

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

823



NICE du 16 au 20 MAI 1983

HYDROPHONE DE VITESSE à PVF2<sup>\*</sup>  
PVF2 VELOCITY HYDROPHONE

Michel JOSSERAND

THOMSON-CSF, Division des Activités Sous-Marines, BP 53, 06801 CANGES-sur-MER CEDEX (France)

## RESUME

Dans le domaine de l'écoute passive en très basses fréquences, pour localiser des bruiteurs à l'aide d'antennes de dimensions raisonnables, il est intéressant de concevoir des capteurs qui présentent une directivité intrinsèque.

L'hydrophone de vitesse n'est pas le seul type de capteur ayant une directivité intrinsèque, mais c'est le seul capteur directif dont la sensibilité puisse être intrinsèquement indépendante de la fréquence.

Le polyvinyl difluoré PVF2 utilisé sous forme de bilame, est adapté à la réalisation de capteurs de vitesse. Du fait de sa grande souplesse le PVF2 permet de réaliser un compromis entre deux exigences contradictoires : une bonne sensibilité qui demande une épaisseur de bilame élevée, une grande souplesse de la membrane pour que la fréquence de résonance soit la plus basse possible, ce qui requiert une épaisseur faible.

La réalisation d'un banc de calibration en vitesse vibratoire ainsi qu'une modélisation assez précise du fonctionnement des hydrophones à bilame de PVF2 encastré ont permis de mettre au point des capteurs de vitesse de poids faible et d'encombrement réduit, présentant une directivité intrinsèque à quelques dizaines de hertz, adaptés à des antennes passives à support stable.

## SUMMARY

In underwater acoustical low frequencies applications, an hydrophone with intrinsic directivity is often needed. Velocity sensitive hydrophones are not the only devices having this property, but they are the only directive one that can have a sensitivity independent on frequency.

Poled polyvinylidene fluoride (PVF2) bimorphs are suitable for design of velocity hydrophones. Because of their softness and mechanical flexibility, the PVF2 bimorphs make possible a compromise between two opposite requirements : a high sensitivity which needs a thick polymer, a high mechanical flexibility of the membrane to get the lowest possible resonance frequency that requires a thin bimorph.

The study of a low frequency particule velocity calibration system, added to a rather accurate modelization of the operation of hydrophones with cantilever PVF2 bimorphs, made possible the achievement of small lightweight velocity hydrophones, showing an intrinsic directivity below a hundred hertz, and well adapted to passive arrays with stable support.

\* Etude financée par la DRET (Paris, France)



## 1. - INTRODUCTION.

Les capteurs hydrophoniques utilisés actuellement dans les bases sonars sont des capteurs de pression, c'est-à-dire qu'ils sont sensibles à un scalaire : la pression vibratoire. Quand la dimension du capteur est petite devant la longueur d'onde, celui-ci est alors obligatoirement omnidirectionnel.

Dans le domaine de l'écoute passive en très basse fréquence, pour localiser des bruiteurs à l'aide d'antennes de dimensions raisonnables, il est intéressant de concevoir des capteurs qui présentent une directivité intrinsèque.

L'hydrophone de vitesse n'est pas le seul type de capteur ayant une directivité intrinsèque. Tous les capteurs sensibles à une grandeur vectorielle liée à l'onde acoustique ont cette propriété : capteurs d'accélération, déplacement particulaire, gradient de pression. Mais c'est le seul capteur directif dont la sensibilité puisse être intrinsèquement indépendante de la fréquence.

Le polyvinyl difluoré, PVF2, utilisé sous forme de bilame est adapté à la réalisation de capteurs de vitesse. Du fait de sa grande souplesse, un bilame de PVF2, associé à une masse inerte, suit le mouvement particulaire du fluide, et le courant en sortie de l'hydrophone est alors proportionnel à la vitesse vibratoire de l'onde incidente. De plus le PVF2 permet de réaliser un compromis entre deux exigences contradictoires : une bonne sensibilité qui demande une épaisseur de bilame élevée, une grande souplesse de la membrane pour que la fréquence de résonance soit la plus basse possible, ce qui requiert une épaisseur faible.

## 2. - PRINCIPES.

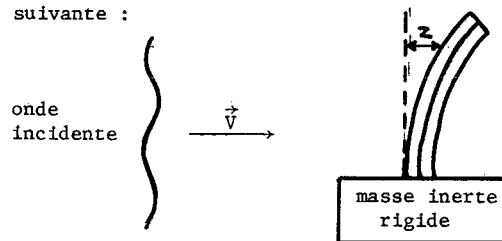
Avant de présenter une structure d'hydrophone de vitesse, il est intéressant de mettre en évidence les exigences que doit remplir l'élément sensible piézo-électrique d'un tel capteur.

En premier lieu, cet élément sensible doit suivre le mouvement particulaire du fluide qui l'entoure, sans le perturber : son impédance mécanique doit donc être aussi faible que possible. Dans le cas contraire une différence de pression se crée entre ses faces : le capteur est alors sensible au gradient de pression.

Pour que l'impédance mécanique de l'élément piézo-électrique soit faible, il apparaît nécessaire de le réaliser sous la forme d'une lame. En outre, du fait de sa souplesse, le PVF2 est un matériau mieux adapté à la réalisation d'hydrophones de vitesse que la céramique piézoélectrique.

D'autre part, le capteur doit également être insensible à la pression acoustique. Dans un bilame, les polarisations inversées des deux lames permettent d'annuler les charges électriques qui apparaissent sous l'effet d'une pression incidente.

Une structure simple d'hydrophone de vitesse que l'on peut imaginer à partir d'un bilame de PVF2 est la suivante :



Un bilame piézoélectrique constitué de deux films minces, rectangulaires, en PVF2 de polarisations opposées, est solidaire à une extrémité d'une masse rigide par un encastrement. Cette masse est supposée immobile.

Supposons une onde plane arrivant perpendiculairement au plan de la membrane. Lorsque la fréquence  $f$  de l'onde acoustique est supérieure à la fréquence  $f_0$  de résonance de la membrane, le bilame se déforme de telle sorte que la flèche soit égale au déplacement particulaire  $Z$ . Du fait de cette déformation, il apparaît des charges électriques  $Q$  égales et opposées de part et d'autre du bilame.  $Q$  est proportionnel à  $Z$  : le courant  $I$  est alors proportionnel à la vitesse particulaire.

Dans le cas où la fréquence  $f$  de l'onde incidente est inférieure à la fréquence  $f_0$ , la membrane apparaît comme rigide et ne se déforme pas (ou peu), ce qui provoque une différence de pression de part et d'autre du bilame : c'est un hydrophone à gradient de pression.

D'autre part, si l'onde plane incidente est dans le plan de la membrane, du fait de sa faible épaisseur, et de sa rigidité suivant cet axe, le bilame ne sera pas entraîné : la sensibilité de l'hydrophone suivant cette direction sera nulle, ce qui laisse prévoir une directivité intrinsèque du dispositif.

Du fait de sa souplesse le PVF2 permet donc de réaliser des hydrophones de vitesse de faible encombrement, directifs même en basses fréquences.

3. - MODELISATION DU FONCTIONNEMENT.

Le bilame vibrant peut être assimilé à une poutre mince de section uniforme encastrée à une extrémité  $x=0$  et libre à l'autre  $x=L$ , où  $L$  désigne la longueur du bilame. Soit  $l$  sa largeur et  $h$  son épaisseur.

Suivant ces hypothèses, la déformée de la plaque suit la loi d'Euler-Bernouilli :

$$m \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = F(x,t)$$

où  $m$  = masse linéique de la plaque

$E$  = module d'Young du PVF2

$w(x,t)$  : déformée de la plaque

$I$  : moment d'inertie d'une section de la plaque par rapport à l'axe neutre.

Si l'on néglige les effets de la diffraction sur la masse inerte, la charge appliquée par unité de longueur  $F(x,t)$  est provoquée par la pression de rayonnement due à la différence entre la vitesse à la surface de la lame  $\frac{\partial w}{\partial t}$  et la vitesse incidente  $V_0$ . Soit  $Z_r$  l'impédance de rayonnement. la pression de rayonnement est égale à :  $F(x,t) = 2 Z_r (V_0 - \frac{\partial w}{\partial t})$ .

Pour un mouvement périodique de pulsation  $\omega$ , l'équation d'Euler-Bernouilli s'écrit :

$$(2Z_r j\omega - m\omega^2) w + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 2 Z_r V_0$$

En basse fréquence, l'impédance de rayonnement d'un objet quelconque est essentiellement due à la masse de fluide entraînée par le déplacement de l'objet. Cette impédance de rayonnement peut être considérée comme imaginaire pure, et de la forme :

$$Z_r = j \cdot \mu \cdot \omega$$

où  $\mu$  désigne la masse ajoutée. En assimilant la masse entraînée  $\mu$  à celle d'un fil infini dans lequel se propage une onde avec le nombre d'onde  $\xi$  :

$$\mu = \rho_f \cdot \frac{l}{\xi} \quad \text{où } \rho_f : \text{masse volumique du fluide}$$

La résolution de l'équation d'Euler-Bernouilli pour le bilame encastré conduit à l'expression de la déformée :

$$w = -\frac{V_0}{j} \left[ \frac{1}{2} \frac{\cos \xi(L-x) - \sin \xi(L-x)}{\cos \xi L} + \frac{1}{2}(1 + \operatorname{tg} \xi L) e^{-\xi x} - 1 \right]$$

Du fait de la polarisation du bilame le capteur piézo-électrique fonctionne en court-circuit : la densité de charge  $D(x,y,z)$  d'un point quelconque du volume du capteur piézoélectrique a pour expression :

$$D(x,y,z) = e_{13} \cdot z \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

où  $e_{13}$  désigne le coefficient piézoélectrique liant les densités de charges suivant l'épaisseur du bilame aux déformations dans le matériau. La sensibilité en courant de l'hydrophone est déduite par intégration :

$$I = -e_{13} \frac{lh}{8} \xi \left[ \frac{1}{\cos \xi L} - (1 + \operatorname{tg} \xi L) e^{-\xi L} \right] V_0$$

L'analyse de la déformée d'un bilame de 270  $\mu$  d'épaisseur, 1 cm de largeur et 36 mm de longueur, montre que la valeur moyenne du déplacement de la membrane évolue fortement avec la fréquence. Pour quelques fréquences la lame oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre comme à 2 kHz par exemple (Fig. 1), alors que généralement elle semble entraînée par la vitesse incidente et oscille autour de cette position (Fig. 2 à 900 Hz). La courbe de sensibilité (Fig. 3) montre des pics obtenus à ces fréquences particulières où la lame n'est pas entraînée mais résonne autour de sa position d'équilibre.

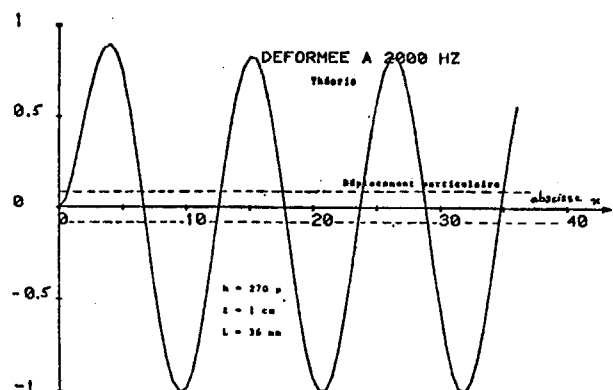


Fig. 1  
Hydrophone de vitesse cantilever

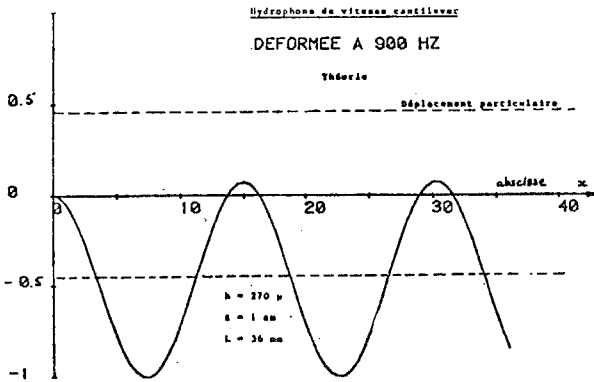


Fig. 2

La sensibilité de cette structure d'hydrophone de vitesse n'est donc pas indépendante de la fréquence, mais à la différence des capteurs à gradient de pression dont la partie sensible est en céramique piézo-électrique rigide, pour lesquels la sensibilité est d'autant plus faible que la fréquence est basse, pour cet hydrophone de vitesse la sensibilité est plus forte en très basse fréquence.

4. - LA CALIBRATION EN VITESSE VIBRATOIRE.

Les dimensions des cuves acoustiques habituelles ne permettant pas la mesure en ondes planes en basse fréquence, un guide d'ondes à parois rigides a été développé. Il est constitué d'un tube cylindrique vertical, en acier, contenant un liquide (eau, huile ...) excité par le bas par un émetteur fonctionnant en régime continu.

Dans ce guide d'ondes vertical à parois rigides, excepté au voisinage de l'émetteur, les ondes planes émises se réfléchissent parfaitement sur la surface et il s'établit ainsi dans le tube un champ stationnaire. Le champ de pression est décrit par la relation :

$$p = - p_0 \cdot 2 j \sin kd \quad (1)$$

et la pression, l'accélération et la vitesse vibratoire sont reliées par :

$$\frac{p}{v} = j \rho c \operatorname{tg} kd \quad (2)$$

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{\rho}{k} \cdot \operatorname{tg} kd \quad (3)$$

Ces expressions font intervenir la célérité c du son dans le fluide contenu dans le tube. L'élasticité de

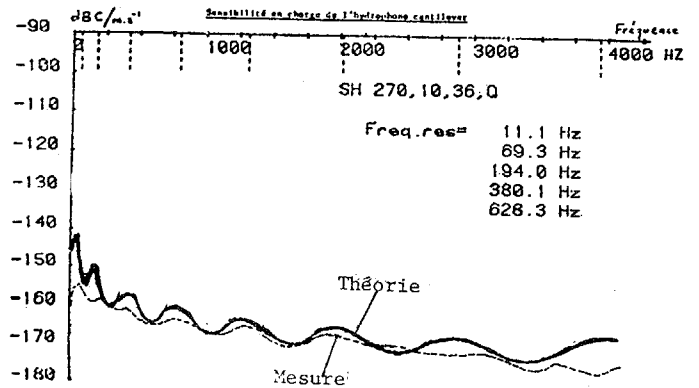


Fig. 3

la colonne entraîne une dispersion de la vitesse dans le fluide : par exemple une huile silicone de vitesse 1100 m/s en milieu infini présente une célérité c = 850 m/s dans le tube.

Après avoir vérifié que le champ de pression est correctement décrit par l'équation (1) (Fig. 4 à 500 Hz pour la colonne remplie d'eau), le signal de sortie de l'hydrophone peut être comparé aux profils théoriques de vitesse et d'accélération décrits par (2) et (3).

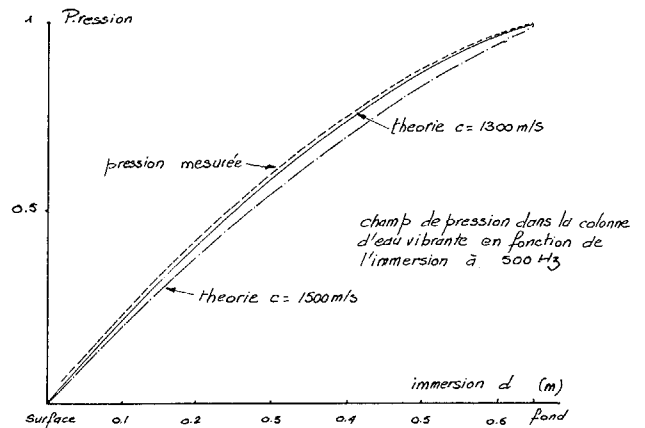


Fig. 4

5. - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

Le premier hydrophone réalisé a été constitué à partir d'un bilame de PVF2 de 270 μ d'épaisseur, 10 mm de largeur et 36 mm de longueur, présentant un coefficient piézoélectrique e<sub>13</sub> de l'ordre de 7.10<sup>-2</sup> C/m<sup>2</sup>.

Le relevé du signal de sortie de l'hydrophone à pression constante et en fonction de la fréquence (Fig. 5) montre que le capteur réalisé est bien du type vitesse et non pas gradient de pression ou accélération.

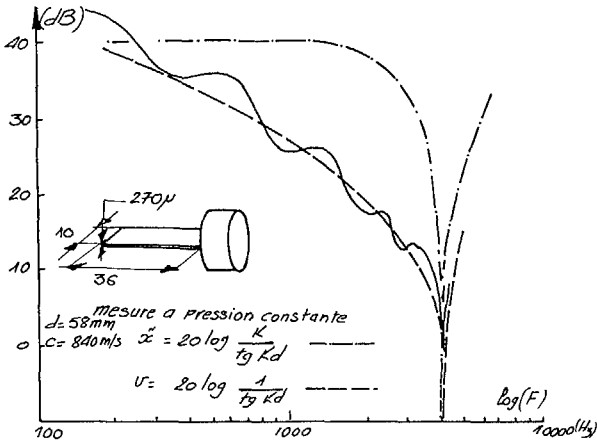


Fig. 5

De plus, il présente bien la directivité recherchée même en très basse fréquence, comme à 60 Hz (Fig. 6) ou à 400 Hz (Fig. 7).

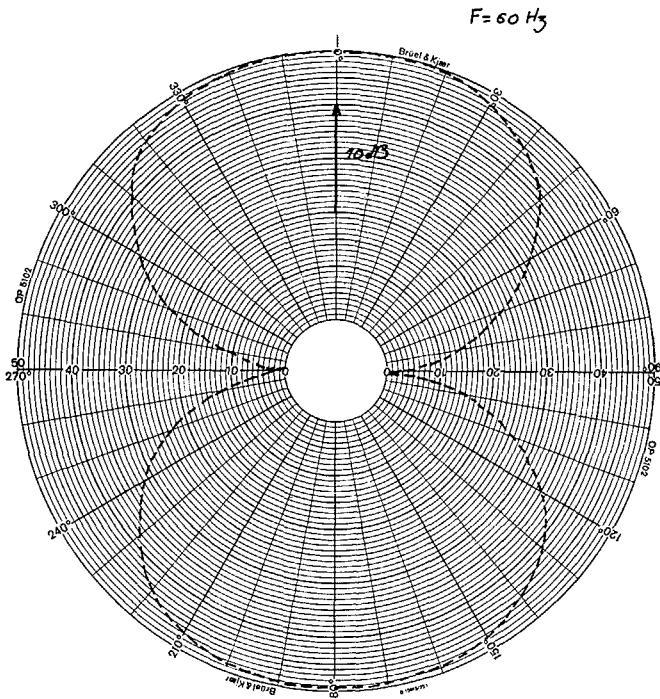


Fig. 6 - Directivité intrinsèque de l'hydrophone cantilever

Comme l'indique la figure 5, la sensibilité de cet hydrophone de vitesse n'est pas indépendante de la fréquence. La comparaison avec la prévision théorique (Fig. 3) montre que la modélisation est assez précise pour des épaisseurs de PVF2 pas trop élevées. L'augmentation de l'épaisseur du bilame permet évidemment d'améliorer la sensibilité du capteur mais pour les

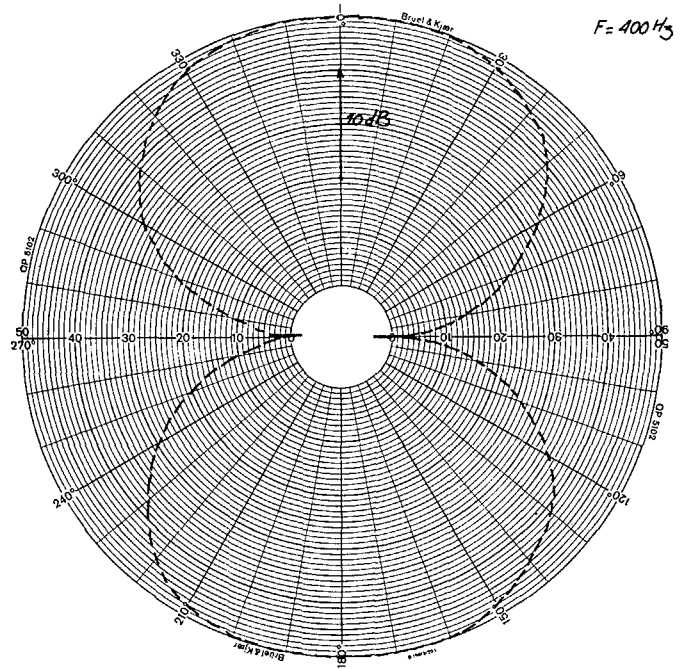


Fig. 7 - Directivité intrinsèque de l'hydrophone cantilever

fortes épaisseurs de bilame de PVF2 comme 750 μ ou 950 μ, l'écart entre la modélisation et les relevés expérimentaux va en grandissant : du fait de sa forte épaisseur, le bilame n'est pas aussi souple que le suppose le calcul théorique.

D'une façon générale, on peut dire qu'au vu des différentes réalisations, la structure d'hydrophone de vitesse à PVF2 peut être classée parmi les capteurs sensibles : la sensibilité moyenne est de l'ordre de -190 dBV/μPa.

6. - CONCLUSIONS.

La modélisation proposée permet de prévoir correctement les possibilités des hydrophones de vitesse à bilame de PVF2 encastré, particulièrement lorsque l'épaisseur du bilame n'est pas trop élevée. Ce modèle est néanmoins perfectible pour les bilames d'épaisseur de l'ordre du millimètre.

Nous avons montré que du fait de sa souplesse le polymère piézoélectrique PVF2 permet la réalisation d'hydrophones de vitesse directifs en très basse fréquence, d'encombrement et de poids réduits et qui possèdent une bonne sensibilité en basse fréquence. Ces capteurs présentent l'avantage d'être plus simples, plus faciles à manipuler et moins encombrants que les capteurs électrodynamiques.

Le handicap majeur de tels hydrophones risque de provenir de leur sensibilité aux vibrations de la structure porteuse. Néanmoins leur intérêt pour des antennes passives dont le support est stable semble acquis

