

2.7. MIGAC_

Titre : Micro-générateurs aéroélectriques flexibles pour l'auto-alimentation de capteurs communicants

Porteur du projet : R. Séveno

Laboratoire : IETR UMR CNRS 6164, université de Nantes

Laboratoire associé : COSYS, SII, Université Gustave Eiffel

Doctorant : J. Le Scornec (IETR UMR CNRS 6164, ED MathSTIC)

Directeur de Thèse : B. Guiffard (IETR UMR CNRS 6164)

Encadrant : R. Séveno (IETR UMR CNRS 6164), V. Le Cam (IFSTTAR, COSYS, SII)

Collaboration avec : J. C. Thomas (GeM UMR CNRS 6183)

Mots clés : Energie renouvelable ; autonomie énergétique ; capteurs intelligents ; contrôle de structure ; matériaux fonctionnels

Verrous scientifiques ou technologiques levés : Réalisation d'un générateur piézoélectrique flexible par un procédé facilement transférable à l'industrie ; récupération d'énergie mécanique de faibles courants d'air

Etat : début : octobre 2017 ; fin : mars 2021

2.7.1. Résumé du projet

Le contrôle de santé de structures, telles que des ponts ou des voies ferrées, est aujourd'hui primordial afin de prévenir des accidents et même d'anticiper l'usure prématurée de certaines de leurs pièces stratégiques. Ce contrôle est effectué par des capteurs regroupés sur des cartes électroniques qui permettent le transfert des informations vers des bases de données qui serviront à suivre en temps réels les évolutions (naturelles ou accidentelles) de ces structures. L'autonomie énergétique de ces réseaux de capteurs constitue un enjeu important dans le déploiement de ces contrôles, car il existe une multitude de sites où il n'est pas possible de se brancher sur le réseau électrique, et où le remplacement de batteries dédiées pose des problèmes de logistique importants. Des panneaux photovoltaïques sont déjà utilisés afin de pourvoir à l'alimentation de réseaux de capteurs, mais de nombreux sites où l'énergie solaire n'est pas accessible nécessitent encore des solutions alternatives d'alimentation (sous des tabliers de ponts, dans des tunnels). L'objectif du projet MIGAC est de développer des générateurs aéroélectriques pouvant alimenter une carte électronique permettant à cette dernière de transférer les informations recueillies par ses capteurs intégrés. Ces générateurs de nouvelle génération vont convertir l'énergie mécanique des courants d'air en électricité, et pourront être implantés dans des sites réputés difficile d'accès. La technologie utilisée pour réaliser ces générateurs devra être simple et de faible coût, ceci afin de faciliter son déploiement et de proposer une alternative sérieuse aux dispositifs actuels d'alimentation de réseaux de capteurs.

2.7.2. Résultats du projet

2.7.2.1. Résumé des travaux de thèse

Dans un premier temps, le procédé de fabrication des couches minces de zircono-titanate de plomb (PZT) sur substrat flexible d'aluminium a été présenté. Les films minces de PZT sont élaborés par voie chimique, avec une technique dérivée du procédé sol-gel. Le film mince de PZT est obtenu après plusieurs dépôts par centrifugation de couches de 300 nm de PZT, permettent ainsi d'obtenir des films homogènes à l'épaisseur désirée. L'épaisseur, la rugosité de surface ainsi que la bonne cristallisation des films de PZT ont été validées par les caractérisations structurales (microscopie électronique à balayage, microscopie à force atomique et diffraction des rayons X). Afin de réaliser la caractérisation ferroélectrique, diélectrique et piézoélectrique du matériau, une structure d'électrode Métal-Isolant-Métal (MIM) a été réalisée en aluminium à la surface de celui-ci.

Une première étude sur l'influence de la couche d'alumine (Al_2O_3) sur les propriétés ferroélectriques et piézoélectriques a été réalisée. Cette couche se forme à la surface du substrat d'aluminium lors du traitement thermique nécessaire à la cristallisation du PZT. Ainsi, à partir de la permittivité du PZT obtenue avec et sans la couche de RuO_2 , une épaisseur théorique environ 42 nm d'alumine a été déterminée.

L'influence de la couche d'alumine sur les propriétés du matériau a été mise en évidence grâce aux différentes caractérisations ferroélectriques et piézoélectriques. Ainsi, le champ coercitif et le coefficient piézoélectrique d_{31} augmentent et diminuent respectivement d'environ 50 % à cause de la présence de cette couche d'alumine. Cette étude montre qu'il est important de prendre en compte la couche d'alumine pour les caractérisations ferroélectriques et piézoélectriques afin d'obtenir les coefficients d_{31} réels de la couche de PZT.

Dans une deuxième étude, l'optimisation du matériau $Pb_{1,3}Zr_{0,57}Ti_{0,43}O_3$ (PZT 57/43) à l'aide d'un dopage au manganèse a été présentée. Ce dopage par un ion accepteur d'électrons a permis d'augmenter le facteur de qualité ainsi que la permittivité. Avec une permittivité relative de 260 à 1,5 % de manganèse contre 315 sans dopage, cette baisse de la permittivité et donc de capacité devait permettre d'augmenter la récupération d'énergie. Cependant, le dopage a également diminué le coefficient piézoélectrique d_{31} , ce qui implique une conversion électromécanique plus faible. Cette diminution a un effet direct sur la récupération d'énergie, avec une puissance maximale quasiment divisée par deux avec un dopage à 1,5 % de manganèse (≈ 20 nW) contre 37 nW sans dopage. En effet, la diminution de la capacité n'a pas permis de compenser la diminution du coefficient piézoélectrique. Cette étude révèle donc que le dopage des couches minces de PZT avec du manganèse n'est pas favorable pour la récupération d'énergie.

Une dernière étude sur l'influence de l'épaisseur du film de PZT sur les propriétés diélectriques, ferroélectriques, piézoélectriques et électriques a été menée. Il s'avère que l'augmentation de l'épaisseur de PZT a un effet positif sur la récupération d'énergie car elle induit une diminution de la capacité et une augmentation du coefficient piézoélectrique. Cet effet bénéfique est confirmé en récupération d'énergie avec une puissance maximale multipliée par environ 6, passant de 50 nW pour 5 couches à environ 390 nW avec 20 couches. Cependant, avec 20 couches déposées, soit une épaisseur d'environ 6 μm , des craquelures apparaissent à la surface du matériau, ce qui peut avoir des conséquences sur la durée de vie du matériau. Cette étude révèle que l'épaisseur du matériau actif influence fortement et de façon positive la récupération d'énergie.

Dans un deuxième temps et avant de s'intéresser aux propriétés de récupération d'énergie du micro-générateur, l'optimisation de la structure d'électrodes a été présentée. En effet, il a été démontré que la puissance générée par un micro-générateur piézoélectrique dépend principalement du courant piézoélectrique et de la capacité linéaire de celui-ci. Or pour diminuer la capacité et donc accroître les performances énergétiques, une autre structure d'électrodes est utilisée. L'intérêt de la structure à électrodes interdigitées (IDE) réside dans l'espace inter-électrodes qui peut être beaucoup plus important que celui de la structure MIM. Plus l'espace inter-électrodes est grand et plus la capacité du micro-générateur sera faible. Cependant, la polarisation avec ce type de structure d'électrodes est plus difficile à cause des tensions très élevées nécessaires pour polariser l'échantillon. Un procédé permettant d'obtenir des micro-générateurs à électrodes interdigitées (IDE) et sur substrat polymère a été développé. Ce procédé de fabrication permet d'adapter facilement les dimensions des micro-générateurs en forme de poutres, finalement constitués de la couche PZT encapsulée entre deux films polymère aux sources d'excitation ambiantes. La caractérisation diélectrique a permis de confirmer une diminution très importante (d'un facteur 8800) de la capacité grâce aux électrodes interdigitées. Elle passe en effet de 150 nF avec une structure MIM à 17 pF à 1 kHz pour la structure IDE (avec un gap de 400 μm). Cette diminution de la capacité linéaire du micro-générateur est favorable pour des applications de récupération d'énergie.

Pour évaluer l'aptitude des micro-générateurs à la récupération d'énergie, plusieurs systèmes d'excitation ont été testés (pot-vibrant, système Shimadzu, soufflerie) afin d'appliquer différentes contraintes mécaniques aux micro-générateurs (fréquence, accélération, rayon de courbure, etc.) et pour différentes configurations (de type poutre bi-encastree, encastree-libre).

L'utilisation d'un pot-vibrant comme source d'excitation a permis de caractériser l'énergie récupérée à partir des vibrations en contrôlant l'accélération ainsi que la fréquence de l'excitation. Cela a permis dans un premier temps de confirmer l'intérêt de la structure IDE par rapport à la structure MIM. Dans un second temps, la modification de la position la ligne neutre et l'ajout d'une masse d'épreuve sur les propriétés de récupération d'énergie ont été étudiés. Cette dernière permet d'améliorer la récupération d'énergie des micro-générateurs et entraîne également une modification de la fréquence de résonance de la poutre. Ainsi, l'utilisation d'une masse a permis de multiplier par cinq la puissance délivrée par le micro-générateur qui passe de 127 μW à 9,9 Hz lorsque la masse est placée à 8 cm de l'encastrement à 25 μW à 18 Hz sans masse. L'étude des propriétés en récupération d'énergie a démontré l'importance de la ligne neutre. Les déformations subies par la couche PZT et donc la puissance maximale récupérée augmentent avec l'écart entre la couche PZT et la ligne neutre, cet écart pouvant être simplement modulé par l'épaisseur du polymère.

AAP 2017 – MIGAC : Micro-générateurs aéroélectriques flexibles pour l'auto-alimentation de capteurs communicants

Ces travaux ont pour objectif de démontrer qu'il est possible de récupérer l'énergie d'un simple flux d'air à partir de nos micro-générateurs. Pour cela, trois configurations différentes (horizontale, horizontale avec obstacle et « Galloping ») ont été testées afin de déterminer la plus favorable à la récupération d'énergie. Cette étude a permis de démontrer que les configurations horizontales avec et sans obstacle n'étaient pas viables pour des applications de récupération d'énergie. Les tensions générées avec ces configurations sont trop instables et de faible amplitude. De plus, ces configurations nécessitent un vent supérieur à 21 km/h pour commencer à générer de l'énergie. Contrairement à la configuration « Galloping » qui commence à générer de l'énergie avec un vent de seulement 2,3 m/s, soit environ 8 km/h. Cette configuration permet également d'obtenir des tensions sinusoïdales très stables et avec de grandes amplitudes (> 100 V). Ainsi, dans cette configuration, le micro-générateur peut générer une puissance maximale de $3 \mu\text{W}$ pour une vitesse de vent de 2,3 m/s à $38 \mu\text{W}$ avec une vitesse de 6 m/s (≈ 21 km/h). Cette configuration est donc idéale pour la récupération d'énergie à partir de faible courant d'air.

Les différents systèmes d'excitation ont montré que les micro-générateurs développés dans ces travaux avaient le potentiel pour être utilisés comme source d'énergie renouvelable. Cependant, les micro-générateurs délivrent des tensions alternatives et des puissances trop faibles pour alimenter directement un capteur communicant. Une étape de conversion de l'énergie est alors nécessaire.

Ainsi, pour l'alimentation du capteur, une approche basique de la conversion d'énergie a été utilisée afin de convertir la tension alternative en une tension continue. Le pont redresseur double alternance avec un filtre permet de redresser et lisser la tension en sortie des micro-générateurs. De plus, il est autonome en énergie et il a l'avantage d'être deux fois plus efficace que le redressement simple alternance et il est également facile à mettre en œuvre. Ainsi, avec ce circuit, il a été possible d'alimenter un capteur communicant à partir de l'énergie délivrée par les micro-générateurs. Pour cela, l'énergie produite par les micro-générateurs sous un flux d'air (≈ 10 m/s) a été stockée dans un condensateur de 1,2 mF. Pour atteindre la tension maximale d'alimentation du capteur ($\approx 4,5$ V), il faut environ 33 minutes avec quatre générateurs branchés en parallèle. Une fois cette tension atteinte, l'énergie stockée dans le condensateur a été restituée en alimentant le capteur permettant à celui-ci de réaliser 9 acquisitions (mesure de températures et envoi des données) en 37 minutes.

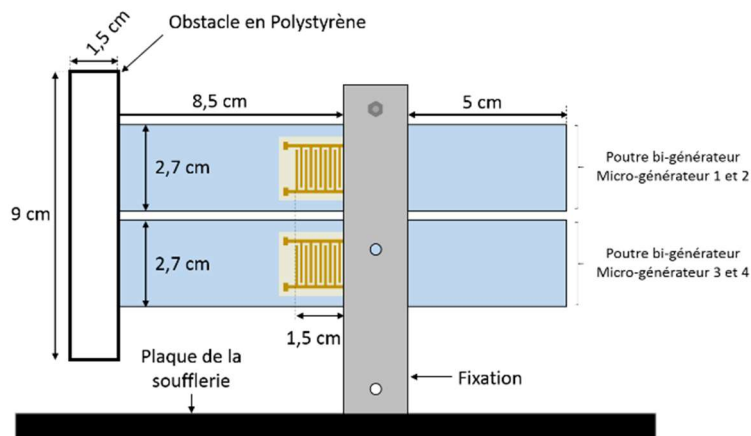


Figure 17. MIGAC : Schéma du montage expérimental en configuration "Galloping" pour 4 microgénérateurs associés en parallèle

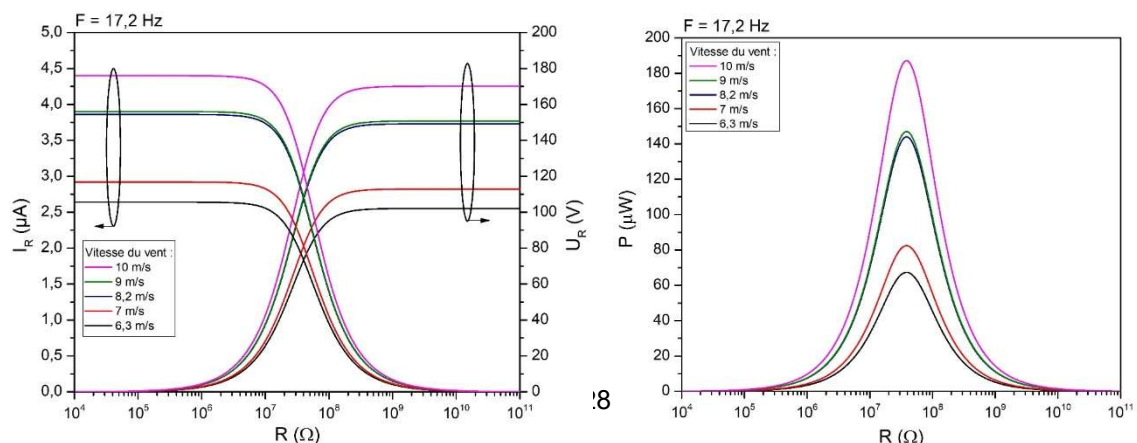


Figure 18. MIGAC : Courant, tension et puissance délivrée par 4 micro-générateurs pour différentes vitesses de vent en fonction de la résistance de charge

2.7.2.2. Publications

Poster

1. R. Seveno, T. Dufay, B. Guiffard, M. El Gibari, J. Le Scornec, J-C. Thomas, P.J. Cottinet, M. Lallart, L. Petit, V. Le Cam, “Flexible electro-active materials“, World Electronics Forum (WEF2017), 24-28 October 2017, Angers (Poster + showroom)
2. J. Le Scornec, M. El Gibari, R. Séveno, B. Guiffard, and V. Le Cam, ‘Influence de la structure des électrodes interdigitées sur les microgénérateurs piézoélectriques”, COFMER’03 - Colloque franco-maghrébin sur les énergies renouvelables, Marrakech, Maroc, 16-18 avril 2019 (Poster)
3. J. Le Scornec, B. Guiffard, R. Seveno and V. Le Cam, “Low frequency flexible piezoelectric energy harvesters”, IWPMA-2019, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2019 (IWPMA2019), Lyon, France, October 1st-4th 2019 (Poster)
4. J. Le Scornec, B. Guiffard, R. Seveno, V. Le Cam, “Hybrid polymer/piezoelectric oxide bilayer films for low frequency energy harvesting”, PowerMEMS 2019, Kraków, Poland, 2-6 December 2019

Conférence, présentation orale

1. R. Seveno, T. Dufay, B. Guiffard, J. Le Scornec, M. El Gibari, S. Carpy, J-C. Thomas, P. J. Cottinet, M. Lallart, L. Petit et V. Le Cam, “Films piézoélectriques flexibles pour la récupération d’énergie”, COFMER’03 - Colloque franco-maghrébin sur les énergies renouvelables, Marrakech, Maroc, 16-18 avril 2019
2. R. Seveno, T. Dufay, B. Guiffard, S. Ginestar, J. Le Scornec, J. C. Thomas, V. Le Cam « Films piézoélectriques flexibles à base de PZT », journées du GDR Oxyfun, Piriac sur mer, 21-23 mars 2018
3. J. Le Scornec, B. Guiffard, R. Séveno et V. Le Cam, " Flexible piezoelectric micro-generator with interdigitated electrodes for energy harvesting", Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d’Energie (JNRSE) 2018, Besançon, May 14th-15th 2018 (oral)
4. R. Seveno, B. Guiffard and J. Le Scornec, “Flexible Al/PZT/Al composite for piezoelectric applications”, ICST 2018, Limerick, Irlande, 4-6 décembre 2018

Conférence invitée

1. R. Seveno, J. Le Scornec, B. Guiffard, V. Le Cam, M. El Gibari, J-C. Thomas, P. J. Cottinet, M. Lallart and L. Petit, “Flexible PZT thin films prepared by Chemical Solution Deposition process”, IWPMA-2019, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2019 (IWPMA2019), Lyon, France, 1-4 Octobre 2019

Présentation de TP :

1. R. Seveno, B. Guiffard, J. Le Scornec, E. Tanguy, P. Derval, S. Hassini, B. Massé, P. Navarro, “Caractérisation d’un générateur piézoélectrique flexible”, CETSIS 2018 (Colloque consacré à l’Enseignement des Technologies et des Sciences de l’Information et des Systèmes), Fes, Maroc, 22-26 octobre 2018

Revue :

1. J. Le Scornec, B. Guiffard, R. Seveno, V. Le Cam, “Frequency tunable, flexible and low cost piezoelectric micro-generator for energy harvesting”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, 2020, 312, pp.112148., DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112148>

2.7.2.3. Dissémination

Participation à l’action « Passeport Recherche » avec une classe du lycée La Colinière de Nantes (2018)

Participation à l’action « Nuit blanche des chercheurs (2018)

Conférence à l’Université permanente en 2019

2.7.2.4. Equipement et ressourcement

- Salaire du doctorant
- Ordinateur
- Petits matériels d’électronique
- Inscription et frais de congrès
- Co-financement de matériel pour banc de mesure

