



ENREGISTREMENT DE LA PRESSION DE RADIATION ET SON APPLICATION AUX RELEVÉS DES CHAMPS SONORES

par

Claude GAZANHES *

I. INTRODUCTION.

On sait depuis Lord Rayleigh et P. Langevin [1] qu'une palette placée dans le faisceau d'un champ sonore ou ultrasonore est soumise à une pression moyenne dite « pression de radiation » dirigée dans le sens de la propagation. Dans le cas d'un disque plan parfaitement réfléchissant recouvrant entièrement le faisceau, la poussée s'exprime par la relation simple :

$$(1) \quad F = 2E_0 S,$$

E_0 représente la densité d'énergie de l'onde incidente et S la section droite du faisceau. De la mesure de la poussée on déduit facilement la puissance sonore émise mais l'on n'obtient aucun renseignement sur la répartition de la pression à l'intérieur du faisceau. Pour connaître celle-ci il devient nécessaire d'utiliser un tout petit obstacle ne perturbant pas le champ ultrasonore. Pour cela, nous avons employé une petite sphère métallique solidaire d'un pendule mécanique.

Nous allons voir successivement comment s'exerce la pression de radiation sur une sphère, décrire le pendule électronique et son étalonnage, enfin donner les résultats obtenus dans l'étude des champs ultrasonores.

II. PRESSION DE RADIATION SUR UNE SPHÈRE.

La formule (1) du paragraphe précédent n'est plus valable pour une sphère. Celle-ci en effet modifie toujours le champ sonore, en diffractant l'onde incidente. La force qui s'exerce sur la sphère est la résultante des efforts transmis par l'onde incidente et par les ondes diffractées.

King [2] a calculé la force résultante qui s'exerce sur une sphère ; il démontre que la poussée due à la pression de radiation peut se mettre sous la forme :

$$(2) \quad \bar{F} = 10^7 \pi a^2 Y(\alpha, m) \bar{J}/C,$$

où

$$(3) \quad \bar{F} = K\bar{J},$$

a : rayon de la sphère en cm,

C : vitesse du son dans le milieu en cm/s,

$\bar{J}$: intensité sonore moyenne en W/cm²,

$\bar{F}$: poussée sur l'obstacle en dyne,

$\alpha = 2\pi a/\lambda$,

$m = \rho_0/\rho_1$.

$Y(\alpha, m)$ est une fonction des paramètres α et m développable en série entière de la variable α . ρ_0, ρ_1 sont des masses spécifiques du milieu ambiant et de l'obstacle.

Fox [3] a tabulé la fonction Y pour $1 \leq \alpha \leq 20$ et $m \leq 1$. Cela correspond pour une sphère de 3 mm de diamètre à des fréquences supérieures à 150 kHz et à des obstacles de densité supérieure à celle du milieu ambiant. A l'aide de ces courbes nous avons calculé puis tracé le coefficient K de l'équation (3) en fonction de la fréquence entre 0,1 MHz et 0,6 MHz (Fig. 1). Ces courbes donnent la poussée sur l'obstacle rapportée à une intensité sonore moyenne de 1 W/cm².

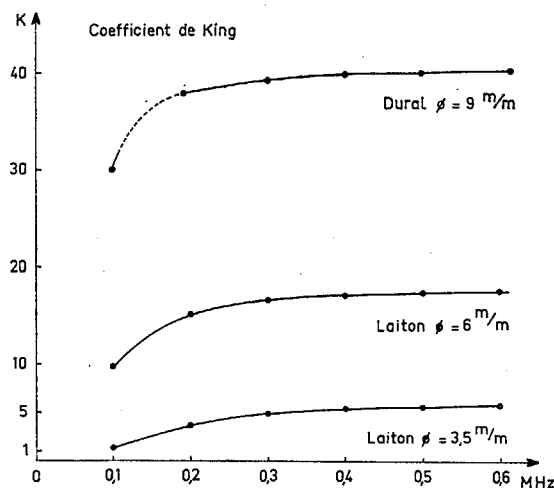


FIG. 1. — Abaque pour le calcul de la poussée sur l'obstacle ramenée à une intensité sonore moyenne de 1 W/cm².

Par exemple pour une sphère de laiton de 3,5 mm de diamètre, on obtient pour la fréquence de 0,5 MHz :

$$\bar{F}_{\text{dyne}} = 5,6 \bar{J}_{\text{W/cm}^2}.$$

* Ingénieur en chef du laboratoire des Ultrasons au C.N.R.S. (Marseille).

III. LE PENDULE ÉLECTRONIQUE.

A. Description.

L'appareil comporte trois parties principales (Fig. 2).

1) Le pendule proprement dit [4].

Il est composé d'une sphère fixée à l'extrémité d'un fil de verre très fin, dont l'autre extrémité est soudée à la tige principale du pendule. Celle-ci porte au quart de sa longueur une aiguille d'acier servant de pivot et à son extrémité supérieure une fine palette en aluminium de 20 mm de diamètre servant d'électrode mobile.

Seuls la sphère et le fil de verre sont plongés dans le faisceau ultrasonore.

2) Le détecteur électronique

Il traduit le déplacement de la sphère en grandeur électronique facilement mesurable. Pour cela l'électrode mobile du pendule est placée entre les électrodes fixes d'un condensateur. Un oscillateur à 50 kHz alimente sous une tension constante deux bobines identiques reliées aux électrodes fixes du condensateur. La tension qui apparaît entre l'électrode mobile et le point milieu des bobines est égale, en première approximation à :

$$v = V \frac{L}{d} \theta,$$

d : distance entre les électrodes fixes ;
 L : distance entre le pivot et l'axe du disque ;
 θ : angle dont a tourné le pendule.

Cette tension est superposée ensuite, dans un détecteur de rapport, à une tension de référence réglable en phase. Après amplification, le déséquilibre initial entre les capacités se traduit par un courant mesuré par un galvanomètre associé à un suiveur de spot.

3) Le dispositif d'enregistrement.

Le pendule équipe une cuve acoustique de 150 cm × 50 cm × 50 cm. Un premier chariot permet le déplacement horizontal Oy suivant l'axe de la cuve ; à l'intérieur de ce chariot, un deuxième chariot porte le pendule et permet le déplacement horizontal Ox suivant la largeur de la cuve. Le dispositif est complété par le galvanomètre-enregistreur dont les déplacements du stylet sont homothétiques de ceux de l'obstacle dans la cuve.

B. Étalonnage.

Celui-ci consiste à traduire la grandeur électronique en grandeur acoustique à partir de déplacements et de forces connus ou directement mesurables [5].

On a tracé les caractéristiques suivantes.

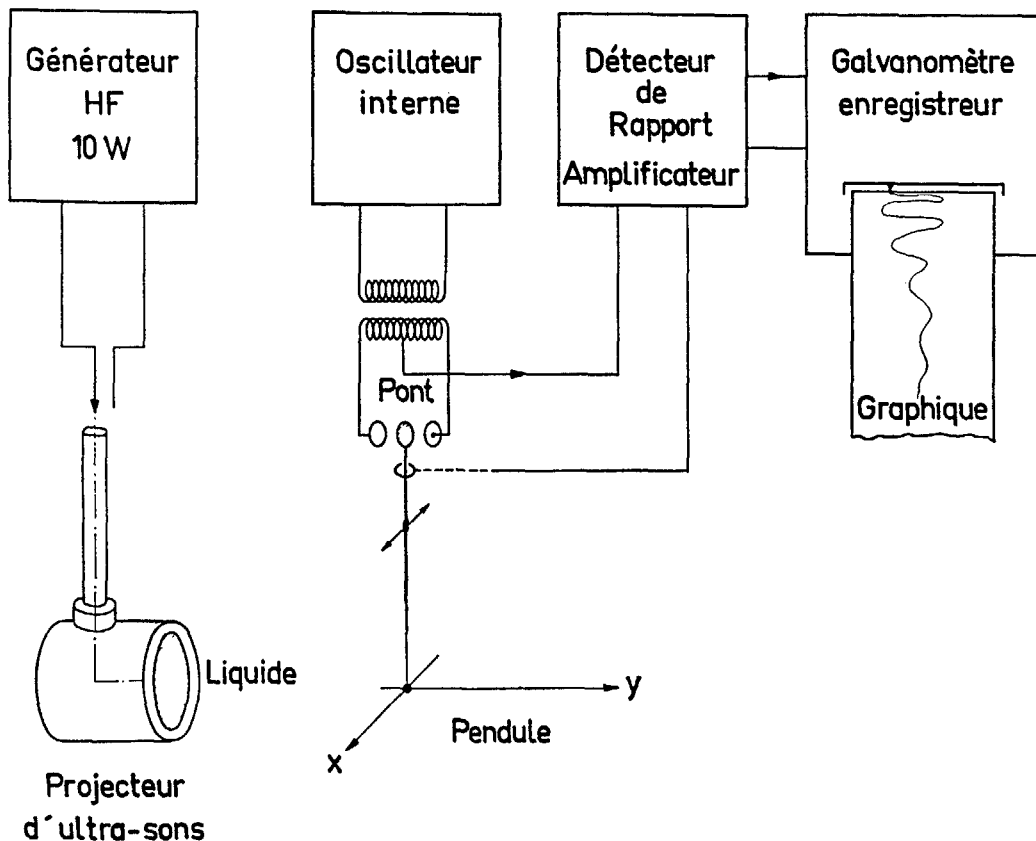


FIG. 2. — Schéma synoptique du pendule électronique.



1) Déviation de l'obstacle-Courant de sortie du détecteur.

La courbe de la figure 3 montre que dans la partie linéaire la sensibilité est de $12 \mu\text{A}/\text{mm}$; la linéarité est suffisante tant que le déplacement ne dépasse pas 5 mm. Au-delà de 5 mm la courbure est due aux forces électrostatiques et au manque de parallélisme des électrodes.

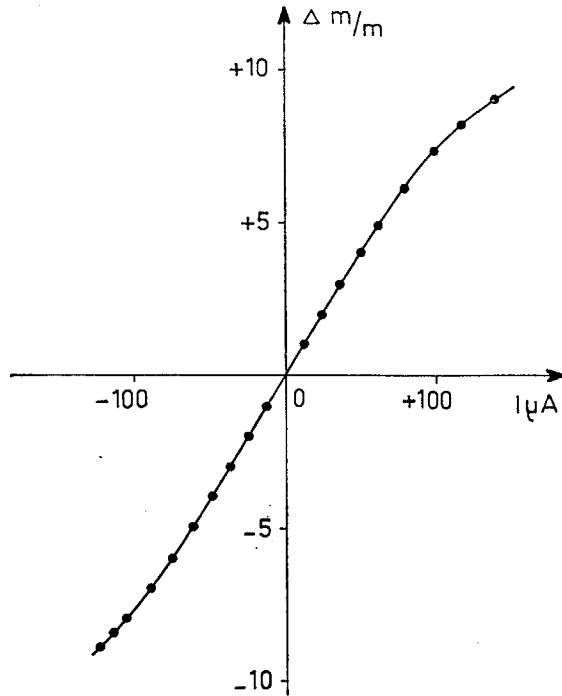


FIG. 3. — Caractéristique : déviation de l'obstacle-courant de sortie du détecteur.

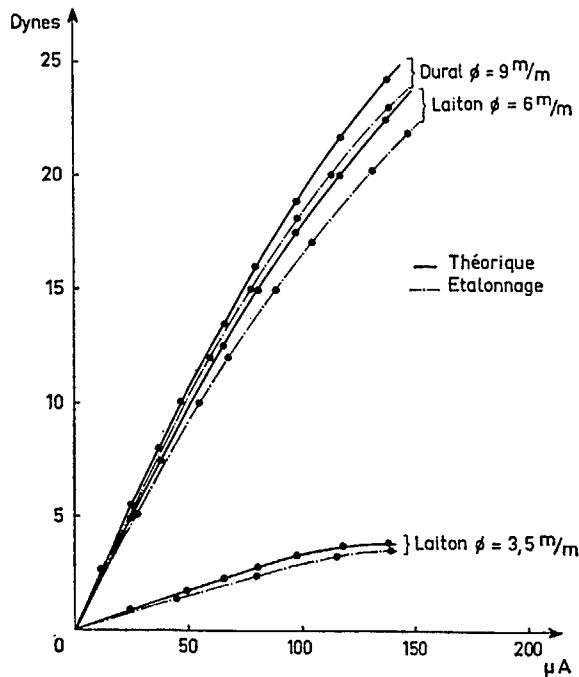


FIG. 4. — Caractéristique : poussées sur l'obstacle-courant de sortie du détecteur.

2) Poussée-Courant de sortie du détecteur.

Les courbes de la figure 4 sont tracées pour trois sphères différentes :

- n° 1 : sphère laiton, diamètre 3,5 mm ;
- n° 2 : sphère laiton, diamètre 6 mm ;
- n° 3 : sphère aluminium, diamètre 9 mm.

Pour la sphère n° 1 la sensibilité du pendule est de $30 \mu\text{A}$ pour 1 dyne.

3) Caractéristique courant de sortie du détecteur en fonction de la fréquence (Fig. 5).

Ces courbes rassemblent sur un même réseau les courbes précédentes et le coefficient de King correspondant. Pour une fréquence ultrasonore et un courant de sortie donnés, elles permettent de déterminer graphiquement l'intensité ultrasonore rayonnée.

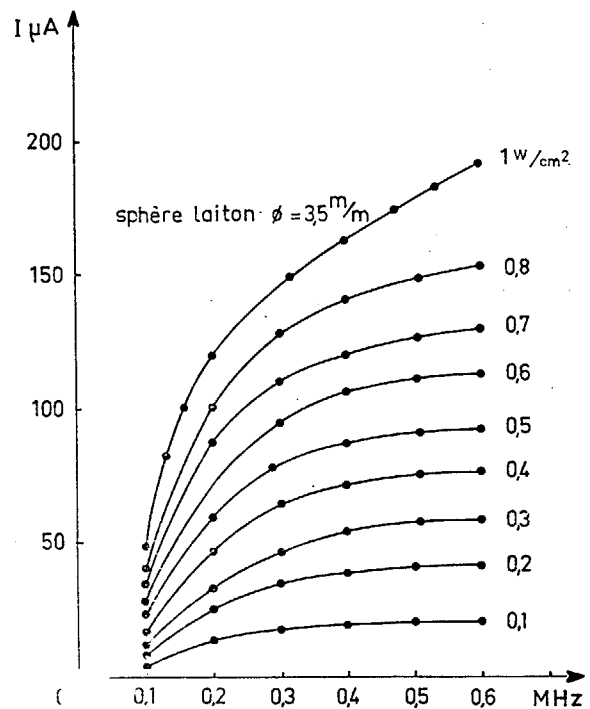


FIG. 5. — Caractéristique : courant de sortie du détecteur-fréquence.

IV. APPLICATIONS.

Une des applications principales de ce pendule est l'étude du champ ultrasonore créé par les transducteurs électroacoustiques. La figure 6 en

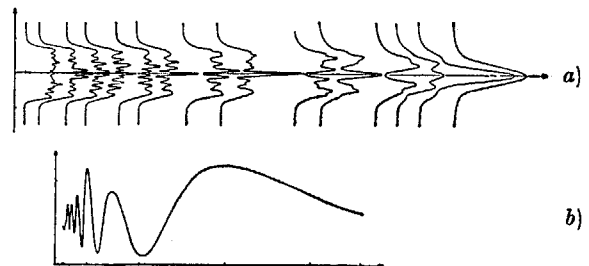


FIG. 6. — Relevé d'un champ ultrasonore rayonné par un quartz. — a) Coupes méridiennes du faisceau relevé le long de l'axe de révolution. b) Coupe longitudinale du faisceau relevé le long de l'axe de révolution.

donne un exemple relatif à un disque de quartz de 60 mm de diamètre, vibrant sur son fondamental 1 144 kHz. On a relevé les méridiennes du faisceau correspondant aux maximums et minimums des poussées suivant l'axe du faisceau ultrasonore. Les coupes transversales mettent en relief le pouvoir de résolution élevé de l'appareil et montrent que les maximums et minimums sont pratiquement alignés sur l'axe du transducteur. Par contre, on note l'écart avec la distribution théorique qui prévoit des minimums nuls, des maximums égaux.

Cet écart avec la théorie se retrouve encore lorsque nous comparons les relevés des pressions suivant l'axe de disques de quartz et de céramiques de titanate de baryum excités sur le fondamental, le 3^e et 9^e partiels. Nous constatons sur les figures 7 et 8 que la distance du maximum principal au centre du disque est inférieure à celle que prévoit la théorie [6].

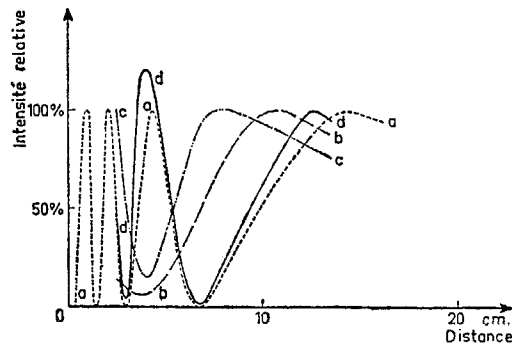


FIG. 7. — Relevé de pressions : a) Piston (298 kHz) ; b) Quartz (298,6 kHz) ; c) BaTiO₃ (298,47 kHz) ; d) BaTiO₃ (296,3 kHz). a), b), c), disques excités sur le fondamental ; d) disque excité sur le 3^e partiel.

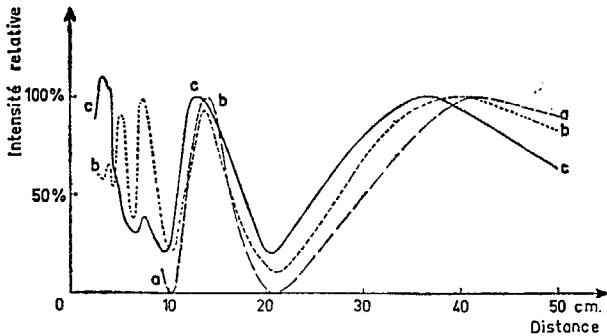


FIG. 8. — Relevé de pressions : a) Piston (900 kHz) fondamental ; b) Quartz (897 kHz) 3^e partiel ; c) BaTiO₃ (909,19 kHz) 9^e partiel.

La courbe théorique est obtenue en supposant que les disques de quartz ou de céramique oscillent en membrane piston, c'est-à-dire que la distribution d'amplitude des vitesses des particules de la surface vibrante est uniforme. Cette hypothèse n'est généralement pas valable. En particulier pour les céramiques, cette distribution d'amplitude dépend du mode de vibration et du rapport diamètre-épaisseur du disque [7].

Il nous est alors apparu intéressant de calculer à partir d'une distribution d'amplitude réelle la répartition de la pression suivant l'axe du disque vibrant

et de comparer nos résultats à un relevé expérimental de cette même pression obtenu à l'aide du pendule.

Pour ce faire nous avons tracé à l'aide d'une petite sonde piézoélectrique [8] la distribution d'amplitude correspondant à trois disques de titanate de baryum (Fig. 9A). Nous avons introduit cette distribution dans la formule [9],

$$P(Z) = i \exp^{i\omega t} \frac{\rho C}{\lambda} \int_S U_\omega(r, \theta) \frac{e^{-ikR}}{R} dS,$$

donnant la pression acoustique produite en un point de l'espace proche de la surface émettrice. Les calculs effectués sur une machine arithmétique CAB 500 ont conduit aux trois courbes de la figure 9C que l'on compare aux relevés expérimentaux de la figure 9B qui sont voisins des courbes précédentes.

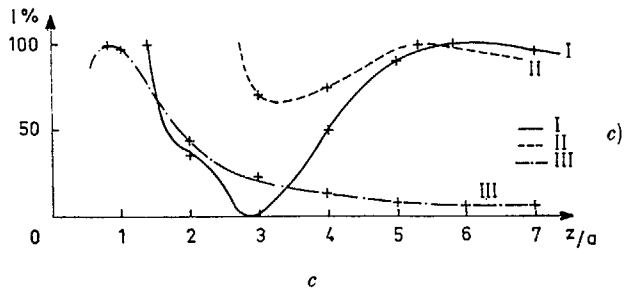
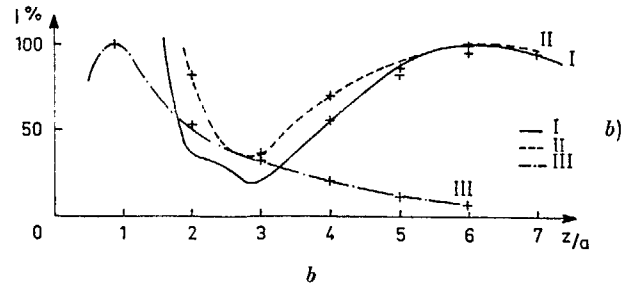
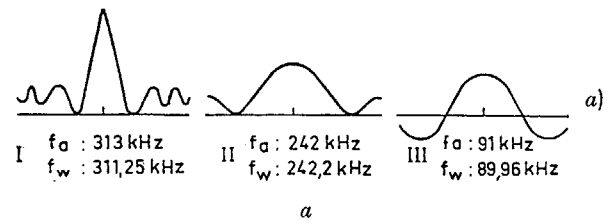


FIG. 9. — Étude de trois disques de titanate de baryum. A) Distribution d'amplitude ; B) Pression : relevé expérimental ; C) Pression : calculée.

Signalons pour terminer que le pendule permet d'étalonner des petits capteurs piézoélectriques. La figure 10 donne un exemple de courbe d'étalon-

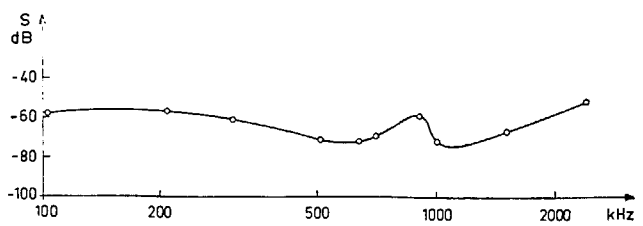


FIG. 10. — Courbe d'étalonnage d'un capteur de 8 mm de diamètre.



nage obtenue pour un petit capteur de 8 mm de diamètre. On note sur la courbe la résonance du capteur pour 911 kHz.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LANGEVIN (P.), CHILOWSKY (C.). Brevet français n° 502-913, (29 mai 1946).
- [2] KING (L. V.). *Proc. Roy. Soc. (A.)*, (1934), **147**, p. 212
- [3] FOX (F. E.). *J. Acoust. Soc. amer.*, (1940), **12**, p. 147.
- [4] ROURE (J.), GARNIER (J. L.). *C. R. Acad. Sci.*, (1964), **258**, p. 3825....
- [5] GAZANHES (C.), GARNIER (J. L.), REINIER (G.), *Acustica*, (1965-1966), **16**, n° 3, p. 142.
- [6] PAJEWSKI (W.), GAZANHES (C.), GARNIER (J. L.). *C. R. Acad. Sci.*, (1966), **262**, p. 232....
- [7] SHAW (E. A. G.). *J.A.S.A.*, (1956), **28**, n° 1, p. 38.
- [8] GAZANHES (C.). *C. R. Acad. Sci.*, (1965), **262**, p. 3303.
- [9] PAJEWSKI (W.), GAZANHES (C.). *5^e Congrès Int. d'Acoustique*, Liège, (sept. 1965), D **16**.