

## Étude expérimentale

## de la diffusion d'une onde de Rayleigh

par une rainure rectangulaire (<sup>1</sup>)

Experimental study of the Rayleigh-wave diffraction at a rectangular groove



Elian BARON

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

Après l'obtention d'un diplôme d'ingénieur (ESME 82), l'auteur a choisi de se spécialiser dans le domaine de l'acoustique (DEA Paris-VI, 83). Actuellement, il s'intéresse plus particulièrement aux ondes de surface et notamment à leur comportement en milieu rugueux.



Michel DE BILLY

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

Maître Assistant de Physique à l'Université Pierre-et-Marie-Curie, Michel DE BILLY assure un enseignement auprès des étudiants de premier Cycle de Médecine (PCEM 1). L'activité essentielle de sa recherche porte sur la diffusion des ondes acoustiques par les surfaces rugueuses aléatoires et par des cibles-cylindriques ( $ka$  élevé). Son travail a porté aussi sur l'analyse des effets observés en rétrodiffusion au voisinage de l'angle de Rayleigh dans le cas d'une interface liquide-solide plan.

## RÉSUMÉ

Dans cet article, on étudie la conversion en ondes de volume d'une onde de Rayleigh incidente sur une rainure rectangulaire. Plus précisément, on trace les courbes de distribution angulaire de l'énergie portée par les ondes de volume diffusées (longitudinales et transversales). Ces résultats expérimentaux sont comparés avec les courbes théoriques découlant des calculs développés par Tuan (*J. Appl. Phys.*, 46, 1975, p. 36-41).

## MOTS CLÉS

Onde de Rayleigh, diffusion, rainure

## SUMMARY

*In this paper, we study the conversion into bulk-wave of a Rayleigh wave incident on a rectangular groove. More precisely, we study the angular distribution of the bulk-wave power scattered. These experimental plots are compared with the theoretical curves given by the Tuan's model (*J. Appl. Phys.*, 46, 1975, p. 36-41).*

## KEY WORDS

Rayleigh wave, diffraction, groove.

(<sup>1</sup>) Étude soutenue par la DRET (Contrat n° 83070).

**TABLE DES MATIÈRES**

- 1. Introduction
- 2. Approche théorique
- 3. Procédure expérimentale
- 4. Résultats expérimentaux et discussion
- 5. Conclusion
- Bibliographie

**1. Introduction**

Les ondes de surface font depuis longtemps l'objet d'études approfondies qui trouvent leur application tant en contrôle non destructif qu'en traitement du signal. De nombreuses recherches ont été menées sur l'interaction de telles ondes avec des discontinuités superficielles mais la plupart ne concernant que la réflexion et la transmission. Nous nous intéressons quant à nous au phénomène de diffusion volumique, c'est-à-dire à la conversion onde de Rayleigh-ondes de volume. Tuan [1], en utilisant une technique de perturbation au premier ordre, caractérise ce phénomène, en l'appliquant à l'interaction d'une onde de Rayleigh avec une rainure rectangulaire. Ronnekleiv et Souquet [2] reprennent cette étude et l'adaptent à un réseau infini de rainures. Utilisant les mêmes bases, Parekh et Tuan [3] élargissent le problème à différents types de rainures. Nous présentons dans cet article quelques résultats expérimentaux concernant le phénomène de conversion dû à l'interaction d'une onde de Rayleigh avec une rainure de type rectangulaire.

**2. Approche théorique**

La démarche théorique complète et détaillée peut être trouvée dans les références [1, 3]. Nous en résumons très brièvement les principaux résultats.

Le profil de la rainure est décrit par l'équation :

$$(1) \quad S(x, z) = z - \varepsilon \lambda_R f(x) = 0,$$

où  $\lambda_R$  est la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh incidente,  $\varepsilon$  est un nombre sans dimension très petit devant 1 ( $\varepsilon \ll 1$ ).

$f(x)$  est une fonction qui caractérise le profil avec  $f(0) = -1$  pour tous les profils. La profondeur de la rainure  $h$  est déterminée par l'égalité  $h = -\varepsilon \lambda_R f(0) = \varepsilon \lambda_R$  (d'où  $h \ll \lambda_R$ ). La géométrie du problème est schématisée sur la figure 1.

A la rainure, l'intensité incidente transportée par l'onde de Rayleigh est convertie en intensité portée par les ondes de volume longitudinale et transversale. Si nous limitons notre étude au plan sagittal, les distributions angulaires de la densité de puissance relative portée par chacune des ondes de volume engendrées sont données par les relations suivantes (valables pour des valeurs de  $\rho$  grandes devant les longueurs d'onde des ondes longitudinale et transversale) :

$$(2) \quad S_l(\rho, \theta) = \frac{1}{2} \omega k_l^3 (\lambda + 2\mu) |\varepsilon \varphi_1(\rho, \theta)|^2,$$

$$(3) \quad S_k(\rho, \theta) = \frac{1}{2} \omega k_t^3 \mu |\varepsilon \psi_1(\rho, \theta)|^2,$$

où  $\lambda$  et  $\mu$  représentent les coefficients de Lamé du solide,  $k_l$  et  $k_t$  les vecteurs d'onde des ondes longitudinale et transversale et  $\omega$  la pulsation.  $\varphi_1$  et  $\psi_1$  sont les potentiels au premier ordre du développement en série du champ diffusé sous forme d'onde de volume. Les équations (2) et (3) peuvent s'écrire sous la forme du produit d'un coefficient ayant la même dimension que  $S_j(\rho, \theta)$  par une fonction  $S_j(\theta)$ . Cette fonction sans dimension représente les variations, en fonction de l'angle azimutal  $\theta$ , d'une puissance normalisée. On montre que les fonctions  $S_j(\theta)$  peuvent s'écrire respectivement pour l'onde de volume longitudinale et transversale :

$$(4) \quad S_l(\theta) = |k_R^2 \varphi_1(\rho, \theta)|^2 k_l \rho,$$

$$(5) \quad S_t(\theta) = |k_R^2 \psi_1(\rho, \theta)|^2 k_t \rho.$$

Expérimentalement, nous nous sommes intéressés aux seules propriétés directionnelles des ondes de volume engendrées dans le solide. C'est pourquoi nous avons mesuré la pression acoustique en fonction de l'angle azimutal  $\theta$  pour nous permettre d'atteindre une quantité  $V_l(\theta)$  [ou  $V_t(\theta)$ ] proportionnelle à  $S_l(\rho, \theta)$  [ou  $S_t(\rho, \theta)$ ] et donc indirectement à  $S_l(\theta)$  [ou  $S_t(\theta)$ ]. Le coefficient de proportionnalité dépend essentiellement des propriétés acoustiques du solide.

**3. Procédure expérimentale**

Notre objectif est de mesurer la distribution angulaire de l'intensité portée par les ondes de volume. La rainure est usinée au centre d'un échantillon demi-cylindrique en duraluminium (voir fig. 1 a). Le rayon  $\rho$  [ = 100 mm ] est suffisamment grand afin de respecter les conditions théoriques [champ lointain]. Les dimensions des rainures sont données sur la figure 1 b. La hauteur  $h = 0,15$  mm est choisie de manière à avoir  $\varepsilon = h/\lambda_R \ll 1$  pour toutes nos fréquences de travail. La rainure est supposée infinie perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde incidente. Pour engendrer cette onde incidente, on utilise un coin en plexiglas (voir fig. 2) dont l'angle  $\alpha$  est donné par la relation  $\sin \alpha = C/C$ , où  $C$  est la vitesse longitudinale

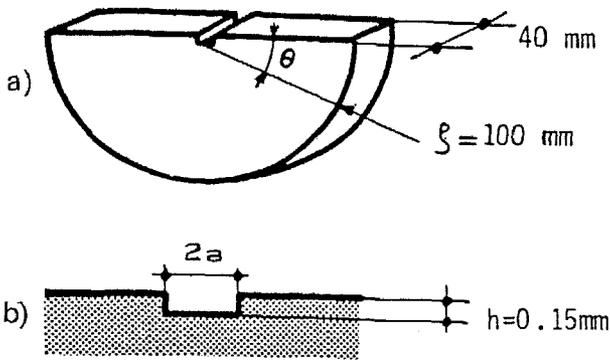


Fig. 1. — Description de l'échantillon.

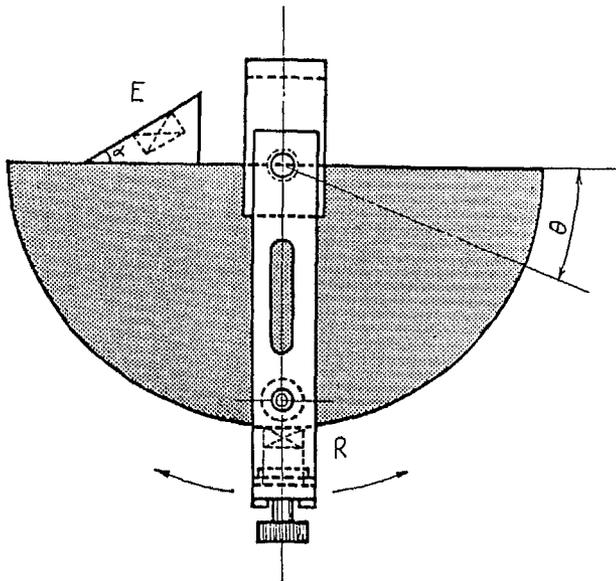


Fig. 2. — Montage expérimental.

dans le plexiglas [le transducteur émetteur engendre des ondes polarisées longitudinalement] et  $C_r$  la vitesse de l'onde de Rayleigh dans le duraluminium. Les expériences ont été menées à l'aide de palpeurs de 12 mm de diamètre résonant à diverses fréquences : 0,65, 1,5 et 2,25 MHz. La surface sur laquelle l'onde de Rayleigh se propage avant d'atteindre la rainure est rectifiée, donc parfaitement plane et lisse. Le montage expérimental est schématisé sur la figure 2. Le transducteur récepteur est mobile en  $\theta$  sur la périphérie de l'échantillon, la distance rainure-récepteur restant constante. Les relevés expérimentaux sont effectués tous les  $5^\circ$ , le récepteur étant adapté au type d'onde que l'on veut étudier (onde longitudinale ou transversale). Un fluide approprié assure le couplage entre l'échantillon et les différents éléments en contact (coin, transducteur récepteur). Une vis micrométrique permet d'appliquer une pression constante sur le récepteur, assurant ainsi une bonne reproductibilité des résultats. L'émetteur est excité par des impulsions suffisamment longues pour se rapprocher de l'hypothèse théorique d'une émission continue. Le signal de réception est amplifié puis visualisé sur l'écran

d'un oscilloscope. Plusieurs signaux sont observés et un moyen simple d'identifier le signal à étudier est de mettre un absorbant entre le coin et la rainure. Le signal qui disparaît après cette opération est celui qui nous intéresse (voir fig. 3). La localisation étant ainsi effectuée, l'absorbant est retiré et les mesures peuvent commencer.

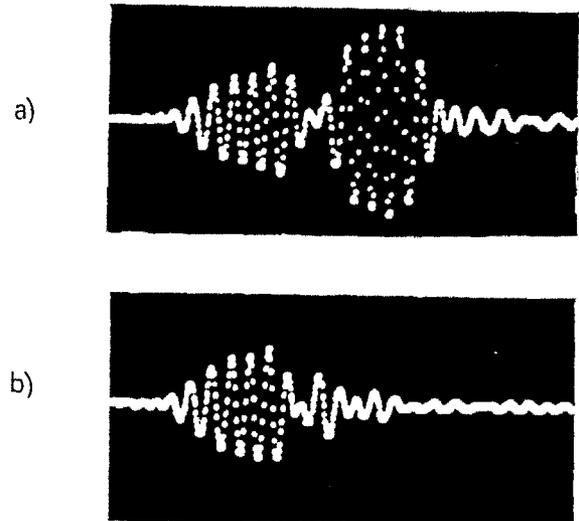


Fig. 3. — Signal observé dans le cas d'une onde de volume de type longitudinal : (a) sans absorbant, (b) avec absorbant.

## 4. Résultats expérimentaux et discussion

Les mesures ont été effectuées à différentes fréquences correspondant à des valeurs de  $\varepsilon$  égales à 0,033, 0,077 et 0,115 ( $h=0,15$  mm). On a donc *a priori*  $\varepsilon \ll 1$ . Les rainures sont de type rectangulaire, avec  $2a=3,28$  mm et  $2a=4$  mm (fig. 1). Sur les figures 4 à 6, les relevés expérimentaux de  $V_i(\theta)$  (ou  $V_t(\theta)$ ) sont figurés par des points (—●—). On a tracé à titre de comparaison les courbes théoriques (trait continu) représentatives des quantités normalisées :

$$S'_i(\theta) = \frac{S_i(\theta)}{W_i} \quad \text{et} \quad S'_t(\theta) = \frac{S_t(\theta)}{W_i}$$

dans lesquelles  $W_i$  est associée à la puissance incidente normalisée. Les courbes expérimentales sont normalisées par rapport au premier pic théorique.

On constate une assez bonne correspondance entre théorie et expérience. La position des maximums et des minimums est bien respectée, de même que l'amplitude relative des pics entre eux. Comme de nombreux auteurs (voir par exemple [4]), on constate que la conversion est prépondérante en ondes de volume transversales.

Signalons que d'autres résultats sont reproduits en références [5] et [6].

Nos résultats sont évidemment altérés par le fait que les sondes utilisées ont une certaine ouverture. A

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA DIFFUSION D'UNE ONDE DE RAYLEIGH PAR UNE RAINURE RECTANGULAIRE

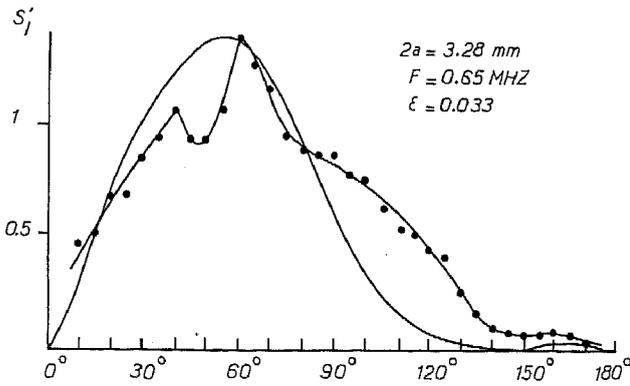


Fig. 4 a. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde longitudinale ( $2a = 0,73 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_l(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_1(\theta)$ .

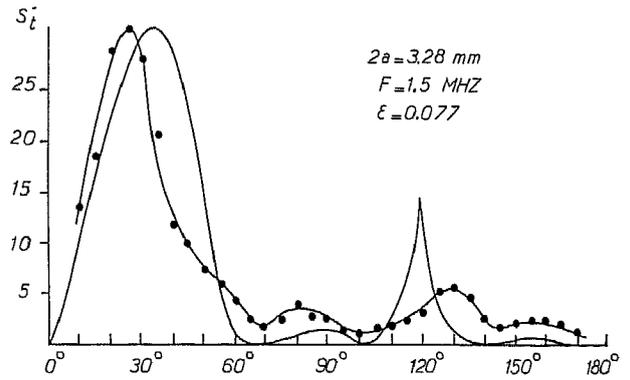


Fig. 5 b. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde transversale ( $2a = 1,68 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_t(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_t(\theta)$ .

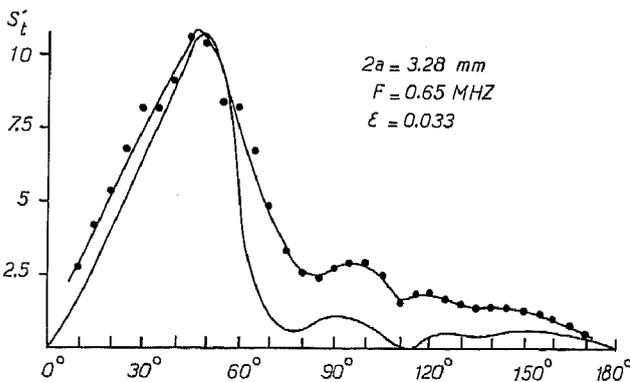


Fig. 4 b. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde transversale ( $2a = 0,73 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_t(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_t(\theta)$ .

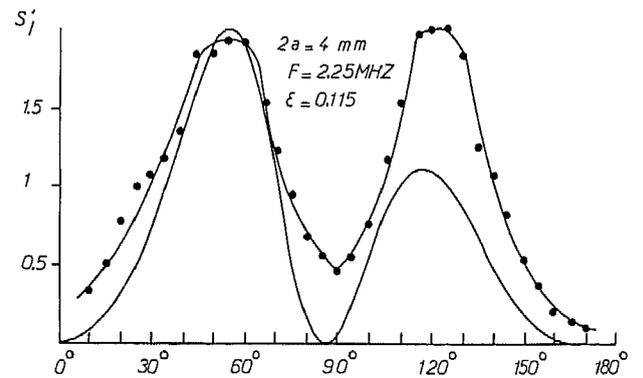


Fig. 6 a. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde longitudinale ( $2a = 3,08 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_l(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_1(\theta)$ .

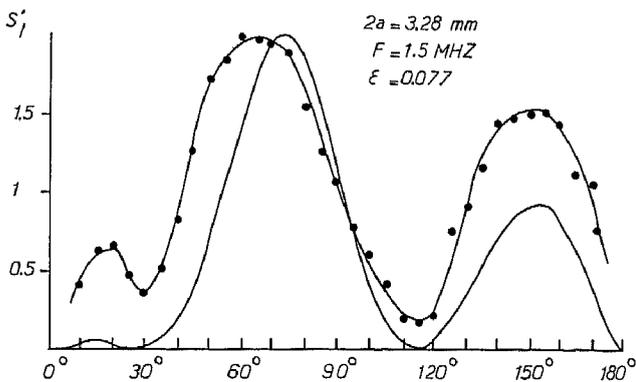


Fig. 5 a. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde longitudinale ( $2a = 1,68 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_l(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_1(\theta)$ .

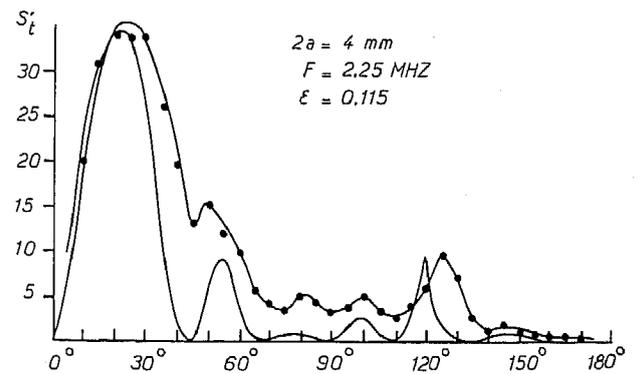


Fig. 6 b. — Variations angulaires de l'intensité normalisée diffusée sous forme d'onde transversale ( $2a = 3,08 \lambda_R$ ): — courbe théorique représentant  $S'_t(\theta)$ , —●— courbe expérimentale représentant  $V_t(\theta)$ .

l'émission, la non-directivité du faisceau ultrasonore favorise les effets de bord, donc les phénomènes d'interférences parasites (voir par exemple la figure 4 a aux alentours de  $50^\circ$ ). A la réception, il est impossible de mesurer une valeur à un angle précis, mais seulement sur un intervalle  $\Delta\theta$ , ce qui explique qu'en aucun

cas, nos minimums expérimentaux n'atteignent la valeur nulle.

Signalons pour finir que des expériences similaires menées à des fréquences légèrement plus élevées présentent des différences notables par rapport aux résultats théoriques.

Comme il est indiqué en référence [6] et ainsi que le remarquent Georgiou et Bond [7], il semble que la limite de validité de la théorie soit donnée par  $\varepsilon=0,08$ .

Ces résultats confirment qu'il serait intéressant de pousser jusqu'au second ordre la théorie développée par Tuan (autorisant ainsi un  $\varepsilon$  légèrement plus grand), ce qui élargirait son domaine de validité et affinerait les résultats, même à basse fréquence.

## 5. Conclusion

Nos résultats expérimentaux valident dans une large mesure la théorie développée par Tuan. Partant de cela, il s'agit de savoir si les courbes de diffusion angulaire de l'énergie convertie à la rainure présentent des propriétés particulières à chaque profil (les dimensions variant pour un profil donné), le but final étant bien entendu de traiter le problème inverse, c'est-à-dire caractériser une rainure (ou en élargissant le terme un défaut de surface) à partir d'une certaine courbe de diffusion.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. S. TUAN, On bulk waves excited at a groove by Rayleigh waves, *J. Appl. Phys.*, 46, 1975, p. 36-41.
- [2] A. RONNEKLEIV et J. SOUQUET, On the theory of acoustic surface-wave to bulk wave scattering by grooves, *J. Appl. Phys.*, 47, 1976, p. 4422-4425.
- [3] J. P. PAREKH et H. S. TUAN, Reflection and bulk wave conversion of Rayleigh wave at a single shallow groove, *J. Appl. Phys.*, 48, 1977, p. 994-1003.
- [4] J.-Cl. DE BREMAECKER, Transmission and reflection of Rayleigh waves at corners, *Geophysics*, 23, 1958, p. 253-256.
- [5] E. BARON, M. DE BILLY et G. QUENTIN, Analyses expérimentale et théorique des phénomènes de conversion liés à l'interaction d'une onde de Rayleigh avec une rainure de type rectangulaire, *Revue Phys. Appl.*, 20, 1985, p. 369-375.
- [6] E. BARON, M. DE BILLY et G. QUENTIN, Experiments on the acoustic surface-wave to bulk-wave scattering by grooves, soumis pour publication à *Sonics and Ultrasonics*.
- [7] G. A. GEORGIU et L. J. BOND, Studies in ultrasonic wave-defect interaction, soumis pour publication à *ASME Journal of Energy Resources Technology*.