# Développement de capteurs Interdigités souples pour le contrôle de structures

R. Takpara[a], D. Fall[a], M. Duquennoy[a], C. Courtois[b], M. Rguiti[b], L. Seronveaux[c], D. Monnoye[c], G. Martic[d], V. Lardot[d], M. Gonon[e], N. Maury[e], C. Pelegris[f], M. Guessasma[f], N. Ferguen[f] et E. Bellenger[f]

[a]IEMN-DOAE, Université de Valenciennes, LE MONT HOUY, 59300 Valenciennes, France
[b]LMCPA, Université de Valenciennes, PECMA, Z.I. Champ de l'Abbesse, 59600 Maubeuge, France
[c]SIRRIS, Liege Science PARC, Rue du bois Saint Jean 12, BE-4102 Seraing, Belgique
[d]CRIBC, 4 Avenue Gouverneur Cornez, 7000 Mons, Belgique
[e]UMONS, Place du parc, 4 B7000 Mons, Belgique
[f]LTI-Université de Picardie, Jules Verne -IUT de l'Aisne, 02100 Saint-Quentin, France
rafatou.takpara@univ-valenciennes.fr

Ce travail porte sur la réalisation de capteurs Interdigités (IDT) sur des supports piézoélectriques flexibles. L'enjeu est double puisqu'il s'agit premièrement de disposer de capteurs souples dont la fréquence propre est la plus élevée possible afin de générer des ondes de surface qui donnent la possibilité de caractériser les surfaces des structures mais aussi de réaliser ces capteurs avec des technologies relativement bon marché, pour obtenir au final des capteurs performants à coût réduit capables de s'adapter à différentes géométries. Ceci permet ensuite d'envisager un contrôle continu des structures en intégrant ces capteurs sur ces dernières.

# 1 Introduction

Afin de contrôler ''finement'' les structures en surface et pour observer par exemple des fissures débouchantes précoces ou tester la qualité d'un revêtement, il est nécessaire de disposer de capteurs travaillant en hautes fréquences (2-30MHz). Or, classiquement, dans le cadre du contrôle non destructif, la génération des ondes guidées est obtenue à partir de capteurs à coins mais compte tenu des pertes et atténuations, leur fréquence propre maximale est aux alentours de 10MHz. Concernant la génération par IDT, dans la littérature scientifique les fréquences maximales proposées pour ce type de capteurs, sont de l'ordre de quelques mégahertz [1], [2], [3]. Notre objectif est donc de réaliser des capteurs IDT souples capables de générer des ondes guidées à plus hautes fréquences. Afin de répondre à cet objectif, plusieurs laboratoires de recherche français et belges se sont réunis autour d'un projet européen de coopération transfrontalière INTERREG nommé PRISTIFLEX.

# 2 Les mousses céramiques

Nos impératifs dans ce projet, nous amènent à utiliser les matériaux souples avec de bonnes performances piézoélectriques pour la génération des ondes de surface. Certes, il existe quelques matériaux comme le PVDF, mais malgré ses qualités mécaniques attirantes, l'utilisation de celui-ci est limitée par ses propriétés piézoélectriques. Ainsi dans le cadre de ce projet nous avons décidé de travailler avec une céramique piézoélectrique que nous allons rendre flexible par introduction des pores : il s'agit d'une mousse céramique de type $BaTiO_3$.

## 2.1 Procédé de fabrication des matériaux poreux

Il existe plusieurs méthodes pour élaborer des matériaux poreux. Le choix de la méthode à utiliser pour l'élaboration de ces derniers est guidé par le résultat visé. Les principales méthodes utilisées sont : la technique du réplica, la méthode sacrificielle et la méthode des mousses stabilisées par des particules. Cette dernière méthode est celle qui est utilisée dans le cadre de nos travaux.

La méthode des mousses stabilisées (fig. 1) consiste à incorporer du gaz dans une suspension de particules céramiques. Le gaz peut être incorporé dans la suspension par agitation ou par réaction chimique avec dégagement gazeux. L'étape délicate consiste à stabiliser la mousse. La stabilisation de ces mousses se fait par l'introduction de molécules amphiphiles (par exemple, l'acide butyrique). Celles-ci comportent une tête hydrophile et une queue hydrophobe (fig. 2). Le pH est ajusté de manière à ce que la molécule amphiphile s'adsorbe, via sa partie polaire, à la surface des particules de $BaTiO_3$. L'objectif est de rendre les particules de $BaTiO_3$ suffisamment hydrophobes pour conduire à leur adsorption à l'interface air/eau.

Après la mise en forme et séchage, les mousses stables sont frittées à haute température. Cette méthode permet d'obtenir des céramiques poreuses dont les pores ont des dimensions comprises entre 10µm et 300 µm et le taux de porosité varie entre 40% et 95% [4]. Lors du frittage, le matériau est sensible à la fissuration. Il est donc nécessaire de le chauffer progressivement car un gradient de température entrainerait des contraintes et donc des fissurations. Le cycle de chauffage comprend alors une rampe montante, un palier, et une rampe descendante pour éviter la fissuration du matériau fragile qu'est la céramique.

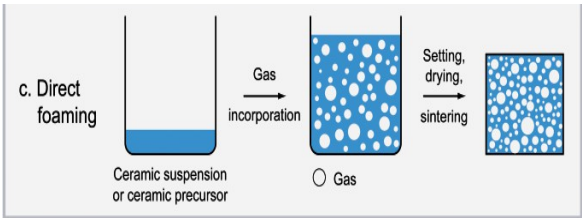



Figure 1 : Schéma de la méthode des mousses stabilisées [5]

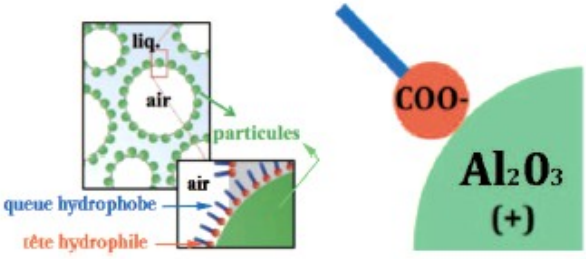



Figure 2 : Stabilisation des mousses par des particules

## 2.2 Caractéristiques des mousses céramiques

En jouant sur la concentration de l'acide butyrique, on arrive à faire varier deux paramètres : le taux de porosité et la taille des pores. Plus la concentration en acide est élevée, plus la taille des pores diminuent. La vitesse d'agitation au cours de l'incorporation du gaz permet aussi de jouer sur la taille des pores. Plus la vitesse est grande, plus les pores sont petits.

Aujourd'hui, nous arrivons à élaborer des mousses avec des taux de porosité allant de 50 à 90%, et de taille de pores variant entre 50µm et 100µm. Les mousses ainsi élaborées ont de bonnes propriétés piézoélectriques notamment le $d_{33}$ allant jusqu'à 170pC/N ($d_{33}$=33pC/N pour le PVDF). Cependant les propriétés mécaniques (en termes de flexibilités) des mousses deviennent faibles. Pour remédier à ce problème de fragilité, nous avons opté pour l'imprégnation des polymères dans les mousses. Cela permet d'accroître la déformabilité du matériau

piézoélectrique tout en gardant la connectivité de la phase céramique. Les polymères d'infiltration rencontrés dans la littérature sont le poly ε-caprolactone, un élastomère urée-uréthane et une résine époxyl vinyl ester. Dans notre cas, nous avons choisi une résine d'imprégnation de type époxy (nom commercial *épofix*). Il est à noter que l'incorporation du polymère permet de gagner en propriété mécanique, sans altérer le d33 du matériau.

La figure 3 nous permet de voir le comportement de ces deux types de matériaux pendant une sollicitation mécanique (flexion 3 points). Nous pouvons constater que le composite se déforme plus avant la rupture, contrairement au matériau poreux. Quelques constantes mécaniques, permettant aussi de mieux comparer les deux matériaux sont présentés dans le tableau 1.

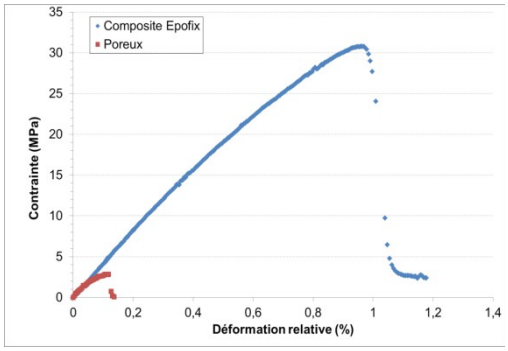



Figure 3 : Essais de flexion 3 points sur une mousse et le composite correspondant

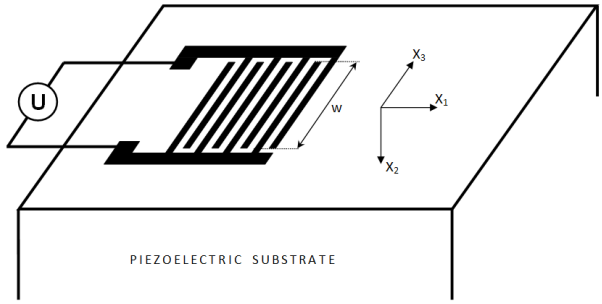
Tableau **1** : Comparaison des propriétés mécaniques des matériaux poreux et composites

| Matériaux | Contrainte rupture (MPa) | Allongement rupture (%) | Module de Young (GPa) |
|---|---|---|---|
| Poreux | 2,8 | 0,13 | 2,2 |
| Composite | 31 | 0,96 | 3,2 |

# 3 Etude des paramètres du capteur

Afin d'optimiser les capteurs, nous avons réalisé une modélisation par éléments finis de ceux-ci sur *COMSOL Multiphysics®*. Dans un premier temps à partir des différentes propriétés mécaniques, physiques et piézoélectriques, nous avons étudié la capacité des mousses piézoélectriques à générer les ondes de surface.

Un capteur IDT est constitué de deux électrodes métalliques, en forme de peignes (souvent en or ou en argent), composées de doigts imbriqués, qui sont déposées sur un substrat piézoélectrique (fig. 4). Lorsqu'une tension électrique est appliquée entre les deux électrodes, le champ électrique créé engendre des compressions et des dilatations, au voisinage de la surface de la lame piézoélectrique, donnant naissance aux ondes de surface [6].




w : largeur de recouvrement des électrodes

U : tension appliquée entre les électrodes

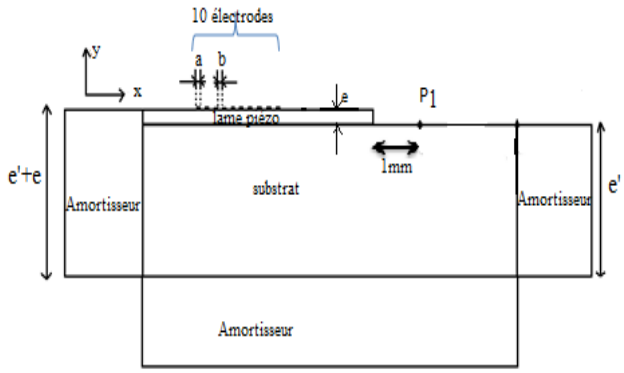
Figure 4 : Schéma d'un capteur interdigité déposé sur la surface d'un substrat piézoélectrique

A partir des modélisations, nous avons déterminé les déplacements (normaux à la surface de propagation) comme indiqué sur la figure 5. Ainsi, nous avons pu comparer les performances des mousses céramiques (en amplitude) avec les matériaux piézoélectriques classiques (comme les PZTs ou le $LiNbO_3$). Les mousses piézoélectriques permettent de générer les ondes de surface avec des amplitudes plus élevés que certains PZTs, ainsi que le $LiNbO_3$ comme nous pouvons le constater dans le tableau 2.

Tableau 2 : classement des matériaux du plus performant au moins performant (f=20MHz)

| Classement | Matériaux | déplacement (nm) |
|---|---|---|
| 1 | PZ29 | 31,9 |
| 2 | PZ27 | 21,1 |
| 3 | P191 | 15,9 |
| 4 | PZ28 | 14,1 |
| 5 | $BaTiO_3$ | 6,6 |
| 6 | PZ24 | 5,9 |
| 7 | $LiNbO_3$ | 2,2 |

Nous nous sommes intéressés ensuite à l'épaisseur optimale de la lame piézoélectrique. L'objectif étant de générer directement des ondes de surface sur une structure à caractériser, à partir de cette lame piézoélectrique mise en contact (ou collée) avec celle-ci.




e : épaisseur de la lame piézoélectrique
e' : épaisseur du substrat
a : largeur des électrodes
b : espacement entre les électrodes
$\lambda_{R_imp}$=2*(a+b)

Figure 5 : Modèle utilisé pour l'étude de l'épaisseur de la lame piézoélectrique à utiliser sur substrat

Nous avons considéré que la lame piézoélectrique était collée (liaison rigide) au substrat. Par contre l'atténuation dans les matériaux n'a pas été considérée.

Nous avons relevé les déplacements normaux en différents points : par exemple le point P1 est situé à 1mm de la lame piézoélectrique (figure 6). Différents couples de matériaux piézoélectriques déposés sur différents substrat ont été étudiés. A partir de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans le substrat et de la valeur de la fréquence d'excitation, nous calculons la longueur d'onde $\lambda_{R_imp}$ (Eq. 1) et donc la largeur des électrodes et leurs espacements (Eq. 2) à imposer pour le capteur IDT.

$$\lambda_{R_imp} = V/f \quad (1)$$

$$a=b=\lambda/4 \quad (2)$$

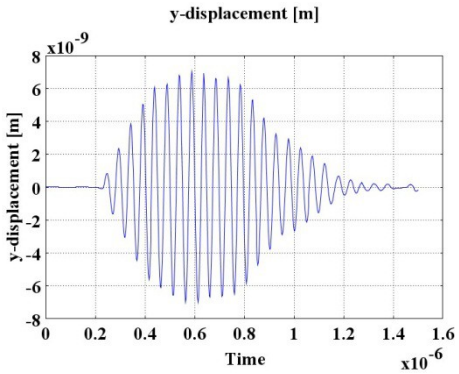



Figure 6 : Déplacements normal généré à 1mm des électrodes (10 électrodes) sur une mousse de $BaTiO_3$ à 20MHz

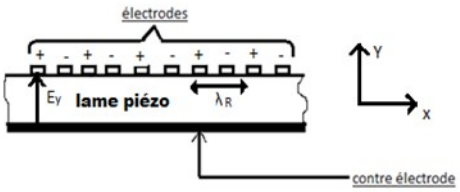



Figure 7 : Schéma illustrant la contre électrode

Pour chaque épaisseur, deux types d'essais ont été réalisés : un essai avec une contre électrode et un essai sans cette dernière. La contre électrode, permet de créer, en plus du champ inter-électrodes, un champ électrique vertical entre les électrodes supérieures et la contre électrode (le champ Ey sur la figure 7). Cet effet, est évidemment d'autant plus important que l'épaisseur est petite [7].

A partir des résultats de simulation, nous observons trois grands cas de figure: le premier cas correspond au cas où l'épaisseur « e » est très faible par rapport à la longueur d'onde de surface dans la lame piézoélectrique, le second cas correspond au cas où « e » est comparable à cette longueur d'onde, et enfin le troisième cas correspond au cas où « e » est largement supérieur à la longueur d'onde dans la lame piézoélectrique.

Pour le 1er cas ($e << \lambda_{R_lame}$), les résultats (en amplitude et type d'onde générée) sont très variables d'une épaisseur à une autre (fig.8). D'autre part, on ne peut pas envisager de telles épaisseurs avec les mousses piézoélectriques compte tenu du fait que les pores ont une taille minimale aux alentours de 50µm. Il est donc difficile de travailler avec des épaisseurs pour lesquels $e/\lambda_{R_lame}<0,8$.

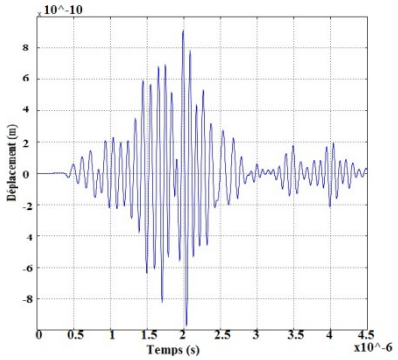



Figure 8 : Déplacement générés pour e/ $\lambda_{R_lame}$ =0,15 (amplitude maximale = 0.8 nm)

2ème Cas ($e \approx \lambda_{R_lame}$) : Ce cas est favorable à l'excitation de l'onde de surface. En effet pour ces épaisseurs de la lame piézoélectrique, les déplacements normaux générés sur le substrat ont une forme comparable à ceux que l'on a pour une onde de Rayleigh sur un substrat piézoélectrique semi-infini (fig.9). D'autre part, les vitesses de propagation de ces ondes correspondent à celle de l'onde de Rayleigh dans le substrat. Les amplitudes les plus élevées ont été également obtenues pour ce cas. Nous avons donc de bons résultats pour des épaisseurs comprises entre 0.8* $\lambda_{R_lame}$ et 1.2* $\lambda_{R_lame}$.

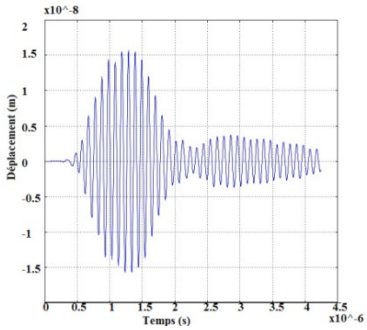



Figure 9 : Déplacement générés pour e=$\lambda_{R_lame}$ (amplitude maximale = 15 nm)

3ème cas ($e >> \lambda_{R_lame}$) : l'onde générée sur le substrat est fortement influencée par le bord de la lame piézoélectrique dans ce cas de figure. En effet, l'onde de surface est dans un premier temps générée sur la lame piézoélectrique, puis elle se propage sur celle-ci et va ensuite sur le substrat "en passant" par l'extrémité de la lame. Ces résultats sont donc fortement dépendant de la qualité de l'arrête de la lame. Puisque cet élément sera très difficile de maîtriser expérimentalement, nous n'avons pas retenu ce 3ème cas.

En conclusion il est préférable de choisir une épaisseur pour la lame piézoélectrique comprise entre $0.8 * \lambda_{R_lame}$ et $1.2 * \lambda_{R_lame}$.

# 4 Technologie de dépôt d'électrodes

Deux types de technologie ont été testés pour la réalisation des électrodes interdigités : la méthode Impression jet d'encre et la méthode Ablation laser

## 4.1 Impression jet d'encre (Aerosol Jet printing)

L'Aerosol Jet printing (AJP) est une technologie d'impression haute résolution par formation d'un aérosol composé d'encre chargée en nanoparticules. Cette technologie permet notamment de réaliser des capteurs IDT sans avoir à recourir à l'utilisation de masques. Les autres avantages liés à cette technique sont d'avoir la possibilité de réaliser des schémas en 3D, de faire des frittages in-situ et d'utiliser une très large gamme d'encre (Ag, Or, semis conductrice, diélectrique, etc.). D'autre part, il est possible d'augmenter l'épaisseur des électrodes en effectuant plusieurs passes au même endroit. Par contre, la sensibilité et la stabilisé du système dépendent de l'environnement d'impression et la qualité du dépôt est affectée par l'état de surface et la porosité du substrat. Enfin, les électrodes sont réalisées au fur et à mesure et les risques d'éclaboussures ne sont pas négligeables ce qui est particulièrement le cas pour la réalisation des IDT (grand nombre d'électrodes) sachant que le moindre court-circuit annihile le capteur. Les capteurs IDT obtenus dans ce projet ont été réalisés sur la base d'un équipement commercial OPTOMEC® AJP300CE. Ce système est capable d'imprimer des lignes aussi fines que 10µm de large et 150nm d'épaisseur en un seul passage (pour des conditions parfaitement contrôlées).

## 4.2 Ablation laser

Les techniques basées sur l'ablation laser ont l'avantage d'être des techniques rapides, sans contact et qui offrent la possibilité de réaliser facilement des schémas complexes d'électrodes et de pouvoir les modifier à loisir puisque le spot laser vaporise le métal au fur et à mesure du passage du spot laser sur les zones où il faut supprimer le métal, sans avoir à recourir à l'utilisation de masques comme en lithographie. Par contre, il est nécessaire de réaliser une première étape de métallisation de la surface. D'autre part, il peut y avoir un léger échauffement local de la structure usiné qui peut être préjudiciable en particulier pour les céramiques PZT (température de Curie). L'idéal est que la couche soit sublimée sans que le substrat soit échauffé. Ceci dépend de la conduction thermique de la couche et du substrat et de l'absorption électromagnétique de la couche.

Les capteurs IDT obtenus dans ce projet ont été réalisés à partir de 3 équipements : un dispositif de la marque Rofin (BAASEL Lasertech) disposant d'une source laser YAG émettant à une longueur d'ondes de 1060 nm et de puissance nominale de 65W. Une deuxième série d'essais ont été réalisé sur un équipement commercial Trumark Station Trumpf 5000 disposant d'une source laser Nd:YVO4 émettant à une longueur d'onde à 1064nm et de puissance nominale de 20W. Enfin, un troisième système de photoablation équipé d'un laser de type excimère (fournisseur : Optec, équipement faisant également partie de la plateforme Hainolase), dont le faisceau laser de longueur d'ondes 248nm est généré par un pompage photonique à travers un mélange gazeux (Kr + F).

# 5 Conclusion

Cette étude a pour but de développer des capteurs interdigités flexibles pour générer des ondes de surface dans le cadre du CND. Dans ces travaux, nous élaborons un matériau piézoélectrique sous forme de mousse. Ce matériau étant flexible, il est donc possible de l'utilisé sur une surface non plane. L'aptitude des mousses piézoélectriques à générer les ondes de surface a été modélisée et l'épaisseur de ce matériau à utiliser pour la génération des ondes de surface sur un substrat (non piézoélectrique) a été étudiée. L'étude est encore en cours et ce type de capteurs devrait bientôt être utilisé pour le contrôle non destructif de substrats.

# Remerciements

Les auteurs remercient pour leurs soutiens, la région Nord-Pas-de-Calais et l'Union Européenne (fonds FEDER) via les programmes Interreg IV "PRISTIFLEX".

# Références

[1] R. Monkhouse, P. Wilcox, P. Cawley, Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of lamb waves in structures, *Ultrasonics 35* p489-498 (1997).

[2] J. Jin, S.T. Quek, Q. Wang, Design of interdigital transducers for cracks detection in plates, *Ultrasonics 43* p481–493, USA (2005).

[3] J. K. Na, James L. Blackshire, Interaction of Rayleigh waves with a tightly closed fatigue crack, *NDT&E International 43 432–439*, USA *(2010)*

[4] U. Gonzenbach, A. Studart, E. Tervoort, and J. Gauckler, Macroporous Ceramics from Particle-Stabilized Wet Foams, *Journal of the American Ceramic Society* vol.90, issue 1, pp.16-22 (2007).

[5] A. Studart, U. Gonzenbach, E. Tervoort, J. Gauckler, Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review, *Journal of the American Ceramic Society*, vol.89, issue 6, pp.1771-1789 (2006).

[6] D. Royer, E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, Tome1 : propagation libre et guidée, *Masson Paris*, (1999).

[7] F. Bellan, A. Bulletti, L. Capineri, L. Masotti, G. Goksen, F. Degertekin, B. Khuri, F. Guasti and R. Edgardo, A new design and manufacturing process for embedded Lamb waves interdigital transducers based on piezopolymer film, *Sensors and Actuators A* 123–124 (2005).