Capteur de niveau d'un liquide à absorption d'ondes élastiques

L. Levin, D. Royer, O. Legras

► To cite this version:

L. Levin, D. Royer, O. Legras. Capteur de niveau d'un liquide à absorption d'ondes élastiques. Journal de Physique IV Proceedings, 1994, 04 (C5), pp.C5-291-C5-294. 10.1051/jp4:1994560 . jpa-00253055

HAL Id: jpa-00253055

<https://hal.science/jpa-00253055>

Submitted on 1 Jan 1994

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Capteur de niveau d'un liquide à absorption d'ondes élastiques

L. LEVIN, D. ROYER et O. LEGRAS*

Laboratoire Ondes et Acoustique de l'Université Paris 7, URA 1503 CNRS, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris cedex 05, France

** Auxitrol, 78 Avenue de la Prospective, 18025 Bourges, France*

Abstract. This new type of liquid level sensor is based on the attenuation of elastic waves guided in a hollow cylinder partially immersed in the liquid. The cylinder (10 cm long) is suspended at one end of a few meter long magnetostrictive wire. The acoustic waves are launched in the wire by a pulse of current in a coil and after propagating are transmitted through a cylindrical horn to the hollow cylinder. The carrier frequency of the wave trains and the thickness of the tube are chosen so that the waves strongly leak into the liquid when the cylinder is immersed. Then, this sensor is automatically maintained just immersed by winding or unwinding the wire so that the waves can leak. The level is finally determined by measuring the time-of-flight of the echo reflected at the junction between the wire and the horn.

1- INTRODUCTION

Trois techniques sont principalement utilisées pour mesurer le niveau d'un liquide dans une cuve. La première est basée sur la mesure de la pression hydrostatique: un gaz est insufflé dans un tuyau immergé dans le liquide jusqu'à l'apparition de bulles. La seconde consiste à contrôler la tension mécanique d'un fil qui supporte un disque. L'équilibre correspond à une certaine pénétration du disque dans le liquide de sorte qu'un changement de niveau déséquilibre le système et déclenche automatiquement l'enroulement ou le déroulement du fil autour d'un tambour. La troisième technique repose sur la mesure du temps de vol d'ondes acoustiques se propageant dans l'air entre un transducteur fixe et la surface du liquide. Ces méthodes ne donnent pas entière satisfaction. La précision de la première est souvent insuffisante car elle dépend des inhomogénéités locales de densité du liquide. La technologie de la seconde est complexe et nécessite une connaissance très précise de la circonférence du tambour. La troisième est très sensible aux fluctuations de température et aux mouvements de l'air. Pour remédier à ces inconvénients, nous proposons un nouveau dispositif basé sur l'absorption d'ondes élastiques.

2- PRINCIPE

Le principe de fonctionnement de ce palpeur repose sur le fait que les ondes élastiques guidées par une plaque ou un cylindre (creux) rayonnent de façon importante dans un liquide environnant lorsque la fréquence est telle que la vitesse de groupe passe par un minimum [1]. La figure 1 a montre le schéma fonctionnel du capteur; il se compose d'un tube (palpeur: $\varnothing_{\text{ext}} = 9$ mm, $\varnothing_{\text{int}} = 7$ mm) suspendu à un fil magnétostrictif F ($\varnothing = 0,5$ mm). Le fil est enroulé autour d'un tambour commandé par un moteur. A un instant t_0 , un train d'ondes acoustiques est engendré dans le fil par une bobine émettrice (E) et se propage à une vitesse constante V. Une partie est transmise au tube à travers un cône plein. L'autre partie, réfléchiée à la jonction A, est détectée par la bobine réceptrice R (écho E1). Lorsque le tube est dans l'air, le train d'ondes transmis se réfléchit à l'extrémité B et donne lieu au second écho E2 (fig.1 b). La fréquence porteuse du train d'ondes et l'épaisseur du tube sont choisies de telle sorte que les ondes élastiques rayonnent fortement dès que le cylindre pénètre dans le liquide. L'amplitude de l'écho E2 diminue alors en fonction de l'immersion et le déroulement du fil est arrêté dès que le signal E2 passe en dessous d'un seuil

fixé. Le niveau H du liquide est alors donné par le retard ($t_1 - t_0$) de l'écho E1 :

$$H = V(t_1 - t_0)/2 + d_2 + d_1/2 \quad (1)$$

La distance d_2 est déduite de l'amplitude du second écho E2 et du coefficient d'atténuation. L'élément essentiel du capteur est le palpeur P. La nature du matériau et le mode de propagation déterminent la vitesse et le coefficient d'atténuation du train d'ondes transmis.

3 - VITESSE DE GROUPE DES ONDES GUIDEES DANS UN TUBE.

Trois types de mouvements peuvent se propager dans un guide cylindrique de longueur infinie. Les modes de *torsion* ne font intervenir qu'une seule composante de déplacement u_θ qui ne dépend pas de l'angle sur la circonférence θ . Les modes *longitudinaux* sont caractérisés par des déplacements de type radial (u_r) et axial (u_z) indépendants de θ . Les modes de flexion correspondent, à des déplacements incluant toutes les composantes variant en $\sin(n\theta)$ et $\cos(n\theta)$. Alors qu'il existe une infinité de familles de modes de flexion $F(n,m)$, il n'y a qu'une famille de modes de torsion $T(0,m)$ et une famille de modes longitudinaux $L(0,m)$. La formulation analytique donnée par Gazis [2] implique la résolution d'une équation résultant de l'annulation d'un déterminant 6×6 [3]. Ici nous employons l'approximation des coques minces [4].

La figure 2 montre les variations de la vitesse de groupe pour les premiers modes de flexion et longitudinaux dans un tube en acier de rayon moyen $a = 4,37$ mm et d'épaisseur $h = 1,25$ mm ($\rho = 7\,930$ kg/m³). Les vitesses des ondes longitudinales $V_L = 5\,690$ m/s et transversales $V_T = 3\,170$ m/s dans le matériau ont été mesurées par la méthode de la ligne à retard. Il apparaît que la vitesse de groupe du mode $L(0,1)$ présente un minimum très accentué pour une fréquence de 227 kHz correspondant à un produit $\frac{\omega a}{V_T} = 1,68$. On s'attend, comme pour le mode symétrique des ondes de Lamb se propageant dans une plaque [5], à ce que le rayonnement dans un fluide environnant soit maximum à cette fréquence.

Pour le mode longitudinal $L(0,1)$, les valeurs expérimentales (*) ont été mesurées sur un tube de longueur 55 cm ($a = 4,37$ mm, $h = 1,25$ mm) se terminant par une section pleine de diamètre 10 mm. Les trains d'ondes élastiques sont émis par une céramique piézoélectrique collée en bout de la partie pleine. Le minimum de la vitesse de groupe (420 m/s) apparaît pour une fréquence de 196 kHz. Au voisinage de ce minimum, la vitesse de phase change rapidement: la forme du signal est alors assez distordue. Il est de ce fait plus difficile de détecter la position exacte du pic du train d'ondes réfléchi. Cependant les points expérimentaux sont en bon accord avec la courbe calculée.

4- ATTENUATION

La vitesse de phase V_ϕ de l'onde guidée étant supérieure à la vitesse c dans l'eau, l'énergie acoustique est rayonnée progressivement sous forme d'une onde conique faisant un angle $\theta = \arcsin(c/V_\phi)$ avec le plan perpendiculaire à l'axe du guide. Le coefficient d'atténuation $\alpha = \langle P_d \rangle / 2 \langle P_1 \rangle$ s'exprime en fonction de la puissance moyenne dissipée dans le liquide par unité de longueur $\langle P_d \rangle$ et de la puissance moyenne $\langle P_1 \rangle$ transportée par l'onde guidée. Dans un liquide non visqueux, de masse volumique ρ , seules les contraintes normales T_{rr} ne sont pas nulles à l'interface $r = b$: $T_{rr} = -\rho c \dot{u}_r$. Sachant que la rayonnement ne s'effectue que sur la surface externe et que le déplacement mécanique u dans le liquide est égal à $u_f(b)/\cos \theta$, la puissance moyenne dissipée s'écrit :

$$\langle P_d \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} -T_{rr}(b) \dot{u}_r^*(b) b d\theta \right] = \pi b \rho c \frac{|\dot{u}_r(b)|^2}{\cos \theta} \quad (2)$$

La puissance moyenne transportée par le mode longitudinal s'exprime en fonction de sa vitesse de groupe et des composantes u_r et u_z du déplacement mécanique dans le tube (masse volumique ρ_s) par :

$$\langle P_1 \rangle = \frac{1}{2} \rho_s V_g \int_{b-h}^b [|\dot{u}_r|^2 + |\dot{u}_z|^2] 2\pi r dr \quad (3)$$

Le coefficient d'atténuation α est proportionnel au carré du déplacement normal $u_r(b)$ à la surface en contact avec le liquide et à l'inverse de la vitesse de groupe V_g :

$$\alpha = \frac{b \rho c}{2 \rho_s V_g \cos \theta} \cdot \frac{|u_r(b)|^2}{\int_{-h/2}^{+h/2} [|u_r|^2 + |u_z|^2] (a+x) dx} \quad (4)$$

La figure 3 montre les variations, en fonction de la fréquence, du facteur d'atténuation 2α . Les mesures ont été effectuées sur le même cylindre ($a = 4,37$ mm, $h = 1,25$ mm), la partie inférieure étant maintenue en dehors de tout contact avec l'eau à l'aide d'un cache, afin d'éviter les effets de rayonnement en bout de cylindre. Seule la partie au-dessus du cache est immergée.

5 - EXPERIENCES.

Les trains d'ondes élastiques (durée de $100 \mu s$) sont émis dans le fil en alliage d'acier et de nickel par une impulsion de courant appliquée à une bobine comprenant 20 tours de fil. A la fréquence porteuse (260 kHz), le diamètre du fil (0,5 mm) est petit devant la longueur d'onde ($\lambda \approx 20$ mm), les ondes élastiques émises se propagent sur des distances supérieures à 20 m avec une vitesse de groupe de 5 000 m/s, sans dispersion ni atténuation gênantes. Les impulsions réfléchies sont détectées par une bobine réceptrice (2 000 tours). Le fil est brasé au sommet du cône plein de longueur 6 cm, prolongé par un tube de 10 cm ($a = 3,75$ mm, $h = 1,5$ mm) fermé à son extrémité. La figure 4 a montre les signaux détectés. Après le passage de l'onde émise, le premier écho E1 provient de la réflexion à la jonction entre le fil et le cône. Plus de la moitié (selon la qualité de la soudure) de l'énergie incidente est transmise dans le tube sous forme d'un mode longitudinal, se propageant alors à une vitesse de groupe de 1220 m/s, qui se réfléchit en bout de tube et donne lieu au second écho E2. Lorsque le tube est immergé, l'amplitude de E2 décroît rapidement. Les figures 4 b et c correspondent respectivement à une immersion de 5 et 8 mm. Ces résultats montrent que la pénétration du tube dans le liquide peut être connue et contrôlée au millimètre près. Le dispositif électronique est géré par un microcontrôleur qui comporte une horloge fonctionnant à 2 MHz, ce qui donne une résolution de 1,25 mm. La figure 5 montre les signaux obtenus pour un palpeur suspendu à 10 m et à 20 m. L'amplitude du signal est divisée par 3 sur un parcours total de 40 m à 230 kHz. Le niveau du signal est maintenu constant en ajustant le niveau d'émission à la longueur de fil déroulé. La variation relative de la vitesse de groupe en fonction de la température est intégrée dans le calcul de distance. Les mesures effectuées avec ce dispositif dans un puits métrologique ont fait apparaître une précision de ± 2 mm sur des distances allant jusqu'à 20 m.

6 - CONCLUSION

Les expériences décrites ont montré la validité du principe du capteur. Le contact avec le liquide est détecté par l'absorption de trains élastiques se propageant dans un tube selon le mode $L(0,1)$ à une fréquence proche du minimum de la vitesse de groupe. En utilisant un fil magnétostrictif, enroulé autour d'un tambour, pour transmettre les trains d'ondes au tube, la course dépasse 20 m. La résolution est de l'ordre de 1,5 mm. Une fois corrigées les variations de vitesse dues aux variations de température, la précision est de ± 2 mm.

REFERENCES

- 1 - E. DIEULESAINT, O. LEGRAS et D. ROYER, "DéTECTEUR de la présence d'un liquide à ondes élastiques", J. Phys., vol. 51, Colloque C2, pp. 53-56, 1990.
- 2 - D.C. GAZIS, "Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinder. I. Analytical foundation", J. Acoust. Soc. Am., vol. 31, pp.568-573, 1959.
- 3 - N.C. NICHOLSON and W.N. McDICKEN, "Mode propagation of ultrasound in hollow wave-guides", Ultrasonics, vol. 29, pp. 411-416, 1991.
- 4 - R.M. COOPER and P.M. NAGHDI, "Propagation of non axially symmetric waves in elastic cylindrical shells", J. Acoust. Soc. Am., vol. 29, pp.1365-1373, 1957.
- 5 - E. DIEULESAINT, D. ROYER, O. LEGRAS and A. CHAABI, "Acoustic plate mode touch screen", Electron. Lett., vol. 27, pp.49-51, 1991.

Fig.1-a) Schéma de principe du capteur
b) Signaux attendus lorsque le palpeur est non immergé.

Fig.2. Vitesse de groupe relative des premiers modes longitudinaux et de flexion se propageant dans un tube de rayon moyen $a = 4,37$ mm et d'épaisseur $h = 1,25$ mm en fonction de la fréquence. Valeurs expérimentales de la vitesse de groupe (•) du mode $L(0,1)$.

Fig.3. Signaux détectés lorsque le palpeur ($a = 3,75$ mm, $h = 1,5$ mm) est :
a) dans l'air b) immergé de 5 mm dans l'eau c) immergé de 8 mm.

Fig.4. Variation du facteur d'atténuation 2α en fonction de la fréquence pour un tube ($a = 4,37$ mm, $h = 1,25$ mm) en contact avec l'eau sur la surface extérieure. Valeurs expérimentales ($\times$).

Fig.5. Signaux obtenus lorsque le palpeur est suspendu à : a) 10 m, b) 20 m pour une fréquence d'émission de 230 kHz.