

**Génération et propagation
d'une onde guidée particulière
sur une interface liquide-solide**

The excitation and propagation of some particular waves

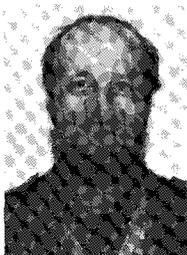
on a liquid-solid interface



Alain JUNGMAN

Groupe de Physique des Solides de l'ENS, Université Paris-VII, Tour 23, 2, place Jussieu, 75251 PARIS CEDEX 05

Alain Jungman est à la fois enseignant et chercheur à l'Université Paris 7 depuis 1968. Maître-assistant dans le département de Physique, où il enseigne l'électronique numérique et le traitement du signal, il effectue son travail de recherche au sein du Groupe de Physique des Solides de l'École Normale Supérieure. Après un doctorat de 3^e cycle en Spectroscopie Moléculaire, il s'oriente vers les problèmes de la diffusion ultrasonore et de ses applications aux essais non destructifs des matériaux. Titulaire d'un doctorat d'État depuis 1983, il a à son actif 50 publications ou communications à des conférences internationales. Ses activités internationales l'ont amené à contribuer à plusieurs programmes de recherche avec des universités étrangères où il a effectué des séjours de longue durée (Université Laval, Québec, Canada; Ohio State University, Columbus, États-Unis). Il est également membre du comité d'organisation de trois colloques internationaux sur la diffusion acoustique (1979 et 1984) et les essais non destructifs des matériaux (1980) qui se sont tenus à l'Université Paris-VII. Ses travaux actuels concernent la diffusion ultrasonore par des surfaces rugueuses, l'étude des ondes guidées et leurs applications à la caractérisation des surfaces.



Gérard QUENTIN

Groupe de Physique des Solides de l'ENS, Université Paris-VII, Tour 23, 2, place Jussieu, 75251 PARIS CEDEX 05

Après une thèse portant sur la découverte et la mesure de la piézoélectricité et des effets acousto-électriques dans le tellure effectuée au sein du groupe de Physique des Solides de l'ENS, Gérard Quentin anime l'équipe d'optique ultrasonore comportant à l'heure actuelle sept chercheurs. Principaux sujets d'étude: diffusion par les surfaces rugueuses périodiques et aléatoires, par les cibles immergées, par les défauts et inclusions dans les métaux, par les fissures superficielles. Étude de la propagation des ondes de Rayleigh et de Scholte-Stoney aux interfaces et des ondes de Lamb dans les plaques; réflexion, rétrodiffusion, transmission, rétro-transpression, spectroscopie ultrasonore; problème inverse.

RÉSUMÉ

Dans le cas d'une interface liquide-solide, l'onde de Rayleigh généralisée, dont l'énergie est principalement concentrée dans le solide, a été abondamment étudiée théoriquement et expérimentalement. Cependant les solutions théoriques, utilisant les conditions de continuité sur la surface, permettent de prévoir l'existence d'une autre onde (Onde de Scholte-Stoney).

Dans cette étude, nous décrivons en particulier les conditions de génération de cette onde par conversion de mode sur un profil périodique; et nous mesurons sa vitesse, son atténuation et le déplacement du faisceau.

MOTS CLÉS

Conversion de mode, déplacement latéral, diffraction, interface, onde de surface, réflexion, spectroscopie ultrasonore, surface périodique.

SUMMARY

In the case of a liquid-solid interface, the generalized Rayleigh waves, whose energy is mainly concentrated in the solid, are probably the best known, theoretically and experimentally. However, the theoretical solutions, based on the conditions of continuity on the surface, predict other kinds of guided waves in the liquid which have been rarely observed (Scholte-Stoneley waves).

We are interested, in that study, in a new type of guided wave. We describe the conditions of excitation of such a waves by using periodic surfaces; and we measure its velocity, attenuation, and its lateral displacement.

KEY WORDS

Diffraction, lateral displacement, liquid-solid interface, mode conversion, periodic surface, reflection, surface wave, ultrasonic spectroscopy.

TABLE DES MATIÈRES**1. Introduction****2. Positions théoriques du problème**

- 2.1. Vitesse de l'onde de Scholte et angle d'incidence critique
- 2.2. Génération d'ondes guidées par diffraction et conversion de mode
- 2.3. Déplacement du faisceau réfléchi ou diffracté

3. Appareillage expérimental

- 3.1. Système de Spectroscopie ultrasonore
- 3.2. Arrangement mécanique

4. Méthode de mesure et résultat

- 4.1. Génération de l'onde guidée dans le liquide
- 4.2. Caractérisation de l'onde guidée
- 4.3. Déplacement du faisceau

5. Conclusion**Bibliographie****1. Introduction**

L'existence d'une onde guidée sur l'interface plane libre d'un solide élastique semi-infini a été prédite pour la première fois par Lord Rayleigh [1] en 1885. Si le second milieu est un fluide, comme c'est le cas dans cette étude, l'équation séculaire des vitesses possède deux solutions: la première, de nature complexe, correspond à une onde qui réémet à travers l'interface, et par suite s'atténue suivant sa direction de propagation. C'est l'onde de Rayleigh généralisée étudiée par de nombreux auteurs [2-4]. La seconde racine, réelle celle-ci, est associée à une onde de surface dont l'énergie est principalement localisée dans le liquide, et qui se propage, sans atténuation, sur l'interface. Cette onde, considérée parfois comme un cas particulier de l'onde de Stoneley [3-5] existant à

l'interface entre deux solides, et généralement désignée onde de Stoneley généralisée ou onde de Scholte [6], a été relativement peu étudiée. C'est surtout en géophysique que Scholte [6] et Cagniard [7] sur le plan théorique, et Roener, Vining et Strick [8] sur le plan expérimental, se sont intéressés à cette onde.

Les conditions de génération de l'onde de Scholte-Stoneley, à partir d'une onde de volume incidente dans le fluide, imposent des conditions géométriques difficiles à satisfaire pratiquement (le sinus de l'angle critique est légèrement supérieur à l'unité). Pour obtenir une telle onde, de Billy et Quentin [9] ont développé une méthode utilisant les propriétés de mouillage d'un solide partiellement immergé.

Nous proposons ici une procédure originale de génération d'une onde guidée sur une interface liquide-solide, à partir des propriétés de conversion de mode sur un profil périodique. Comme l'ont montré Jungman *et al.* [10], les spectres rétrodiffusés en incidence normale par des surfaces périodiques présentent des anomalies d'amplitude liées à l'apparition d'ondes de surface. Nous utilisons un dispositif analogue pour générer une onde de Scholte, et nous généralisons la méthode au cas d'une incidence quelconque. Pour caractériser cette onde, nous mesurons sa vitesse et son atténuation le long d'une surface plane lisse. Afin de mettre en évidence la nature guidée de cette onde, nous utilisons le phénomène de déplacement latéral du faisceau réfléchi spéculairement en présence d'une onde de surface. Ce phénomène, étudié d'abord dans le domaine des ondes électromagnétiques [11], puis étendu au cas de l'acoustique [12], a été décrit expérimentalement par Breazeale *et al.* [13] dans le cas d'une onde de Rayleigh généralisée produite par conversion de mode sur une structure périodique. Nous montrons l'existence d'un phénomène similaire en présence de l'onde de Scholte-Stoneley générée sur le profil périodique.

2. Positions théoriques du problème**2.1. VITESSE DE L'ONDE DE SCHOLTE ET ANGLE D'INCIDENCE CRITIQUE**

Les équations de propagation et les conditions de continuité sur une interface liquide-solide plane

DIFFUSION PAR DES SURFACES RUGUEUSES

conduisent à l'équation séculaire des vitesses [3-5]:

$$(1) \quad 4 \left(\frac{C_t}{C} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{C_t}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \left[\left(\frac{C_t}{C_1} \right)^2 - \left(\frac{C_t}{C} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[1 - 2 \left(\frac{C_t}{C} \right)^2 \right]^2 = \frac{\rho_L}{\rho_S} \left[\frac{(C_t/C_1)^2 - (C_t/C)^2}{(C_t/C_L)^2 - (C_t/C)^2} \right]^{1/2},$$

où C_t , C_l sont les vitesses transversales et longitudinales dans le solide C_L est la vitesse dans le liquide.

ρ_L et ρ_S sont les densités du liquide et du solide.

Les racines de cette équation sont les vitesses de phase des ondes guidées susceptibles de se propager sur la surface. Deux solutions [5] sont généralement envisagées: $C_{R'}$ et C_S .

(i) La première, complexe, $C_{R'}$ correspond à l'onde de Rayleigh généralisée. Son énergie, principalement localisée dans le solide, s'atténue en se propageant par réémission dans le liquide. Elle vérifie la relation:

$$(2) \quad C_R < C_{R'} < C_t < C_l.$$

(ii) La seconde réelle C_S est la vitesse de l'onde de Scholte à laquelle on s'intéresse ici. Localisée dans le liquide, elle se propage sans atténuation visqueuse. La vitesse de cette onde est très légèrement inférieure à celle d'une onde de volume dans le liquide:

$$(3) \quad C_S < C_L \quad \text{d'où} \quad \sin \theta_S = \frac{C_L}{C_S} > 1.$$

Par suite, il n'existe pas d'angle réel θ_S permettant de générer une onde de Scholte dans un fluide à partir d'une onde de volume incidente.

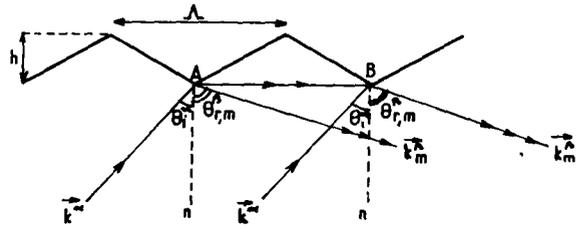
2. 2. GÉNÉRATION D'ONDES GUIDÉES PAR DIFFRACTION ET CONVERSION DE MODE

Le problème théorique de la diffusion d'une onde ultrasonore par une interface liquide-solide périodique a été traité par Claeys *et al.* [14]. En introduisant dans les équations de continuité les tenseurs d'élasticité, ces auteurs établissent un système d'équations linéaires dont les solutions numériques confirment l'existence d'anomalies d'amplitude dans les spectres réfléchis spéculairement en incidence normale. La fréquence de ces anomalies correspond à celle du faisceau diffracté sous incidence rasante, à condition d'introduire dans les équations de diffraction soit la vitesse d'une onde de Rayleigh généralisée, soit celle d'une onde de Scholte, ce qui revient à admettre implicitement l'existence d'une conversion de mode. Partant de l'équation classique des réseaux de la théorie de la diffraction, on peut alors écrire l'angle d'incidence θ_i pour lequel on observe avec un réseau de pas Λ un maximum de diffraction dans la direction θ_d , sous la forme (fig. 1):

$$(4) \quad k_i^\alpha \sin \theta_i^\alpha - k_d^\beta \sin \theta_d^\beta = -m \frac{2\pi}{\Lambda},$$

où :

— k_i et k_d sont les nombres d'onde incident et diffractés respectivement;



$\alpha, \beta = \text{onde } l, t \text{ ou } S$
 $m = 0, 1, 2, \dots \text{ ordre de diffraction}$

Fig. 1. — Géométrie de la diffraction.

- α, β désignent le type d'onde (l, t, R, R' ou S);
- θ_d est positif s'il est situé dans le cadran opposé à celui de l'angle d'incidence (diffraction avant), et réciproquement (diffusion arrière);
- $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ est l'ordre de diffraction. Il est positif ou négatif selon que $\theta_{d,m} > \theta_i$ ou $\theta_{d,m} < \theta_i$ respectivement. Dans le cas d'un signal large bande, l'équation (4), explicitée en fonction des vitesses, donne la fréquence diffractée suivant la direction $\theta_{d,m}^\beta$:

$$(5) \quad F = - \frac{m C_\alpha}{\Lambda [\sin \theta_i^\alpha - (C_\alpha/C_\beta) \sin \theta_{d,m}^\beta]}.$$

Soit, en considérant la diffraction rasante ($\theta_{d,m}^\beta = \pm \pi/2$):

$$(6) \quad F_\pm = - \frac{m C_\alpha}{\Lambda (\sin \theta_i^\alpha \mp C_\alpha/C_\beta)},$$

F_+ et F_- sont les fréquences associées aux ondes diffractées vers l'avant et vers l'arrière respectivement.

En faisant $C_\alpha = C_L$ et $C_\beta = C_{R'}$ ou C_S dans l'équation (6), on retrouve bien la position des anomalies calculées à partir des équations rigoureuses utilisant les grandeurs élastiques.

2. 3. DÉPLACEMENT DU FAISCEAU RÉFLÉCHI OU DIFFRACTÉ

Le « déplacement latéral » d'un faisceau lors de la réflexion sur une structure périodique a été étudiée théoriquement pour des ondes électromagnétiques [15] et observé expérimentalement dans le cas de l'acoustique. La modification de la distribution transversale de l'énergie dans le faisceau acoustique réfléchi s'explique par la présence d'une onde guidée sur la surface. Cette modification a été observée dans le cas d'une onde de type Rayleigh généralisée [13] ou de type Rayleigh [16]. L'onde guidée, obtenue par conversion partielle de l'onde de volume incidente en onde de surface, réémet vers l'intérieur d'un des milieux par suite de la présence de la structure périodique. Cette réémission, déplacée par rapport à la réflexion directe produit des interférences destructives qui modifient la répartition spatiale de l'amplitude réfléchie dans un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau. Cette redistribution d'énergie se traduit d'une part, par des variations brutales de

l'amplitude dans le spectre réfléchi [10, 14, 16], d'autre part, par un « déplacement latéral » du maximum réfléchi, par rapport à ce que prévoient les lois géométriques de la réflexion. Dans le cas de l'onde de Scholte, qui fait l'objet de cette étude, la mise en évidence de ce « déplacement » nous permet de confirmer la nature guidée de l'onde produite sur la structure périodique. La figure 2 explicite les deux différentes configurations possibles pour le faisceau « déplacé », dans le cas de la réflexion spéculaire. En pointillés, nous représentons l'onde de volume réémise par la surface.

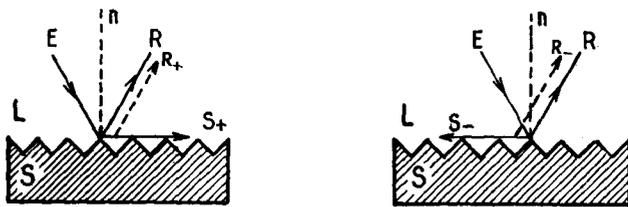


Fig. 2. — Génération de Onde de Scholte (S_{\pm}), réflexion directe (R), et réémission après conversion de mode (R_{\pm}).

3. Appareillage expérimental

3.1. SYSTÈME DE SPECTROSCOPIE ULTRASONORE

L'utilisation de signaux large bande, en offrant différentes fréquences de couplage avec la surface périodique, permet d'ajuster l'incidence du faisceau de façon non critique pour générer une onde guidée. La composante spectrale, associée à la fréquence de l'onde de surface, et définie avec une résolution de 30 kHz au voisinage de 5 MHz, est ensuite étudiée isolément.

3.2. ARRANGEMENT MÉCANIQUE

Le système goniométrique est conçu pour mesurer la distribution d'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau diffusé par la cible. Il comporte un seul support à la fois pour l'échantillon et pour un des capteurs, et possède un grand nombre de degrés de liberté. L'élément principal du système est un axe vertical autour duquel l'échantillon peut tourner seul pour ajuster l'incidence du faisceau, et un bras horizontal, support d'un des capteurs, lui aussi mobile autour de l'axe. Le bras mobile autour de l'axe vertical supporte le capteur. L'aspect le plus important du support du capteur est son mouvement de translation perpendiculairement au bras-support, permettant ainsi l'exploration du champ et la mesure du « déplacement latéral » du faisceau réfléchi.

4. Méthode de mesure et résultat

4.1. GÉNÉRATION DE L'ONDE GUIDÉE DANS LE LIQUIDE

La figure 3 montre le spectre normalisé réfléchi par une interface eau-laiton de période $\Lambda = 250$ m. Les trois minima observés en incidence normale correspon-

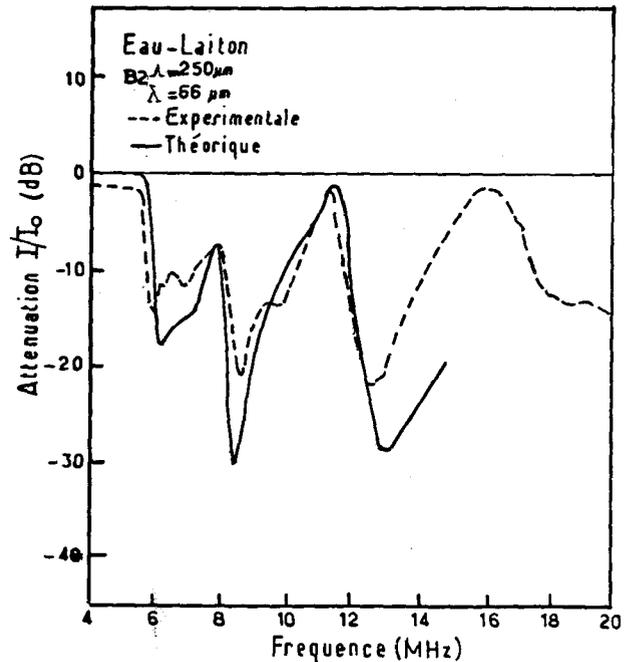


Fig. 3. — Spectre normalisé réfléchi, sous incidence normale.

dent aux fréquences 6, 8 et 12 MHz données par l'équation (6) dans le cas de l'incidence normale ($\theta_i^{\text{eau}} = 0$). La fréquence 8 MHz est obtenue en faisant $C_{\beta} = C_R = 2005 \text{ ms}^{-1}$ (vitesse de l'onde de Rayleigh généralisée dans le laiton), tandis que les fréquences 6 et 12 MHz sont données pour $C_{\beta} = C_S = 1470 \text{ ms}^{-1}$ et $m = 1$ et 2 respectivement. Ce dernier cas correspond à une onde dont la vitesse de propagation est très voisine de celle d'une onde longitudinale dans l'eau. Nous l'interprétons comme étant l'onde de Scholte.

Le spectre de la figure 4 est obtenu par réflexion spéculaire sous une incidence de 20° sur un échantillon en dural ($\Lambda = 400 \mu\text{m}$, $h = 56 \mu\text{m}$). Les deux minima à 5,45 MHz et 5,65 MHz correspondent d'après l'équation (6) à l'onde de Scholte arrière au deuxième ordre ($\theta_d = -\pi/2$, $m = -2$) et à l'onde de Scholte avant au premier ordre ($\theta_d = \pi/2$, $m = 1$) respectivement. Chaque nouvelle incidence fait ainsi apparaître dans le spectre réfléchi de nouveaux minima auxquels sont associées des ondes guidées dont les fréquences sont données par la même équation (6).

4.2. CARACTÉRISATION DE L'ONDE GUIDÉE

Pour authentifier l'onde de Scholte, des mesures de vitesse et d'atténuation sont effectuées.

4.2.1. Mesure de vitesse

La figure 5 indique le dispositif expérimental. Un émetteur-récepteur immergé émet une impulsion ultrasonore en direction de la partie d'un échantillon métallique par conversion de mode et effet de filtrage, on génère une onde guidée à bande étroite qui se propage ensuite sur la partie lisse de l'échantillon avant de se

DIFFUSION PAR DES SURFACES RUGUEUSES

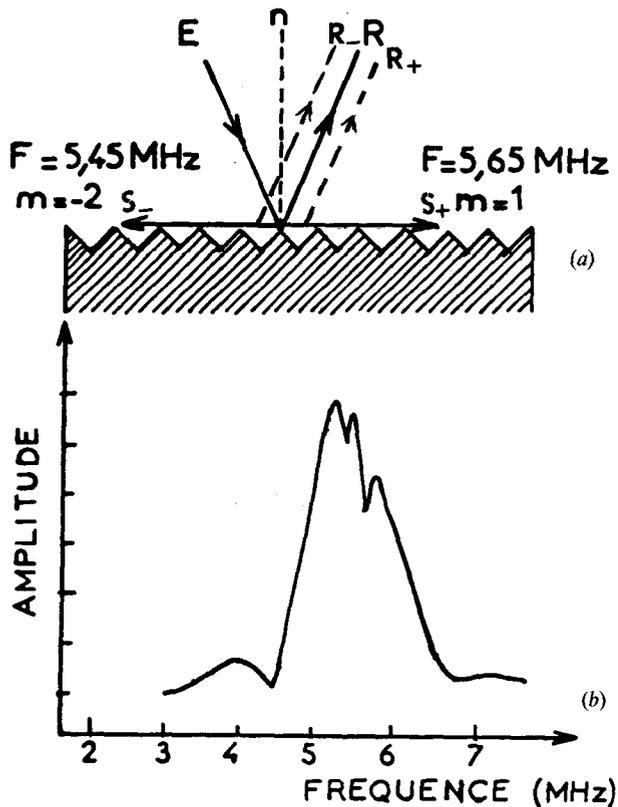


Fig. 4. - Réflexion spéculaire oblique ($\theta_i = 20^\circ$):
(a) position des rayons, (b) spectre réfléchi.

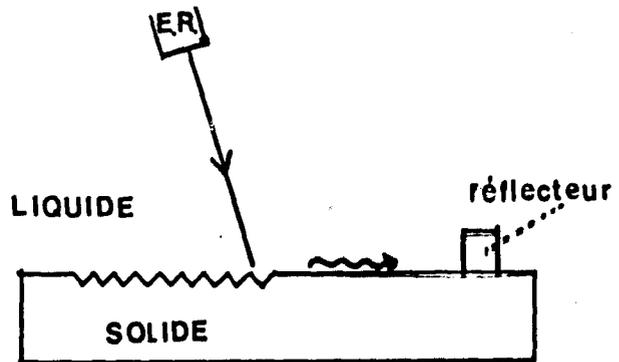


Fig. 5. - Dispositif expérimental pour les mesures de vitesse et d'atténuation de l'onde guidée.

réfléchir sur un réflecteur métallique de même nature physique que celle de l'échantillon solide. L'onde de surface réfléchie est reconvertie en onde de volume sur le réseau, puis est reçue par le capteur. Les mesures de vitesse sont réalisées en déplaçant le réflecteur et en mesurant les variations de temps de transit de l'onde de surface. Les résultats, présentés sur le tableau, et obtenus pour un échantillon de laiton et un de dural, confirment la valeur légèrement inférieure de la vitesse de cette onde par rapport à celle d'une onde longitudinale dans l'eau. Cependant, l'incertitude relativement importante de ces résultats liée essentiellement au repérage de la position du réflecteur, impose d'autres types de mesures.

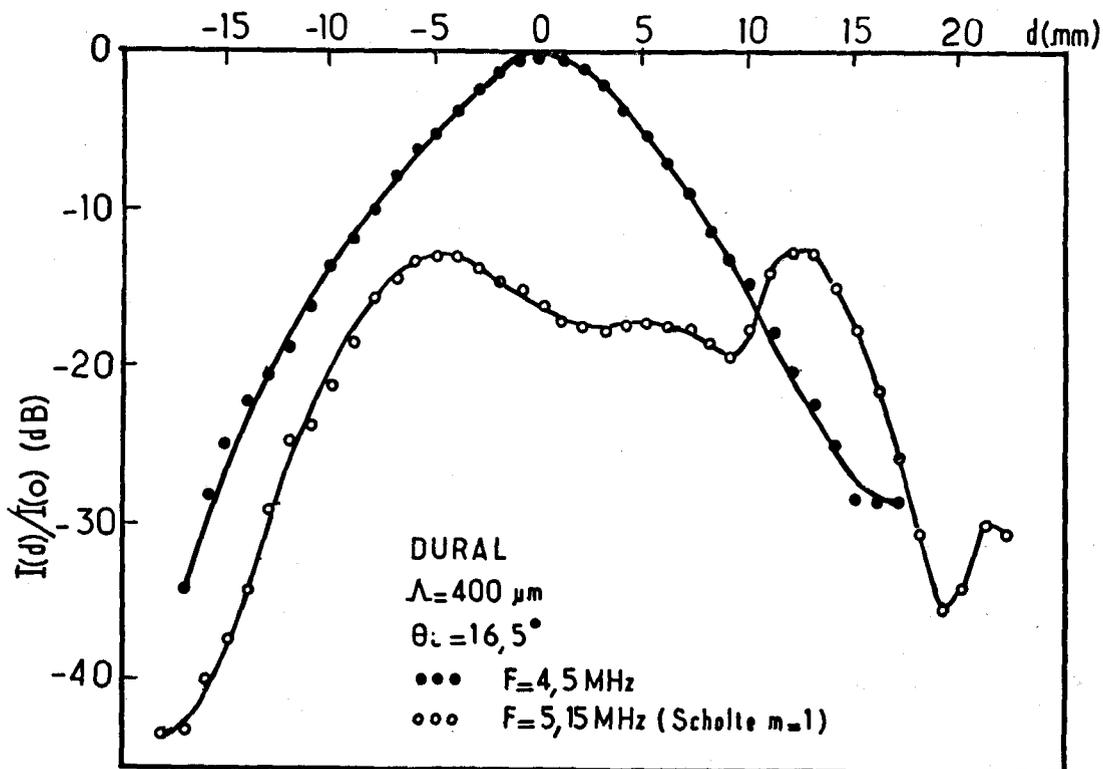


Fig. 6. - Distribution de l'amplitude transversale dans le faisceau réfléchi.

GÉNÉRATION ET PROPAGATION D'UNE ONDE GUIDÉE PARTICULIÈRE

TABLEAU
Caractéristiques des échantillons

Matière	Largeur (mm)	Longueur totale (mm)	Longueur du réseau (mm)	Périodicité (μm)	Hauteur pic-creux (μm)	Section du réflecteur (mm)
Laiton	50	100	40	250	90	10 x 10
Dural	50	120	40	400	56	18 x 10
<i>Mesure des vitesses</i>						
Matériaux	Vitesse (m. s ⁻¹)	Incertitude ΔV (m. s ⁻¹)	Écart/eau (%)	Type d'onde		
Eau	1492	4		Compression		
Laiton	1461	10	-2	Surface		
Dural	1452	8	-3	Surface		

4.2.2. Mesure d'atténuation

L'onde de Scholte se caractérise théoriquement par une atténuation négligeable suivant sa direction de propagation. C'est cette absence d'atténuation que nous essayons de mettre en évidence. Cependant, l'atténuation géométrique importante due à la forme elliptique des fronts d'onde induits sur la surface, rend difficile le cas échéant la détection et la mesure d'une atténuation visqueuse.

En résumé, les mesures de vitesse et d'atténuation ne sont pas assez significatives pour déterminer la nature de l'onde générée sur la surface périodique. C'est pourquoi nous montrons, dans le paragraphe suivant, qu'il existe pour la fréquence de couplage, une distribution particulière de l'énergie dans le faisceau réfléchi. Ce « déplacement » du maximum réfléchi par rapport aux lois de la réflexion géométrique, est interprété comme étant dû à un couplage avec une onde de surface.

4.3.0. Déplacement du faisceau

Deux fréquences sont isolées dans le spectre réfléchi par une surface périodique ($\Lambda = 400 \mu\text{m}$) en dural, insonée sous un angle de $16,5^\circ$. La première $F = 4,5 \text{ MHz}$ ne correspond, d'après l'équation (6), à aucun couplage avec la surface. La seconde $F = 5,17 \text{ MHz}$ correspond très exactement à un minimum associé à une onde de Scholte diffusée vers l'avant $\theta_d = \pi/2$, $m = 1$ dans l'équation (6). En déplaçant le récepteur perpendiculairement à l'axe du faisceau réfléchi pour ces deux fréquences, on obtient les courbes d'atténuation de la figure 6. A la fréquence de couplage $F_+ = 5,17 \text{ MHz}$, la distribution de l'amplitude diffère, de façon significative, de celle obtenue pour la fréquence $4,5 \text{ MHz}$ non couplée à la surface. En particulier, le profil du faisceau n'a plus l'aspect symétrique habituel et présente deux maximums à -5 mm et $+12 \text{ mm}$ de part et d'autre de l'axe géométrique.

5. Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible de générer une onde guidée par couplage entre une onde longitudinale incidente dans un liquide et une surface solide périodique. En se fondant sur les résultats théoriques tirés de l'équation séculaire des vitesses (équation de Rayleigh généralisée), nous avons été conduits à faire l'hypothèse d'une onde de Scholte-Stoneley. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons réalisé des mesures de vitesse. Bien que nos mesures diffèrent sensiblement des valeurs théoriques, leur différence, par rapport à l'onde de volume dans le liquide, est dans le bon sens. Par contre, les mesures d'atténuation visqueuse, masquée par les pertes par divergence, n'ont pas permis de conclure. Enfin, les modifications observées dans la distribution transversale des amplitudes du faisceau réfléchi confirment la nature guidée de cette onde.

En résumé, ces résultats ont permis de mettre en évidence une onde de surface, localisée dans le liquide, et de vitesse très légèrement inférieure à celle d'une onde de volume.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LORD RAYLEIGH, *Proc. London Math. Soc.*, 17, 1885, p. 4.
- [2] R. STONELEY, *Proc. Roy. Soc., Ser. A* 106, 1924, p. 416.
- [3] L. M. BREKHOVSKIKH, *Waves in Layered Media*, Academic Press, New York, 1960.
- [4] I. A. VIKTOROV, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum, New York, 1960.
- [5] H. ÜBERALL, *Surface Waves in Acoustics, Physical Acoustics*, Academic Press, X, 1973, pp. 1-60.
- [6] J. G. SCHOLTE, *K. Ned. Akad. Wet. Versl. Gewone Vergad. Afd. Natwurtid*, 51, 1948, pp. 533, 642, 828, 969.

DIFFUSION PAR DES SURFACES RUGUEUSES

- [7] L. CAGNIARD, *Reflection and refraction of progressive seismic waves*, chap. 14, McGraw Hill, New York, 1962.
- [8] W. L. ROENER, T. F. VINING et E. STRICK, *Philos. Trans. R. Soc. London*, A 251, 1959, pp. 455-523.
- [9] M. DE BILLY et G. QUENTIN, *J. Appl. Phys.*, 54, (8), 1983, pp. 4314-4322.
- [10] A. JUNGMAN, L. ADLER et G. QUENTIN, *J. Appl. Phys.*, 53, (7), 1982, pp. 4673-4680.
- [11] F. GOSS et H. HÄNCHEN, *Ann. Physik*, 1, (6), 1947, p. 333.
- [12] A. SCHOCH, *Ergeb. Exakt. Naturwiss.*, 23, 1950, p. 127.
- [13] M. A. BREAZEALE et M. A. TORBETT, *Appl. Phys. Lett.*, 29, (8), 1976, p. 456.
- [14] J. M. CLAEYS, O. LEROY, A. JUNGMAN et L. ADLER, *J. Appl. Phys.*, 54, (10), 1983.
- [15] T. TAMIR et H. L. BERTONI, *J. Opt. Soc. Amer.*, 61, (10), 1971, pp. 1397-1413.
- [16] R. ROBERTS, J. D. ACHENBACH, R. T. KO, L. ADLER, A. JUNGMAN et G. QUENTIN, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 74, (3), 1983, pp. 1025-1032.