

50376
1990
261

Numéro d'ordre : 641

50376
1990
261

THESE

présentée à

L' Université des Sciences et Techniques de Lille

pour obtenir le grade de

Docteur en Sciences des Matériaux

par

Philippe GUILLAUSIER

Ingénieur EUDIL



ETUDE DU COMPORTEMENT ACOUSTIQUE DES NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES SOUS PRESSION HYDROSTATIQUE

Soutenu le 20 Décembre 1990 devant la Commission d'Examen :

Président	M. RIETSCH
Rapporteurs	M. BRUNEEL M. DECARPIGNY
Examineurs	M. BAUER M. GRANGE M. LAGIER Mme. RICHARD

A mes Parents,

A mon Epouse,

*A la mémoire
de mon Grand-Père,
et de mon Beau-Père.*

Cette thèse a été préparée au sein du Groupe d'Etudes et de Recherches en Détection Sous-Marine (GERDSM Division "Antennes" - DCN TOULON), en collaboration avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Institut Supérieur d'Electronique du Nord (ISEN), dans le cadre du protocole signé le 27 août 1986 entre la DRET et le CNRS. Que les directeurs et administrateurs des ces différents organismes reçoivent ici ma profonde gratitude.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur le Professeur F. RIETSCH, qui a accepté la présidence de ce jury de thèse.

Je remercie Messieurs les Professeurs C. BRUNEEL, F. BAUER, G. GRANGE et Monsieur M. LAGIER pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, et pour leur participation au jury.

Je remercie également Monsieur M. BOISRAYON de m'avoir reçu dans la Division "Antennes" du GERDSM, et permis d'y effectuer cette étude dans d'excellentes conditions.

Monsieur J. N. DECARPIGNY m'a permis de mener à bien ce travail en m'aidant par ses conseils et son soutien amical et constant. Je lui dois une grande part de ma formation en acoustique. Je lui exprime toute ma gratitude.

Mesdames M. RICHARD et M. VASSAS ont suivi cette étude durant tout son déroulement. Les moyens techniques qu'elles ont mis à ma disposition, leur confiance, et leurs encouragements ont été très précieux. Je les en remercie vivement et les assure de ma reconnaissance.

Messieurs R. BOURGUE, D. CAUCAT, J. P. VIGUIE ont participé activement aux phases pratiques de ce travail. Leur assistance technique, leurs conseils, et leur gentillesse m'ont été d'un grand secours. Je les en remercie très chaleureusement.

Je suis reconnaissant à Messieurs J. P. BESOMBES et S. PARBAUD de m'avoir fait profiter de leur compétence et de leur expérience en caractérisation des matériaux.

Je tiens à remercier très sincèrement Madame A. C. HENNION-HLADKY ainsi que Messieurs B. DUBUS et K. ANIFRANI qui m'ont aidé à utiliser le code éléments finis ATILA.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de cette thèse. Je pense aux directeurs et assistants des différents laboratoires industriels ou universitaires qui m'ont fourni des échantillons à mesurer, et avec qui j'ai eu de nombreuses discussions amicales et fructueuses. Je pense aussi à l'ensemble du personnel du GERDSM qui m'a réservé un accueil très chaleureux.

INTRODUCTION	1
I - GENERALITES	4
1 - HISTORIQUE	5
2 - PIEZOELECTRICITE, PYROELECTRICITE, FERROELECTRICITE	6
3 - RELATIONS DE LA PIEZOELECTRICITE	10
4 - CERAMIQUES FERROELECTRIQUES	14
4 - 1 - Les céramiques PZT	16
4 - 1 - 1 - Le système $PbZrO_3 - PbTiO_3$	16
4 - 1 - 2 - La structure pérovskite	18
4 - 2 - Non-linéarités	20
II - GENERATEUR PIEZOELECTRIQUE EN MODE HYDROSTATIQUE	22
1 - DEFINITION DES PARAMETRES HYDROSTATIQUES	23
2 - HYDROPHONE	24
2 - 1 - Schéma électrique équivalent	24
2 - 2 - Facteur de mérite hydrostatique	27
III - DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE CARACTERISATION EN PRESSION	29
1 - DETERMINATION DU FACTEUR DE MERITE HYDROSTATIQUE	30
1 - 1 - Principe	30
1 - 2 - Mesure de constante de charge hydrostatique	30
1 - 3 - Mesure de capacité	31

2 - DISPOSITIF DE MESURE	31
2 - 1 - Enceinte de mesure sous pression	31
2 - 2 - Chaîne de mesure	33
2 - 2 - 1 - Mesure de d_h	33
2 - 2 - 2 - Mesure de C	35
2 - 2 - 3 - Automatisation de la chaîne	36
3 - CARACTERISTIQUES	36
IV - NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES	39
1 - INTERET	40
2 - PRESENTATION	41
2 - 1 - Les polymères et copolymères piézoélectriques	41
2 - 1 - 1 - Le PVDF	41
2 - 1 - 2 - Le P[VDF-TrFE]	41
2 - 1 - 3 - Caractéristiques communes	42
2 - 2 - Les céramiques très fortement anisotropes	42
2 - 2 - 1 - $PbTiO_3$	42
2 - 2 - 2 - $PbNb_2O_6$	42
2 - 2 - 3 - Caractéristiques communes	43
2 - 3 - Les céramiques composites	43
2 - 3 - 1 - Le composite de connectivité 3-3	44
2 - 3 - 2 - Les composites de connectivités 3-2, 3-1	46
2 - 3 - 3 - Le composite de connectivité 1-3	47
2 - 3 - 4 - Le composite de connectivité 0-3	50
2 - 3 - 5 - Caractéristiques communes	51

3 - COMPORTEMENT EN PRESSION	51
3 - 1 - Conditions de mesure et critère de stabilité	51
3 - 1 - 1 - Cycles en pression	52
3 - 1 - 2 - Fluage ou vieillissement sous pression	53
3 - 1 - 3 - Critère de stabilité	53
3 - 2 - Bilan	57
3 - 2 - 1 - Commentaires	57
3 - 2 - 2 - Conclusion	64
V - ETUDE DES PROPRIETES ELECTRO-ACOUSTIQUES DES COMPOSITES Z37	65
1 - COMPOSITE Z37	66
2 - CARACTERISATION A PRESSION ATMOSPHERIQUE	68
3 - CARACTERISATION EN PRESSION	71
3 - 1 - Etude en fonction de la fraction volumique de PZT	71
3 - 1 - 1 - Résultats	72
3 - 1 - 2 - Discussion	76
3 - 1 - 3 - Interprétation des résultats	81
3 - 2 - Etude à fraction volumique de PZT fixée	83
3 - 2 - 1 - Montées-descentes en pression sans palier intermédiaire	83
3 - 2 - 2 - Vieillissement sous pression	89
3 - 2 - 3 - Vieillissement après relâchement de la pression	89
3 - 3 - Conclusion	91
VI - MODELISATION	94

1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	95
1 - 1 - Modèle de Wersing	95
1 - 2 - Modèle "self consistent"	99
1 - 3 - Modèle de percolation	102
1 - 3 - 1 - Piézoélectricité et percolation	102
1 - 3 - 2 - Le composite Z37 et la percolation	103
1 - 4 - Modèle de "poutres"	107
1 - 4 - 1 - Constante diélectrique ϵ_{33}	108
1 - 4 - 2 - Constante piézoélectrique d_{33}	109
1 - 4 - 3 - Constante piézoélectrique d_{31}	110
1 - 4 - 4 - Constante piézoélectrique d_h	112
1 - 5 - Conclusion	112
2 - MODELE ANALYTIQUE	113
2 - 1 - Principe	113
2 - 2 - Développement	115
2 - 2 - 1 - Constante diélectrique ϵ_{33}	115
2 - 2 - 2 - Constante piézoélectrique d_{33}	115
2 - 2 - 3 - Constante piézoélectrique d_{31}	116
2 - 3 - Résultats	117
2 - 4 - Conclusion	121
3 - SIMULATION NUMERIQUE	125
3 - 1 - Equations du problème	125
3 - 2 - Formulation variationnelle	126
3 - 3 - Analyse par la méthode des éléments finis	126
3 - 4 - Modélisation du composite Z37	128

SOMMAIRE

3 - 4 - 1 - Hypothèses	128
3 - 4 - 2 - Conditions aux limites	130
3 - 4 - 3 - Symétries	130
3 - 4 - 4 - Maillages	130
3 - 4 - 5 - Développement	135
3 - 4 - 6 - Résultats	139
3 - 4 - 7 - Conclusion	150
CONCLUSION	145
REFERENCES	147
ANNEXES	155
ANNEXE 1. Plans de l'enceinte de mesure en pression	155
ANNEXE 2. Catalogue des résultats expérimentaux	170
ANNEXE 3. Associations parallèle et série	202

Un hydrophone est un détecteur immergé d'ondes acoustiques. Comme la plupart des transducteurs électromécaniques, il est constitué par un matériau piézoélectrique. Sa sensibilité est définie par la tension que génère une onde de pression hydrostatique [6]. Le coefficient de tension, g_h , qui relie [1] le champ électrique (tension/épaisseur) traversant un matériau piézoélectrique, à la variation de pression hydrostatique, est par conséquent un paramètre très utile pour évaluer les qualités d'un matériau destiné à la conception d'un hydrophone. Un autre paramètre fréquemment utilisé est le coefficient de charge, d_h , reliant la densité surfacique de charge aux bornes du matériau, à la variation de pression hydrostatique. Le bruit étant généralement un facteur limitatif en détection des signaux [6], il est en effet important de connaître le produit ($d_h \cdot g_h$), proportionnel au rapport (signal/bruit) de l'hydrophone [8]. Les coefficients d_h et g_h vérifient la relation [7]:

$$g_h = \frac{d_h}{\epsilon_{33} \epsilon_0}$$

où ϵ_{33} est la constante diélectrique du matériau dans la direction de polarisation, et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide. Un coefficient d_h élevé et une faible constante diélectrique sont donc nécessaires pour que l'hydrophone ait une forte sensibilité et un bon rapport (signal/bruit). Pour être tout à fait satisfaisant, le matériau piézoélectrique constituant l'hydrophone devrait aussi posséder:

- une faible densité pour permettre la réalisation d'antennes de grandes dimensions (mono ou multiéléments),
- une forte compliance et une grande flexibilité pour épouser n'importe quelle forme, et pour résister aux chocs mécaniques,
- des coefficients d_h et g_h peu dépendants de la pression, de la température, et de la fréquence d'excitation.

Les céramiques en titanozirconate de plomb (PZT) équipent depuis 1954, la majorité des transducteurs, en raison de leur excellent facteur de couplage électromécanique. Toutefois, leur utilisation en détection sous-marine présente de nombreux inconvénients. Ces céramiques ont un coefficient piézoélectrique d_{33} très important, mais leur constante de charge hydrostatique $d_h (=d_{33} + 2d_{31})$ est faible, car les termes d_{33} et $2d_{31}$ ont des signes opposés, et sont pratiquement égaux en valeur absolue. Etant donné leur forte permittivité ($\epsilon_{33} > 1000$), leur coefficient de tension, g_h , est aussi très faible. De plus, leur densité est élevée ($7.9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$), et pour certaines applications un matériau plus souple et moins fragile serait préférable.

Aussi, depuis quelques années, de nouveaux matériaux réputés pour leurs bonnes performances en mode hydrostatique sont apparus. Ils peuvent être classés en trois catégories:

- les céramiques très fortement anisotropes telles que les titanates de plomb ou les métaniobates de plomb,
- les polymères et les copolymères piézoélectriques tels que le PVDF et le P[VDF-TrFE],
- les céramiques composites.

Ces matériaux sont promis à d'importantes applications en acoustique sous-marine, sous réserve de leur stabilité en pression, en température et en fréquence. Une caractérisation complète de ces matériaux, en fonction de tous les paramètres susceptibles de modifier leur comportement, serait souhaitable mais très lourde à mettre en œuvre. Par conséquent, notre étude se limite aux effets de la pression hydrostatique sur leur comportement acoustique. Dans un premier temps, nous développons et mettons au point une méthode de mesure permettant de caractériser les matériaux piézoélectriques, en mode hydrostatique et en pression. Après avoir testé plusieurs types de nouveaux matériaux, préparés par divers laboratoires universitaires ou privés, nous dressons le bilan des performances actuellement atteintes. Puis, nous nous intéressons plus particulièrement à un type de matériau très prometteur : le composite PZT-air de connectivité 3-3, aussi appelé céramique poreuse. Nous essayons d'interpréter physiquement les variations de ses caractéristiques en pression, et proposons un modèle visant à optimiser ses propriétés.

Ce rapport est divisé en six chapitres.

Le premier rappelle le phénomène et les relations de la piézoélectricité. Une description succincte des céramiques ferroélectriques classiquement utilisées (PZT) y est effectuée.

Le second traite du fonctionnement des matériaux piézoélectriques dans des conditions hydrostatiques. Il définit un facteur de mérite permettant de les caractériser et de les comparer.

Le troisième décrit la méthode et le dispositif de mesure en pression mis au point pour évaluer ce facteur de mérite.

Le quatrième présente l'ensemble des nouveaux matériaux. Il définit une procédure de test en pression et un critère de stabilité. Les résultats concernant les performances de chaque type de matériau et leur dépendance en pression y sont résumés et commentés.

Le cinquième est consacré à une caractérisation approfondie du composite PZT-air de connectivité 3-3 préparé par la société PONS (composite Z37). Il met en évidence l'analogie entre le comportement du composite sous faible pression hydrostatique, et celui d'une céramique PZT classique sous forte contrainte uniaxiale, parallèle à la direction de polarisation.

Le sixième et dernier chapitre discute de la modélisation des propriétés diélectriques et piézoélectriques du composite de connectivité 3-3. Il développe un modèle basé sur une représentation simplifiée de la microstructure du composite, et prouve sa validité par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux, puis par simulation numérique éléments finis. Enfin, il examine toutes les perspectives offertes par ce modèle.

CHAPITRE I

GENERALITES

1 - HISTORIQUE

L'étude des relations entre les phénomènes pyroélectriques et la symétrie cristalline amena Pierre Curie, dès 1880, à prévoir l'existence d'un phénomène électrique résultant de l'application d'une pression selon certains axes du cristal. C'est ensuite dans le laboratoire de Jacques Curie que la piézoélectricité fut pour la première fois mise en évidence sur des cristaux naturels.

L'effet piézoélectrique inverse, c'est-à-dire la déformation d'un cristal sous l'application d'une différence de potentiel, fut prédit en 1881 par Lippman à partir de considérations thermodynamiques et fut vérifié expérimentalement peu après par les frères Curie.

La plupart des relations générales entre structure cristalline et piézoélectricité avaient été énoncées par les frères Curie, lorsque W. Voigt introduisit en 1894 la notion de tenseur et l'appliqua à la théorie de l'élasticité des milieux anisotropes. Par combinaison des éléments de symétrie des tenseurs élastiques et des vecteurs électriques avec les symétries géométriques des cristaux, il détermina, parmi les 32 classes cristallines, celles dans lesquelles l'effet piézoélectrique pouvait avoir lieu. Pour chaque classe, il dénombra ensuite parmi les 18 coefficients piézoélectriques possibles, ceux qui devaient être différents de zéro.

Malgré une utilisation mineure de la piézoélectricité par Pierre Curie pour mesurer les charges émises par le radium, cette découverte n'eut pas d'application pratique jusqu'à la première guerre mondiale. Les besoins croissants en détection sous-marine aboutirent à l'utilisation d'ondes acoustiques puisque à cette époque la production d'ondes radios n'était pas possible et que ces dernières ne se propagent pas dans l'eau.

Les meilleurs résultats, pour générer et détecter des ondes acoustiques, furent obtenus par l'utilisation d'un cristal piézoélectrique de quartz. Cette méthode fut développée par Paul Langevin et la structure imaginée reste encore adoptée, avec de faibles modifications, dans les sonars actuels.

Le quartz fut ensuite abandonné comme transducteur sonore sous-marin vu ses possibilités d'émission de puissance limitées et la difficulté d'obtenir de très grosses pièces. Toutefois, il restait utilisé là où une grande stabilité en fréquence et une faible sensibilité thermique étaient requises. Le professeur G. Cady utilisa le premier en 1919, un quartz pour le contrôle de la fréquence d'un oscillateur radio-électrique. Sous l'impulsion des

laboratoires "Bell Telephone", on se servit aussi de cristaux de quartz pour créer des filtres d'ondes très sélectifs en téléphonie.

Les progrès technologiques dans l'élaboration des matériaux permettent dès la fin de la seconde guerre mondiale la réalisation des premiers matériaux piézoélectriques de synthèse. Ce sont les premières céramiques ferroélectriques de titanate de baryum, de formule $BaTiO_3$.

Depuis, de nombreuses recherches ont permis d'augmenter le nombre des matériaux piézoélectriques et d'élargir leur champ d'utilisation:

- en 1954 apparaissent les titanozirconates de plomb, aussi appelés PZT, qui vont supplanter les matériaux naturels dans la construction des transducteurs sonores et ultrasonores;
- quelques années plus tard, de nouveaux matériaux sont mis au point (céramiques très fortement anisotropes, polymère et copolymère piézoélectriques, céramiques composites). Leurs propriétés permettent d'envisager d'intéressantes applications non seulement en acoustique sous-marine (élaboration d'hydrophones très sensibles), mais encore dans des domaines aussi divers que l'étude des phénomènes sismiques, la recherche pétrolière, l'instrumentation médicale et le contrôle non destructif.

2 - PIEZOELECTRICITE, PYROELECTRICITE, FERROELECTRICITE

La piézoélectricité est la propriété que présentent certains corps de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ce comportement, spontané dans plusieurs cristaux naturels ou synthétiques, tels que le quartz ou le sel de Seignette, est dû à la structure cristalline : une action mécanique provoque l'apparition ou la variation (en amplitude et/ou en direction) d'un dipôle électrique dans chaque maille cristalline du matériau par déplacement des centres de charges positives et négatives, comme le montre la figure I-1 pour la coupe Z du quartz. L'équilibre électrostatique se trouvant rompu, une polarisation apparaît : c'est l'effet piézoélectrique direct. Il existe corrélativement un effet inverse, un champ électrique provoquant une déformation mécanique du matériau. La piézoélectricité ne peut se manifester ni pour des corps conducteurs, ni pour des corps à haut degré de symétrie. On montre que l'absence de centre de symétrie dans la maille élémentaire est nécessaire à l'apparition de ce phénomène.

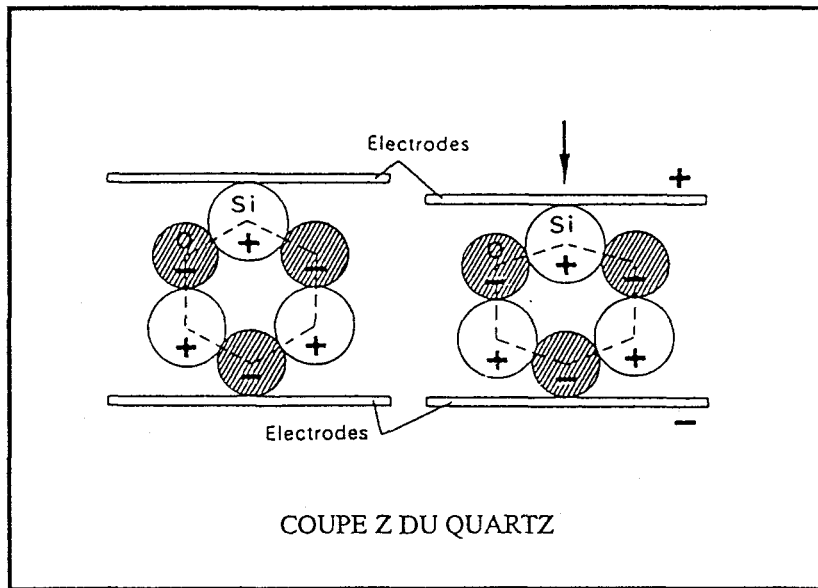


Figure I-1

Il existe 20 classes de cristaux piézoélectriques (figure I-2). Parmi celles-ci, dix sont "polaires", c'est-à-dire possèdent une polarisation électrique en l'absence de champ électrique externe appliqué. La direction privilégiée de la polarisation est appelée axe polaire du cristal.

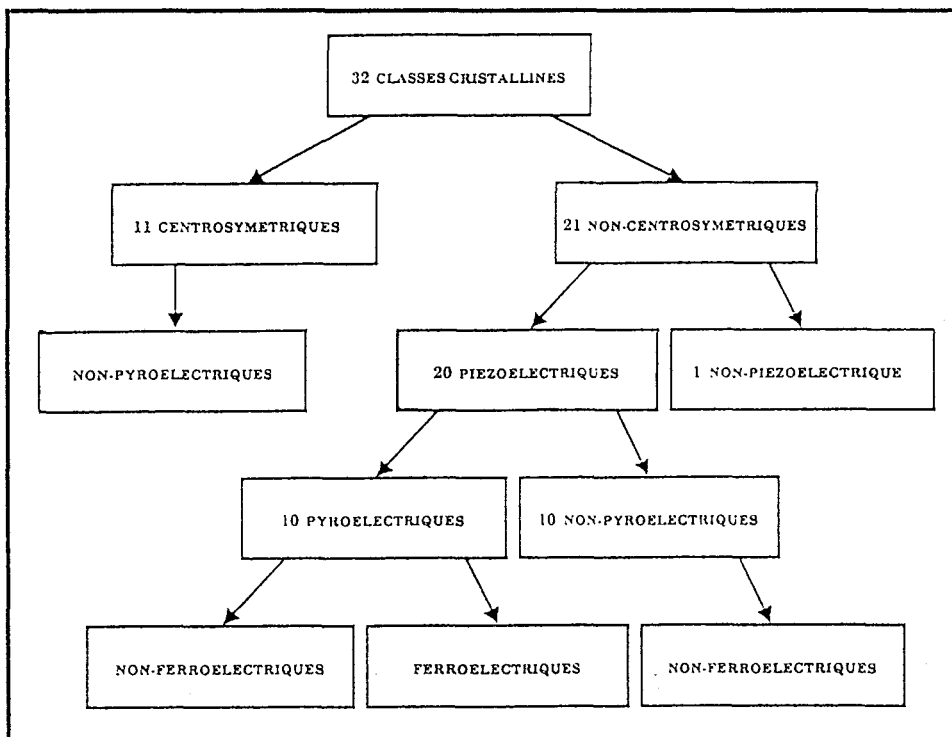


Figure I-2

On ne peut généralement pas détecter les charges de polarisation sur les faces du cristal perpendiculaires à l'axe polaire, car elles sont compensées par des charges libres provenant de la conductivité du matériau ou du milieu ambiant. Cependant, comme l'amplitude du moment dipolaire est fonction de la température, il est possible d'observer la variation de la polarisation spontanée de ces cristaux, en mesurant les charges écoulées dans un circuit extérieur fermé, lorsqu'on modifie leur température. Pour cette raison, les cristaux appartenant à ces 10 classes cristallines sont appelés "pyroélectriques".

Les cristaux ferroélectriques correspondent à un sous-groupe des "pyroélectriques", pour lesquels l'axe polaire, support d'un dipôle permanent, est mobile dans le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Le sens de la polarisation peut même être inversé par application d'un champ électrique suffisamment intense. Cette propriété permet une mesure directe de la polarisation par les charges qui s'écoulent dans le circuit extérieur lorsqu'on fait varier le sens du champ électrique. La courbe donnant la polarisation en fonction du champ électrique apparaît sous la forme d'un cycle d'hystérésis tel qu'illustré sur la figure I-3. Sur cette courbe, P_S représente la polarisation spontanée, P_r la polarisation rémanente à champ nul, et E_c le champ coercitif qui annule la polarisation.

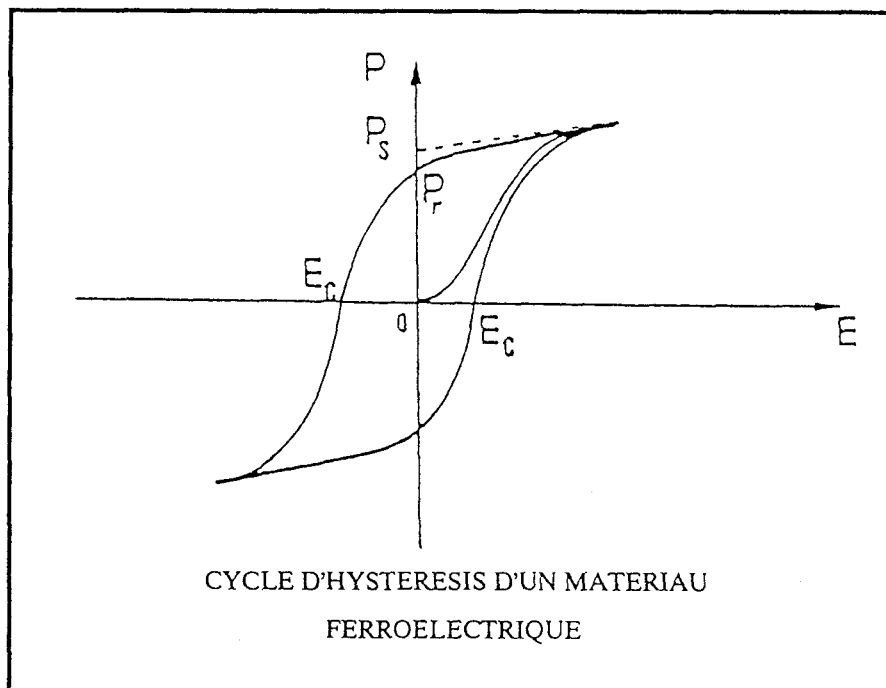


Figure I-3

Pour des raisons énergétiques, le sens de la polarisation spontanée à l'intérieur du cristal, n'est pas partout le même. Le cristal ferroélectrique est comme les matériaux

ferromagnétiques subdivisé en "domaines" (régions dans lesquelles la polarisation est uniforme). La frontière entre deux domaines adjacents est appelée "mur" ou "paroi" de domaines (figure I-4). Cette zone de transition est une région perturbée du cristal, dans laquelle le moment dipolaire bascule progressivement d'une position à une autre. La forme, le nombre et la disposition des domaines dépendent de la structure cristalline du matériau et des contraintes extérieures électriques et mécaniques. Ainsi lorsqu'on applique un champ électrique, les murs de domaines se déplacent de façon à laisser augmenter le volume du domaine dont la direction de polarisation spontanée est la plus proche de celle du champ appliqué. Si ce dernier est suffisamment élevé, le cristal peut présenter une direction de polarisation spontanée unique.

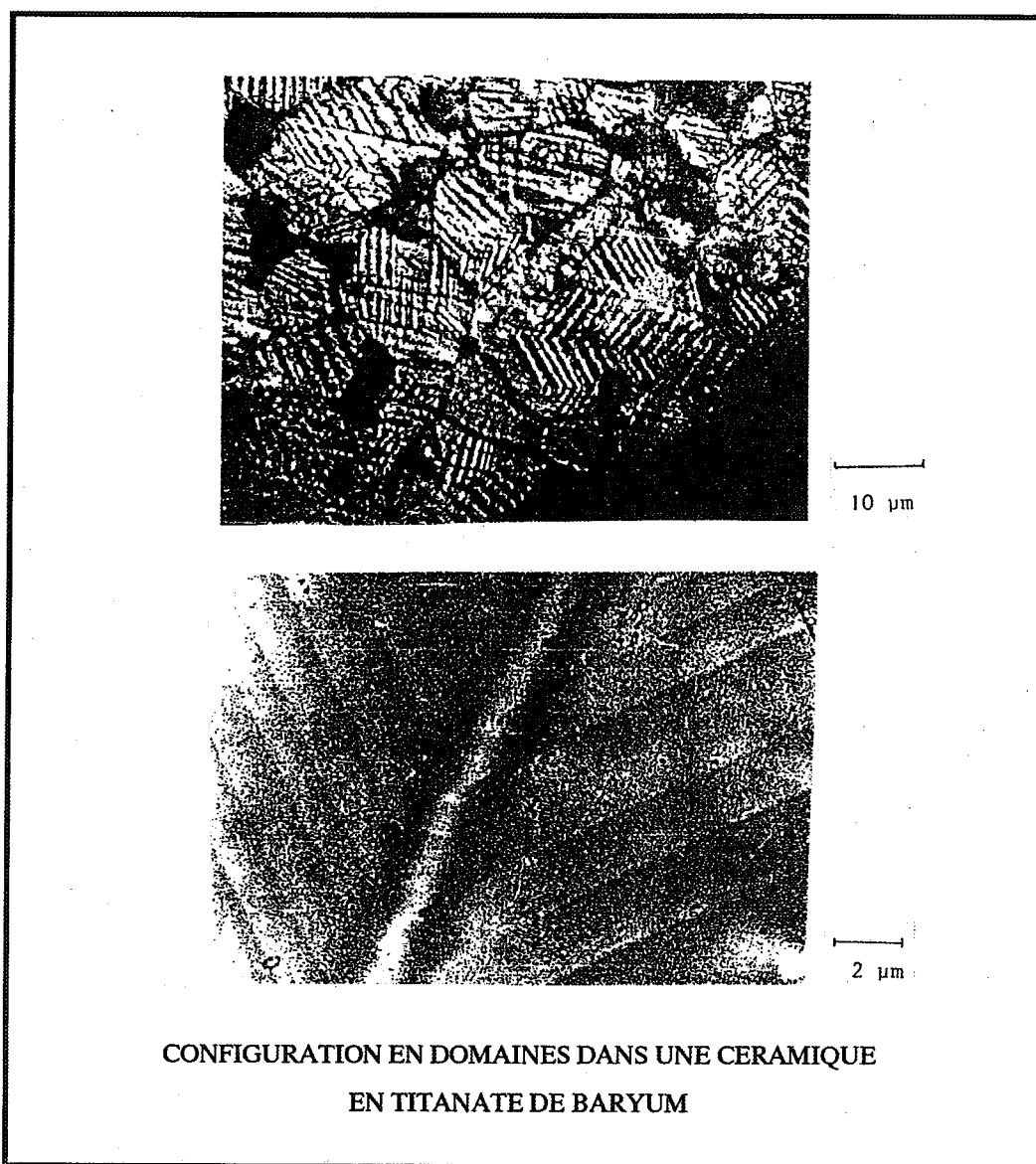


Figure I-4

3 - RELATIONS DE LA PIEZOELECTRICITE

Les relations constitutives de la piézoélectricité et de la pyroélectricité se déduisent des fonctions d'état thermodynamiques du système. Ainsi, une variation élémentaire de l'énergie interne (U) d'un matériau piézoélectrique comprend une composante thermique, une composante mécanique, et une composante diélectrique et s'écrit:

$$dU = dQ + T_{jk}.dS_{jk} + E_i.dD_i \quad (I-1)$$

avec T_{jk} une composante du tenseur des contraintes, S_{jk} une composante du tenseur des déformations, E_i et D_i les composantes des vecteurs champ électrique et déplacement électrique. La notation adoptée est celle d'EINSTEIN, les indices variant de 1 à 3. L'énergie de GIBBS (G) du système (ou enthalpie libre) s'écrit:

$$G = U - S_{jk}.T_{jk} - E_i.D_i - \sigma.\theta \quad (I-2)$$

avec σ l'entropie du système et θ la température à laquelle il est soumis. Pour une transformation réversible de ce système, on déduit de (I-1) et (I-2):

$$dG = -S_{jk}.dT_{jk} - D_i.dE_i - \sigma.d\theta \quad (I-3)$$

S_{jk} , D_i et σ sont donc des dérivées partielles de G:

$$S_{jk} = - \left. \frac{\delta G}{\delta T_{jk}} \right|_{E,\theta} \quad D_i = - \left. \frac{\delta G}{\delta E_i} \right|_{T,\theta} \quad \sigma = - \left. \frac{\delta G}{\delta \theta} \right|_{T,E} \quad (I-4)$$

Par ailleurs, les différentielles totales de S_{jk} , D_i et σ peuvent s'écrire:

$$\begin{aligned} dS_{ij} &= \left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta T_{kl}} \right|_{E,\theta} .dT_{kl} + \left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta E_k} \right|_{T,\theta} .dE_k + \left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta \theta} \right|_{T,E} .d\theta \\ dD_i &= \left. \frac{\delta D_i}{\delta T_{kl}} \right|_{E,\theta} .dT_{kl} + \left. \frac{\delta D_i}{\delta E_k} \right|_{T,\theta} .dE_k + \left. \frac{\delta D_i}{\delta \theta} \right|_{T,E} .d\theta \\ d\sigma &= \left. \frac{\delta \sigma}{\delta T_{kl}} \right|_{E,\theta} .dT_{kl} + \left. \frac{\delta \sigma}{\delta E_k} \right|_{T,\theta} .dE_k + \left. \frac{\delta \sigma}{\delta \theta} \right|_{T,E} .d\theta \end{aligned} \quad (I-5)$$

Chacune des dérivées partielles énumérées peut, de plus, s'exprimer en fonction de l'enthalpie libre. Ainsi, pour la première:

$$\left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta T_{kl}} \right|_{E,\theta} = - \left. \frac{\delta^2 G}{\delta T_{kl} \delta T_{ij}} \right|_{E,\theta} = - \left. \frac{\delta^2 G}{\delta T_{ij} \delta T_{kl}} \right|_{E,\theta} = \left. \frac{\delta S_{kl}}{\delta T_{ij}} \right|_{E,\theta} = S_{ijkl}^{E\theta} = S_{klij}^{E\theta} \quad (I-6)$$

Ce terme est, par définition, la compliance (ou flexibilité) à champ électrique et température constants, du matériau. De même, cinq autres constantes peuvent être extraites des relations (I-3), (I-4) et (I-5) suivant les équations ci-après:

- la permittivité diélectrique à contrainte et température constantes:

$$\epsilon_{ij}^{T\theta} = \left. \frac{\delta D_i}{\delta E_j} \right|_{T,\theta} = - \left. \frac{\delta^2 G}{\delta E_j \delta E_i} \right|_{T,\theta} = - \left. \frac{\delta^2 G}{\delta E_i \delta E_j} \right|_{T,\theta} = \left. \frac{\delta D_j}{\delta E_i} \right|_{T,\theta} = \epsilon_{ji}^{T\theta} \quad (I-7)$$

- la capacité calorifique C à contrainte et champ électrique constants:

$$\frac{\rho \cdot c}{\theta} = \left. \frac{\delta \sigma}{\delta \theta} \right|_{T,E} \quad (I-8)$$

- la constante piézoélectrique de charge d à température constante:

$$d_{kij}^{\theta} = \left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta E_k} \right|_{T,\theta} = \left. \frac{\delta D_k}{\delta T_{ij}} \right|_{E,\theta} \quad (I-9)$$

- le coefficient de dilatation à champ électrique constant:

$$\alpha_{ij}^E = \left. \frac{\delta S_{ij}}{\delta \theta} \right|_{T,E} = \left. \frac{\delta \sigma}{\delta T_{ij}} \right|_{E,\theta} \quad (I-10)$$

- la constante pyroélectrique p à contrainte constante:

$$p_i^T = \left. \frac{\delta D_i}{\delta \theta} \right|_{T,E} = \left. \frac{\delta \sigma}{\delta E_i} \right|_{T,\theta} \quad (I-11)$$

A l'aide de ces constantes, on peut finalement écrire:

$$dS_{ij} = S_{ijkl}^{E\theta} .dT_{kl} + d_{mij}^{\theta} .dE_m + \alpha_{ij}^E .d\theta$$

$$dD_n = d_{mkl}^{\theta} .dT_{kl} + \epsilon_{nm}^{T\theta} .dE_m + p_n^T .d\theta \quad (I-13)$$

$$d\sigma = \alpha_{kl}^E .dT_{kl} + p_m^T .dE_m + \rho .c \frac{d\theta}{\theta}$$

Les règles de condensation des tenseurs [1] permettent d'écrire plus simplement:

$$dS_i = S_{ij}^{E\theta} .dT_j + d_{mi}^{\theta} .dE_m + \alpha_i^E .d\theta$$

$$dD_n = d_{nj}^{\theta} .dT_j + \epsilon_{nm}^{T\theta} .dE_m + p_n^T .d\theta \quad (I-13)$$

$$d\sigma = \alpha_j^E .dT_j + p_m^T .dE_m + \rho .c \frac{d\theta}{\theta}$$

avec i et j variant de 1 à 6, et n et m de 1 à 3.

Le calcul qui vient d'être effectué a permis d'obtenir des coefficients mécaniques, diélectriques et piézoélectriques établis à température constante. Cette piézoélectricité obtenue à température constante correspond à la piézoélectricité primaire. Les mêmes coefficients, déterminés dans des conditions adiabatiques ($d\sigma=0$), seraient légèrement différents. La différence obtenue sur les coefficients piézoélectriques correspond à la piézoélectricité secondaire, souvent beaucoup plus faible que la piézoélectricité primaire. Elle exprime la prise en compte de la pyroélectricité dans le terme piézoélectrique. Dans la pratique, il sera sous-entendu que les mesures sont effectuées à température constante, et l'exposant θ sera omis. Admettant en outre que les relations différentielles (I-13) peuvent être linéarisées, on peut écrire:

$$\begin{aligned} S_i &= S_{ij}^E .T_j + d_{mi}^{\theta} .E_m \\ D_n &= d_{nj}^{\theta} .T_j + \epsilon_{nm}^T .E_m \end{aligned} \quad (I-14)$$

D'autres variables indépendantes peuvent être utilisées. Les équations obtenues sont alors, en négligeant les termes pyroélectriques:

$$T_i = C_{ij}^E \cdot S_j - e_{mi} \cdot E_m$$

$$D_n = e_{nj} \cdot S_j + \epsilon_{nm}^S \cdot E_m$$

$$S_i = S_{ij}^D \cdot T_j + g_{mi} \cdot D_m$$

$$E_n = -g_{nj} \cdot T_j + \beta_{nm}^T \cdot D_m \quad (I-15)$$

$$T_i = C_{ij}^D \cdot S_j - h_{mi} \cdot D_m$$

$$E_n = -h_{nj} \cdot S_j + \beta_{nm}^S \cdot D_m$$

Les tenseurs des constantes mécaniques, diélectriques et piézoélectriques sont caractéristiques de la classe de symétrie cristalline à laquelle le matériau appartient. C'est ce qu'exprime la table (figure I-5) établie d'après des données de W. P. MASON [2] et de E. DIEULESAINT [1]. Par exemple, pour une céramique de la classe 6mm du système hexagonal, les équations (I-14) s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ \hline D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{31} \\ S_{12}^E & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{31} \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 & | & 0 & d_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & | & d_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} & 0 & | & \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{31} & 0 & 0 & | & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ \hline E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (I-16)$$

soit, en supposant qu'il n'y a pas de cisaillement:

$$T = (T_1, T_2, T_3, 0, 0, 0)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E \\ S_{12}^E & S_{11}^E & S_{13}^E \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{I-17})$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Remarque:

Le système de coordonnées est défini de façon à ce que la direction (3) corresponde à la direction de polarisation du matériau.

4 - CERAMIQUES FERROELECTRIQUES

Il est difficile, sinon impossible, d'obtenir tous les matériaux ferroélectriques sous forme de monocristaux qui sont, par ailleurs, très fragiles. La plus grande partie des applications piézoélectriques est donc réalisée avec des céramiques polycristallines ferroélectriques.

Une céramique est un assemblage d'un très grand nombre de microcristaux rigidement soudés entre eux par frittage. Dans la céramique ferroélectrique, les microcristaux élémentaires sont ferroélectriques. Cependant, dans l'élément simplement fritté, les polarisations spontanées des domaines des divers monocristaux sont orientées au hasard, et le matériau n'a, à l'échelle macroscopique, aucun moment dipolaire global. Pour introduire dans un tel milieu l'anisotropie nécessaire à l'existence de la piézoélectricité, on doit le soumettre à un champ électrique intense, qui aligne préférentiellement suivant sa direction les polarisations des microcristaux élémentaires (figure I-6). Lorsque le champ électrique est supprimé, il subsiste au sein du matériau une certaine polarisation rémanente : P_r . C'est après cette étape dite de "polarisation" que la céramique présente toutes les propriétés d'un monocristal ferroélectrique.

CHAPITRE I
- GENERALITES -

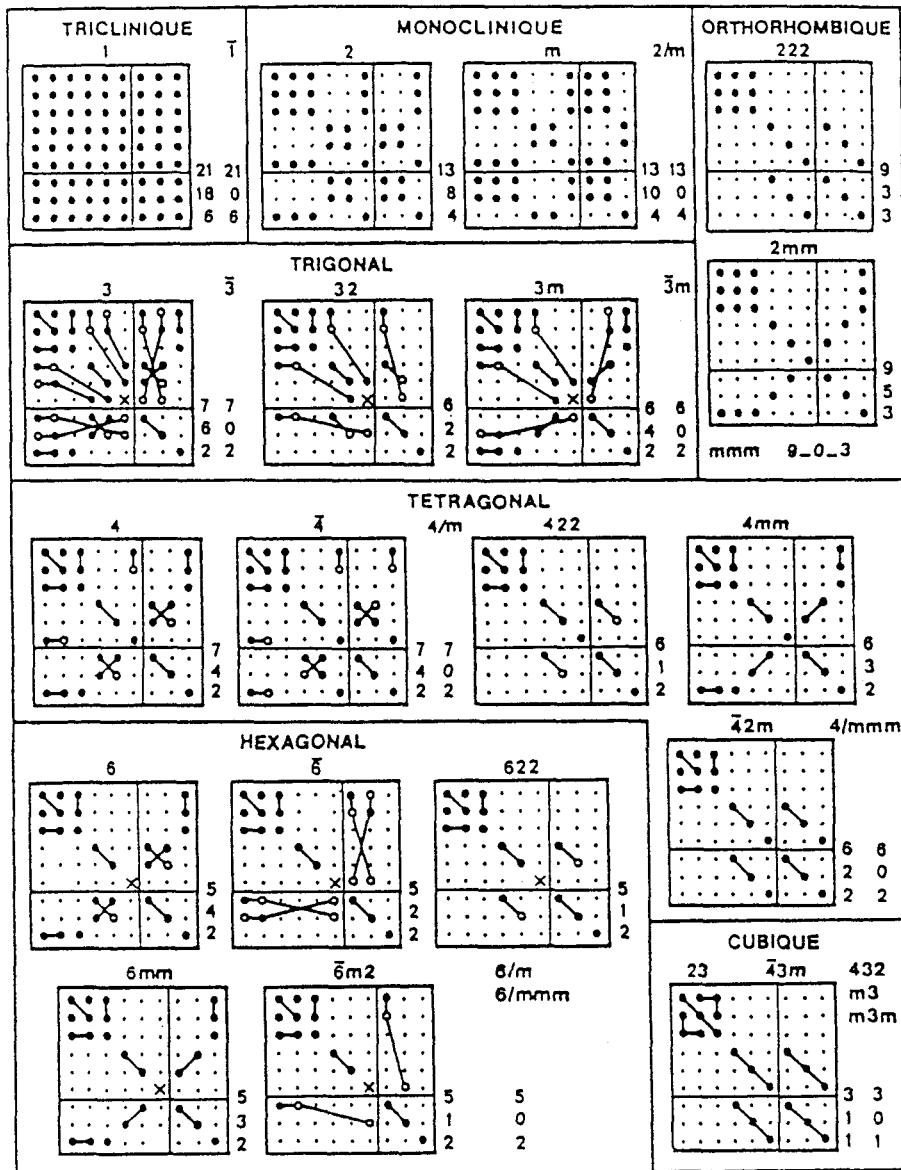


Table de symétrie des matrices de constantes élastiques, piézoélectriques et diélectriques dans le système des axes cristallographiques. La symétrie par rapport à la diagonale principale n'est pas mentionnée. Les nombres de constantes élastiques, piézoélectriques et diélectriques indépendantes sont indiqués successivement à droite de chaque tenseur. Cette table est donnée pour les tenseurs C_{ij} , e_{im} , ϵ_{mn} .

TABLE DE SYMETRIE DES TENSEURS

Figure I-5

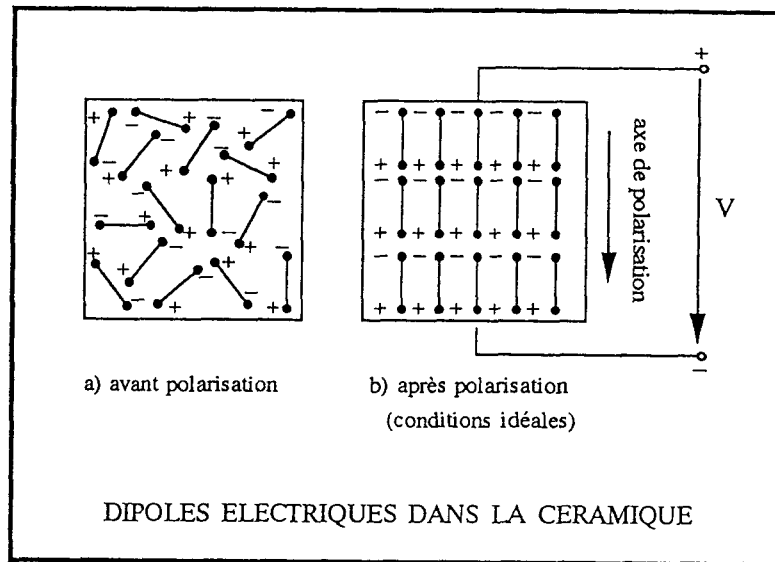


Figure I-6

Pratiquement, l'orientation des polarisations élémentaires selon la direction du champ polarisant s'accompagne de contraintes mécaniques dont la libération lente provoque un retour progressif à l'état désordonné: c'est ce qu'on appelle le "vieillessement" des céramiques qui se traduit par une variation des caractéristiques de la céramique au cours du temps.

On conçoit enfin qu'une élévation de la température tende à détruire l'alignement des dipôles élémentaires selon la direction du champ de polarisation. A une température dite température de Curie, il n'existe plus de moment électrique macroscopique et la céramique perd toutes ses propriétés piézoélectriques. L'un des avantages des céramiques est d'avoir une température de Curie nettement plus élevée que celle de la plupart des cristaux piézoélectriques.

4 - 1 - Les céramiques PZT

4 - 1 - 1 - Le système $PbZrO_3 - PbTiO_3$

La solution solide PZT de zirconate de plomb ($PbZrO_3$) et de titanate de plomb ($PbTiO_3$) présente une frontière morphotropique pour des proportions Zr/Ti voisines de 1/1 (figure I-7). Ce changement de structure cristalline est particulièrement intéressant puisqu'il s'accompagne de propriétés diélectriques et piézoélectriques remarquables [3] (figure I-8).

CHAPITRE I
- GENERALITES -

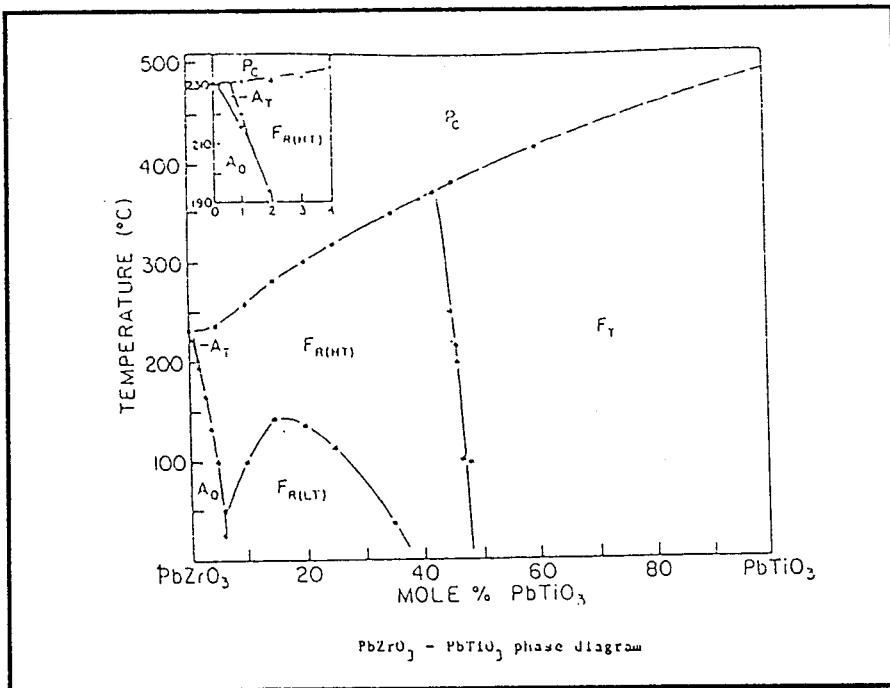


Figure I-7

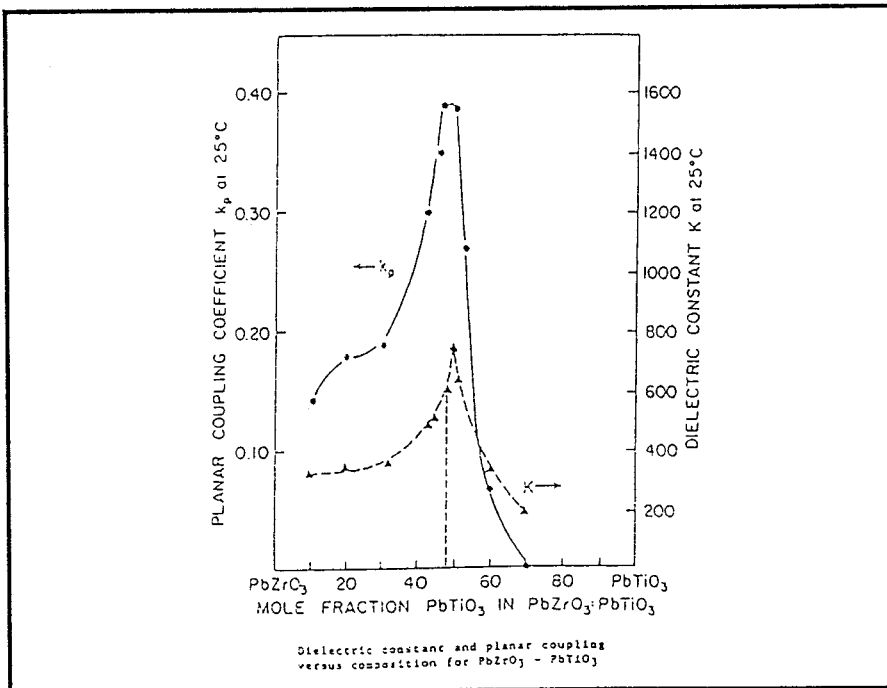


Figure I-8

Ainsi les compositions voisines de la frontière entre les phases tétragonale et rhomboédrique sont d'un grand intérêt technologique pour la réalisation de transducteurs acoustiques en émission ou en réception, ainsi que pour de nombreux capteurs à grande sensibilité tels que les accéléromètres.

4 - 1 - 2 - La structure pérovskite

Les titanozirconates de plomb de formule théorique $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ sont des composés dont la structure cristalline est de type pérovskite. Cette structure, de formule générale ABO_3 , présente dans sa forme la plus simple une maille cubique avec : un cation A, de grand rayon, bivalent et de coordinance douze, disposé suivant un arrangement cubique, un cation B, de rayon plus faible, tétravalent et de coordinance six, au centre de chaque cube, et un oxygène au centre des six faces du cube (les ions oxygène forment un octaèdre au centre duquel se trouve l'ion B). Cette description est la représentation de la structure en prenant l'ion A comme origine de la maille. La figure I-9 montre la maille cubique, ABO_3 , avec origine en A ou en B, et met en évidence les octaèdres d'oxygène.

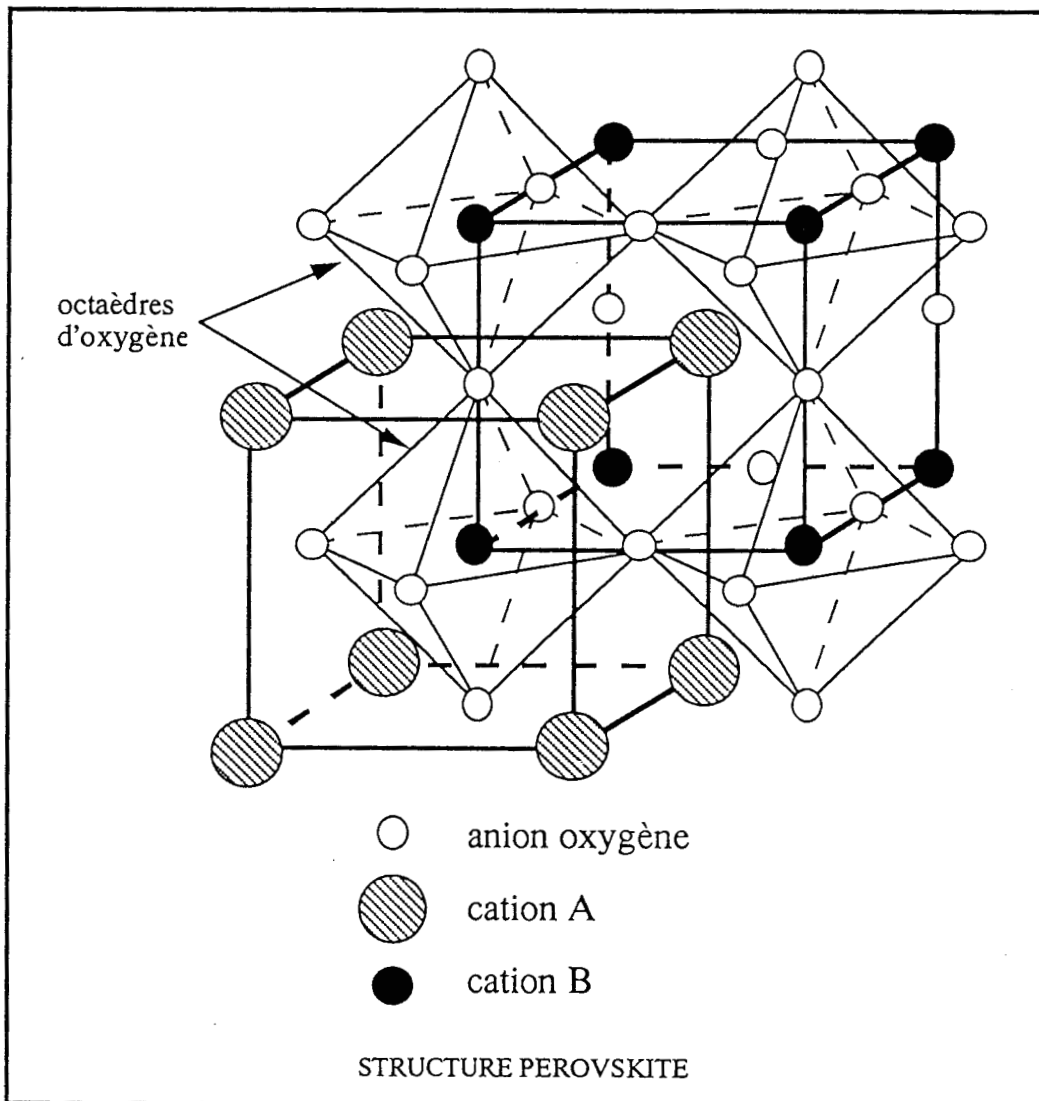


Figure I-9

La structure cubique correspond en fait à la phase haute température paraélectrique. Au dessous de la température de Curie, la maille se déforme et devient pseudocubique. Au niveau de chaque maille, le centre de gravité des charges négatives se sépare de celui des charges positives, ce qui laisse apparaître des moments dipolaires élémentaires.

A température ambiante, la phase pseudocubique peut être tétragonale, rhomboédrique et orthorhombique (figure I-10), selon la nature des ions composant la maille. Dans la plupart des céramiques PZT utilisées, les phases tétragonale et rhomboédrique coexistent, la phase tétragonale étant largement prédominante.

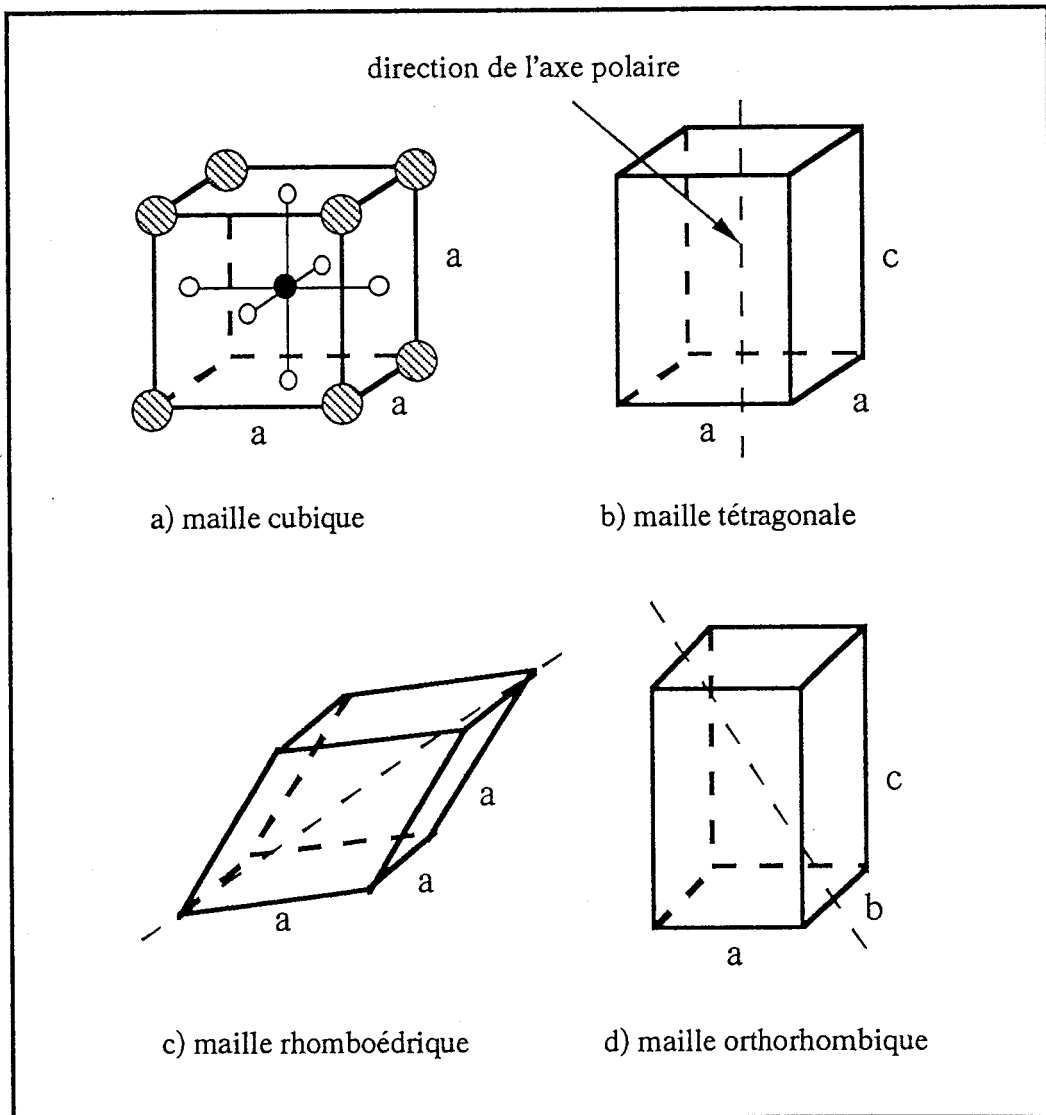


Figure I-10

4 - 2 - Non-linéarités

Sous haut niveau de sollicitation mécanique ou électrique, les céramiques ferroélectriques exhibent un comportement non-linéaire qui se traduit par une évolution de leurs coefficients diélectriques, élastiques, piézoélectriques, et une forte augmentation de leurs pertes électriques et/ou mécaniques.

Pour comprendre l'origine de ces non-linéarités, il faut se rappeler que l'existence d'un effet piézoélectrique dans la céramique est due à un processus tout à fait non-linéaire : la polarisation. En fait, c'est seulement en première approximation et à faible niveau que l'effet piézoélectrique peut être décrit par des relations linéaires (I-14, I-15) entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

A fort niveau, les non-linéarités qui affectent les caractéristiques de la céramique résultent essentiellement d'effets liés aux mouvements des murs de domaines [4]. Ce phénomène est compréhensible. Par exemple, les mailles d'un cristal de structure tétragonale (figure I-11) ont tendance à répondre à un champ électrique appliqué, en faisant pivoter leur axe polaire dans la direction la plus proche du champ. Ces rotations se produiront principalement dans les frontières de domaines qui sont des régions de transition, dans lesquelles le moment dipolaire des mailles cristallines bascule progressivement d'une position à une autre. C'est dans ces régions, que les moments pivoteront en nécessitant le moins d'énergie. Après rotation, une maille initialement élément d'un mur de domaines devient partie intégrante du domaine adjacent : on dit qu'il y a eu déplacement du mur de domaine (figure I-11). Ce mouvement s'accompagne d'une importante libération de charges et de fortes pertes internes.

De façon générale, pour un matériau ferroélectrique de structure pérovskite, l'axe polaire est orienté parallèlement à une arête de la maille cristalline pour la phase tétragonale, parallèlement à une diagonale intérieure pour la phase rhomboédrique, et parallèlement à une diagonale d'une face de la maille pour la phase orthorhombique (figure I-10). Dans tous les cas, des réorientations de domaines à 180° peuvent avoir lieu. Ces réorientations n'entraînent pas de déformation mécanique. BERLINCOURT et KRUEGER [4] supposent que c'est ce type de réorientations qui apparaît principalement avec de forts niveaux d'excitation électrique. L'autre type de réorientations, c'est-à-dire une rotation de l'axe dipolaire de 90° dans une structure tétragonale, de 109° ou 71° dans une structure rhomboédrique, de 160° ou 120° ou 90° dans une structure orthorhombique, implique des changements de dimensions, et donc

une déformation. Ce type de réorientations peut survenir sous forte sollicitation mécanique, ou électrique.

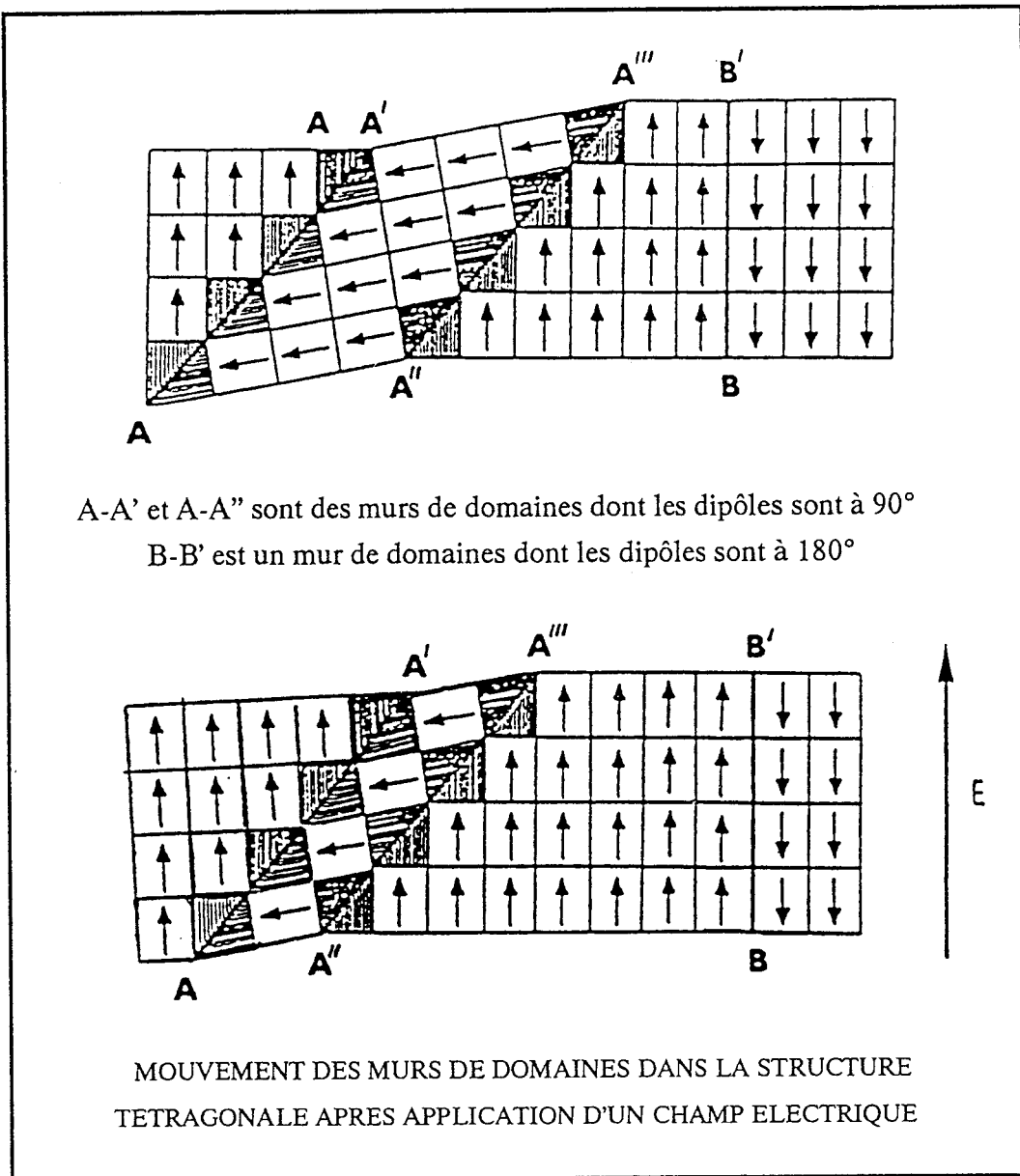


Figure I-11

La solution qui a été trouvée avec les PZT "durs", pour réduire les pertes et stabiliser les coefficients, est de diminuer l'amplitude des mouvements de parois de domaines. Physiquement, cela revient à créer des lacunes d'oxygène par substitutions d'ions de valence appropriée dans certains sites de la maille pérovskite. Ces lacunes constituent de gros défauts dans le réseau et participent ainsi au blocage du mouvement des frontières de domaines [5].

CHAPITRE II

GENERATEUR PIEZOELECTRIQUE EN MODE HYDROSTATIQUE

1 - DEFINITION DES PARAMETRES HYDROSTATIQUES

Lorsqu'un matériau piézoélectrique (figure II-1) est soumis à une pression hydrostatatique p , le tenseur des contraintes s'écrit: $T=(p,p,p,0,0,0)$.

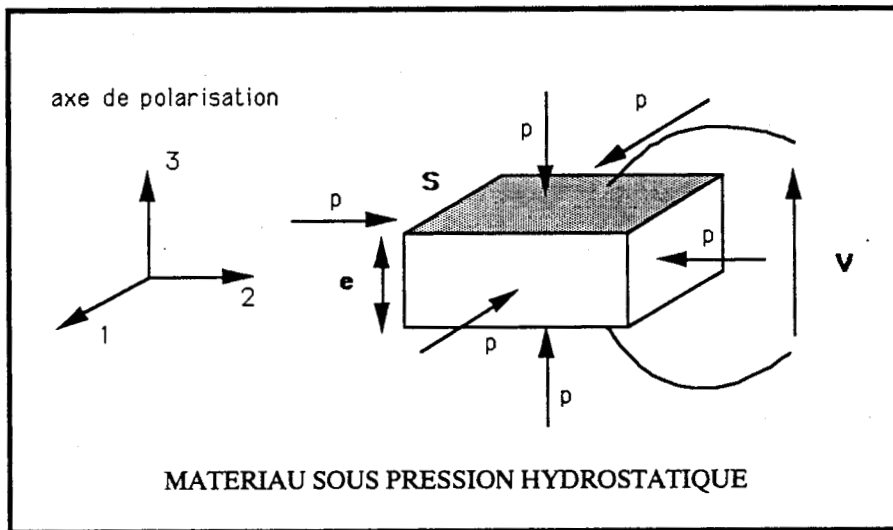


Figure II-1

La charge créée par effet piézoélectrique est:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \epsilon_{11}^T . E_1 \\
 D_2 &= \epsilon_{22}^T . E_2 \\
 D_3 &= \epsilon_{33}^T . E_3 + (d_{31}+d_{32}+d_{33}) . p \quad (II-1)
 \end{aligned}$$

On pose:

$$\boxed{d_h = d_{31}+d_{32}+d_{33}} \quad (II-2)$$

d_h est appelé "coefficient de charge hydrostatatique".

L'expression de la charge générée suivant l'axe de polarisation devient ainsi:

$$D_3 = \epsilon_{33}^T . E_3 + d_h . p \quad (II-3)$$

De façon analogue, on pose [6]:

$$g_h = \frac{d_h}{T} = g_{31} + g_{32} + g_{33} \quad (\text{II-4})$$

g_h est appelé "coefficient de tension hydrostatique".

La "sensibilité hydrostatique" est définie à partir de la tension aux bornes du matériau en circuit ouvert. Pour une pression hydrostatique appliquée p , une tension V apparaît aux bornes du matériau d'épaisseur e , de surface d'électrode S (figure II-1).

Le champ électrique induit est:

$$E = \frac{V}{e} = g_h \cdot p$$

$$\text{soit } \frac{V}{p} = g_h \cdot e = S_h \quad (\text{II-5})$$

On pose:

$$S_h = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{V}{p} \right) \quad (\text{II-6})$$

$$\text{référence : } S_h = 0 \text{ dB pour } \frac{V}{p} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$$

2 - HYDROPHONE

2 - 1 - Schéma électrique équivalent [7]

Considérons une lame piézoélectrique de surface d'électrode S , d'épaisseur e , placée dans un fluide où règne la pression hydrostatique $P = p \cdot \sin \omega t$.

L'équation d'état de la lame en fonction de ses paramètres hydrostatiques est:

$$D = \varepsilon^T \cdot \mathcal{E} + d_h \cdot \mathcal{P} \quad (\text{II-7})$$

Soit Q la charge portée par ses électrodes:

$$Q = S \cdot D$$

$$Q = S \cdot \varepsilon^T \cdot \mathcal{E} + S \cdot d_h \cdot \mathcal{P}$$

Le courant produit par la lame est:

$$I = \frac{\delta Q}{\delta t} = S \cdot \varepsilon^T \frac{\delta \mathcal{E}}{\delta t} + S \cdot d_h \frac{\delta \mathcal{P}}{\delta t} \quad (\text{II-8})$$

Supposons que le générateur décrit ci-dessus débite dans une résistance R (figure II-2).

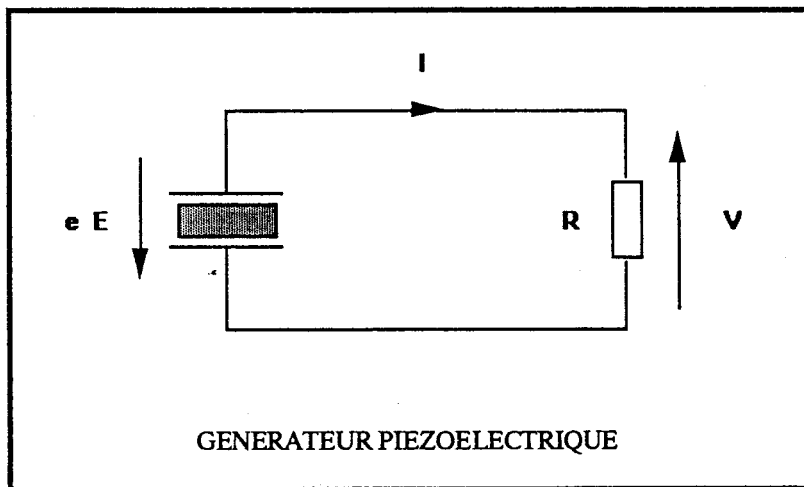


Figure II-2

On peut écrire:

$$I = \frac{\mathcal{V}}{R} = - \frac{e\mathcal{E}}{R}$$

$$I = - \frac{e\mathcal{E}}{R} = S \cdot \varepsilon^T \frac{\delta \mathcal{E}}{\delta t} + S \cdot d_h \frac{\delta \mathcal{P}}{\delta t} \quad (\text{II-9})$$

soit

$$\mathcal{E} + \frac{R.S.\varepsilon^T}{e} \frac{\delta \mathcal{E}}{\delta t} = - \frac{R.S.d_h}{e} \frac{\delta \mathcal{P}}{\delta t} \quad (\text{II-10})$$

soit en notation complexe

$$\mathcal{E} \left[1 + j\omega \frac{R.S.\varepsilon^T}{e} \right] = -j\omega \frac{R.S.d_h}{e} \mathcal{P} \quad (\text{II-11})$$

$$\text{d'où: } \mathcal{E} = \frac{\frac{R.S.d_h.\omega}{e} \left[- \frac{R.S.\varepsilon^T.\omega}{e} - j \right] \mathcal{P}}{\left[1 + \left(\frac{R.S.\varepsilon^T.\omega}{e} \right)^2 \right]} \quad (\text{II-12})$$

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}} \text{ a pour argument } \phi \text{ tel que } \text{tg}\phi = \frac{e}{R.S.\varepsilon^T.\omega} \quad (\text{II-13})$$

$$\text{soit } \text{tg}\phi = \frac{1}{R.C.\omega} \text{ avec } C = \varepsilon^T \frac{S}{e} = \text{capacité de la lame.}$$

Le module du champ s'écrit:

$$E = \frac{\frac{R.S.d_h.\omega}{e} \mathcal{P}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R.S.\varepsilon^T.\omega}{e} \right)^2}} \quad (\text{II-14})$$

La tension générée par la lame est donc de la forme $\mathcal{V} = V.\sin(\omega t + \varphi)$ avec

$$\varphi = \phi + \pi \text{ tel que } \text{tg}\varphi = - \frac{1}{RC\omega} \quad (\text{II-15})$$

$$V = e.E = \frac{R.S.d_h.\omega.\mathcal{P}}{\sqrt{1 + (R.C.\omega)^2}} = \frac{R.C.\omega}{\sqrt{1 + (R.C.\omega)^2}} \frac{d_h.S.\mathcal{P}}{C} \quad (\text{II-16})$$

En posant $f = \frac{d_h \cdot S \cdot p}{C} = \left[\frac{d_h}{\epsilon^T} \right] e \cdot p = (g_h \cdot e) \cdot p = S_h \cdot p$ (II-17)

on aboutit au schéma équivalent suivant:

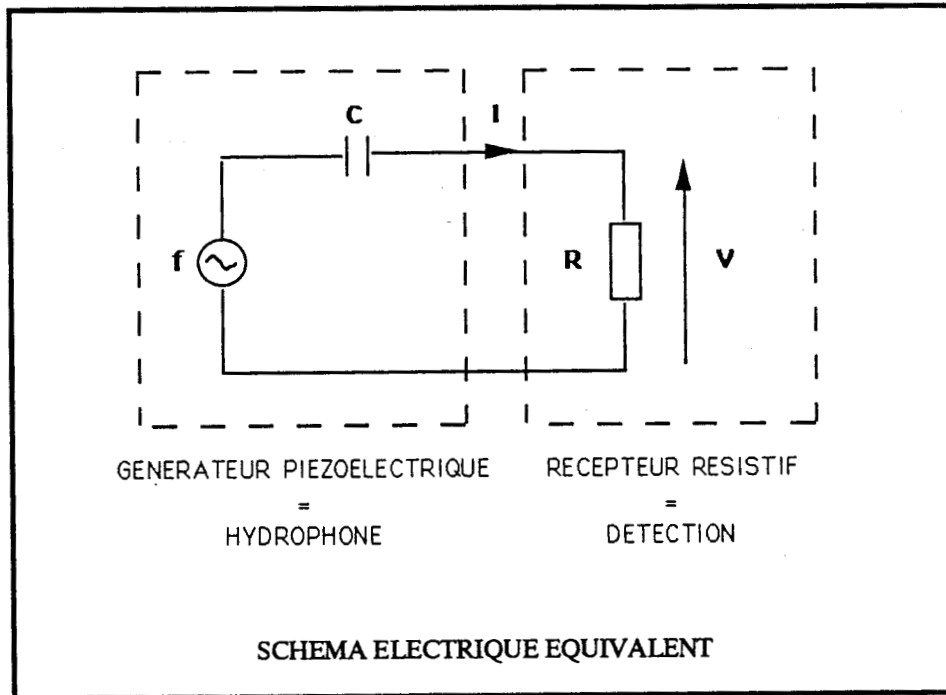


Figure II-3

En régime hydrostatique, le générateur piézoélectrique ou "hydrophone" est donc entièrement caractérisé par deux paramètres:

- la sensibilité hydrostatique ($f = S_h \cdot p$),
- la capacité ($C = \epsilon^T \frac{S}{e}$).

2 - 2 - Facteur de mérite hydrostatique [7]

La tension efficace aux bornes de la résistance R (figure II-3) est:

$$V_{\text{eff}} = \frac{V}{\sqrt{2}} = \frac{R \cdot C \cdot \omega}{\sqrt{1 + (R \cdot C \cdot \omega)^2}} \frac{f}{\sqrt{2}} \quad (\text{II-18})$$

Le générateur fournit donc une puissance $P = \frac{V_{\text{eff}}^2}{R} = \frac{R.C^2.\omega^2}{1 + (R.C.\omega)^2} \frac{f}{2}$ (II-19)

Cette puissance est optimale à l'adaptation d'impédance ($R.C.\omega = 1$) et vaut:

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{4} \omega.C.f^2 \quad (\text{II-20})$$

soit d'après (II-17)

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{4} \omega.p^2.S.e.(d_h.g_h) \quad (\text{II-21})$$

Pour une fréquence donnée et dans des conditions électriques équivalentes (adaptation d'impédance), la puissance fournie par l'hydrophone augmente avec:

- p^2 = carré du module de la pression acoustique,
- S = surface d'électrode,
- e = épaisseur de l'élément,
- $d_h.g_h$ = facteur de mérite hydrostatique.

Le produit ($d_h.g_h$) est le seul paramètre propre au matériau piézoélectrique utilisé. Il traduit l'aptitude du matériau à rendre l'hydrophone plus performant. Il va nous permettre de caractériser et de comparer différents matériaux en régime hydrostatique.

Remarque:

Le facteur de mérite couramment utilisé par l'acousticien est le produit ($S_h^2.C$) proportionnel au rapport (signal / bruit) de l'hydrophone [8]. D'après (II-17):

$$S_h^2.C = S.e.(d_h.g_h) \quad (\text{II-22})$$

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE CARACTERISATION EN PRESSION

1 - DETERMINATION DU FACTEUR DE MERITE HYDROSTATIQUE

1 - 1 - Principe

L'élément piézoélectrique est placé dans une cellule de volume v , remplie d'un fluide de couplage de compressibilité χ , où règne une pression statique P à température ambiante. Sa constante de charge hydrostatique d_h et sa capacité C sont mesurées aux basses fréquences, sous faible pression acoustique et faible champ électrique. On en déduit:

$$\epsilon_{33}^T = C \frac{e}{S} \quad \text{puis} \quad g_h = \frac{d_h}{\epsilon_{33}^T}$$

ce qui permet d'accéder au facteur de mérite hydrostatique de l'élément à la pression P :

$$m_0 = d_h \cdot g_h = \frac{d_h^2}{\epsilon_{33}^T} \quad (\text{III-1})$$

1 - 2 - Mesure de constante de charge hydrostatique

Les vibrations d'un piston engendrent dans la cellule de mesure, des variations de pression d'amplitude:

$$p = \chi \frac{\Delta v}{v}$$

Comme les dimensions de la cellule sont négligeables devant les longueurs d'ondes du signal acoustique, la pression instantannée ($P+p$) est la même en tout point. L'hydrostaticité du milieu est conservée. Dans ces conditions, la constante de charge a pour expression [9]:

$$d_h = \frac{Q_E}{p \cdot S} \quad (\text{III-2})$$

Q_E est la charge électrique libérée par l'élément d'épaisseur e , de surface d'électrode S . La pression acoustique p et la charge Q_E sont mesurées simultanément.

1 - 3 - Mesure de capacité

L'élément sous pression est soumis à un champ électrique alternatif $\mathcal{E} = E \cdot \sin \omega t$. On mesure son admittance $Y = G + jB$. On en déduit sa capacité:

$$C = \frac{B}{\omega} \quad (\text{III-3})$$

et sauf indication contraire, sa tangente d'angle de pertes diélectriques:

$$\text{tg} \delta = \frac{G}{B} \quad (\text{III-4})$$

2 - DISPOSITIF DE MESURE**2 - 1 - Enceinte de mesure sous pression (A1)**

L'enceinte (figure III-1) est constituée par trois cellules distinctes [10]. Les cellules inférieure et supérieure de volume v sont alimentées en fluide par une arrivée commune. Chacune communique avec la cellule latérale abritant le piston solidaire du pot vibrant extérieur. L'ensemble est constamment en équipression. Ainsi, quelle que soit la pression statique interne, le piston conserve toute liberté de déplacement suivant son axe.

Seule la cellule supérieure est équipée pour les mesures de constante de charge et de capacité (couvercle d'accès, sorties électriques étanches, capteur de pression...).

La présence de bulles d'air dans le fluide de couplage rend difficile la stabilisation de la pression statique et peut engendrer des variations sur le niveau de pression acoustique donc, sur la mesure de d_h elle-même. Après chaque mise en place d'un nouvel élément, on procède au dégazage du fluide, en faisant le vide dans l'enceinte à l'aide d'une pompe à palettes. Puis on rétablit la pression atmosphérique tout en remplissant parfaitement l'enceinte.

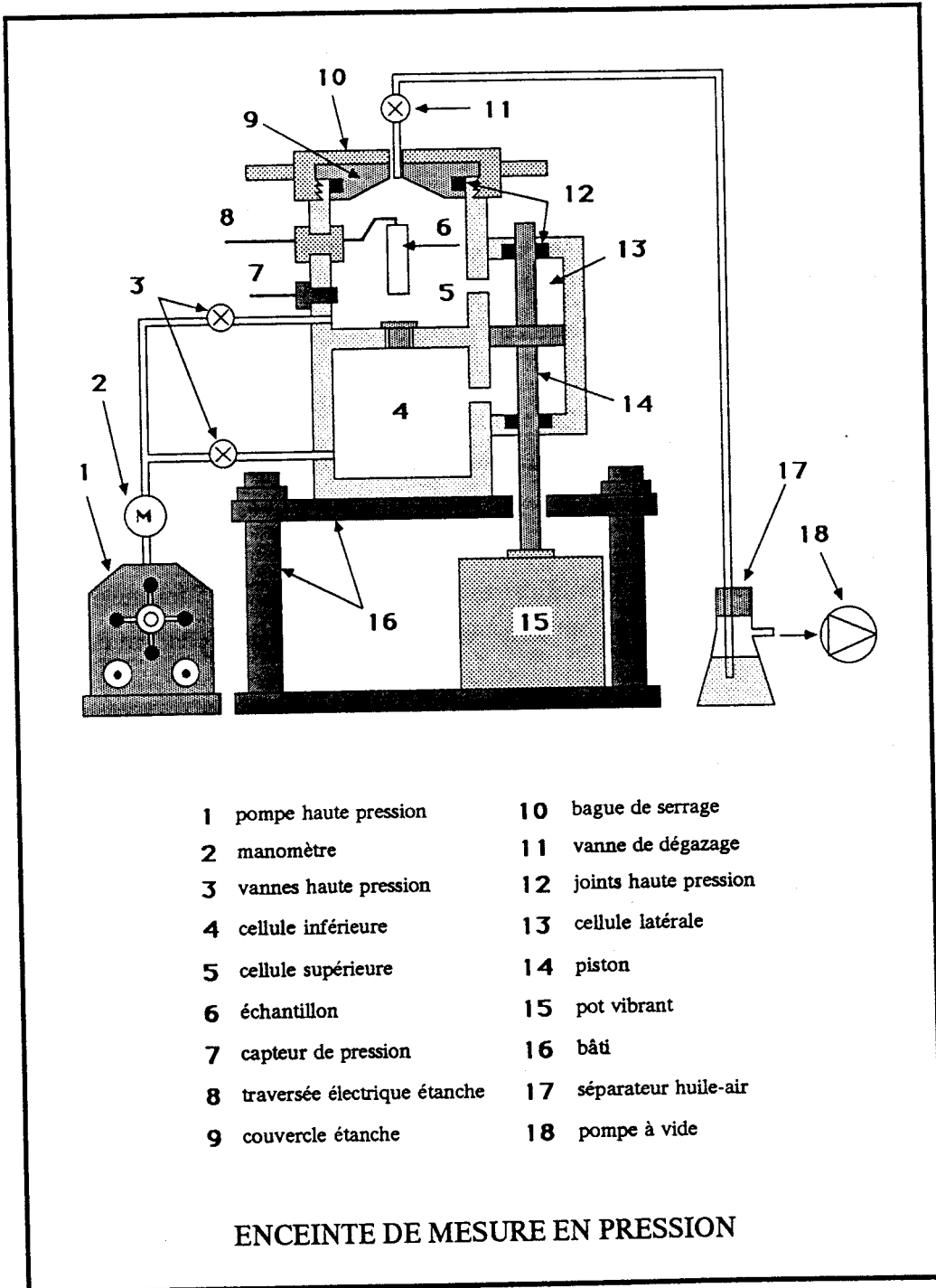


Figure III-1

2 - 2 - Chaîne de mesure

2 - 2 - 1 - Mesure de dh

L'analyseur de spectre bicanal HP 3562A (figure III-2) génère un signal aléatoire de faible niveau, caractérisé par sa densité spectrale de puissance [11], dans la bande de fréquence sélectionnée (20-1620 Hz). Ce signal, après amplification et adaptation d'impédance dans l'amplificateur B&K 2706, est envoyé aux bornes du pot vibrant électromagnétique B&K 4808. La tension d'excitation est d'environ 465 mV_{eff}.

Dans l'enceinte (figure III-1), l'élément piézoélectrique et le capteur de pression dynamique PCB Piézotronics 112A subissent des pressions acoustiques efficaces dont l'amplitude n'excède pas 150 Pa.

On récupère en sortie des amplificateurs de charge B&K 2635 les tensions V_E et V_C proportionnelles aux charges Q_E et Q_C délivrées respectivement par l'élément et le capteur de pression.

$$Q_E = d_h \cdot p \cdot S$$

p = amplitude de la pression acoustique

S = surface d'électrode de l'élément

$$Q_C = \sigma \cdot p$$

σ = sensibilité du capteur de pression = 1.27.10⁻¹² C.psi⁻¹

$$V_E = \frac{k_E}{C_E} Q_E$$

$$V_C = \frac{k_C}{C_C} Q_C$$

C_E, C_C = capacités d'intégration de l'étage d'entrée des amplificateurs de charge

k_E, k_C = gains de l'étage amplification des amplificateurs de charge

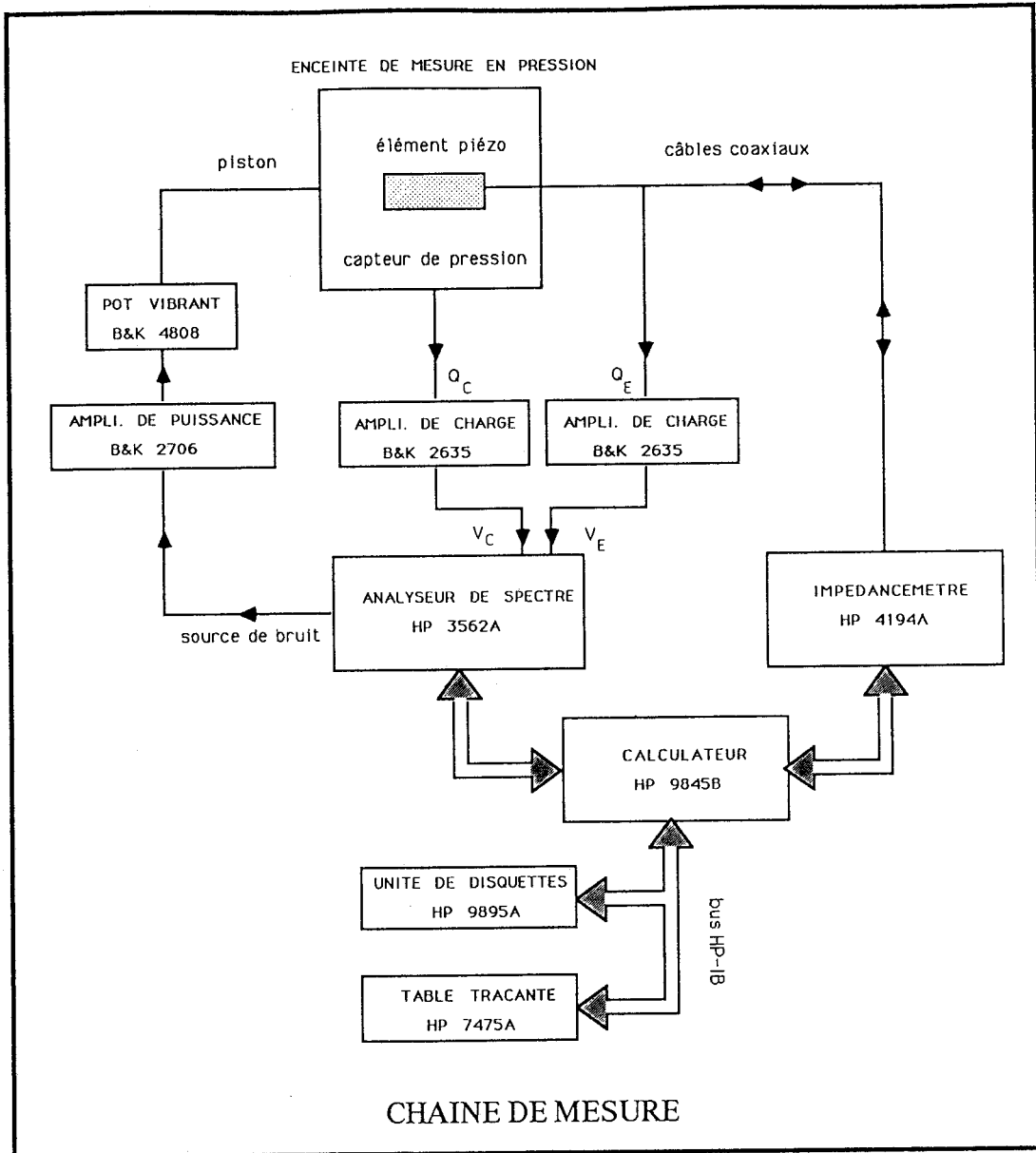


Figure III-2

Ces tensions sont numérisées par l'analyseur qui calcule:

$$d_h = \frac{Q_E}{p \cdot S} = \eta_1 \frac{V_E}{V_C} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{avec: } \eta_1 = \frac{\sigma}{S} \frac{\left[\frac{C_E}{k_E} \right]}{\left[\frac{C_C}{k_C} \right]} \quad (\text{III-6})$$

L'incertitude de mesure est de 5% dans la bande (20-1620 Hz).

2 - 2 - 2 - Mesure de C

L'impédancemètre HP 4194A (figure III-2) génère une tension sinusoïdale de 500 mV_{eff} dans la bande (100-1620 Hz), notée V_A aux bornes du pont interne (figure III-3). Le potentiel au point G ou "terre virtuelle" est annulé par adaptation de la tension V_B en sortie de l'amplificateur. Le pont est équilibré.

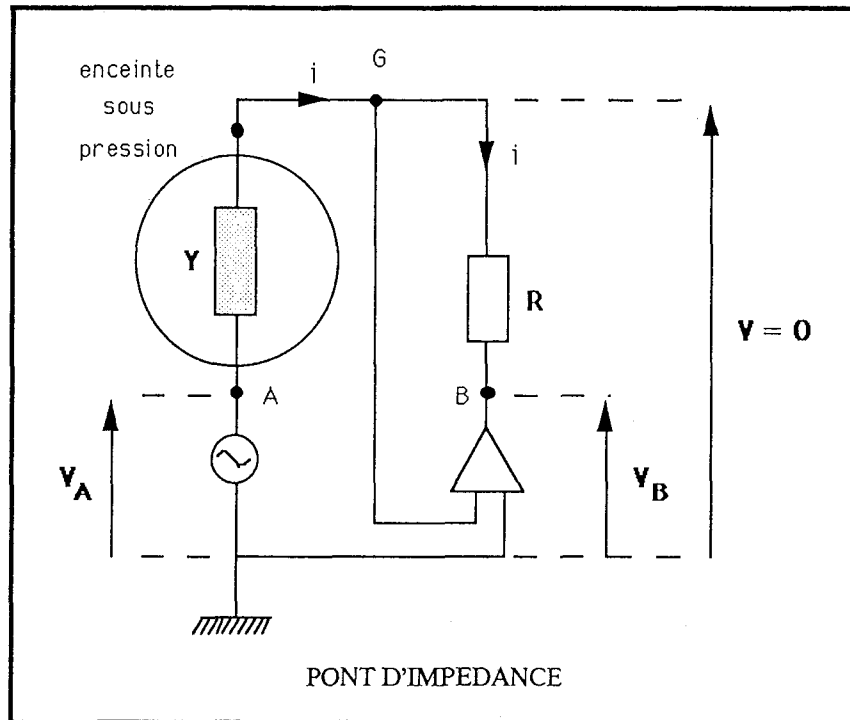


Figure III-3

L'élément d'épaisseur e, connecté au pont d'impédance, est soumis au champ électrique $\mathcal{E} = \frac{V_A}{e} \sin\omega t$. Son admittance a pour expression:

$$Y = -\frac{1}{R} \frac{V_B}{V_A} = G + jB \quad (\text{III-7})$$

sa capacité est: $C = \frac{B}{\omega}$

L'impédancemètre mesure la capacité des câbles électriques qui le relie à l'élément piézoélectrique, puis celle de l'élément connecté et déduit par différence celle de l'élément seul sans ses connexions. L'incertitude sur la mesure est de 2%.

2 - 2 - 3 - Automatisation de la chaîne

Le calculateur HP 9845B gère le fonctionnement de la chaîne (figure III-2). Il pilote les appareils de mesure, stocke les données expérimentales sur disquette, et les traite:

- calculs de ϵ_{33}^T , g_h , $d_h \cdot g_h$,
- éditions de tableaux, graphiques...

3 - CARACTERISTIQUES

Le dispositif expérimental (§-2) permet de déterminer le facteur de mérite d'un élément piézoélectrique, à température ambiante, en fonction de la pression hydrostatique (0-16 MPa) avec une précision de l'ordre de 12% dans la bande (100-1620 Hz). Une mesure en pression compte 381 points de résolution en fréquence (un point tous les 4 Hz), et requiert moins de 90 secondes.

Les échantillons sont des disques ou des plaques, polarisés suivant leur épaisseur e , munis d'électrodes uniformes imposant le même potentiel sur la surface S (figure III-4). Leurs dimensions doivent rester inférieures à celles du volume utile: $\phi=50$ mm, $h=45$ mm.

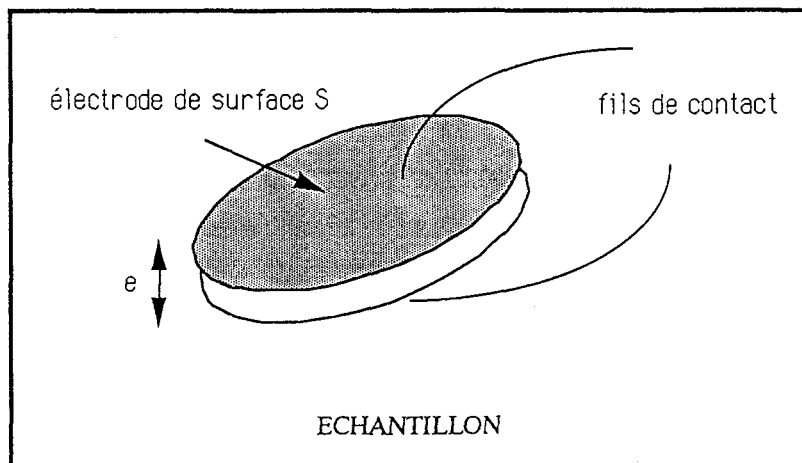


Figure III-4

Les mesures étant effectuées dans une huile isolante, les échantillons peuvent en principe être testés directement, sans précaution particulière. Toutefois, certains matériaux supportent mal des séjours prolongés ou répétitifs dans le fluide de couplage. Il est alors nécessaire de prévoir un enrobage de protection.

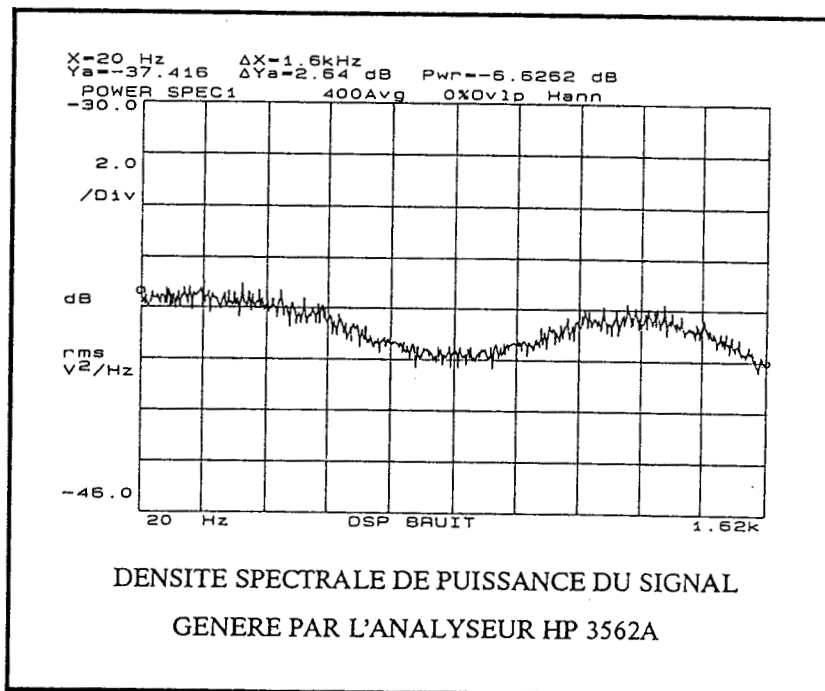


Figure III-5

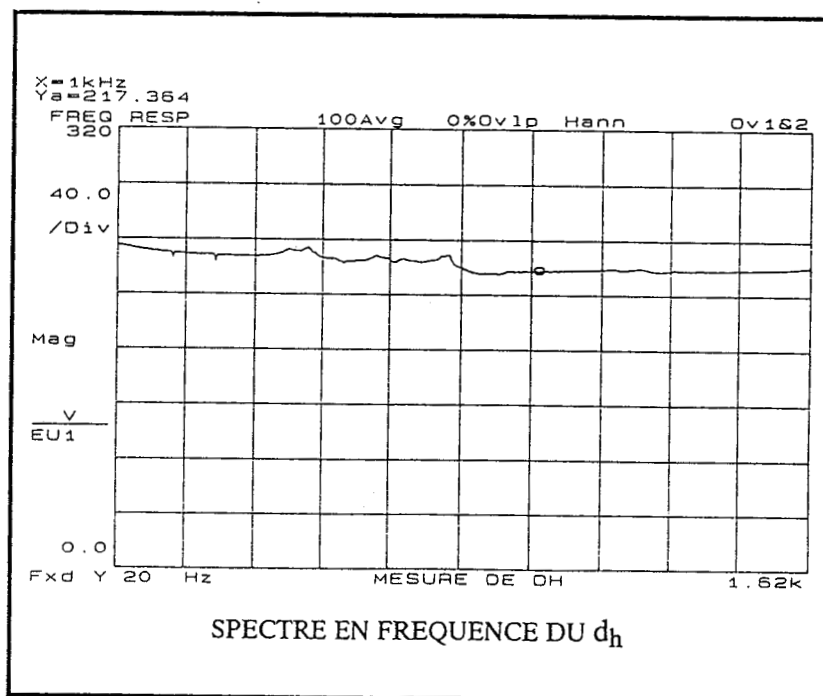


Figure III-6

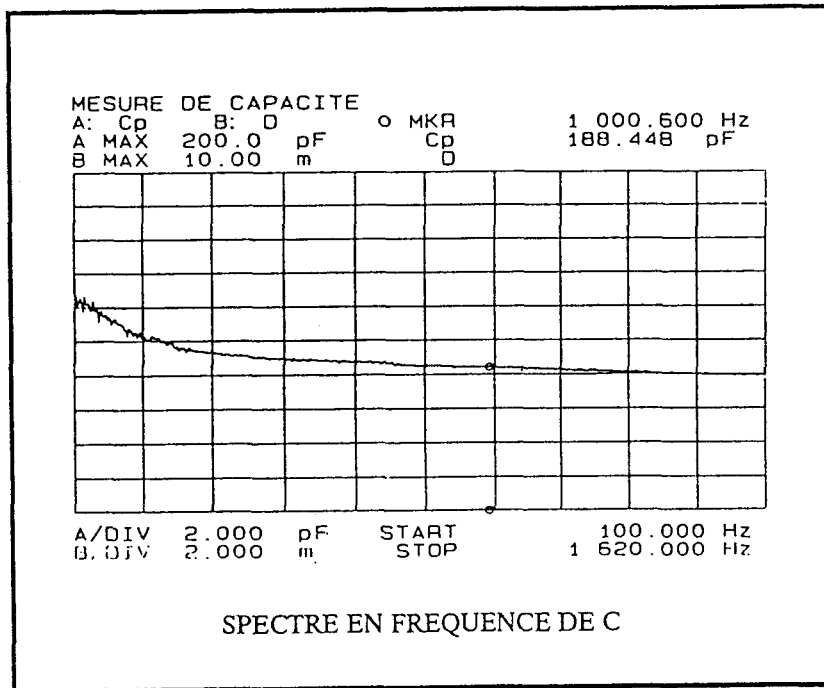


Figure III-7

CHAPITRE IV

NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES

1 - INTERET

Depuis plus de 40 ans, les céramiques ferroélectriques constituent la partie active de la plupart des transducteurs piézoélectriques. Les premières céramiques en titanate de baryum ($BaTiO_3$ ou BT) ont été progressivement remplacées par les solutions solides de titanozirconate de plomb (PZT). Ces dernières, de composition $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ avec x voisin de 0.5, possèdent un facteur de couplage électromécanique plus élevé, et des caractéristiques variables [5-12] avec la concentration (Zr, Ti).

Leur d_{33} est fort, mais leur d_h est presque nul car : $d_{33} \approx -(d_{31} + d_{32}) = -2 d_{31}$. Si on veut obtenir un hydrophone aux performances acceptables, il est indispensable de modifier artificiellement les caractéristiques électromécaniques de la céramique suivant ses 3 axes. On y parvient grâce au type de montage schématisé (figure IV-1).

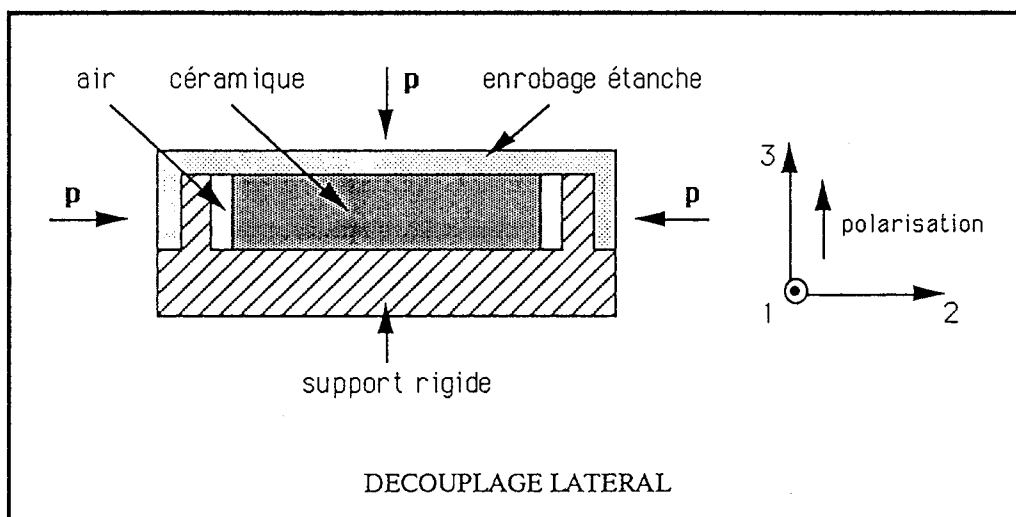


Figure IV-1

La céramique PZT fonctionne ainsi en mode uniaxial 3-3, et son facteur de mérite vaut:

$$d_{33} \cdot g_{33} = 8.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1} \gg d_h \cdot g_h = 0.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1} \text{ [13]}$$

Depuis une vingtaine d'années, de nouveaux matériaux au $d_h \cdot g_h$ élevé, ont été développés. Ils permettent la réalisation d'hydrophones très sensibles, de conception simplifiée, puisqu'aucun artifice de découplage n'est nécessaire. Outre leurs bonnes propriétés piézoélectriques en mode hydrostatique, certains ont une densité très inférieure à celle des PZT, et parfois une compliance et une flexibilité beaucoup plus grandes.

2- PRESENTATION

Ces matériaux peuvent être classés en trois catégories:

- les polymères et copolymères piézoélectriques,
- les céramiques très fortement anisotropes,
- les céramiques composites.

2 - 1 - Les polymères et copolymères piézoélectriques

2 - 1 - 1 - Le PVDF

Commercialisé en 1960, le polyfluorure de vinylidène (PVDF ou PVF₂) a connu un essor considérable depuis la mise en évidence de sa piézoélectricité par H.KAWAI [14] en 1969. Le PVDF est un polymère thermoplastique, semi-cristallin [15], de formule chimique $-(\text{CH}_2\text{-CF}_2)_n-$. Il existe sous quatre formes cristallines, communément appelées α , β , γ , δ , selon la chronologie de leur identification [15]. L'état cristallin dépend de la méthode de synthèse suivie et des traitements thermiques et mécaniques effectués. La forme α , obtenue spontanément par refroidissement à partir de l'état fondu, n'est pas piézoélectrique. Seule la forme β présente l'anisotropie nécessaire à la piézoélectricité. On l'obtient par transformation de la phase α , au cours d'une opération d'étirement et de polarisation à chaud [16].

2 - 1 - 2 - Le P[VDF-TrFE]

La découverte des propriétés du PVDF a suscité la synthèse de nouveaux matériaux macromoléculaires tels que le copolymère de polyfluorure de vinylidène et de polytrifluoroéthylène (P[VDF-TrFE] ou P[VF₂-C₂F₃H]). Plus facile à fabriquer que le PVDF, puisqu'il n'est pas nécessaire de l'étirer pour lui conférer un caractère piézoélectrique, ce type de matériau s'avère très prometteur [17-18].

2 - 1 - 3 - Caractéristiques communes

Dotés d'une excellente résistance aux chocs, d'une grande souplesse mécanique [19], et d'une faible densité ($\rho \sim 2.10^3 \text{kg.m}^{-3}$), les piézoplastiques permettent de réaliser divers types de transducteurs [20], en particulier des hydrophones surfaciques de grandes dimensions [21]. Leur prix de revient est relativement bas. Cependant, la polarisation de films d'épaisseurs supérieures à 1.5 mm pour le PVDF et 3 mm pour le P(VDF-TrFE) est difficile voire impossible. Leurs caractéristiques piézoélectriques, diélectriques et mécaniques dépendent sensiblement de la température [18-21-22-23]. Enfin, l'accroissement des pertes diélectriques avec la fréquence [23] en limite l'utilisation au domaine basse fréquence.

2 - 2 - Les céramiques très fortement anisotropes

2 - 2 - 1 - PbTiO₃

La céramique ferroélectrique à base de titanate de plomb (PbTiO₃ ou PT) présente une forte anisotropie électromécanique [24], qui peut être considérablement accrue par dopages au calcium (Ca) [25-26] ou au samarium (Sm) [27].

L'effet piézoélectrique, important suivant l'axe de polarisation, s'avère faible dans les directions perpendiculaires à celui-ci. W. WERSING *et al.* [28] montrent que cette anisotropie dépend de l'orientation statistique des domaines ferroélectriques dans la céramique, du rapport $\frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_{33}^T}$ de leurs permittivités diélectriques, et de leurs coefficients électrostrictifs Q_{11} , Q_{12} , Q_{44} . Ce résultat permet d'expliquer la corrélation observée entre les caractéristiques hydrostatiques de la céramique, sa composition, son degré de polarisation, et la température.

2 - 2 - 2 - PbNb₂O₆

Le métaniobate de plomb (PbNb₂O₆ ou PN) est l'un des rares cristaux de structure tungstène-bronze ou tunnel [5], à posséder des propriétés piézoélectriques intéressantes sous forme polycristalline. La céramique PN possède une porosité d'environ 7% ($\rho \sim 6.10^3 \text{kg.m}^{-3}$), une température de Curie très élevée ($T_C \sim 560^\circ\text{C}$), et une anisotropie piézoélectrique comparable à celle du titanate de plomb.

2 - 2 - 3 - Caractéristiques communes

Les céramiques PT, PN, ont un d_h sensiblement plus fort que celui des PZT, et une constante diélectrique ϵ_r beaucoup plus petite. Leurs pertes électriques et mécaniques sont faibles. Mais leur densité ($\rho \sim 7.10^3 \text{kg.m}^{-3}$) reste importante. De plus, ce sont des céramiques fragiles dont la préparation est délicate (elles risquent de se fracturer lors du considérable changement de volume qu'elles subissent à la température de Curie [5]).

2 - 3 - Les céramiques composites

L'association d'une céramique et d'un polymère permet, dans certaines configurations, de privilégier le couplage électromécanique 3-3 de la céramique au détriment des couplages 3-1, 3-2, et d'abaisser la permittivité ϵ_{33} du mélange. On obtient ainsi une "céramique composite" au facteur de mérite hydrostatique très élevé. On désigne un composite diphasé par deux entiers "i-j", qui caractérisent la structure tridimensionnelle de chacune des phases associées (figure IV-2).

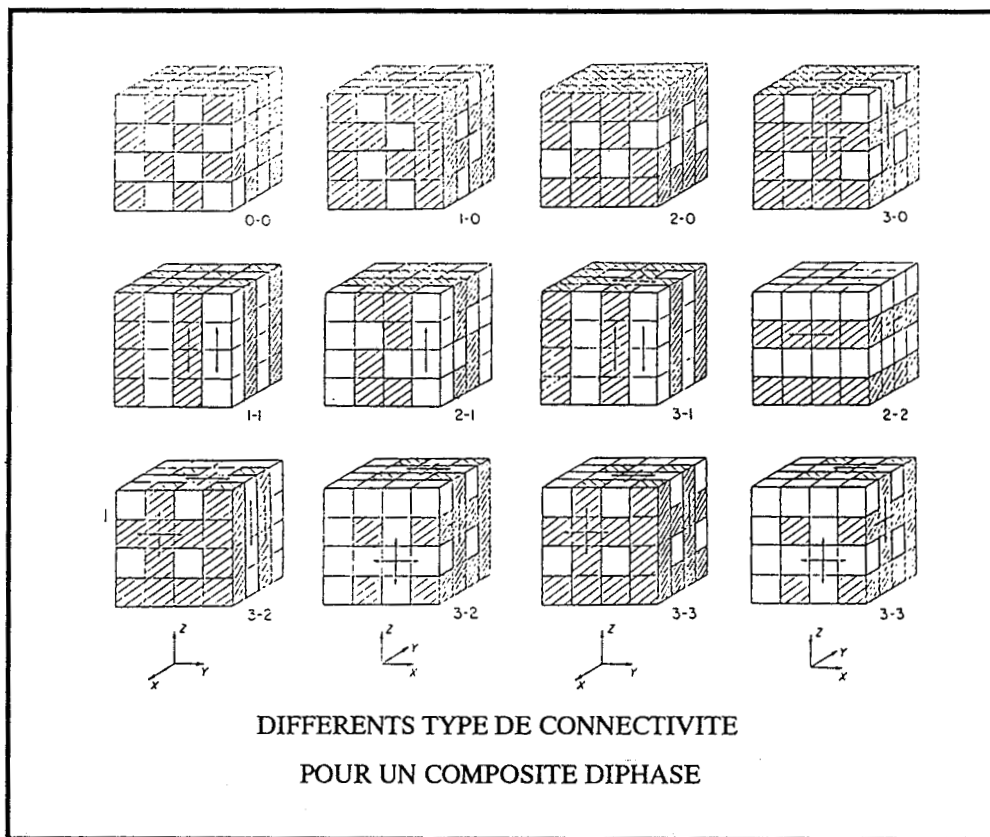


Figure IV-2

Le premier entier "i" précise le nombre de directions (0, 1, 2, 3) suivant lesquelles la céramique assure une liaison ou "connectivité" [29]. Le second, "j", représente la connectivité du polymère. Si la phase polymère des composites 3-3 ou 3-0 est remplacée par de l'air, on obtient des céramiques à pores ouverts ou fermés. Cette nomenclature s'étend aux composites multiphasés "i-j-k-..." où "i" indique toujours, la connectivité de la phase céramique.

Aujourd'hui, il existe des composites à 2, 3, 4 constituants indépendants. Nous allons passer en revue les plus connus.

2 - 3 - 1 - Le composite de connectivité 3-3

L'observation d'un composite 3-3 en microscopie électronique révèle une structure de type corail [30], formée de pores isotropes, communicants, répartis de façon homogène dans une matrice PZT (figure IV-3).



Figure IV-3

Le diamètre moyen des pores, compris entre 1 et 500 μm , dépend du processus de fabrication de la matrice [13-31-32]. Les pionniers, D. P. SKINNER *et al.* [31], utilisent une technique de moulage à la cire-perdue à partir d'un squelette corallien ("coral replamine process"). Pour permettre une fabrication plus industrielle, T. R. SHROUT *et al.* [32] proposent une méthode dans laquelle la porosité est créée par des billes de polymère, mêlées aux oxydes de base de la céramique, puis éliminées par calcination ("burned out plastic spheres process" ou "burps process"). Enfin, un autre procédé consiste à mettre en forme la céramique avec de gros grains ou "granulats" [33], pour réduire la densification pendant l'opération de frittage. Quelle que soit la technique utilisée, la matrice obtenue possède une porosité ouverte. Il est nécessaire de l'imprégner ou de l'enrober de polymère pour assurer son étanchéité. Dans certains cas, la céramique imprégnée est soumise à des contraintes de cisaillement-compression, de façon à casser les ponts entre les grains et rendre l'ensemble flexible [31].

Les propriétés physiques du composite 3-3 dépendent de la fraction volumique de céramique, des conditions de polarisation, et du type d'étanchéité réalisé [13].

A très basse fréquence (30 Hz), la céramique lacunaire brute, plongée dans un fluide isolant, possède un $d_h.g_h$ médiocre [13]. En empêchant le fluide de pénétrer dans la céramique, on améliore considérablement son facteur de mérite. Les caractéristiques hydrostatiques obtenues par imprégnation sont d'autant plus fortes que le polymère utilisé est souple [13-34]. Mais cette technique entraîne une augmentation systématique des pertes diélectriques [13]. En revanche, l'enrobage, sans influence sur la $tg\delta$, permet d'atteindre de meilleurs $d_h.g_h$ que l'imprégnation, et ce quelle que soit la nature du revêtement (époxy, polyuréthane) [13-33]. A plus haute fréquence (1000 Hz), la céramique poreuse non étanche est presque aussi performante que la céramique enrobée [33]. Son comportement est analogue à celui d'un filtre passe haut dont la fréquence de coupure avoisine les 400 Hz [13].

Il est important de retenir que, pour des techniques de polarisation et d'étanchéité fixées, la fraction volumique de céramique est la caractéristique fondamentale du composite. C'est elle qui régit l'ensemble de ses propriétés piézoélectriques, diélectriques, et mécaniques.

Remarque:

Certaines matrices PZT font intervenir des pores asymétriques [35]. On constate alors que les caractéristiques piézoélectriques du composite dépendent aussi de l'angle que fait le champ de polarisation avec l'orientation préférentielle des pores [36].

2 - 3 - 2 - Les composites de connectivités 3-2, 3-1

Ces composites sont réalisés à partir d'une céramique PZT ou PT massive, sur les faces de laquelle, on taille des rainures équidistantes [7], ou dans laquelle, on perce des trous régulièrement disposés [30-37] débouchant sur les faces parallèles à la direction de polarisation (figures IV-4, IV-5).

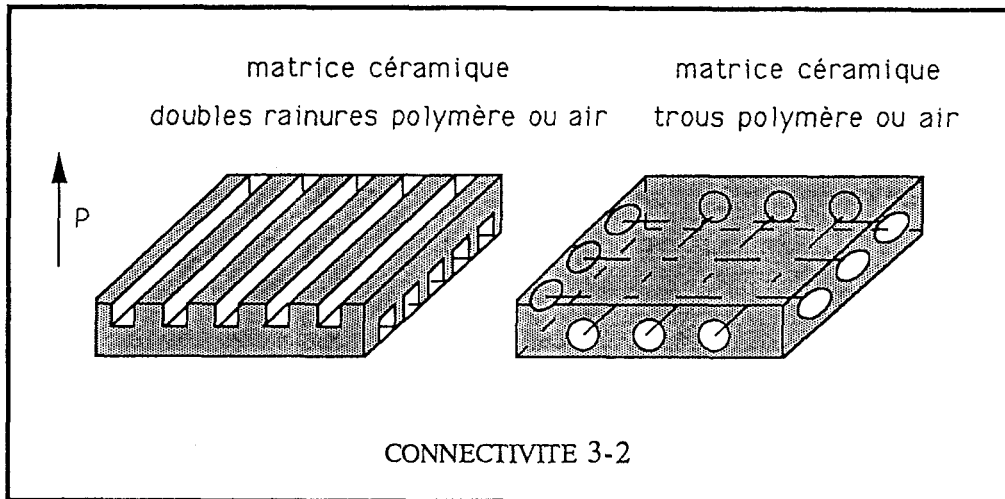


Figure IV-4

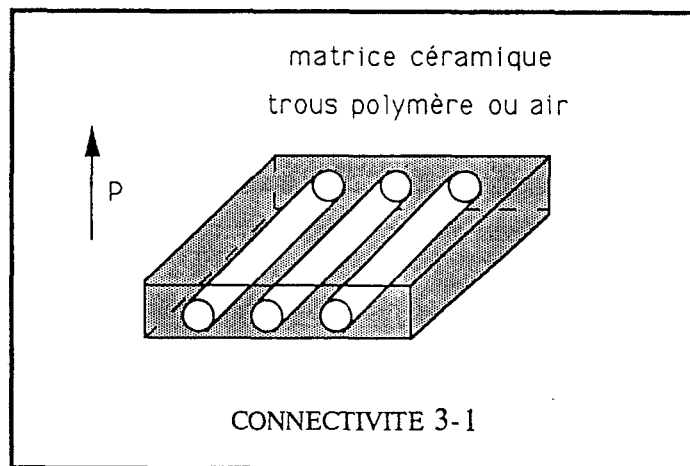


Figure IV-5

La matrice rainurée ou perforée présente des faces ouvertes. Il est donc indispensable de l'imprégner ou de l'enrober de polymère pour la rendre étanche.

Les propriétés piézoélectriques et diélectriques de l'ensemble dépendent du type d'étanchéité choisi et de la fraction volumique de céramique, ou plus précisément, de la taille des trous et rainures, de leur espacement, et des dimensions de la matrice [37].

Les meilleurs résultats sont obtenus par enrobage de la matrice polarisée avant perçage. Les coefficients hydrostatiques du composite 3-2 sont généralement très supérieurs à ceux du composite 3-1 [37].

2 - 3 - 3 - Le composite de connectivité 1-3

Ce type de composite, développé par KLINKER *et al.* [38], est formé de plots en céramique PZT ou PT, alignés suivant leur axe de polarisation, et noyés dans une matrice polymère (figure IV-6).

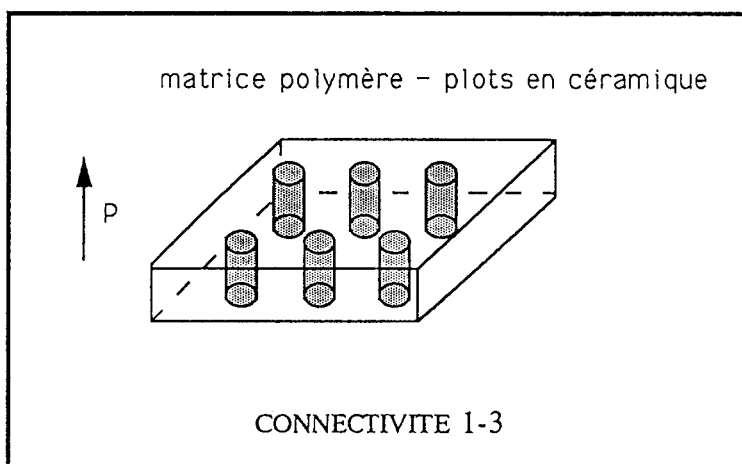


Figure IV-6

La moindre pression parallèle aux plots en céramique ou "briquets" engendre une déformation très dissymétrique des deux phases. Si la liaison mécanique aux interfaces céramique-polymère est parfaite, les briquets, plus rigides que la matrice, supportent un surplus de contraintes longitudinales. Ce phénomène d'amplification de contraintes constitue le principal intérêt du montage parallèle 1-3.

Les performances hydrostatiques du composite varient avec la fraction volumique de céramique, le diamètre des briquets, l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques du polymère [7-38].

D'un point de vue théorique, le composite 1-3 devrait posséder un facteur de mérite élevé, mais les résultats expérimentaux sont beaucoup plus faibles que prévus. Cet écart à la théorie provient vraisemblablement :

- du glissement longitudinal des briquets (décohésion fibre-matrice) [7],
- des défauts de parallélisme entre briquets [39],
- du coefficient de Poisson généralement élevé de la matrice qui induit des contraintes transverses indésirables, agissant sur la face latérale des plots piézoélectriques [7-30].

Trois améliorations intéressantes ont été récemment apportées à la structure de type 1-3.

La première [7] consiste à laisser un espace libre entre la face latérale des briquets et la matrice (figure IV-7). Leur assemblage est assurée par deux électrodes rigides collées à la fois sur le polymère et la céramique. Ce montage de type 1-3-1, pris en sandwich entre deux armatures métalliques, puis enrobé de résine polymère, n'est pas flexible.

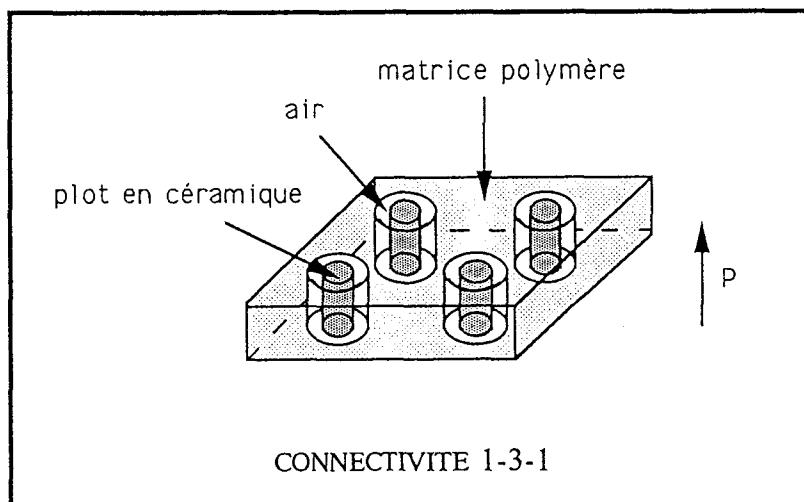


Figure IV-7

La seconde [30-40] consiste à introduire une porosité fermée dans la matrice pour augmenter sa souplesse et réduire son coefficient de Poisson. La structure résultante est de type 1-3-0. La porosité apparaît soit, sous la forme de petites bulles d'air dispersées de façon homogène dans le polymère (figure IV-8) soit, sous la forme d'une grande cavité centrale [40], isolant complètement une partie de la surface latérale des plots (figure IV-9).

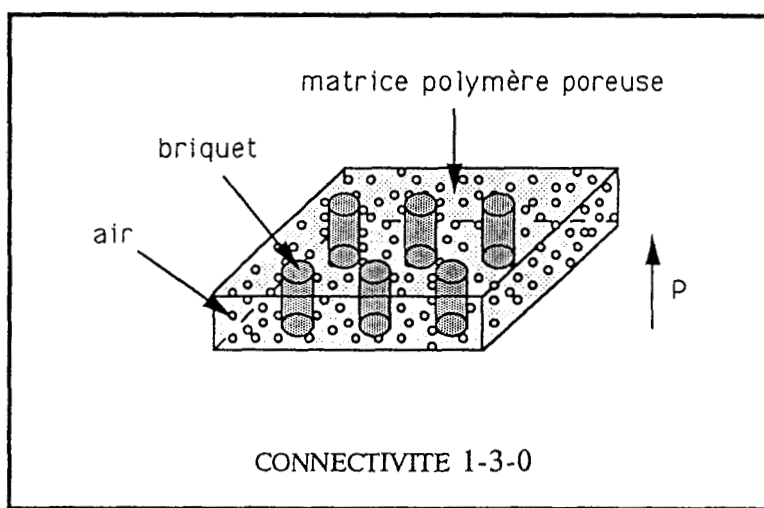


Figure IV-8

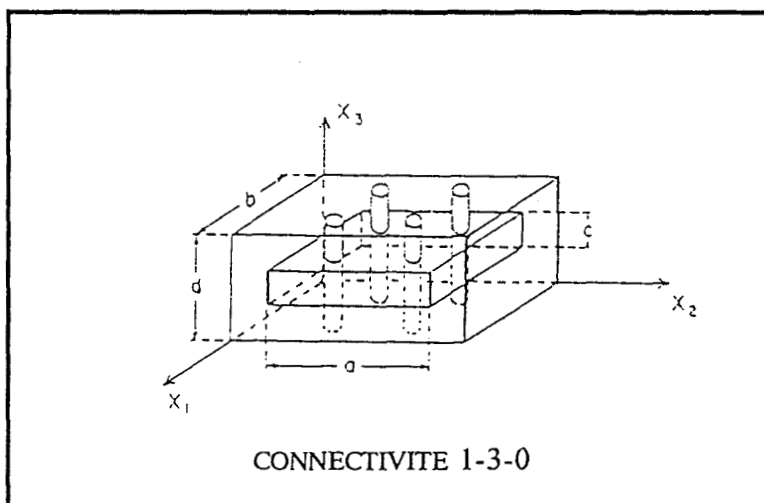


Figure IV-9 : extraite de [40]

La troisième [41] consiste à rigidifier transversalement la matrice, en incorporant des fibres de verre au polymère, dans les directions perpendiculaires aux briquets (figure IV-10). On obtient un composite de connectivité 1-2-3, ou 1-2-3-0 si le polymère est poreux.

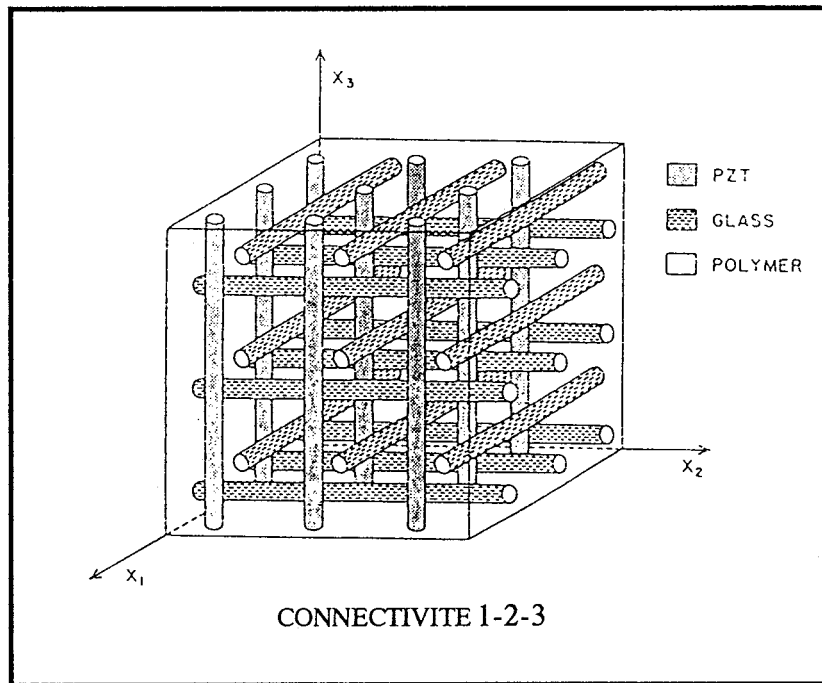


Figure IV-10 : extraite de [41]

L'intérêt manifesté pour les qualités de ces composites, ne peut cependant pas faire oublier les difficultés de fabrication liées à leur structure sophistiquée. Leurs séduisantes propriétés, tributaires des conditions de fabrication en laboratoire, semblent difficilement reproductibles à l'échelle industrielle.

2 - 3 - 4 - Le composite de connectivité 0-3

Le composite 0-3 est constitué par une matrice polymère chargée en particules de céramique ferroélectrique (figure IV-11). Sa structure simple et flexible est comparable à celle du PVDF (phase cristalline piézoélectrique noyée dans une phase amorphe).

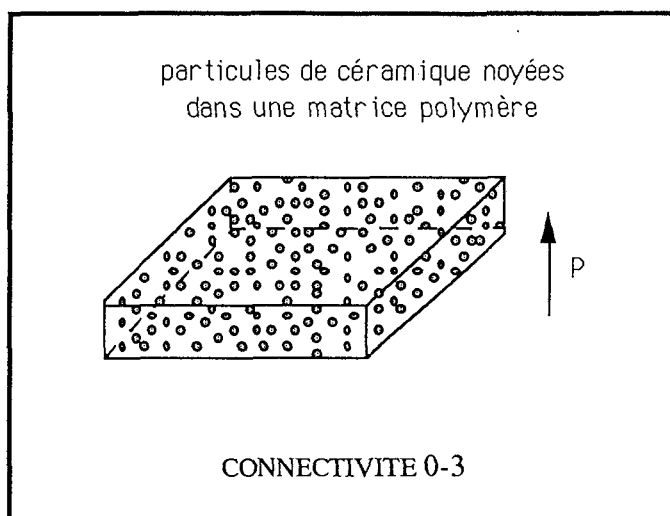


Figure IV-11

La polarisation des particules de céramique enrobées de polymère n'est possible que si les deux phases possèdent des conductivités voisines, d'où l'addition de poudre de carbone à la matrice [42]. Les composites réalisés à partir de grains en PT (PbTiO_3), ou en BF-PT ($(\text{Pb, Bi})(\text{Ti, Fe})\text{O}_3$), présentent les meilleurs facteurs de mérite hydrostatiques [30-42].

2 - 3 - 5 - Caractéristiques communes

Les matériaux composites possèdent des densités ($2 \text{ à } 6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) inférieures à celle des PZT, et un large domaine de permittivités diélectriques ϵ_r (20-1000) [19]. Toutefois, la présence d'une phase polymère ou air peut augmenter les taux de pertes électriques et mécaniques [23], et engendrer une dépendance en fréquence, température et pression [39] des caractéristiques.

3 - COMPORTEMENT EN PRESSION

3 - 1 - Conditions de mesure et critère de stabilité

Nous suivons l'évolution en pression du $d_h \cdot g_h$ des échantillons grâce au dispositif expérimental présenté au chapitre III. Les mesures sont réalisées à température ambiante (22°C), dans la bande (100-1620 Hz), entre la pression atmosphérique et 10 MPa (100 bars). La plage de pression choisie correspond aux conditions classiques d'utilisation de

l'hydrophone en immersion entre 0 et -1000 m. La réponse des échantillons s'avérant toujours plate dans la bande de fréquence, seule la valeur mesurée à 1 kHz est enregistrée, puis normalisée par rapport à la valeur initiale à pression atmosphérique. Le tout est exprimé en dB [43]:

$$X_P \text{ (dB)} = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{X_P}{X_0} \right) \quad \text{(IV-1)}$$

X_0 = valeur initiale mesurée à pression atmosphérique,

X_P = valeur mesurée à la pression P.

L'incertitude sur la mesure de $d_{h,gh}$ (de l'ordre de 12%) correspond environ à 1dB.

Pour éprouver la stabilité en pression des échantillons, deux types de tests sont effectués.

3 - 1 - 1 - Cycles en pression

Chaque échantillon commence par subir le cycle décrit (figure IV-12), ce qui permet d'établir une première courbe donnant le $d_{h,gh}$ en fonction de la pression.

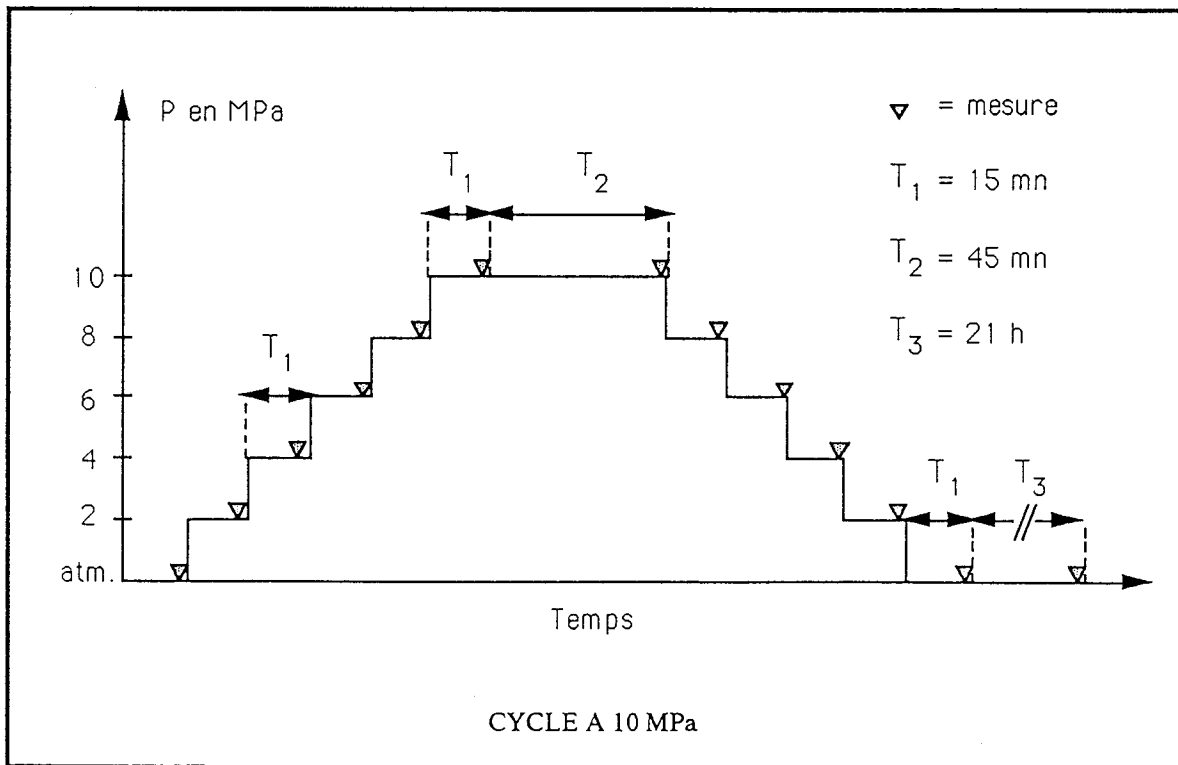


Figure IV-12

Cette courbe (figures IV-13, 14, 15, 16) présente un effet d'hystérésis plus ou moins marqué. Elle nous renseigne à la fois sur l'influence de la pression et sur celle de son temps d'application. Si les variations en $d_h \cdot g_h$ observées ne dépassent pas 1dB, l'échantillon est soumis à quatre autres cycles identiques, espacés par 21 heures de récupération à pression atmosphérique (1 cycle par jour).

3 - 1 - 2 - Fluage ou vieillissement sous pression

Lorsqu'au bout de cinq cycles, l'échantillon présente toujours un $d_h \cdot g_h$ constant à 1 dB près, on le laisse reposer 72 heures à pression atmosphérique. Il est ensuite maintenu 96 heures à 10 MPa, et fait l'objet de mesures réparties dans le temps (figures IV-17, 18, 19).

3 - 1 - 3 - Critère de stabilité

L'échantillon dont la variation de $d_h \cdot g_h$ n'excède pas 1 dB (limite de résolution du système de mesure) à l'issue des deux tests précédents, est considéré comme stable en pression, pour des pressions hydrostatiques inférieures ou égales à 10 MPa.

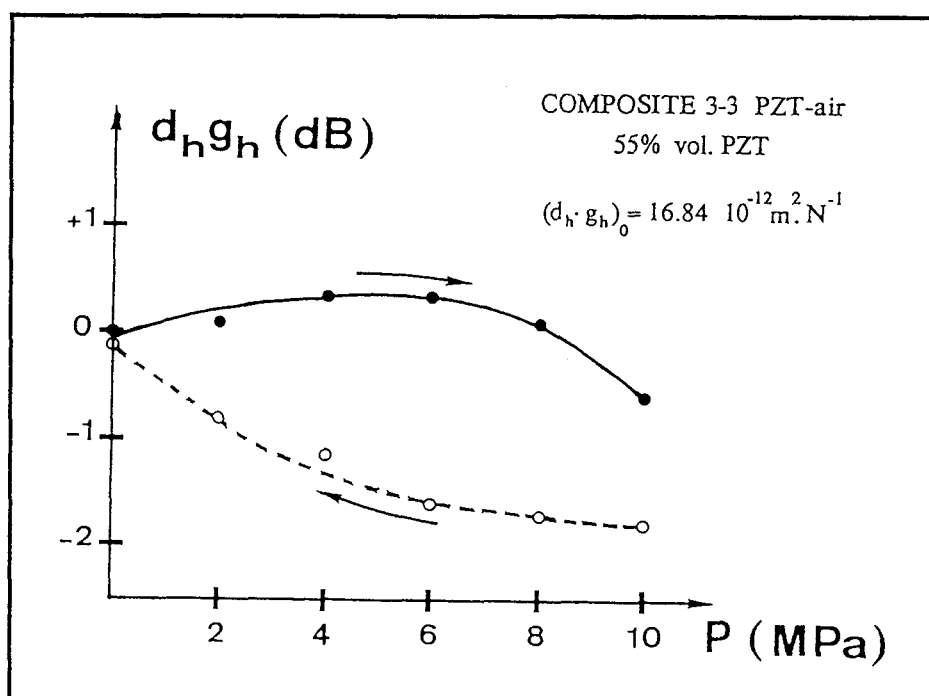


Figure IV-13

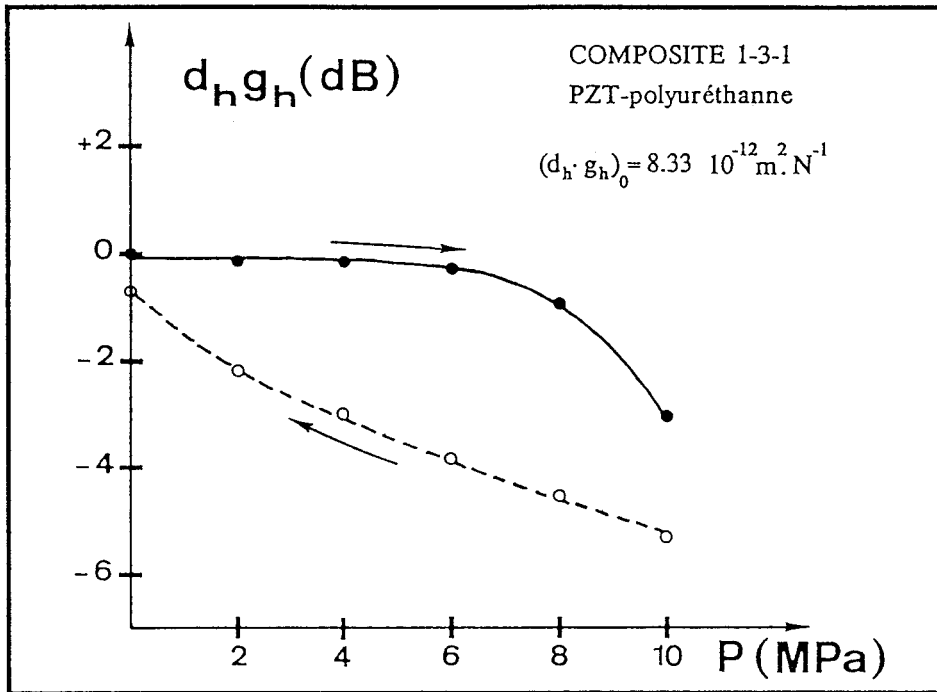


Figure IV-14

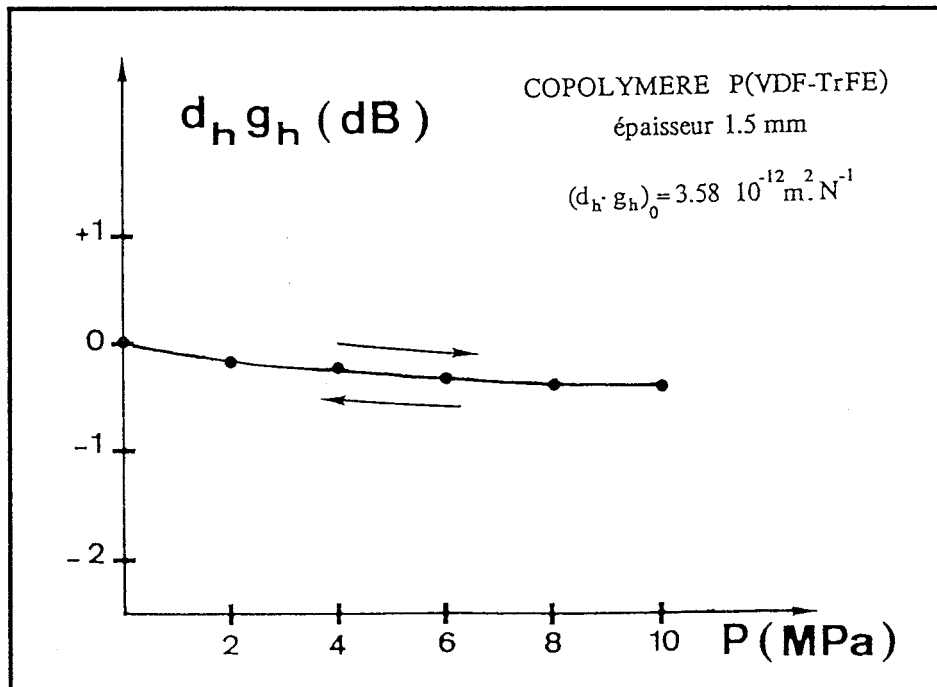


Figure IV-15

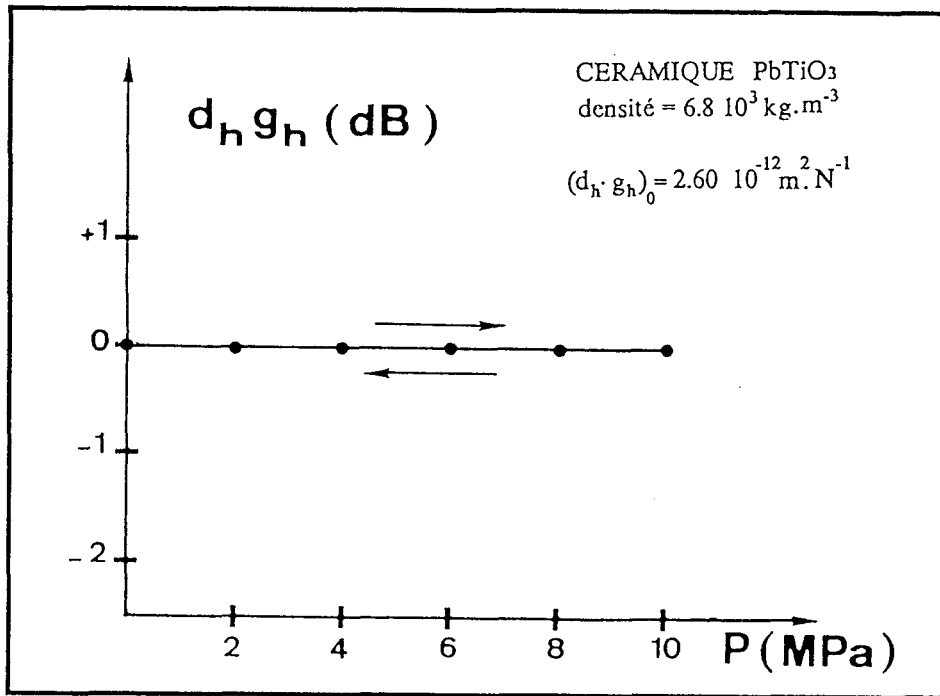


Figure IV-16

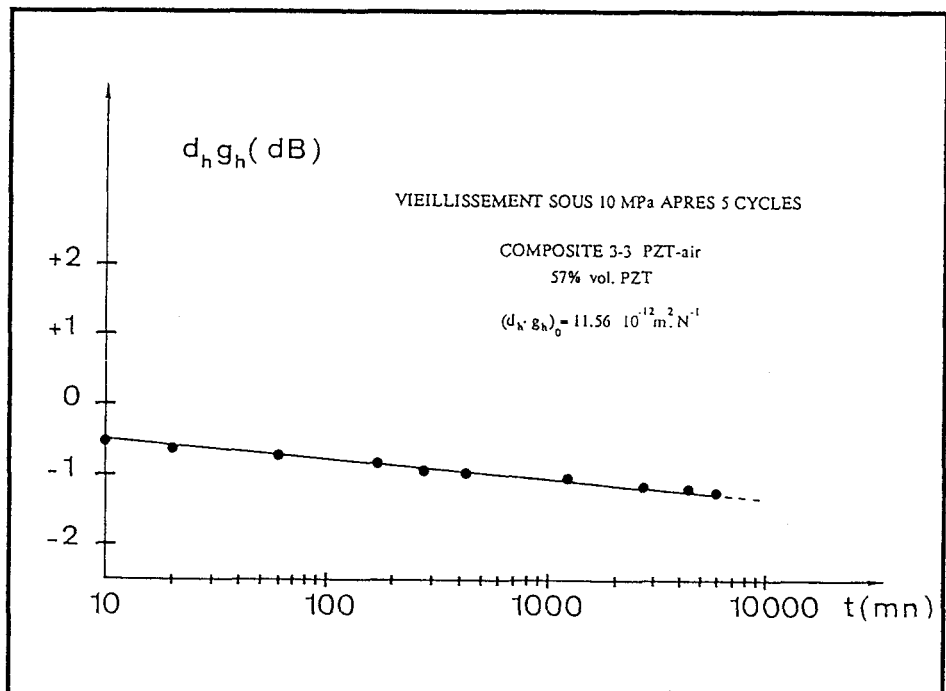


Figure IV-17

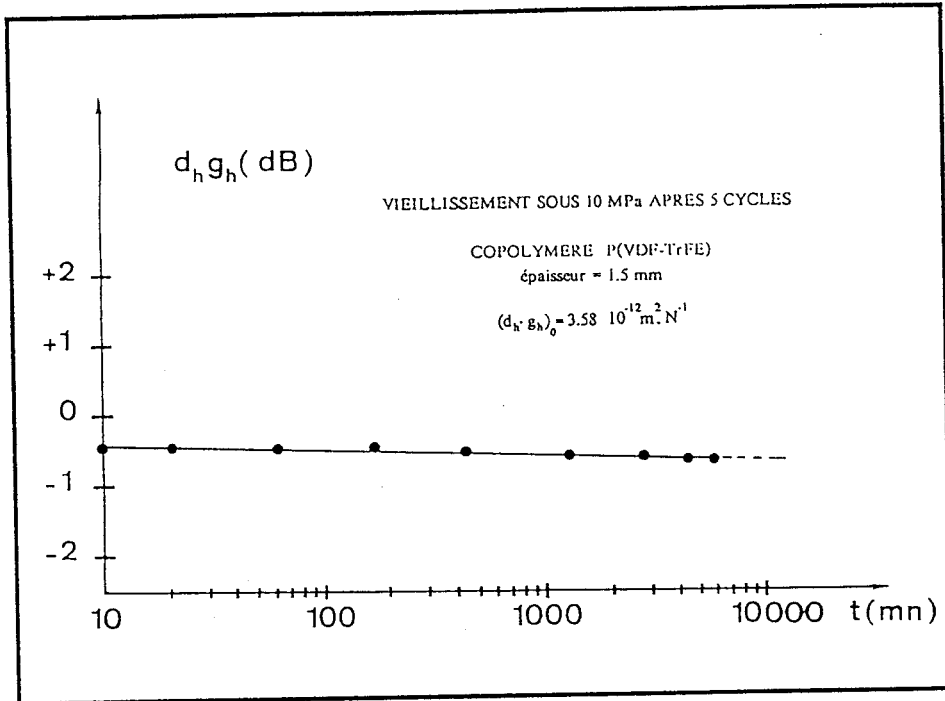


Figure IV-18

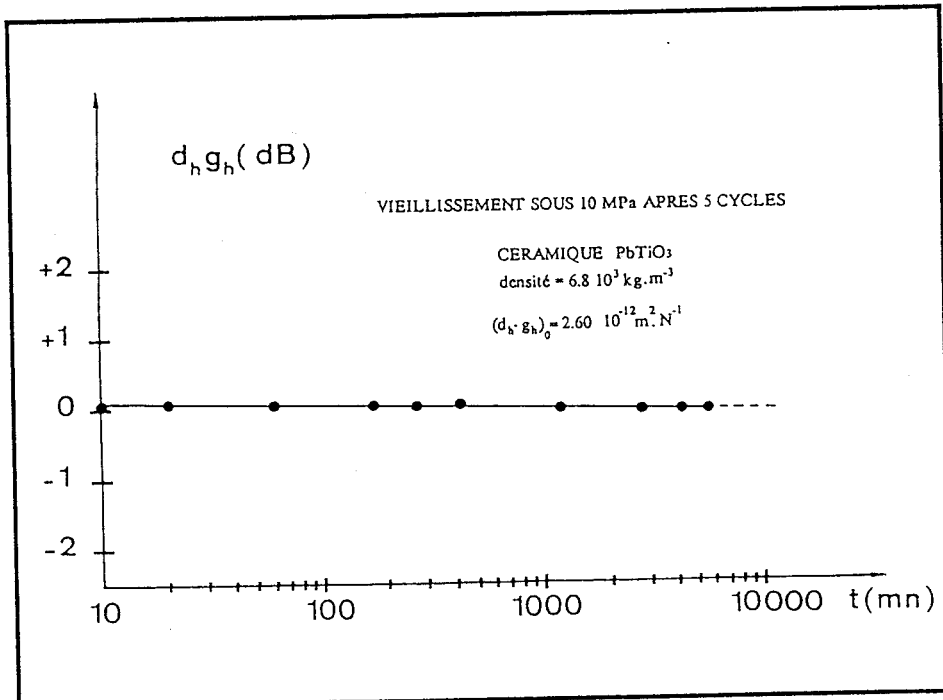


Figure IV-19

3 - 2 - Bilan

Les résultats expérimentaux sont rassemblés dans le catalogue joint en annexe (A2). Chaque élément mesuré y figure accompagné d'un certain nombre d'informations portant sur son type, sa provenance, ses caractéristiques physiques à l'ambiante, son comportement en pression. Les échantillons possédant les meilleurs $d_h.g_h$ sont présentés dans les tableaux 1, 2.

La situation au 15/08/90 peut être résumée par le diagramme (figure IV-20) sur lequel sont reportées nos mesures ainsi que les valeurs recensées dans diverses publications.

3 - 2 - 1 - Commentaires

Les céramiques PT ($PbTiO_3$) sont stables. Aucun effet d'hystérésis, ni aucune variation de leur facteur de mérite, n'ont pu être décelés au cours des divers cycles et fluage entrepris (figures IV-16, 19). Leur comportement sous pression hydrostatique s'apparente à celui des céramiques classiques BT ($BaTiO_3$) et PZT [47]. Leur $d_h.g_h$ est environ 15 fois plus important que celui d'une céramique PZT.

Les propriétés des polymères et des copolymères piézoélectriques évoluent très peu en fonction de la pression [18-48]. Seule une légère baisse de leur facteur de mérite avec la contrainte et son temps d'application (figures IV-15, 18) est observable. Le $d_h.g_h$ est d'autant plus grand que l'épaisseur de l'échantillon est faible (quelques exceptions sont à noter parmi les copolymères). A épaisseurs égales, le copolymère est 2 fois plus performant que le PVDF. Son facteur de mérite est 10 à 20 fois plus important que celui d'une céramique PZT. Certains PVDF poreux possèdent des caractéristiques très intéressantes à l'ambiante [46] ($d_h.g_h = 5.64 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.N^{-1}$), mais sont instables en pression [48].

Les composites de connectivité 3-2 à matrice rainurée sont insensibles à la pression. Cependant, le meilleur $d_h.g_h$ ($1.05 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.N^{-1}$), présenté par l'élément à matrice PZT dont les rainures sont restées vides, est incroyablement faible en comparaison de celui mesuré par A. SAFARI *et al.* [37] sur des échantillons à matrice perforée ($45.7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.N^{-1}$). Notre échantillonnage restreint et incomplet (absence d'élément à matrice perforée) ne nous permet pas de conclure sur l'intérêt et la stabilité de cette catégorie de matériau. Toutefois, la constance de leurs performances en pression semble très plausible, compte tenu de leur structure massive et rigide [30].

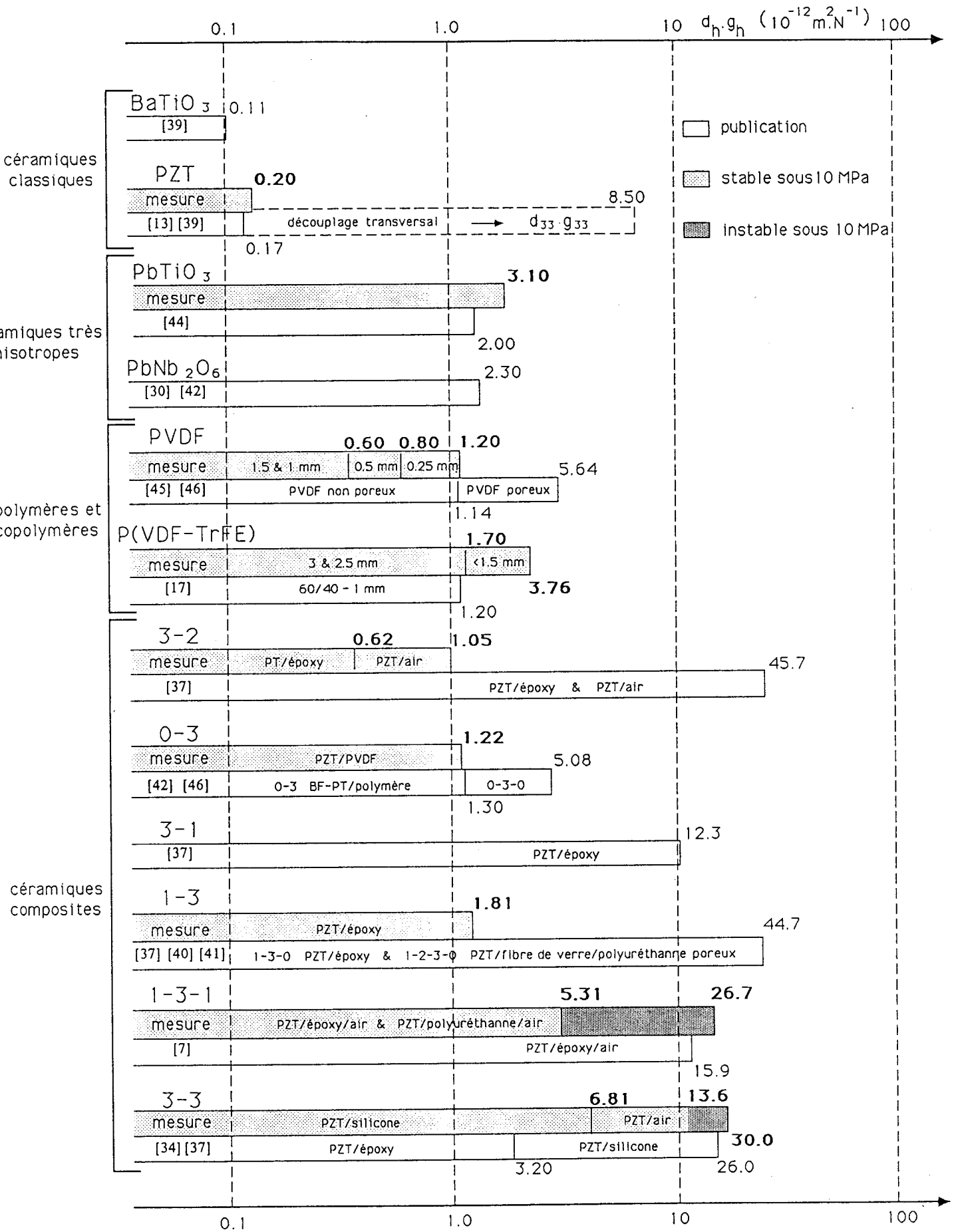


DIAGRAMME COMPARATIF (Figure IV-20)

CHAPITRE IV

- NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES -

RANG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TYPE	3-3 corail PZT-air	1-3-1	3-3 corail PZT-silicong	(VDF-TrFE)	CERAMIQUE PbTiO ₃	1-3 PZT époxy	0-3 PZT PVDF	PVDF	3-2 PZT air
PROVENANCE	PONS	INSA EYRAUD	METRAVIB	ATOCEM PENWALD	QUARTZ & SILICE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	THOMSON	INSA EYRAUD
REFERENCES	Z37 N°41	N°2906	N°3-6		N°15	N°2852	N°2861	N°1	N°2776
GEOMETRIE	disque	paral.	disque	paral.	anneau	paral.	paral.	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 r=10	30x30x5	Ø=38 h=3.5	38x38x1		50x50x5	50x50x5	30x30x.25	50x50x5
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	3.05	3.56	4.50		6.90			1.8	
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)			8000	250000	60000			400000	15000
tgδ (%)		10	11	15	4	6	16	20	7
EPSILON 33 RELATIF	126	153	138	7,7	199	69	120	12	733
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	197							36	
d _h (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	183	190	91	16	74	33	36	11,4	83
g _h (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	164	141	75	235	42	54	34	107	13
d _h .g _h (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	30,0	26,7	6,81	3,76	3,10	1,81	1,22	1,20	1,05
S _h (dB réf V.µPa ⁻¹)	-175,7	-183,0	-191,7	-192,5	-193,5	-191,3	-195,4	-211,0	-201,0
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable	instable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	stable

CLASSEMENT DES MEILLEURS ECHANTILLONS
EN FONCTION DU FACTEUR DE MERITE HYDROSTATIQUE (Tableau 1)

CHAPITRE IV

- NOUVEAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES -

RANG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-silicone	1-3-1	(VDF-TrFE)	CERAMIQUE PbTiO ₃	1-3 PZT époxy	0-3 PZT PVDF	PVDF	3-2 PZT air
PROVENANCE	PONS	METRAVIB	INSA EYRAUD	ATOCEM PENWALD	QUARTZ & SILICE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	THOMSON	INSA EYRAUD
REFERENCES	Z37 N°211	N°3-6	N°2913		N°15	N°2852	N°2861	N°1	N°2776
GEOMETRIE	disque	disque	paral.	paral.	anneau	paral.	paral.	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=38 h=3.5	30x30x5	38x38x1		50x50x5	50x50x5	30x30x 25	50x50x5
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	4,19	4,50	3,45		6,90			1,8	
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)		8000		250000	60000			400000	15000
tgδ (%)		11	8	15	4	6	16	20	7
EPSILON 33 RELATIF	275	138	76	7,7	199	69	120	12	733
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	249							36	
dh (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	182	91	60	16	74	33	36	11,4	83
gh (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	75	75	88	235	42	54	34	107	13
dh.gh (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	13,6	6,81	5,31	3,76	3,10	1,81	1,22	1,20	1,05
Sh (dB réf V.µPa ⁻¹)	-182,5	-191,7	-187,1	-192,5	-193,5	-191,3	-195,4	-211,0	-201,0
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	stable

CLASSEMENT DES MEILLEURS ECHANTILLONS, STABLES EN PRESSION,
EN FONCTION DU FACTEUR DE MERITE HYDROSTATIQUE (Tableau 2)

Le facteur de mérite des composites 0-3, environ 6 fois plus important que celui d'une céramique PZT, est indépendant de la pression. De nombreuses publications [39-42-46] confirment ce résultat. Certains composites à matrice poreuse de type 0-3-0, tels que les Piezo-Rubbers NTK 305 ou 307, présentent de très bon $d_h.g_h$ à l'ambiante (5.08 ou $4.88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$), mais sont instables en pression [46].

Les meilleurs composites 1-3 ont un $d_h.g_h$ environ 8 fois plus important que celui d'une céramique PZT, et sont stables en pression. Différents types d'assemblages ont pu être testés (A2). Les meilleurs résultats sont obtenus à partir d'associations PZT/époxy, ou PT/époxy.

Le composite de type 1-3-0 est instable. Son étonnant facteur de mérite à l'ambiante ($44.6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$) perd 10 dB sous 7 MPa [40]. Faute d'échantillon et d'information, il nous est impossible de conclure sur les types 1-2-3 et 1-2-3-0 dont le $d_h.g_h$ à pression atmosphérique atteint $44.7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$ [41]. Néanmoins, la grande souplesse de leur matrice polyuréthane nous paraît peu compatible avec une bonne tenue en pression.

Les composites 1-3-1 possèdent un excellent facteur de mérite, 5 à 150 fois plus important que celui d'une céramique classique PZT. Cependant, les meilleurs échantillons ($5.31 < d_h.g_h < 26.7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$) supportent mal la pression hydrostatique. De larges effets d'hystérésis et de fortes variations affectent leur $d_h.g_h$ (figure IV-14). La stabilité est obtenue au prix d'un abaissement du facteur de mérite. Le compromis sensibilité-stabilité dépend des caractéristiques du montage (nombre et taille des briquets, diamètre des logements, épaisseur et souplesse de la matrice, rigidité des électrodes...) [7]. Son optimisation exige une étude plus approfondie sur le comportement en pression du composite. Actuellement, seuls deux échantillons, sur 15 testés, présentent des $d_h.g_h$ (1.74 et $5.31 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$) stables en pression (figure IV-21).

Le $d_h.g_h$ des composites 3-3 dépend essentiellement de la fraction volumique de céramique [34]. Il varie continûment de 30 à $0.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$. Plus l'échantillon est dense, plus il est stable et moins il est sensible. Les propriétés de la céramique non étanche évoluent très peu en fonction de la pression [33-39]. Celles de la céramique imprégnée sont d'autant plus faibles et stables que le polymère d'imprégnation est rigide [13]. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de céramiques poreuses enrobées. Les plus sensibles ($13.6 < d_h.g_h < 30 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$) sont instables (figures IV-13, 22). Celles dont le facteur de mérite est inférieur à $13.6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$ sont stables jusqu'à 10 MPa (figure IV-23, 24).

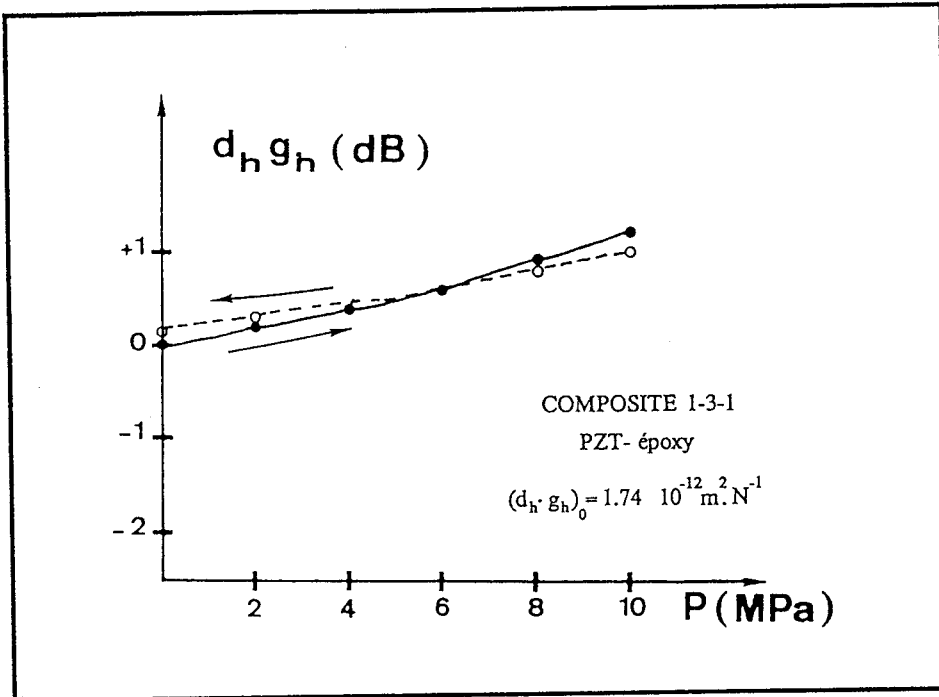


Figure IV-21

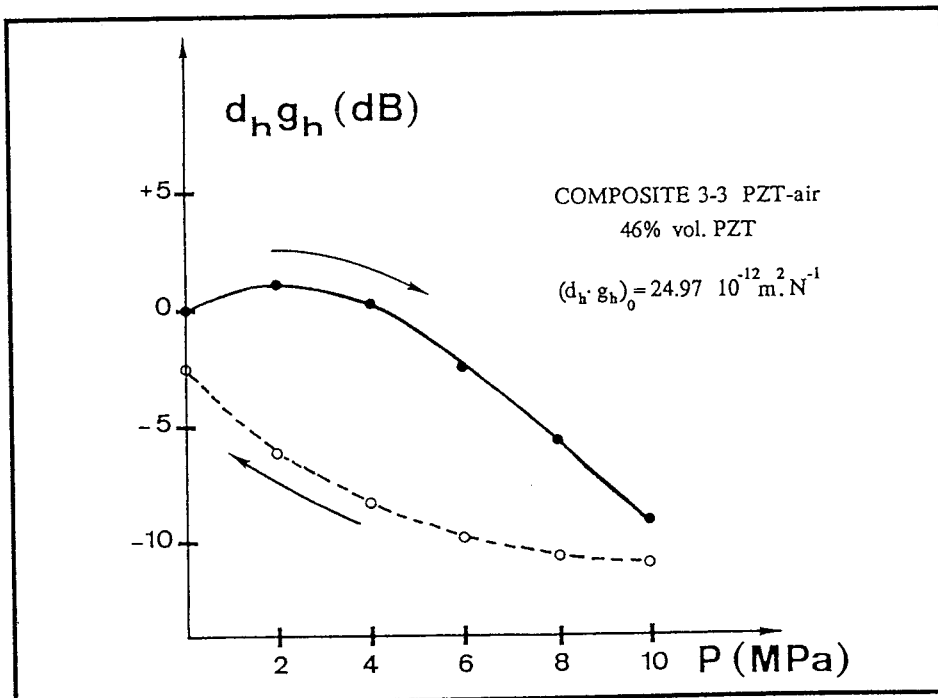


Figure IV-22

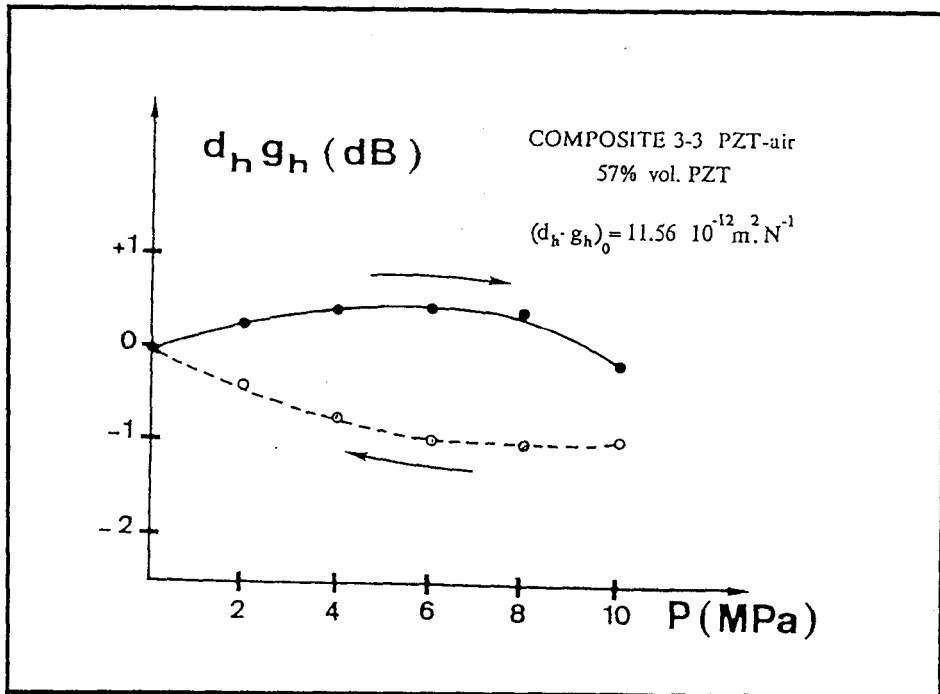


Figure IV-23

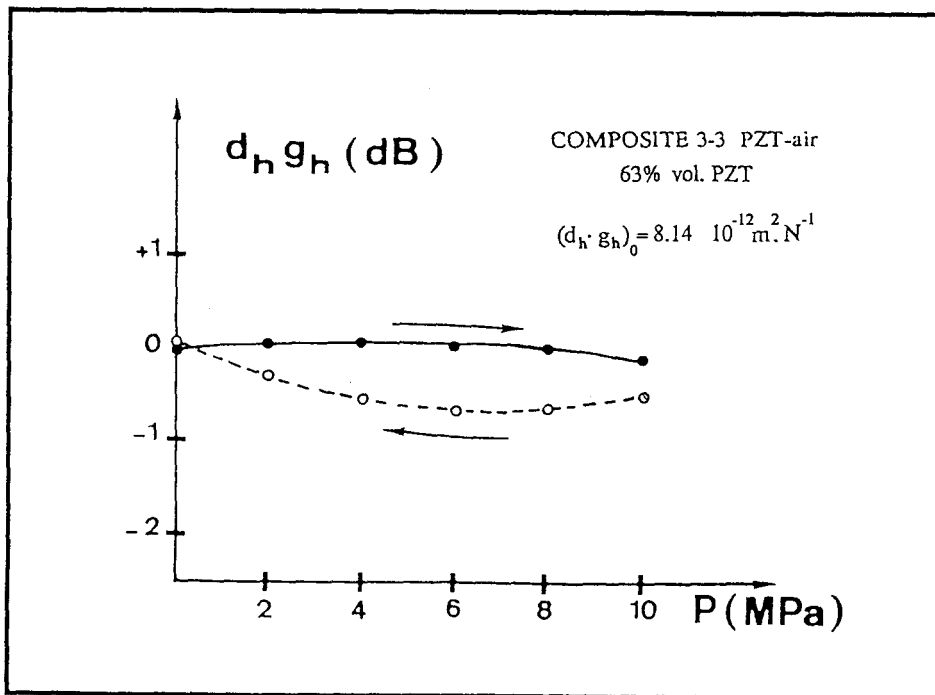


Figure IV-24

3 - 2 - 2 - Conclusion

Parmi tous les matériaux testés, les composites 3-3 et 1-3-1 sont les plus performants (figure IV-20). Leur facteur de mérite optimum est atteint au détriment de leur stabilité en pression (tableau 1). Cependant, des compromis sensibilité-tendue en pression intéressants existent dans les deux cas (tableau 2).

Sous leurs formes stables actuelles, les meilleurs composites 3-3 PZT-air sont plus sensibles que les meilleurs composites 1-3-1. Leur facteur de mérite est environ 50 fois plus important que le $d_h.g_h$ d'une céramique PZT classique, et à peu près 1.5 fois plus important que le $d_{33}.g_{33}$ d'une céramique PZT classique. De plus, la mise en œuvre de ces composites de connectivité 3-3 a déjà dépassé le stade de la fabrication en laboratoire et semble ne poser aucun problème à l'échelle industrielle [13]. Nous allons donc par la suite, nous intéresser plus particulièrement à ce type de matériau très prometteur.

CHAPITRE V

ETUDE DES PROPRIETES ELECTRO-ACOUSTIQUES
DES COMPOSITES Z37

1 - COMPOSITE Z37

La céramique poreuse Z37 est un composite PZT-air de connectivité 3-3. Sa matrice est issue de la nuance X37 des céramiques PZT (type I) réalisées par la société PONS [13]. Munie d'électrodes, obtenues par dépôt d'argent cuit au four, elle est polarisée dans un bain d'huile chaude, puis dégraissée et enrobée de résine polyuréthane. Ses pores remplis d'air ne présentent pas d'orientation particulière (figures V-1, 2, 3). Leur diamètre est compris entre 1 et 100 μm . La majorité d'entre eux se situe dans la gamme 10-20 μm . Le diamètre moyen des grains PZT est d'environ 10 μm .

Le procédé de fabrication PONS permet de réaliser des composites dont la densité varie de façon continue entre 2.80 et 7.30 10^3 kg.m^{-3} . La densité (ρ) des échantillons est calculée à partir de leurs dimensions et de leur masse. La fraction volumique de PZT est estimée en considérant la densité de la céramique de base X37 (7.30 10^3 kg.m^{-3}) comme référence:

$$\text{vol.PZT (\%)} = \frac{\rho}{7.30} \times 100 \quad (\text{V-1})$$

Une estimation plus rigoureuse consisterait à prendre en compte la faible porosité (5.7%) de la céramique de base X37, conduisant à une densité effective de la matière égale à 7.74 10^3 kg.m^{-3} , et par suite à une fraction volumique de PZT légèrement inférieure à celle indiquée pour le composite.

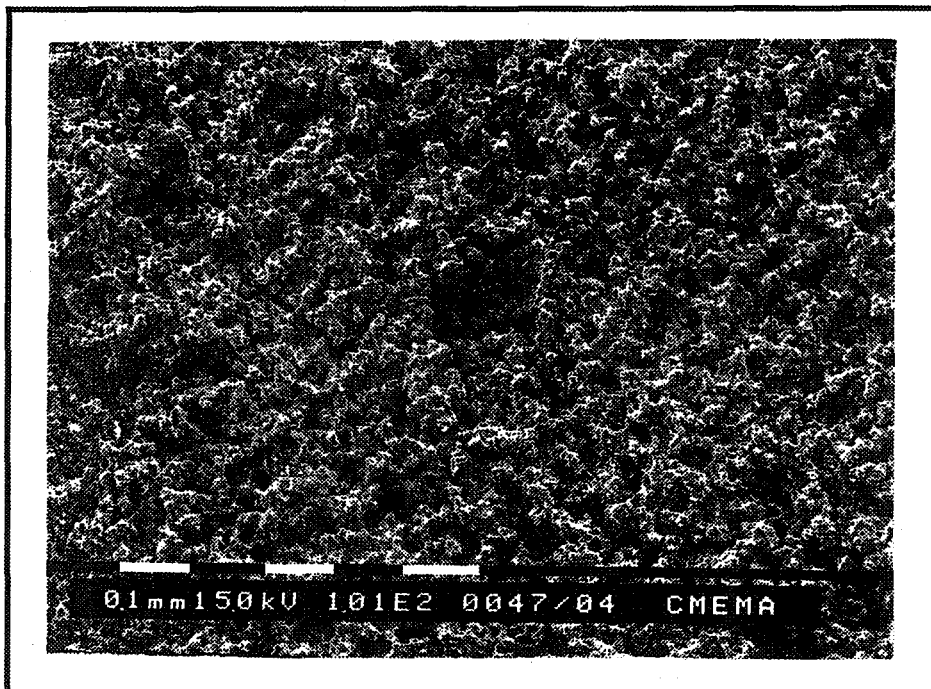


Figure V-1 (vol.PZT = 50%)

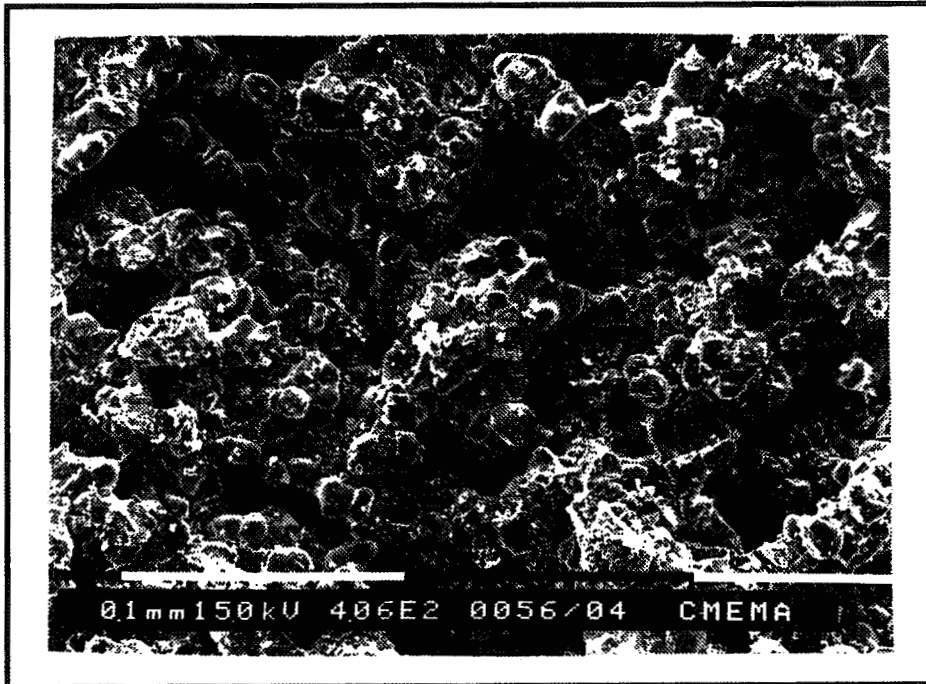


Figure V-2 (vol.PZT = 50%)

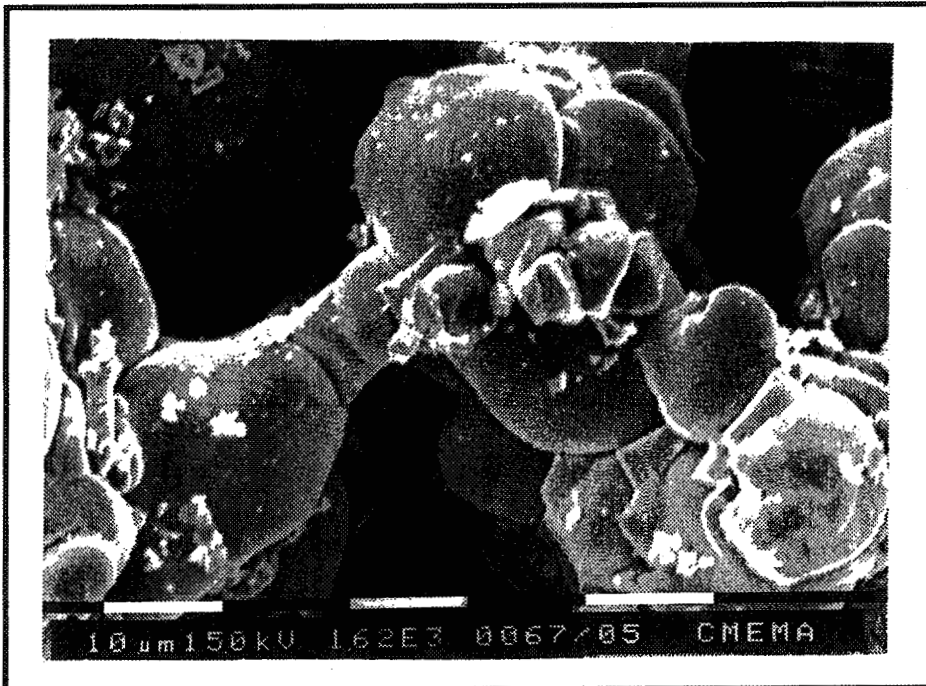


Figure V-3 (vol.PZT = 50%)

Les échantillons sont, à quelques exceptions près, des disques de dimensions constantes ($\phi=36$ mm, $h=10$ mm), polarisés au minimum un mois avant mesure, dont la densité varie de 3.05 à $7.30 \cdot 10^3$ kg.m⁻³.

2 - CARACTERISATION A PRESSION ATMOSPHERIQUE

Les caractéristiques diélectriques et piézoélectriques du composite Z37 dépendent de la fraction volumique de céramique. Nous présentons leurs évolutions, à température ambiante et à pression atmosphérique, pour des fractions volumiques comprises entre 42% et 100 % de PZT.

Les mesures de ϵ_r et d_h (figures V-4, 7) sont effectuées à 1kHz grâce au dispositif décrit au chapitre III. Les valeurs de d_{33} (figure V-5) sont données par le constructeur. Elles ont été établies dans l'air, en statique, à l'aide d'un d_{33} -mètre [13], et sont en parfait accord avec celles déterminées par nos soins, à 100 Hz, au Berlincourt-mètre. Les coefficients $|d_{31}|$ et $d_h \cdot g_h$ (figures V-6, 8) sont calculés:

$$|d_{31}| = \frac{d_{33} - d_h}{2} \quad (V-2)$$

$$d_h \cdot g_h = \frac{d_h^2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (V-3)$$

Nous constatons que la permittivité relative ϵ_r ainsi que les constantes piézoélectriques d_{33} et $|d_{31}|$ augmentent avec le taux de PZT. La constante de charge hydrostatique d_h passe par un maximum pour une fraction volumique de PZT d'environ 50% ($\rho \sim 3.7 \cdot 10^3$ kg.m⁻³). Quant au facteur de mérite hydrostatique $d_h \cdot g_h$, il diminue quand la fraction volumique de céramique croît.

La dispersion des caractéristiques est relativement faible (<10%). Les variations observées sont identiques à celles d'un composite imprégné [34, 49]. Le maximum en d_h provient de la décroissance très rapide du coefficient $|d_{31}|$ avec la porosité.

Le modèle analytique proposé au chapitre suivant, basé sur une représentation simplifiée de la microstructure du composite, permet d'interpréter l'allure des différentes courbes tracées à l'ambiante.

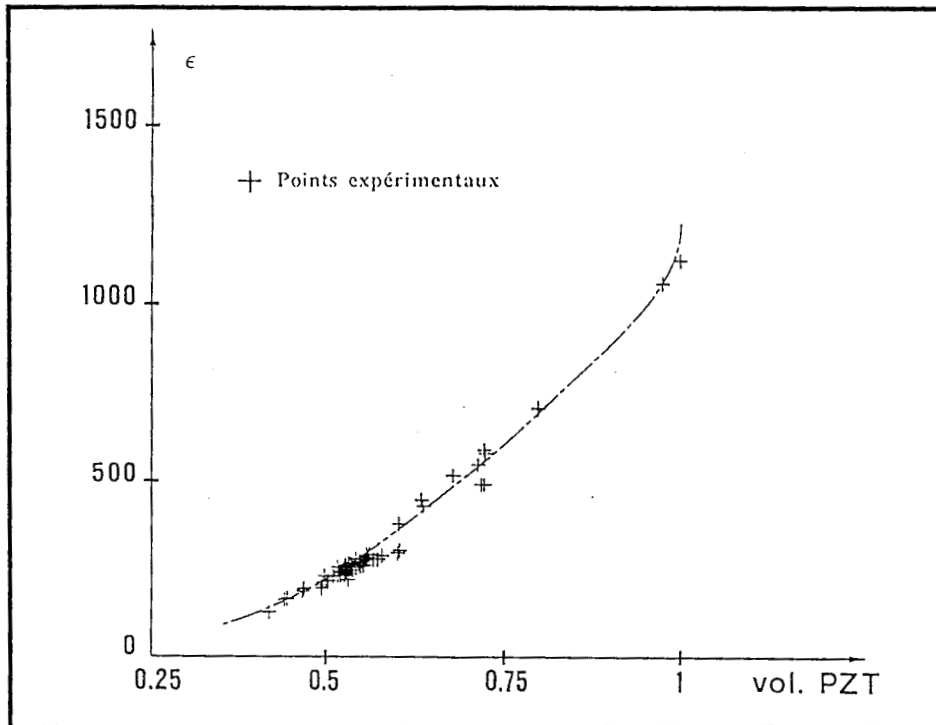


Figure V-4

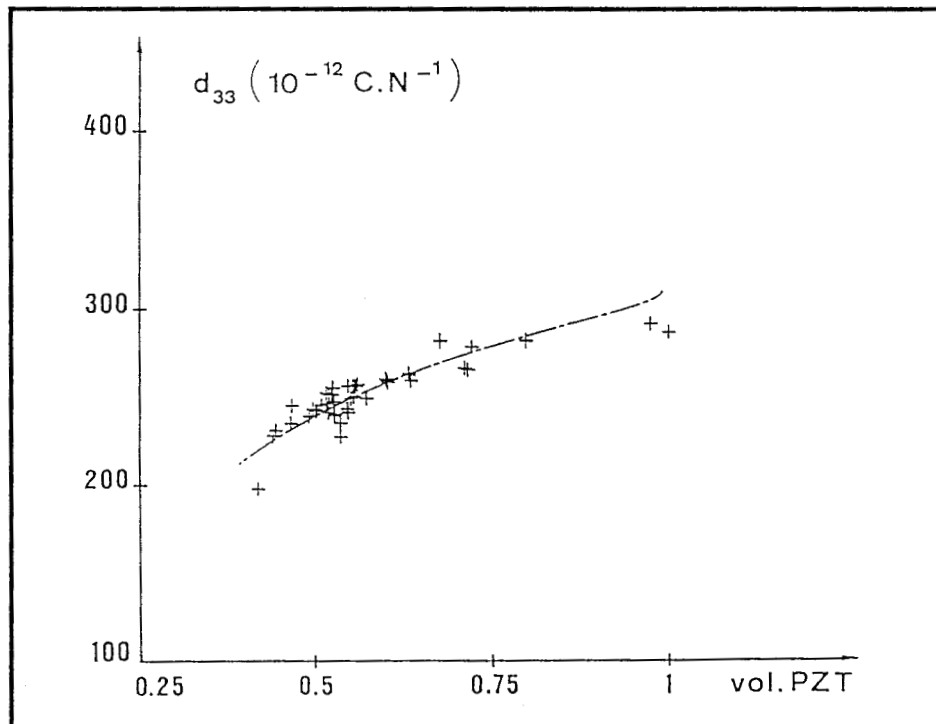


Figure V-5

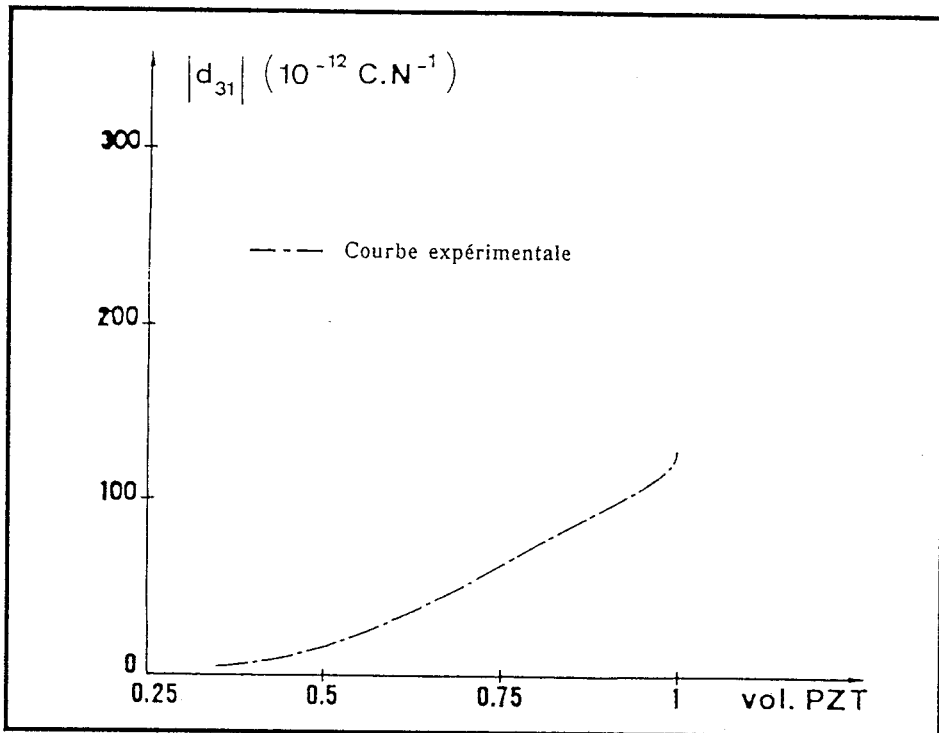


Figure V-6

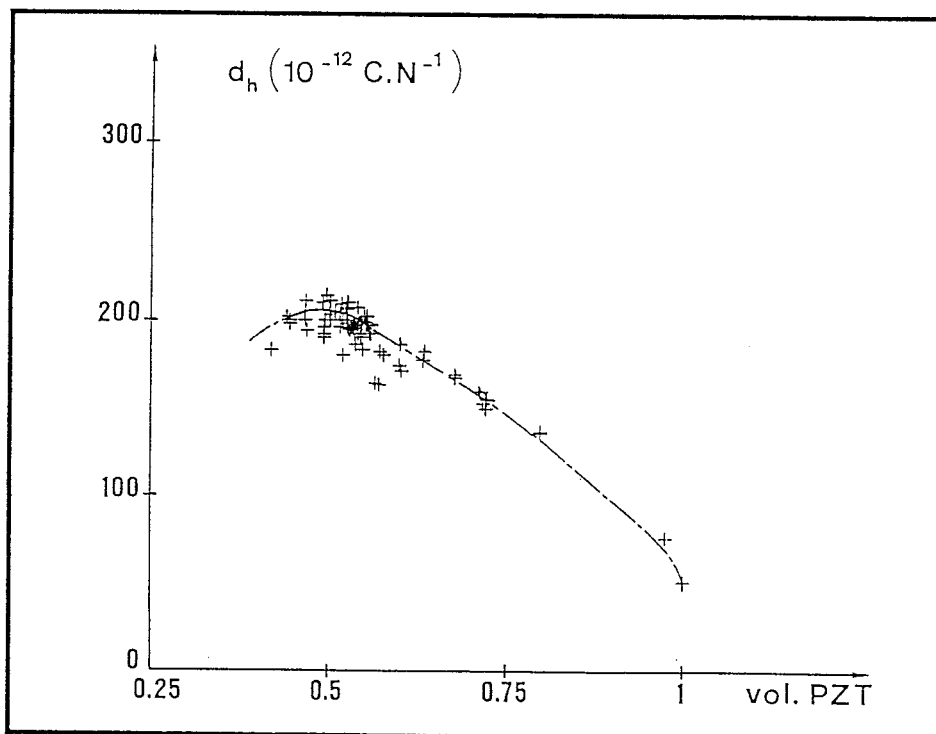


Figure V-7

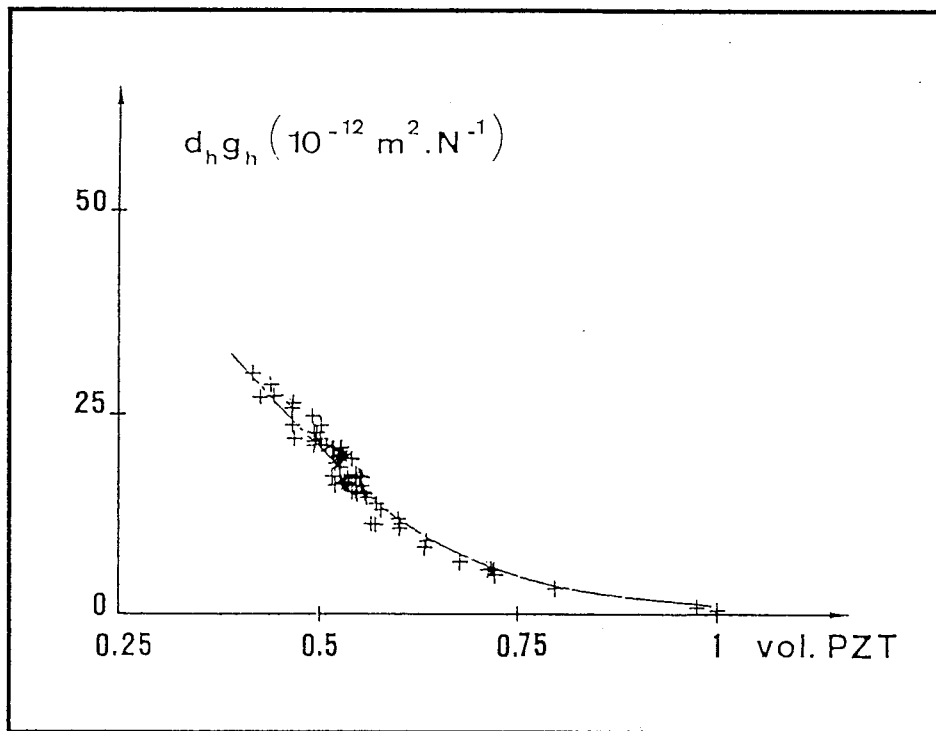


Figure V-8

3 - CARACTERISATION EN PRESSION

Diverses expériences sont effectuées sur des échantillons n'ayant jamais subis d'essais en pression. Les variations de permittivité ϵ_r et de constante de charge hydrostatique d_h sont normalisées et exprimées en dB (IV-1) avec comme référence la valeur initiale à pression atmosphérique (ϵ_{r_0} ou d_{h_0}).

3 - 1 - Etude en fonction de la fraction volumique de PZT

Quatre échantillons (46, 52, 57, 63 % vol.PZT) sont soumis à une série de 5 cycles à 10 MPa (figure IV-12). Quatre autres échantillons (50, 55, 60, 72 % vol.PZT) subissent une série de 5 cycles à 16 MPa (figure V-9). Le temps de récupération entre deux cycles est en moyenne de 20 heures. Les 15 minutes d'attente sur chaque palier de montée ou descente en pression permettent à la température du fluide de couplage de se stabiliser [50], et laissent la permittivité de l'échantillon atteindre un équilibre relatif avant acquisition. Les valeurs de ϵ_r et d_h , mesurées lors des 1^{er} et 5^{ème} cycles, sont reportées figures V-10 à V-25.

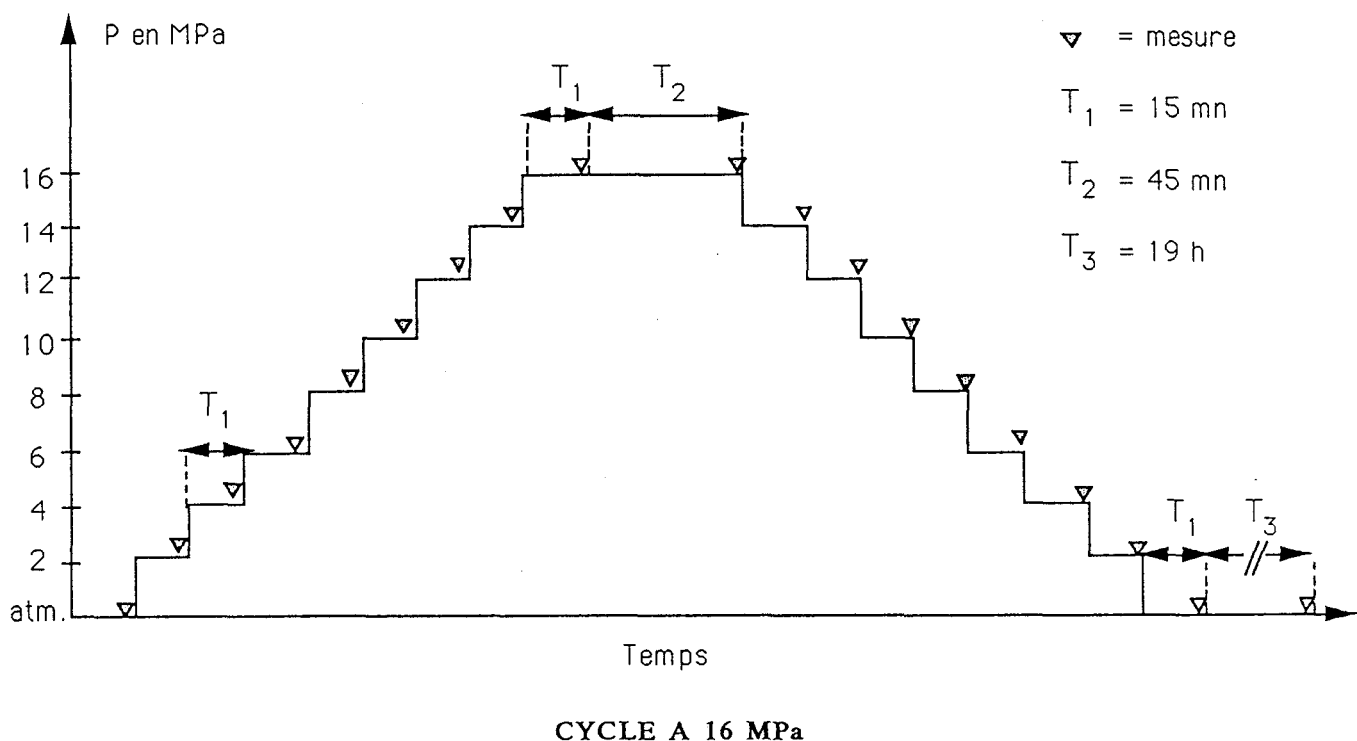


Figure V-9

3 - 1 - 1 - Résultats

La constante diélectrique ϵ_r croît de façon considérable avec la pression. Son augmentation est d'autant plus forte que la porosité de l'échantillon est élevée (figures V-10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24). La constante de charge d_h commence par croître pour atteindre une valeur maximale, puis décroît (figures V-11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25).

Pour les deux constantes, l'effet d'hystérésis est d'autant plus important que la pression maximale du cycle est élevée et que la fraction volumique de PZT est faible.

Après une heure passée à 10 ou 16 MPa, le ϵ_r a tendance à augmenter, et le d_h à diminuer. Le d_h diminue d'autant plus que la densité de l'échantillon est basse et que la pression de fluage est élevée.

Au retour à pression atmosphérique, tous les échantillons présentent une constante diélectrique supérieure au ϵ_r initial, et une constante piézoélectrique de charge différente du d_h initial. L'écart entre les caractéristiques avant et après passage en pression est d'autant plus important que la fraction volumique de PZT est faible et que la pression maximale atteinte au cours du cycle est élevée. Cet écart s'amenuise pendant le temps de repos qui sépare deux cycles consécutifs, mais subsiste toujours.

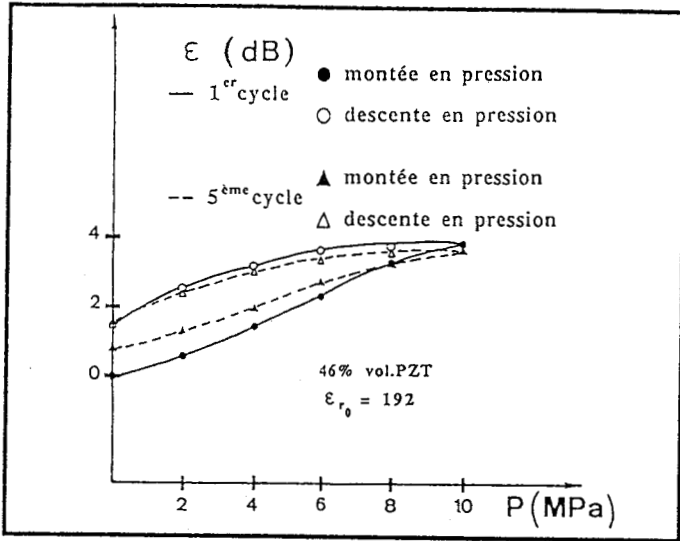


Figure V-10

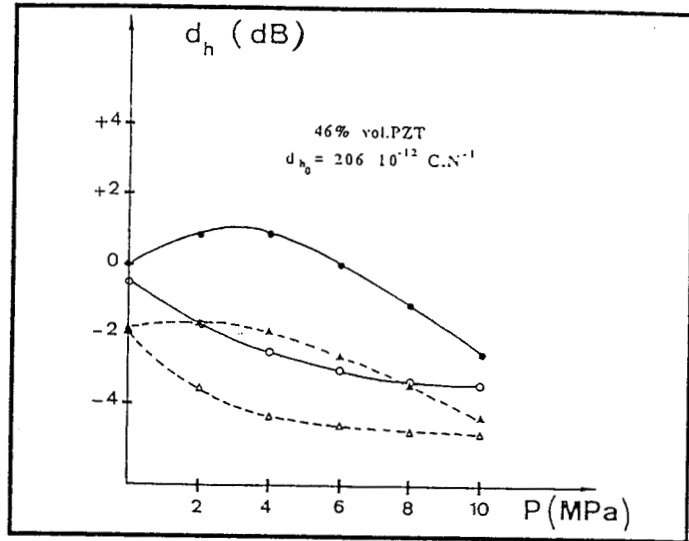


Figure V-11

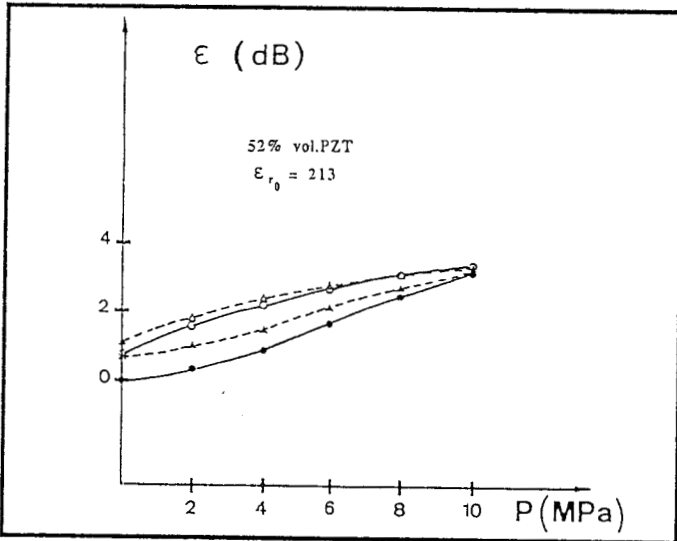


Figure V-12

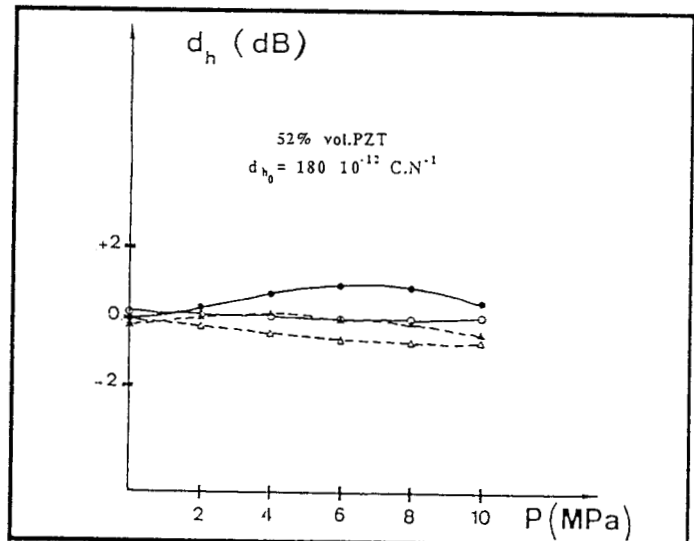


Figure V-13

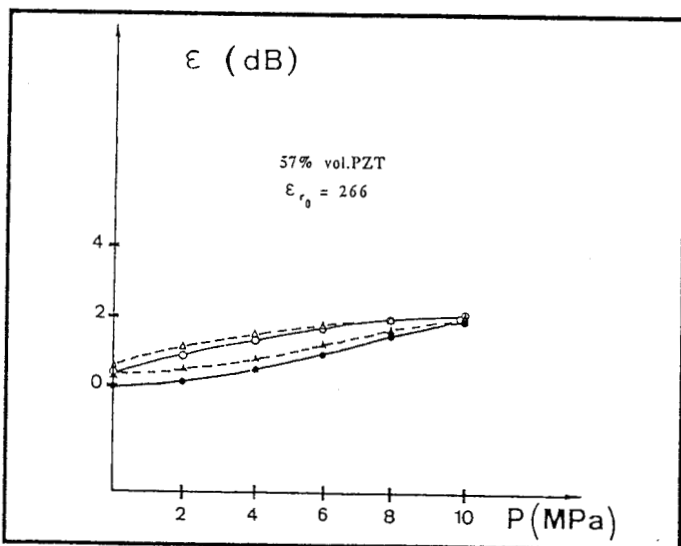


Figure V-14

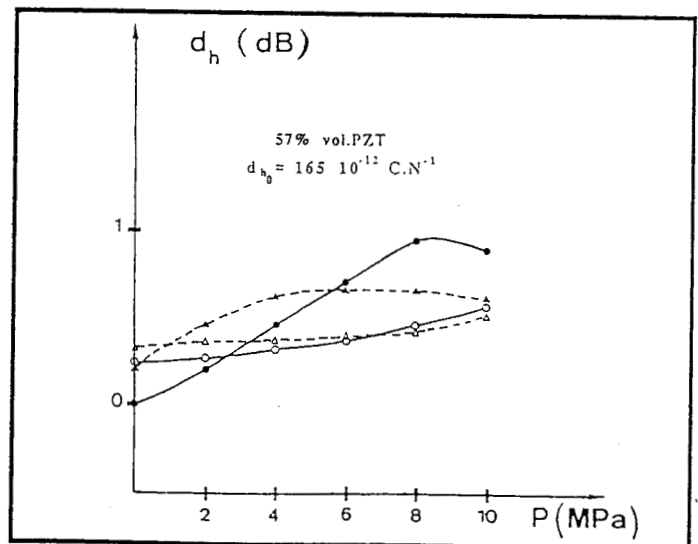


Figure V-15

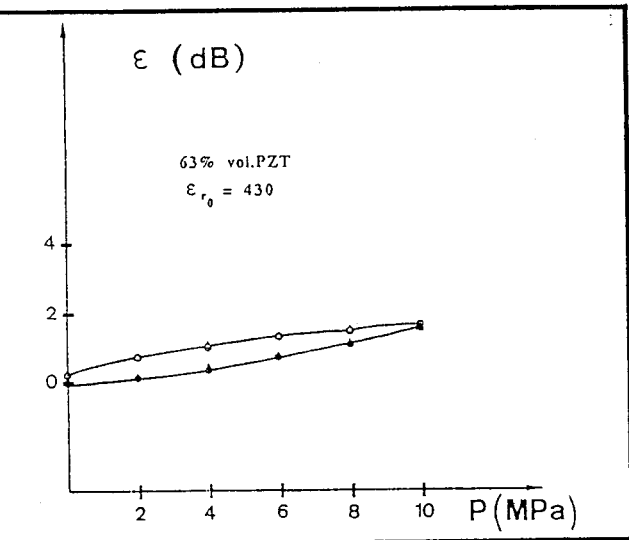


Figure V-16

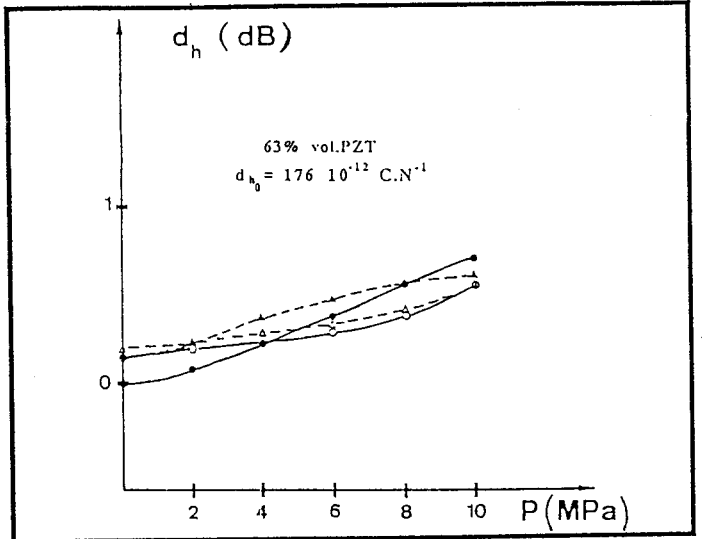


Figure V-17

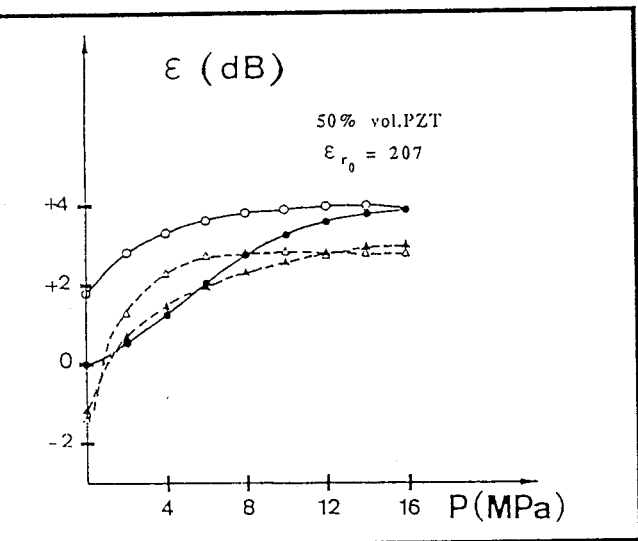


Figure V-18

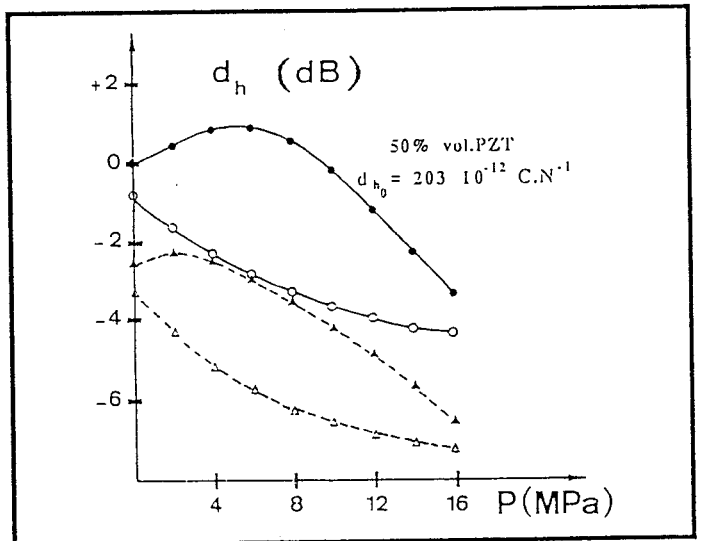


Figure V-19

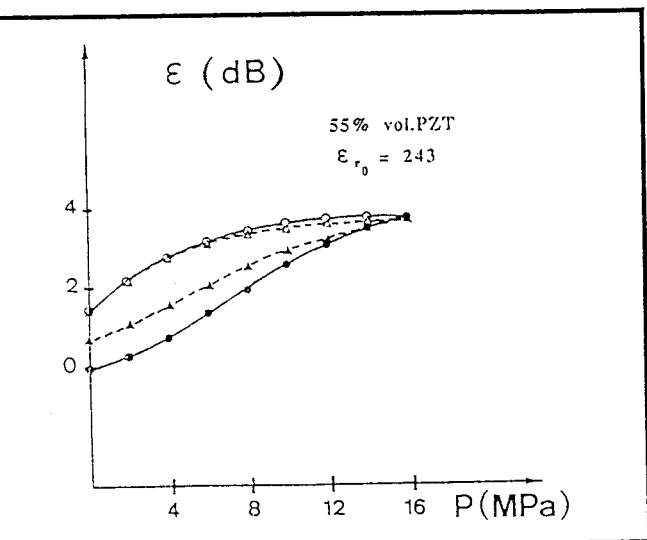


Figure V-20

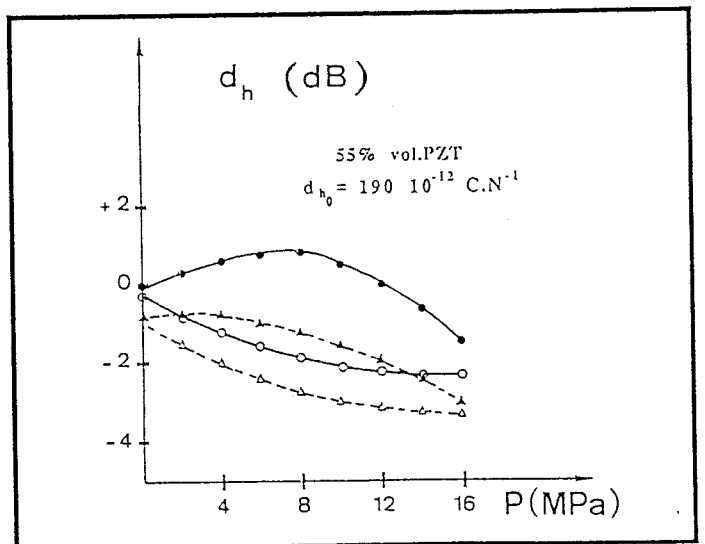


Figure V-21

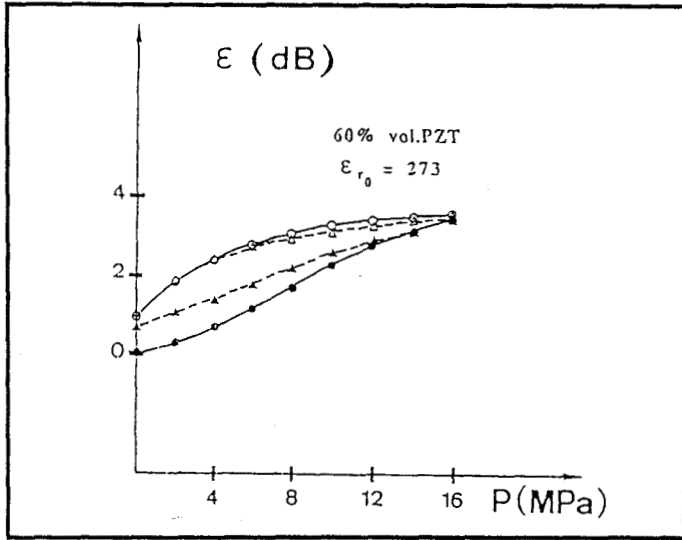


Figure V-22

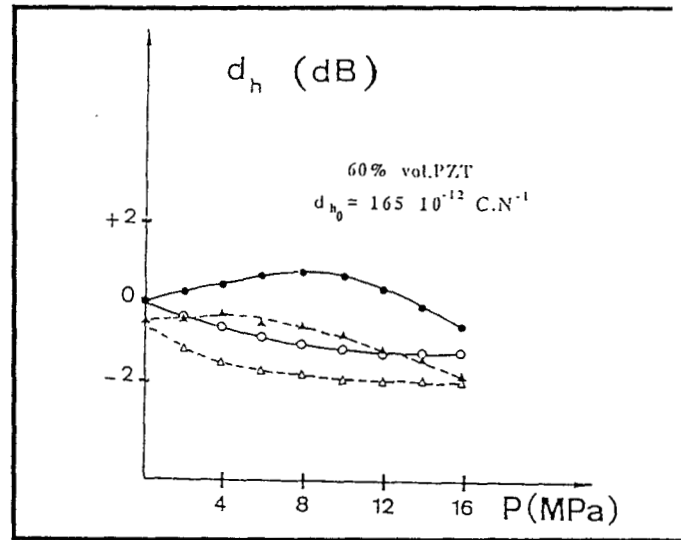


Figure V-23

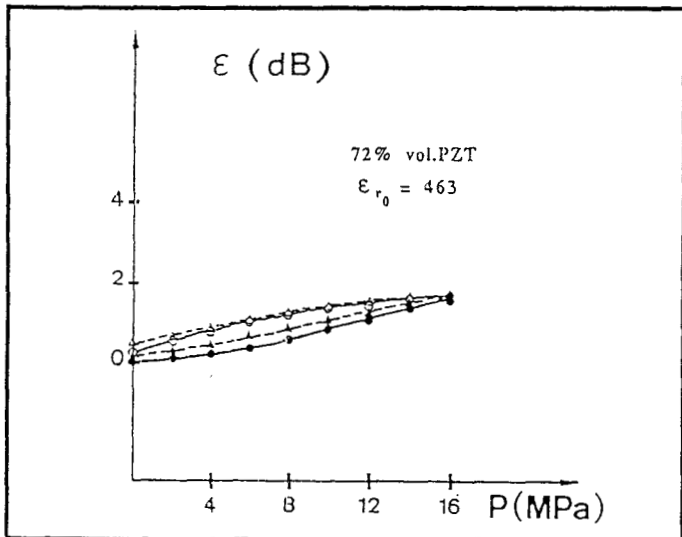


Figure V-24

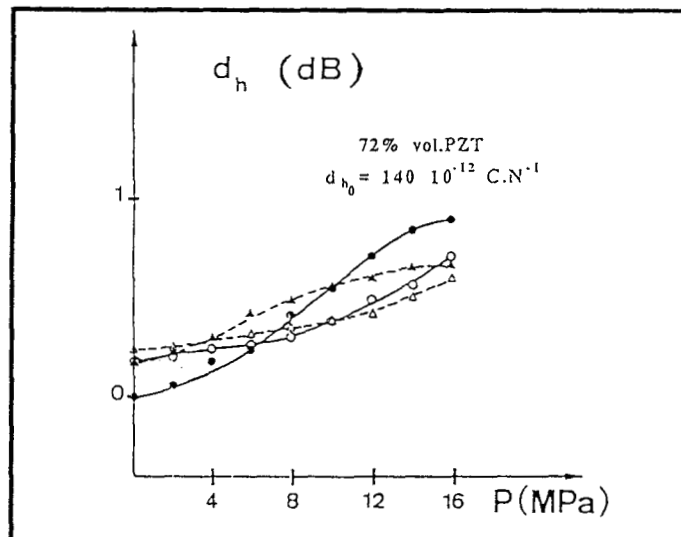


Figure V-25

Au fil des cycles, les variations de ϵ_r et d_h deviennent plus régulières et moins importantes. L'effet d'hystérésis faiblit. La valeur moyenne des d_h en pression diminue. Celle des ϵ_r augmente, sauf dans le cas des échantillons (46, 50 % vol.PZT) de faibles densités (figures V-10, 18), pour lesquels au contraire, la valeur moyenne des ϵ_r en pression diminue. Les écarts avant et après fluage, avant et après passage en pression, ont tendance à s'estomper. La répétition des cycles semble stabiliser le comportement sous pression des échantillons, au prix d'une baisse de leur facteur de mérite hydrostatique. Baisse d'autant plus importante que la porosité de l'échantillon et la pression appliquée sont fortes.

A l'issue de ce premier type d'expériences, il apparait que les caractéristiques électriques et piézoélectriques du composite dépendent de la pression hydrostatique, de sa

durée d'application, et du nombre de cycles effectués. Plus le taux de céramique est élevé, plus le composite est stable, moins il est performant.

3 - 1 - 2 - Discussion

Les variations de ϵ_r et d_h (figures V-10 à 25), mises en évidence lors des premières montées en pression, sont très différentes de celles observées sur des céramiques PZT soumises à des contraintes omnidirectionnelles [47-51] croissantes (figures V-26 à V-29).

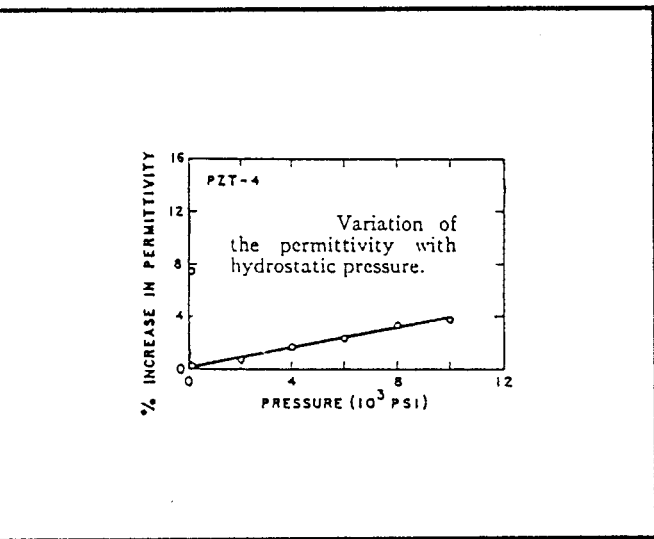


Figure V-26 : extraite de [47]

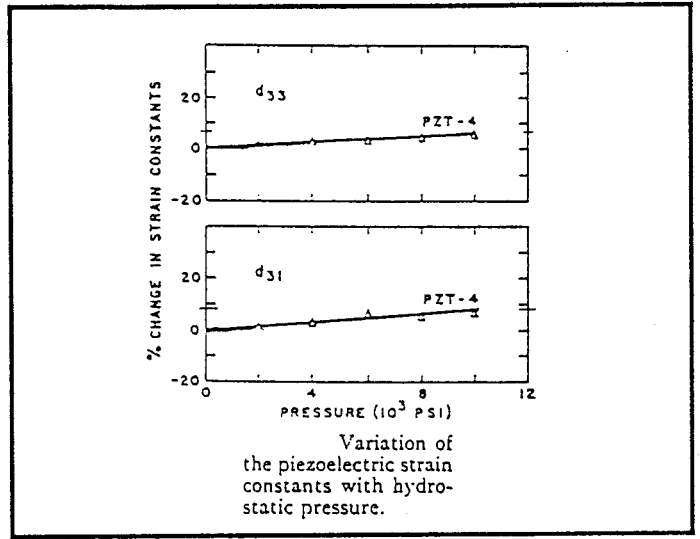


Figure V-27 : extraite de [47]

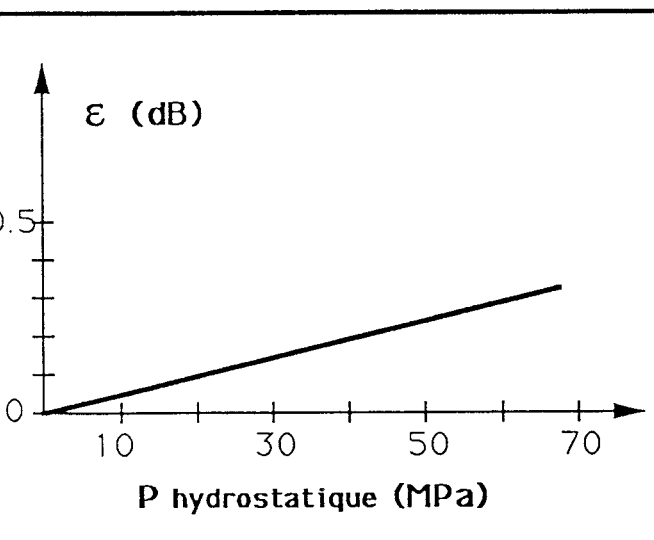


Figure V-28 : déduite de la fig. 26

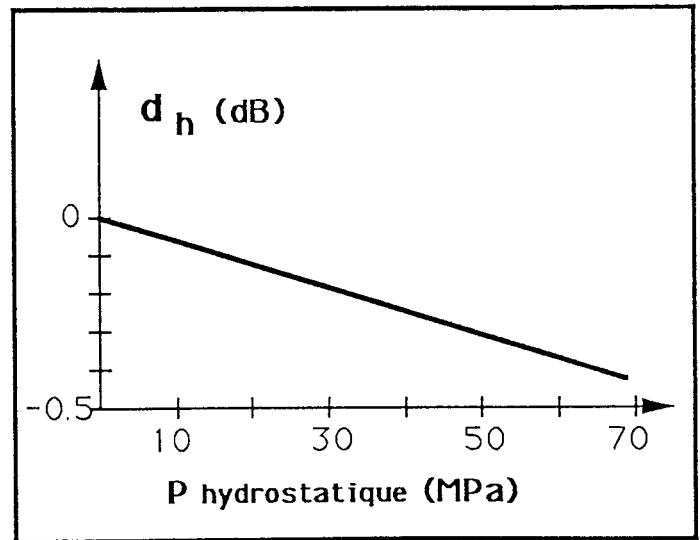


Figure V-29 : déduite de la fig. 27

Dans des conditions hydrostatiques (figures V-28, 29), les variations des constantes ϵ_r et d_h restent négligeables même pour des pressions importantes ($10 \cdot 10^3 \text{ PSI} = 69 \text{ MPa}$). Seules de fortes contraintes, parallèles à l'axe de polarisation des échantillons, peuvent être à l'origine des évolutions enregistrées.

La plupart des céramiques PZT, sollicitées en mode uniaxial [43-50], présentent des variations comparables (figures V-30 à V-33), sensibles à la température [52] et au champ électrique [4-53] ambiants. Ces variations sont principalement dues à la réorientation des domaines ferroélectriques dans une direction normale à la direction de compression [4]. Elles peuvent aussi résulter d'un changement de structure cristalline [50].

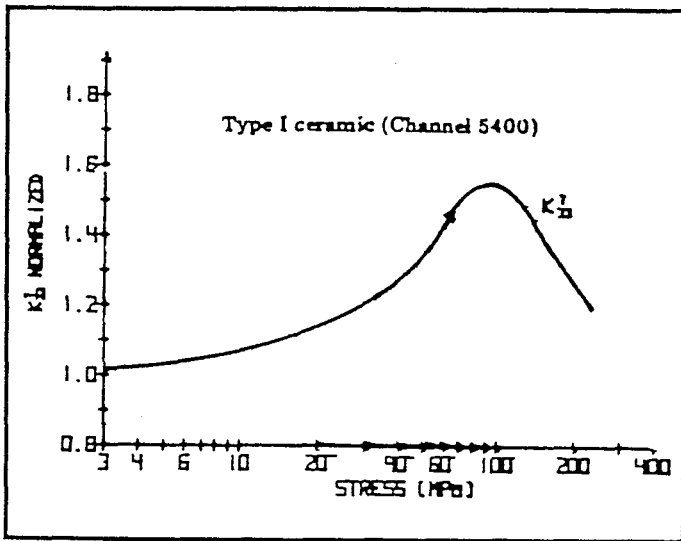


Figure V-30 : extraite de [43]

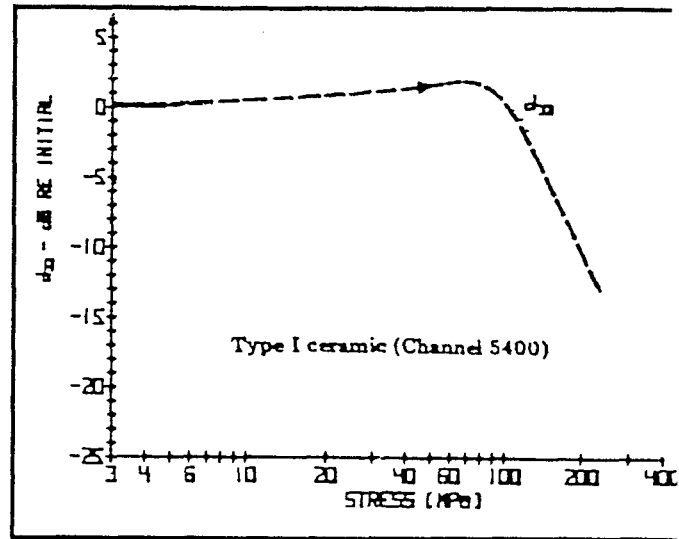


Figure V-31: extraite de [43]

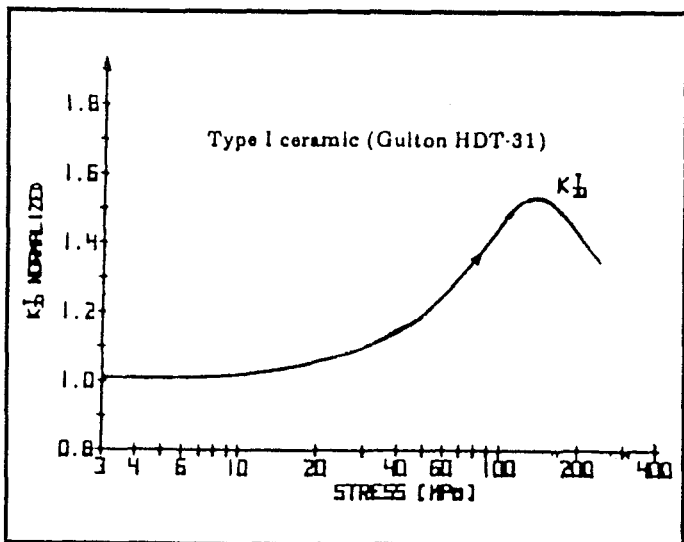


Figure V-32 : extraite de [43]

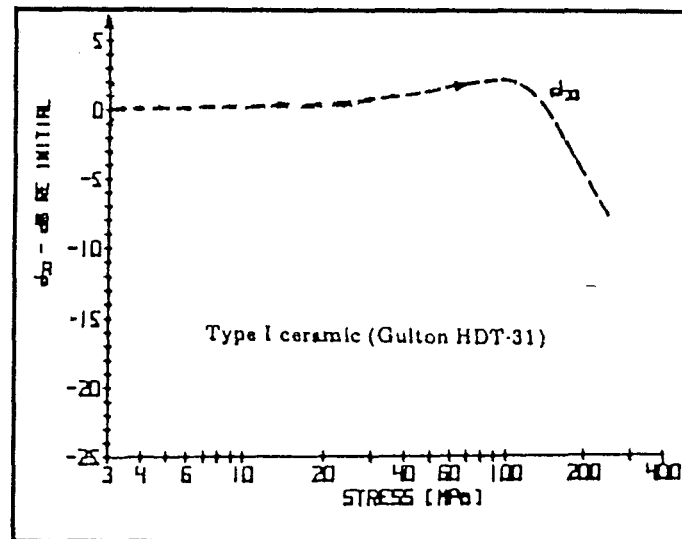


Figure V-33 : extraite de [43]

Les nombreuses similitudes existant entre nos courbes de montées en pression et celles établies en mode uniaxial (figures V-30 à 33) par MEEKS, TIMME, et BROWDER [43-50], nous conduisent à penser que la phase active (X37) du composite se comporte comme si elle était soumise à une contrainte supérieure à la pression hydrostatique et quasiment parallèle à la direction de polarisation. Nous appellerons cette contrainte : la contrainte "locale".

Le coefficient d'amplification (τ) entre la pression hydrostatique extérieure (P) et la contrainte locale (T_3) dépend de la fraction volumique de céramique (figure V-34). Pour chaque fraction volumique, nous calculons τ comme suit:

$$\tau(\text{vol.PZT}) = \frac{T_3^{\text{max}}}{P^{\text{max}}(\text{vol.PZT})} \quad (\text{V-4})$$

$T_3^{\text{max}} = 60 \text{ MPa}$ = contrainte correspondant à l'optimum de la courbe $d_{33} = f(T_3)$ établie par S. W. MEEKS, R. W. TIMME [50] pour des PZT de type I.

$P^{\text{max}}(\text{vol.PZT})$ = contrainte correspondant au d_h optimum observé lors du premier passage en pression de l'échantillon de fraction volumique (vol.PZT).

L'amplification de contrainte est d'autant plus importante que la fraction volumique de PZT est faible (figure V-34).

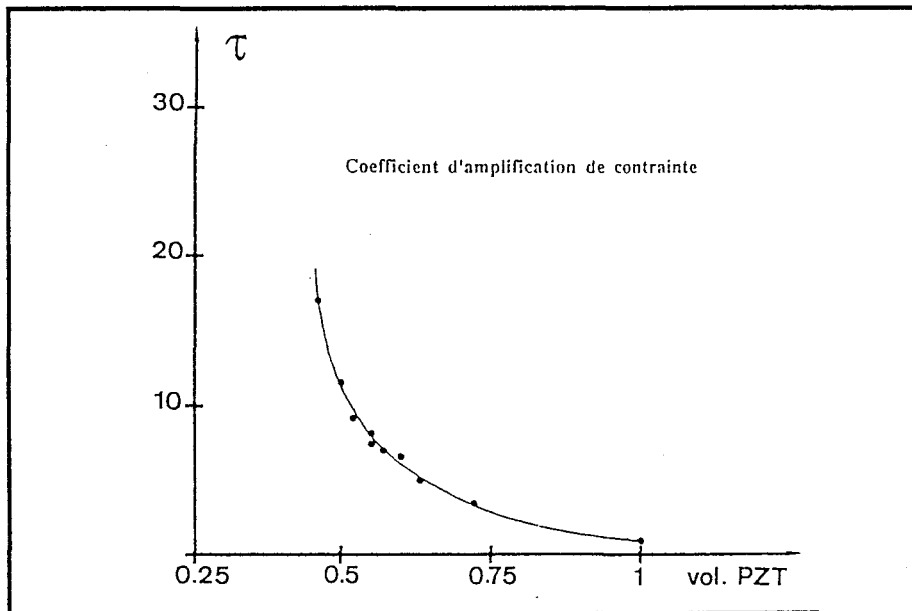


Figure V-34

Les valeurs de ϵ_r et d_h enregistrées lors de la première montée en pression, pour chaque densité (figures V-10 à 25), sont reportées figures V-35 et V-36 en fonction de la contrainte locale: $T_3 = \tau (\text{vol.PZT}) \times P$. L'ensemble de ces valeurs s'étend continûment de 7 à 184 MPa avec une dispersion négligeable (<0.2 dB).

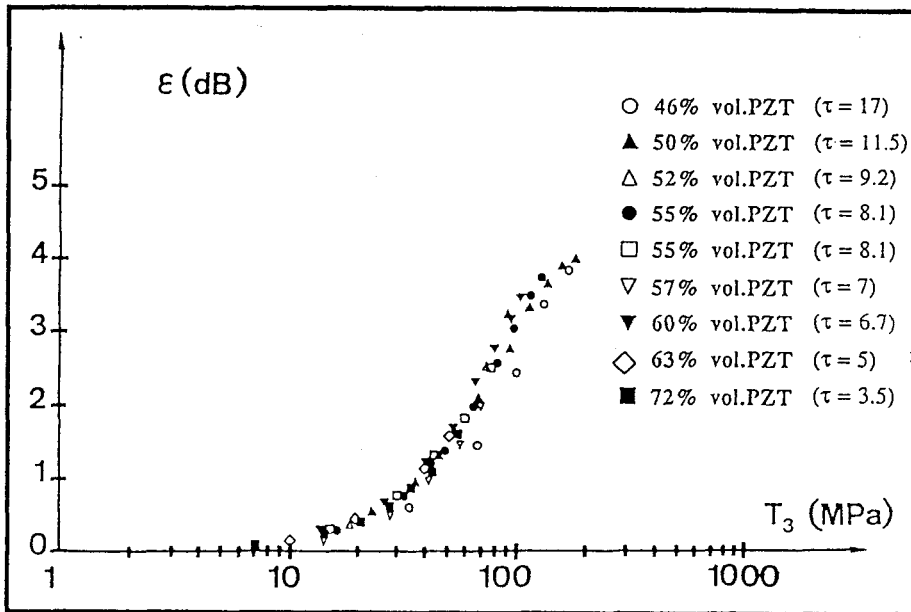


Figure V-35

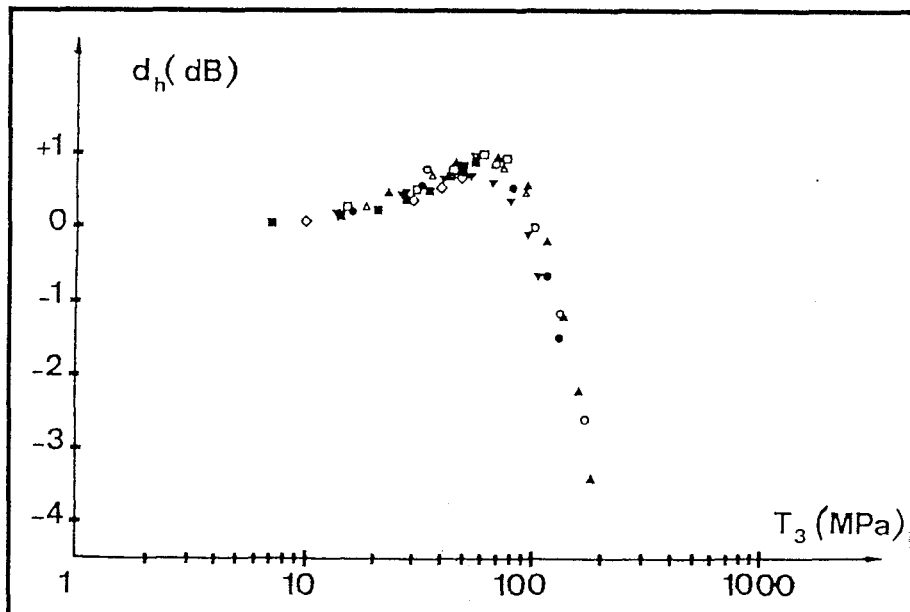


Figure V-36

Les courbes tracées à partir de ces valeurs sont similaires aux variations de ϵ_r et d_{33} mises en évidence par BROWDER et MEEKS [43] sur différentes céramiques PZT de type I (figures V-37, 38). Même si nous ne disposons pas des courbes $\epsilon_r = f(T_3)$ et $d_{33} = f(T_3)$ propres à la nuance X37, ceci confirme la prédominance du couplage longitudinal 3-3 et l'existence d'effets d'accumulation de contrainte dans la matrice piézoélectrique.

La légère différence d'amplitude (1 dB) entre les variations de d_h et d_{33} (figure V-38) provient vraisemblablement de certains couplages transverses ($2d_{31}=d_{33}-d_h$) dont on ne peut faire totalement abstraction, la contrainte locale n'étant probablement pas strictement parallèle à l'axe polaire.

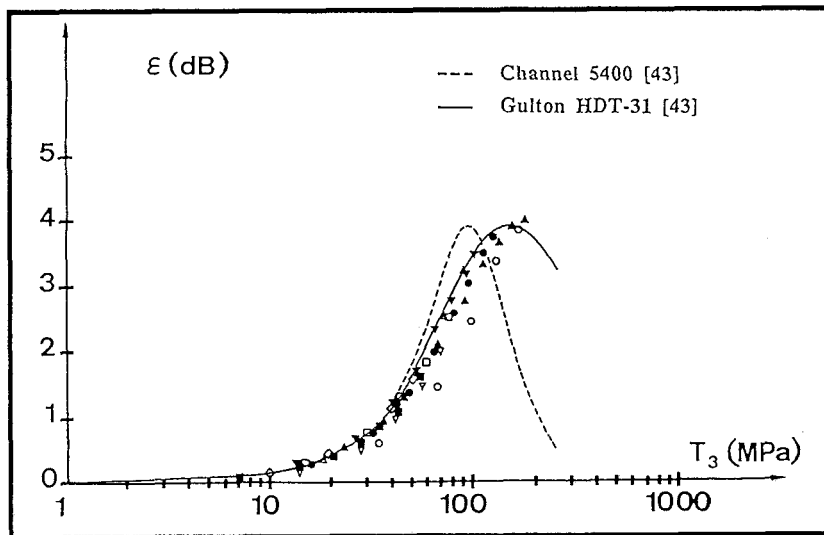


Figure V-37

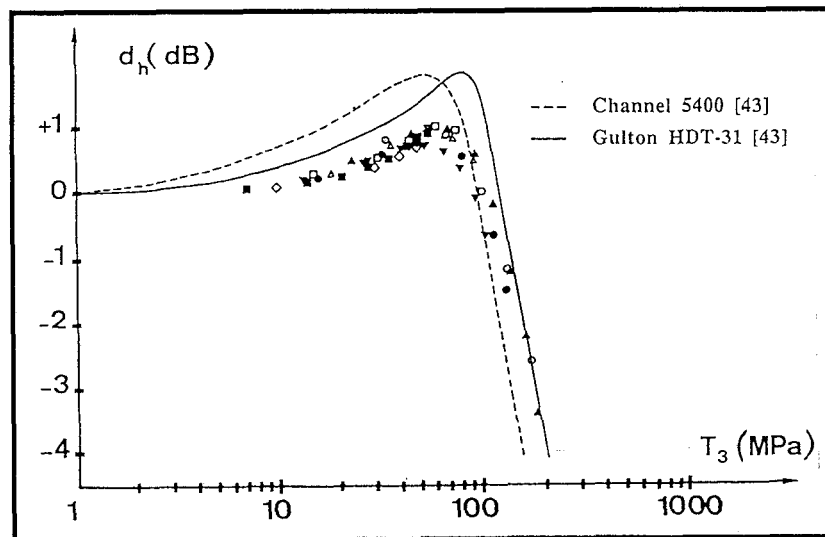


Figure V-38

3 - 1 - 3 - Interprétation des résultats

Le phénomène d'amplification de contrainte, et la prépondérance du couplage longitudinal 3-3, que nous nous sommes efforcés de mettre en évidence (§ 3-1-2), permettent d'interpréter l'ensemble des variations observées au cours de ce premier type d'expériences (figures V-10 à 25).

Sous faible pression ($T_3 < 0.5$ MPa), le comportement piézoélectrique du composite est linéaire [4]. Les charges libérées proviennent d'une légère déformation des domaines ferroélectriques. ϵ_r et d_h sont constants.

Quand la pression augmente ($0.5 \text{ MPa} < T_3 < 60$ MPa), certains domaines changent d'orientation [4]. Les parois de domaines sont momentanément plus mobiles [53]. La quantité de charges libérées croît, impliquant une non-linéarité des propriétés piézoélectriques. Les constantes d_h et ϵ_r augmentent (figures V-39, 40).

Plus la pression s'élève ($60 \text{ MPa} < T_3 < 130$ MPa), plus le nombre de domaines réorientés dans le plan perpendiculaire à l'axe de polarisation augmente [4-53]. Leur contribution au ϵ_r et au d_h décroît au fur et à mesure que l'instabilité temporaire des parois de domaines diminue [53]. Le d_h chute (figure V-39). La permittivité des domaines étant plus forte suivant la normale aux dipôles [53-54], la constante diélectrique ϵ_r (figure V-40) continue à croître. Pendant l'heure de fluage, les parois de domaines se stabilisent et perdent de leur mobilité. Quelques domaines supplémentaires changent d'orientation définitivement. D'où la dépendance en temps observée (figures V-39, 40). Le d_h diminue. Le ϵ_r augmente sensiblement.

La réorientation des domaines étant partiellement irréversible [53], les courbes $\epsilon_r = f(P)$ et $d_h = f(P)$ forment des cycles d'hystérésis. Au retour à pression atmosphérique ($T_3=0$), la polarisation rémanente du composite est réduite (dépolérisation). La permittivité est plus forte qu'initialement. La diminution de la valeur moyenne des d_h en pression au fil des cycles (figure V-39), et l'augmentation de celle des ϵ_r (figure V-40), sont d'autres conséquences de la réorientation irréversible de certains domaines.

La "stabilisation" ou "diminution de la dépendance en pression" observée après plusieurs cycles est due à la réduction du nombre de domaines susceptibles d'être réorientés par la contrainte maximale (T_3) [53].

Quand la contrainte maximale (T_3) dépasse 130 MPa, on se rapproche du maximum hypothétique des variations de ϵ_r (figure V-37) qui pourrait correspondre [50] au début d'une transition de phase: tétragonale \rightarrow rhomboédrique. L'accroissement du taux de phase rhomboédrique, susceptible d'engendrer une diminution de la polarisation spontanée [47], pourrait donc être à l'origine de la chute de la valeur moyenne des permittivités au fil des cycles (figure V-41), constatée uniquement pour les échantillons de faibles densités.

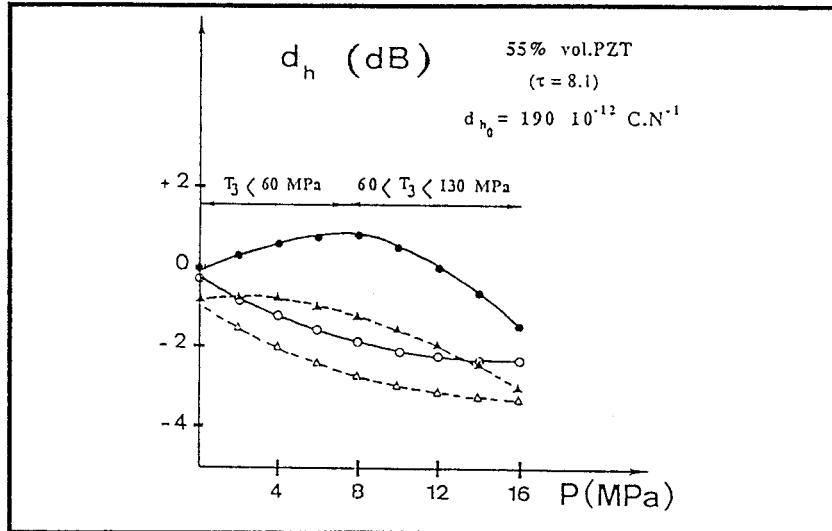


Figure V-39

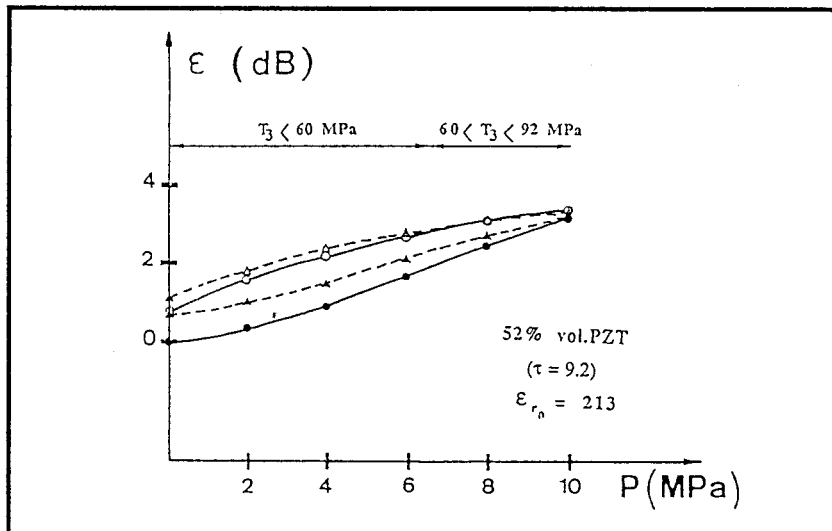


Figure V-40

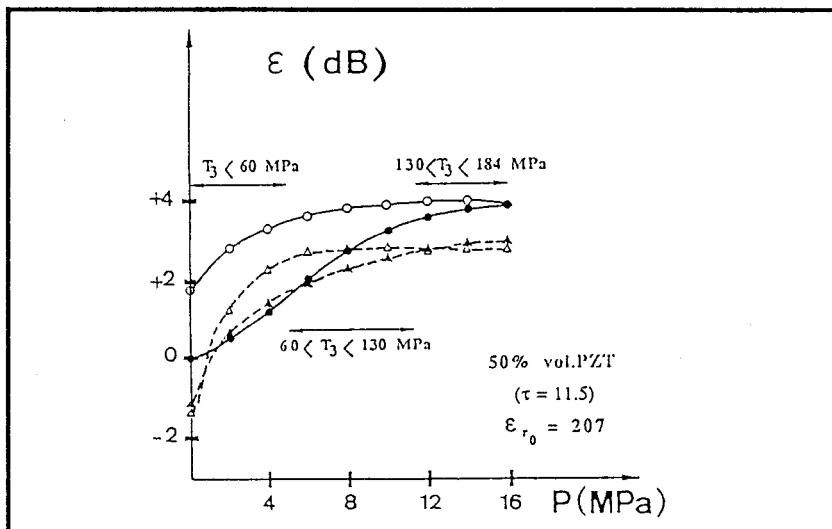


Figure V-41

3 - 2 - Etude à fraction volumique de PZT fixée

Toutes les expériences qui vont suivre, sont réalisées sur des échantillons dont la fraction volumique de PZT est égale à 55%. La contrainte locale (§ 3-1-2) que ces échantillons vont subir, sera donc environ 8 fois plus importante que la pression hydrostatique appliquée (§ 3-1-2 figure V-34).

3 - 2 - 1 - Montées-descentes en pression sans palier intermédiaire

Trois échantillons subissent une série de 30 cycles respectivement à 5, 10, 16 MPa (figures V-42, 45, 48). Les valeurs de ϵ_r et d_h sont mesurées à la pression atmosphérique et à la pression maximale, lors des 5 premiers cycles, puis tous les 5 cycles. Les variations de ϵ_r et d_h en fonction du nombre de passages en pression sont présentées figures V-43 à V-50.

a) cycles à 5 ou 10 MPa

Quand la pression hydrostatique atteint 5 ou 10 MPa ($T_3 = 40$ ou 80 MPa), certains domaines changent d'orientation [4]. Les parois de domaines sont temporairement dans un état très instable. Les constantes ϵ_r et d_h mesurées pendant la courte durée des paliers en pression (5 mn) sont donc supérieures à celles mesurées initialement à pression atmosphérique (figures V-43, 44, 46, 47). Plus la pression est élevée, plus la proportion de domaines susceptibles de changer d'orientation augmente [4]. Les constantes ϵ_r et d_h mesurées sous 10 MPa (figures V-46, 47) sont donc supérieures à celles mesurées sous 5 MPa (figures V-43, 44).

Le nombre de parois de domaines qui trouvent une position d'équilibre stable, en cinq minutes, sous pression, est probablement faible. Quelques domaines sont réorientés de façon irréversible. Quand la pression est relâchée, la plupart retournent à leur position d'origine, d'où une recrudescence momentanée de la mobilité des parois de domaines. Les valeurs de ϵ_r et d_h mesurées entre deux cycles consécutifs, sont donc inférieures aux valeurs sous pression et supérieures aux valeurs initiales (figures V-43, 44, 46, 47). La proportion des domaines temporairement réorientés par la contrainte locale (T_3) étant plus forte sous 10 MPa que sous 5 MPa, les constantes ϵ_r et d_h mesurées entre deux cycles à 10 MPa (figures V-46, 47) sont supérieures à celles mesurées entre deux cycles à 5 MPa (figures V-43, 44).

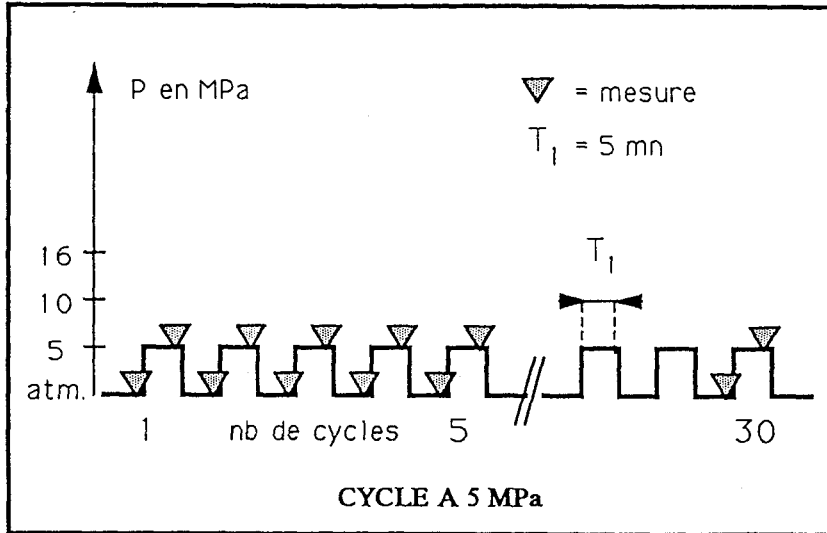


Figure V-42

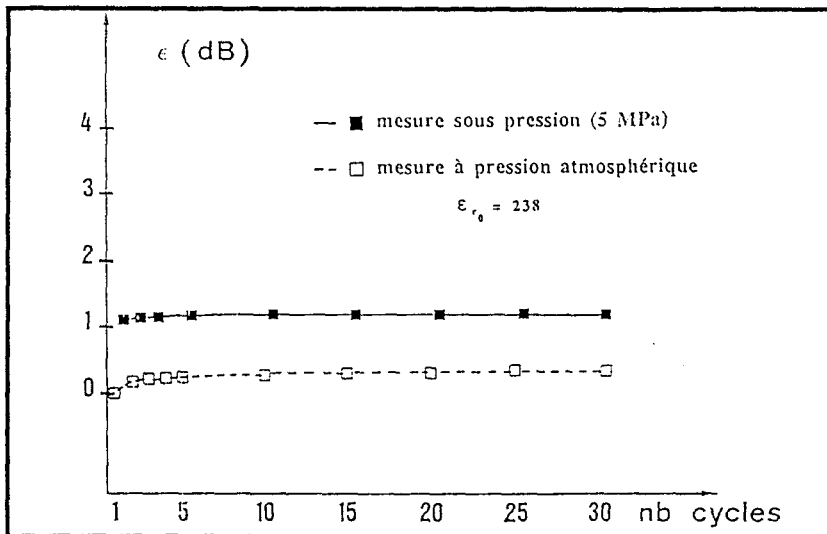


Figure V-43

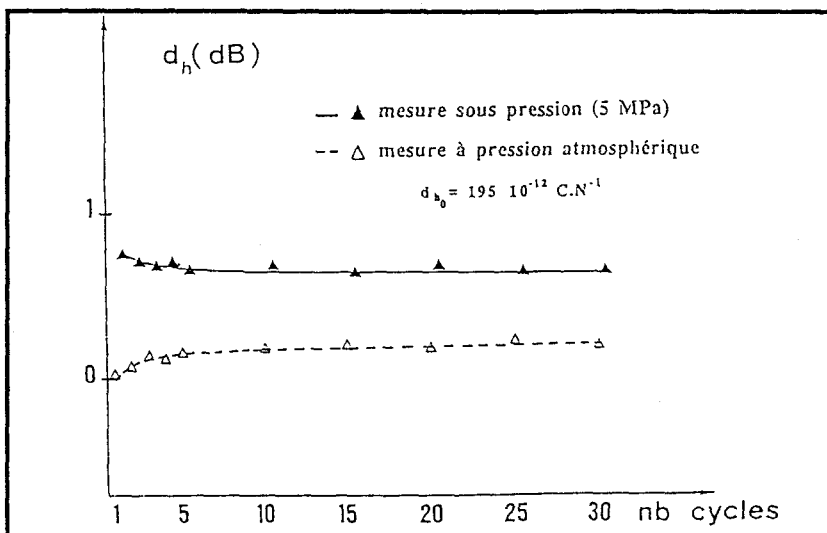


Figure V-44

Les domaines qui changent définitivement d'orientation lors du premier passage en pression ne sont plus susceptibles d'être réorientés lors du second, et ainsi de suite... La réduction au fil des cycles du nombre de domaines réorientables est responsable de la "stabilisation" ou "diminution de la dépendance en pression" des constantes ϵ_r et d_h .

Avant de se stabiliser, la valeur moyenne des ϵ_r en pression augmente (figures 43, 46), celle des d_h diminue (figures V-44, 47), donc celle des facteurs de mérite hydrostatiques (tableau V-1) diminue encore plus : $d_h \cdot g_h = \frac{d_h^2}{\epsilon_0 \epsilon_r}$

	cycle à 5 Mpa	cycle à 10 MPa
$\overline{d_h \cdot g_h}$ (dB) au 1 ^{er} cycle	+0.21	+0.32
$\overline{d_h \cdot g_h}$ (dB) au 30 ^{ème} cycle	+0.06	-0.39
$\Delta \overline{d_h \cdot g_h}$ (dB)	-0.15	-0.71

(tableau V-1)

Plus la pression est élevée, plus la valeur moyenne des $d_h \cdot g_h$ chute (tableau V-1), et plus la "stabilisation" des constantes ϵ_r et d_h s'avère longue : 5 cycles à 5 MPa (figures V-43, 44), et pratiquement 30 cycles à 10 MPa (figures V-46, 47) sont nécessaires pour que ces constantes atteignent des valeurs fixes à l'ambiante et en pression.

b) cycles à 16 MPa

Lorsque la pression atteint 16 MPa, la contrainte locale ($T_3 = 128$ MPa) engendre un grand nombre de réorientations pour la plupart irréversibles. Le composite est dès le premier cycle considérablement dépolarisé. Les constantes ϵ_r sous 16 MPa sont donc très élevées (figure V-49), et les d_h très faibles (figure V-50).

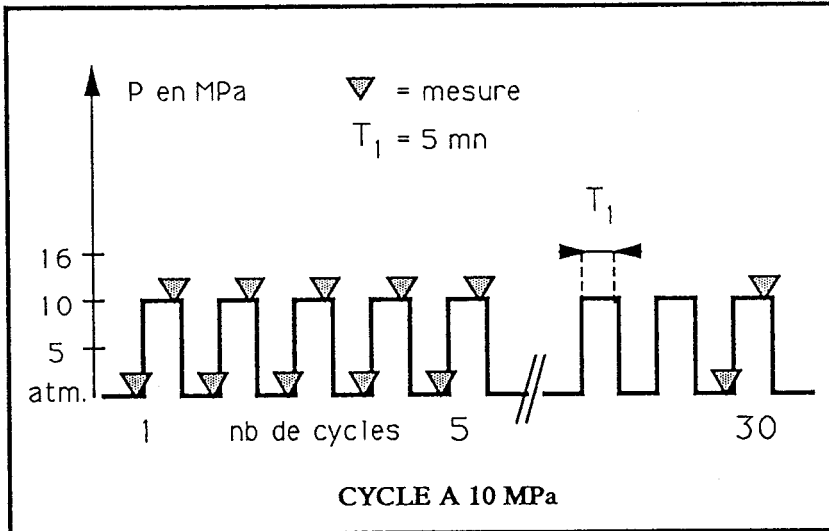


Figure V-45

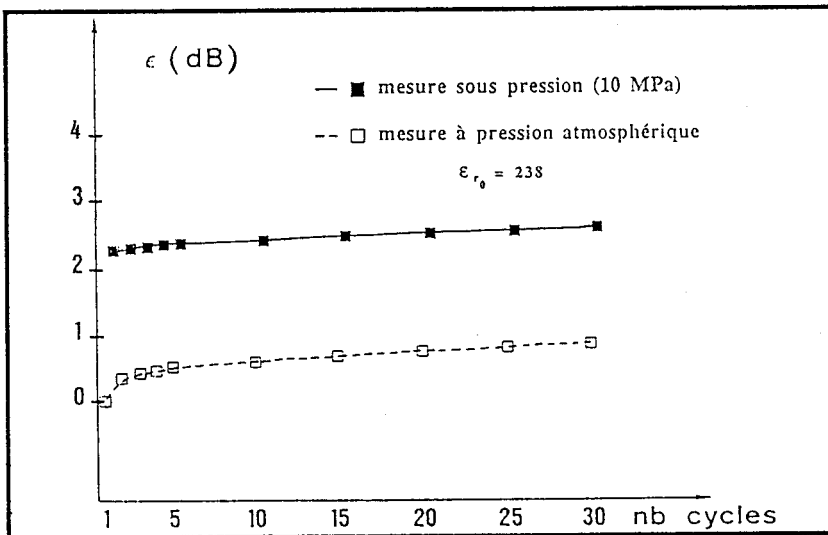


Figure V-46

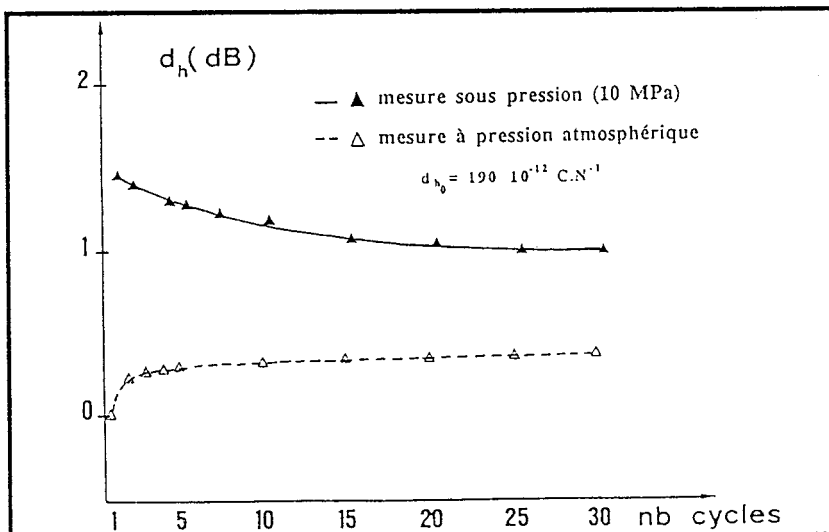


Figure V-47

Quand la pression est relâchée brutalement, la relaxation des contraintes internes dans la phase active du composite permet à quelques domaines de retrouver leur position d'origine. Les parois sont temporairement plus mobiles. Les d_h au retour à pression atmosphérique bien que faibles sont donc supérieurs à ceux mesurés sous 16 MPa (figure V-50).

Au fur et à mesure que le nombre de domaines susceptibles d'être réorientés diminue, les d_h à l'ambiante et en pression chutent (figure V-50). Ils deviennent rapidement inférieurs au d_h initial, et ne se stabilisent qu'à partir du trentième cycle. Leur dégradation durant les 5 premiers cycles de cette série de 30 (figure 50), est toutefois moins importante (tableau V-2) que celle observée au paragraphe précédant (§ 3-1-1 figure V-21). Le composite est donc sensible à la vitesse avec laquelle les cycles sont effectués (ou autrement dit à la durée d'application de la pression).

	5 ^{ème} cycle à 16 MPa § 3-1 fig. 21	5 ^{ème} cycle à 16 MPa § 3-2 fig. 50
d_h (dB) à P atm.	-0.8	+0.2
d_h (dB) à 16 MPa	-3	-0.6

(tableau V-2)

Compte tenu de la forte dépolarisation que subit le composite lors du premier passage en pression, et de son augmentation au fil des cycles, la permittivité à l'ambiante croît avant d'atteindre au trentième cycle (figure V-49) une valeur fixe (2 dB) très supérieure à la valeur initiale.

c) conclusion

Au fil des cycles, la dépendance en pression des constantes ϵ_r et d_h s'atténue. La valeur moyenne des $d_h.g_h$ en pression (tableau V-1) diminue, puis se stabilise. La "stabilisation" du composite est d'autant plus lente et dommageable que la pression maximale des cycles est élevée, et que la vitesse à laquelle les cycles sont effectués est faible.

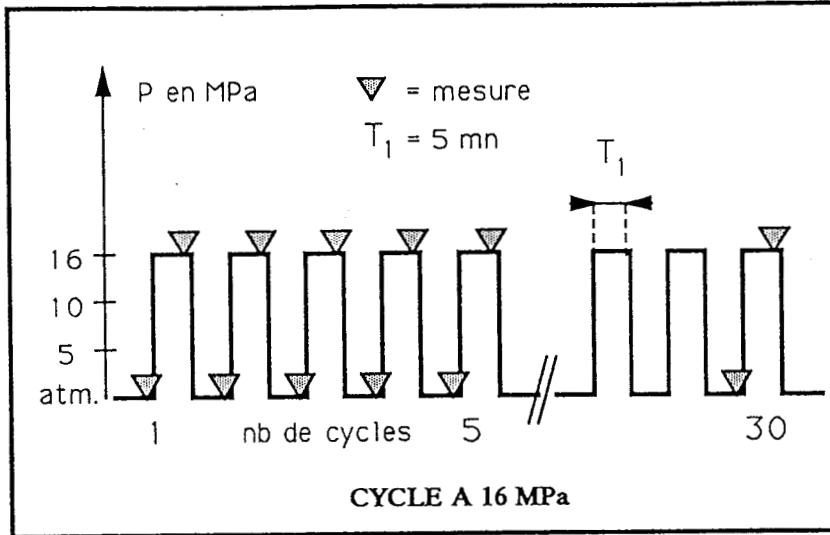


Figure V-48

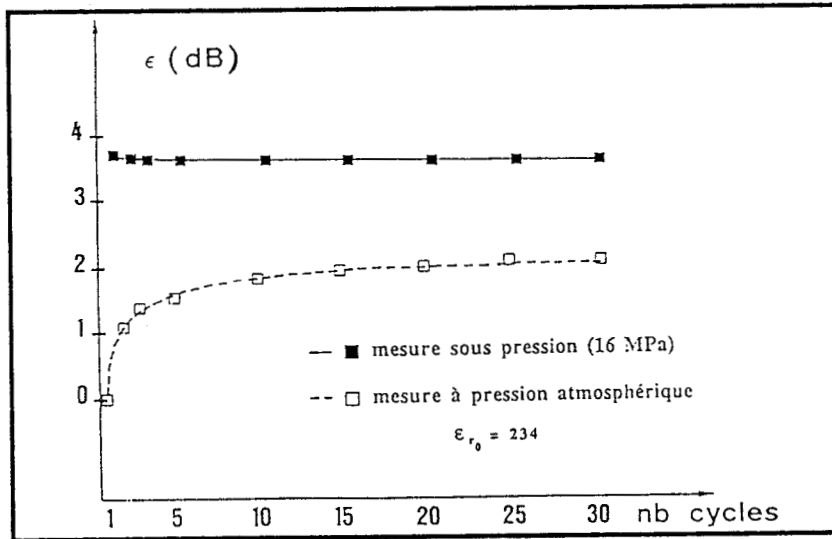


Figure V-49

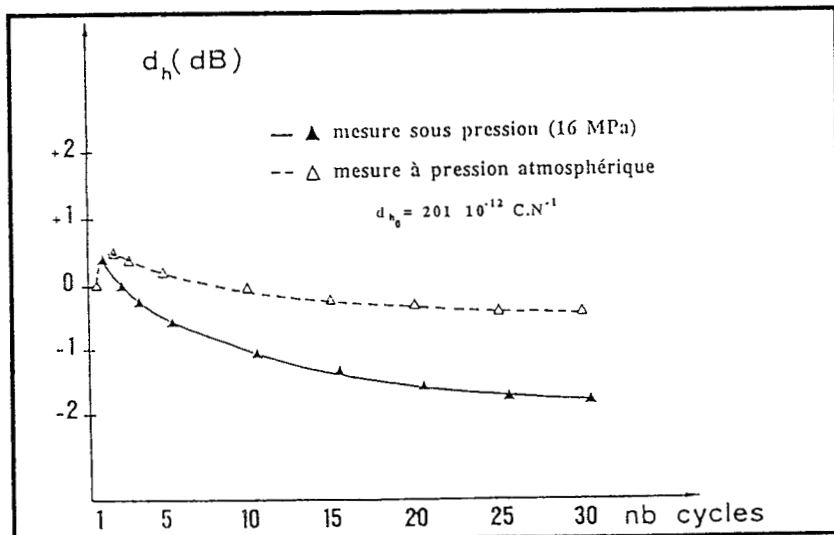


Figure V-50

3 - 2 - 2 - Vieillissement sous pression

Trois échantillons sont exposés pendant 100 heures respectivement à 5, 10, 16 MPa, et font l'objet de mesures réparties dans le temps (figures V-51 à V-56).

a) résultats

Les importantes valeurs de ϵ_r et d_h mesurées 10 minutes après application de la pression ne sont que temporaires. Pendant toute la durée du "fluage", les valeurs de ϵ_r augmentent sensiblement (figures 51, 53, 55), celles de d_h diminuent (figures 52, 54, 56). Cependant, au fil du temps, la dépendance en pression des caractéristiques s'atténue : ϵ_r et d_h semblent converger vers des valeurs constantes, d'autant plus fortes pour ϵ_r et faibles pour d_h , que la pression appliquée est élevée (figures V-55, 56). Au cours de la première heure de "fluage", le vieillissement du composite est important. Il ralentit sensiblement par la suite et suit une loi en $\log(t)$. Globalement, plus la pression appliquée est élevée, plus le vieillissement est rapide et sévère (diminution du $d_h \cdot g_h$).

b) interprétation des résultats

L'instabilité des parois de domaines après application de la pression engendre une forte augmentation des constantes ϵ_r et d_h . Par la suite, la mobilité des parois diminue et le nombre de domaines définitivement réorientés dans le plan perpendiculaire à l'axe de polarisation croît (la polarisation rémanente du composite diminue). La chute des d_h résulte du cumul des deux phénomènes précédents. La faible croissance des ϵ_r est surtout significative de la dépolarisation progressive du composite. Plus la pression est élevée, plus la dépolarisation est importante, et plus les parois de domaines se stabilisent vite [53]. Le vieillissement du composite est donc plus rapide et préjudiciable sous une forte pression que sous une faible.

3 - 2 - 3 - Vieillissement après relâchement de la pression

Trois échantillons sont exposés pendant 2 heures respectivement à 5, 10, 16 MPa. Puis, la pression est relâchée brutalement et chacun d'eux fait l'objet de mesures à la pression atmosphérique, réparties sur environ 100 heures (figures V-57 à V-62).

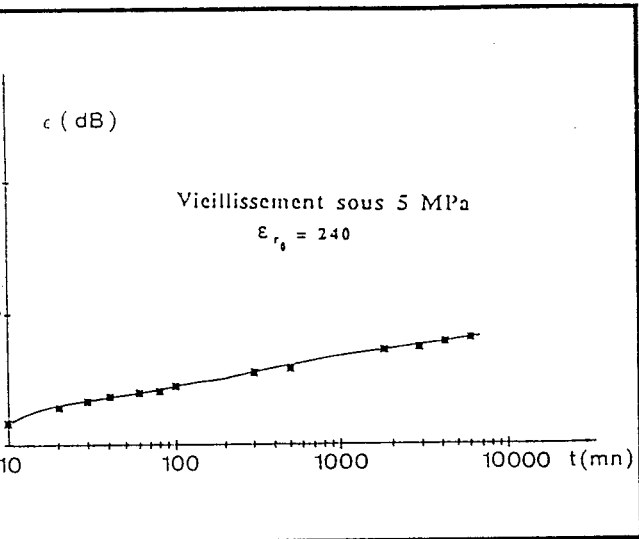


Figure V-51

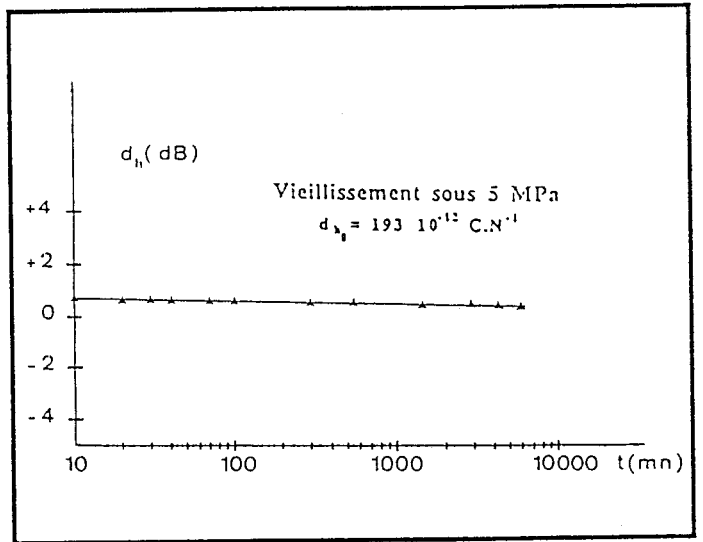


Figure V-52

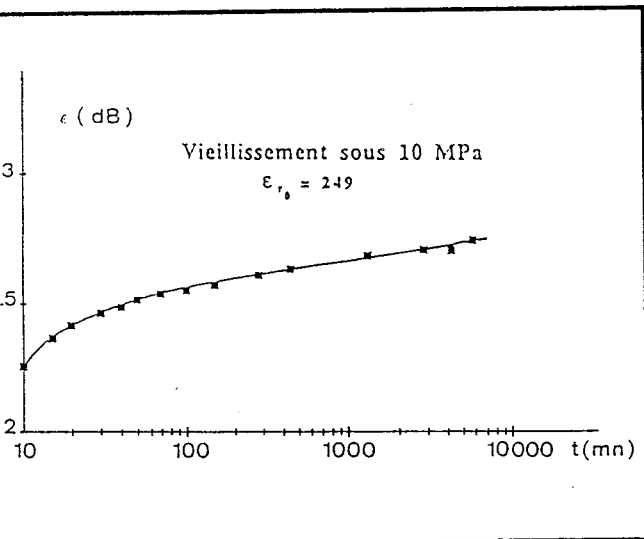


Figure V-53

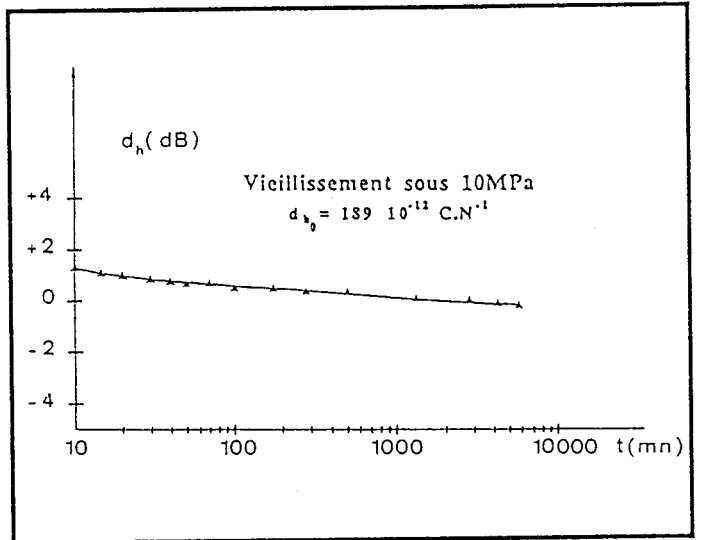


Figure V-54

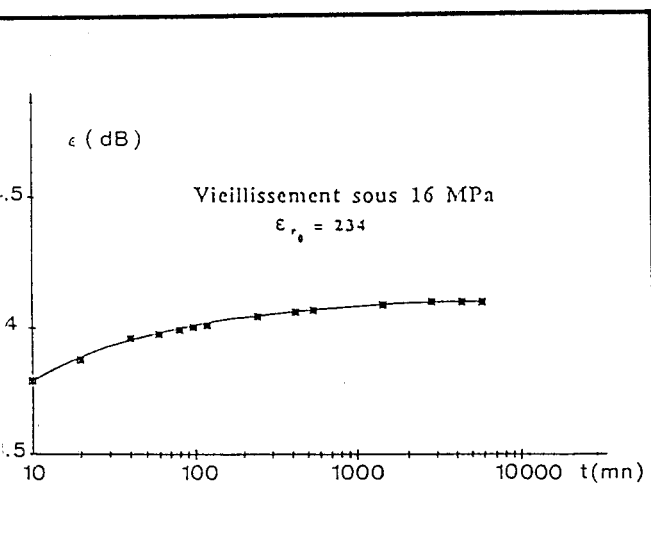


Figure V-55

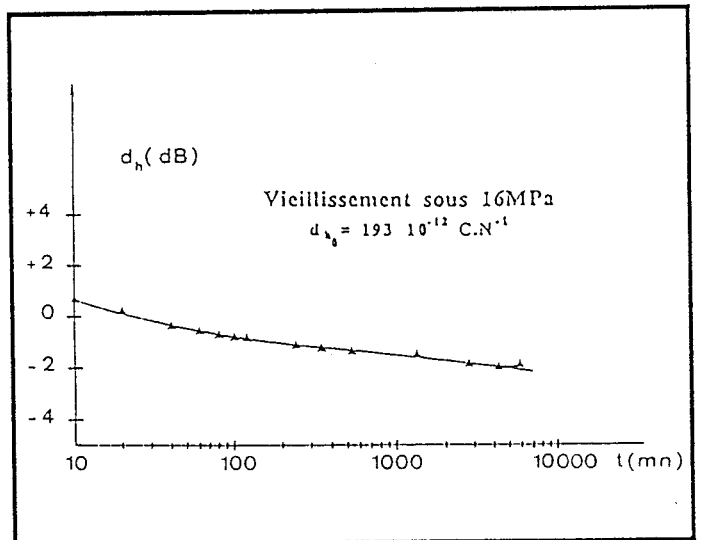


Figure V-56

a) résultats

La permittivité chute d'abord ($t < 100$ mn) rapidement, puis plus lentement suivant une loi en $\log(t)$ (figures V-57, 59, 61). La vitesse initiale de décroissance est d'autant plus grande que la contrainte imposée est élevée. La valeur finale, vers laquelle la permittivité ϵ_r converge, est supérieure à la valeur mesurée avant application de la pression. Cette valeur finale est d'autant plus importante que la pression appliquée est élevée.

Le d_h a aussi tendance à diminuer au cours du temps. Sa décroissance survient aussitôt (figures V-58, 60), ou seulement après une croissance d'environ 100 minutes (figure V-62). Elle suit une loi en $\log(t)$ et s'avère d'autant plus rapide que la pression initialement imposée est importante.

b) interprétation des résultats

Lorsque la pression est relâchée brutalement, la relaxation des contraintes dans la phase active du composite permet à certains domaines réorientés de retourner à leur position d'origine. La mobilité des parois de domaines augmente momentanément puis diminue au fur et à mesure que les parois se stabilisent. L'action conjuguée des deux phénomènes précédents (retour de certains domaines à leur position d'origine et stabilisation des parois) est vraisemblablement responsable des variations de ϵ_r et d_h enregistrées ($t < 100$ mn) à court terme. Nous pensons qu'ensuite, seule la stabilisation des parois prédomine et engendre le vieillissement "lent" observé à plus long terme. La valeur finale de la permittivité est supérieure à la valeur initiale (avant application de la pression) car certains domaines ont été réorientés définitivement. Plus la pression est forte, plus le nombre de réorientations irréversibles est important, plus la valeur finale de la permittivité est élevée.

3 - 3 - Conclusion

Cette étude en pression non exhaustive est riche d'enseignements. Nous constatons tout d'abord la dépendance en pression des propriétés du composite:

- sensibilité à la pression hydrostatique,
- sensibilité au nombre de cycles (stabilisation),
- sensibilité à la vitesse avec laquelle les cycles sont effectués, ou au temps d'application de la pression (vieillessement).

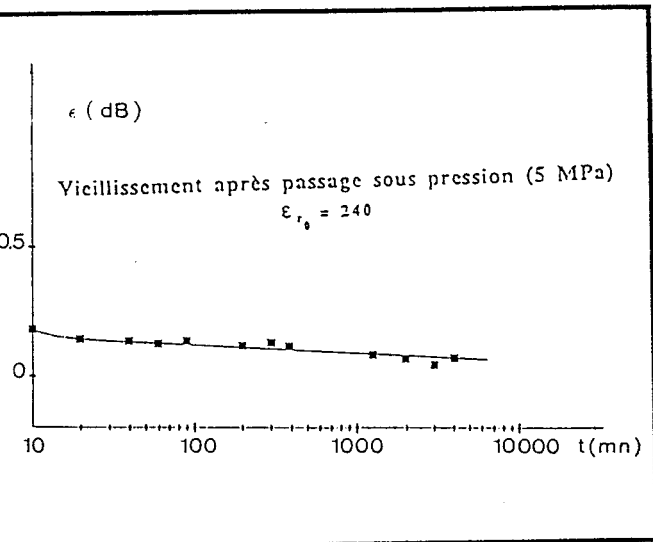


Figure V-57

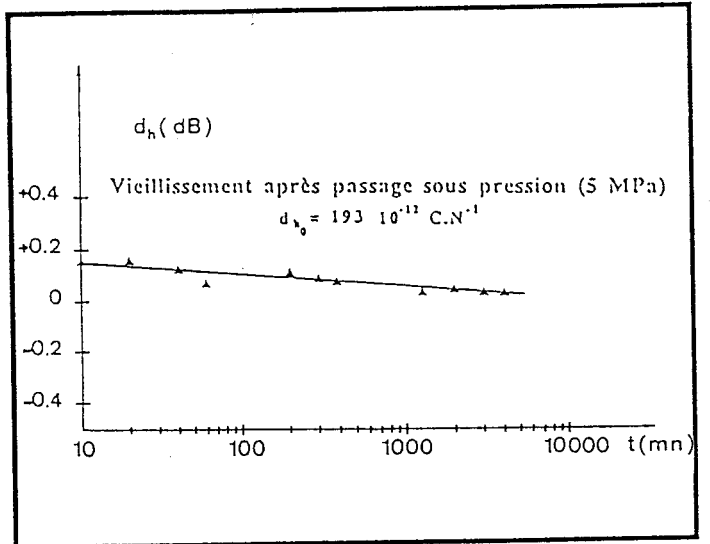


Figure V-58

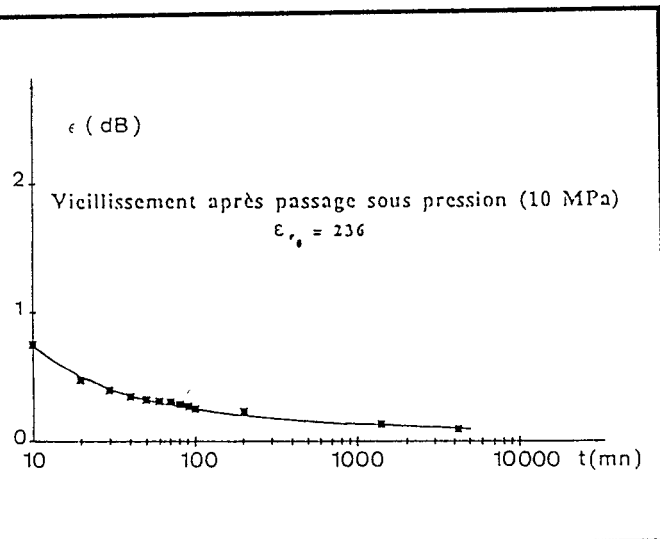


Figure V-59

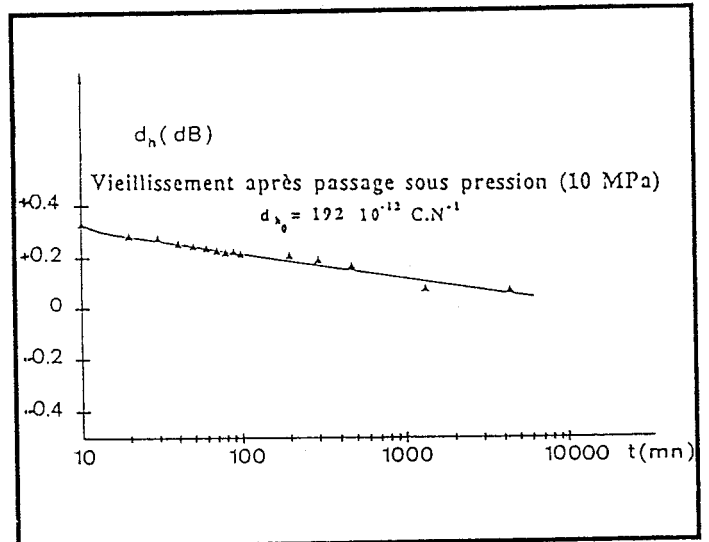


Figure V-60

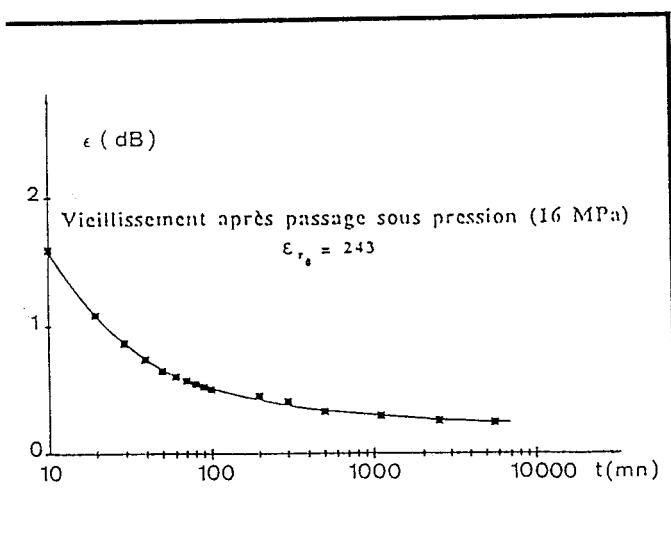


Figure V-61

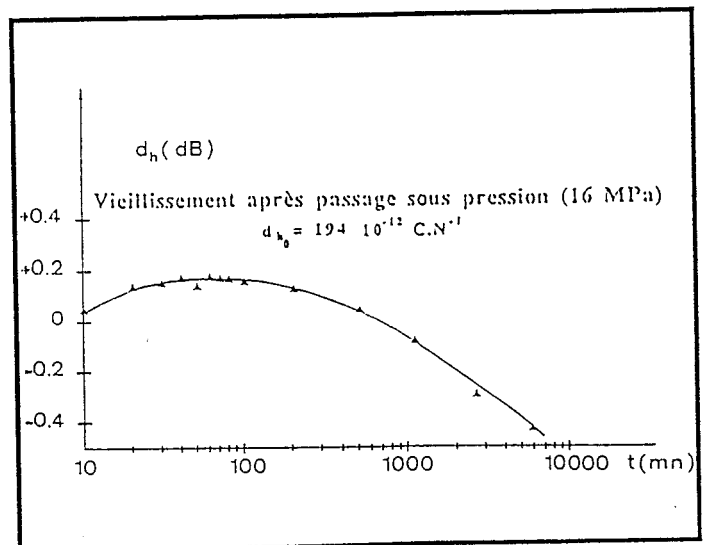


Figure V-62

Nous voyons qu'il est nécessaire de réaliser un compromis entre les performances acoustiques et la stabilité en pression, en jouant sur la fraction volumique de PZT.

Nous montrons que la phase active du composite se comporte comme si elle était soumise à une contrainte, parallèle à l'axe de polarisation, proportionnelle à la pression hydrostatique, augmentant de façon exponentielle avec la porosité (§ 3-1-2 figure V-34).

Enfin, nous nous efforçons d'interpréter physiquement les variations en pression des caractéristiques du composite, en reprenant les discussions théoriques sur le comportement d'une céramique classique soumise à de fortes contraintes uniaxiales (réorientation des domaines ferroélectriques dans le plan perpendiculaire à l'axe de compression [52 à 54], changement de structure cristalline [50]).

CHAPITRE VI

MODELISATION

1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'optimisation de la conception des composites passe par la compréhension de leur fonctionnement et par la prédiction de leurs propriétés, c'est à dire par une modélisation de leur comportement.

De nombreux modèles à deux ou trois dimensions ont été développés pour déterminer les propriétés effectives d'un système multiphasé à partir des caractéristiques respectives des différentes phases, de leurs proportions volumiques et de la connectivité de l'ensemble [7-34-37-40-55-56-57-58-59]. Les phénomènes se produisant aux interfaces sont rarement pris en compte. Deux modèles simples servent souvent de référence : les associations "série" et "parallèle" (A3).

La modélisation d'un composite de connectivité 3-3 (imprégné ou non) est un problème difficile qui a déjà fait l'objet de quelques études [34-57-58-59-60].

1 - 1 - Modèle de Wersing [57]

W. WERSING *et al.* [57] considèrent que la céramique poreuse est constituée d'un assemblage de cellules cubiques identiques (figure VI-1) que l'on peut étudier séparément.

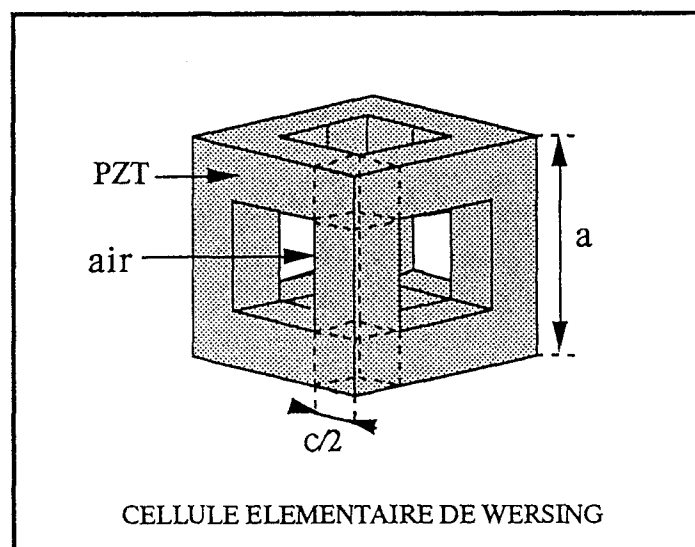


Figure VI-1

La fraction volumique de céramique s'exprime par:

$$v = 3x^2 - 2x^3 \quad \text{où} \quad x = \frac{c}{a} \quad (\text{VI-1})$$

On obtient [57]:

$$\epsilon_{33} = {}^1\epsilon_{33} x^2 \quad (\text{VI-2})$$

$$d_{33} = {}^1d_{33} \left[1 - x + \frac{x^2}{2 - x} \right] \quad (\text{VI-3})$$

$$d_{31} = {}^1d_{31} \frac{x}{2 - x} \quad (\text{VI-4})$$

L'indice (1) désigne les constantes propres à la phase active (céramique X37):

$${}^1\epsilon_{33} = 1230,$$

$${}^1d_{33} = 305 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1},$$

$${}^1d_{31} = -129 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}.$$

Les constantes du milieu effectif (composite) n'ont pas d'indice. Leurs variations sont portées figures VI-2 à VI-5.

Les prévisions de ce modèle en matière de permittivité (figure VI-2) sont bonnes.

En matière de d_{31} (figure VI-4), le modèle donne une approche correcte du comportement expérimental, mais les valeurs prédites aux faibles densités (vol.PZT < 60%) sont relativement éloignées de la réalité.

Enfin, les variations théoriques des constantes d_{33} et d_h (figures VI-3, 5) sont très différentes de celles observées expérimentalement.

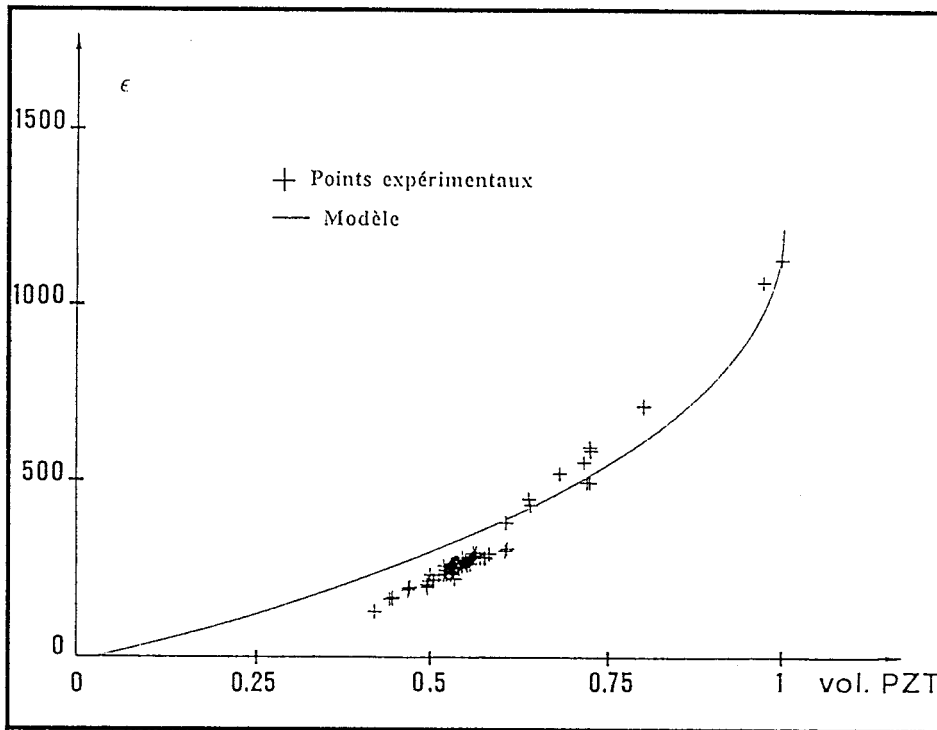


Figure VI-2

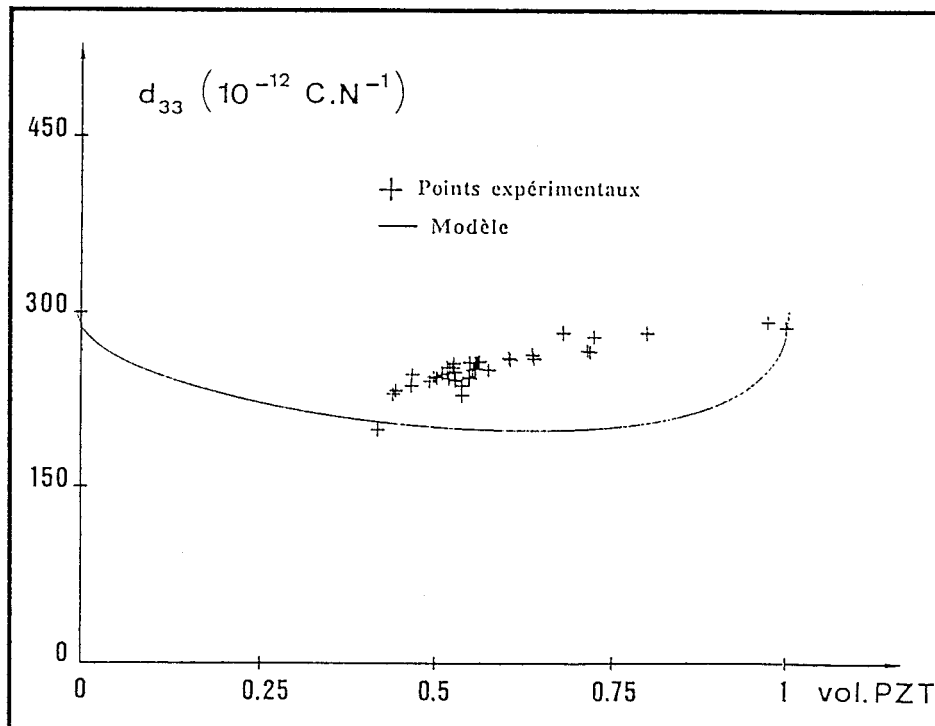


Figure VI-3

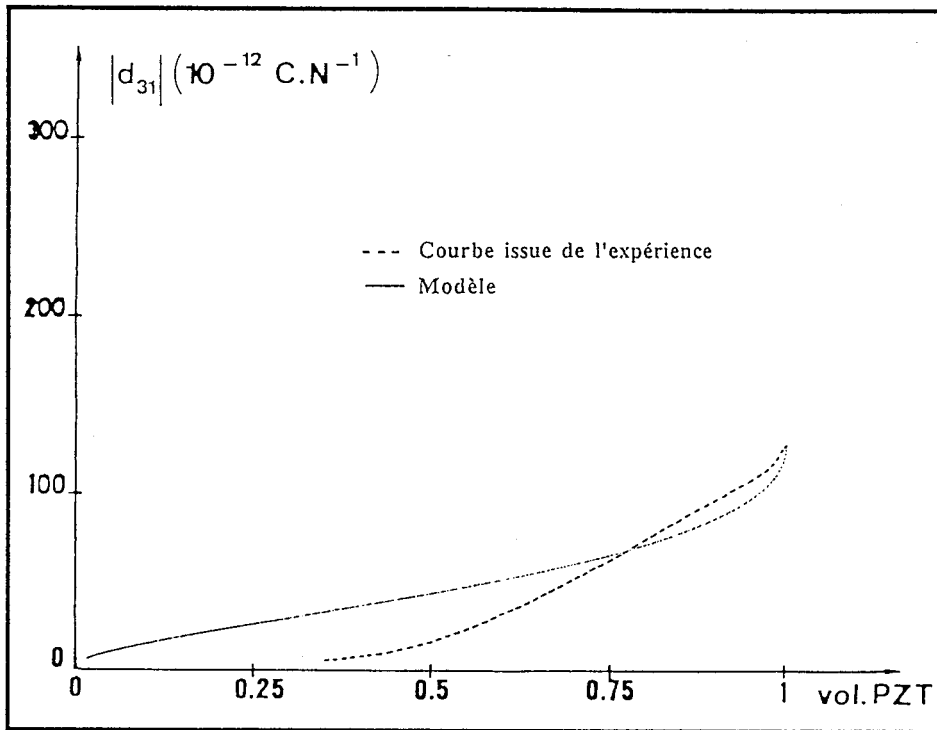


Figure VI-4

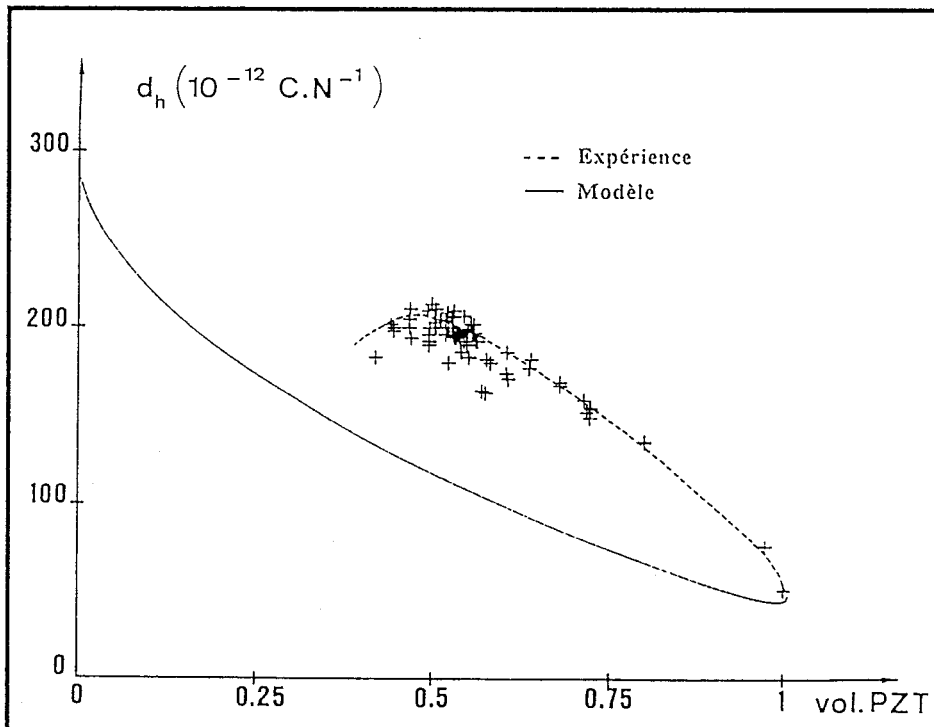


Figure VI-5



1 - 2 - Modèle "self consistent" [58]

M. LAGIER *et al.* [58] considèrent que le composite Z37 est constitué d'une part, de céramique piézoélectrique (X37) jouant le rôle de matrice, d'autre part, de trous sphériques (air) jouant le rôle d'inclusions.

On suppose qu'il existe un matériau homogène équivalent, résultant d'un processus de moyenne statistique sur la composition réelle du composite, renfermant 2 types d'inclusion (figure VI-6):

- l'une de rayon a , possédant les propriétés de l'air ($^2\lambda, ^2\mu, ^2\varepsilon$),
- l'autre de rayon b , possédant les propriétés de la céramique X37 ($^1\lambda, ^1\mu, ^1\varepsilon, ^1d$).

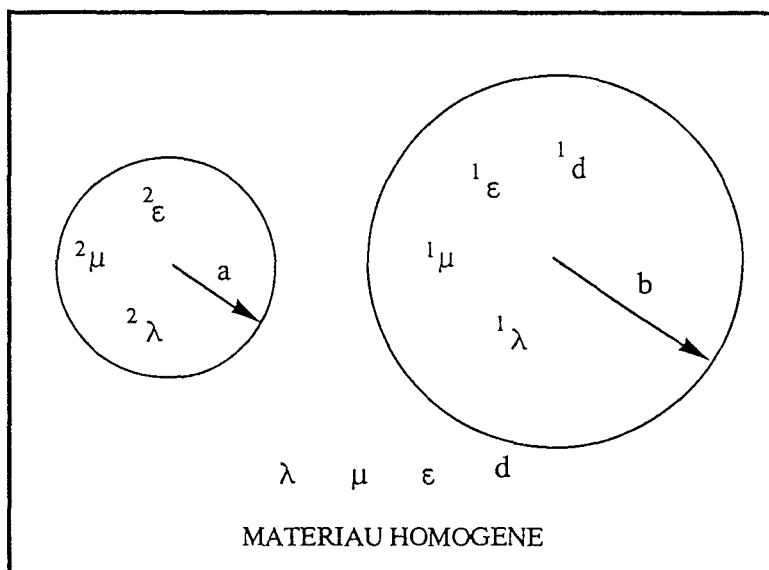


Figure VI-6

λ, μ sont les coefficients de Lamé,

v est la fraction volumique de céramique,

$$a^3 = 1-v, b^3 = v.$$

Pour déterminer les propriétés physiques du matériau homogène équivalent, on utilise les modèles développés par BRUGGEMAN et BERRYMAN ("self consistent") reposant respectivement sur la "transparence" électrique et mécanique du système. On écrit donc que les termes les plus importants des champs diffractés par les 2 types d'inclusion doivent s'annuler au prorata des concentrations.

On néglige l'interaction entre les différentes inclusions (hypothèse 1). Le type de sollicitation (hydrostatique) ne fournissant pas assez d'équations pour résoudre le problème, M. LAGIER *et al.* [58] font trois hypothèses supplémentaires pour achever les calculs.

La permittivité est directement tirée de la formule de BRUGGEMAN :

$$(1 - v) \frac{\varepsilon - 2\varepsilon}{2\varepsilon + 2\varepsilon} + v \frac{\varepsilon - 1\varepsilon}{2\varepsilon + 1\varepsilon} = 0 \quad (\text{VI-5})$$

Les inconnus K ($\lambda + \frac{2}{3}\mu$) et μ , où K est le coefficient de compressibilité du matériau homogène, sont déduits du système:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1-v) \left[\frac{K - 2K}{3^2K + 4\mu} \right] + v \left[\frac{K - 1K}{3^1K + 4\mu} \right] = 0 \\ (1-v) \left[\frac{\mu - 2\mu}{2\mu + F} \right] + v \left[\frac{\mu - 1\mu}{1\mu + F} \right] = 0 \text{ (hypothèse 2)} \end{array} \right. \quad (\text{VI-6})$$

$$\text{avec } F = \frac{\mu}{6} \frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \quad (\text{VI-7})$$

Enfin, en négligeant (hypothèse 3) le terme en $1/r^5$ du champ électrique [58], on obtient :

$$d_h = \frac{v \ 1L (2\varepsilon + 2\varepsilon) \ 1d_h + 3 (1-v) \ 2M (1\varepsilon - 2\varepsilon) (d_{15} + d_{31})}{v (2\varepsilon + 2\varepsilon) + (1-v) (2\varepsilon + 1\varepsilon) - (1-v) \ 2M (1\varepsilon - 2\varepsilon)} \quad (\text{VI-8})$$

$$\text{avec } 1L = \frac{1K}{K} \frac{3K + 4\mu}{3^1K + 4\mu} \quad (\text{VI-9})$$

$$2M = \frac{8}{5} \frac{\mu}{K} \frac{K - 2K}{3^2K + 4\mu} \quad (\text{VI-10})$$

$$d_{15} + d_{31} = 1d_{15} + 1d_{31} \text{ (hypothèse 4)}$$

Les permittivités ε données par la formule de BRUGGEMAN sont en bon accord avec les résultats expérimentaux (figure VI-7).

Par contre, les courbes théorique et expérimentale de d_h (figure VI-8) ne concordent pas : elles présentent des inflexions de signes opposés. Aux fortes densités (vol.PZT > 70%) les valeurs théoriques de d_h (proches de la réalité) sont inférieures aux valeurs expérimentales. Aux faibles densités (vol.PZT < 60%), elles les dépassent très nettement.

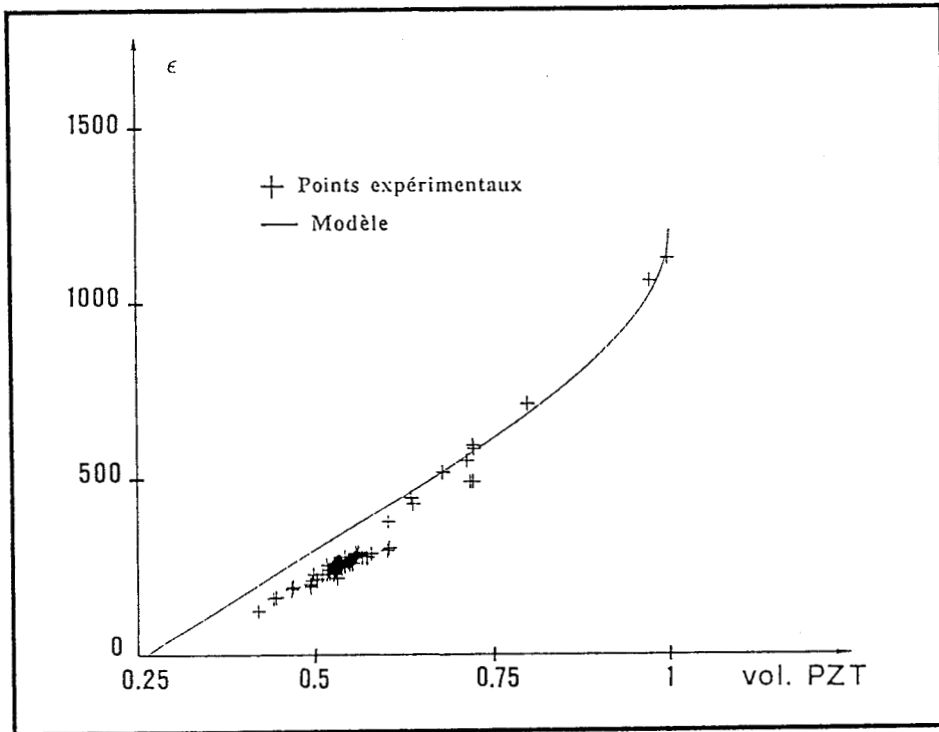


Figure VI - 7

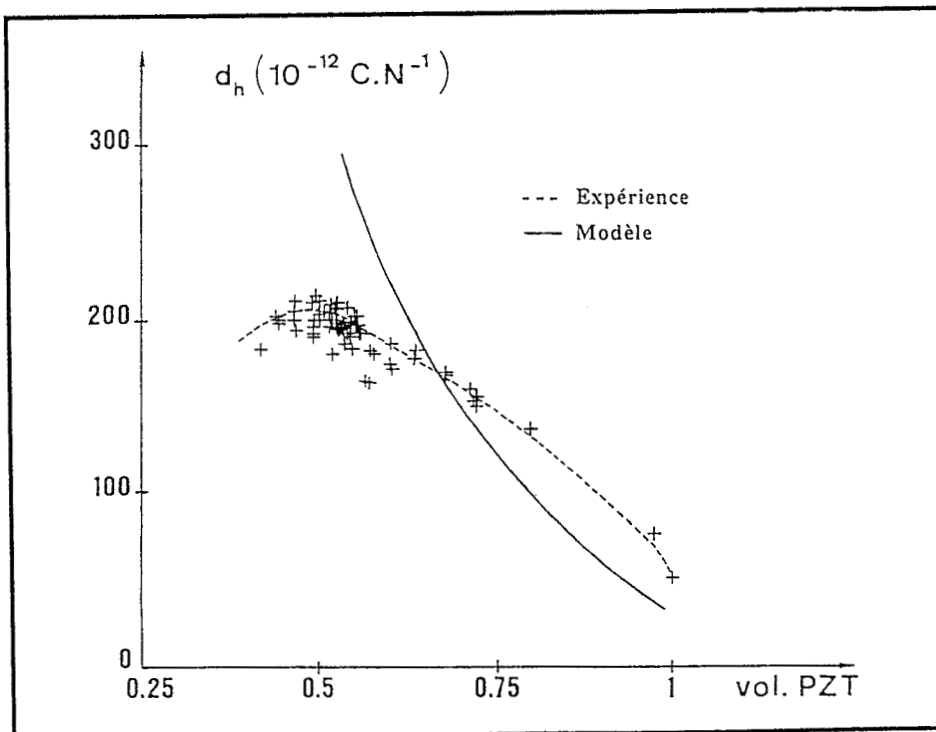


Figure VI - 8

1 - 3 - Modèle de percolation [13-59-60]

G. GAILLARD *et al.* [13-60] considèrent que le composite Z37 aux faibles densités est semblable à un enchevêtrement de brins en céramique (figure VI-9) possédant les propriétés d'un milieu percolant [59].

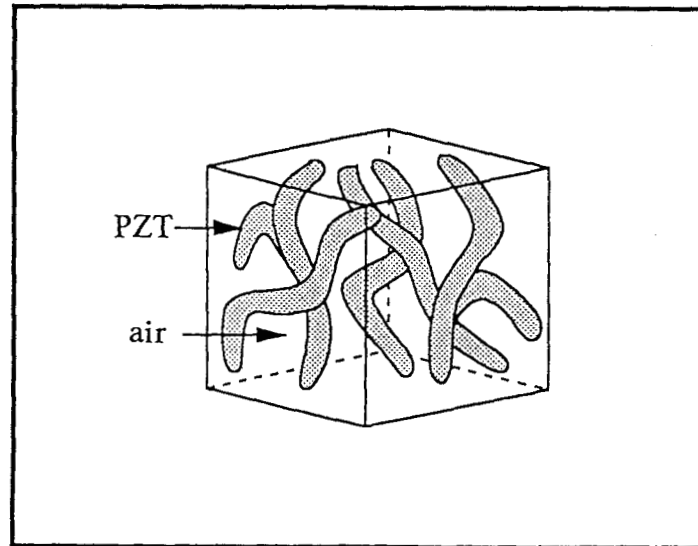


Figure VI-9

1 - 3 - 1 - Piézoélectricité et percolation [59]

Le modèle de percolation prédit que les comportements électriques et mécaniques d'un système percolant sont distincts. Si par exemple, le système est constitué d'une proportion v de céramique, la constante diélectrique du système s'annule au seuil de percolation v_c et suit une loi du type:

$$\epsilon = \epsilon' (v - v_c)^t$$

avec $t = 2$ pour un système de dimension 3 [59] et $v_c = 0.15$ [60] (VI-11)

Le module d'élasticité Y possède un comportement critique différent et varie selon:

$$Y = Y' (v - v_c)^\tau$$

avec $\tau = 3.8$ pour un système de dimension 3 [59] (VI-12)

Si la céramique est piézoélectrique, un nouveau problème apparaît : celui du couplage entre les propriétés électriques et mécaniques qui ont séparément des comportements critiques distincts (VI-11, VI-12). L'étude de ce couplage a été réalisée récemment par D. SORNETTE, M. LAGIER *et al.* [59], en considérant un milieu piézoélectrique de forte constante diélectrique plongé dans un milieu de constante unité ou proche de l'unité et de compliance très grande ou infinie.

Cette étude prévoit que le coefficient macroscopique de couplage longitudinal d_{33} présente un comportement non critique, du type:

$$d_{33} = d'_{33} (v-v_c)^\theta$$

avec $\theta = -0.2$ pour un système de dimension 3 [59] (VI-13)

D. SORNETTE, M. LAGIER *et al.* [59] considèrent en outre que le coefficient de couplage transverse d_{31} est nul ou négligeable avant le seuil de percolation. Leur argument est le suivant : "une force transverse induit une déformation verticale, de signe aléatoire d'un site (intersection de deux brins) à l'autre, apportant en moyenne une faible contribution au d_{31} du système". Les coefficients piézoélectriques d_{33} (VI-13) et d_{31} d'un système percolant auraient donc des comportements non critiques très différents [59], donnant lieu à d'importants d_h près du seuil de percolation.

Remarque:

Les approximations permettant le calcul théorique de l'exposant θ (VI-13) conduisent à une incertitude sur le résultat (-0.2) d'au moins 100% [59].

1 - 3 - 2 - Le composite Z37 et la percolation

La loi proposée par G. GAILLARD [13] pour reproduire l'évolution de la permittivité en fonction de la fraction volumique de PZT est en très bon accord avec les résultats expérimentaux, en particulier aux faibles densités (figures VI-10). Cette loi est bien de type percolant puisqu'elle s'écrit:

$$\varepsilon = \varepsilon' (v-v_c)^t$$

avec $t = 2$, $v_c = 0.123$, $\varepsilon' = 1772$ [13] (VI-14)

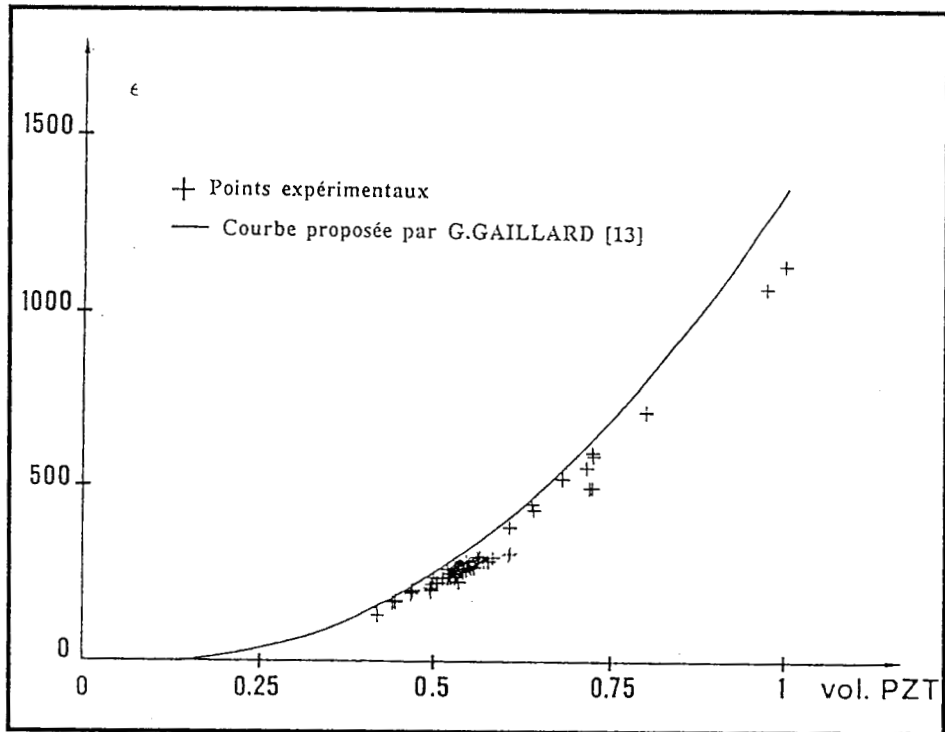


Figure VI-10

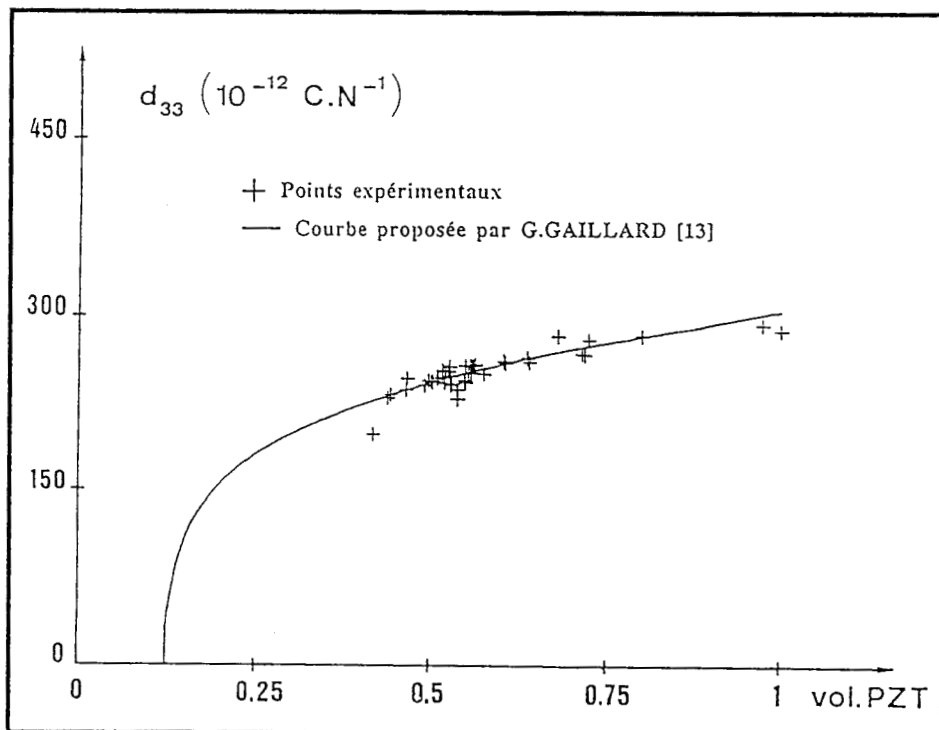


Figure VI-11

Par contre, celles permettant de simuler les variations de Y^E [13], d_{33} , d_{31} et d_h (figures VI-11, 12, 13), nous paraissent assez éloignées des prévisions théoriques:

$$Y^E = Y^{E'} (v-v_c)^\tau$$

avec $\tau = 2.33$, $v_c = 0.123$, $Y^{E'} = 9.68 \cdot 10^{10} \text{ N.m}^{-2}$ [13] (VI-15)

$$d_{33} = d'_{33} (v-v_c)^\theta$$

avec $\theta = + 0.26$, $v_c = 0.123$, $d'_{33} = 315 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$ [13] (VI-16)

$$|d_{31}| = \alpha + \beta \cdot v$$

avec $\alpha = - 98.4 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$, $\beta = + 232.5 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$ [13] (VI-17)

Nous voulons bien admettre que la différence d'environ 38%, entre l'exposant expérimental $\tau = 2.33$ (VI-15) et l'exposant théorique $\tau = 3.80$ (VI-12), provient de grandes corrections qui interviennent sur le comportement mécanique lorsque, comme c'est le cas ici, on n'est pas suffisamment proche du seuil de percolation [13].

Nous voulons bien croire que l'écart d'environ 250% entre l'exposant expérimental $\theta = + 0.26$ (VI-16) et l'exposant théorique $\theta = - 0.20$ (VI-13), connu à 100% près [59], peut ne pas paraître abusif.

Nous notons aussi que le d_{31} donné par la formule (VI-17) s'annule avant le seuil de percolation (figure VI-12) conformément à la théorie [59].

Cependant, nous ne pensons pas que de tels arguments soient assez solides pour prouver que les lois empiriques proposées par G. GAILLARD [13] constituent une vérification expérimentale des propriétés critiques du composite Z37 en régime de percolation.

De plus, si le composite possédait effectivement un comportement de milieu percolant, d'après la théorie [59] et les relations (VI-16, VI-17) [13], son d_h optimum devrait être atteint pour un taux de céramique proche du seuil de percolation (22%) (figure VI-13). Or, son d_h optimum correspond en réalité, à une fraction volumique d'environ 50%.

Enfin, même si le composite Z37 était assimilable à un système percolant, le modèle de percolation [59] ne permettrait de prévoir son comportement qu'en ayant recours à l'expérimentation [13]. Autrement dit, un tel modèle ne pourrait donner aucune indication sur la façon d'améliorer les performances acoustiques du composite.

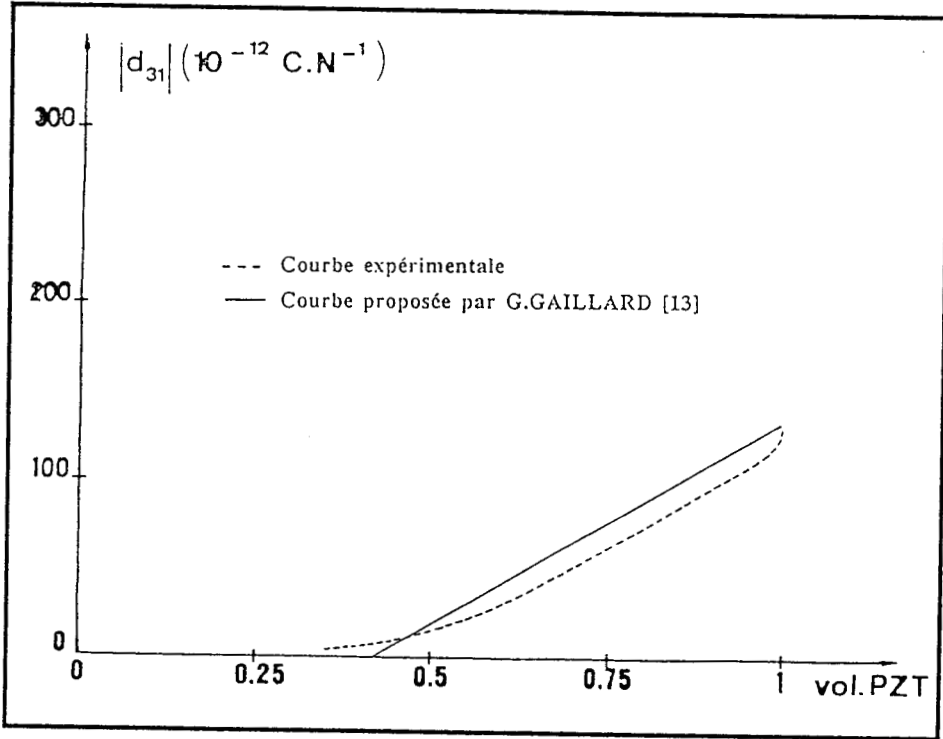


Figure VI-12

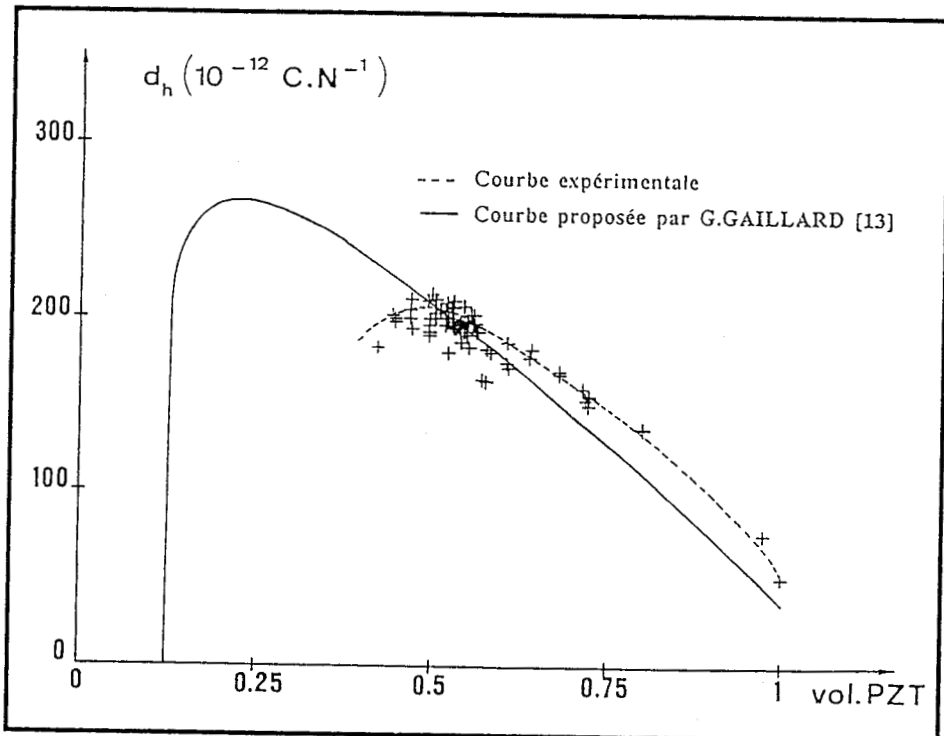


Figure VI-13

1 - 4 - Modèle de "poutres" [34]

K. RITTENMEYER *et al.* [34] supposent que le composite résulte d'un assemblage de cellules cubiques identiques (figure VI-14) dont les propriétés sont équivalentes à celles du composite.

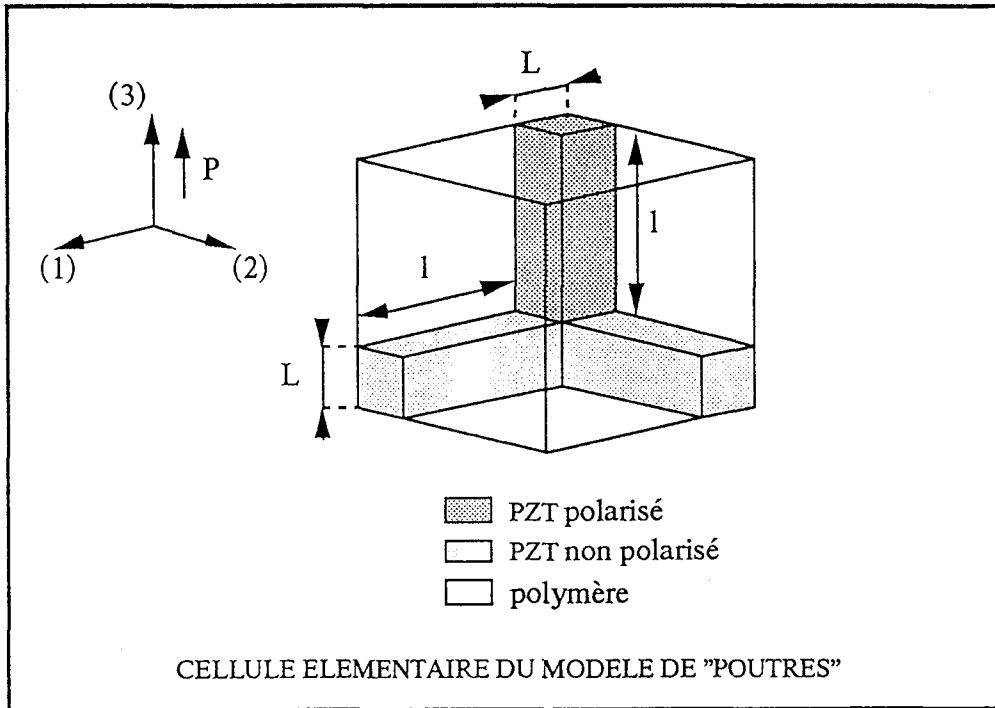


Figure VI-14

La cellule élémentaire est constituée par trois "poutres" en céramique se coupant perpendiculairement, le volume restant étant rempli de polymère. On suppose que l'une des poutres, parallèle à l'axe de polarisation (3), est totalement polarisée, tandis que les deux autres, dans des directions perpendiculaires, ne le sont pas. On distingue quatre blocs en céramique (figure VI-15):

- trois blocs (A, B, C) de longueur l, de section carrée LxL, parallèles aux directions (1), (2), (3),
- et un bloc cubique (D), de volume LxLxL, à l'intersection.

La fraction volumique de céramique s'écrit:

$$v = \frac{L^3 + 3L^2l}{(L+l)^3} \quad (\text{VI-18})$$

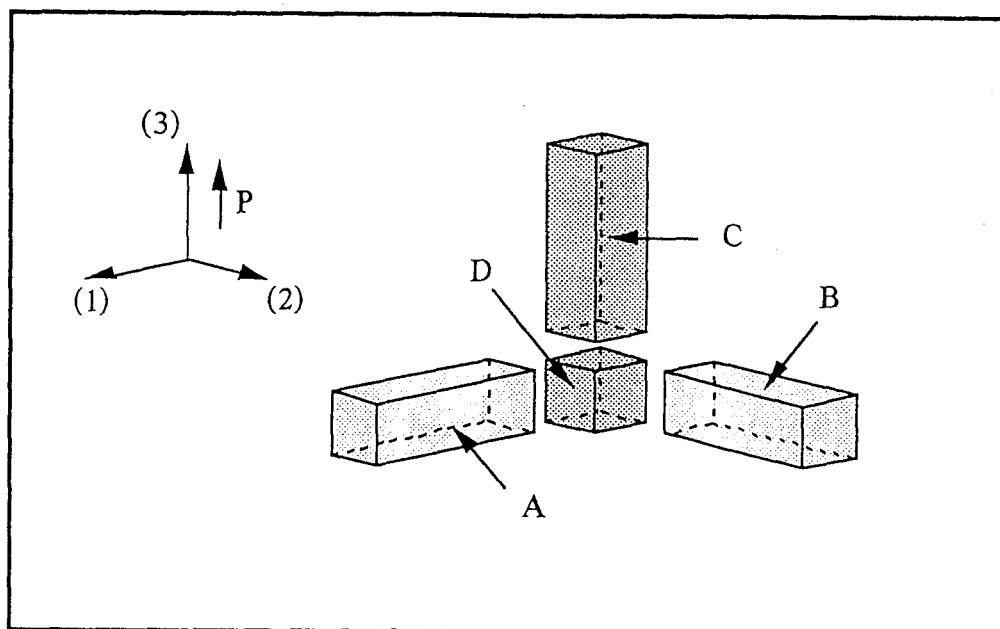


Figure VI-15

soit, pour un cube "unité" ($L+1 = 1$):

$$v = L^3 + 3L^2 \quad (\text{VI-19})$$

L'indice (1) désignera les constantes caractéristiques de la céramique, l'indice (2), celles du polymère. Les caractéristiques du composite ne seront pas indicées.

1 - 4 - 1 - Constante diélectrique ϵ_{33}

Les constantes diélectriques des deux phases sont telles que: $\epsilon_{33}^{(1)} \gg \epsilon_{33}^{(2)}$. La constante diélectrique du composite est donc principalement due aux blocs C et D parallèles à l'axe de polarisation, puisque les blocs A et B parallèles aux axes (1) et (2), en série avec le polymère, n'apportent qu'une faible contribution. Pour un cube unité ($L+1=1$), la permittivité effective est donc:

$$\epsilon_{33} = L^2 \cdot \epsilon_{33}^{(1)} \quad (\text{VI-20})$$

Les relations (VI-19) et (VI-20), valables lorsque le polymère est remplacé par de l'air, permettent d'exprimer la permittivité ϵ_{33} du composite Z37 en fonction de la fraction volumique de céramique (figure VI-16) en posant $\epsilon_{33}^{(1)} = 1230$ (valeur de la céramique X37).

La corrélation entre la théorie et l'expérience est bonne, surtout aux fortes densités (vol.PZT>50%).

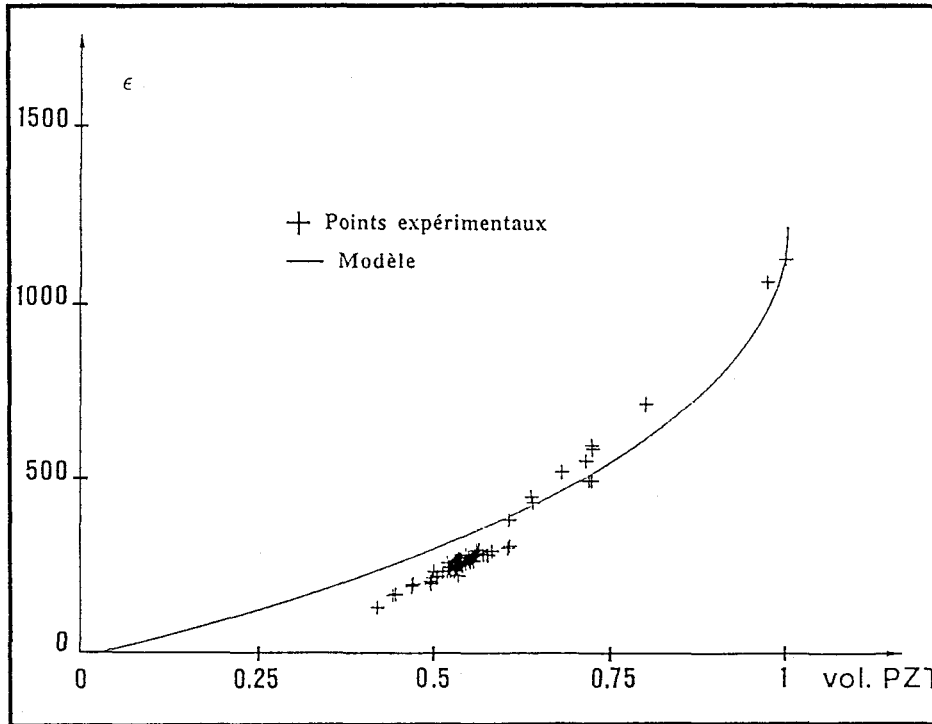


Figure VI-16

1 - 4 - 2 - Constante piézoélectrique d_{33}

Pour un composite où les deux phases sont disposées en parallèle (A3), la constante piézoélectrique de charge d_{33} s'écrit:

$$d_{33} = \frac{1_v 1d_{33} 2s_{33} + 2_v 2d_{33} 1s_{33}}{1_v 2s_{33} + 2_v 1s_{33}} \quad (\text{VI-21})$$

1_v et 2_v sont les fractions volumiques de céramique et de polymère, $1s_{33}$ et $2s_{33}$ les compliances longitudinales, $1d_{33}$ et $2d_{33}$ les constantes piézoélectriques de charge ($2d_{33} = 0$).

Dans le cas du composite de connectivité 3-3, les deux phases sont à la fois en parallèle et en série. Cependant, dans la cellule élémentaire (figure VI-15), seuls les blocs C et D, totalement polarisés donc piézoélectriquement actifs, sont en parallèle avec le polymère. Les blocs A et B, en série avec le polymère, ne contribuent pas à l'effet piézoélectrique puisqu'ils ne sont pas polarisés.

Tout se passe comme si le composite possédait une fraction volumique de céramique plus faible. On peut ainsi écrire:

$$d_{33} = \frac{1_V^* 1_{d_{33}} 2_{s_{33}}^*}{1_V^* 2_{s_{33}}^* + 2_V^* 1_{s_{33}}} \quad (\text{VI-22})$$

$1_V^* = L^2$ est la fraction volumique de PZT actif (polarisé),

$2_V^* = 1-L^2$ est la fraction volumique de polymère chargé de PZT non polarisé,

$2_{s_{33}}^*$ est la compliance du polymère modifiée par la présence de PZT non polarisé,

$2_{s_{33}} > 2_{s_{33}}^* > 1_{s_{33}}$.

$$\text{soit : } d_{33} = \frac{L^2 1_{d_{33}}}{L^2 + (1-L^2) S} \quad (\text{VI-23})$$

$$\text{avec : } S = \frac{1_{s_{33}}}{2_{s_{33}}^*}$$

Les variations du d_{33} en fonction de la fraction volumique de PZT sont portées figure VI-17, en prenant $1_{d_{33}} = 305 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$ (valeur de la céramique X37) et comme le préconisent K. RITTENMEYER *et al.* [34] $S = 0.1$. Nous constatons que les valeurs théoriques du d_{33} sont en bon accord avec les valeurs expérimentales. Cependant, en appliquant le modèle de "poutres" au composite Z37 où le polymère est remplacé par de l'air, il n'est plus permis d'assimiler le paramètre $2_{s_{33}}^*$ à une compliance : "la compliance de l'air modifiée par la présence d'une phase PZT" n'a aucune signification physique. Nous considérerons donc ce paramètre comme un paramètre de fit.

1 - 4 - 3 - Constante piézoélectrique d_{31}

Dans la cellule élémentaire (figure VI-15) seulement deux blocs sont piézoélectriques : les blocs C et D. Or, les contraintes transversales ne peuvent être transmises qu'au bloc D, via les blocs A et B. Le d_{31} s'écrit donc:

$$d_{31} = L^3 \cdot 1_{d_{31}} \quad (\text{VI-24})$$

Les valeurs de d_{31} en fonction du taux de PZT sont reportées figure VI-18, en prenant $1_{d_{31}} = -129 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$ (valeur de la céramique X37).

Le modèle donne une approche correcte du comportement expérimental, mais les valeurs de d_{31} prédites aux fortes densités (vol.PZT>60%) sont assez éloignées de la réalité.

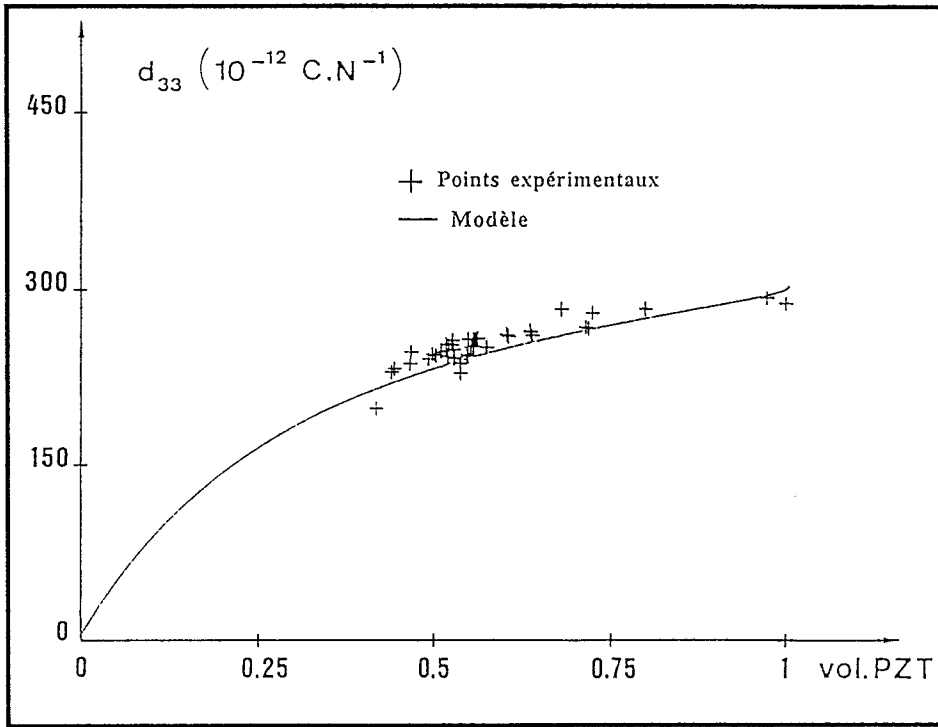


Figure VI-17

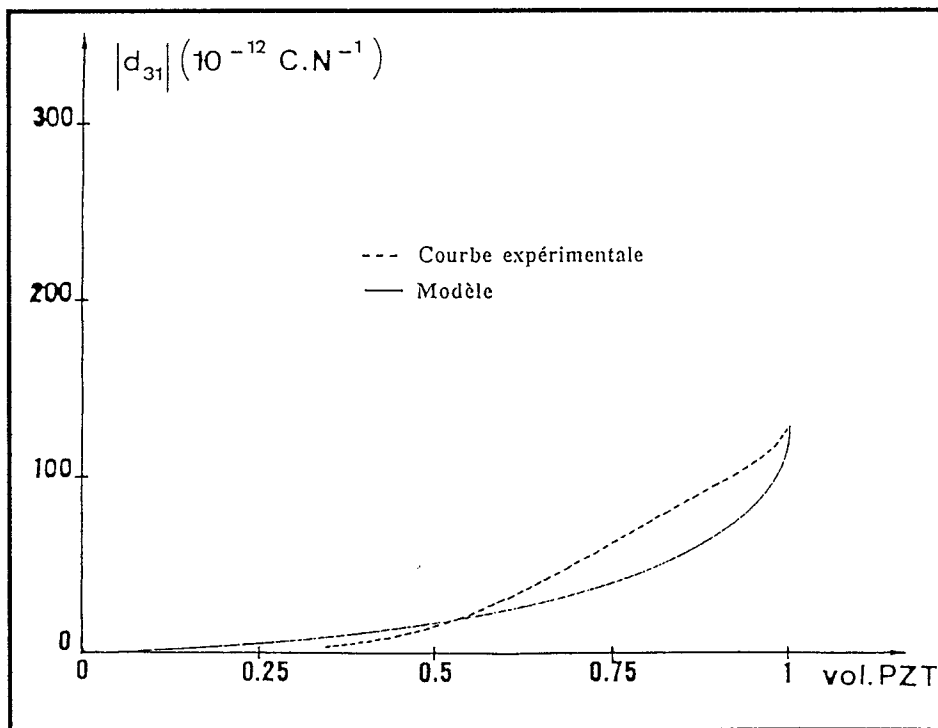


Figure VI-18

1 - 4 - 4 - Constante piézoélectrique d_h

On accède au d_h théorique en écrivant : $d_h = d_{33} - 2 \cdot |d_{31}|$. La plupart des valeurs prédites ne concordent pas avec les mesures, mais le passage par un maximum de la constante d_h , pour un taux de PZT d'environ 50%, est respecté (figure VI-19).

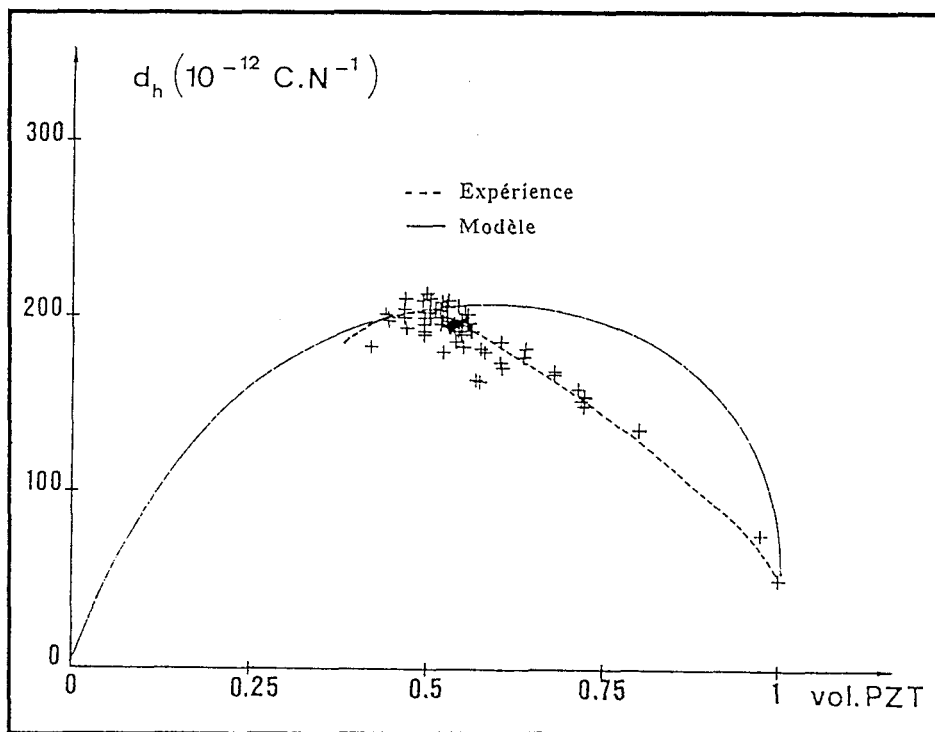


Figure VI-19

1 - 5 - Conclusion

Aucun modèle, parmi ceux recensés, nous semble en mesure de simuler les propriétés diélectriques et piézoélectriques du composite Z37. Nous pouvons cependant remarquer que seul le modèle de "poutres" respecte l'ensemble des tendances observées:

- décroissance rapide du ϵ_{33} avec la porosité,
- diminution lente du d_{33} ,
- diminution rapide d_{31} ,
- existence d'un d_h maximum pour une porosité d'environ 50%.

Ceci nous incite à penser que les hypothèses du modèle sont bonnes et peuvent probablement conduire à de meilleurs résultats.

2 - MODELE ANALYTIQUE

2 - 1 - Principe

Nous reprenons les hypothèses du modèle de "poutres" [34], et considérons la cellule élémentaire comme une combinaison d'associations parallèle et série (figure VI-20).

	association parallèle	association série
d_{33}	$\frac{1_V^1 d_{33}^2 s_{33} + 2_V^2 d_{33}^1 s_{33}}{1_V^2 s_{33} + 2_V^1 s_{33}}$	$\frac{1_V^1 d_{33}^2 \epsilon_{33} + 2_V^2 d_{33}^1 \epsilon_{33}}{1_V^2 \epsilon_{33} + 2_V^1 \epsilon_{33}}$
d_{31}	$1_V^1 d_{31} + 2_V^2 d_{31}$	$\frac{1_V^1 d_{31}^2 \epsilon_{33}^2 s_{11} + 2_V^2 d_{31}^1 \epsilon_{33}^1 s_{11}}{(1_V^2 \epsilon_{33} + 2_V^1 \epsilon_{33}) (1_V^2 s_{11} + 2_V^1 s_{11})}$
ϵ_{33}	$1_V^1 \epsilon_{33} + 2_V^2 \epsilon_{33}$	$\frac{1_{\epsilon_{33}}^2 \epsilon_{33}}{1_V^2 \epsilon_{33} + 2_V^1 \epsilon_{33}}$
s_{33}	$\frac{1_{s_{33}}^2 s_{33}}{1_V^2 s_{33} + 2_V^1 s_{33}}$	$1_V^1 s_{33} + 2_V^2 s_{33}$

(tableau VI-1)

Par la suite, nous adopterons la notation suivante:

- c constante propre au composite,
- 1_c constante propre à la céramique,
- 2_c constante propre au polymère,
- 1_{c^*} constante propre au sous-ensemble 1* (figure VI-20)
- 2_{c^*} constante propre au sous-ensemble 2* (figure VI-20)
- $1_{c^{**}}$ constante propre au sous-ensemble 1** (figure VI-20)
- etc...

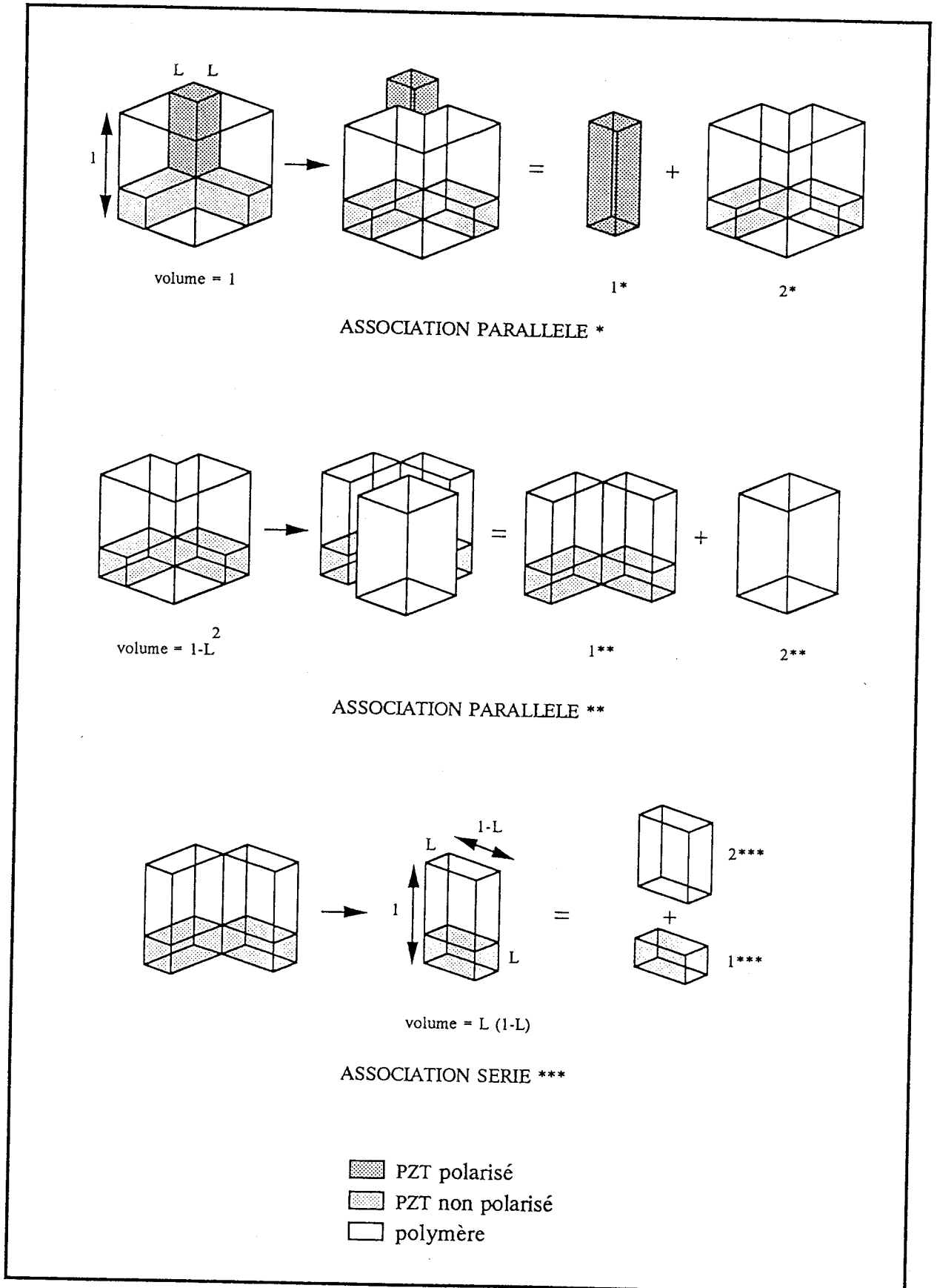


Figure VI-20

2 - 2 - Développement

2 - 2 - 1 - Constante diélectrique ϵ_{33}

D'après l'association parallèle (*), ϵ_{33} s'écrit:

$$\epsilon_{33} = 1_V^* \epsilon_{33}^1 + 2_V^* \epsilon_{33}^{2*} \quad (\text{VI-25})$$

$$1_V^* = L^2$$

$$2_V^* = 1 - L^2$$

Grâce aux associations (**) et (***), nous pourrions développer l'expression de ϵ_{33}^{2*} et vérifier que ce terme est négligeable devant ϵ_{33}^1 . Pour simplifier, nous admettrons directement que $\epsilon_{33}^1 \gg \epsilon_{33}^{2*} > \epsilon_{33}$. Nous obtenons ainsi:

$\epsilon_{33} = L^2 \epsilon_{33}^1$	(VI-26)
---------------------------------------	---------

2 - 2 - 2 - Constante piézoélectrique d_{33}

D'après l'association (*), nous pouvons écrire:

$$d_{33} = \frac{1_V^* d_{33}^1 s_{33}^{2*} + 2_V^* d_{33}^{2*} s_{33}^1}{1_V^* s_{33}^{2*} + 2_V^* s_{33}^1} \quad (\text{VI-27})$$

$$1_V^* = L^2$$

$$2_V^* = 1 - L^2$$

Les blocs transverses en céramique n'étant pas polarisés, le sous-ensemble 2* (figure VI-20) n'est pas piézoélectrique ($d_{33}^{2*} = 0$), donc:

$$d_{33} = \frac{L^2 d_{33}^1}{L^2 + (1 - L^2) S} \quad (\text{VI-28})$$

$$\text{avec : } S = \frac{s_{33}^1}{s_{33}^{2*}}$$

D'après l'association (**):

$$\frac{1}{2s_{33}^*} = \frac{1v^{**} 2s_{33} + 2v^{**} 1s_{33}^{**}}{2s_{33} 1s_{33}^{**}} = \frac{\frac{2L(1-L)}{(1-L^2)} 2s_{33} + \frac{(1-L)^2}{(1-L^2)} 1s_{33}^{**}}{2s_{33} 1s_{33}^{**}} \quad (\text{VI-29})$$

Et, d'après l'association (***):

$$1s_{33}^{**} = 1v^{***} 1s_{33} + 2v^{***} 2s_{33} = L 1s_{33} + (1-L) 2s_{33} \quad (\text{VI-30})$$

L'expression (VI-28) devient donc:

$$d_{33} = \frac{L^2 1d_{33}}{L^2 + (1-L^2) \left[\frac{1s_{33}}{2s_{33}} \right] \left(\frac{1 + L^2 + (L-L^2) \left[\frac{1s_{33}}{2s_{33}} \right]}{1 - L^2 + (L+L^2) \left[\frac{1s_{33}}{2s_{33}} \right]} \right)} \quad (\text{VI-31})$$

Si le composite est imprégné $2s_{33}$ représente la compliance longitudinale du polymère. Si le polymère est remplacé par de l'air, nous considèrerons que ce coefficient est un paramètre de fit, probablement caractéristique d'effets de structure (§ 3-4-7) et/ou de compressibilité.

2 - 2 - 3 - Constante piézoélectrique d_{31}

Le calcul du d_{31} est rapide. D'après l'association (*), on peut écrire:

$$d_{31} = 1v^* 1d_{31} + 2v^* 2d_{31}^* \quad (\text{VI-32})$$

Le sous-ensemble 2* (figure VI-20) n'étant pas piézoélectrique ($2d_{31}^* = 0$), il vient:

$$d_{31} = L^2 1d_{31} \quad (\text{VI-33})$$

2 - 3 - Résultats

Les variations théoriques des constantes ϵ_{33} , d_{33} , d_{31} , d_h , $d_h \cdot g_h$, en fonction de la fraction volumique de céramique, établies en prenant:

$$^1\epsilon_{33} = 1230$$

$$^1d_{33} = 305 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$$

$$^1d_{31} = -129 \cdot 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$$

$$^1s_{33} = 14.9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$$

$$\frac{^1s_{33}}{^2s_{33}} = 0.040$$

sont comparées aux variations expérimentales (à pression et température ambiantes) figures VI-21 à VI-25.

Dans l'ensemble, nous constatons une assez bonne corrélation entre le modèle et l'expérience. Aux fortes et moyennes densités ($50\% < \text{vol.PZT} < 100\%$), les prévisions théoriques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Aux faibles densités ($43\% < \text{vol.PZT} < 50\%$), les valeurs prédites s'écartent un peu de la réalité, mais la tendance reste correcte.

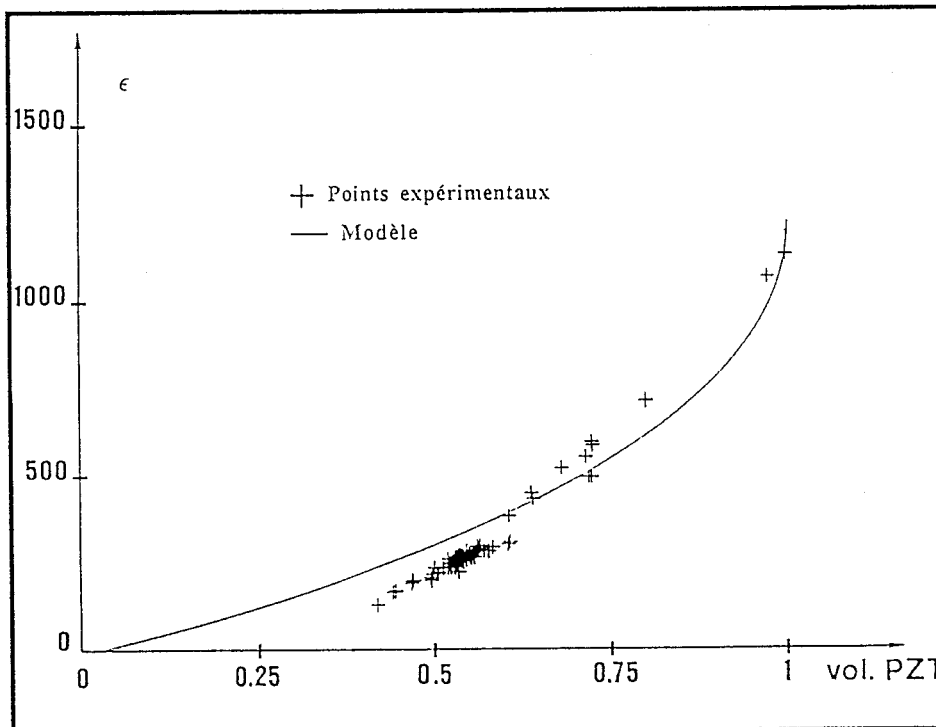


Figure VI-21

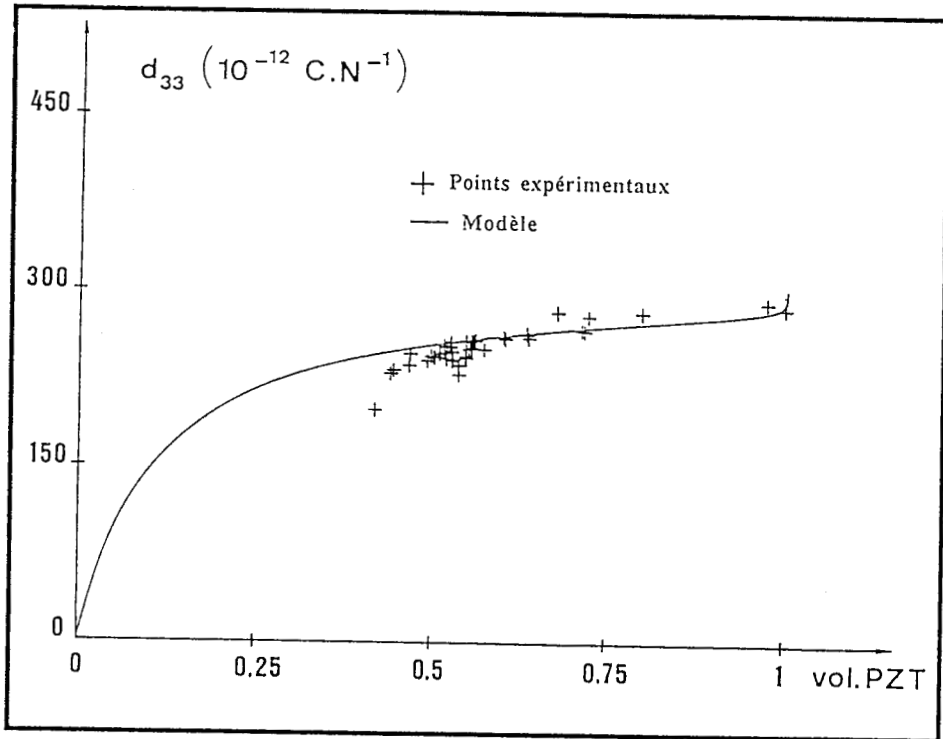


Figure VI-22

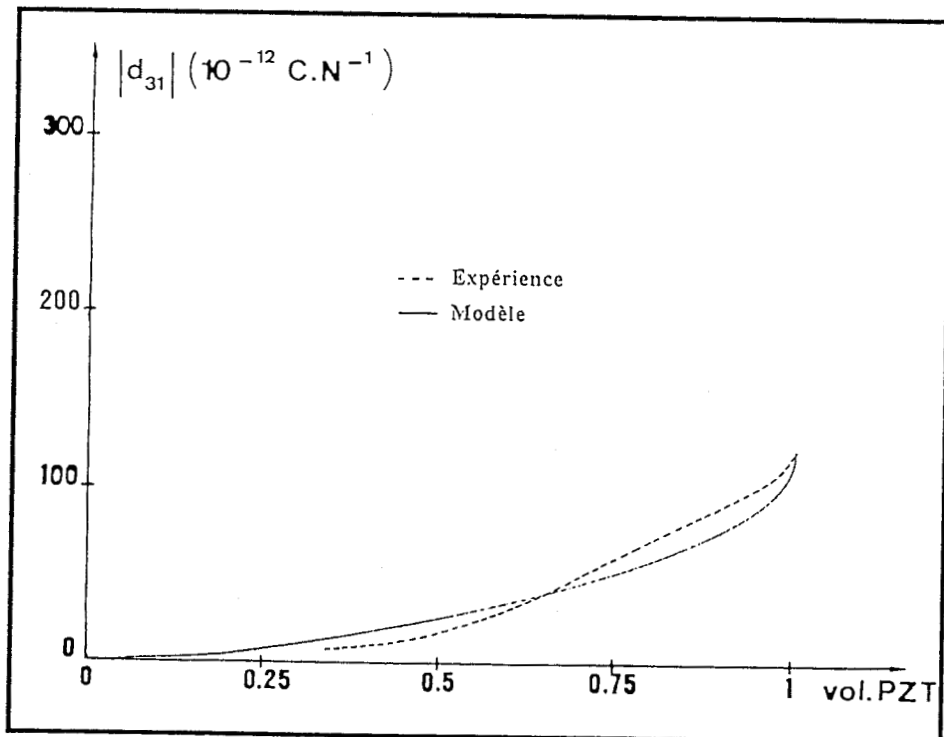


Figure VI-23

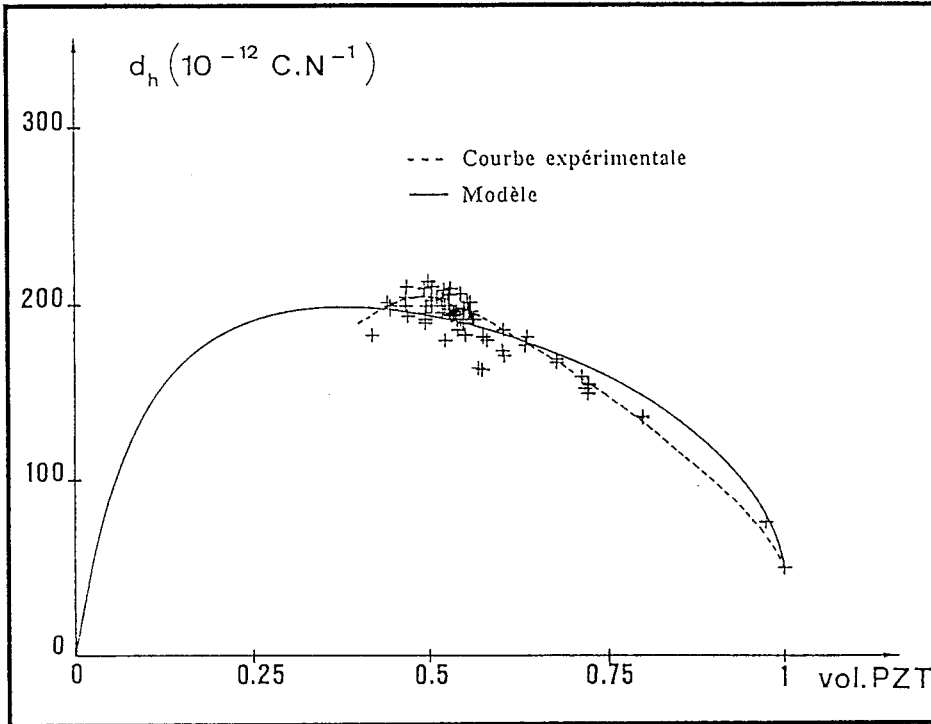


Figure VI-24

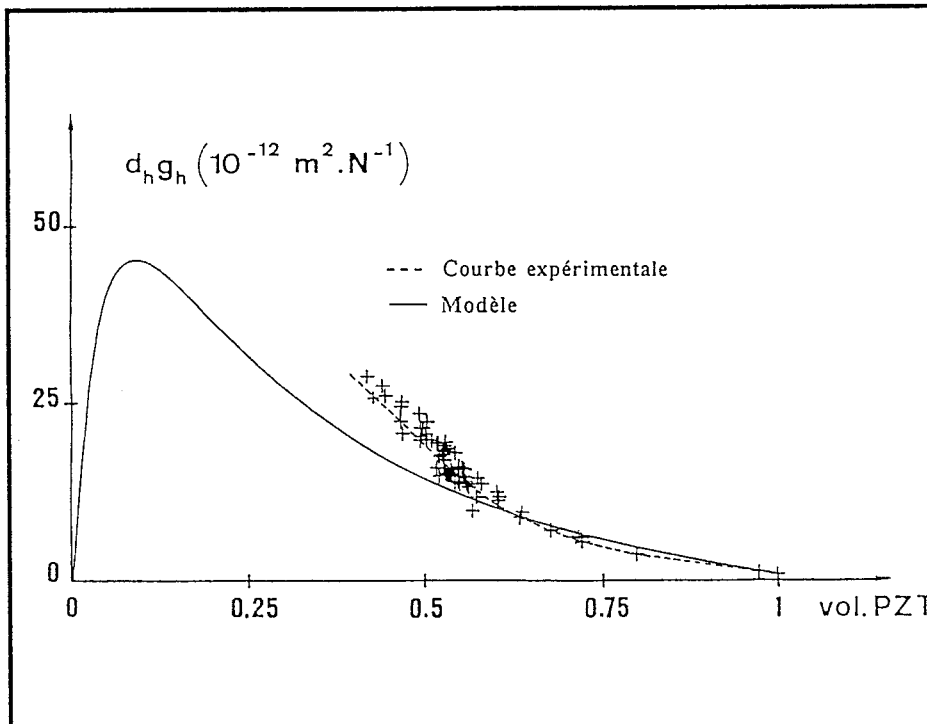


Figure VI-25

Ce modèle nous donne aussi la possibilité d'étayer les conclusions de l'étude en pression (chapitre V).

En effet, lorsque le composite est soumis à une pression hydrostatique P, une proportion importante de PZT actif (figure VI-20) subit une contrainte uniaxiale T_3 , parallèle à l'axe de polarisation, d'amplitude (association *):

$$T_3 = \frac{{}^1Y_{33}^D}{Y_{33}^D} P \quad (\text{VI-34})$$

${}^1Y_{33}^D$ est le module d'Young de la céramique X37 ($11.25 \cdot 10^{10} \text{ N.m}^{-2}$),
 Y_{33}^D est celui du composite Z37 (tableau VI-2).

De plus, l'évolution du coefficient ${}^1Y_{33}^D / Y_{33}^D$ en fonction de la fraction volumique de PZT (figure VI-26), calculée à partir des mesures regroupées tableau VI-2, est analogue à celle du coefficient d'amplification de contrainte (τ), déterminé lors de l'étude en pression (chapitre V, §-3).

ρ (10^3 kg.m^{-3})	vol.PZT (%)	Y_{33}^D mesuré (10^{10} N.m^{-2})
2.98	41	0.41
3.22	44	0.56
3.47	47	0.84
3.83	52	1.13
4.00	55	1.37
4.20	57	1.67
4.48	61	1.81
5.21	71	3.27

(tableau VI-2) : extrait de [13]

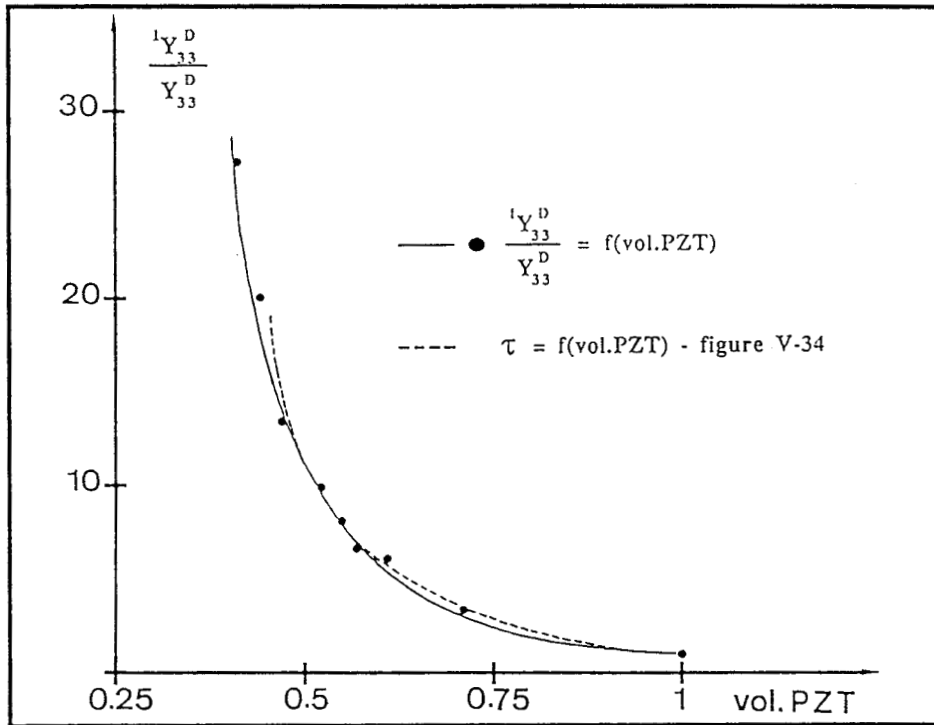


Figure VI-26

2 - 4 - Conclusion

Le modèle que nous venons de développer, permet de simuler et d'interpréter simplement les propriétés diélectriques et piézoélectriques du composite Z37.

Il permet aussi d'étudier l'influence des caractéristiques de la céramique (ou du polymère) de base sur les performances acoustiques du composite.

Nous avons donc fait varier, tour à tour, de $\pm 15\%$ les paramètres l_{d33} , l_{s33} , $l_{\epsilon33}$, l_{d31} , de la céramique X37, et nous avons tracé dans chaque cas, l'évolution théorique des $d_h.g_h$ du composite, en fonction de la fraction volumique de PZT.

Les courbes obtenues sont présentées figures VI-27 à VI-30. Nos observations sont consignées dans le tableau VI-3.

		$d_h \cdot g_h$ optimum	$d_h \cdot g_h$ moyen
↑ influence croissante	$^1 d_{33}$ ↗	↗ et se déplace vers les fortes densités	↗
	$\frac{^1 s_{33}}{2 s_{33}}$ ↗	↘ et se déplace vers les fortes densités	↘
	$^1 \epsilon_{33}$ ↗	↘ et se déplace vers les faibles densités	↘
	$ ^1 d_{31} $ ↗	↘ et se déplace vers les faibles densités	↘

(tableau VI-3)

Il apparaît clairement que les performances du composite (à pression et température ambiantes) pourraient encore être améliorées, si la céramique de base possédait:

- soit, un d_{33} supérieur au d_{33} de la céramique X37,
- soit, une compliance longitudinale s_{33} plus faible,
- soit, une permittivité ϵ_{33} inférieure,
- soit, un d_{31} moins important (en valeur absolue).

Enfin, si la céramique de base était plus "dure" [5] que la céramique X37, on renforcerait très probablement, à densités égales, la stabilité en pression du composite.

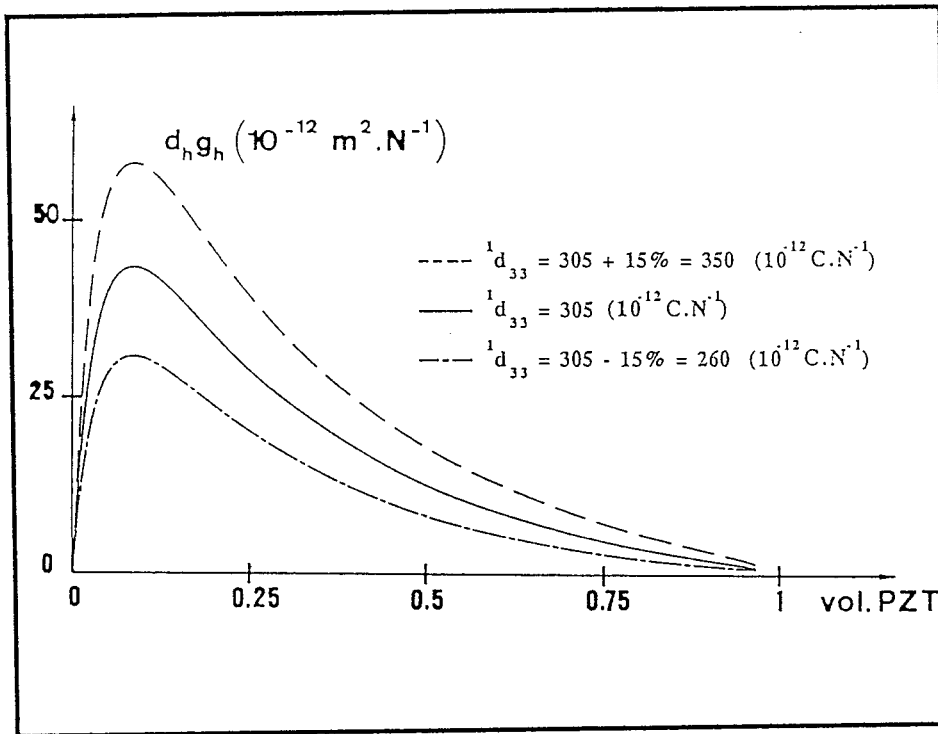


Figure VI-27

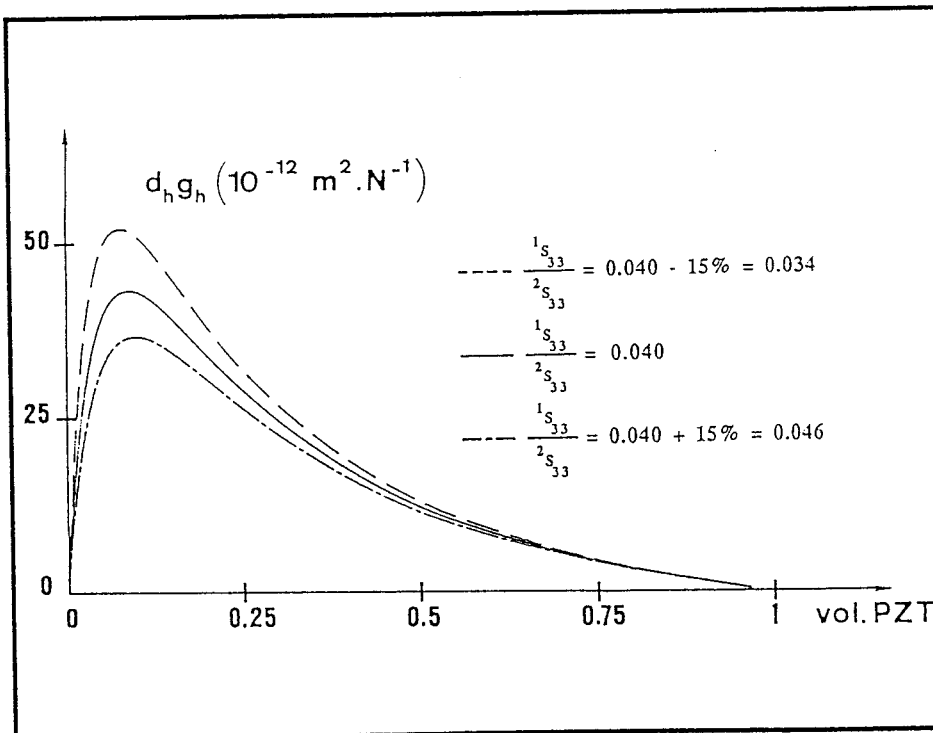


Figure VI-28

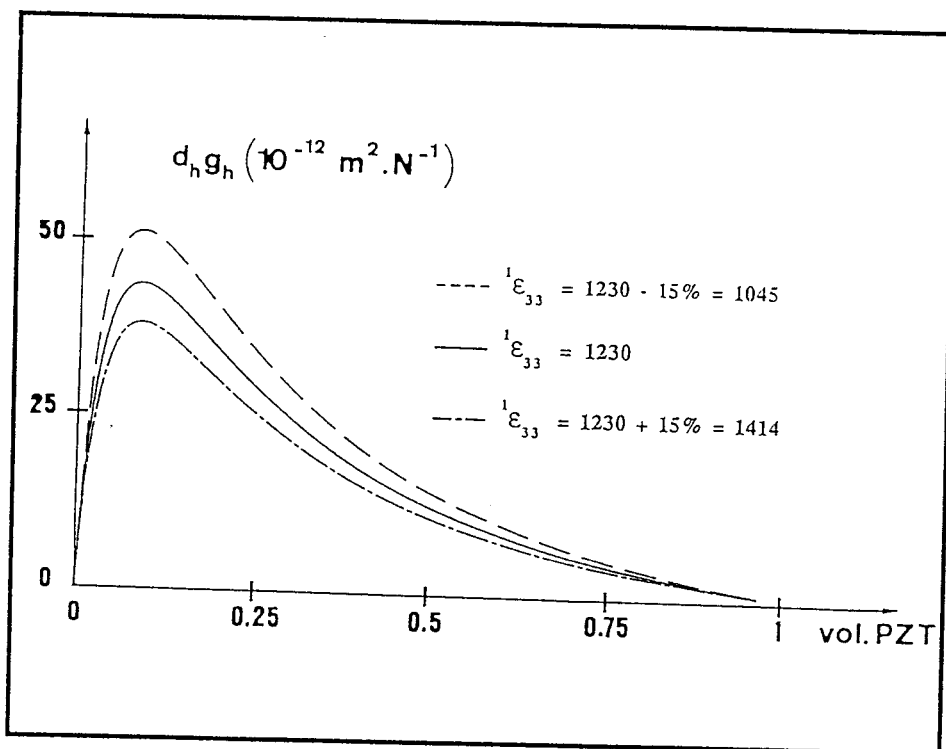


Figure VI-29

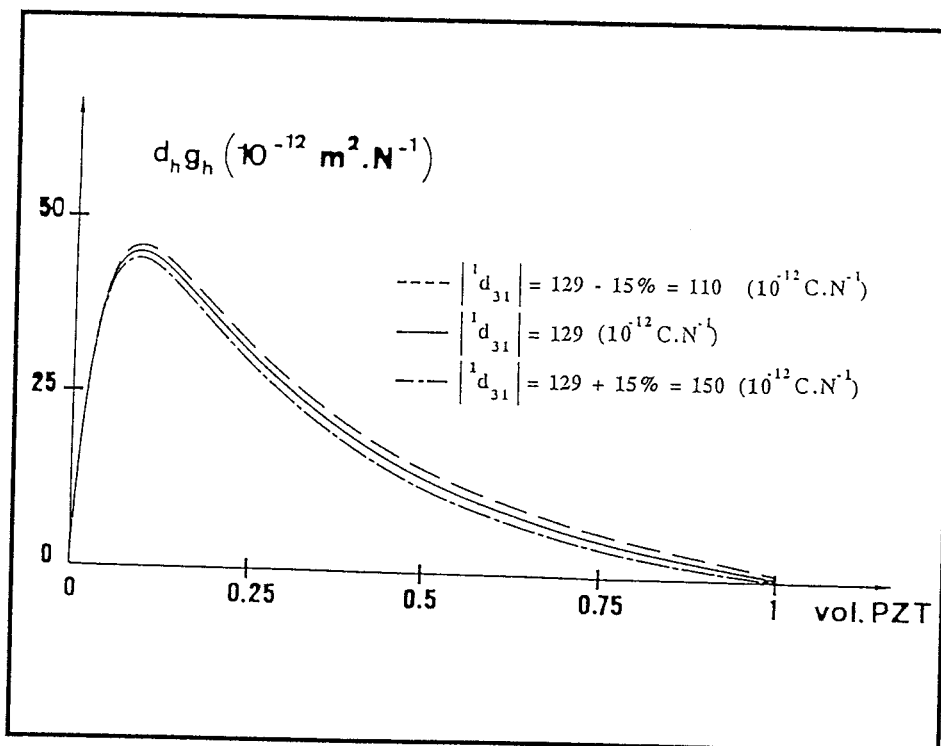


Figure VI-30

3 - SIMULATION NUMERIQUE

3 - 1 - Equations du problème

Dans l'analyse d'une structure piézoélectrique, seuls les effets élastiques, diélectriques et piézoélectriques sont pris en compte. Les non-linéarités de grands déplacements ou de comportements et les effets dissipatifs (frottements internes, pertes diélectriques) sont exclus. Les équations d'état du système sont [61]:

$$\begin{aligned} T &= C^E S - e^t E \\ D &= e S + \epsilon^S E \end{aligned} \quad (\text{VI-35})$$

T : vecteur des contraintes mécaniques,
S : vecteur des déformations,
E : vecteur champ électrique,
D : vecteur déplacement électrique,
 C^E : matrice des rigidités mécaniques pour $E=0$,
 ϵ^S : matrice des permittivités diélectriques pour $S=0$,
e : matrice piézoélectrique.

$$E = - \text{grad } \phi \quad (\text{VI-36})$$

ϕ : potentiel.

$$S = B u \quad (\text{VI-37})$$

u : vecteur des déplacements,
B : opérateur différentiel.

Loi de Newton:

$$\text{div } T = \rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad (\text{VI-38})$$

ρ : masse spécifique du milieu piézoélectrique.

Equation de Poisson pour un isolant parfait:

$$\text{div } D = 0 \quad (\text{VI-39})$$

Les équations (VI-35) à (VI-39) constituent un système complet d'équations différentielles qui peut être résolu grâce aux conditions limites appropriées.

3 - 2 - Formulation variationnelle

Une autre façon de résoudre le problème consiste à appliquer le principe variationnel d'Hamilton [62]:

$$\delta \int L \, dt = 0 \quad (\text{VI-40})$$

L'opérateur δ représente une variation au premier ordre, et le terme de Lagrange L une différence d'énergies du milieu:

$$L = E_{\text{cin}} - E_{\text{élast}} + E_{\text{élect}} + W \quad (\text{VI-41})$$

E_{cin} : énergie cinétique du système.

$E_{\text{élast}}$: énergie élastique du système.

$E_{\text{élect}}$: énergie électrostatique du système.

w : travail extérieur développé aux frontières du système piézoélectrique.

Les équations (VI-35) à (VI-39) sont les équations d'Euler associées à la quantité stationnaire L . L'annulation de la variation de L au premier ordre implique la vérification de l'ensemble des équations d'état et conditions aux limites du système.

3 - 3 - Analyse par la méthode des éléments finis

Le domaine piézoélectrique considéré est découpé en éléments discrets, interconnectés en un nombre fini de points frontière : les nœuds. L'ensemble de ces éléments constitue le maillage (figure VI-31). A l'intérieur de chaque élément, le champ des déplacements u et le potentiel ϕ sont définis de façon unique par une combinaison linéaire de fonctions d'interpolation polynomiales $N^e(x,y,z)$, avec pour coefficients les valeurs nodales de u et ϕ . Par exemple, le potentiel dans l'élément e , au point M , de coordonnées (x,y,z) s'écrit:

$$\phi^e(x,y,z) = \phi_a^e N_a^e(x,y,z) + \phi_b^e N_b^e(x,y,z) + \phi_c^e N_c^e(x,y,z) + \phi_d^e N_d^e(x,y,z) \quad (\text{VI-42})$$

La construction des fonctions d'interpolation dépend de la géométrie des éléments de maillage et du nombre de nœuds. On dispose ainsi de fonctions d'essai, définies par morceau sur des éléments jointifs, dépendants des seules valeurs nodales de u et ϕ .

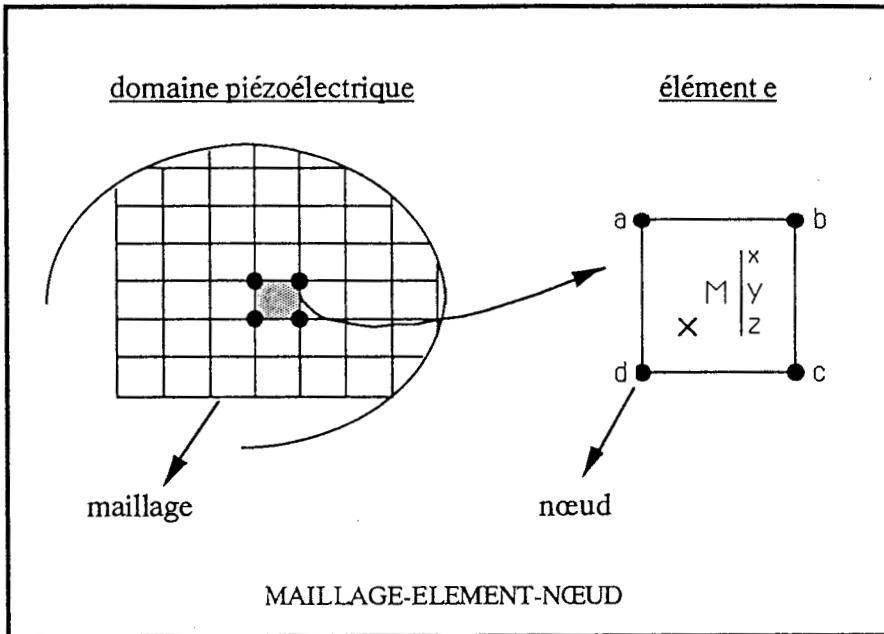


Figure VI-31

Après formulation des différents tenseurs (T, D, E, S), on introduit ces fonctions dans l'expression de L, décomposée au préalable en somme d'intégrales sur tous les éléments du maillage (assemblage). Dès lors, l'application du principe variationnel conduit à minimiser le terme stationnaire L par rapport aux valeurs nodales de u et ϕ :

$$\begin{cases} \frac{\delta L}{\delta u} = 0 \\ \frac{\delta L}{\delta \phi} = 0 \end{cases} \quad (\text{VI-43})$$

Ces deux équations, regroupées sous forme matricielle, s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^t & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F} \\ -\underline{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{VI-44})$$

\underline{u} : vecteur des valeurs nodales du champ de déplacement,

$\underline{\phi}$: vecteur des valeurs nodales du potentiel électrique,

\underline{F} : vecteur des valeurs nodales des forces appliquées,

\underline{Q} : vecteur des valeurs nodales des charges électriques,

$[K_{uu}]$: matrice de rigidité mécanique,
 $[K_{u\phi}]$: matrice de rigidité piézoélectrique,
 $[K_{\phi\phi}]$: matrice de rigidité diélectrique,
 $[M]$: matrice de masse cohérente pour un solide,
 ω : pulsation ($\omega = 2\pi f$),
 t : transposée.

Le système (VI-44) peut encore être simplifié [61-63] et devient:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2[M] & \underline{K}_{u\phi} \\ \underline{K}_{u\phi}^t & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F} \\ \frac{-I}{j\omega} \end{bmatrix} \quad (\text{VI-45})$$

$\underline{K}_{u\phi}$ est un vecteur, $K_{\phi\phi}$ un scalaire; ϕ est le potentiel électrique appliqué et I le courant électrique entrant dans la structure.

3 - 4 - Modélisation du composite Z37

3 - 4 - 1 - Hypothèses

Nous supposons que le composite possède une structure périodique (figure VI-32) dont la maille élémentaire est l'une des quatre cellules cubiques présentées figure VI-33.

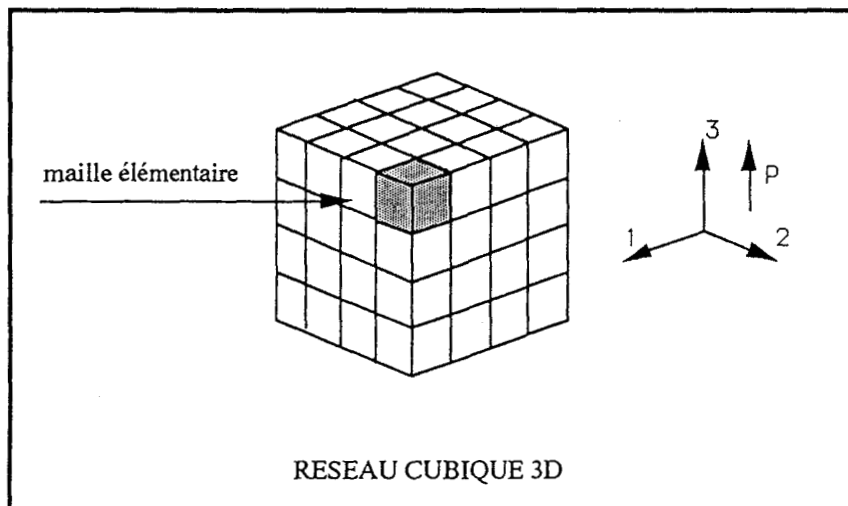


Figure VI-32

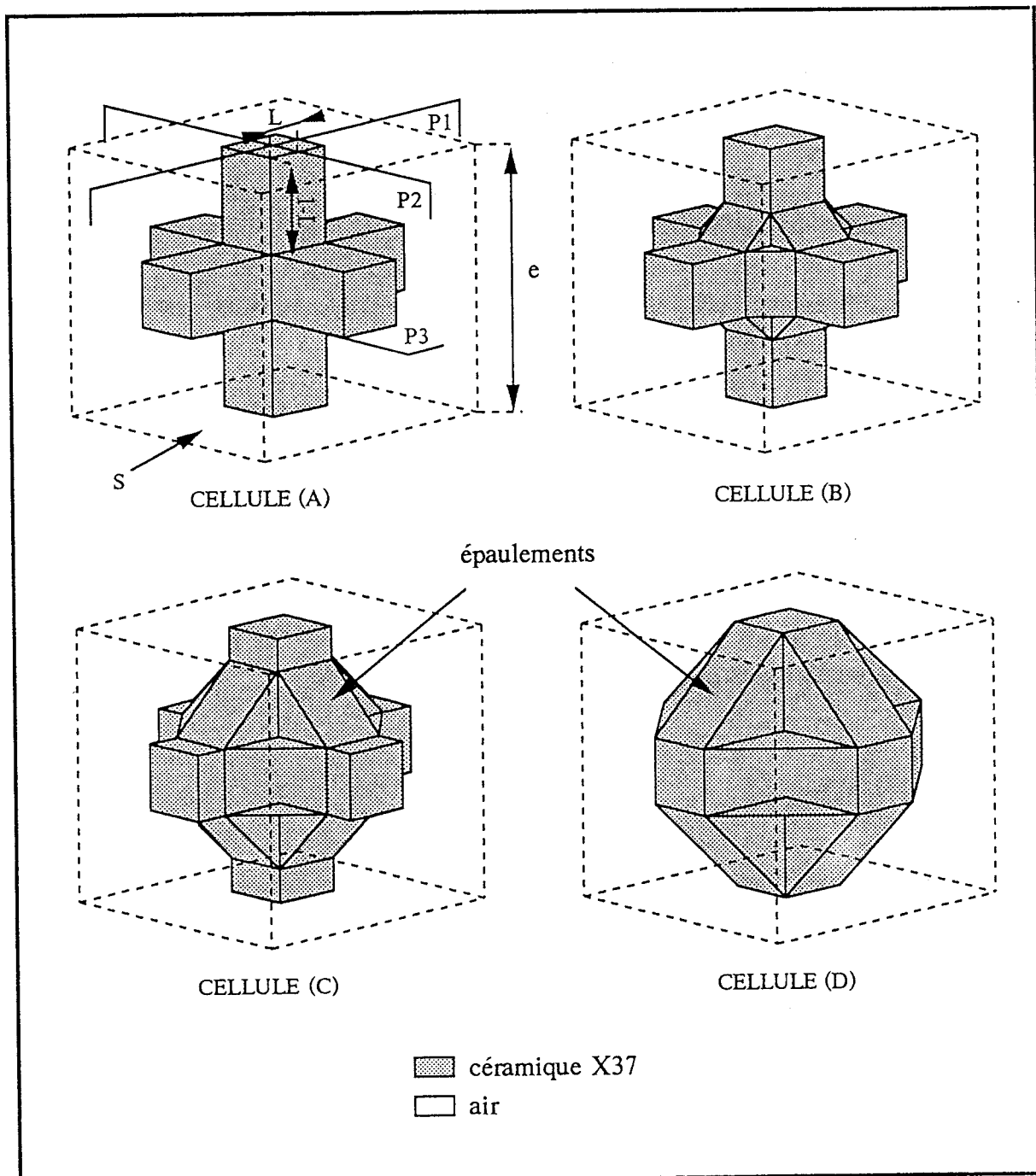


Figure VI-33

En vertu du principe de l'action-réaction, les contraintes normales et statiques, s'équilibrent aux interfaces des cellules cubiques. Ainsi, pour des sollicitations simples (normales et quasi-statiques, mécaniques ou électriques), nous admettons que l'étude du composite se ramène à celle de la maille élémentaire.

3 - 4 - 2 - Conditions aux limites

Les frontières de la maille élémentaire (comme celles du composite) sont libres, donc dénuées de plan de symétrie.

3 - 4 - 3 - Symétries

Du point de vue du test, les cellules présentées figure VI-33 sont intéressantes. Trois plans de symétrie (P1, P2, P3) permettent de réduire le maillage au huitième. Les analyses réalisées plus loin ne considèrent donc que le cas, où le champ de déplacement est symétrique par rapport à ces trois plans.

3 - 4 - 4 - Maillages

Six maillages différents ont été réalisés.

a) maillages A1 et A2

Les premiers maillages réalisés (figure VI-34), notés A1 et A2, correspondent exactement au huitième de la cellule (A).

Leurs caractéristiques sont :

- nombre d'éléments : 10
- type d'éléments : hexaèdre isoparamétrique à 20 nœuds (10)
- nombre de nœuds : 128

Le maillage A2 ne comporte que 4 éléments hexaédriques polarisés, à la différence du maillage A1 où tous les éléments sont polarisés.

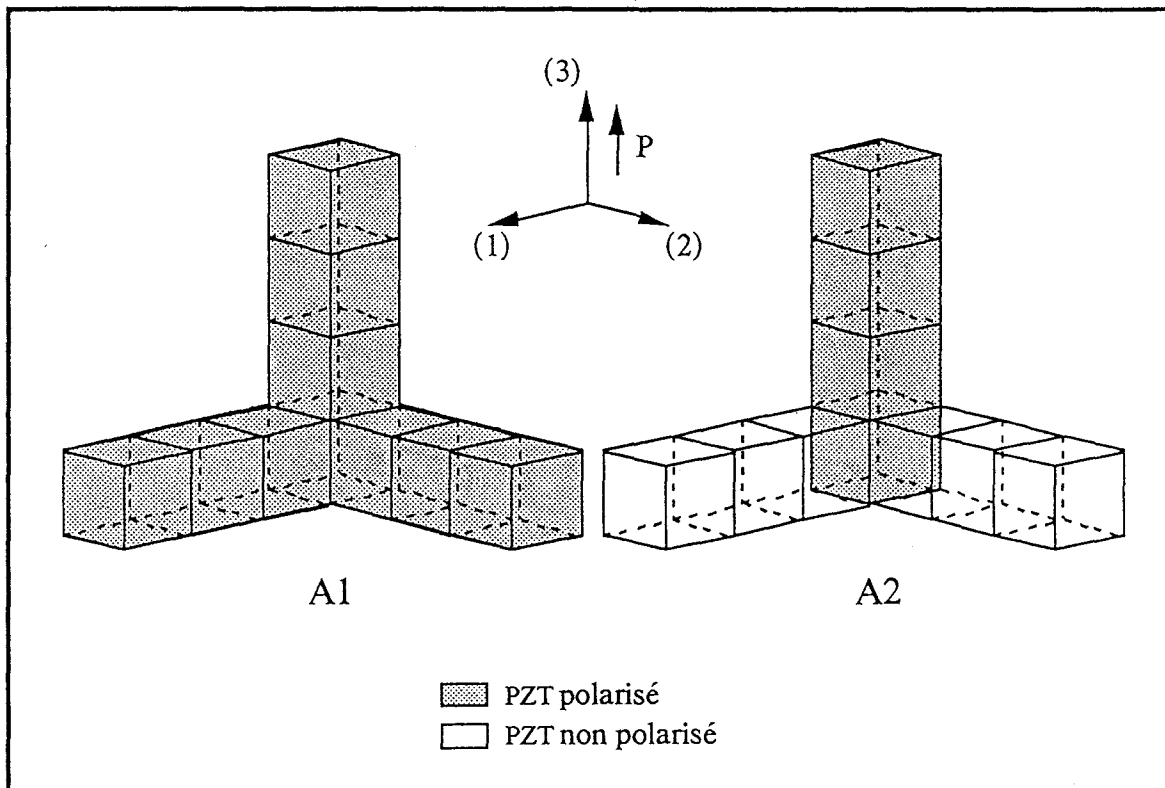


Figure VI-34

b) maillage B

Le maillage B (figure VI-35) correspond au huitième de la cellule (B).
Ses caractéristiques sont:

- nombre d'éléments : 13
- types d'éléments : hexaèdre isoparamétrique à 20 nœuds (10)
prisme à base triangulaire isoparamétrique à 15 nœuds (3)
- nombre de nœuds : 134

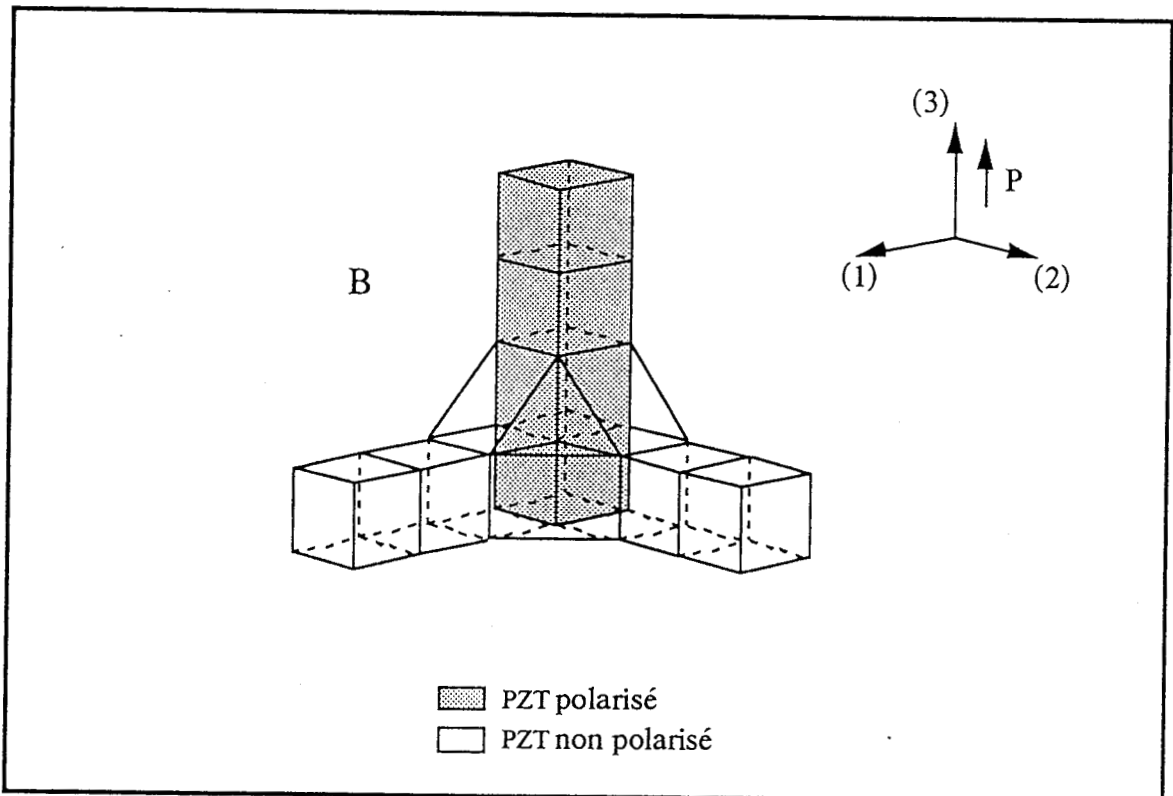


Figure VI-35

c) maillages C1 et C2

Les maillages C1 et C2 (figure VI-36) correspondent au huitième de la cellule (C).
Leurs caractéristiques sont :

- nombre d'éléments : 22
- types d'éléments : hexaèdre isoparamétrique à 20 nœuds (10)
prisme à base triangulaire isoparamétrique à 15 nœuds (12)
- nombre de nœuds : 167

Le maillage C2 ne comporte que 4 éléments hexaédriques polarisés, à la différence du maillage C1 où 8 éléments sont polarisés (6 hexaèdres et 2 prismes).

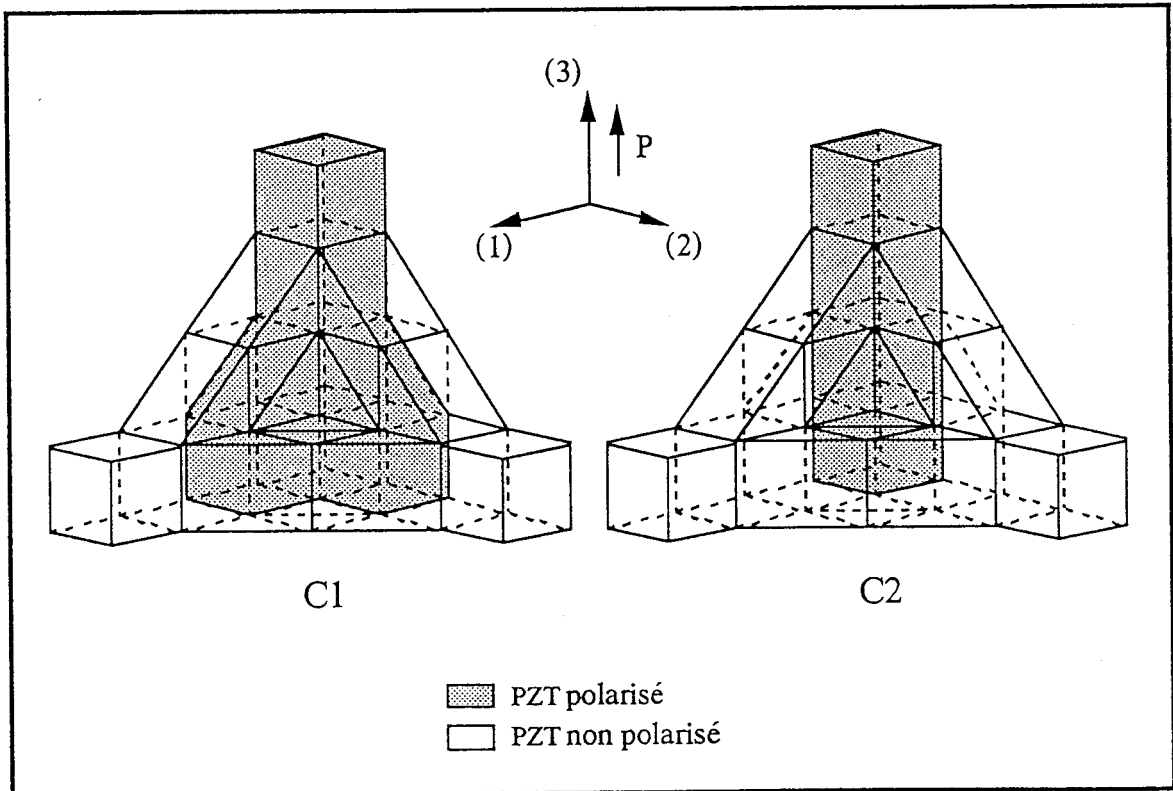


Figure VI-36

d) maillage D

Le maillage D (figure VI-37) correspond au huitième de la cellule (D).
Ses caractéristiques sont :

- nombre d'éléments : 37
- types d'éléments : hexaèdre isoparamétrique à 20 nœuds (10)
prisme à base triangulaire isoparamétrique à 15 nœuds (27)
- nombre de nœuds : 221

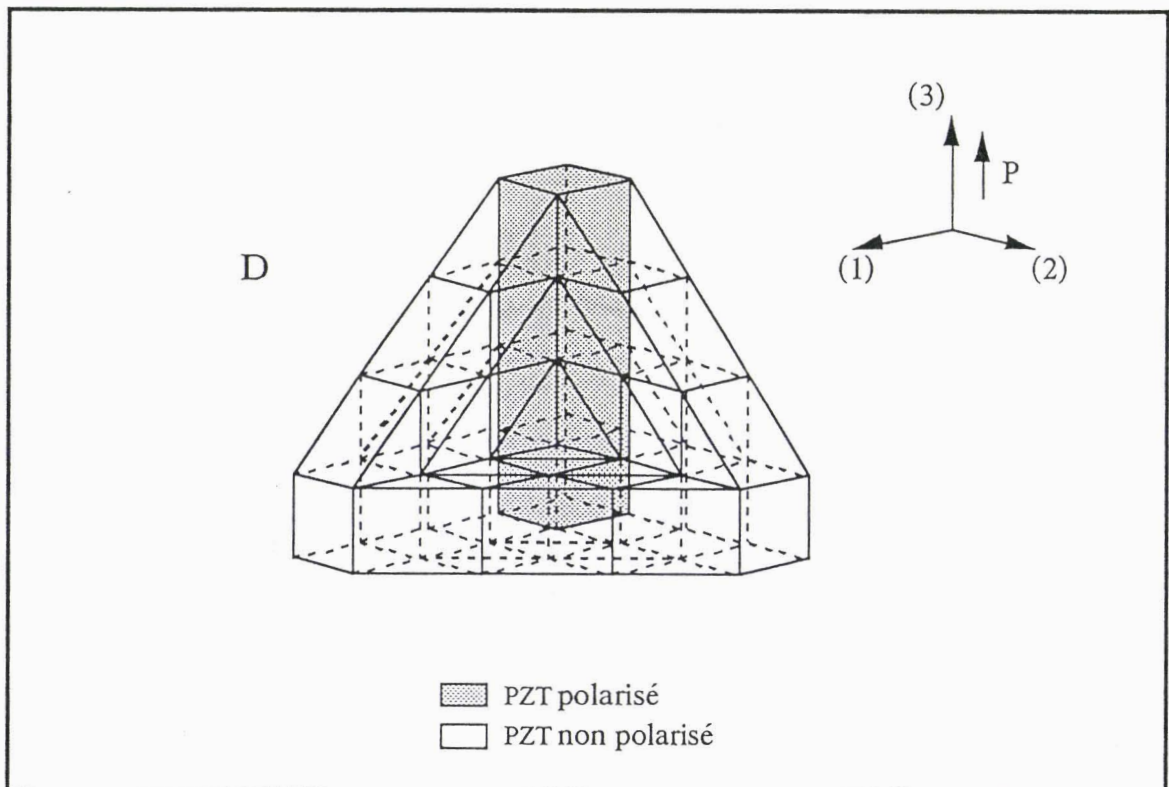


Figure VI-37

3 - 4 - 5 - Développement

Pour chaque type de maillage, et pour six L distincts (L proportionnel à la fraction volumique de céramique du composite), nous calculons grâce au code éléments finis ATILA, les coefficients ϵ_{33} , d_{33} , d_{31} , d_h du système.

a) calcul de la constante ϵ_{33} (analyse harmonique très basse fréquence)

Une différence de potentiel sinusoïdale (ϕ , $f=10$ Hz) est appliquée entre les faces de la maille élémentaire perpendiculaires à la direction de polarisation (3). Les équations du système sont donc:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2[M] & \underline{K}_{u\phi} \\ \underline{K}_{u\phi}^t & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-I}{j\omega} \end{bmatrix} \quad (\text{VI-46})$$

Le code calcule le champ de déplacement \underline{u} en utilisant la première ligne du système (VI-46):

$$[K_{uu}] - \omega^2[M] \underline{u} = - \underline{K}_{u\phi} \phi \quad (\text{VI-47})$$

et l'admittance électrique en utilisant la seconde ligne:

$$Y = -j\omega \left[K_{\phi\phi} + \frac{\underline{K}_{u\phi}^t \cdot \underline{u}}{\phi} \right]_{(BF)} jB \quad (\text{VI-48})$$

d'où la capacité C de la maille à basse fréquence, et la constante diélectrique ϵ_{33} du composite:

$$C = \frac{B}{\omega} = - \left[K_{\phi\phi} + \frac{\underline{K}_{u\phi}^t \cdot \underline{u}}{\phi} \right] \quad (\text{VI-49})$$

$$\epsilon_{33}^T = C \frac{e}{S \cdot \epsilon_0} \quad (\text{VI-48})$$

e : côté de la maille élémentaire (figure VI-33),
 S : surface de la maille élémentaire (figure VI-33),
 ϵ_0 : permittivité du vide ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹).

b) calcul de la constante d_{33} (analyse statique en circuit ouvert avec chargement longitudinal)

Une force (F) est appliquée sur les faces de la maille élémentaire normales à la direction de polarisation (3) (figure VI-38). Les équations du système deviennent:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] & \underline{K}_{u\phi} \\ \underline{K}_{u\phi}^t & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{VI-51})$$

Le code calcule \underline{u} et le potentiel électrique induit ϕ :

$$([K_{uu}] - \underline{K}_{u\phi} \cdot K_{\phi\phi}^{-1} \cdot \underline{K}_{u\phi}^t) \underline{u} = \underline{F} \quad (\text{VI-52})$$

$$\phi = - K_{\phi\phi}^{-1} \cdot \underline{K}_{u\phi}^t \cdot \underline{u} \quad (\text{VI-53})$$

Nous en déduisons la quantité de charges Q qui apparaît sur les faces de la maille normales à la direction de polarisation, puis le d_{33} du composite:

$$Q = C \cdot \phi \quad (\text{VI-54})$$

$$\boxed{d_{33} = \frac{Q}{F} = \frac{C \cdot \phi}{F}} \quad (\text{VI-55})$$

c) calcul de la constante d_{31} (analyse statique en circuit ouvert avec chargement transversal)

Une force (F) est appliquée sur les faces de la maille élémentaire, parallèles à la direction de polarisation (3) (figure VI-39). En procédant comme au § précédent, nous obtenons:

$$\boxed{d_{31} = \frac{1}{2} \frac{Q}{F} = \frac{1}{2} \frac{C \cdot \phi}{F}} \quad (\text{VI-56})$$

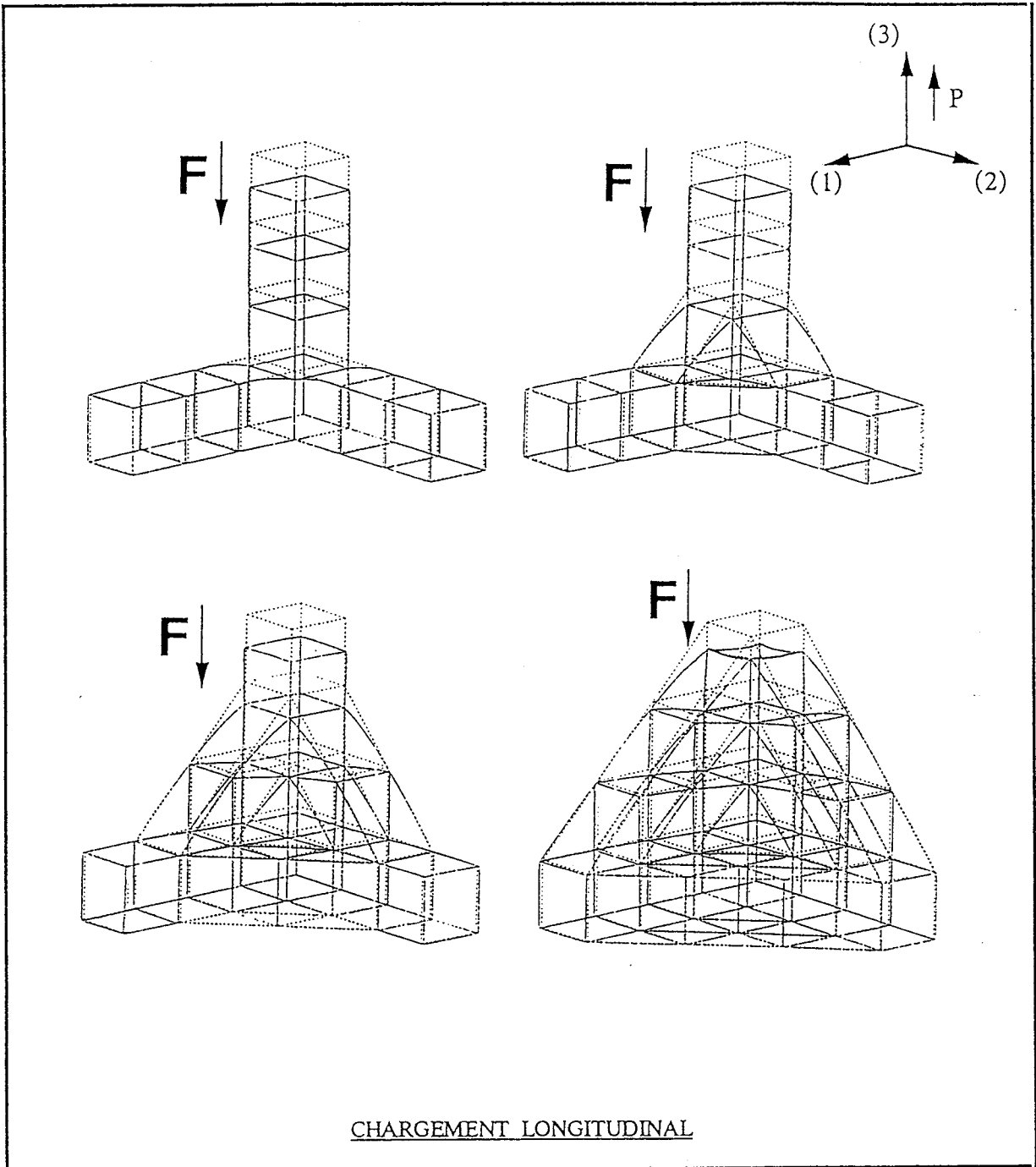


Figure VI-38

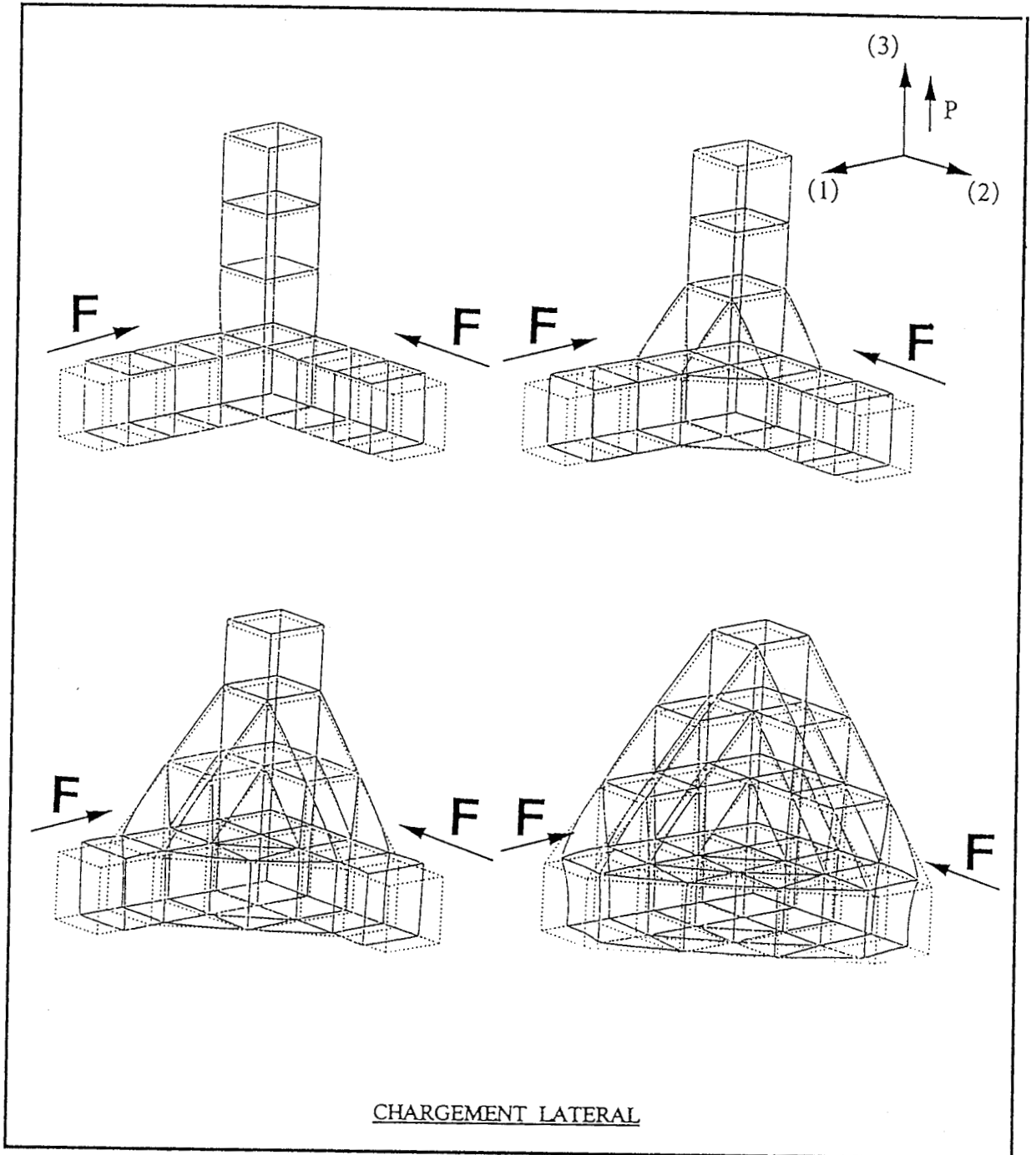


Figure VI-39

















3 - 4 - 6 - Résultats

Nos résultats de simulation sont rassemblés dans les tableaux VI-6 à VI-11.

L'influence des paramètres:

- largeur des poutres en céramique (L),
- importance des épaulements,
- proportion de céramique polarisée,

sur les caractéristiques de la cellule de base, est résumée dans le tableau VI-4.

	vol. PZT	ϵ_{33}^T	d_{33}	$ d_{31} $	d_h
L 					
épaulement 					
proportion de PZT polarisé 					

(tableau VI-4)

Le tableau VI-5 montre que nos résultats permettent d'approcher ou d'encadrer les caractéristiques du composite quelle que soit sa densité.

vol. PZT (%)	L	maillage	ϵ_{33}^T		d_{33} (10^{-12} C.N $^{-1}$)		d_h (10^{-12} C.N $^{-1}$)	
			expérience	simulation	expérience	simulation	expérience	simulation
45	0.40	C1		153.7		243.3		209.9
45			170		230		202	
47			189		240		206	
52	0.50	B		189.3		240.7		181.3
54			241		245		200	
58	0.50	C1		245.7		250.5		200.5
61			340		254		189	
66	0.57	C1		328.8		254.8		191
70			510		274		165	
78	0.70	A1		497.7		275.5		179.3
80			700		282		135	
89	0.80	A2		646		257.2		129.2

(tableau VI-5)

3 - 4 - 7 - Conclusion

Connaissant les différentes évolutions des constantes diélectriques et piézoélectriques de la cellule, en fonction de la géométrie et de la polarisation de la phase PZT (tableau VI-4), nous pensons qu'une étude paramétrique plus fine pourrait permettre de converger exactement vers les résultats expérimentaux pour chaque densité.

La prise en compte d'épaulements, d'autant plus importants que la densité du composite est faible, nous semble une condition nécessaire de convergence (tableau VI-5). Cependant, il est vraisemblable qu'une cellule intermédiaire entre A et C (figure VI-33) suffise pour simuler correctement l'ensemble des résultats expérimentaux.

Dans le modèle analytique (§-2), c'est sans doute la valeur arbitraire donnée au paramètre de fit qui permet de pallier à la grande simplicité de la cellule élémentaire. Ce paramètre n'a pas de signification physique à proprement parler. Il rend artificiellement compte de la réelle complexité structurale du composite.

CHAPITRE VI
- MODELISATION -

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	16	16	18	25	25	27
C _{BF} (pF)	6.91	6.44	7.44	10.5	10.3	18.2
epsilon relatif	39.0	36.4	42.0	59.3	58.2	102.8
d ₃₃ (pC/N)	283	262	237	229.4	209.6	164
d ₃₁ (pC/N)	-22.5	-19.8	-11	-7.4	-6.5	-5
d _h (pC/N)	238	222.4	214.8	214.6	196.6	154

(tableau VI-6) RESULTATS OBTENUS POUR L=.25

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	35	35	38	45	45	57
C _{BF} (pF)	20.1		20.2	27.2	26.3	40.5
epsilon relatif	113.5		114.1	153.7	148.6	228.8
d ₃₃ (pC/N)	284		239.6	243.3	219	192
d ₃₁ (pC/N)	-23.5		-21.9	-16.7	-15.7	-13.3
d _h (pC/N)	237		195.8	209.9	187.6	165.5

(tableau VI-7) RESULTATS OBTENUS POUR L=.40

CHAPITRE VI

- MODELISATION -

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	50	50	52	58	58	60
C _{BF} (pF)	34.7	29.6	33.5	43.5	42.2	61.1
epsilon relatif	196.1	167.2	189.3	245.7	238.4	345.2
d ₃₃ (pC/N)	285	252.3	240.7	250.5	225.8	206.0
d ₃₁ (pC/N)	-28.7	-34.6	-29.7	-25.0	-23.8	-20.9
d _h (pC/N)	227.6	183.1	181.3	200.5	178.1	164.2

(tableau VI-8) RESULTATS OBTENUS POUR L=.50

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	60	60	62	66	66	76
C _{BF} (pF)	48.7		45.9	58.2	56.5	78.9
epsilon relatif	275.1		259.3	328.8	319.2	445.7
d ₃₃ (pC/N)	285.1		241.8	254.8	230.8	215.0
d ₃₁ (pC/N)	-38.2		-35.6	-31.9	-30.5	-27.6
d _h (pC/N)	208.7		170.6	191.0	169.8	159.8

(tableau VI-9) RESULTATS OBTENUS POUR L=.57

CHAPITRE VI
- MODELISATION -

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	78	78				
C _{BF} (pF)	88.1	72.8				
epsilon relatif	497.7	411.3				
d ₃₃ (pC/N)	275.5	251.1				
d ₃₁ (pC/N)	-48.1	-51.8				
d _h (pC/N)	179.3	147.4				

(tableau VI-10) RESULTATS OBTENUS POUR L=.70

maillages	A1	A2	B	C1	C2	D
vol. PZT (%)	89	89				
C _{BF} (pF)	140.3	114.3				
epsilon relatif	792.6	646.0				
d ₃₃ (pC/N)	287.2	257.2				
d ₃₁ (pC/N)	-56.0	-64.0				
d _h (pC/N)	175.2	129.2				

(tableau VI-11) RESULTATS OBTENUS POUR L=.80

L'étude que nous avons menée a permis de faire le point sur les performances acoustiques et le comportement en pression d'un bon nombre de nouveaux matériaux piézoélectriques pour hydrophone.

Un dispositif de mesure a été mis en place pour caractériser ces matériaux en mode hydrostatique et en pression.

Dans l'ensemble, tous les matériaux testés possèdent des propriétés assez remarquables par rapport à celles des céramiques PZT traditionnelles. L'évolution des "monophasés" semble arriver à son apogée, avec les céramiques en titanate de plomb et les copolymères piézoélectriques. Par contre, les progrès récemment accomplis dans la synthèse des matériaux composites, nous conduisent à penser que les composites piézoélectriques vont continuer à prendre une importance notable, à mesure que les procédés de fabrication à grande échelle seront maîtrisés.

L'un des composites les plus performants, et paradoxalement l'un des moins connus, le composite PZT-air de connectivité 3-3, aussi appelé céramique poreuse, nous a particulièrement intéressé.

Nous avons observé l'influence de la porosité sur ses propriétés diélectriques et piézoélectriques, et sur leur stabilité en pression.

Résultats expérimentaux et modélisation théorique à l'appui, nous avons cherché à interpréter son comportement en fonction de la porosité et de la pression hydrostatique.

Le modèle analytique proposé nous permet d'envisager plusieurs façons d'améliorer son facteur de mérite, en jouant sur les caractéristiques de la céramique de base.

Dans l'avenir, il serait intéressant de compléter notre étude en pression par une caractérisation en température et en fréquence des nouveaux matériaux, afin d'en définir tous les domaines d'utilisation, et de permettre une optimisation de leur fonctionnement par l'identification des gammes de pression, température et fréquence, dans lesquelles le couplage est maximum.

La préparation des composites PZT-air de connectivité 3-3, à partir de nouvelles céramiques de base, choisies en fonction des indications du modèle analytique, serait souhaitable, car susceptible d'accroître la sensibilité et la stabilité en pression du composite.

Enfin, la céramique poreuse, imprégnée d'huile isolante, dont le comportement en fréquence est analogue à celui d'un filtre passe haut [13], et dont la sensibilité semble indépendante de la pression [13], pourrait constituer un nouveau domaine d'étude riche d'applications.

- [1] **E. DIEULESAINT, D. ROYER**
Ondes élastiques dans les solides
Masson (1974)
- [2] **W. P. MASSON**
Physical acoustics
Academic Press (1964)
- [3] **B. JAFFE, W. R. COOK and H. JAFFE**
Piézoélectric ceramic
Academic London (1971)
- [4] **D. BERLINCOURT and H. H. A. KRUEGER**
Domain processes in lead titanate zirconate and barium titanate ceramics
J. Appl. Phys. 30(11), p.1804-1810 (1959)
- [5] **J. M. HERBERT**
Ferroelectric transducers and sensors
Electrocomponent Science Monographs, volume 3
Gordon and Breach Science Publ. (1982)
- [6] **O.B. WILSON**
An introduction to the theory and design of sonar transducers
US Government Printing Office (1985)
- [7] **L. EYRAUD, P. EYRAUD, A. PELURSON, C. RICHARD**
Structure discontinue, ordonnée ou désordonnée, piézoélectrique pour hydrophones
Rapport final, Convention : C88.48.603.007, D.C.A.N. de Toulon, G.E.R.D.S.M.
Laboratoire de Génie Electric & Ferroélectricité, I.N.S.A. Lyon (1989)
- [8] **M. BOISRAYON**
Hydrophone de coque en "nouveaux matériaux", Commentaires sur le rapport Sintra
Note technique n°49520 ET/LD
D.C.A.N. de Toulon, G.E.R.D.S.M. (1986)

- [9] **R. J. BOBBER**
 Underwater electroacoustic measurements
 US Government Printing Office (1970)
- [10] **THOMSON SINTRA A.S.M.**
 Matériau composite piézoélectrique de texture 0-3, première phase d'industrialisation
 Rapport poste 1, ASM 88/C54/274 JPB/LB, marché A87 48 628 (1988)
- [11] **L. GUYESSE, P. SABATHE**
 Acoustique sous-marine
 Dunod (1964)
- [12] **D. BERLINCOURT**
 Piezoelectrics ceramics : characteristics and applications
 J. Acoust. Soc. Am. 70(6), p.1586-1595 (1981)
- [13] **G. GAILLARD-GROLEAS**
 Etude et mise au point de céramiques piézoélectriques poreuses
 Thèse de Doctorat, Université de Paris 6 (1990)
- [14] **H. KAWAI**
 Jpn. J. Appl. Phys. 8, 975 (1969)
- [15] **G. M. SESSLER**
 Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride
 J. Acoust. Soc. Am. 70(6), p.1596-1608 (1981)
- [16] **E. FUKADA, T. FURUKAWA**
 Piezoelectricity and ferroelectricity in polyvinylidene fluoride
 Ultrasonics 9(1), p.31-34 (1981)
- [17] **A. CHALUMEAU**
 Contribution à l'étude de la transition de Curie et des propriétés physiques et piézoélectriques des copolymères du polyfluorure de vinylidène (PVF₂) et du polytrifluoroéthylène (PTrFE)
 Thèse de Doctorat, Université de Paris 6 (1988)

- [18] **G. M. STACK and R. Y. TING**
Piezoelectric properties and temperature stability of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers
IEEE Trans. on Ferroelectrics and frequency control 36(4), p. 417-423 (1989)
- [19] **C.A.S.T.**
Matériaux piézoélectriques, pyroélectriques, électrostrictifs et applications
Document de stage formation continue, Centre d'Actualisation Scientifique et Technique, I.N.S.A. Lyon (1988)
- [20] **THOMSON SINTRA A.S.M.**
Etude prospective de l'intérêt du PVF₂ pour les applications ASM
Rapport final, ASM 86/34/045 JL/AD, marché DRET n° 84/347 (1986)
- [21] **J. C. Mc GRATH, L. HOLT, D. M. JONES and I. M. WARD**
Recent measurements on improved thick film piezoelectric PVDF polymer materials for hydrophone applications
Ferroelec. 50, p. 339-346 (1983)
- [22] **G. E. JOHNSON, L. L. BLYLER, G. R. CRANE and C. GIENIEWSKI**
Thermal piezoelectric stability of poled uniaxially and biaxially oriented poly(vinylidene fluoride)
Ferroelec. 32, p. 43-47 (1981)
- [23] **M. D. DELODDERE**
Contribution à la caractérisation de matériaux piézoplastiques
Etude de leurs propriétés élastiques, diélectriques et piézoélectriques
Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille 1 (1989)
- [24] **Y. ITO, K. NAGATSUMA, H. TAKEUCHI, and S. JYOMURA**
Surface acoustic-wave and piezoelectric properties of (Pb, Ln)(Ti, Mn)O₃ ceramics (Ln=rare earths)
J. Appl. Phys. 52, p. 4479-4486 (1981)
- [25] **Y. YAMASHITA, K. YOKOYAMA, H. HONDA, and T. TAKAHASHI**
(Pb, Ca)((Co_{1/2}W_{1/2}), Ti)O₃ piezoelectric ceramics and their applications
Jpn. J. Appl. Phys. 20, supplement 20-4, p. 183-187 (1981)

- [26] **K. M. RYTENMYER, R. Y. TING, and T. A. HENRIQUES**
Piezoelectric properties of calcium-modified lead titanate and its applications
in underwater transducers
J. Acoust. Soc. Am. 79, p.2073-2076 (1986)
- [27] **H. TAKEUCHI, S. JYOMURA, E. YAMAMOTO, and Y. ITO**
Electromechanical properties of (Pb, Ln)(Ti, Mn)O₃ ceramics (Ln=rare earths)
J. Acoust. Soc. Am. 72, p.1114-1120 (1982)
- [28] **W. WERSING, K. LUBITZ, J. MOHAUPT**
Anisotropic piezoelectric effect in modified PbTiO₃ ceramics
IEEE Trans. on Ferroelectrics and frequency control 36(4), p. 424-433 (1989)
- [29] **R. E. NEWNHAM, D. P. SKINNER and L. E. CROSS**
Connectivity of piezoelectric-pyroelectric composites
Mat. Res. Bull. 13, p. 525-536 (1978)
- [30] **R. E. NEWNHAM, A. SAFARI, J. GINIEWICZ and B. H. FOX**
Composite piezoelectric sensors
Ferroelec. 60, p. 15-21 (1984)
- [31] **D. P. SKINNER, R. E. NEWNHAM and L. E. CROSS**
Flexible composite transducers
Mat. Res. Bull. 13, p. 599-607 (1978)
- [32] **T. R. SHROUT, W. A. SCHULZE and J. V. BIGGERS**
Simplified fabrication of PZT/polymer composites
Mat. Res. Bull. 14, p. 1553-1559 (1979)
- [33] **R. Y. TING**
Piezoelectric properties of a porous PZT ceramic
Ferroelec. 65, p. 11-20 (1985)
- [34] **K. RITTENMYER, T. SHROUT, W. A. SCHULZE and R. E. NEWNHAM**
Piezoelectric 3-3 composites
Ferroelec. 41, p. 189-195 (1982)

- [35] **M. KAHN, R. W. RICE and D. SHADWELL**
Preparation and piezoelectric response of PZT ceramics with anisotropic pores
Advanced Ceramic Materials 1(1), p. 55-60 (1986)
- [36] **M. KAHN**
Acoustic and elastic properties of PZT ceramics with anisotropic pores
J. Am. Ceram. Soc. 68(11), p. 623-628 (1985)
- [37] **A. SAFARI, R. E. NEWNHAM, L. E. CROSS and W. A. SCHULZE**
Perforated PZT-polymer composites for piezoelectric transducer applications
Ferroelec. 41, p. 197-205 (1982)
- [38] **K. A. KLICKER, J. V. BIGGERS, and R. E. NEWNHAM**
Composites of PZT and epoxy for hydrostatic transducer applications
J. Am. Ceram. Soc. 64(1), p. 5-9 (1981)
- [39] **R. Y. TING**
Evaluation of new piezoelectric composite materials for hydrophone applications
Ferroelec. 67, p. 143-157 (1986)
- [40] **M. J. HAUN and R. E. NEWNHAM**
An experimental and theoretical study of 1-3 and 1-3-0 piezoelectric PZT-polymer
composites for hydrophone applications
Ferroelec. 68, p. 123-139 (1986)
- [41] **M. J. HAUN, R. E. NEWNHAM and W. A. SCHULZE**
1-2-3 and 1-2-3-0 piezoelectric composites for hydrophone applications
Advanced Ceramic Materials 1(4), p. 361-365 (1986)
- [42] **R. E. NEWNHAM, A. SAFARI, G. SA-GONG and J. GINIEWICZ**
Flexible composite piezoelectric sensors
IEEE Ultrasonics Symposium, p. 501-506 (1984)
- [43] **L. P. BROWDER, S. W. MEEKS**
Effects of one-dimensional stress on MIL-STD-1376 piezoelectric ceramic materials,
type I, II, and III
NRL report 8159, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. (1977)

- [44] **QUARTZ & SILICE**
Céramiques piézoélectriques
Documentation technique
- [45] **J. RUNT and E. C. GALGOCI**
Piezoelectric composites of PZT and some semi-crystalline polymers
Mat. Res. Bull. 19, p. 253-260 (1984)
- [46] **H. BANNO, K. OGURA, H. SOBUE and K. OHYA**
Piezoelectric and acoustic properties of piezoelectric flexible composites
Jpn. J. Appl. Phys. 26, supplement 26-1, p. 153-155 (1987)
- [47] **R. Y. NISHI and R. F. BROWN**
Behavior of piezoceramic projector materials under hydrostatic pressure
J. Acoust. Soc. Am. 36(7), p.1292-1296 (1964)
- [48] **S. W. MEEKS and R. Y. TING**
Effects of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF
J. Acoust. Soc. Am. 74, p.1681-1686 (1983)
- [49] **A. M. VARAPRASAD and R. KRISHNAN**
PZT-polymer composites for transducers of hydrophone systems
Sensors and Actuators 14, p. 361-368 (1988)
- [50] **S. W. MEEKS and R. W. TIMME**
Effects of one-dimensional stress on piezoelectric ceramics
J. Appl. Phys. 46(10), p. 4334-4338 (1975)
- [51] **M. T. MUNIER, J. P. BESOMBES**
Caractéristiques d'emploi en tension, pression, et température des céramiques piézoélectriques à usage de transducteurs
Rapport final, marché DRET 78-34-011-00-480-75-01,
CIT ALCATEL division Marine (1979)
- [52] **H. H. A. KRUEGER and D. BERLINCOURT**
Effects of high static stress on the piezoelectric properties of transducer materials
J. Acoust. Soc. Am. 33(10), p. 1339-1344 (1961)

- [53] **R. Y. NISHI**
 Effect of one-dimensional pressure on the properties of several transducers ceramics
 J. Acoust. Soc. Am. 40(2), p. 486-495 (1966)
- [54] **H. H. A. KRUEGER**
 Stress sensitivity of piezoelectric ceramics: part 1 sensitivity to compressive stress
 parallel to the polar axis
 J. Acoust. Soc. Am. 42(3), p. 636-645 (1967)
- [55] **T. FURUKAWA, K. ISHIDA and E. FUKADA**
 Piezoelectric properties in the composite systems of polymers and PZT ceramics
 J. Appl. Phys. 50(7), p. 4904-4912 (1979)
- [56] **H. BANNO and D. SAITO**
 Piezoelectric and dielectric properties of composites of synthetic rubber and PbTiO_3 or PZT
 Jpn. J. Appl. Phys. 22, supplement 22-2, p. 67-69 (1983)
- [57] **W. WERSING, K. LUBITZ and J. MOHAUPT**
 Dielectric, elastic and piezoelectric properties of porous PZT ceramics
 Ferroelec. 68, p. 77-97 (1986)
- [58] **THOMSON SINTRA A.S.M.**
 Technologie acoustique - Etude de céramiques piézoélectriques poreuses
 Rapport ASM 89/C54/772 JPB/LG, contrat DRET 88 015 22 lot n°2 (1989)
- [59] **D. SORNETTE, M. LAGIER, S. ROUX and A. HANSEN**
 Critical piezoelectricity in percolation
 J. Phys. France 50, p. 2201-2216 (1989)
- [60] **G. GAILLARD-GROLEAS, M. LAGIER and D. SORNETTE**
 Critical behaviour in piezoelectric ceramics
 Communication privée
- [61] **J. N. DECARPIGNY**
 Application de la méthode des éléments finis à l'étude de transducteurs piézoélectriques
 Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et Techniques de Lille 1 (1984)

REFERENCES

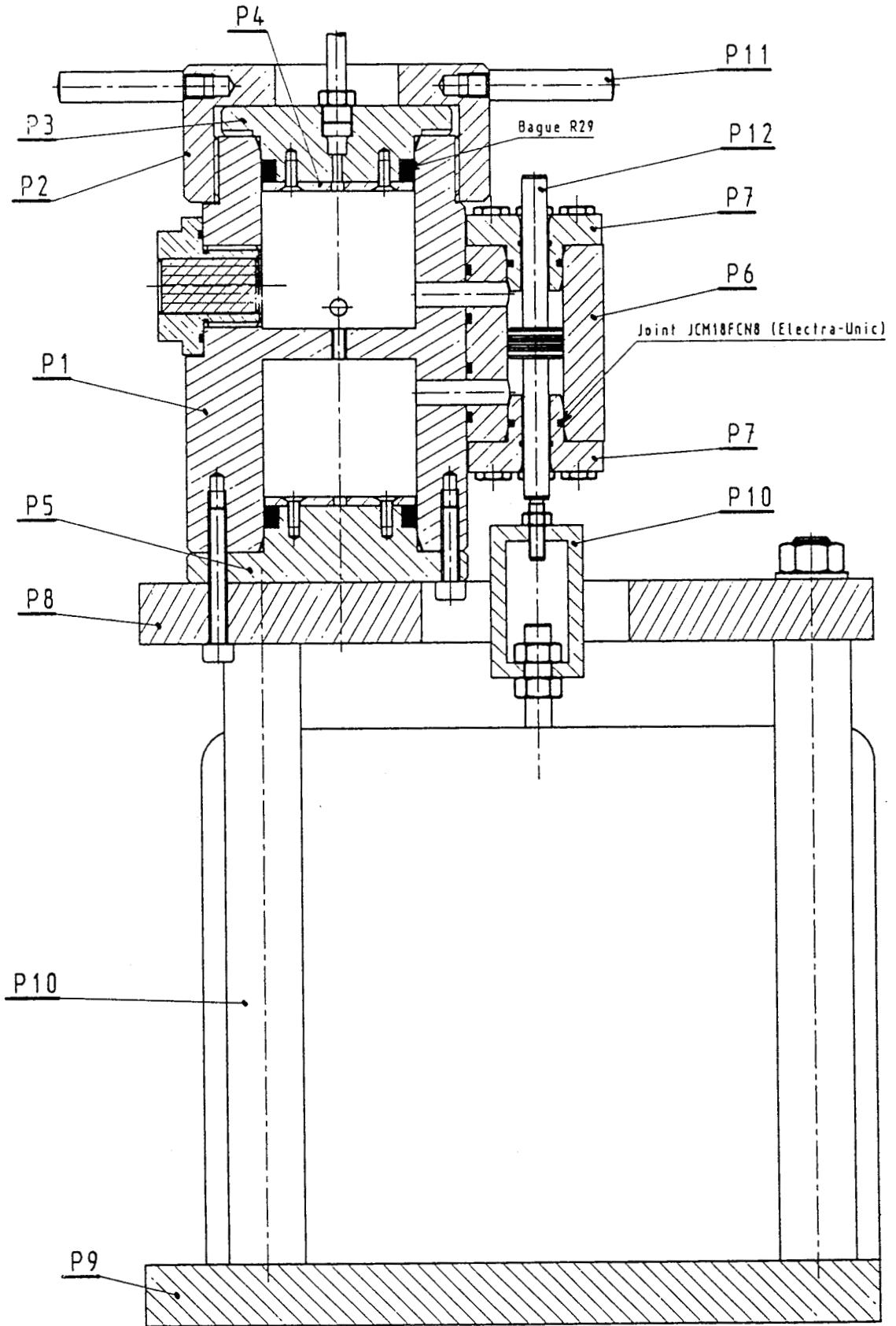
- [62] **R. LERCH, H. KAARMANN**
Three-dimensional finite element analysis of piezoelectric media
IEEE Ultrasonics Symposium, p.853-858 (1987)
- [63] **ISEN**
ATILA : Analyse de transducteurs par intégration des équations de Laplace
Notice d'utilisation version 4.02 (1989)

ANNEXE 1

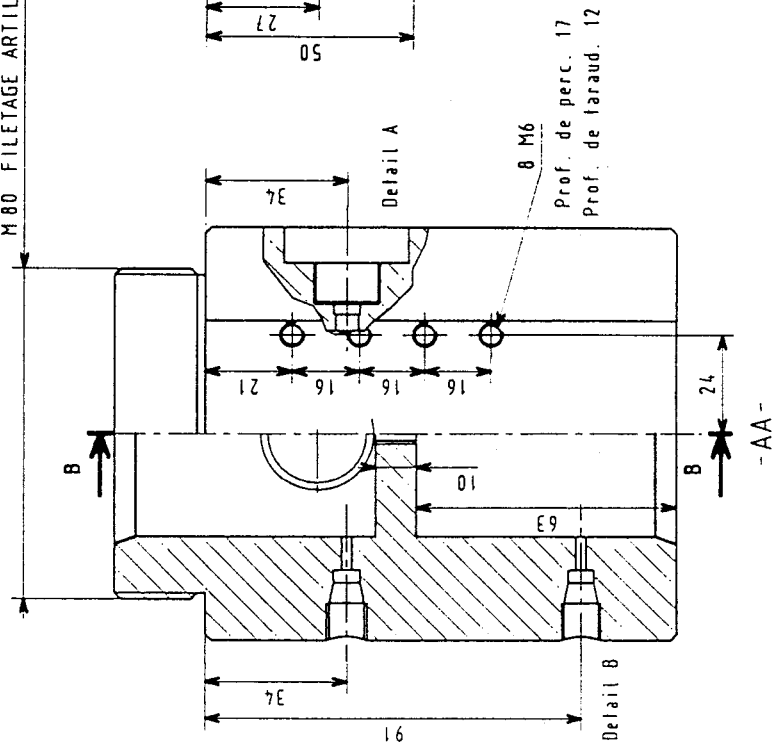
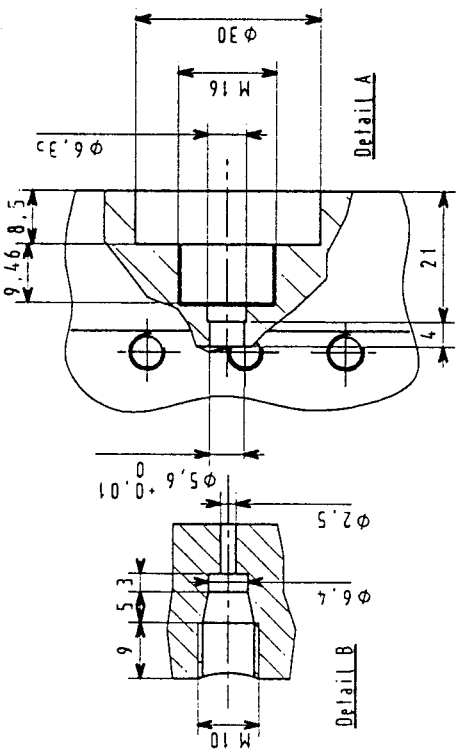
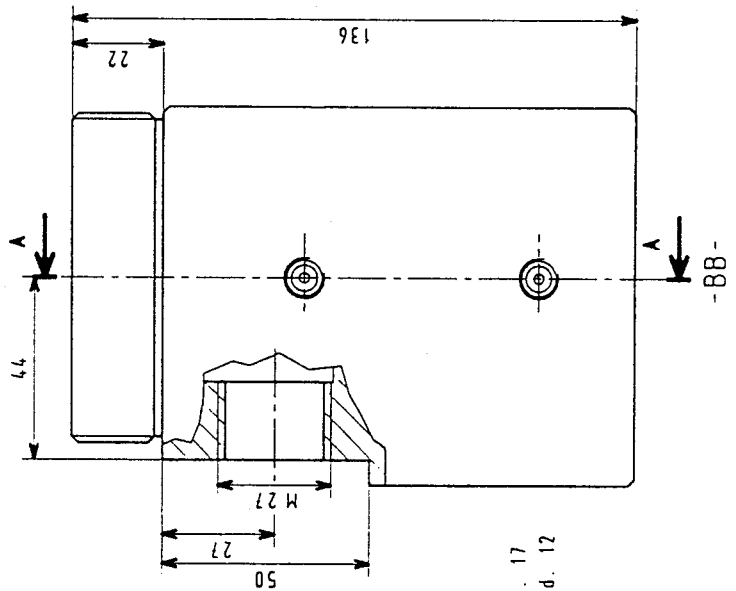
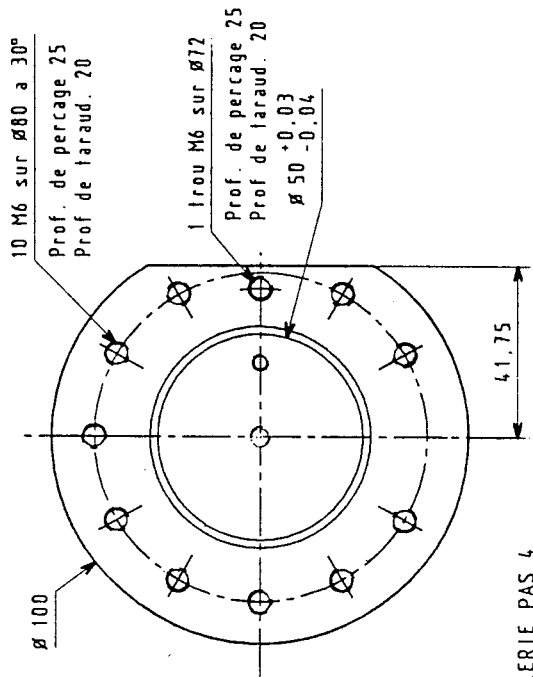
PLANS DE L'ENCEINTE DE MESURE EN PRESSION

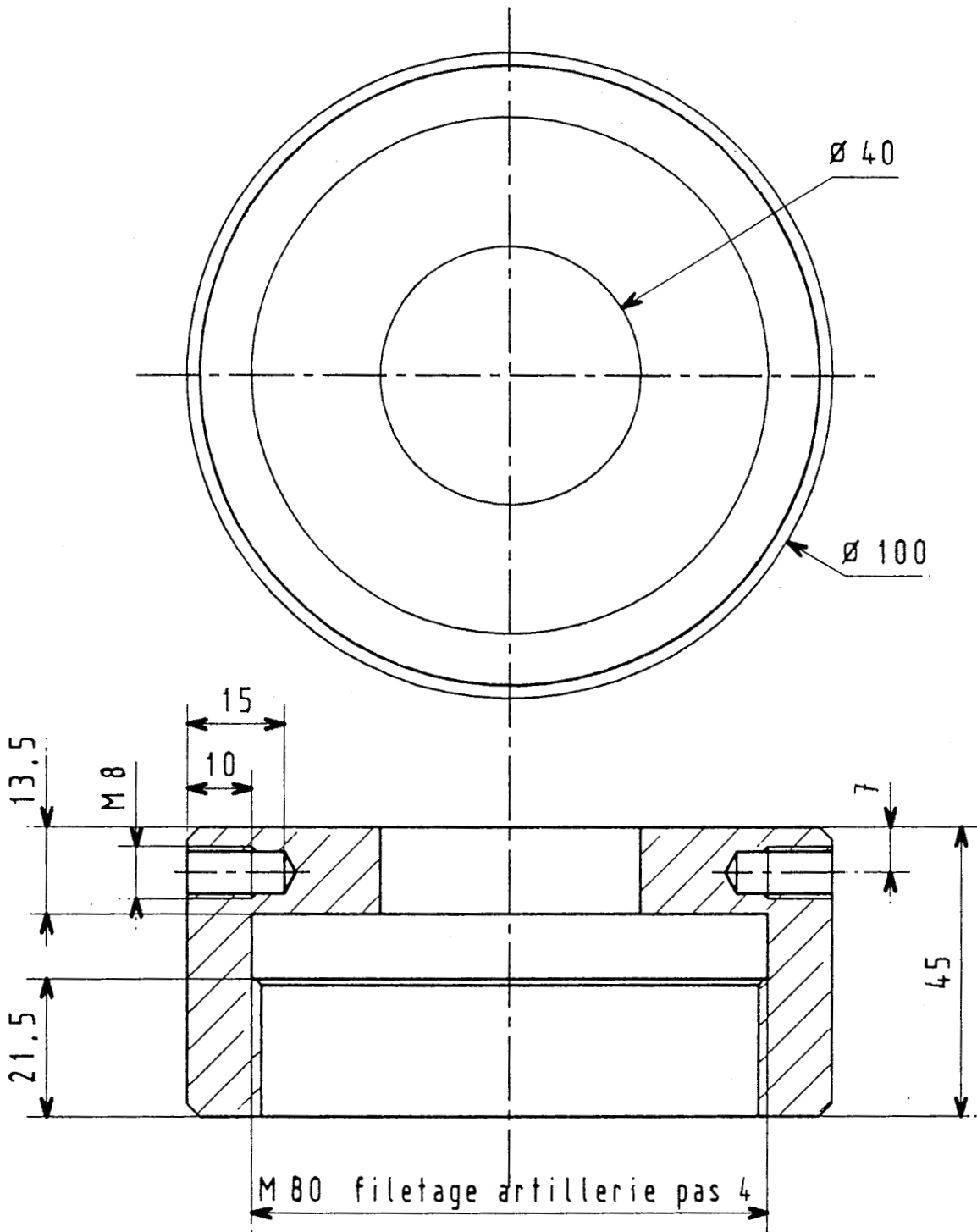
Dispositif de mesure dynamique de constante
de charge dh en pression

Ensemble
Echelle:



Corps d'enceinte	P1
Mat. Z30 C13	
Nbr. 1	



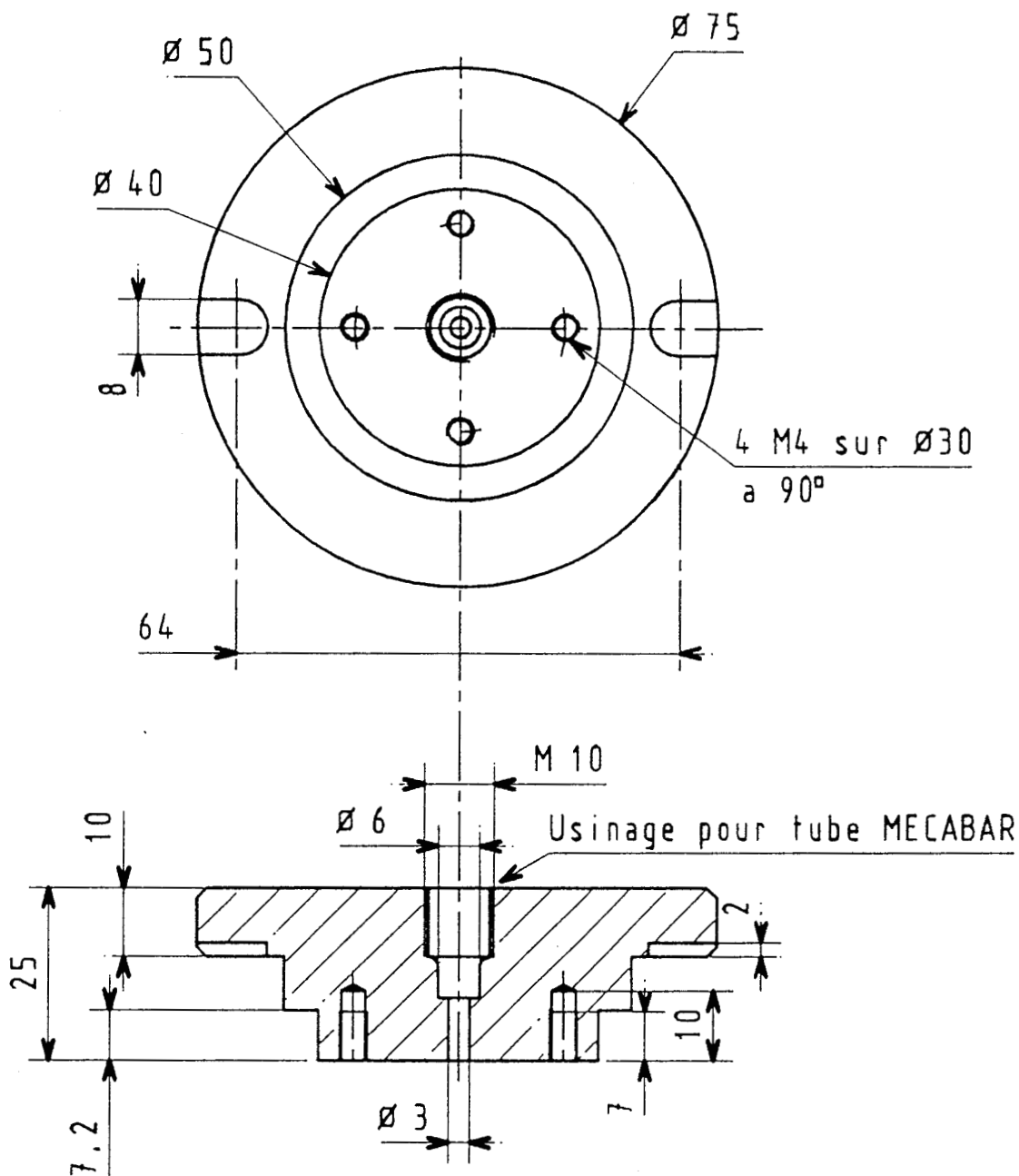


Baque de serrage

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P2

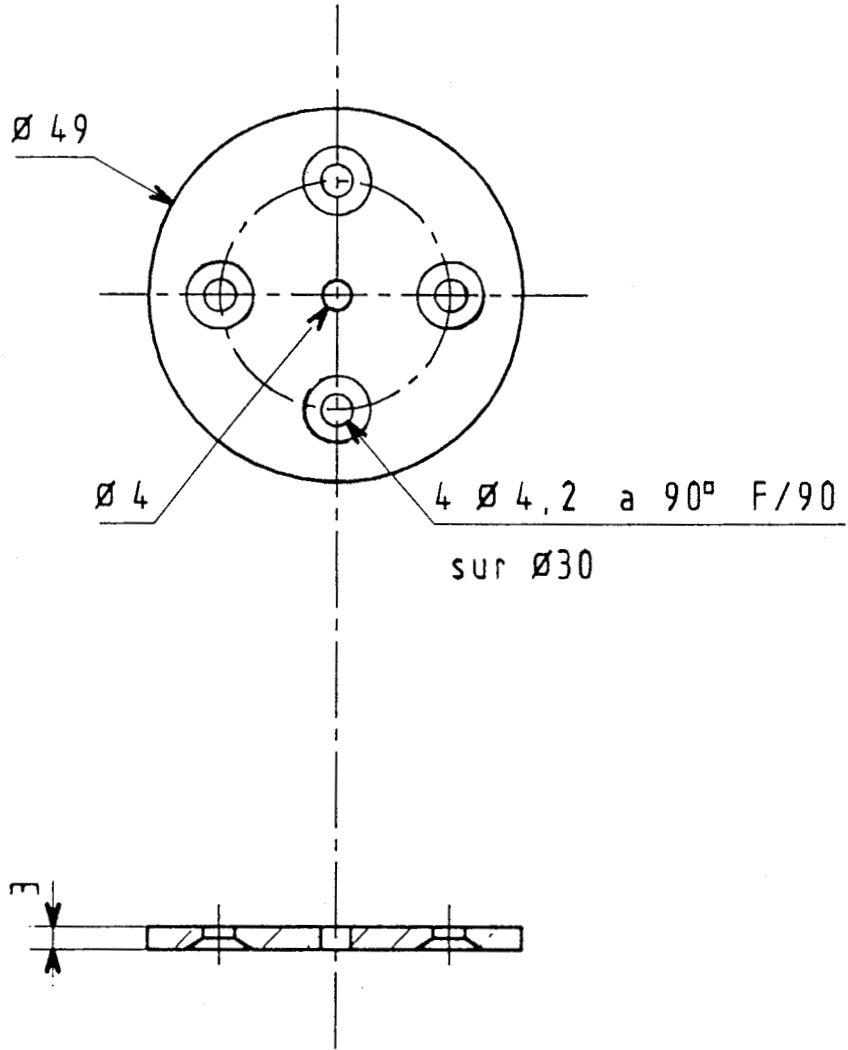


Couvercle d'enceinte

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P3

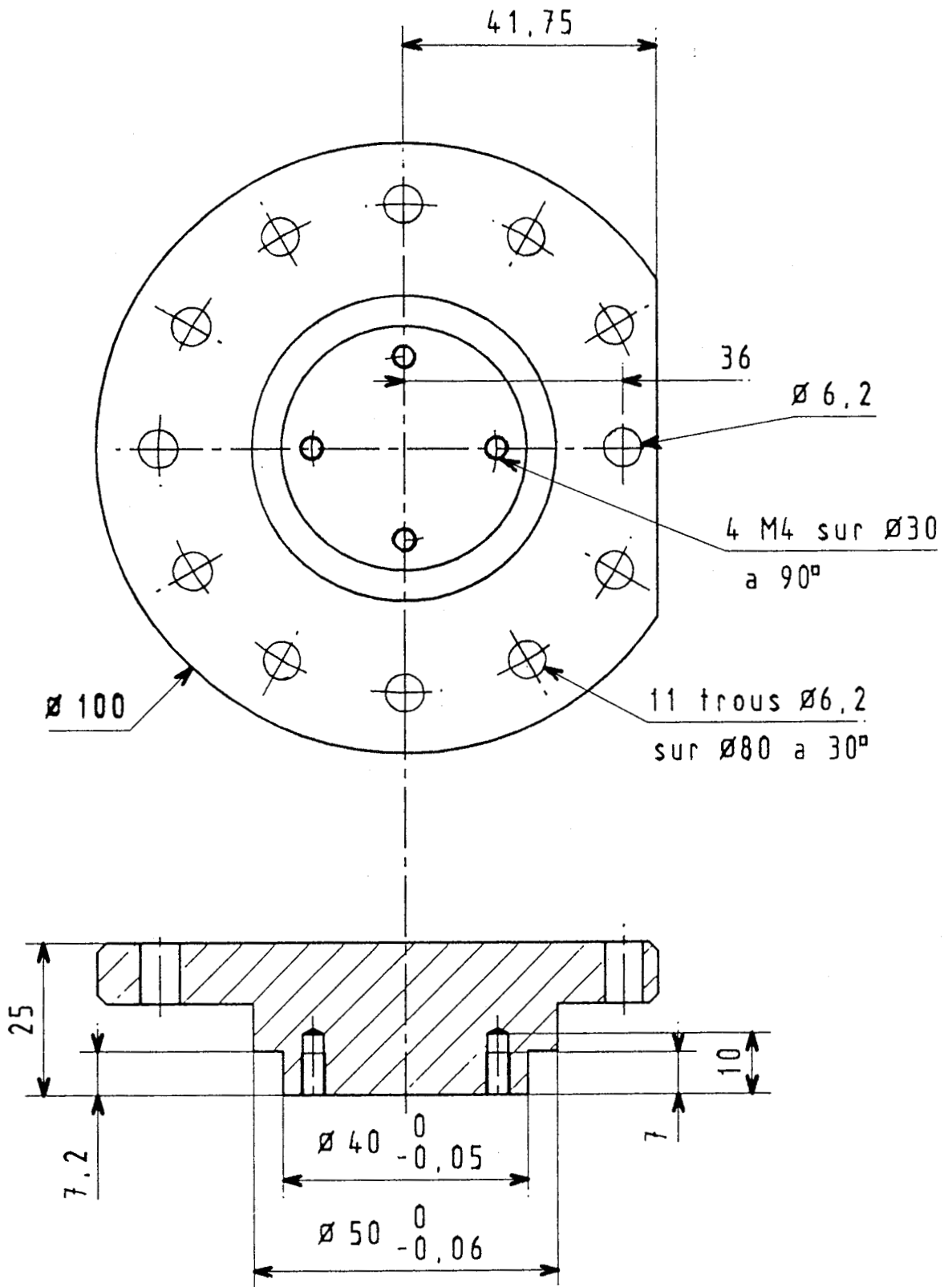


Plaque

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P4



Fond d'enceinte

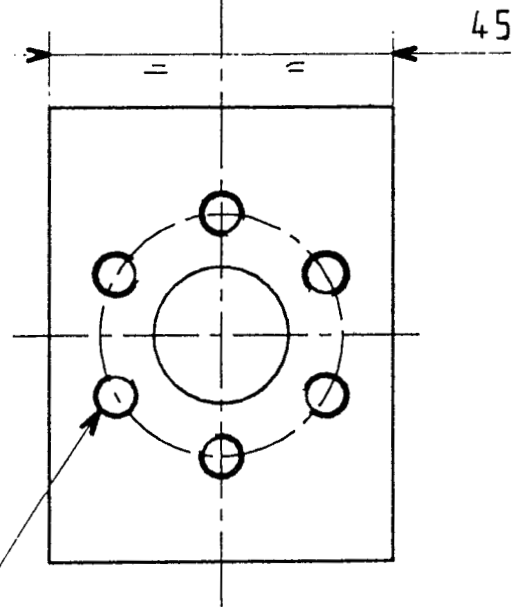
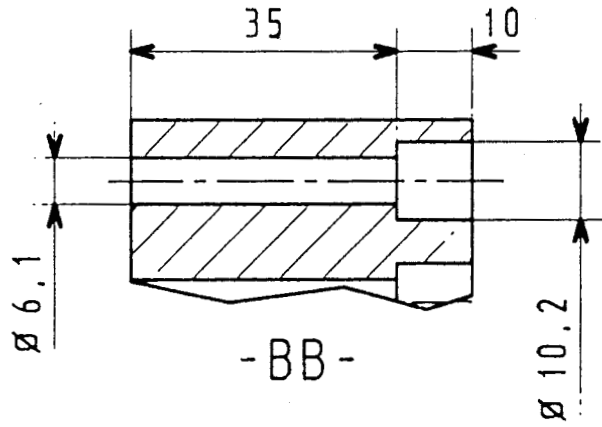
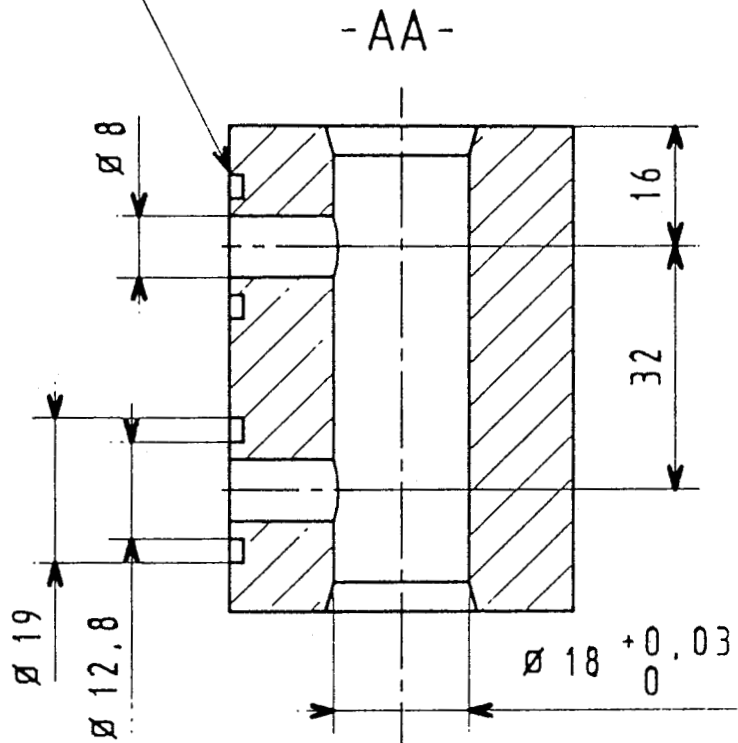
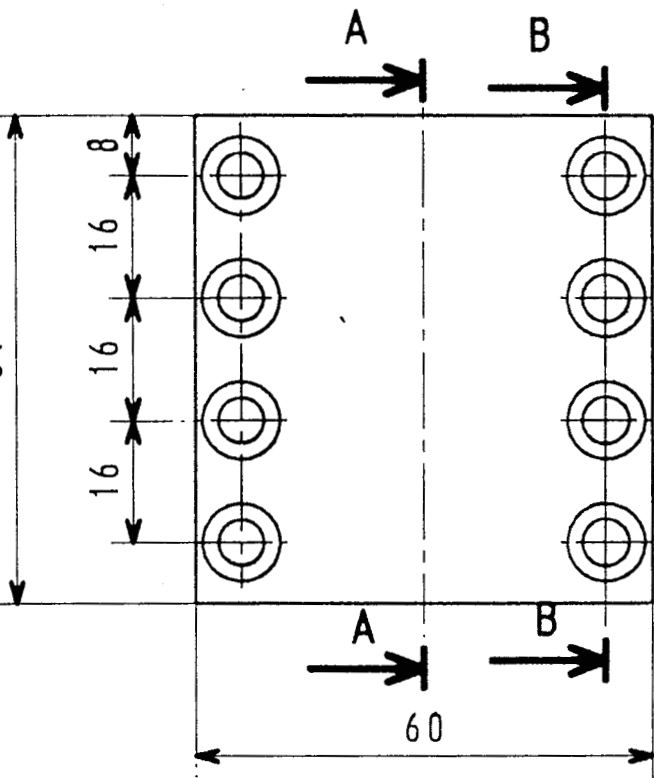
Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P5

- ANNEXE 1 -

Gorge pour joint
bague R11



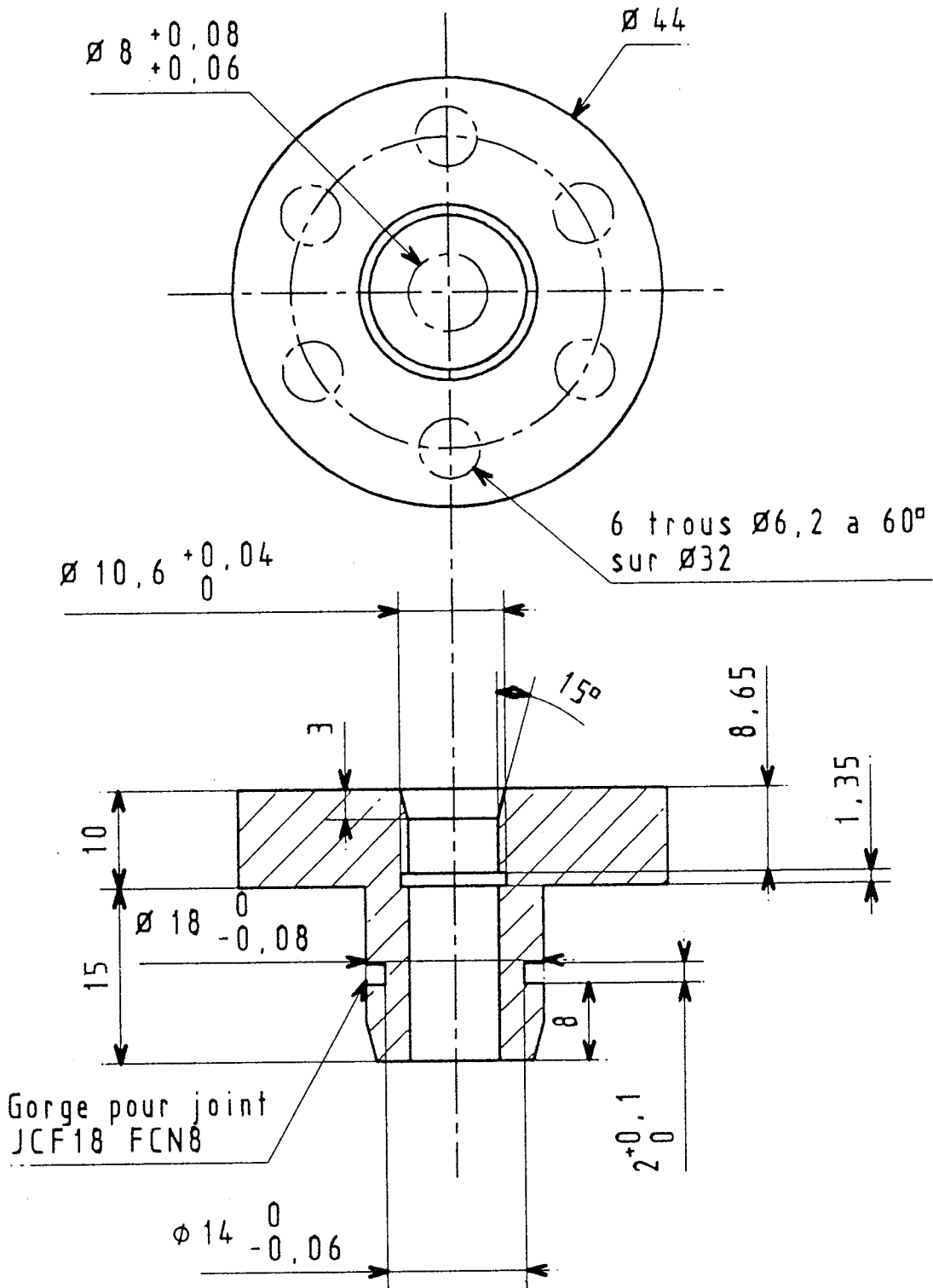
2 fois 6 trous M6 sur $\varnothing 32$ a 60°
Prof. per. 18 taraud. 15

Repartiteur de pression

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P6

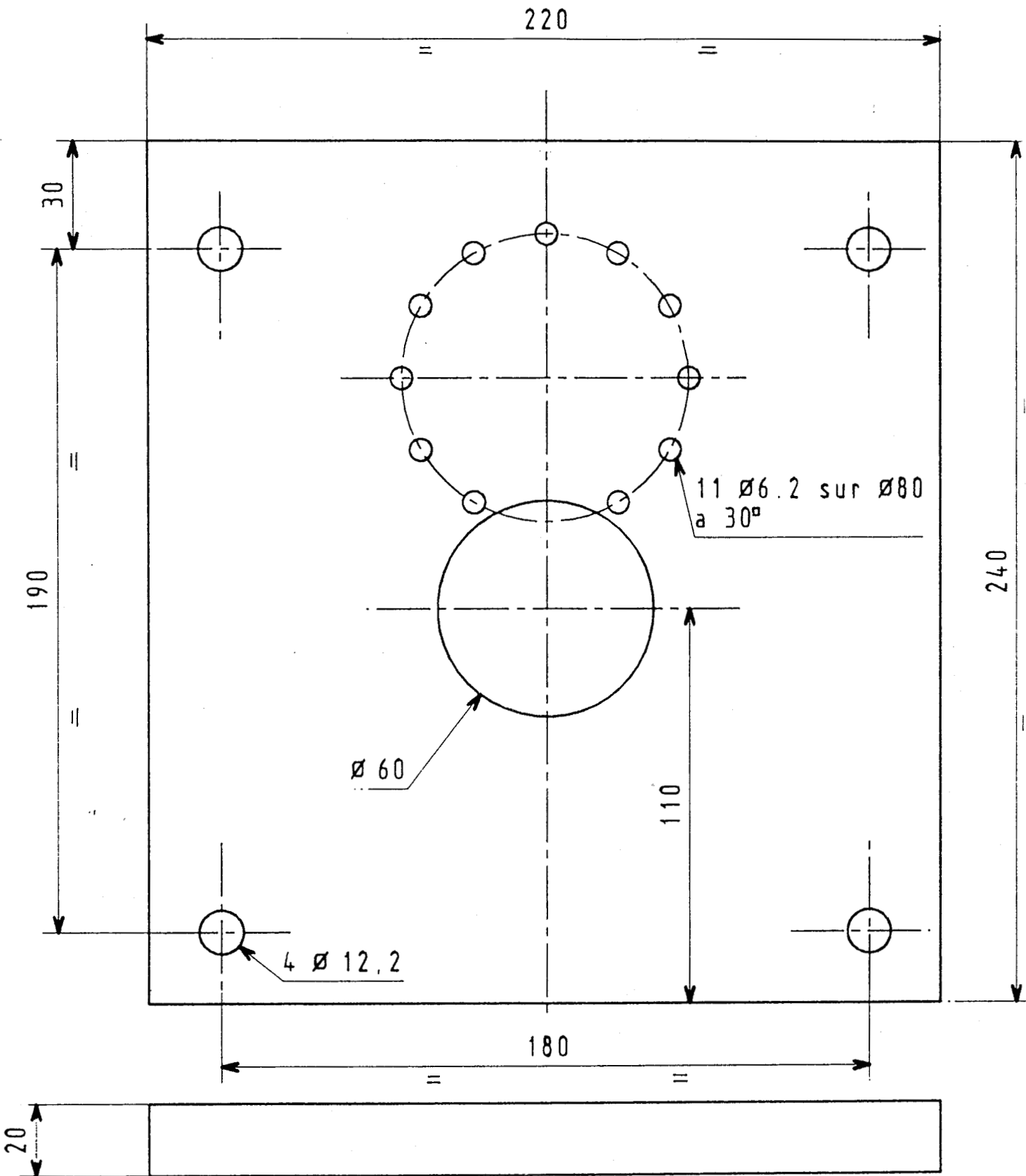


Bouchon

Mat. Z30 C13

Nbr. 2

P7

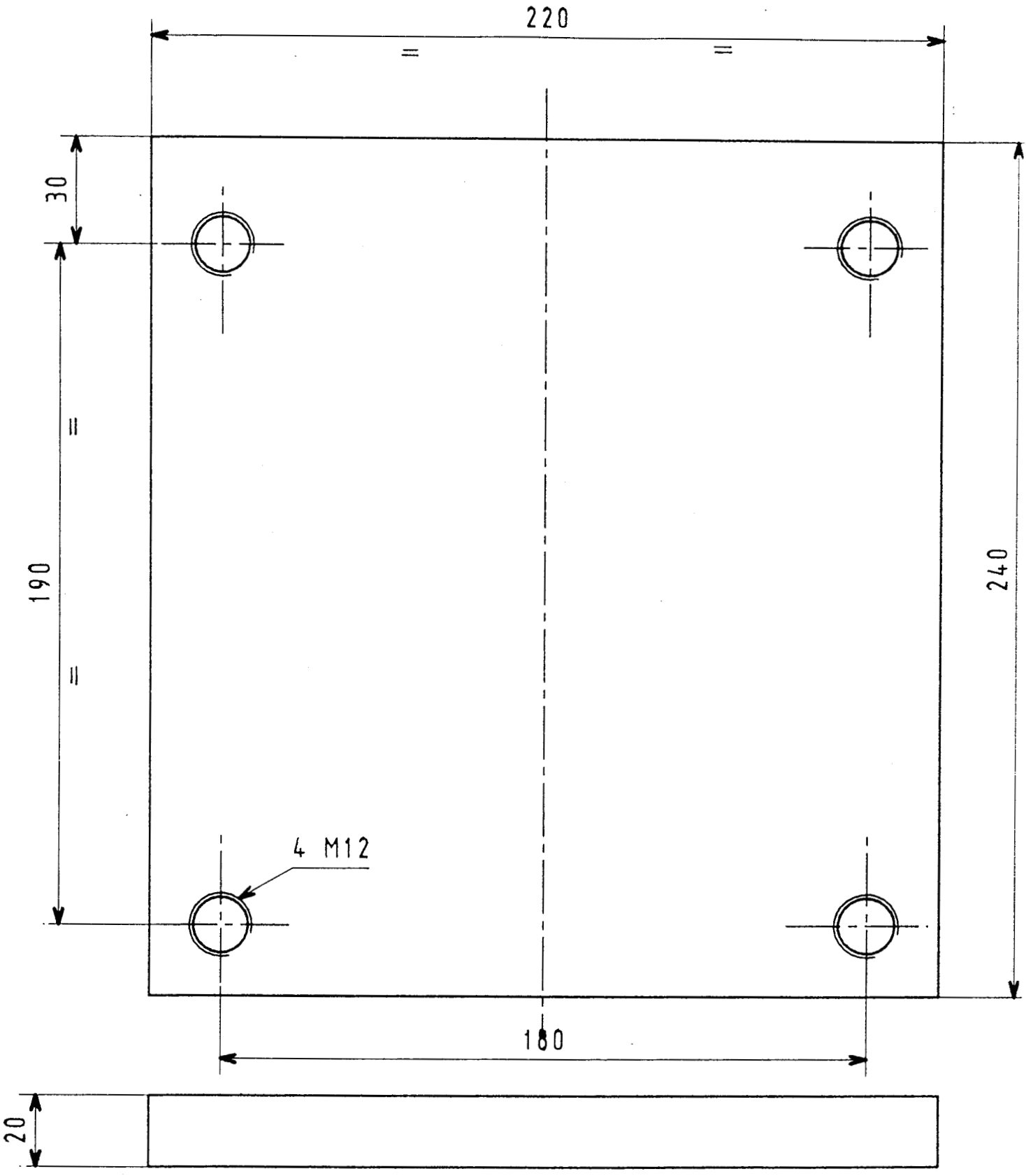


Plateau

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P8

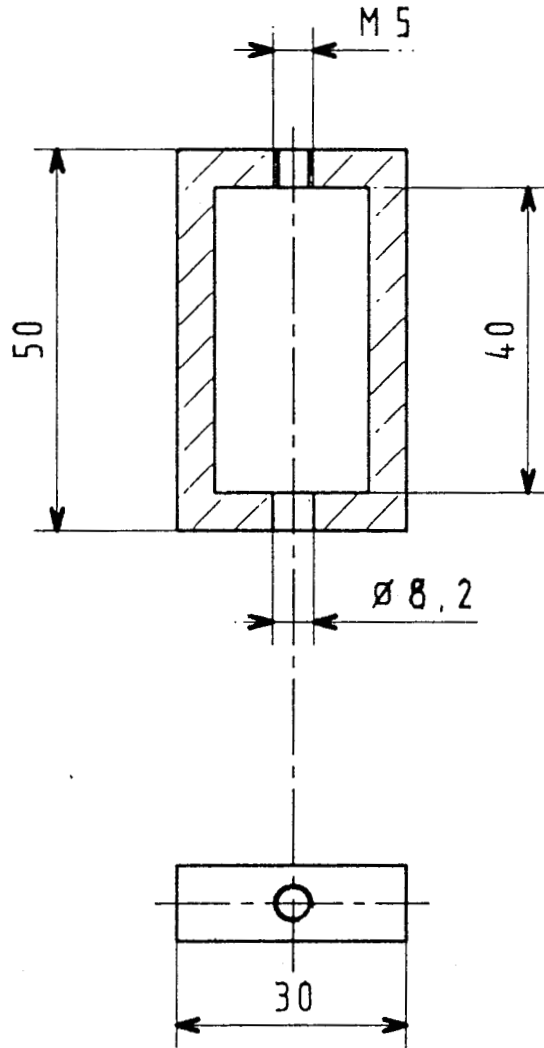


Embase

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P9

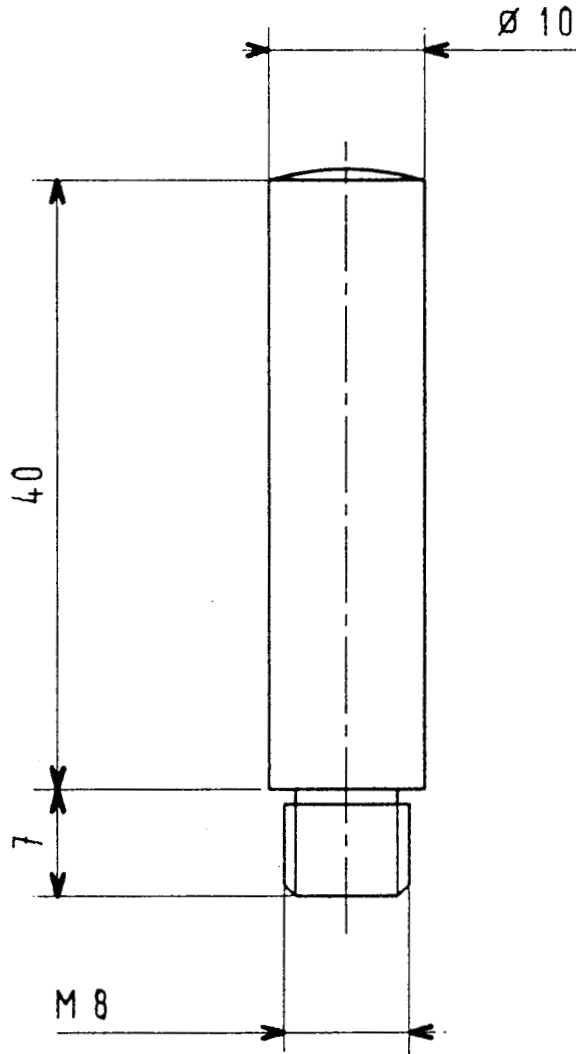


Cavalier

Mat. Z30 C13

Nbr. 1

P10

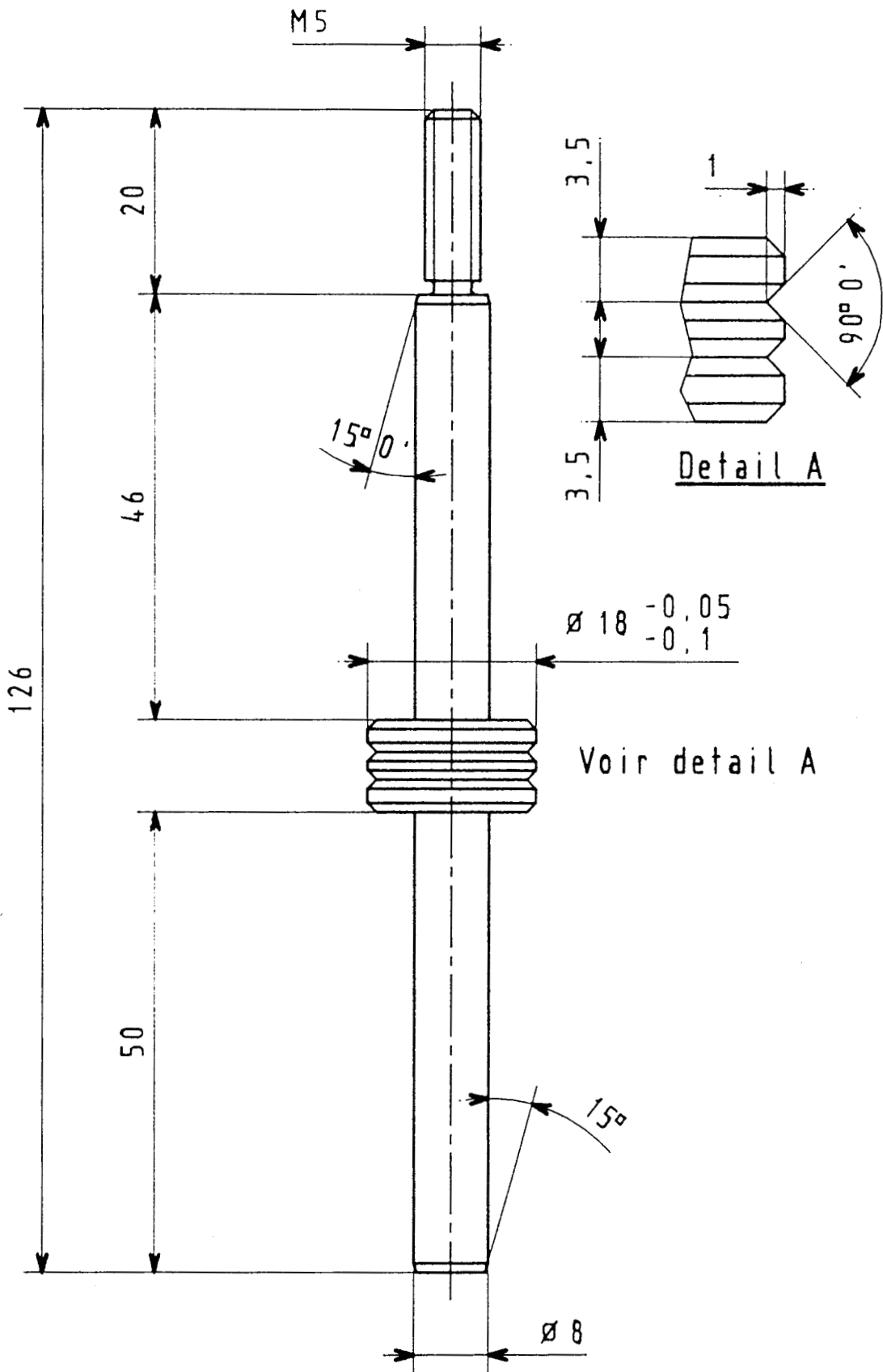


Poignée

Mat. Z30 C13

Nbr. 2

P11

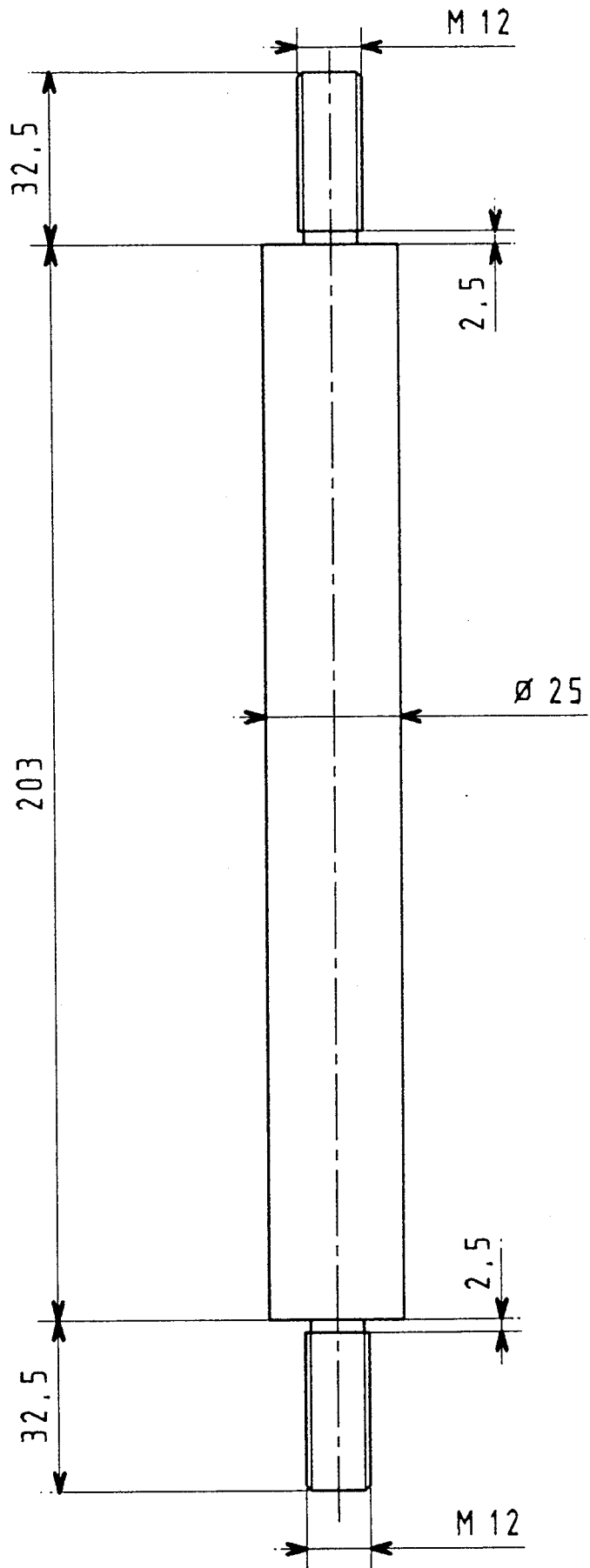


Piston

Mat. 25CD4 ou 35CD4

Nbr. 1

P12



Colonne

Mat. Z30 C13

Nbr. 4

ANNEXE 2

CATALOGUE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

COMPOSITE 3-3

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°41	Z37 N°361	Z37 N°351	Z37 N°3513	Z37 N°321	Z37 N°2014	Z37 N°201	Z37 N°2015
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,05	3,21	3,24	3,24	3,40	3,40	3,41	3,42
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)						25000		
tgδ (%.)						10		
EPSILON 33 RELATIF	126	161	166	163	185	192	191	195
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	197	228	231		235		245	
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	183	202	200	198	205	200	211	194
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	164	142	136	137	152	118	125	113
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	30,0	28,6	27,2	27,2	25,6	23,5	26,3	22
Sh (dB réf V.µPa ⁻¹)	-175,7	-176,9	-177,3	-177,2	-178,0	-178,6	-178,1	-178,9
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable			instable		instable		instable

▼ Mesures réalisées par la société PONS

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°26A104	Z37 N°6	Z37 N°7	Z37 N°8	Z37 N°412	Z37 N°301	Z37 N°322	Z37 N°4301
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=20 h=6	Ø=20 h=6	Ø=20 h=6	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,59	3,60	3,60	3,60	3,61	3,63	3,66	3,67
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)					45000			
tgδ (%)					7			
EPSILON 33 RELATIF	202	194	192	195	211	229	214	215
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	239					243	242	
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	210	192	196	190	200	214	203	200
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	118	112	115	110	107	106	107	105
d _{h.g_h} ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	24,6	21,5	22,6	20,9	21,4	22,6	21,7	21,0
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-178,6	-183,5	-183,2	-183,6	-179,4	-179,5	-179,4	-179,6
COMPORTEMENT SOUS PRESSION		instable	instable	instable	instable			instable

- ANNEXE 2 -

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°43 dist	Z37 N°71	Z37 N°171	Z37 N°116	Z37 N°281	Z37 N°2813	Z37 N°111	Z37 N°231
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	discue	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=21 h=6	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,67	3,72	3,77	3,77	3,79	3,80	3,80	3,83
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^5 \Omega$)								150000
tgδ (%)								7
EPSILON 33 RELATIF	214	227	229	254	240	242	230	250
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	242	245	246	252	241	251		251
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	211	205	204	196	209	200	180	207
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	111	102	101	87	98	93	88	94
d _{h.g_h} ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	23,5	20,9	20,5	17,1	20,5	18,7	15,9	19,4
S _h (dB réf V.µPa ⁻¹)	-179,1	-179,8	-179,9	-185,6	-180,1	-180,6	-181,1	-180,6
COMPORTEMENT SOUS PRESSION				instable		instable	instable	

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°3812 02	Z37 N°3805	Z37 N°117	Z37 N°311	Z37 N°61	Z37 N°2316	Z37 N°2322	Z37 N°2334
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=20 h=6	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,84	3,84	3,84	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								
tgδ (%)								
EPSILON 33 RELATIF	259	228	239	245	247	249	236	233
d33 ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)			255	239	247			
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	198	196	200	206	210	200	195	200
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	86	97	94	95	96	91	93	97
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	17,1	19,0	18,9	19,6	20,2	18,1	18,2	19,4
Sh (dB réf V.µPa ⁻¹)	-185,7	-180,3	-180,5	-180,4	-180,3	-180,8	-180,6	-180,3
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable	instable	instable			instable	instable	instable

- ANNEXE 2 -

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°82	Z37 N°3812 E	Z37 N°3804	Z37 N°3821 E	Z37 N°3811 E	Z37 N°3821 02	Z37 N°221	Z37 N°291
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	cisque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=20 h=6	Ø=36 h=10	Ø=20 h=6	Ø=20 h=6	Ø=20 h=6	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,86	3,86	3,88	3,88	3,89	3,91	3,92	3,92
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								
tgδ (%)								
EPSILON 33 RELATIF	241	261	217	265	265	265	262	261
d33 ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	240						235	227
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	210	194	195	194	196	195	192	197
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	98	84	101	83	84	83	83	82
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	20,7	16,3	19,8	16,0	16,4	16,2	15,9	16,8
Sh (dB réf V, μPa^{-1})	-180,1	-185,9	-179,8	-186,1	-185,9	-186,0	-181,6	-181,7
COMPORTEMENT SOUS PRESSION		instable	instable	instable	instable	instable		

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°3919	Z37 N°3901	Z37 N°3905	Z37 N°3925	Z37 N°341	Z37 N°331	Z37 N°3312	Z37 N°214
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=30 h=3	Ø=38 h=19	Ø=38 h=10	Ø=38 h=4	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,93	3,96	3,96	3,99	3,99	4,00	4,00	4,01
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								34000
tgδ (%)								6
EPSILON 33 RELATIF	245	277	252	269	265	258	258	256
d33 ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)					243	241	256	
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	186	192	207	190	199	199	198	183
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	86	78	93	80	85	87	87	81
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	15,9	15,0	19,2	15,1	16,8	17,3	17,2	14,8
Sh (dB réf V.µPa ⁻¹)	-191,8	-176,5	-180,6	-189,9	-181,4	-181,2	-181,2	-181,8
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable	instable	instable	instable			instable	instable

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°372	Z37 N°254	Z37 N°323	Z37 N°1914	Z37 N°191	Z37 N°1905	Z37 N°192	Z37 N°317
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=21 h=6	Ø=36 h=10	Ø=21 h=6	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	4,03	4,05	4,06	4,07	4,08	4,08	4,10	4,14
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								
tgδ (%)								
EPSILON 33 RELATIF	269	276	273	289	280	281	290	276
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	249	256	250	256	256	256	257	
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	202	197	202	197	192	192	192	164
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	85	81	84	77	76	77	75	67
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	17,1	15,8	16,8	15,2	14,8	14,8	14,4	11,0
Sh (dB réf V.µPa ⁻¹)	-181,4	-181,9	-181,5	-186,7	-182,2	-186,7	182,5	-183,5
COMPORTEMENT SOUS PRESSION						instable		instable

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°315	Z37 N°211	Z37 N°241	Z37 N°516	Z37 N°324	Z37 N°511	Z37 N°511 G	Z37 N°5111
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	4,18	4,19	4,23	4,39	4,40	4,41	4,63	4,63
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	40000					16000		
tgδ (%.)	5					14		
EPSILON 33 RELATIF	275	275	286	294	375	301	443	441
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)		249		260	259	258	263	262
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	165	182	180	174	186	171	177	177
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	68	75	71	67	56	64	45	45
d _{h.g_h} ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	11,2	13,6	12,8	11,6	10,4	10,9	7,9	8,0
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-183,5	-182,5	-182,9	-183,5	-185,0	-183,8	-186,9	-186,9
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable		stable		stable		stable

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS
REFERENCES	Z37 N°325	Z37 N°512	Z37 N°5121	Z37 N°255	Z37 N°18	Z37 N°5131	Z37 N°1812	Z37 N°513
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque	disque
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	4,65	4,95	4,95	5,20	5,23	5,26	5,26	5,27
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)							45000	
tgδ (%)							14	
EPSILON 33 RELATIF	425	514	513	545	487	588	487	578
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	259	281	282	266	265			278
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	182	167	169	159	152	155	149	154
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	48	37	37	33	35	30	35	30
d _{h.g_h} ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	8,8	6,1	6,3	5,2	5,4	4,6	5,2	4,6
Sh (dB réf V. μPa^{-1})	-186,3	-188,7	-188,6	-189,6	-189,0	-190,5	-189,2	-190,4
COMPORTEMENT SOUS PRESSION			stable			stable	stable	

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	X37			
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS			
REFERENCES	Z37 N°5141	Z37 N°514	Z37 N°515	Z37 N°1123				
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque			
DIMENSIONS (mm)	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10	Ø=36 h=10				
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	5,82	5,82	7,10	7,29	7,30			
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^5 \Omega$)								
tgδ (%)								
EPSILON 33 RELATIF	704	707	1059	1123	1230			
d33 ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	282	281	291	286	305			
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	135	135	75	50	47			
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	22	22	8,5	5,0	4,3			
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	2,9	2,9	0,63	0,25	0,20			
Sh (dB réf V, μPa^{-1})	-193,3	-193,3	-201,4	-206,0	-207,3			
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable		stable		stable			

TYPE	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail PZT-air	3-3 corail CPZ3	3-3 corail HTCP	3-3 corail CPZ3		
PROVENANCE	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS	PONS		
REFERENCES	N°5	N°27	N°28	N°45	N°9	N°42		
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	tube	disque		
DIMENSIONS (mm)								
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	3,70	4,40	4,40	4,50	4,70	4,70		
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	300000	120000	140000	1400	2800	12000		
tg δ (%.)	7	6	6	9	5	22		
EPSILON 33 RELATIF	186	395	384	330	389	234		
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	112	222	218	161	171	127		
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	68	63	64	55	50	61		
d _h .g _h ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	7,6	14,0	13,9	8,9	8,5	7,7		
S _h (dB réf V, μPa^{-1})	-187,8	-188,4	-188,3	-187,0	-192,0	-186,2		
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable			stable		stable		

- ANNEXE 2 -

mesure
incertaine

TYPE	3-3 corail	3-3 corail	3-3 corail	3-3 corail	3-3 corail	3-3 corail	3-3 corail	
	PZT-silicone	PZT-silicone	PZT-silicone	PZT-silicone	PZT-silicone	PZT-silicone	PZT-époxy	
PROVENANCE	METRAVIB	METRAVIB	METRAVIB	METRAVIB	METRAVIB	METRAVIB	INSA EYRAUD	
REFERENCES	N°3-2	N°3-6	N°1-2	N°18-2	N°18-6	N°E5-1	N°2713	
GEOMETRIE	disque	disque	disque	disque	disque	cisque	paral.	
DIMENSIONS (mm)	Ø=38 h=3.5	Ø=38 h=3.5	Ø=36 h=3.5	Ø=21 h=3	Ø=21 h=3	Ø=36 h=5	50x50x5	
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	4,50	4,50	4,70		4,50		5,90	
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	6500	8000	5500				60000	
tgδ (%)	12	11	11	77	48		18	
EPSILON 33 RELATIF	91	138	114	160	233	93	587	
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	61	91	37	53	70	81	23	
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	76	75	37	37	34	99	4,5	
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	4,64	6,81	1,37	1,97	2,38	8,00	0,10	
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-192,0	-191,7	-197,8	-199,0	-199,8	-186,1	-213,7	
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable	stable	stable			stable	

COMPOSITE 3-2

TYPE	3-2 PbTiO ₃ époxy	3-2 PZT époxy	3-2 PZT air					
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD					
REFERENCES	N°2758	N°2760	N°2776					
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.					
DIMENSIONS (mm)	50x50x5	50x50x5	50x50x5					
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	6,00	5,40						
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)	9000	25000	15000					
tgδ (%)	12	7	7					
EPSILON 33 RELATIF	117	720	733					
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)								
d _h (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	25	29	83					
g _h (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	25	4,6	13					
d _h .g _h (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	0,62	0,13	1,05					
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-198,2	-212,8	-201,0					
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable	stable					

COMPOSITE 1-3

- ANNEXE 2 -

TYPE	1-3 PZT époxy	1-3 PbTiO ₃ époxy	1-3 PZT époxy	1-3 PZT bois de chêne	1-3 PZT bois de chêne	1-3 PZT sciure et résine	1-3 PZT sciure et résine	1-3 PZT époxy
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD
REFERENCES	P762 QS N°2674	PT N°2675	P762 QS N°2681	N°2767 bis	N°2770 bis	N°2774 bis	N°2777 bis	N°2779
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)	50x50x5	50x50x5	50x50x5	50x50x5	50x50x5	50x50x5	50x50x5	50x50x5
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	4,30	3,70	3,00					
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)	200000	40000	9000	90000	14000	70000	13000	35000
tgδ (%)	11	7	22	37	62	24	34	54
EPSILON 33 RELATIF	500	95	341	106	120	220	193	86
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)								
d _h (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	32	36	16	15	14	28	29	14
g _h (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	7,3	43	5,3	16	13	14	17	18
d _h .g _h (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	0,20	1,6	0,10	0,25	0,18	0,41	0,48	0,26
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-209,0	-193,0	-212,0	-198,9	-200,9	-199,9	-198,6	-197,8
COMPORTEMENT SOUS PRESSION		stable		stable		stable	stable	

TYPE	1-3 PZT époxy	1-3 PZT époxy						
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD						
REFERENCES	N°2819	N°2852						
GEOMETRIE	paral.	paral.						
DIMENSIONS (mm)	50x50x5	50x50x5						
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})								
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								
$\text{tg}\delta$ (%)	34	6						
EPSILON 33 RELATIF	82	69						
d_{33} ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
d_h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	32	33						
g_h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	44	54						
$d_h.g_h$ ($10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$)	1,44	1,81						
S_h (dB réf $\text{V}.\mu\text{Pa}^{-1}$)	-193,1	-191,3						
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable						

TYPE	1-3-1	1-3-1	1-3-1	1-3-1	1-3-1	1-3-1	1-3-1	1-3-1
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD
REFERENCES	N°2878	N°2887	N°2903	N°2905	N°2904	N°2906	N°2909	N°2910
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)	40x5x2	40x5x2	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})					2,99	3,56	2,90	3,71
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)			400000	200000				
$\text{tg}\delta$ (%)	23	20	6	6	5	10	6	7,5
EPSILON 33 RELATIF			121	87	154	153	148	175
d_{33} ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
d_h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	184	90	153	138	56	190	148	138
g_h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	44	59	143	180	41	141	113	89
$d_h.g_h$ ($10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$)	7,80	5,00	21,8	24,8	2,30	26,7	16,7	12,3
S_h (dB réf $\text{V.}\mu\text{Pa}^{-1}$)	-201,5	-199,0	-229,0	-229,0	-193,7	-183,0	-185,0	-187,0
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable	instable	instable	instable	instable	instable	instable	instable

TYPE	1-3-1	1-3-1	1-3-1 PZT/époxy	1-3-1 PZT/époxy	1-3-1 PZT/époxy	1-3-1 PZT/PU	1-3-1 PZT/PU	
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	
REFERENCES	N°2912	N°2913	N°2934	N°2937	N°2938	N°2945	N°2950	
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	
DIMENSIONS (mm)	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	30x30x5	
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})		3,45	3,12			2,50		
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)								
$\text{tg}\delta$ (%)	9	8	13	10	6	19	9	
EPSILON 33 RELATIF	39	76	44	38	135	80	144	
d_{33} ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
d_h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	18	60	26	24	71	77	120	
g_h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	52	88	67	72	59	108	94	
$d_h.g_h$ ($10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$)	0,94	5,31	1,74	1,73	4,24	8,33	11,3	
S_h (dB réf V. μPa^{-1})	-191,6	-187,1	-189,5	-188,9	-190,5	-185,3	-186,5	
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	instable	stable	stable	instable	instable	instable	instable	

COMPOSITE 0-3

TYPE	0-3 PZT kérimid	0-3 PZT PVDF	0-3 PZT PVDF	0-3	0-3	0-3		
PROVENANCE	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	INSA EYRAUD	PONS	PONS	PONS		
REFERENCES	N°2701	N°2744	N°2861	CSZ3 souple N°9	N°9	N°10		
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	tube	paral.	paral.		
DIMENSIONS (mm)	50x50x5	50x50x5	50x50x5	Øext=20 Øint=10 h=25	50x50x5	50x50x5		
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})				4,50	4,70	4,70		
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	100000	40000		3000	10000			
tg δ (%.)	12	61	16	45	5	7		
EPSILON 33 RELATIF	105	286	120	105	93	88		
d33 ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	12	18	36	33	31	30		
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	12	7,1	34	36	38	38		
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	0,14	0,13	1,22	1,20	1,16	1,15		
Sh (dB réf $\text{V.}\mu\text{Pa}^{-1}$)	-205,3	-208,7	-195,4	-195,0	-194,5	-194,3		
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable		stable		stable	stable		

CERAMIQUE $PbTiO_3$

mesure
incertaine
↓

TYPE	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃
PROVENANCE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	QUARTZ & SILICE	CHANNEL MASSOT
REFERENCES	N°1	N°2	N°9	N°10	N°15	N°16	N°18	N°4
GEOMETRIE	tube	tube	tube	paral.	anneau	paral.	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)								
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	6,80	6,70	6,90	6,90	6,90	6,80	6,80	7,80
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)	10000	12000	60000	8000	60000	20000	14000	350
tgδ (%.)	6	7	6	6	4	5	8	17
EPSILON 33 RELATIF	200	187	198	191	199	194	185	1398
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)								
dh (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	67	71	69	71	74	67	94	31
gh (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	38	43	39	42	42	39	57	2,5
dh.gh (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	2,50	3,00	2,70	3,00	3,10	2,60	5,40	0,10
Sh (dB réf V.μPa ⁻¹)	-194,5	-193,4	-195,0	-198,0	-193,5	-194,2	-201,3	-212,2
COMPORTEMENT SOUS PRESSION				stable	stable	stable		stable

TYPE	CERAMIQUE PbTiO ₃	CERAMIQUE PbTiO ₃						
PROVENANCE	EDO BRUSSET	INSA EYRAUD						
REFERENCES	EC N°97	HPT massif QS						
GEOMETRIE	disque	paral.						
DIMENSIONS (mm)	Ø=19 h=1,6	50x50x5						
MASSE SPECIFIQUE (10 ³ kg.m ⁻³)	7,0	6,90						
ISOLEMENT SOUS 100 V (10 ⁶ Ω)	45000	7000						
tgδ (%)	10	5						
EPSILON 33 RELATIF	197	196						
d ₃₃ (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)								
d _h (10 ⁻¹² C.N ⁻¹)	54	61						
g _h (10 ⁻³ V.m.N ⁻¹)	31	35						
d _h .g _h (10 ⁻¹² m ² .N ⁻¹)	1,66	2,1						
S _h (dB réf V.μPa ⁻¹)	-206,1	-195,0						
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable						

PVDF

- ANNEXE 2 -

TYPE	PVDF	PVDF	PVDF	PVDF	PVDF			
PROVENANCE	THOMSON	THOMSON	THOMSON	THOMSON	THOMSON			
REFERENCES	PIZ 03	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4			
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.			
DIMENSIONS (mm)		30x30x.25	30x30x.5	30x30x1	30x30x1.5			
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})		1,8	1,8	1,8	1,8			
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	300	400000	350000	600000	500000			
tg δ (%.)	43	20	17	15	15			
EPSILON 33 RELATIF	11	12	12	12	12			
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)		36	32	30	25			
dh ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	13	11,4	9	7,8	7,2			
gh ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	131	107	85	74	68			
dh.gh ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	1,60	1,20	0,80	0,60	0,50			
Sh (dB réf V. μPa^{-1})	-210,0	-211,0	-207,0	-203,0	-200,0			
COMPORTEMENT SOUS PRESSION		stable	stable	stable	stable			

COPOLYMERE



mesure
incertaine

TYPE	(VDF-TrFE) 70/30	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)
PROVENANCE	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER	ISL BAUER
REFERENCES	MI238	RIMA/1	COUPE 6/4/88	RBM N°1	RBM N°2	RBM N°3	RBM N°5	CYLINDRE N°1
GEOMETRIE	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	paral.	tube
DIMENSIONS (mm)	75x75x.25	90x30x.45	82x72x.45	43x46x3	51x51x2,5	25x24x0,5	39x20x0,5	Øext=12 Øint=11 h=36
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	2,8	2,1	2,0			1,8	1,8	2,0
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	100000	100000	100000	800	100000	100000	100000	200000
tg δ (%)	10	17	10	23	12	15	11	10
EPSILON 33 RELATIF	6	5	7	9	8	8	8	6,8
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)			31	26	35	33	34	
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	11,7	6,7	12,5	7	11	13	13,7	14
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	225	157	210	85	157	184	193	232
d _h .g _h ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	2,60	1,10	2,60	0,60	1,70	2,40	2,60	3,25
Sh (dB réf V. μPa^{-1})	-205,0	-203,0	-200,5	-193,0	-188,0	-200,0	-199,0	-198,7
COMPORTEMENT SOUS PRESSION				stable	stable	stable	stable	

- ANNEXE 2 -

TYPE	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)	(VDF-TrFE)
PROVENANCE	THOMSON	THOMSON	THOMSON	THOMSON	THOMSON	THOMSON	ATOCHEM PENWALD	ATOCHEM PENWALD
REFERENCES	N°3	N°7	N°11	N°12	N°13	N°14		
GEOMETRIE	paral.	disque	disque	disque	disque	disque	paral.	paral.
DIMENSIONS (mm)	50x50x1	Ø=50 h=1,15	Ø=46,7 h=0,95	Ø=46,6 h=0,95	Ø=47,0 h=0,95	Ø=46,6 h=0,97	38x38x0,5	38x38x1
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})	2	2	2,2	2,2	2,1	2,2		
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	70000	60000	80000	40000	60000	60000	150000	250000
$\text{tg}\delta$ (%)	14	13	13	13	14	13	14	15
EPSILON 33 RELATIF	8	8	8	8	8	8	7,7	7,7
d_{33} ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	28	29	28	34	32	33		
d_h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	7,7	8,5	8,8	10,2	8,9	9,5	15,8	16
g_h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	111	115	128	150	127	136	233	235
$d_h.g_h$ ($10^{-12} \text{ m}^2.\text{N}^{-1}$)	0,86	0,97	1,13	1,54	1,12	1,29	3,68	3,76
S_h (dB réf V. μPa^{-1})	-198,3	-197,6	-198,3	-196,9	-198,4	-197,6	-198,7	-192,5
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable	stable		stable		stable	stable	stable

TYPE	(VDF-TrFE)							
PROVENANCE	ATOCEM PENWALD							
REFERENCES								
GEOMETRIE	paral.							
DIMENSIONS (mm)	38x38x1,5							
MASSE SPECIFIQUE (10^3 kg.m^{-3})								
ISOLEMENT SOUS 100 V ($10^6 \Omega$)	400000							
tg δ (%)	16							
EPSILON 33 RELATIF	7,7							
d ₃₃ ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)								
d _h ($10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$)	15,6							
g _h ($10^{-3} \text{ V.m.N}^{-1}$)	229							
d _{h.g_h} ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)	3,57							
Sh (dB réf V. μPa^{-1})	-189,3							
COMPORTEMENT SOUS PRESSION	stable							

ANNEXE 3

ASSOCIATIONS PARALLELE ET SERIE

ASSOCIATION PARALLELE

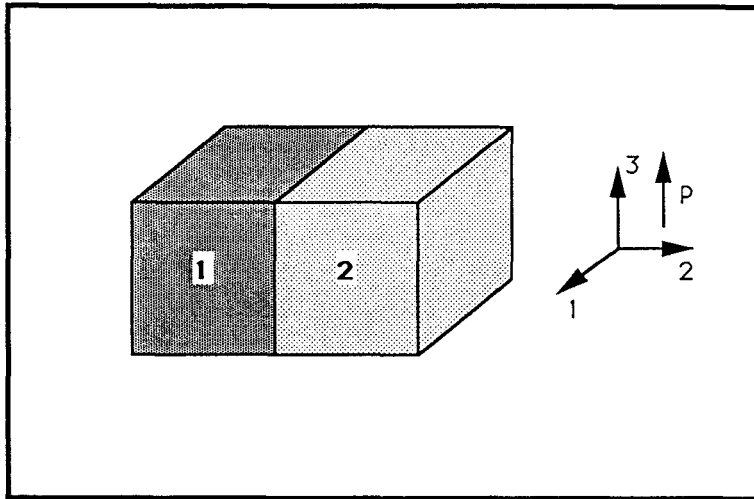


Figure A-1

L'association parallèle (figure A-1) est ainsi appelée car les deux phases sont disposées en parallèle par rapport à la direction de polarisation (3), aussi bien du point de vue électrique que mécanique. On fait alors les suppositions suivantes:

$$E_3 = {}^1E_3 = {}^2E_3$$

$$E_1 = {}^1E_1 = {}^2E_1$$

$$D_2 = {}^1D_2 = {}^2D_2$$

$$S_3 = {}^1S_3 = {}^2S_3$$

$$S_1 = {}^1S_1 = {}^2S_1$$

$$T_2 = {}^1T_2 = {}^2T_2$$

Enfin si 1v est la fraction volumique de la phase 1, et 2v celle de la phase 2, on écrit la loi des mélanges:

$$E_2 = {}^1v {}^1E_2 + {}^2v {}^2E_2$$

$$D_3 = {}^1v {}^1D_3 + {}^2v {}^2D_3$$

$$D_1 = {}^1v {}^1D_1 + {}^2v {}^2D_1$$

$$S_2 = {}^1v {}^1S_2 + {}^2v {}^2S_2$$

$$T_3 = {}^1v {}^1T_3 + {}^2v {}^2T_3$$

$$T_1 = {}^1v {}^1T_1 + {}^2v {}^2T_1$$

Ainsi, à partir des équations piézoélectriques et des conditions précédentes, on peut calculer toutes les caractéristiques (électriques, mécaniques, piézoélectriques) de la maille. On obtient par exemple:

$$\epsilon_{33} = {}^1v^1\epsilon_{33} + 2v^2\epsilon_{33}$$

$$s_{33} = \frac{{}^1s_{33} {}^2s_{33}}{{}^1v^2s_{33} + 2v^1s_{33}}$$

$$d_{33} = \frac{{}^1v^1d_{33} {}^2s_{33} + 2v^2d_{33} {}^1s_{33}}{{}^1v^2s_{33} + 2v^1s_{33}}$$

$$d_{31} = {}^1v^1d_{31} + 2v^2d_{31}$$

ASSOCIATION SERIE

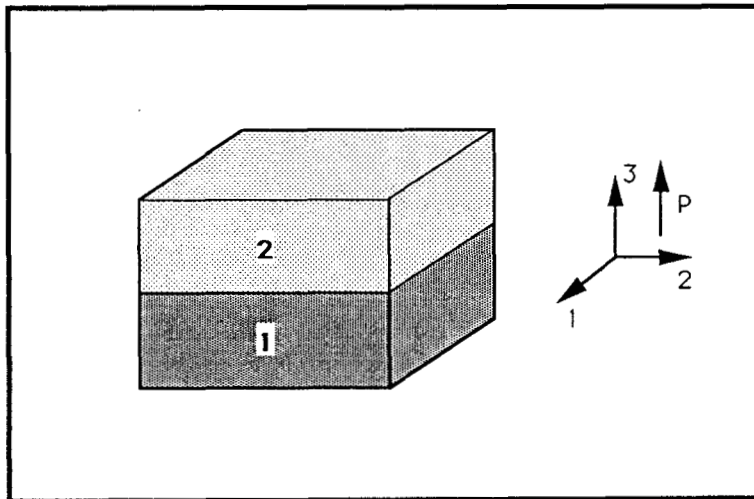


Figure A-2

L'association série (figure A-2) est ainsi appelée car les deux phases sont disposées en série par rapport à la direction de polarisation (3), aussi bien du point de vue électrique que mécanique. On traduit une telle association en supposant que:

$$E_2 = {}^1E_2 = {}^2E_2$$

$$E_1 = {}^1E_1 = {}^2E_1$$

$$D_3 = {}^1D_3 = {}^2D_3$$

$$S_2 = {}^1S_2 = {}^2S_2$$

$$S_1 = {}^1S_1 = {}^2S_1$$

$$T_3 = {}^1T_3 = {}^2T_3$$

La loi des mélanges permet alors d'écrire:

$$E_3 = {}^1v {}^1E_3 + {}^2v {}^2E_3$$

$$D_2 = {}^1v {}^1D_2 + {}^2v {}^2D_2$$

$$D_1 = {}^1v {}^1D_1 + {}^2v {}^2D_1$$

$$S_3 = {}^1v {}^1S_3 + {}^2v {}^2S_3$$

$$T_2 = {}^1v {}^1T_2 + {}^2v {}^2T_2$$

$$T_1 = {}^1v {}^1T_1 + {}^2v {}^2T_1$$

On peut aussi déterminer toutes les propriétés de la maille. On obtient par exemple:

$$\epsilon_{33} = \frac{{}^1\epsilon_{33} {}^2\epsilon_{33}}{{}^1v {}^2\epsilon_{33} + {}^2v {}^1\epsilon_{33}}$$

$$s_{33} = {}^1v {}^1s_{33} + {}^2v {}^2s_{33}$$

$$d_{33} = \frac{{}^1v {}^1d_{33} {}^2\epsilon_{33} + {}^2v {}^2d_{33} {}^1\epsilon_{33}}{{}^1v {}^2\epsilon_{33} + {}^2v {}^1\epsilon_{33}}$$

$$d_{31} = \frac{{}^1v {}^1d_{31} {}^2\epsilon_{33} {}^2s_{11} + {}^2v {}^2d_{31} {}^1\epsilon_{33} {}^1s_{11}}{({}^1v {}^2\epsilon_{33} + {}^2v {}^1\epsilon_{33}) ({}^1v {}^2s_{11} + {}^2v {}^1s_{11})}$$

RESUME

De nouveaux matériaux piézoélectriques (les céramiques très fortement anisotropes, les piézoplastiques, les céramiques composites), mieux adaptés que les céramiques PZT au fonctionnement en mode hydrostatique, sont promis à d'importantes applications en détection sous-marine, sous réserve de leur stabilité en pression, en température et en fréquence.

Cette thèse fait le point sur les performances acoustiques et sur le comportement en pression de ces nouveaux matériaux pour hydrophone.

Elle présente un dispositif de mesure permettant de les caractériser en pression, et met en évidence le grand intérêt du composite PZT-air de connectivité 3-3, aussi appelé céramique poreuse.

Ce composite dont les propriétés dépendent à la fois de la porosité de la matrice PZT, et de la pression appliquée, fait l'objet d'une caractérisation approfondie et d'une modélisation visant à interpréter puis à optimiser ses performances en régime hydrostatique.

MOTS-CLEFS

piézoélectrique
(piezoelectric materials)

méthode de mesure
(measuring method)

céramique poreuse
(porous ceramic)



hydrophone
(hydrophone)

pression hydrostatique
(hydrostatic pressure)

modélisation
(modelling)

RESUME

De nouveaux matériaux piézoélectriques (les céramiques très fortement anisotropes, les piézoplastiques, les céramiques composites), mieux adaptés que les céramiques PZT au fonctionnement en mode hydrostatique, sont promis à d'importantes applications en détection sous-marine, sous réserve de leur stabilité en pression, en température et en fréquence.

Cette thèse fait le point sur les performances acoustiques et sur le comportement en pression de ces nouveaux matériaux pour hydrophone.

Elle présente un dispositif de mesure permettant de les caractériser en pression, et met en évidence le grand intérêt du composite PZT-air de connectivité 3-3, aussi appelé céramique poreuse.

Ce composite dont les propriétés dépendent à la fois de la porosité de la matrice PZT, et de la pression appliquée, fait l'objet d'une caractérisation approfondie et d'une modélisation visant à interpréter puis à optimiser ses performances en régime hydrostatique.

MOTS-CLEFS

piézoélectrique
(piezoelectric materials)

hydrophone
(hydrophone)

méthode de mesure
(measuring method)

pression hydrostatique
(hydrostatic pressure)

céramique poreuse
(porous ceramic)

modélisation
(modelling)