

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

935



NICE du 20 au 24 MAI 1985

LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

J-P BESOMBES, P. DAVINET, H. LOUIT, D. ODERO

SINTRA Département DSM, Branche Transducteurs

RESUME

On passe en revue les différents matériaux piézoélectriques qui sont apparus depuis quelques années, tant en France qu'à l'étranger : polymères (PVF2), copolymères (tri et tétra fluoroéthylène - PVF2), céramiques composites (grains ou barreaux de céramiques dans une matrice viscoélastique), nouvelles céramiques anisotropes.

Leurs propriétés mécaniques et piézoélectriques (en statique et en dynamique), mesurées en laboratoire, sont comparées avec celles de céramiques classiques type titanozirconate de plomb ou titanate de baryum.

On examine les problèmes liés à ces nouveaux matériaux : polarisation, métallisation, reproductibilité, vieillissement, comportement en fonction de la température et de la pression hydrostatique.

Enfin, on présente leurs utilisations possibles dans des capteurs acoustiques, en gardant à l'esprit les contraintes auxquelles le capteur est lié : immersion maximale, chocs, vibrations, capteur élémentaire dans un réseau (ponctuel ou étendu) bande passante et préamplificateur associé.

Cet article est la synthèse de travaux financés par la DRET, le GERDSM ou sur fonds propres.

SUMMARY

First of all, we will review the different piezoelectric materials which have appeared in the last few years, both in France and in other countries : polymers (PVF2), copolymers, composite ceramics, new types of anisotropic ceramics.

Their mechanical and piezoelectric properties (both in static and dynamic) are measured in laboratory and compared with those of classical ceramics such as TZP or TibaO₃.

We will then study problems linked with those new materials : polarisation, electrodes, aging, behavior with temperature and hydrostatic pressure.

Last we will show their possible uses on hydrophones keeping in mind what constraints inherent to : maximum depth, shocks, vibrations ...

This work was sponsored by French DOD (DRET and GERDSM) and own funds.



LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES : LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

INTRODUCTION

Les antennes acoustiques utilisées en ASM pour la réception de signaux sont faites de nombreux hydrophones, définis comme un ensemble capteur et préamplificateur associés. Le capteur est constitué par le matériau piézoélectrique convertissant la pression acoustique en tension électrique.

Lors de la définition d'une nouvelle antenne, on cherche à optimiser les performances de ces hydrophones en imposant, en l'absence de signal, que le niveau spectral du bruit électrique, en sortie du préampli, soit inférieur à un niveau spectral arbitraire de bruit extérieur. Ceci dans la bande de fonctionnement de l'hydrophone (définie par sa fréquence basse f_B et sa fréquence haute f_H).

Le schéma équivalent d'un hydrophone est représenté figure 1. Le capteur se comporte comme un générateur de force électromotrice $S_{ho} p$ (S_{ho} : sensibilité du capteur en circuit ouvert, p : pression acoustique minimale détectable) et d'impédance interne C . Le préamplificateur est considéré comme un amplificateur parfait ayant une tension spectrale de bruit e_n et un courant de bruit i_n , associé à une résistance d'entrée pure R .

On constate donc qu'en sortie du préamplificateur, on a la somme de quatre tensions : la tension générée par le bruit extérieur qui subit un filtrage passe-haut de fréquence de coupure f_c ($f_c = 1/2\pi RC$), les tensions générées par l'agitation thermique dans la résistance R d'une part (= $4kTR$), le passage de courant i_n dans cette dernière d'autre part (= Ri_n) ; ces deux dernières tensions sont shuntées par la capacité C et subissent ainsi un filtrage passe-bas de fréquence de coupure f_c , et enfin la tension de bruit générée par le préamplificateur, inchangée par le filtre RC (= e_n).

Il apparaît donc que la conception du capteur dépend pour beaucoup du modèle de densité spectrale du bruit extérieur que l'on veut faire passer. Ce bruit extérieur peut être considéré comme un bruit de mer, un bruit de trafic, un bruit d'écoulement ou un bruit rayonné par le porteur.

De ce qui précède, il résulte que pour une fréquence inférieure à la fréquence de coupure f_c , le bruit dû au préamplificateur est constant (filtre RC passe-bas) alors que le bruit extérieur décroît en 6 dB par octave (filtre RC passe-haut).

Pour une fréquence supérieure à f_c , le bruit dû au préamplificateur décroît en 6 dB par octave jusqu'à atteindre une valeur sensiblement constante donnée par la tension de bruit du préamplificateur.

Le bruit extérieur est relié à la sensibilité S_{ho} du capteur et la fréquence de coupure f_c est liée à sa capacité C . Le facteur de mérite du capteur $M = S_{ho}^2 C$ est un facteur fondamental.

En supposant que les fréquences basse f_B et haute f_H sont respectivement inférieure et supérieure à f_c , on optimise l'hydrophone en égalisant les bruits dus au préamplificateur d'une part, et aux bruits extérieurs d'autre part, pour $f = f_B$ et $f = f_H$ (cf. figure 2), ceci pour le facteur de mérite M le plus faible possible.

Le facteur de mérite M du capteur, quelle que soit la façon dont ce dernier est réalisé, s'exprime par la relation :

$$M = g^2 \epsilon \text{ (ou gd) } \times \text{ facteur de forme } \times \text{ Volume du capteur.}$$

Le terme $g^2 \epsilon$ (ou gd) est le facteur de mérite du matériau piézoélectrique constituant le capteur. La constante piézoélectrique g exprime le rapport entre la pression exercée et le champ électrique résultant, la constante piézoélectrique d exprime la proportionnalité entre la force appliquée et la charge apparaissant sur les électrodes, ϵ est la constante diélectrique du matériau. Ces constantes sont différentes suivant les axes d'application des forces et la direction de polarisation de la céramique. Par exemple d_{33} exprime la proportionnalité existant entre la force appliquée suivant la direction de polarisation et la charge apparaissant sur les électrodes perpendiculaires à cette force appliquée.

Lorsque la force appliquée sur le matériau piézoélectrique est isotrope, on est en mode hydrostatique, les constantes deviennent $d_h g_h$.

Les céramiques classiques actuelles ne permettent pas de réaliser des capteurs performants en mode hydrostatique à cause de la faiblesse de la caractéristique g_h .

Pourtant ce type de capteur est intéressant car il présente les avantages suivants : isotropie et non amplification des contraintes dues à l'immersion, construction simple et donc, a priori, coût de réalisation minimisé.

De nouveaux matériaux piézoélectriques sont apparus depuis quelques années qui permettent d'obtenir de bons facteurs de mérite en hydrostatique. Ils peuvent être classés en trois catégories :

- les céramiques très fortement anisotropes
- les PVF2 et copolymères
- les céramiques composites.

On présente, au chapitre 1, ces différents matériaux et leurs caractéristiques comparées à celles de céramiques classiques. Au chapitre 2, on examine les problèmes liés à ces nouveaux matériaux, polarisation, métallisation, comportement en fonction de la température et de la pression hydrostatique. Au chapitre 3 enfin, on examine leurs utilisations possibles.

CHAPITRE 1 : CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES

1.1 - Céramiques classiques

Le titanate de baryum et les titanozirconates de plomb constituent les céramiques classiques actuelles utilisées pour la réalisation d'hydrophones. La conception de ceux-ci fait appel aux fonctionnements en modes 33 ou 31 puisque la faiblesse de la caractéristique g_h ne permet pas de réaliser des hydrophones performants en mode hydrostatique.

Nous rappelons, au tableau 1, les principales caractéristiques de ces matériaux utilisés en réception.

1.2 - Les céramiques très fortement anisotropes

Depuis longtemps le titanate de plomb était connu pour son haut point de Curie mais il n'était pas utilisé comme céramique piézoélectrique à cause de la porosité et de la fragilité de celle-ci ainsi que des difficultés de polarisation qu'elle présentait. La déformation introduite par l'allongement d'un axe et la contraction des deux autres à la transition cubique-tétraogonale est cause de fréquentes ruptures des céramiques lors de leur synthèse. L'anisotropie de la rétraction thermique pendant le refroidissement intensifie encore les contraintes internes créées au point de Curie. Les études effectuées ces dernières années ont permis d'améliorer sa mise en oeuvre en pratiquant soit des ajouts, soit des substitutions, tout en sauvegardant sa grande anisotropie (coefficient de Poisson $\sim 0,2$) son Q mécanique élevé et ses faibles pertes diélectriques (au prix d'un abaissement de sa température de Curie vers 260°C).

LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

Le métaniobate de plomb présente des propriétés comparables et les mêmes difficultés de préparation. Il a été étudié il y a de nombreuses années pour réaliser des capteurs "hautes températures".

Les principales caractéristiques de ces céramiques sont représentées au tableau 2.

Ce type de matériau présente des caractéristiques hydrostatiques bien supérieures à celles des céramiques conventionnelles.

Ses caractéristiques en mode hydrostatique sont voisines de celles en mode 33 ce qui entraîne une réponse transversale pratiquement nulle. Ils ne sont pas utilisables en "tube radial" ou en bilame. Cette particularité en revanche supprime la réponse aux accélérations transversales. Ce type de matériau peut être utilisé en mode 33 mais sans gain sur les performances (sauf en 33 amplifié).

Il est à noter que la stabilité en pression statique de ces matériaux est supérieure à celle des céramiques conventionnelles.

1.3 - Polymères et copolymères

Ces matériaux comportent diverses variétés qui, outre la nature de la matière de base différent par leur mode de fabrication. Il faut distinguer le PVF2 étiré dans deux directions du PVF2 étiré dans une seule direction, ce dernier mode de préparation entraînant une anisotropie spécifique. De la même manière, dans les copolymères il faut distinguer le difluorure de vinylidène-tétrafluoroéthylène qui nécessite un étirage monoaxial des copolymères difluorure de vinylidène-trifluoroéthylène qui ne nécessitent pas d'étirage.

Tous ces matériaux sont caractérisés par le fait qu'ils possèdent une faible constante diélectrique et un point de Curie peu élevé. Les méthodes de mesure classiques sur céramiques ne leur sont pas applicables à cause de leurs propriétés viscoélastiques, de leur faible surtension mécanique et de leur coefficient de couplage peu élevé. De nouvelles méthodes et des outillages doivent être développés. Aussi les données que l'on peut obtenir sur ces matériaux sont-elles très fragmentaires et incomplètes.

Nous avons, dans le tableau 3, regroupé les caractéristiques que nous avons pu mesurer dans nos laboratoires sur différents matériaux ainsi que les valeurs "catalogue" pour ceux que nous n'avons pu mesurer.

On constate que tous ces matériaux, à cause de leur faible constante diélectrique, présentent une réponse piézoélectrique en tension g bien supérieure à celle des céramiques. Par ailleurs, si l'on s'intéresse au produit dxg , facteur de mérite du matériau, on voit qu'en mode 33 ce facteur de mérite atteint des valeurs du même ordre que celui des céramiques conventionnelles alors qu'en mode hydrostatique ce facteur de mérite est supérieur à celui des céramiques classiques sans pour autant dépasser celui des céramiques anisotropes, type TiO_3Pb (cf. tableau 2).

Par suite de la viscoélasticité et de la faible surtension mécanique les coefficients de ces matériaux sont probablement complexes. Ceci peut être la cause d'un déphasage entre l'action mécanique et la réponse électrique. On remarque en particulier que les valeurs mesurées donnent une valeur de d_h qui ne répond pas à l'équation classique :

$$d_h = d_{33} + d_{31} + d_{32}$$

Cela laisse supposer que le déphasage peut être différent selon l'orientation des contraintes.

Ce phénomène peut aussi provenir des méthodes de mesures utilisées. Ces matériaux sont en fait des composites puisqu'ils comportent une phase cristalline piézoélectrique dispersée dans une phase amorphe non piézoélectrique. La constante d_{33} est mesurée en

compression "à déformation régulière", les constantes d_{31} et d_{32} sont mesurées "en traction", c'est-à-dire à contraintes variables, le matériau n'étant pas homogène tandis que la constante d_h est mesurée à pression constante.

La vitesse de propagation dans ces matériaux est voisine de celle de l'eau et l'impédance caractéristique peu différente, ce qui pourrait être intéressant pour faire des antennes transparentes.

Par suite de l'existence des trois coefficients, certains de ces matériaux peuvent être utilisés en mode 33 ou en bilames, l'emploi en "tube 31" ou "33 amplifié" semble plus douteux à cause de la faiblesse des caractéristiques mécaniques.

La constante diélectrique de ces matériaux diminue quand on monte en fréquence tandis que les pertes diélectriques croissent de façon importante.

Il semble cependant que la stabilité en température dans la gamme 0-25° soit acceptable. La tenue au vieillissement et aux cycles de pression prolongés (risque de fluage) est à examiner.

1.4 - Matériaux composites

Ils constituent une grande famille de matériaux polyphasiques dont une phase est constituée de céramique piézoélectrique. Ils sont classés selon leur type de texture ou de connectivité. La connectivité décrit le nombre de dimensions dans lesquelles chaque phase du composite est continue. Par exemple une connectivité 0-3 décrit des particules de céramique piézoélectrique (titanozirconate de plomb par exemple) en suspension dans une matrice polymère. Le premier indice indique la phase piézoélectrique, le second indice correspond à la phase polymérique, un troisième indice éventuel correspondant à une charge inerte (fibre de verre, sphères creuses, poudre de liège...).

Dans la réalisation de matériaux composites on peut en principe choisir les propriétés désirables de chaque phase. La céramique piézoélectrique apporte l'activité piézoélectrique du composite tandis que le polymère abaisse la constante diélectrique et la densité du composite.

Par une sélection convenable de la connectivité des phases, le comportement des coefficients d_{33} et d_{31} peut être découplé et il peut en résulter un renforcement du coefficient d_h par rapport à celui de la céramique piézoélectrique d'origine.

Nous avons, dans nos laboratoires, étudié plus particulièrement les composites de connectivité 0-3. Le tableau 4 montre les propriétés diélectriques et piézoélectriques de composites de ce type, provenant de différents fabricants.

Physiquement, le composite Sintra se distingue des autres composites du même type par sa granulométrie de poudre céramique beaucoup plus élevée et par le mode de préparation que celle-ci implique. Ce matériau ne peut être réalisé en pièces minces (inférieures à 1 mm).

Ces matériaux présentent des propriétés "apparentes" intermédiaires entre celles des céramiques et celles des polymères tant en constante diélectrique qu'en constantes piézoélectriques mais ils présentent un facteur de mérite dxg qui peut leur être supérieur.

Tous ces matériaux composites présentent une autre différence vis-à-vis des céramiques classiques ou des polymères. Leur constante diélectrique est pratiquement stable entre 100 Hz et 100 kHz, alors que leur tangente d'angle de perte est maximale à très faible fréquence (< 100 Hz) et minimale et stable à partir de 10 kHz.

L'examen du tableau 4 montre que les caractéristiques du composite Sintra sont supérieures à celles des composites du même type (à l'exception du composite à



LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

base de $PbTiO_3$ pour lequel l'anisotropie de la céramique utilisée apparaît clairement). La stabilité de ce matériau en pression est satisfaisante jusqu'à 100 bars alors que les matériaux à grains fins peuvent supporter des pressions supérieures mais au prix d'une perte importante de caractéristiques.

Par définition ces matériaux sont hétérogènes, aussi deux modes d'excitation sont possibles : à pression uniformément répartie ou à déformation régulière. A partir de la modélisation, il apparaît que la réponse piézoélectrique est très différente selon le mode d'excitation utilisé pour la mesure des caractéristiques, l'excitation à déformation régulière fournissant des valeurs supérieures. C'est ce mode d'excitation qui est utilisé pour la mesure du d_{33} . C'est aussi celle que l'on utilise pour mesurer un d_{31} ou un d_{32} .

Pour la mesure en hydrostatique on peut admettre que les électrodes apportent une certaine raideur et contribuent à faire travailler le matériau en 33 "à déformation constante" alors que la réponse en 31 correspond à une pression uniformément répartie. Ceci peut expliquer pourquoi on ne vérifie pas la relation $d_h = d_{33} + d_{31} + d_{32}$.

Il est d'autre part apparu qu'avec ce type de matériau les caractéristiques apparentes mesurées pouvaient varier avec la forme et les dimensions du matériau composite. L'interprétation de ce phénomène est en cours d'étude.

CHAPITRE 2 : PROBLEMES LIES A CES NOUVEAUX MATERIAUX

2.1 - Polarisation

Que l'on soit en présence de céramiques "classiques", de céramiques composites, de PVF2 ou de copolymères, on a toujours affaire à des matériaux ferroélectriques. Ils se caractérisent donc, en présence d'un champ électrique, par un cycle d'hystérésis

Le champ électrique de polarisation nécessaire est, dans l'ordre croissant :

- pour les céramiques classiques, de l'ordre de 30 kV/cm
- pour les céramiques composites : de l'ordre de 40 kV/cm
- pour les copolymères VF2-trifluoréthylène : inférieur à 800 kV/cm
- pour les PVF2 : supérieur à 1 MV/cm.

Pour chacun de ces matériaux, la température du bain de polarisation doit être optimisée. C'est un problème complexe qui nécessite de se pencher sur la nature microscopique du matériau. La méthode classique de polarisation consiste à soumettre le matériau, plongé dans un bain d'huile, à une série de crêneaux de champ électrique. Ce bain d'huile est chauffé de façon à faciliter la polarisation. La température maximale ne peut dépasser 160°C, de sorte qu'on ne peut polariser au-dessus de la température de Curie en laissant refroidir sous tension que les céramiques en titanate de baryum (θ Curie $\sim 130^\circ\text{C}$). Une autre méthode, développée par F. Bauer, de l'Institut franco-allemand de St Louis, consiste à appliquer une tension élevée variant périodiquement et lentement. Un courant apparaît dans le matériau donné par la somme d'un courant de conduction ($i_R = V/R$), d'un courant capacitif

($i_C = \epsilon_0 \partial E / \partial t$) et d'un courant de polarisation

($i_P = \partial P / \partial t$). Les deux premiers donnent une ellipse dans un graphe $i = f(V)$. En soustrayant i_R et i_C du

courant total mesuré au cours de la polarisation, on obtient i_P . Par intégration de ce dernier, on obtient $P = f(V)$.

2.2 - Métallisation (ou dépôt d'électrodes)

Sur les céramiques classiques, le dépôt d'électrodes se fait par sérigraphie d'un mélange d'argent et de fondant qui est ensuite cuit au four.

Sur le PVF2 et copolymères, les électrodes sont déposées par évaporation sous vide ou par pulvérisation cathodique (Al ou Cr...).

Sur la céramique composite, on ne peut pratiquement que déposer des électrodes en peinture conductrice ou coller des clinquants.

Quelle que soit leur nature, ces électrodes sont minces et fragiles. Des problèmes d'adhérence se présentent. Leur raccordement à des fils de câblage ne peut être effectué, dans le cas des polymères et de la céramique composite, que par collage au moyen de colles conductrices, les soudures classiques étant impossibles.

2.3 - Mesure des caractéristiques de ces matériaux

Les méthodes classiques de mesure des caractéristiques de céramiques piézoélectriques sont celles préconisées dans le "IRE Standards on piezoelectric Crystals" (1961). Elles nécessitent des pièces de formes et dimensions appropriées (éprouvettes) telles que l'une des dimensions soit grande par rapport aux autres pour calculer les caractéristiques du matériau à partir des mesures de fréquence de résonance et d'antirésonance des éprouvettes préparées.

Les nouveaux matériaux piézoélectriques (polymères et céramiques composites) présentent des pertes mécaniques élevées (principalement les céramiques composites), leurs coefficients de couplage sont très faibles, il est difficile de faire des éprouvettes de forme appropriée.

La mesure de la capacité et de la tangente de l'angle de perte ne pose pas de difficultés à condition de prendre quelques précautions (capacités parasites).

La mesure des constantes de charge piézoélectrique "d" est, par le principe, simple : on applique une variation de contraintes sur l'échantillon et on mesure la charge électrique générée.

Cette mesure peut être statique (piézomètre manuel) ou dynamique (variation sinusoïdale de la contrainte). Pour les nouveaux matériaux, les mesures en statique et en dynamique donnent des résultats différents. Prenons l'exemple de la céramique composite, bien que diphasique comme les polymères, ce matériau s'en distingue par le fait que les phases sont de composition différente. Ceci se traduit par une différence de comportement en réponse électrique à une brusque variation de pression comme le montre la figure 3.

Cette figure montre un aspect des problèmes de mesure des caractéristiques piézoélectriques de ces matériaux.

La valeur en C représente celle mesurée en "statique" c'est-à-dire au piézomètre manuel en utilisant comme appareil de mesure un électromètre, le point B représente, au cours de la même mesure, la valeur mesurée avec un galvanomètre balistique alors que la valeur en A est celle que l'on peut mesurer en excitation alternative (mesure "dynamique") à partir de quelques hertz. Cette courbe de réponse montre bien que ces matériaux doivent impérativement être mesurés en "dynamique". La réponse en trait plein correspond à celle d'une céramique ou d'un polymère.

Le tableau 5 résume les types de mesures qui peuvent être réalisés selon la nature de l'échantillon à étudier.

2.4 - Variation des caractéristiques des matériaux piézoélectriques avec la pression statique et la température

Nous ne donnerons ici qu'un exemple. La figure 4 représente les variations de d_{33} par rapport à sa valeur no-

LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

minale (à pression et température ambiantes) en fonction de la pression statique unidirectionnelle pour quelques céramiques développées par SINTRA. On constate qu'il est important de connaître les variations tant des constantes piézoélectriques que des constantes diélectriques en fonction de la pression, de la température et de la fréquence (en ce qui concerne les constantes diélectriques) tant du point de vue céramiques classiques, anisotropes ou composites que du point de vue polymères et copolymères. Ces études systématiques sont en cours de réalisation dans nos laboratoires.

CHAPITRE 3 : UTILISATIONS POSSIBLES DES NOUVEAUX MATERIAUX

Nous avons présenté, dans l'Introduction, quelques idées directives sur l'optimisation d'un hydrophone (capteur + préamplificateur). Ceci conduit à définir un facteur de mérite M minimal. Cette dernière valeur est différente suivant les performances à demander à l'hydrophone, performances qui sont fonction du type d'antenne (antenne de coque de sous-marin ou antenne linéaire remorquée par exemple).

On peut montrer que le facteur de mérite $M (=S_{ho}^2 c)$ varie comme la fréquence de coupure $f_c (=1/2\pi R c)$ jusqu'à une limite f_{cl} pour laquelle on ne peut plus réduire S_{ho} , cette dernière restant alors constante, quel que soit $f_c < f_{cl}$. On montre d'autre part que la valeur minimale de M est d'autant plus petite que le bruit du préamplificateur à la fréquence f_H est plus petit et que la résistance d'entrée R est grande. Il faut, de plus, pour minimiser M que f_B soit le plus grand possible et f_H le plus petit possible.

Comme d'autre part, le bruit reçu croît très vite aux basses fréquences (en particulier, les bruits d'écoulement sont supérieurs et de pente beaucoup plus grande que les bruits de mer), il faut éviter de saturer le préamplificateur en prenant f_c trop petit. Il existe donc une valeur de capacité du capteur minimale.

Enfin si f_c se trouve dans la bande (f_B, f_H), outre l'élévation de M entraînée, on est gêné par les variations de phase au voisinage de f_c dues aux imprécisions et variations de la capacité du capteur. On peut alors s'affranchir de ce défaut en stabilisant par une capacité additionnelle en série ou en shunt. Mais le facteur M est augmenté de ce facteur de stabilisation. Ceci est pénalisant et il faut essayer de placer f_c en dessous de f_B .

Examinons maintenant à quel facteur de mérite on peut espérer arriver avec les matériaux connus et divers modes de construction pour un encombrement donné de référence. On constate que si les coefficients g et ϵ sont très différents d'un type de nouveau matériau à l'autre, leurs facteurs de mérite sont très voisins. Le produit $g_h d_h$ est, en moyenne, 5 fois supérieur à celui des céramiques classiques (+ 7 dB) et 4 fois plus faible que le coefficient moyen $g_{33}^2 \epsilon_{33}^T$ de ces mêmes céramiques.

Ils se situent donc en position intermédiaire entre les céramiques classiques en mode hydrostatique et celles en mode 33.

CONCLUSIONS

Les avantages essentiels des nouveaux matériaux par rapport aux céramiques nous paraissent être les suivants :

- fonctionnement en hydrostatique avec des performances acceptables pour tous les matériaux
- coefficients transverses faibles ou très faibles, dans le cas des céramiques composites ou des céramiques très fortement anisotropes
- réalisation aisée de capteurs de grande surface et faible épaisseur pour les polymères et copolymères
- possibilité de capteurs transparents avec ces derniers matériaux.

D'autre part :

- la céramique fortement anisotrope est pratiquement fonctionnelle et devrait pouvoir être industrialisée
- les problèmes et l'industrialisation du PVF2 "épais" semblent pratiquement résolus
- l'étude des céramiques composites est encore en cours et son industrialisation n'est pas encore envisagée.

On remarquera qu'il est actuellement difficile de faire un choix pour l'utilisation d'un matériau ou d'un autre: en effet, si les valeurs nominales de ces divers matériaux sont connues, il n'en est pas de même de leurs variations et dérives, ni des contingences de réalisation de capteurs opérationnels.

Néanmoins des utilisations se dessinent :

* Céramiques très fortement anisotropes (et peut être céramiques composites)

Capteur de petites ou moyennes dimensions, en haut de gamme de fréquences, où il est nécessaire d'utiliser tout le volume possible pour tenir les performances en bruit.

* PVF2 ou copolymères

- Dans le cas des capteurs de grande surface en BF ou TBF, lorsqu'il n'est pas nécessaire, pour tenir les performances en bruit, d'utiliser tout le volume disponible et où l'on peut alors se contenter d'épaisseurs réduites (1 à 2 mm).

- Dans le cas où l'on veut des capteurs transparents acoustiquement.

D'autre part dans l'utilisation de ces nouveaux matériaux, il faut s'affranchir des habitudes acquises avec les céramiques classiques et appliquer une longue réflexion exempte de toute idée préconçue sur les modes nouveaux de mise en oeuvre dus à leurs caractéristiques particulières.

	densité	θ_{Curie} °C	ϵ_r	g_{33}	g_{31}	g_h	d x g			tg δ %
							33	31	h	
TiO ₃ Ba X9	5,4	127	750	16	-5,7	4,6	1,7	0,2	0,14	0,7
TZP X37	7,3	260	1230	28	-11,8	4,3	8,5	1,5	0,2	0,15
TZP X444	7,3	260	2800	21,3	-9,2	3,0	11,3	2,1	0,2	2

g en 10⁻³ V.m/N
dxg en 10⁻¹² m²/N

Tableau 1

	densité	ϵ_r	g_{33}	g_h	d x g	
					33	h
Nb ₂ O ₆ Pb	6,6	225	42,7	33,8	3,6	2,3
TiO ₃ Pb	6,8	210	39,3	36,6	2,9	2,5

Tableau 2



LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

	densité	ϵ_r	g_{33}	g_{31}	g_{32}	g_h	d x g			
			(10^{-3}) V.m/N	(10^{-3}) V.m/N	(10^{-3}) V.m/N	(10^{-3}) V.m/N	33	31	h	
PVF2 mono étiré							(X10 ⁻¹² MKS)			
KUREHA	1,78	13	274	186	20	83,4	8,6	4,0	0,8	x
THORN EMI	1,80	11,5	187	138	19,7	68,8	3,55	1,9	0,48	x
PENWALT	1,78	12	210	230			4,6	5,7		xx
THOMSON	1,78	12	283	169	34	95	8,5	3,0	0,97	xx
THOMSON		11,7	307	147	49	112	9,8	2,2	1,3	x
RAYCHEM	1,87	10,5	366			129	12,4		1,55	xx
PVF2 étirage biaxial SOLVAY		11	185	113	113		3,3	1,2		xx
COPOLYMERES										
VF2/4FE										
KYNAR	1,87	10,6	360	154	78	129	12,3	2,2	1,57	x
VF2/TrFE										
SINTRA 75/25		8,4	390	175	175	175	11,3	2,3	2,3	x
SINTRA 70/30		9,1	348	171	171	145	9,75	2,36	1,7	x

x : mesures labo
xx : données fabricant

Tableau 3

	densité	ϵ_r	g_{33}	g_{31}	g_h	d x g			Observations
						33	31	h	
SINTRA (TZP)	4,5	124	73		47	5,8		2,5	1a
"	"	103	78		59	5,5		3,2	1b
"	"	118	94		50	9,2		2,6	1c
Daikin piezel.(TZP)	5,5/6	100/120		~20,5			~0,4		2
		102	40	24	7,4	1,4	0,5	0,05	1
NTK piezofilm (TZP)	5,3	95		65			3,6		2
NTK piezorubber (TZP)	5,6	55	133,5	70	41(*)	8,7	2,5	0,8(*)	2,3(*)
PbtiO ₃ /néoprène		40			99			3,5	4,5
		54	125,5		46	7,5		1,0	4,5

- 1 mesures Sintra
- 2 notice commerciale
- 3(*) Newmann Conference de Norfolk JASA Mai 84
- 4 Safari These Ph. D. 1983 University of Pennsylvania
- 5 Safari et al. Ferroelectrics 1982 V 4 p. 197

Tableau 4

Types de mesures	Céramiques	PVF2 Copolymères	Composites
d_{33} statique c.c	x	x*	
d_{33} dynamique c.c	x	x	x
d_{31} statique c.c	x		
d_{31} dynamique c.c	x		x
d_{31} dynamique c.T		x	
d_{32} dynamique c.T		x	
d_h statique	x	?	
d_h dynamique	x	x	x

- * faibles épaisseurs
c.c contrainte en compression
c.T contrainte en traction

Tableau 5

LES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES :
LEURS POSSIBILITES EN TANT QUE CAPTEURS

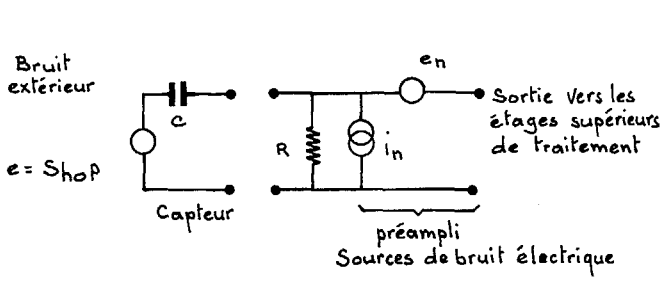


Fig 1

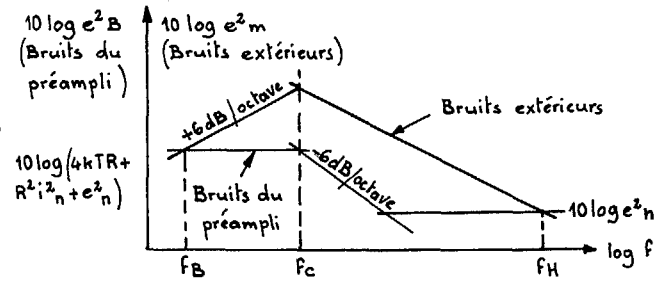


Fig 2

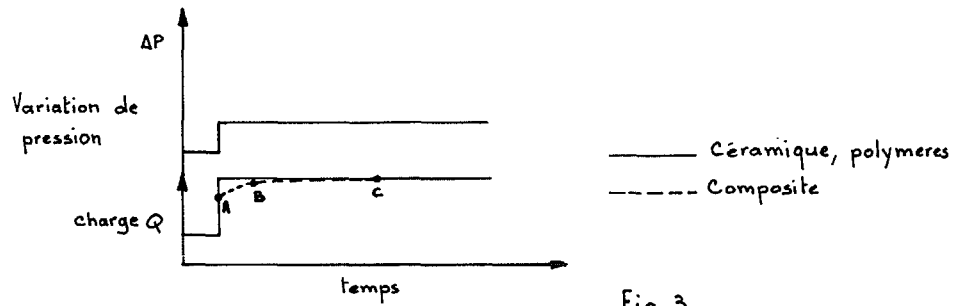


Fig 3

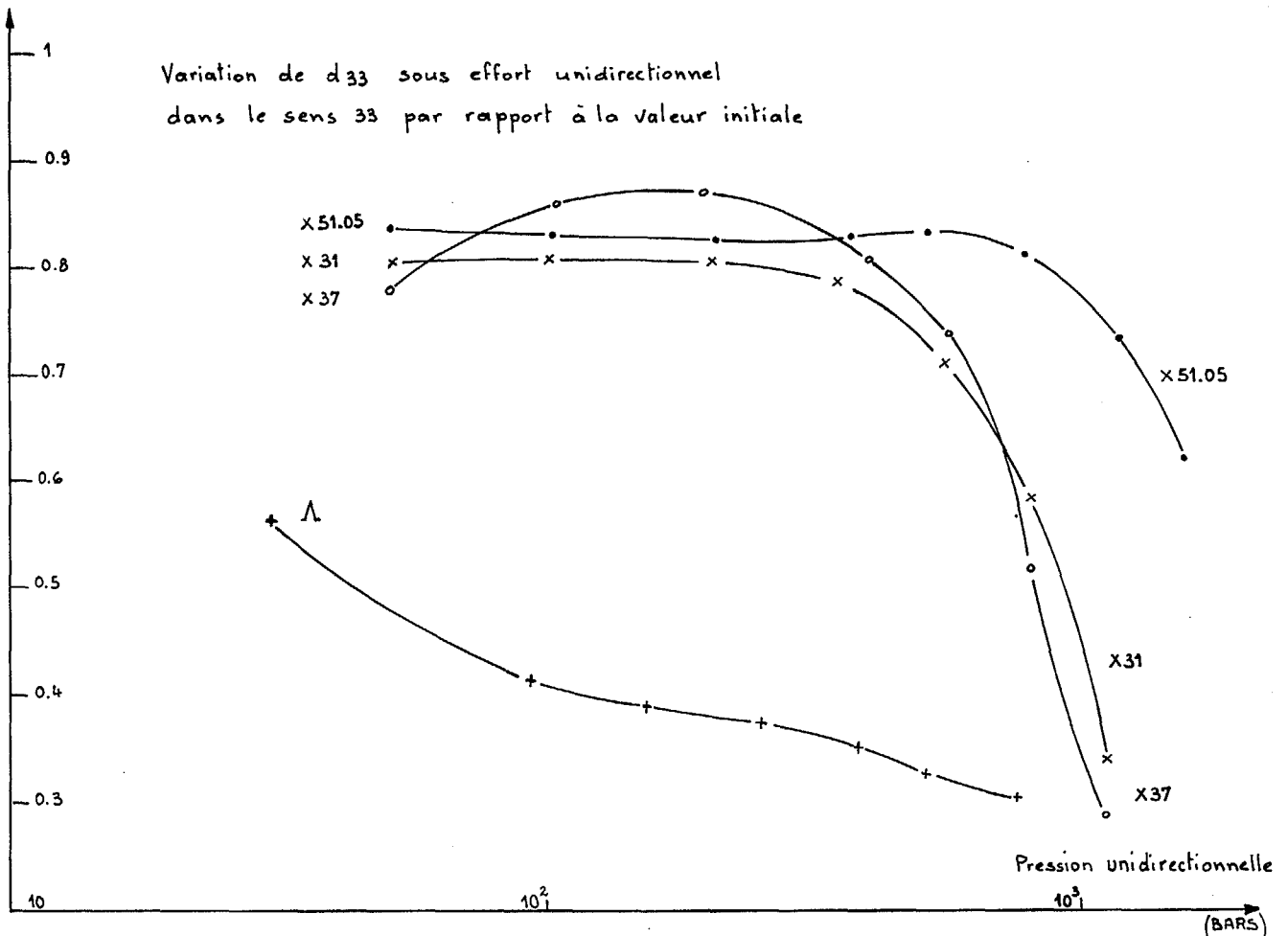


Fig 4

