

DÉVELOPPEMENT DE CAPTEURS INTERDIGITÉS POUR LE CONTRÔLE DE STRUCTURES

R. Takpara, D. Fall, M. Duquennoy, M. Ouafitouh, C. Courtois¹, M. Rguiti¹, M. Gonon²,
N. Maurye², G. Martic³, V. Lardot³, L. Seronveaux⁴, J. Halleux⁴, C. Pélegris⁵ et M.
Guessasma⁵

IEMN-DOAE, université de Valenciennes, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes, France

¹ LMCPA, université de Valenciennes, PECMA, Z.I. Champ de l'Abbesse, 59600 Maubeuge,
France

²UMONS, Université de Mons, place du parc, 4 B7000 Mons, Belgique

³ CRIBC (membre d'EMRA), 4, avenue Gouverneur Cornez, 7000 Mons, Belgique

⁴ SIRRIS, Liège science park, rue du Bois Saint-Jean 12, BE-4102 Seraing, Belgique

⁵ LTI, université de Picardie Jules Verne, IUT de l'Aisne, France

marc.duquennoy@univ-valenciennes.fr

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur la réalisation de capteurs interdigités (IDT) afin de caractériser la qualité des revêtements et les surfaces des structures. L'enjeu de cette étude est triple. Il s'agit premièrement de disposer de capteurs efficaces pour générer des ondes acoustiques de surface SAW (Surface Acoustic Wave) car ces ondes sont bien adaptées à ce type de caractérisation. Le deuxième objectif de cette étude est de réaliser des capteurs flexibles afin qu'ils puissent s'adapter à différentes géométries de structure. Enfin, nous privilégions des technologies relativement bon marché pour développer ces capteurs car cela permet ensuite d'envisager un contrôle continu des structures en intégrant ces capteurs à demeure sur ces dernières. Afin de répondre à ces objectifs, plusieurs laboratoires français et belges se sont réunis autour du projet INTERREG IV intitulé PRISTIFLEX. Après avoir présenté le procédé de fabrication et les caractéristiques du matériau piézoélectrique développé dans cette étude, nous présentons la modélisation qui a permis de définir les paramètres dimensionnels de la lame piézoélectrique qui compose le capteur. Ensuite, les techniques qui permettent de réaliser les électrodes (ablation laser et impression d'encre) sont présentées et un exemple d'électrode réalisée est présentée. Enfin, nous montrons l'efficacité de ces capteurs à partir de la mesure des déplacements engendrés par les ondes de surface excitées par ces derniers.

Mots-clés: contrôle non destructif, ultrasons, ondes de surface, caractérisation de structures

ABSTRACT

This work deals with the realization of interdigital transducers (IDT) in order to characterize the quality of coatings and surfaces of structures. The challenge of this study is threefold. Firstly, the aim is to have efficient sensors to generate surface acoustic wave (SAW) since these waves are well suited for this type of characterization. The second objective of this study is to provide flexible sensors so that they can adapt to different shapes of structures. Finally, relatively inexpensive technologies are favored for the development of these sensors

because this allows continuous monitoring (structural health monitoring) by incorporating these sensors permanently on the structures to be tested. To meet these goals, several French and Belgian laboratories have gathered around the PRISTIFLEX project INTERREG IV. After a presentation of the manufacturing process and the characteristics of the piezoelectric material developed in this study, we discussed modeling which helped to define the dimensional parameters of the piezoelectric plate that composes the sensor. Then, the techniques for producing the electrodes (laser ablation and ink jet printing) were presented and an example of performed electrode was provided. Finally, the effectiveness of these sensors from the measurement of the displacement caused by the surface wave excited by these IDT sensors were demonstrated.

Keywords: NDT, ultrasonics, surface acoustic waves, characterization of structures

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 à ondes de surface. Classiquement, dans le cadre du contrôle non destructif, la génération des ondes guidées est obtenue à partir de capteurs à coins mais ils sont adaptés aux surfaces planes et pour un type de matériau donné. Ils sont donc assez onéreux et il est difficile d'envisager un contrôle santé d'une structure avec ce type de capteur en laissant les capteurs à demeure sur celle-ci. C'est pourquoi nous envisageons dans cette étude, un autre type de capteurs ultrasonores, capables de générer des ondes de surface. Ces capteurs sont des capteurs dits interdigités (ou IDT pour *InterDigital Transducer*) (Monkhouse *et al.*, 1997; Jin *et al.*, 2005; Na & Blackshire, 2010). Contrairement aux capteurs présentés dans la littérature, nous envisageons de réaliser des capteurs IDT souples et capables de s'adapter à la géométrie des structures. 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.

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 (polyfluorure de vinylidène), mais malgré ses bonnes qualités mécaniques, l'utilisation de celui-ci est limitée par ses propriétés piézoélectriques (Monkhouse *et al.*, 1997; Martins *et al.*, 2012; Castaings *et al.*, 1999). 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 BaTiO₃ (titanate de baryum).

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 (Studart *et al.*, 2006). 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) (Gonzenbach *et al.*, 2007; Sepulveda & Binner, 1999). 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 BaTiO₃. L'objectif est de rendre les particules de BaTiO₃ 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% (Gonzenbach *et al.*, 2007). Lors du frittage, le matériau est sensible à la fissuration. Il est donc nécessaire de le chauffer progressivement car un gradient de température entraînerait 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.

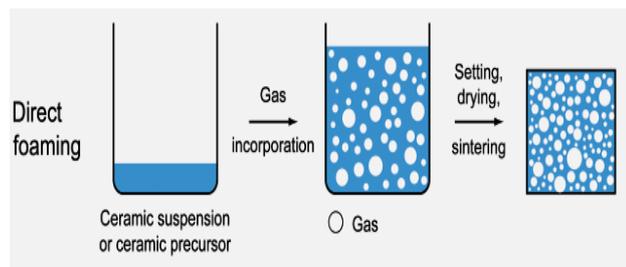


Figure 1. Schéma de la méthode des mousses stabilisées (Stuart *et al.*, 2006).

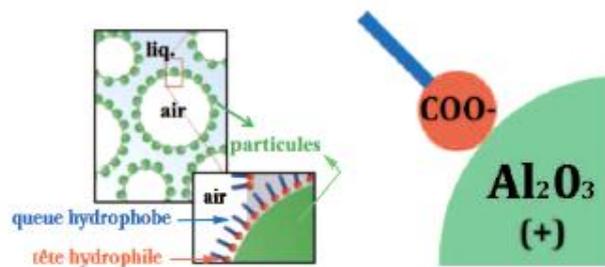


Figure 2. Stabilisation des mousses par des particules.

Caractéristiques des mousses céramiques

En jouant sur la concentration de l'acide butyrique, il est possible de 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 diminue (Gonzenbach *et al.*, 2007). 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 une taille de pores variant entre 50 μm et 100 μm . Les mousses ainsi élaborées ont de bonnes propriétés piézoélectriques notamment le d_{33} allant jusqu'à 170pC/N ($d_{33}=33\text{pC/N}$ pour le PVDF). Cependant les propriétés mécaniques (en termes de flexibilités) des mousses restent 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 époxy 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 trop altérer le d_{33} du matériau.

La Figure 3 permet de vérifier 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 présentées dans le Tableau 1, permettent de comparer les performances de la mousse avant imprégnation et après imprégnation (composite).

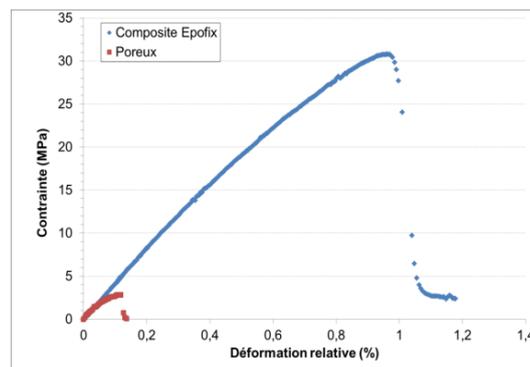


Figure 3. Essais de flexion 3 points sur une mousse et le composite correspondant.

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

ÉTUDE 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 (Royer & Dieulesaint, 1999).

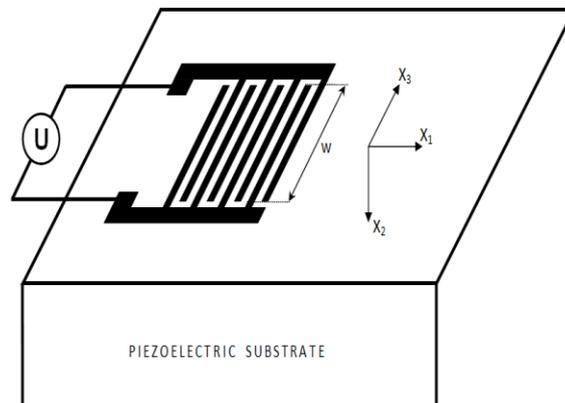


Figure 4. Schéma d'un capteur interdigité déposé sur la surface d'un substrat piézoélectrique. W correspond à la largeur de recouvrement des électrodes et U à la tension appliquée entre les électrodes.

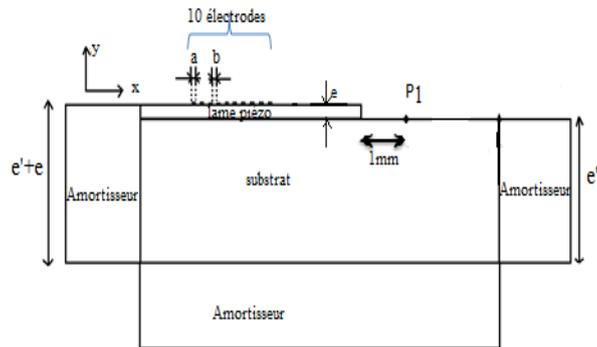
À partir des modélisations, nous avons déterminé les déplacements (normaux à la surface de propagation) comme indiqué sur la Figure 5. Ainsi, nous avons pu comparer les performances des mousses céramiques (en amplitude) avec les matériaux piézoélectriques rigides classiques comme les PZT (Titano-Zirconate de Plomb) ou le LiNbO_3 (Niobate de lithium). Les mousses piézoélectriques permettent de générer les ondes de surface avec des amplitudes plus élevées que certains PZTs, ainsi que le LiNbO_3 comme nous pouvons le constater dans le Tableau 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.

TABLEAU 2

Classement des Matériaux du plus Performant au moins Performant (f=20MHz); (a): PZT Elaborés par la Société FERROPERM; (b): PZT Elaborés par la Société Saint Gobain; (c): (Vashishth & Vishakha, 2009); (d): (Royer & Dieulesaint, 1999)

Classement	Matériaux	déplacement (nm)
1	Pz29 ^(a)	31,9
2	Pz27 ^(a)	21,1
3	P191 ^(b)	15,9
4	Pz28 ^(a)	14,1
5	BaTiO ₃ ^(c)	6,6
6	Pz24 ^(a)	5,9
7	LiNbO ₃ ^(d)	2,2



e : épaisseur de la lame piézoélectrique
 e' : épaisseur du substrat
 a : largeur des électrodes
 b : espacement entre les électrodes
 $\lambda_{R_imp} = 2 * (a+b)$
 $P1$: position où sont relevés les déplacements

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 substrats ont été étudiés. À 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 λ_{R_imp} (éq. 1) et donc la largeur des électrodes et leurs espacements (éq. 2) à imposer pour le capteur IDT.

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

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

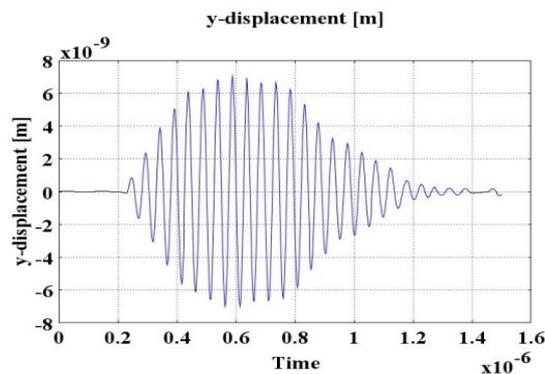


Figure 6. Déplacement normal généré à 1mm des électrodes (10 électrodes) sur une mousse de BaTiO₃ à 20MHz.

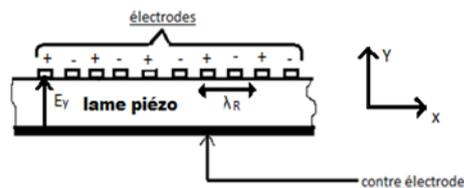


Figure 7. Schéma illustrant la contre électrode.

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 E_y sur la Figure 7). Cet effet, est évidemment d'autant plus important que l'épaisseur est petite (Bellan *et al.*, 2005).

À 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 supérieure à la longueur d'onde dans la lame piézoélectrique.

Pour le 1^{er} cas ($e \ll \lambda_{R_lame}$), 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 50 μ m. Il est donc difficile de travailler avec des épaisseurs pour lesquels $e/\lambda_{R_lame} < 0,8$.

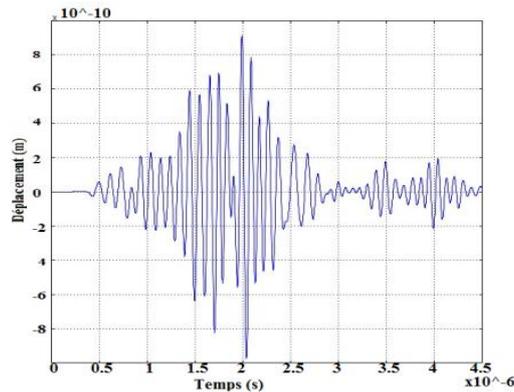


Figure 8. Déplacement généré pour $e/\lambda_{R_lame} = 0,15$ (amplitude maximale = 0.8 nm).

2^{ème} 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 celles 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 $1.2 * \lambda_{R_lame}$.

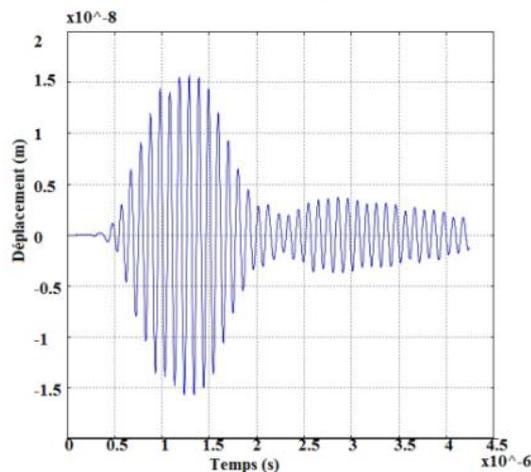


Figure 9. Déplacement généré pour $e = \lambda_{R_lame}$ (amplitude maximale = 15 nm).

3^{ème} cas ($e \gg \lambda_{R_lame}$): 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 dépendants de la qualité de l'arête de la lame. Puisque cet élément sera très difficile à maîtriser expérimentalement, nous n'avons pas retenu ce 3^{ème} cas.

En conclusion il est préférable de choisir une épaisseur pour la lame piézoélectrique comprise entre $0,8 * \lambda_{R_lame}$ et $1,2 * \lambda_{R_lame}$.

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.

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 stabilité 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 OPTOMECA® 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).

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 usinée 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.

RÉSULTATS

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'onde de 1060 nm et de puissance nominale de 65W. Une deuxième série d'essais ont été réalisés 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'onde 248nm est généré par un pompage photonique à travers un mélange gazeux (Kr + F).

Différents capteurs ont été réalisés avec des lames composites de 2mm, 1mm et 500 μ m pour des fréquences de résonance allant de 1 à 5MHz. Sur la partie gauche de la Figure 10, se trouve une photo où une électrode interdigitée a été réalisée par laser excimère sur un substrat de BaTiO₃ de 500 μ m d'épaisseur imprégné par de la résine. Les électrodes interdigitées sont au nombre de 20, leur longueur est de 8 mm et leur largeur est de 150 μ m. Sur la partie de droite, une image MEB illustre la qualité de l'ablation effectuée par le laser et les proportions, par les différentes teintes, des trois matériaux en présence. En noir c'est la résine de remplissage, en gris foncé le BaTiO₃ piézoélectrique et en gris clair le platine conducteur.

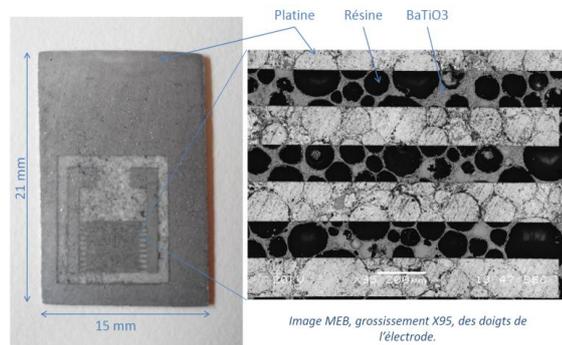


Figure 10. Réalisation des électrodes du capteur IDT sur les composites BaTiO₃/résine.

Nous avons testé les performances acoustiques de ces capteurs et nous avons montré leur capacité à générer des ondes de surface sur une structure en aluminium. En mesurant le temps de vol de l'onde de surface en plusieurs points (Figure 11), il a été possible de retrouver la vitesse de propagation des ondes de surface dans l'aluminium. Ces mesures confirment donc la bonne conversion électromécanique de ces capteurs et démontrent qu'il est tout à fait possible de réaliser des capteurs IDT pour la génération d'ondes de surface HF en vue de réaliser des contrôles non destructifs à partir de ces capteurs.

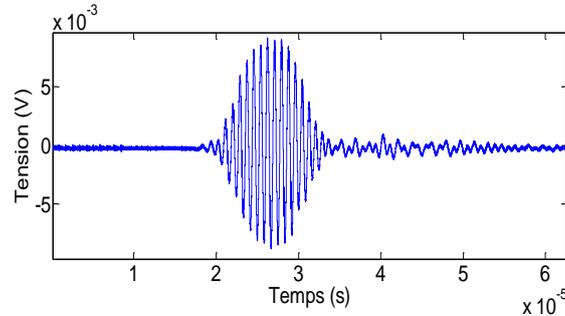


Figure 11. Détection de l'onde de surface générée par un capteur interdigité flexible.

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 composite sous forme de mousse imprégnée de résine. Ce matériau étant flexible, nous avons montré qu'il est donc possible de l'utiliser sur une surface non plane. L'aptitude des mousses piézoélectriques à générer les ondes de surface a été modélisée et testée expérimentalement. Nous avons montré qu'il est préférable de choisir une épaisseur pour la lame piézoélectrique comprise entre 0,8 et 1,2 fois la longueur d'onde de l'onde de surface. Enfin, nous avons montré l'efficacité de ces capteurs à partir de la mesure des déplacements engendrés par les ondes de surface excitées par ces derniers. L'étude se poursuit car nous cherchons à présent à optimiser les amplitudes des ondes de surface générées.

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

- Bellan, F., Bulletti, A., Capineri, L., Masotti, L., Goksen, G., Degertekin, F., Khuri, B., Guasti, F. and Edgardo, R. 2005. A new design and manufacturing process for embedded Lamb waves interdigital transducers based on piezopolymer film. *Sensors and Actuators A*, 123–124: 379-387.
- Castaigns, M., Monkhouse, R., Lowe, M., Cawley, P. 1999. The performance of flexible interdigital PVDF lamb wave transducers. *Acta Acustica United with Acustica*, 85(6): 842-849.
- Gonzenbach, U., Studart, A., Tervoort, E. and Gauckler, J. 2007. Macroporous ceramics from particle-stabilized wet foams. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(1): 16-22.
- Jin, J., Quek, S.T., Wang, Q. 2005. Design of interdigital transducers for cracks detection in plates. *Ultrasonics*, 43: 481–493.
- Martins, M., Correia, V., Cabral, J.M., Lanceros-Mendez, S., Rocha, J.G. 2012. Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications. *Sensors and Actuators A*, 184: 141– 148.

- Monkhouse, P., Wilcox, P., Cawley, P. 1997. Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of lamb waves in structures. *Ultrasonics*, 35: 489-498.
- Na, J.K., Blackshire, J.L. 2010. Interaction of Rayleigh waves with a tightly closed fatigue crack. *NDT&E International*, 43(5): 432-439.
- Royer, D., Dieulesaint, E. 1999. *Ondes élastiques dans les solides*. Tome1 : *propagation libre et guidée*. Masson Paris.
- Sepulveda P. and Binner, J.G.P. 1999. Processing of cellular ceramics by foaming and *in situ* polymerisation of organic monomers. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19(12): 59-66.
- Studart, A., Gonzenbach, U., Tervoort, E., Gauckler, J. 2006. Processing routes to macroporous ceramics: a review. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(6): 1771-1789.
- Vashishth, K.A., Vishakha G. 2009. Wave propagation in transversely isotropic porous piezoelectric materials. *International Journal of Solids and Structures*, 46: 3620-3632.