

ENSC 410 – Propagation d'une onde ultrasonore dans un solide

Préparation à l'Agrégation de Physique – ENS Cachan

Document rédigé par François Treussart et Jean-François Roch
June 17, 2002

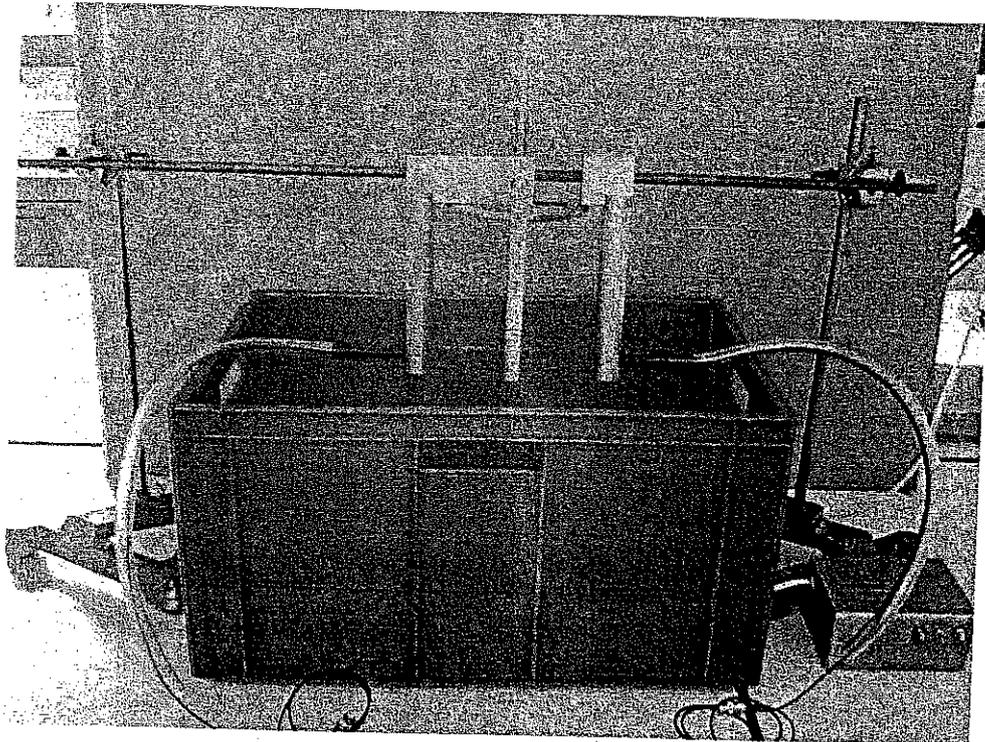


Figure 1: Photographie du dispositif expérimental permettant de mesurer la célérité d'une onde acoustique qui se propage dans un solide.

Contenu

1	Description du dispositif expérimental	2
2	Préambule théorique	3
3	Manipulations et interprétations des mesures	4
3.1	Mesure de la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau	4
3.2	Propagation de l'onde acoustique à travers la plaque métallique	4
3.2.1	Cas de l'incidence normale	4
3.2.2	Cas de l'incidence oblique	5
3.2.3	Etude quantitative de l'influence de l'angle d'incidence	5

Cette manipulation a pour objet la mesure de la célérité des ondes acoustiques qui se propagent dans un solide. Nous admettrons qu'il existe deux mécanismes de propagation : l'un par *compression* (vibrations longitudinale, comme dans les fluides), l'autre par *cisaillement* (vibration transversale), comme l'illustre le schéma de la Fig. 2. Les célérités des ondes de compression et de cisaillement sont respectivement notées c_{\parallel} et c_{\perp} .

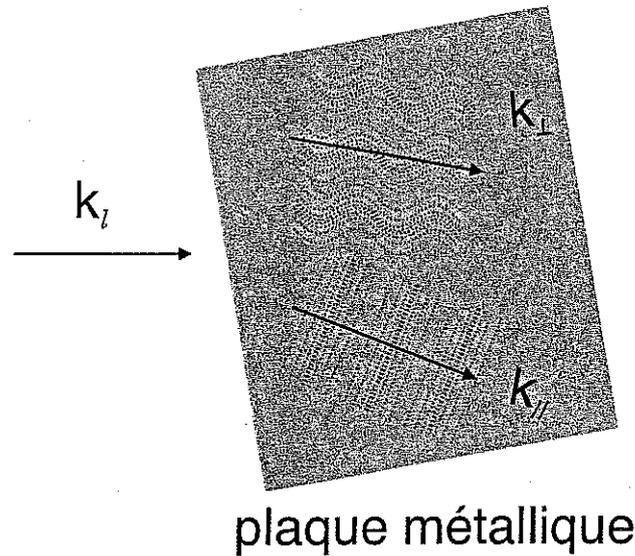


Figure 2: Plans d'onde de cisaillement et de compression pour une onde acoustique dans une plaque métallique.

1 Description du dispositif expérimental

L'expérience proposée se déroule en *immersion* dans l'eau (voir le bac en plastique visible sur la figure 1). Nous considérons le passage de l'onde de l'eau, où sa célérité est c_e , dans une plaque métallique d'épaisseur e , selon le schéma de la Fig. 3. On note i l'angle d'incidence, r_{\parallel} et r_{\perp} les angles de réfraction des ondes respectivement de compression et de cisaillement.

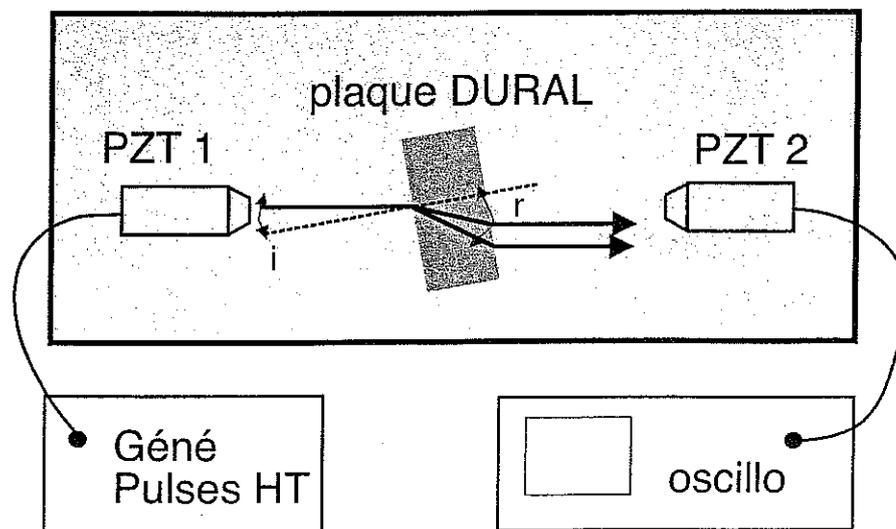


Figure 3: Schéma du dispositif expérimental.

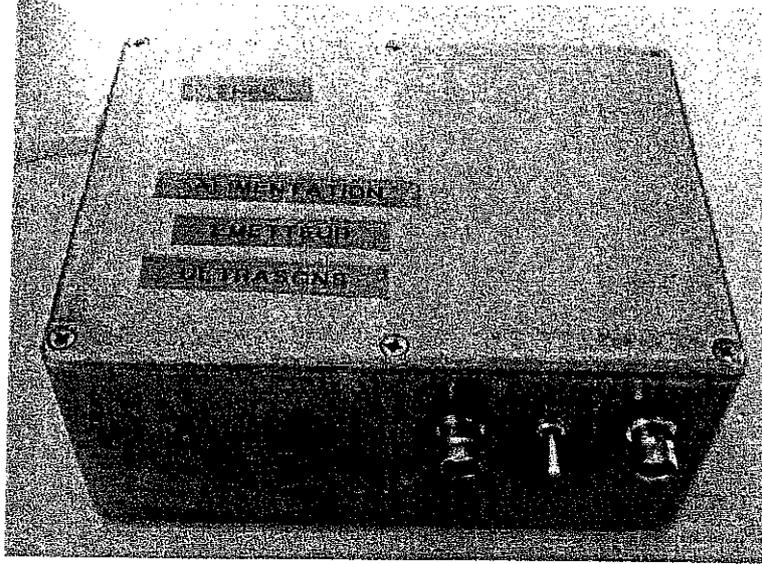


Figure 4: Photographie de l'alimentation du générateur d'impulsion. Le boîtier a deux sorties, l'une pour alimenter le transducteur PZT 1 et l'autre pour délivrer un "top" de synchronisation.

L'onde acoustique est formée d'une séquence de trains d'onde courts, répétés à une cadence de 880 Hz. Elle est engendrée par un transducteur piezoélectrique (PZT 1), optimisé pour émettre dans l'eau une onde collimatée¹. L'émetteur est excité par les impulsions en tension (≈ 150 V) produites par le générateur HT (Fig 4). Chaque train d'onde est formé d'oscillations quasi-sinusoidales de fréquence 2 MHz correspondant à la fréquence de résonance du transducteur PZT 1 (voir la documentation technique des transducteurs IMASONIC en annexe). L'onde transmise est détectée par un transducteur PZT 2, identique à PZT 1, connecté directement à l'entrée d'un oscilloscope numérique.

La plaque métallique, en duralumin et d'épaisseur $e = 15.0$ mm, est susceptible de tourner autour d'un axe vertical. Sa position angulaire est repérée à l'aide d'un rapporteur placé au niveau de la mécanique de maintien des deux transducteurs. Un index permet de repérer l'angle de la plaque par rapport à une position de référence.

2 Préambule théorique

La propagation d'une onde plane acoustique à travers une interface, suit des lois similaires aux lois de Descartes de l'optique géométrique :

$$\frac{\sin i}{c_{\ell}} = \frac{\sin r_{\parallel}}{c_{\parallel}} = \frac{\sin r_{\perp}}{c_{\perp}} \quad (1)$$

À la traversée de la plaque d'épaisseur d , l'onde plane émise par PZT 1 est en avance de phase (par rapport à l'onde qui se propagerait si la plaque était absente) de la quantité positive :

$$(k_{\ell} - k_{\parallel,\perp}) \cdot e e_z = e \left(\frac{2\pi\nu}{c_{\ell}} \cos i - \frac{2\pi\nu}{c_{\parallel,\perp}} \cos r_{\parallel,\perp} \right) = \omega e \left(\frac{\cos i}{c_{\ell}} - \frac{\cos r_{\parallel,\perp}}{c_{\parallel,\perp}} \right)$$

¹Cela signifie que l'impédance acoustique de sortie est proche de celle de l'eau, si bien que l'énergie électrique de l'impulsion est convertie efficacement en énergie mécanique de vibration acoustique dans l'eau. D'autre part, l'onde acoustique est collimatée à l'aide d'une lentille acoustique intégrée au transducteur. Cette lentille est optimisée pour un fonctionnement dans l'eau. Si on venait à utiliser ces émetteurs dans l'air, la puissance acoustique générée serait beaucoup plus faible et l'onde émise ne serait sans doute pas plane.

Le temps de vol d'une impulsion *en présence de la plaque* est par conséquent :

$$T_{\parallel,\perp} = T_0 - e \left(\frac{\cos i}{c_\ell} - \frac{\cos r_{\parallel,\perp}}{c_{\parallel,\perp}} \right), \quad (2)$$

où T_0 représente le temps de vol de l'impulsion acoustique sans la plaque. En introduisant les variables sans dimensions :

$$q_{\parallel,\perp} \equiv \frac{c_\ell (T_0 - T_{\parallel,\perp})}{e} \quad \text{et} \quad x_{\parallel,\perp} \equiv \frac{c_\ell}{c_{\parallel,\perp}}, \quad (3)$$

l'Éq. [2] devient :

$$q_{\parallel,\perp} - \cos i = x_{\parallel,\perp} \cos r_{\parallel,\perp}$$

soit en élevant au carré :

$$q_{\parallel,\perp}^2 - 2q_{\parallel,\perp} \cos i + 1 - \sin^2 i = x_{\parallel,\perp}^2 \cos^2 r_{\parallel,\perp}.$$

Mais selon les lois de Descartes $\sin^2 i = x_{\parallel,\perp}^2 \sin^2 r_{\parallel,\perp}$, si bien que :

$$x_{\parallel,\perp} = \sqrt{q_{\parallel,\perp}^2 - 2q_{\parallel,\perp} \cos i + 1}$$

On en déduit que les célérités c_\perp et c_\parallel obéissent aux relations :

$$c_{\parallel,\perp} = \frac{c_\ell}{\sqrt{q_{\parallel,\perp}^2 - 2q_{\parallel,\perp} \cos i + 1}} \quad \text{avec} \quad q_{\perp,\parallel} \equiv c_\ell \frac{T_0 - T_{\perp,\parallel}}{e} \quad (4)$$

3 Manipulations et interprétations des mesures

3.1 Mesure de la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau

Dans un premier temps, la plaque n'est pas immergée et les deux transducteurs sont placés en regard l'un de l'autre. En déclenchant l'oscilloscope sur le front montant du signal TTL de synchronisation fourni par le boîtier de commande, on mesure la "durée de vol" T_0 à partir de l'impulsion détectée par le transducteur PZT 2. On en tire immédiatement la vitesse de propagation c_ℓ de l'onde ultrasonore dans l'eau, sachant que le *CRC Handbook of Physics* donne

$$c_\ell^{\text{table}} = 1497.4 \text{ m/s à } 25^\circ\text{C}.$$

3.2 Propagation de l'onde acoustique à travers la plaque métallique

3.2.1 Cas de l'incidence normale

On immerge la plaque métallique, en la mettant grossièrement perpendiculaire à l'émetteur PZT 1. On constate que le récepteur détecte une succession d'impulsions, régulièrement espacées les unes des autres et d'amplitude décroissante. On observe les différentes réflexions multiples de l'onde incidente, sur les interfaces "avant" et "arrière" métal-eau. On oriente la plaque de manière à obtenir la plus grande amplitude pour les réflexions internes, ce qui correspond à l'arrivée de l'impulsion émise par PZT 1 sur la plaque, sous une incidence quasiment normale.

On estime la durée Δt entre deux impulsions successivement détectées par PZT 2. On en déduit la célérité des ondes longitudinales de compression dans la plaque : $c_{\parallel} = 2e/(\Delta t)$. On notera que la précision de cette mesure tient essentiellement à la qualité de l'ajustement à l'incidence normale.

On remarquera également qu'en mesurant $T_{\parallel}(i = 0^{\circ})$, on en déduit la valeur de q_{\parallel} (cf. Éq.[3]). En reportant dans l'Éq.[4] avec $i = 0^{\circ}$, on en déduit une autre mesure de c_{\parallel} . La précision de cette mesure repose cette fois sur la détermination préalable de c_{ℓ} .

On peut également discuter l'influence de la longueur des câbles coaxiaux, qui est de l'ordre de 0.5 m. Comme la célérité d'une impulsion dans un tel câble coaxial d'impédance caractéristique 50Ω est d'environ $2/3.c \approx 2 \times 10^8$ m/s, le temps de propagation d'une impulsion électrique dans chaque câble est d'au plus 2.5 ns. Compte tenu de la précision avec laquelle on évalue les temps de propagation de l'onde ultra-sonore, ce retard peut par conséquent être négligé.

3.2.2 Cas de l'incidence oblique

Lorsque l'on augmente i en tournant la plaque, l'amplitude des impulsions détectées par PZT 2 diminue, ainsi que la durée de leur vol puisque l'épaisseur de métal traversée augmente. Dès que l'angle d'incidence dépasse quelques degrés, on commence à apercevoir une nouvelle impulsion, laquelle correspond au mode de propagation par onde de cisaillement. Sous incidence normale, l'impulsion incidente, qui est longitudinale dans l'eau, ne peut pas exciter ce type de vibration. Dès que la plaque n'est plus orthogonale au vecteur d'onde incident, les deux modes de vibration, longitudinale et transverse, peuvent exister simultanément.

Si l'on continue à augmenter l'angle d'incidence, les vibrations longitudinales cessent de se propager, pour l'angle critique $i_{c,\parallel}$. Puis, c'est au tour des vibrations transverses, qui ne se propagent plus dès que $i > i_{c,\perp}$.

Des lois de Descartes [1] on déduit alors une nouvelle mesure de c_{\parallel} à l'aide de la relation

$$c_{\parallel} = \frac{c_{\ell}}{\sin i_{c,\parallel}}$$

La précision de cette mesure dépend d'une part de la détermination préalable de c_{ℓ} , et d'autre part du repérage de l'angle critique qu'on peut estimer à $\pm 1^{\circ}$.

Cette méthode fournit également une mesure de c_{\perp} , toujours grâce à la relation

$$c_{\perp} = \frac{c_{\ell}}{\sin i_{c,\perp}}$$

Les mesures des célérités des ondes de compression et de cisaillement peuvent être comparées aux valeurs tabulées dans le *CRC Handbook of Physics* pour le matériau métallique utilisé (duralumin, type AU4G) :

$$c_{\parallel}^{\text{table}} = 6195 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad c_{\perp}^{\text{table}} = 3120 \text{ m/s}$$

3.2.3 Etude quantitative de l'influence de l'angle d'incidence

Considérons le cas de la propagation de l'onde de cisaillement. On peut mesurer T_{\perp} pour différentes incidences i sur la plaque. On reporte ensuite sur un graphe les valeurs de $\cos i$ en fonction de q_{\perp} . La loi de variation attendue est :

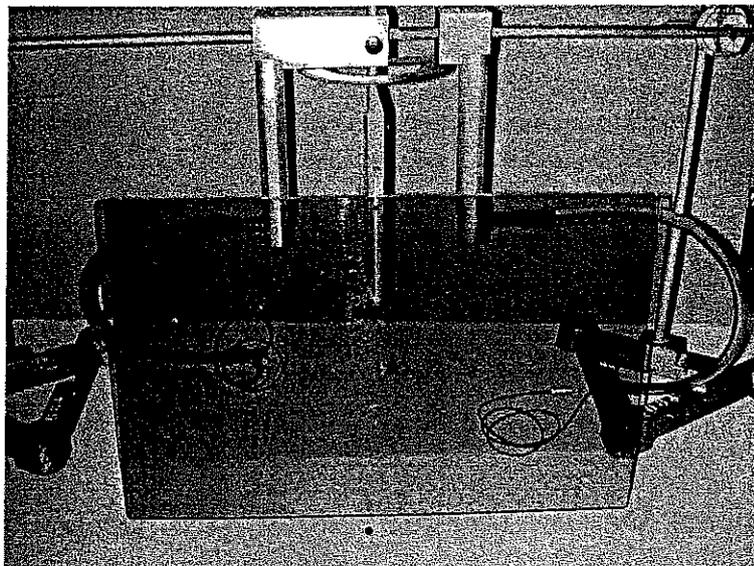
$$\cos i = \frac{2}{q_{\perp}} \left[1 + q_{\perp}^2 - \left(\frac{c_{\ell}}{c_{\perp}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

On peut ainsi ajuster les points de mesure à cette loi de variation, avec comme seul paramètre de l'ajustement c_{\parallel}/c_{\perp} .

Le même type d'étude pourrait être fait pour c_{\parallel} . Cependant, l'amplitude de variation de i est moins grande et la détermination de c_{\parallel} au moyen de cette méthode est très peu précise.

Liste du matériel ENSC 410

- Une bassine remplie d'eau (caisse "rouge" servant à transporter le matériel).
- Deux transducteurs piézoélectriques couissant sur une tige horizontale.
- Le montage mécanique comportant les supports des transducteurs et une plaque en dur-alumin 150×150 mm, d'épaisseur $e = 15.0$ mm. Celle-ci tourne autour d'un axe vertical, qui est matérialisé par un point de contact sur une plaque de plexiglass reposant au fond de la bassine. L'angle de rotation de plaque est mesuré sur un rapporteur fixe, au moyen d'un index.



- Un générateur d'impulsions HT permettant d'alimenter les transducteurs.
- Un oscilloscope numérique et un thermomètre pour mesurer la température de l'eau dans la bassine.

Remerciements

Le dispositif présenté correspond à une expérience de travaux pratiques, mise au point par Christophe COSTE à la préparation à l'agrégation de physique de l'ENS LYON. Nous remercions M. René TARDIEU pour nous avoir communiqué les renseignements techniques qui nous ont permis de dupliquer cette expérience.

L'ensemble mécanique a été réalisé par Jean-Pierre MADRANGE de l'atelier du LESIR-SATIE, et l'électronique d'alimentation du transducteur piézo-électrique par André CLOUQUEUR et Alexandra PICARDI.