



**HAL**  
open science

# CAPTEURS À ONDES ACOUSTIQUES TRANSVERSES HORIZONTALES. POSSIBILITÉS ET LIMITES POUR LA MESURE DE LA VISCOSITÉ

Moussa Hoummady, D. Hauden, F. Bastien

► **To cite this version:**

Moussa Hoummady, D. Hauden, F. Bastien. CAPTEURS À ONDES ACOUSTIQUES TRANSVERSES HORIZONTALES. POSSIBILITÉS ET LIMITES POUR LA MESURE DE LA VISCOSITÉ. Journal de Physique IV Proceedings, 1992, 02 (C1), pp.C1-657-C1-660. 10.1051/jp4:19921142 . jpa-00251100

**HAL Id: jpa-00251100**

**<https://hal.science/jpa-00251100>**

Submitted on 4 Feb 2008

**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.

**CAPTEURS À ONDES ACOUSTIQUES TRANSVERSES HORIZONTALES. POSSIBILITÉS ET LIMITES POUR LA MESURE DE LA VISCOSITÉ**

M. HOUMMADY, D. HAUDEN et F. BASTIEN

*Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs du C.N.R.S. associé à l'Université de Franche-Comté-Besançon, 32 avenue de l'Observatoire, F-25000 Besançon, France***Résumé :**

Les ondes transverses horizontales (TH) sont intéressantes pour l'analyse des liquides car les propriétés physiques de ces derniers (viscosité, densité etc...) sont directement liées aux propriétés de l'onde. Les ondes TH sont excitées et détectées, dans une plaque de quartz, par des transducteurs interdigités (IDT) déposés par photolithographie sur la même surface. La surface opposée est utilisée comme surface d'interaction entre l'onde et un liquide visqueux. Les quantités de liquides mises en jeu pour la mesure sont extrêmement faibles (inférieures à 0,1ml). L'atténuation de l'onde, augmentant avec la viscosité du liquide, est toutefois limitée par le comportement élastique qui devient prépondérant pour des viscosités supérieures à une valeur critique. Cette valeur dépend à la fois de la fréquence de fonctionnement et du coefficient d'élasticité de cisaillement du liquide. Nous présentons des résultats théoriques et expérimentaux obtenus pour deux fréquences différentes (190 MHz et 59 MHz), afin d'étudier l'influence de celle-ci sur la sensibilité et la dynamique du capteur de viscosité à ondes TH.

**Abstract :**

Shear Horizontal waves (SH) are interesting for liquid analysis because their propagation properties depend on physical properties of liquid (viscosity, density etc...). SH waves are generated and detected, in a piezoelectric quartz plate, by means of interdigital transducers (IDT) deposited by photolithography on the same area. The opposite face is used here as an interaction area between the SH waves and a viscous liquid. The used quantities of liquid are smaller than 0.1ml. The wave attenuation increases when the viscosity of the liquid increases. This attenuation is however limited by the elastic behavior appearing at high values of viscosity. The maximum viscosity that can be measured depends on both operating frequency and shear elastic modulus. Theoretical and experimental results are presented for two frequencies (190 MHz and 59 MHz) in order to study the effect of frequency on the sensitivity and operating viscosity range of the device.

**1- Introduction :**

Le principe de fonctionnement des capteurs piézoélectriques consiste à transformer une grandeur physique (température, pression, accélération...) en une grandeur électrique (amplitude, phase, fréquence...). Ces capteurs utilisent les propriétés élastiques des matériaux piézoélectriques pour la propagation d'ondes acoustiques.

Dans un premier temps, la constitution des capteurs piézoélectriques se limitait aux résonateurs à ondes de volume, appelés également résonateurs à quartz. Leurs principales applications concernent encore la mesure de la température et la microbalance à quartz. Les

dispositifs à ondes de surface, en raison de leur fonctionnement à hautes fréquences, furent ensuite utilisés pour améliorer la sensibilité de ces capteurs. Une importante application actuelle les concernant est la mesure des propriétés chimiques des gaz [1-2]. Dans ce type de fonctionnement, l'excitation et la détection des ondes de surface se font électriquement par des transducteurs interdigités (IDT) déposés sur la surface d'un substrat piézoélectrique.

Récemment, une étude a abouti à l'utilisation de ces mêmes IDT pour exciter et détecter non plus des ondes de surface mais des ondes de volume guidées dans des plaques minces piézoélectriques [3]. Les capteurs piézoélectriques fonctionnant sur ce dernier principe sont appelés capteurs à modes de plaque, celle-ci vibrant soit en flexion-compression (modes de Lamb), soit en cisaillement horizontal (modes transverses horizontaux TH).

Dans ces capteurs, la génération et la détection ayant lieu sur une seule face de la plaque, la surface opposée se trouve libre de transducteurs. Celle-ci peut donc remplir la fonction de surface d'interaction entre l'onde et un corps à étudier. Il en résulte de nouvelles applications de ces capteurs, concernant la mesure des propriétés physicochimiques des liquides, telles que la viscoélasticité [4], et la concentration ionique par utilisation d'une couche chimique [5], ainsi que l'étude de transitions de phase [6]. Notons que, dans le but de réduire les pertes par rayonnement dans le liquide étudié, il s'avère judicieux d'utiliser les ondes TH, celles-ci étant évanescentes. Concernant la mesure de la viscoélasticité, un certain nombre de résultats ont été publiés [4]. Nous présentons ici la suite de nos travaux dont le but est une amélioration de la sensibilité et de la dynamique de ce viscosimètre, par étude de l'influence de la fréquence de fonctionnement.

## 2- Description du dispositif expérimental et principe de la mesure :

La plaque de quartz utilisée pour les mesures expérimentales est de coupe Y et d'épaisseur 1 mm. Sur sa surface inférieure sont déposés par photolithographie deux couples de transducteurs, constituant deux lignes à retard notées 1 et 2. Dans le but d'étudier l'influence de la fréquence, les périodes spatiales des transducteurs concernant les lignes 1 et 2 sont choisies différentes et valent respectivement 34,4 micromètres et 150  $\mu\text{m}$  (figure-1).

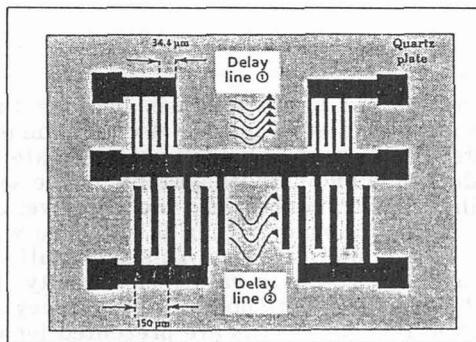


Fig.-1:- Schéma illustrant le fonctionnement à deux fréquences distinctes

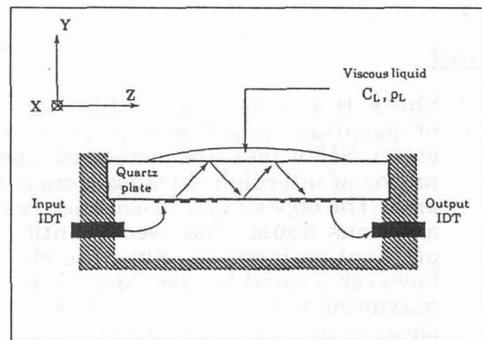


Fig.-2:- Schéma en coupe du dispositif expérimental

Quant au principe de la mesure, bien que déjà publié, nous le rappelons ici pour une meilleure compréhension. Nous déposons le liquide (0,1 ml) sur la surface libre de la plaque (voir figure 2), et mesurons alors l'atténuation de l'onde induite par ce dépôt.

Pour cette mesure, nous procédons par excitation impulsionnelle afin d'une part de séparer le signal électromagnétique des différents échos acoustiques, et d'autre part de s'affranchir des effets de la température.

L'atténuation  $At$  de l'onde lors d'une seule réflexion se déduit de la mesure de l'amplitude de chaque écho après  $n$  réflexions sur l'interface "quartz-liquide" en l'absence de liquide  $A_n^0$  et en présence de celui-ci  $A_n^l$  :

$$At = (1 - \sqrt{A_n^l / A_n^0}) \quad (1)$$

Cette atténuation est d'autant plus importante que le liquide est plus visqueux. Pour faire varier cette viscosité, nous utilisons des mélanges "eau+glycérine" à différentes concentrations, dont nous faisons également changer la température.

### 3- Résultats théoriques et expérimentaux :

Le modèle théorique est élaboré à partir des conditions aux limites relatives à la continuité des déplacements mécaniques et à la continuité des contraintes à l'interface "quartz-liquide".

En ce qui concerne la propagation de l'onde TH dans un liquide non parfait dépourvu d'électricité statique, elle est régie par la loi suivante :

$$T + \tau \frac{\partial T}{\partial t} = \eta \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2)$$

où :  $T$  est la contrainte,  $S$  est la déformation.  $\tau$  est le temps de relaxation du liquide exprimé par  $\tau = \eta / \mu$ ,  $\mu$  étant le coefficient d'élasticité de cisaillement et  $\eta$  le coefficient de viscosité.

Rappelons que pour un liquide parfait dit newtonien, la contrainte est proportionnelle au gradient de la déformation. La relation (2) devient :

$$T = \eta \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3)$$

Dans le cas d'une excitation harmonique, le terme  $\partial / \partial t$  est remplacé par  $j\omega$ . La relation liant la contrainte  $T$  à la déformation  $S$  s'écrit alors :

$$T = \frac{j\omega \eta}{(1 + j\omega\tau)} S \quad (4)$$

En fonction de la valeur de  $\omega\tau$ , deux comportements du liquide sont mis en évidence :

- Quand  $\omega\tau \ll 1$ , le comportement du liquide est alors celui d'un liquide visqueux.
- Quand  $\omega\tau \gg 1$ , le liquide se comporte comme un solide amorphe caractérisé par un coefficient de cisaillement  $\mu$ . La relation (4) se réduit à la loi de Hooke :

$$T = \mu S \quad (5)$$

Il est donc mis en évidence que la mesure de la viscosité se trouve limitée par l'apparition du comportement élastique du liquide, pour des grandes valeurs de  $\omega\tau$ , c'est à dire à partir d'une viscosité critique  $\eta_c = \mu / \omega$ .

A l'aide du dispositif expérimental, les mesures d'atténuation sont réalisées à deux fréquences différentes : 190 MHz pour la ligne à retard 1 et 59 MHz pour la ligne à retard 2. Le rapport entre ces fréquences étant approximativement d'un facteur 3, la viscosité critique se trouve alors augmentée de ce même facteur.

Nous présentons sur la figure 3 les variations théoriques (en traits continus) et expérimentales de l'atténuation normalisée  $At\sqrt{\rho/\rho_0}$  ( $\rho$  et  $\rho_0$  masses volumiques du liquide et de l'eau) en fonction de la racine carrée du coefficient de viscosité  $\eta$ . Ce choix de représentation est motivé par l'existence d'une proportionnalité entre l'atténuation et  $\sqrt{\eta}$  pour un liquide newtonien.

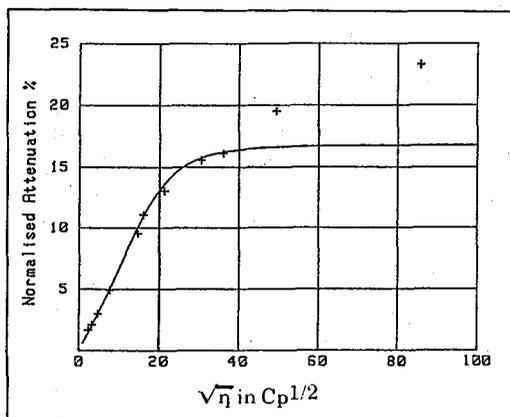


Fig.-3-: Réponse théorique et expérimentale obtenues pour  $f = 190$  MHz

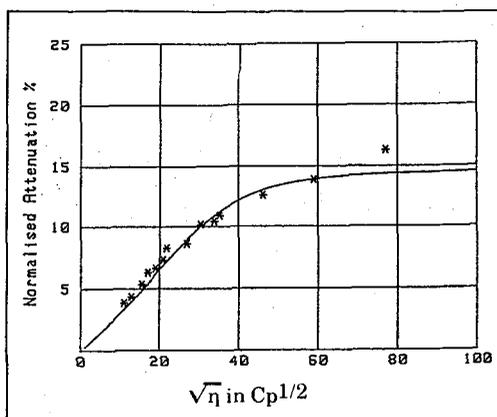


Fig.-4-: Réponse théorique et expérimentale obtenues pour  $f = 59$  MHz

Cette figure montre que le comportement élastique du liquide apparaît à partir d'une viscosité égale à 400 centipoise. Pour des viscosités inférieures à 1 600 centipoise, le modèle théorique est en accord avec les résultats expérimentaux, ce qui n'est plus le cas au-delà de cette valeur. En effet, les grandes valeurs de  $\eta$  sont obtenues par modifications de la température des liquides. L'écart entre résultats expérimentaux et théoriques est dû au fait que  $\mu$  dépend de la température.

La figure 4 montre que, à la fréquence de 59 MHz, la dynamique du viscosimètre est augmentée d'un facteur 3. Toutefois, sa sensibilité se trouve légèrement diminuée. Néanmoins, cette perte de sensibilité n'est pas gênante car les mesures d'atténuations sont effectuées sur des échos ayant subi non pas une mais plusieurs réflexions.

#### 4- Conclusion :

Cette étude fait apparaître qu'un fonctionnement à basse fréquence augmente la dynamique du viscosimètre, mais diminue toutefois sa sensibilité, ce qui nécessite de trouver un compromis entre ces deux facteurs.

Pour cela, il serait intéressant d'exciter des ondes de vitesse plus faibles que celle générées dans les coupes Y à simple rotation du quartz. Cette solution permettrait de diminuer encore la taille du capteur.

#### Références :

- [1] A. Venema, E. Nieuwkoop & M.J. Vellkoop, *Sensors and Actuators* 10, 47-64 (1986).
- [2] D. Rebière, M. Hoummady, D. Hauden, J.L. Aucouturier, J. Pistré, P. Cunin & R. Planade, *TRANSDUCERS'91*, June (91), San Francisco, USA.
- [3] M. Hoummady, B.A. Auld, D. Hauden, E. Bigler, *1er Congrès Français d'Acoustique*, Avril (1990), Lyon.
- [4] M. Hoummady & F. Bastien, *Review of Scientific Instruments*, 62, 1999-2003 (1991).
- [5] C. Caliendo, A. D'Amico, M. Mascini, D. Moscone & E. Verona, *Eurosensors-V*, Sept./Oct. (91)
- [6] M. Hoummady & F. Bastien, *Journal of Applied Physics*, 70, 4629-4631 (1991).