm. Quel est son angle de divergence dans l'acier ?

.....

**AMORTISSEMENT ET
AFFAIBLISSEMENT DES ONDES
US**

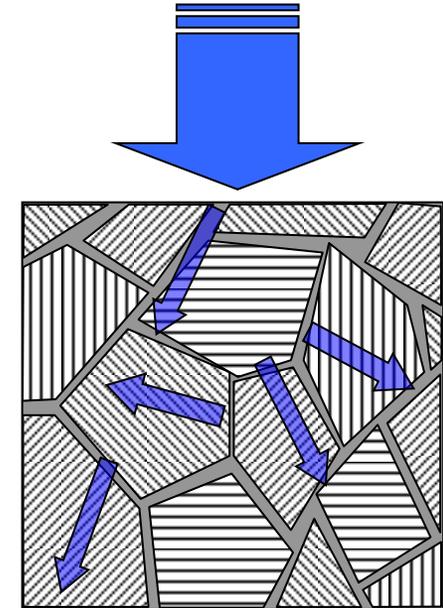
- **L'affaiblissement** est la perte d'amplitude de l'onde. Elle a pour origine trois facteurs principaux:

1- l'absorption : elle résulte des frottements internes et de la conduction thermique. Elle dépend du matériau et augmente avec la fréquence.

2- la diffusion : les hétérogénéités de la matière renvoient ou dévient les ultrasons.

C'est par exemple le cas des joints de grains ou des interfaces fibre / résine dans les composites.

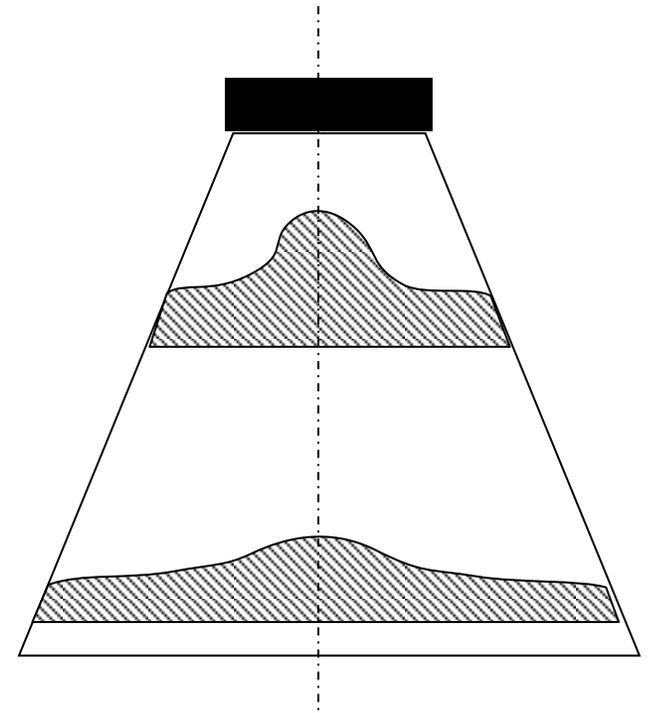
Elle varie avec la grosseur du grain (ou la dimension des hétérogénéités), la fréquence, le nombre "d'anomalies" rencontrées par le faisceau.



3- la divergence:

$$\sin \alpha = k \cdot \frac{\lambda}{D}$$

l'énergie se trouve répartie dans un volume plus grand. donc la divergence dépend de la fréquence, du milieu et du diamètre du capteur (la divergence diminue lorsque le diamètre augmente)

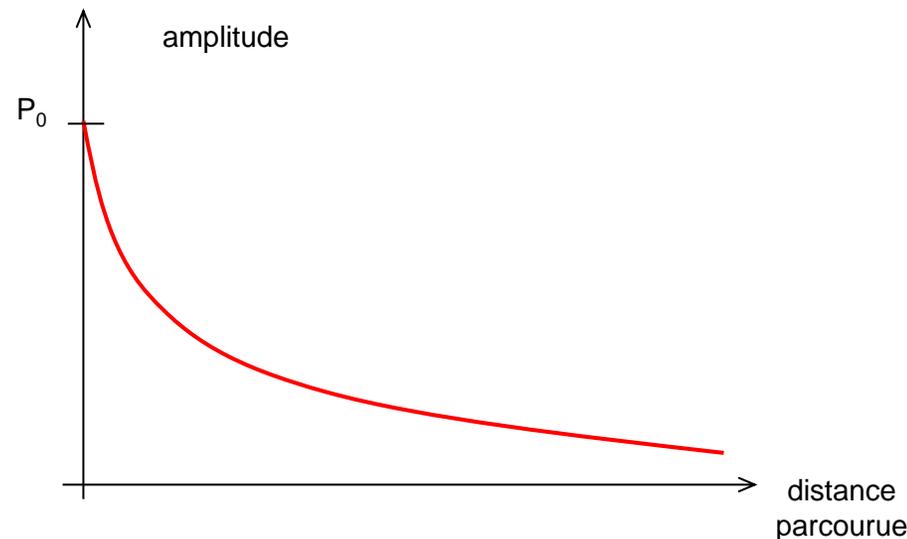


4- Atténuation intrinsèque : On montre également que l'amplitude de l'onde décroît de façon exponentielle avec la distance parcourue dans le matériau

$$\frac{P_x}{P_0} = e^{(-a \cdot x)}$$

où:

- P_x désigne l'amplitude après une distance parcourue x .
- P_0 est l'amplitude initiale
- a est un coefficient propre au matériau (atténuation intrinsèque)



LES CAPTEURS

LES CAPTEURS

Les capteurs sont des systèmes transducteurs (qui transforment une énergie électrique en énergie mécanique et inversement).

Il sont également appelés traducteurs ultrasonores ou palpeurs lorsqu'ils sont utilisés au contact de la pièce.

Un traducteur est caractérisé principalement par

ses dimensions / sa géométrie : divergence, champs proche....

sa fréquence : sensibilité, divergence, champs proche, affaiblissement de l'onde...

La sensibilité est la dimension du plus petit défaut décelable

son amortissement : énergie, pouvoir de résolution,

Le pouvoir de résolution est la capacité à séparer des discontinuités proches les unes des autres en profondeur.

sa plage / domaine d'utilisation : température, immersion

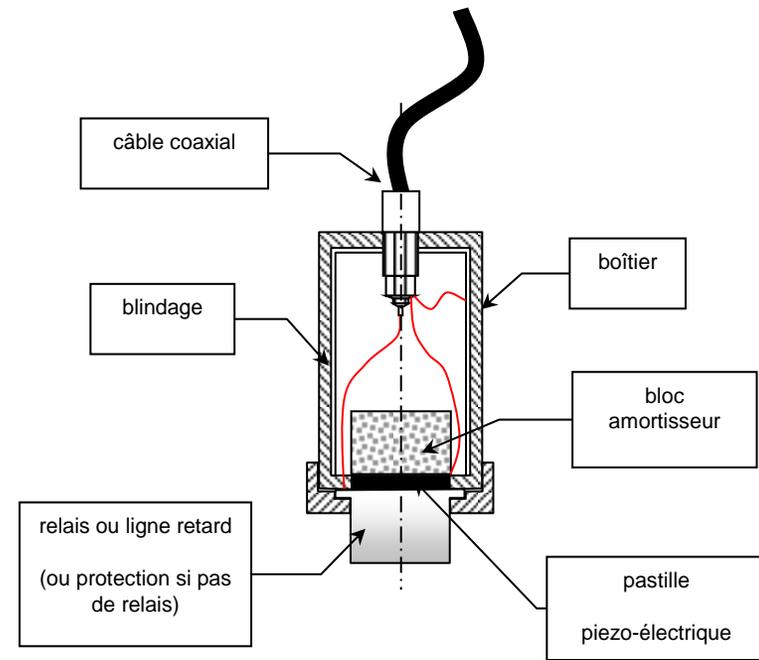
Pour obtenir une fréquence propre fondamentale, de la pastille piézoélectrique (résonance qui permet d'améliorer le rendement) on vise une épaisseur e de la pastille, telle que:

$$f = v/2.e$$

Palpeur droit avec ligne retard:

Le relais permet de sortir la zone de Fresnel de la partie inspectée, de protéger l'élément actif du palpeur (pastille). Il peut également être usinée en forme.

L'amortisseur permet de réduire dans le temps la vibration de la pastille, et d'empêcher la propagation des ondes ultrasonores vers l'arrière du palpeur.

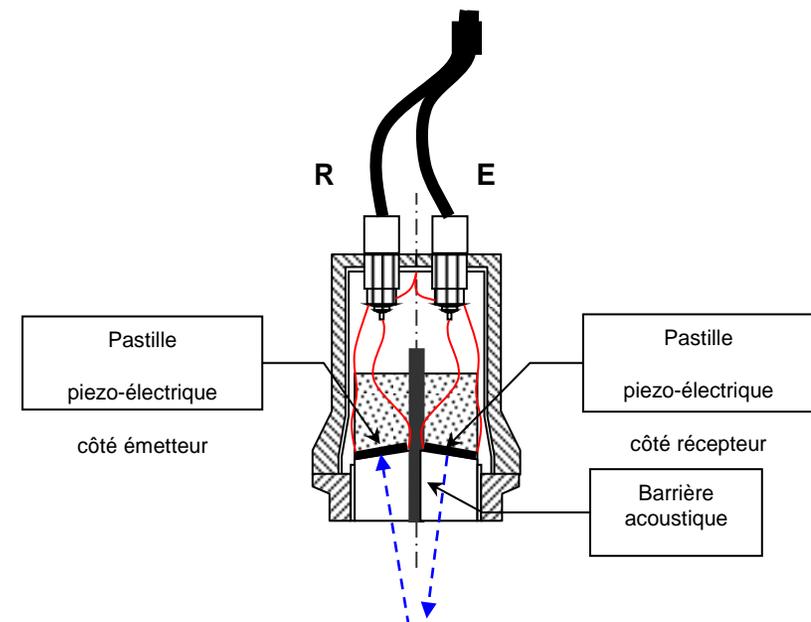


Palpeur droit bi-élément:

les fonctions "émetteur" et "récepteur" sont physiquement séparées et isolées par une barrière acoustique.

l'axe de chaque élément est légèrement incliné par rapport à la normale.

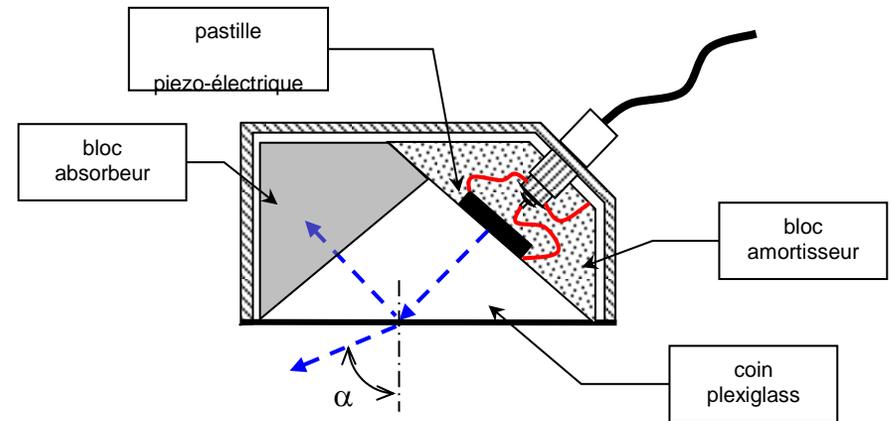
L'angle formé par les deux axes des faisceaux est appelé angle de toit.



Palpeur d'angle

Le palpeur est caractérisé par son angle de réfraction α pour un matériau donné (généralement dans l'acier).

Le bloc absorbeur évite les échos parasites dus aux rebonds dans le boîtier.

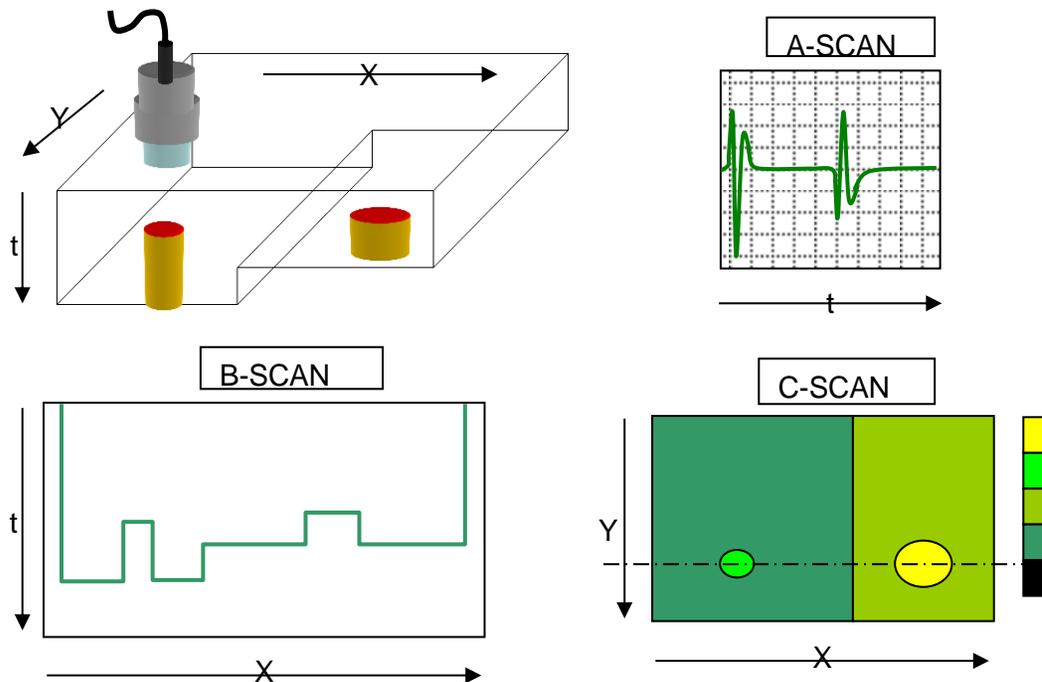


LA REPRÉSENTATION DES MESURES

Représentation de type A (A-Scan) : c'est la visualisation du signal ultrasonore dans laquelle le temps de parcours de l'onde ultrasonore est porté sur l'axe des abscisses et l'amplitude sur l'axe des ordonnées.

Représentation de type B (B-Scan) : Dans un contrôle par écho c'est une vue en coupe dans le plan d'incidence des indications ultrasonores.

Représentation de type C (C-Scan) : représentation des indications ultrasonores projetées sur un plan parallèle à la surface de contrôle (l'information mesurée est généralement représentée par une échelle de couleurs)



MÉTHODES D'INSPECTION ULTRASONORE

1. EXAMEN PAR RÉFLEXION (PAR ÉCHO) :

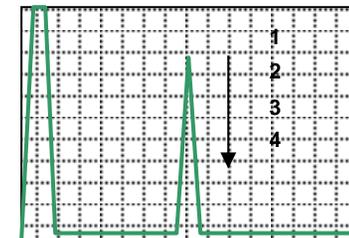
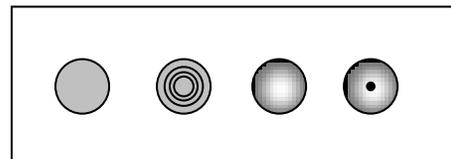
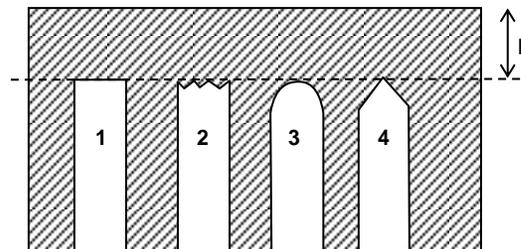
Dans cette méthode la capteur est unique et joue le rôle d'émetteur et de récepteur.
Chaque changement de milieu se caractérise par une différence d'impédance acoustique et donc une interface qui va renvoyer tout ou partie de l'onde acoustique incidente (un défaut dans la matière est considéré comme un milieu différent du matériau dans le lequel il se trouve).

Notion de réflectivité : l'amplitude de l'écho de réflexion va dépendre de :

- La profondeur de l'indication
- Sa forme
- Son orientation par rapport à l'incidence du faisceau
- Ses dimensions
- Son impédance acoustique (par rapport au milieu inspecté)

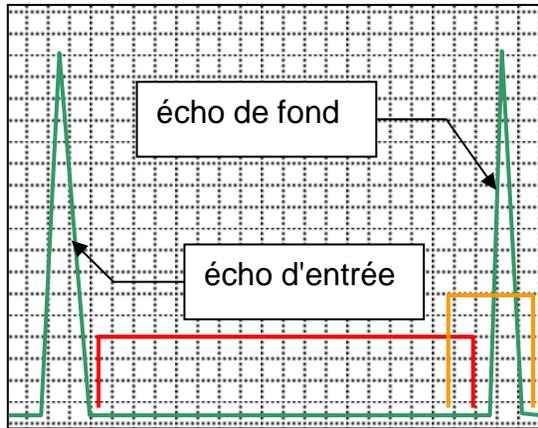
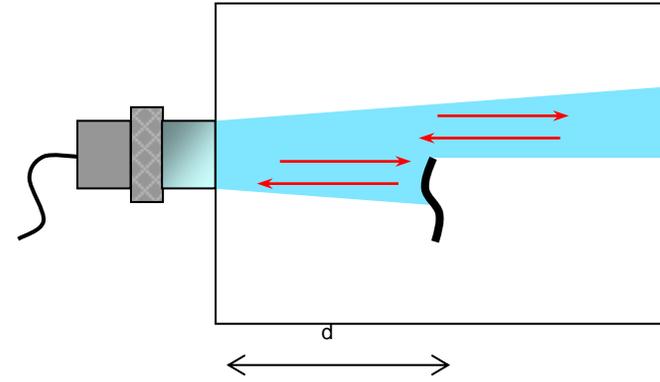
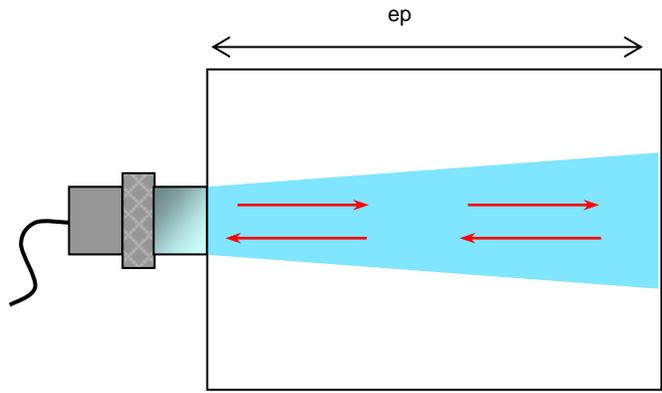
On peut surveiller l'état d'un écho (écho de fond, écho d'interface) et/ou l'apparition anormale d'un écho.

Les deux informations amplitude et temps sont analysées, il est donc important de pouvoir connaître les caractéristiques ultrasonores des milieux traversés (vitesse de propagation, atténuation) pour établir un diagnostic précis (nature et localisation des indications)



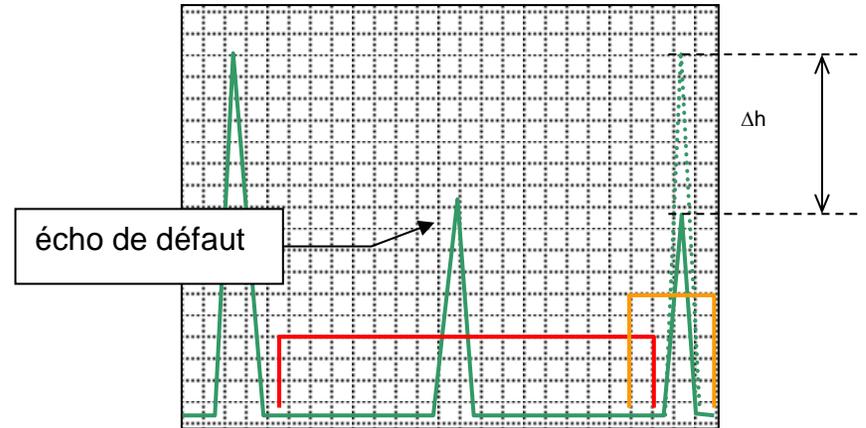
- 1 = référence
- 2 = influence de l'état de surface
- 3 = influence de la forme
- 4 = influence de l'orientation

ondes longitudinal



$$t = 2.ep / V$$

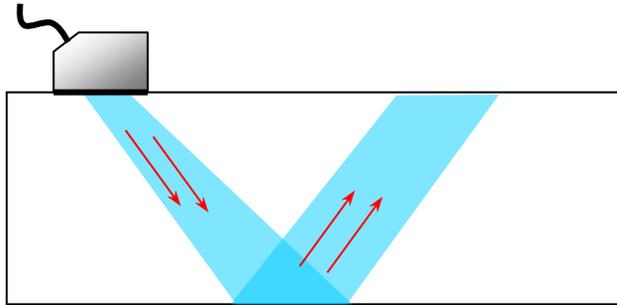
Pièce saine



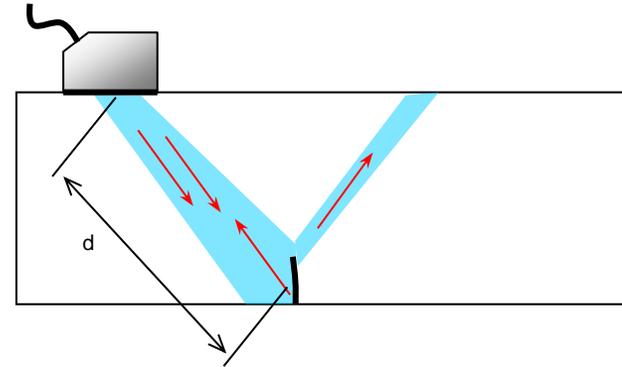
$$t = 2.d / V$$

Présence d'un défaut

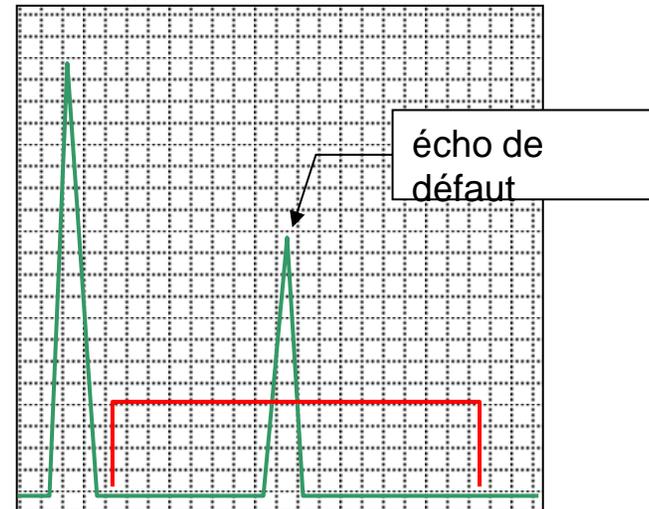
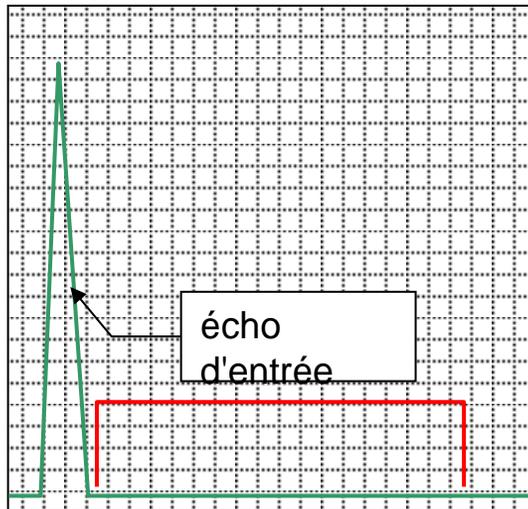
ondes transversal



Pièce saine

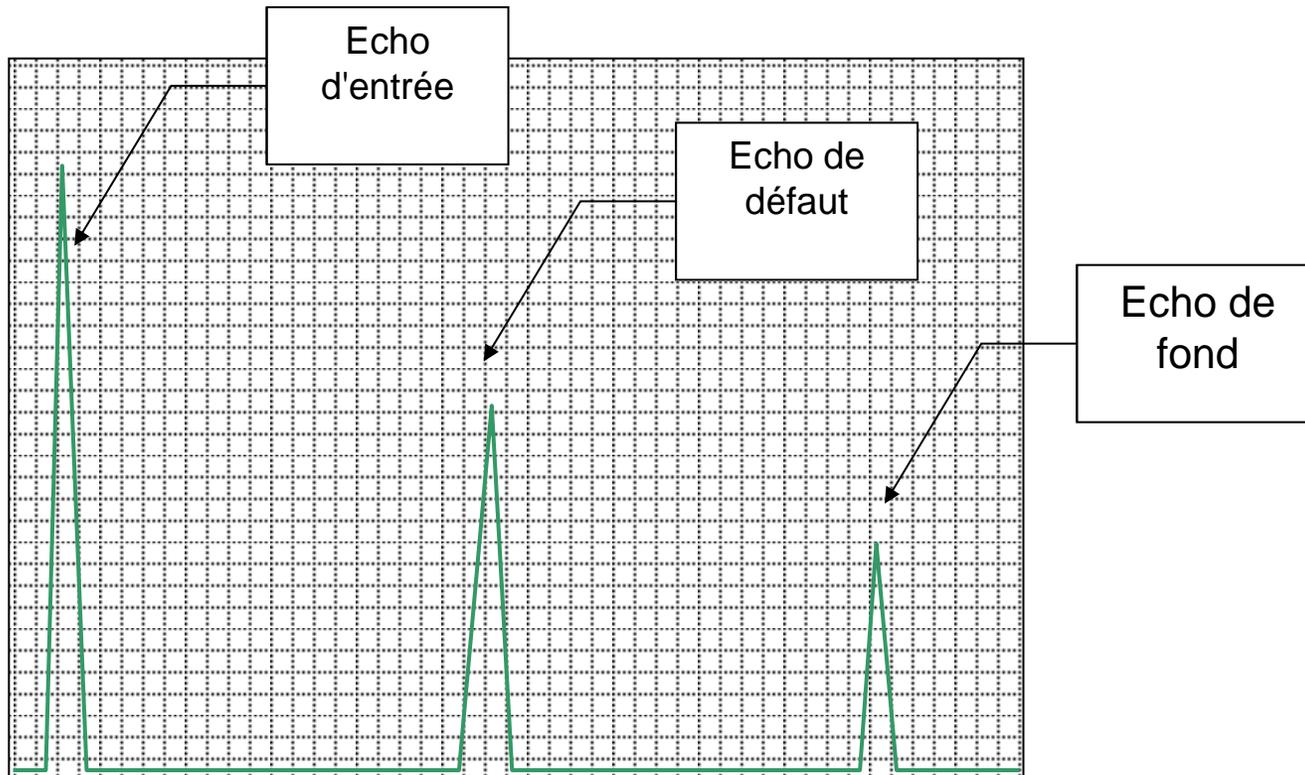
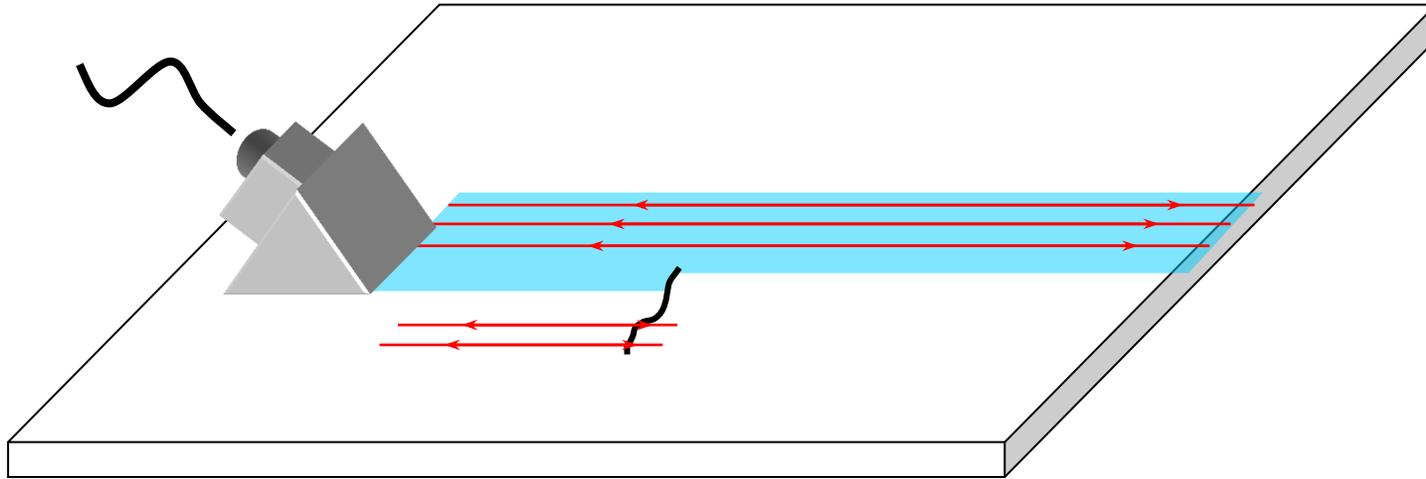


Présence d'un défaut



$$\leftarrow t = 2.d/V \rightarrow$$

ondes de surface



MÉTHODES D'INSPECTION ULTRASONORE

2. EXAMEN PAR TRANSMISSION (OU PAR TRANSPARENCE)

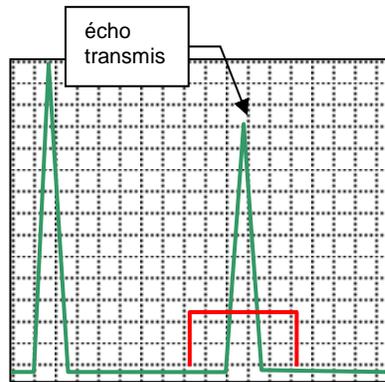
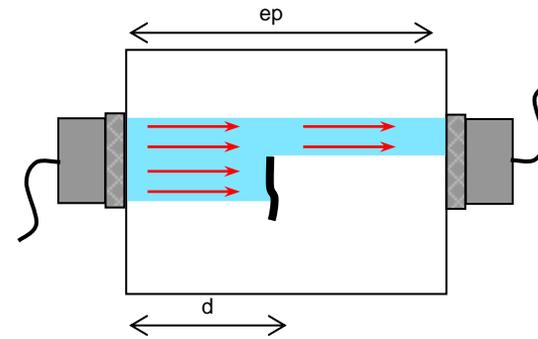
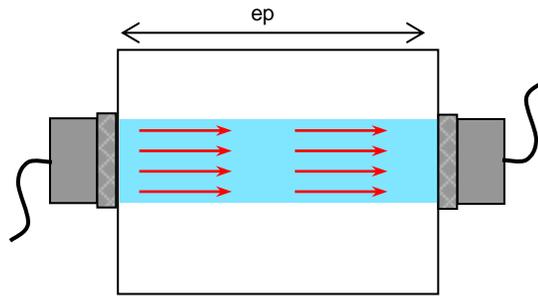
Dans cette méthode, un capteur joue le rôle d'émetteur et un capteur joue le rôle de récepteur. L'onde ultrasonore envoyée par l'émetteur arrive au récepteur après avoir traversé la pièce inspectée. L'énergie captée par le récepteur (qui se traduit par l'amplitude du signal visualisé sur l'appareil) dépend de l'énergie fournie par l'émetteur et des milieux traversés (atténuation intrinsèque des matériaux, interfaces...).

Toute anomalie dans la pièce contrôlée va se traduire par **une atténuation "anormale" du signal, voir une disparition totale.**

Par anormale on entend différente de celle obtenue sur des zones identiques de la pièce (absorption locale) ou de l'étalon.

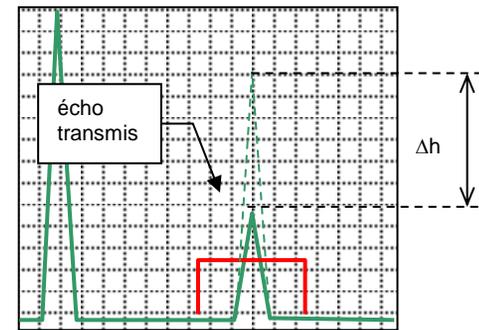
On va privilégier la mesure de l'amplitude de l'écho plutôt que le temps.

ondes longitudinal



$$t = ep / V$$

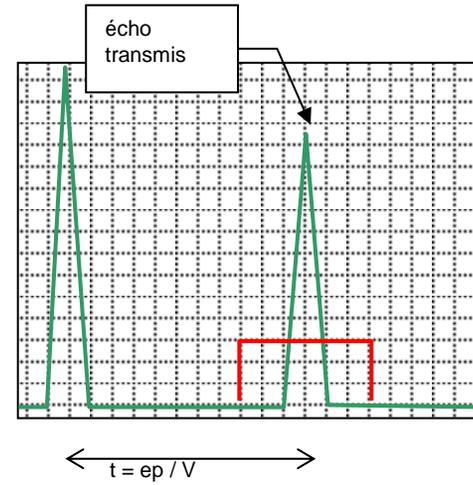
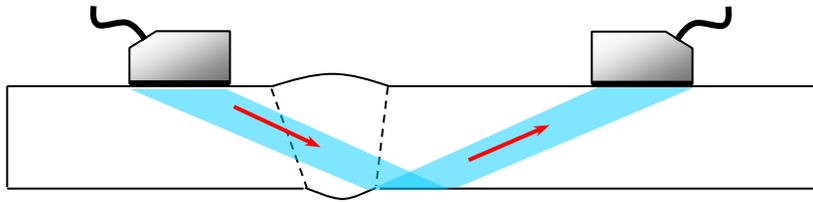
Pièce saine



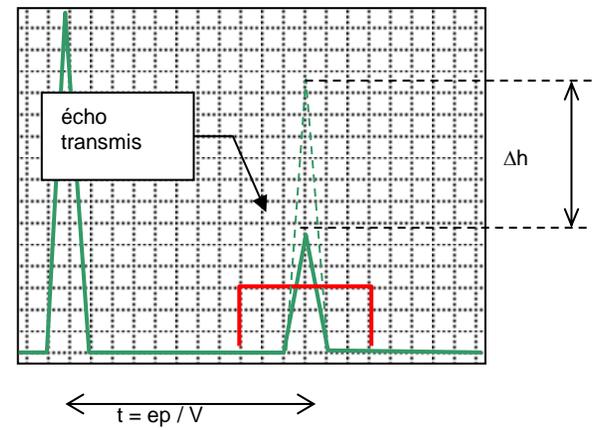
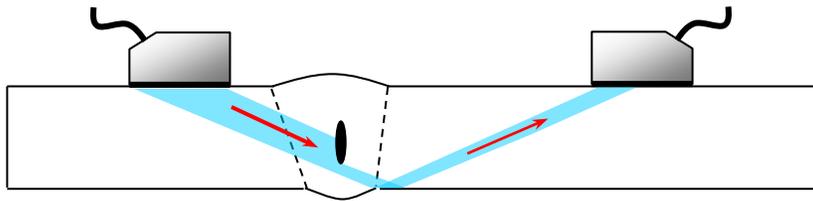
$$t = ep / V$$

Présence d'un défaut

ondes transversal



Pièce saine



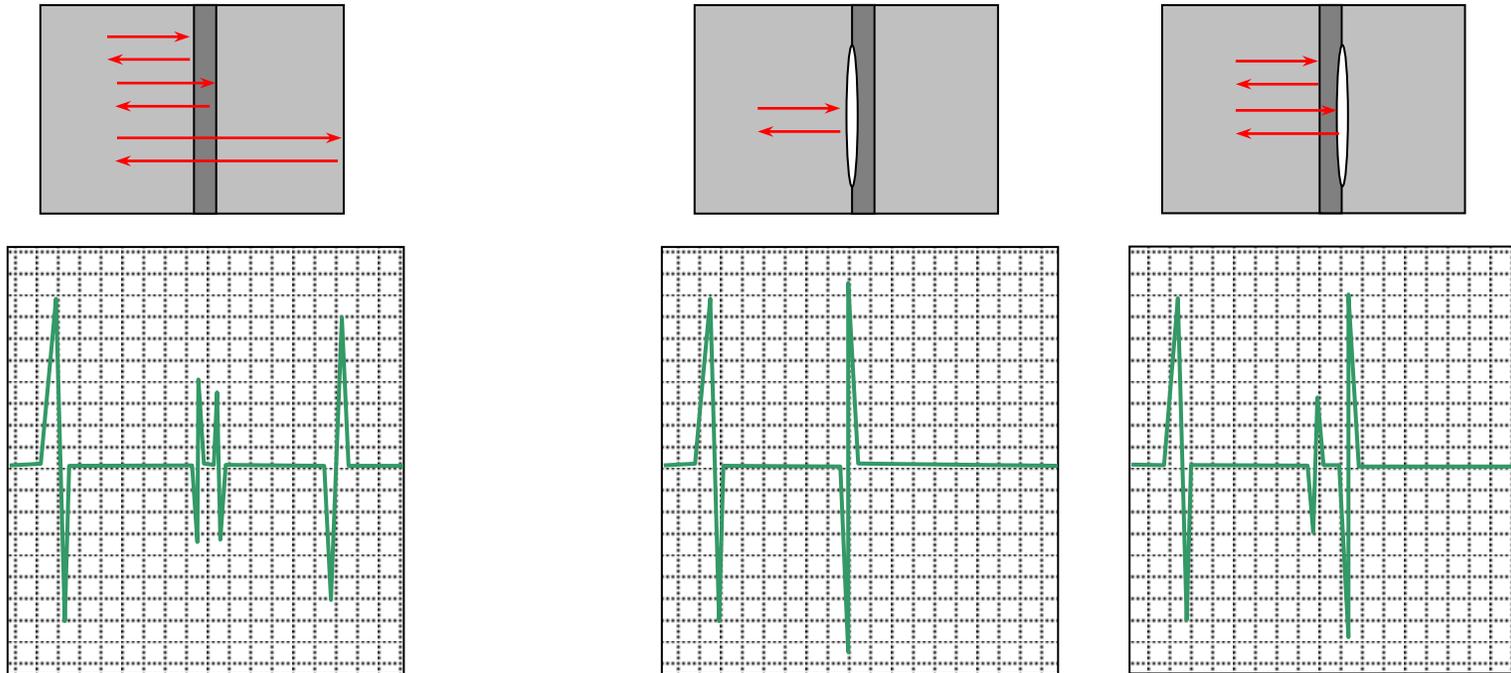
Présence d'un défaut

TECHNIQUES DE CONTRÔLE

CONTRÔLE DE COLLAGE

On peut contrôler les structures collées par réflexion, par transmission ou par résonance.

Pour contrôler les collages en ondes longitudinales, et par réflexion, on va surveiller l'écho de fond mais également les échos d'interface entre les milieux successifs.



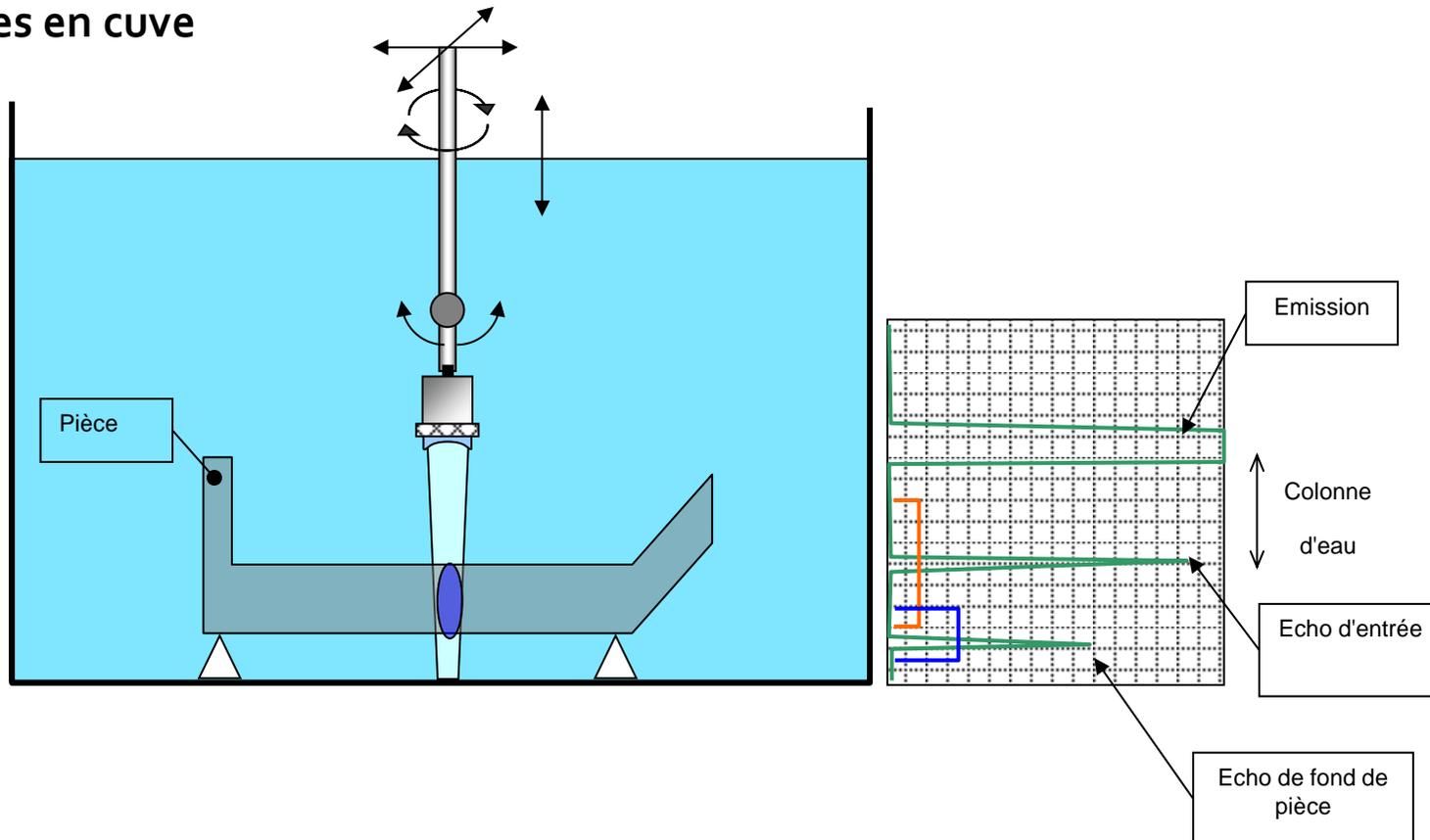
Collage correct

Défauts de collage

CONTRÔLE EN IMMERSION

Dans le cas d'un contrôle en immersion la pièce et le(s) capteur(s) sont totalement (contrôle en cuve) ou partiellement (contrôle par jets d'eau) immergés dans l'eau.

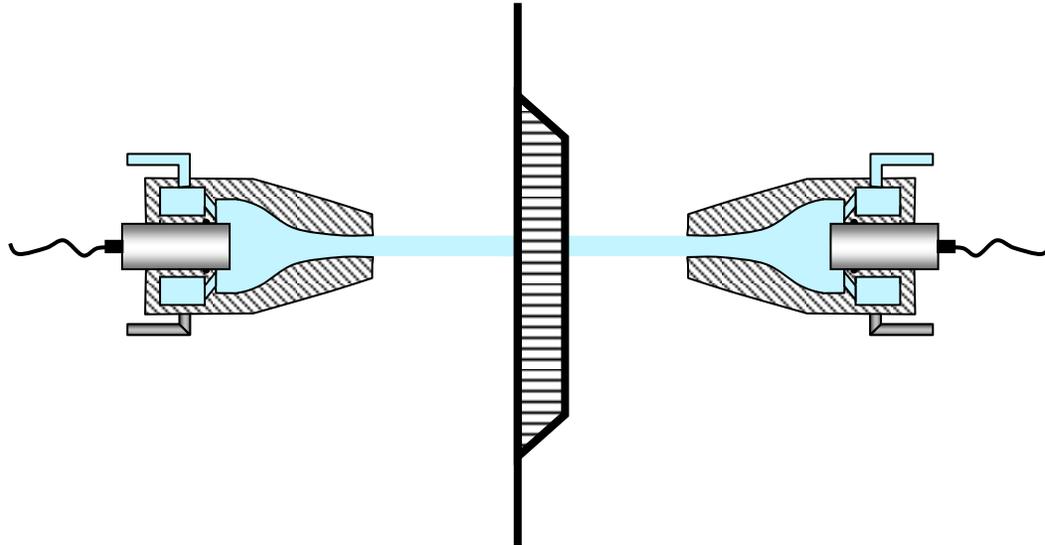
Contrôles en cuve



contrôle par jets d'eau

Dans cette méthode on utilise un jet d'eau pour assurer le couplage entre le capteur et la pièce.

On parle d'immersion localisée.

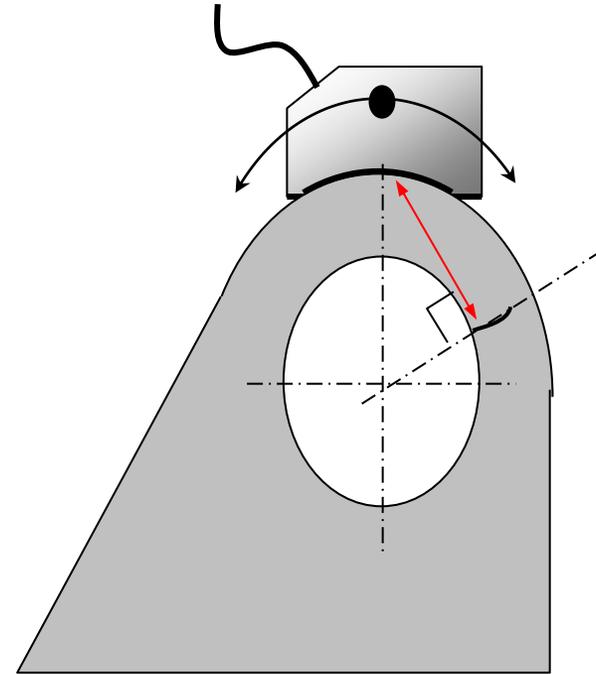
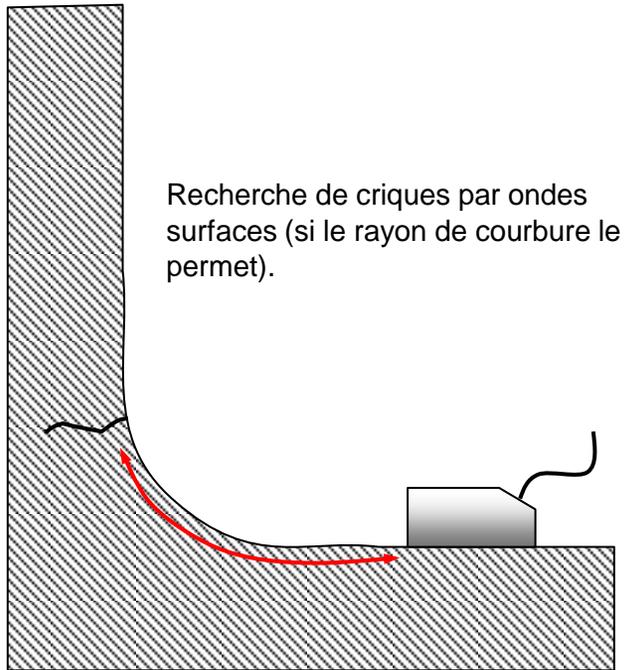


Cette technique est généralement utilisée en transmission sur des installations pilotées (plus rarement en réflexion).

Elle est donc bien adaptée au contrôle automatisé des structures absorbantes. Dans ce cas, on cherche à privilégier la pénétration, utilisant par exemple des émetteurs à train d'ondes.

Les deux buses doivent être maintenues face à face et alignées. Le jet d'eau doit être laminaire afin de ne pas perturber la transmission des ultrasons.

Exemples particuliers de contrôle



Recherche de criques initiées dans un alésage (orientation radiale) avec un sabot en forme.

L'angle d'incidence est calculé pour que le faisceau vienne tangenter l'alésage

L'ÉTALONNAGE ET EVALUATION DES DÉFAUTS

Il est indispensable de procéder à un étalonnage ou calibrage de la chaîne de mesure:
Avant chaque contrôle: pour vérifier les performances de l'équipement et ajuster les réglages à la configuration du contrôle (matériau / pièce à contrôler, capteur utilisé, critères...)

Les appareils numériques disposent de fichiers qui permettent de rappeler des réglages stockés en mémoire. Cette facilité ne dispense pas d'effectuer certaines vérifications avant de commencer le contrôle.

En cours de contrôle: si la durée du contrôle est longue et qu'une dérive de l'appareil est possible, il est préconisé de vérifier les paramètres de contrôle principaux à intervalles réguliers.

Périodiquement: comme la grande majorité des appareils de mesure, les équipements de contrôle ultrasonore sont soumis à des vérifications périodiques avec un raccordement de la chaîne d'étalonnage aux étalons nationaux (généralement semestrielles ou annuelles). Il s'agit d'une vérification complète dont la périodicité est adaptée en fonction du type d'appareil, de sa stabilité entre deux vérifications, et de l'utilisation qui en est prévue. Le référentiel actuel est la norme européenne EN 12668.

ETALONNAGE EN DISTANCE

Il s'agit d'ajuster la base de temps afin que l'échelle horizontale de l'appareil corresponde exactement à une distance dans le matériau parcouru dans la configuration de contrôle (par exemple : 10^{ème} graduation = 100 mm d'acier en ondes longitudinales).

On s'arrange généralement pour avoir une échelle simple et pour que la déviation la plus à gauche de l'écran corresponde à l'épaisseur maximale à contrôler.

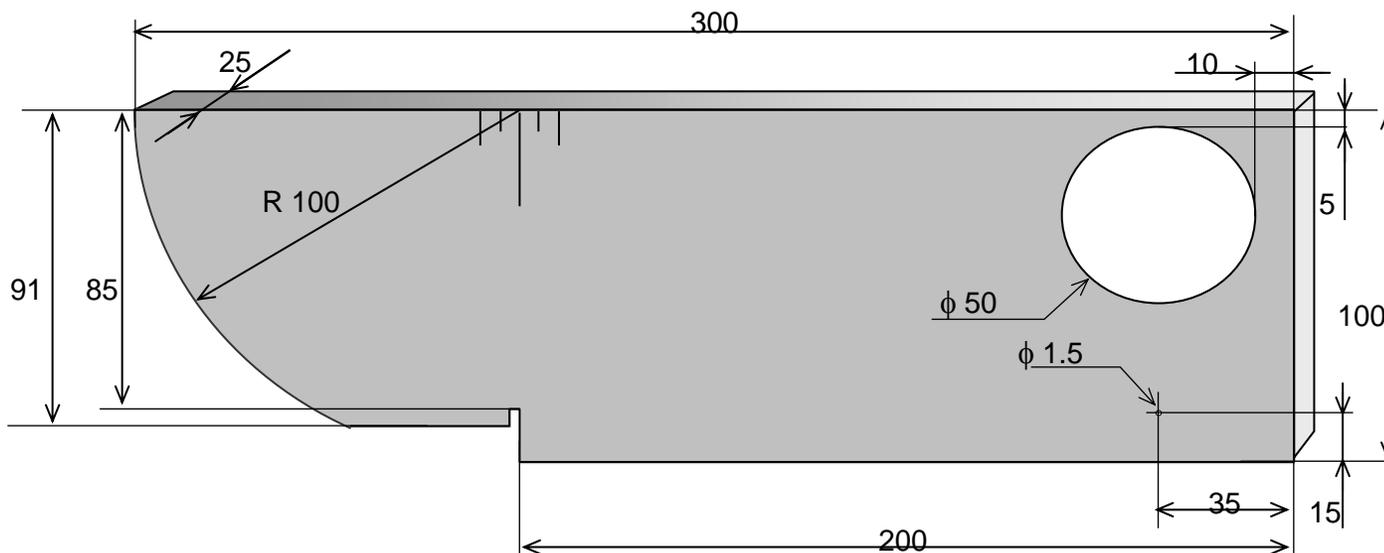
Toute indication affichée par l'appareil peut ainsi être positionnée dans la pièce.

On utilise pour ça des blocs ou plaques de références, dans la même matériau que la pièce à contrôler, dans lesquels sont présents des réflecteurs placés à des distances parfaitement connues ou présentant des épaisseurs graduelles (bloc NFA 09-310 ou cales à gradins par exemple).

L'appareil va être réglé pour afficher les échos de ces réflecteurs à la bonne distance.

La plupart des appareils récents disposent d'un calculateur qui permet d'afficher directement la profondeur en ajustant généralement la vitesse de propagation et le décalage de zéro.

Certains appareils permettent lorsqu'on travaille en incidence oblique d'afficher la distance réelle ou bien la profondeur et la distance projetée à la surface de la pièce.



ETALONNAGE EN AMPLITUDE

L'amplitude d'un écho n'a pas de signification immédiate (le contrôle par ultrasons est une méthode comparative). Il faut disposer d'une référence à laquelle l'amplitude de l'écho puisse être comparée.

On utilise pour ça des blocs ou éprouvettes de référence ou étalons, qui comportent des défauts naturels ou artificiels.

L'avantage des défauts artificiels est qu'on peut maîtriser leur emplacement et leurs dimensions, mais ils ont l'inconvénient de ne pas totalement représenter d'un défaut réel.

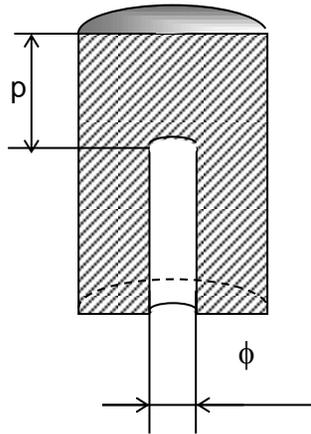
Les défauts artificiels peuvent être: des entailles électro-érodées, des traits de scie, des trous à fond plat, des insertions de film téflon, des manques d'adhésif, des corps étrangers..... Il sont censés représenter au mieux les défauts naturels qui sont susceptibles d'être trouvés dans la pièce (en fonction du matériau, du mode d'élaboration, du stade de contrôle)

Il est également important de pouvoir disposer d'une référence sans défaut qui caractérise un matériau "sain", de manière à quantifier une éventuelle atténuation du signal.

Lors d'un contrôle on peut être amené à augmenter le gain de plusieurs dB par rapport au gain qui a servi à la calibration, ceci pour faciliter la visualisation de petites indications et pallier aux variations de couplage. Mais pour évaluer une indication il est nécessaire de revenir au gain de référence.

Les éprouvettes de référence servent à déterminer les réglages de la chaîne de contrôle, à évaluer les indications détectées et à vérifier la reproductibilité du contrôle (contrôle périodique sur installations automatiques).

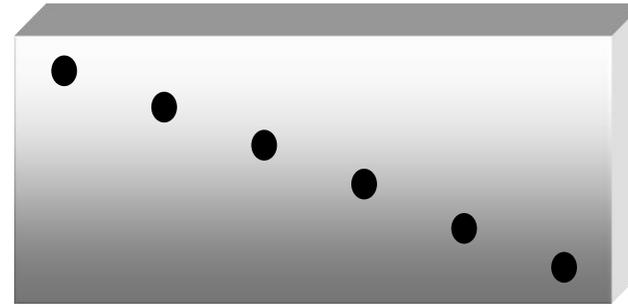
Exemples de blocs ou éprouvettes de références.



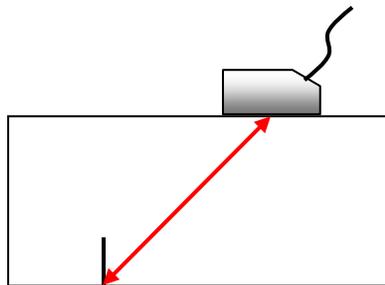
Bloc trou à fond plat.

Généralement par série de blocs d'un même matériau.

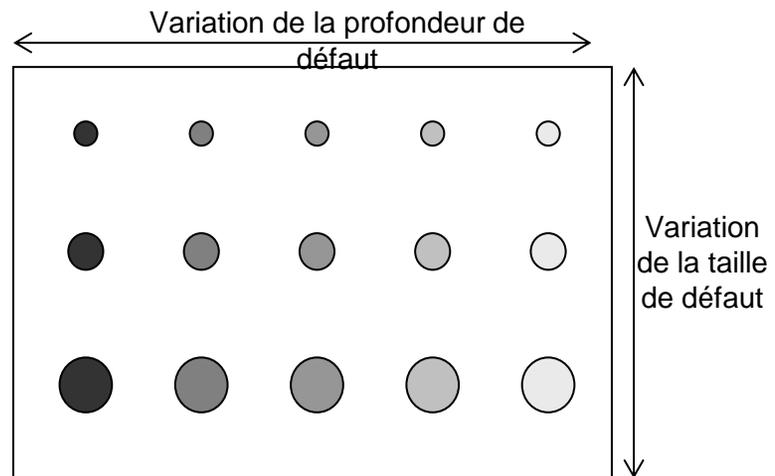
Dans une série on fait varier le diamètre du trou et la distance par rapport à la face de sondage.



Génératrices de trous.



Bloc avec entaille.



Insert téflon entre les plis carbonés

Utilisation des CAD (Courbe Amplitude Distance):

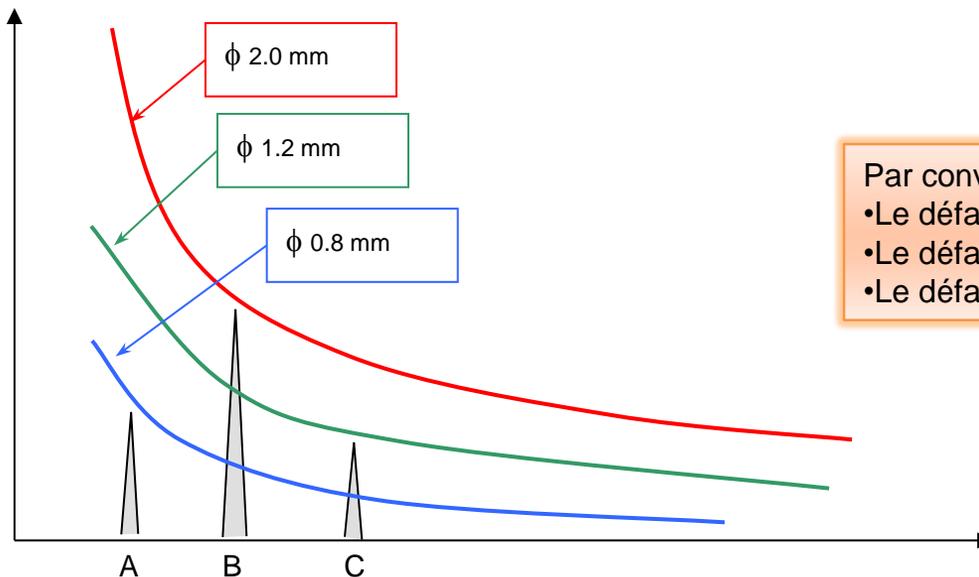
On utilise une série de blocs étalons comportant des trous à fond plat de différents diamètres (fonction de la taille du défaut minimal à trouver)

On règle l'appareil pour que le trou du plus petit défaut situé à une profondeur voisine de l'épaisseur de la pièce à contrôler soit parfaitement détectable.

A l'aide des blocs, on trace les courbes (pour un gain de référence constant) amplitude de l'écho en fonction de la distance à la face de sondage (profondeur), pour chaque taille de défaut.

On contrôle ensuite la pièce avec la même configuration matérielle (même capteur, mêmes réglages), avec un gain éventuellement majoré de quelques dB.

Toute indication sera positionnée sur le graphique (en ayant soin de revenir au gain de référence qui a servi à tracer les courbes) en fonction de sa profondeur. Sa taille sera évaluée par comparaison aux courbes.



Par convention:

- Le défaut A est plus petit que 0.8 mm
- Le défaut B est compris entre 1.2 mm et 2.0 mm
- Le défaut C est compris entre 0.8 mm et 1.2 mm

Matériel de contrôle : appareil, transducteurs, câbles, milieu de couplage

Valeurs numériques usuelles :

- fréquence : 1 à 10 MHz (aciers)
- angles réfractés (valeurs dans l'acier) :
ondes L : 0°
ondes T : $45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$
- épaisseur testée : de 2 mm à 1 m (et plus)

L'appareil : USM 35



Transducteurs

