Mise en œuvre de capteurs RF-MEMS acoustiques pour l'industrie 4.0

Yannick Dusch, Cécile Ghouila-Houri, Aurélien Mazzamurro, Ghizlane Boussatour, Hatem Dahmani, Olivier Bou Matar, Vincent Maurice, Philippe Pernod, Abdelkrim Talbi

▶ **To cite this version:**

Yannick Dusch, Cécile Ghouila-Houri, Aurélien Mazzamurro, Ghizlane Boussatour, Hatem Dahmani, et al.. Mise en œuvre de capteurs RF-MEMS acoustiques pour l'industrie 4.0. 16emes journées pédagogiques du CNFM, JPCNFM'2021, CNFM, Dec 2021, Saint-Malo, France. 6 p., J3eA Hors-série 1 - Actes JPCNFM'2021, Volume 21 (2022), 10.1051/j3ea/20221019 . hal-03464507

HAL Id: hal-03464507
https://hal.science/hal-03464507

Submitted on 4 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Mise en œuvre de capteurs RF-MEMS acoustiques pour l'industrie 4.0

Y. Dusch[a], C. Ghouila Houri[a], A. Mazzamurro[a], G. Boussatour[a], H. Dahmani[a], O. Bou Matar[a], V. Maurice[a], P. Pernod[a], A. Talbi[a]

[a]*Université Lille, CNRS, Centrale Lille, Université Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN, LIA LICS, Lille F-59000, France*

Contact email : yannick.dusch@centralelille.fr

Cette étude propose la conception complète d'un système de suivi à distance des sollicitations mécaniques dans les machines électriques afin de répondre aux problématiques de l'industrie 4.0 et de la maintenance prédictive. Elle s'appuie sur la conception, la fabrication et la caractérisation de MEMS acoustiques hautes fréquences (bande ISM à 433MHz) intégrés à un banc de test et comparés aux performances de jauges de déformation commerciales.

I. Contexte

Avec l'essor de la quatrième révolution industrielle, la demande de systèmes de détection et de surveillance facilement intégrables et capables de relever et de transmettre des informations en temps réel s'est rapidement accrue. Ces systèmes fournissent des informations qui seront utiles sur tout le cycle de vie des produits. Elles permettront en particulier d'améliorer la conception et les procédés de fabrication et serviront comme outil d'aide à la prise de décision pour le suivi des performances et pour la maintenance. Cependant, pour profiter pleinement des avantages offerts par les technologies de l'industrie 4.0, il est nécessaire d'assurer l'intégration entre les systèmes et les dispositifs. Dans ce cadre, le développement de dispositifs intelligents, comprenant capteurs, actionneurs et organes d'interrogation intégrés, devient nécessaire et peut fournir des améliorations significatives dans les processus industriels, affectant positivement toute la chaîne de valeur de développement de produits industriels (1)(2)(3)(4)(5).

La technologie de capteurs développée dans cette étude de cas exploite les ondes acoustiques de surface dans un design de type résonateur ou ligne à retard opérant dans la bande de fréquence ISM 433MHz autorisée pour la France. Cette technologie permet de concevoir des capteurs sans fil et totalement passifs, et de recueillir des informations sur de nombreuses grandeurs physiques : température, pression, champ magnétique, contraintes mécaniques (6)(7)(8)(9)(10). Nous nous sommes focalisés sur la mesure des déformations (statiques et dynamiques) qui présentent un intérêt majeur dans de nombreuses applications industrielles en particulier dans le diagnostic précoce de défauts dans les machines électriques.

Objectif et démarche de l'étude

D'un point de vue pédagogique, cette étude propose aux étudiants d'envisager l'ensemble de la chaîne de valeur, des concepts physiques fondamentaux, au traitement et à l'utilisation des données, en passant par la simulation numérique, la fabrication en environnement contrôlé (Salle blanche CNFM Lille), la caractérisation et l'intégration sur des maquettes génériques représentatives d'applications d'intérêt industriel (Plateforme

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Article publié par EDP Sciences et disponible sur le site https://www.j3ea.org ou https://doi.org/10.1051/j3ea/20221019

SENSE & ACT Centrale Lille). La figure 1 présente la démarche mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

Sur la base d'un socle commun sur les thématiques des matériaux actifs, des capteurs, de l'instrumentation, de l'ingénierie des systèmes radiofréquences pour l'IoT et des technologies de micro et nano fabrication, les étudiants sont amenés à développer sous forme de projet des produits technologiques en lien avec les problématiques industrielles actuelles.

Au-delà de la technologie à ondes acoustiques de surface étudiée dans cette étude, d'autres technologies à fort potentiel de valorisation issues de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN, UMR CNRS 8520) sont également étudiées (capteurs thermiques, cristaux photoniques, détecteurs infrarouges).

Le fil rouge de cette étude réside dans l'utilisation de dispositifs à ondes acoustiques de surface en tant que capteurs de déformations statiques et dynamiques en lieu et place de de jauges de contraintes commerciales piézorésistives.

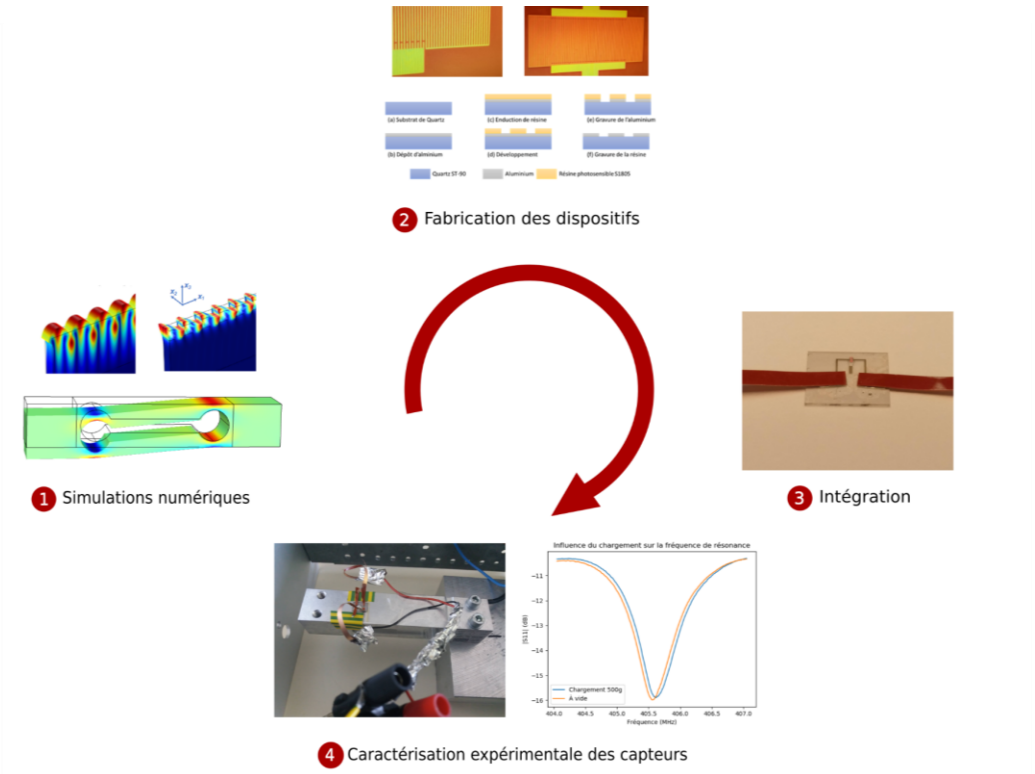

Fig. 1. Illustration de la démarche de l'étude.

II. Modélisation sur COMSOL Multiphysics

Ce cas d'étude est tout d'abord l'occasion pour les étudiants d'aborder la simulation numérique par éléments finis de systèmes multiphysiques, à la fois à travers les modules du logiciel Comsol Multiphysics (Structural Mechanics, MEMS, RF, Wave Optics, Acoustics, pour lesquels Centrale Lille dispose de nombreuses licences), mais aussi à travers l'implémentation directe de nouveaux modèles physiques sous la forme d'équations aux dérivées partielles (Module PDE).

Les étudiants ont dans un premier temps été amenés à étudier les modes acoustiques de surface d'un substrat piézoélectrique (Figure 2), déterminer leurs caractéristiques (polarisation de l'onde, courbes de dispersion, coefficient de couplage électromécanique,

matrice de diffusion...) et déterminer les modes optimaux en fonction de l'application visée. Cette étude a également permis de sensibiliser les étudiants au choix d'un matériau actif vis à vis d'un cahier des charges (coupe cristalline pour les cristaux, stabilité en température, propriétés et intégration de couches minces sur silicium...).

Le chargement d'un corps d'épreuve binoculaire, utilisé pour la caractérisation des dispositifs en tant que capteurs de déformation, a dans un second temps été simulé à l'aide du module structural mechanics de Comsol. Cette étude a permis de déterminer le positionnement des déformations maximales ainsi que la valeur de ces dernières en fonction du chargement mécanique appliqué. Ces simulations ont également permis de simuler la réponse du dispositif en amplitude et phase en fonction des déformations du corps d'épreuve, appliquées à la surface inférieure du substrat du dispositif SAW par l'intermédiaire d'une colle spécifique.

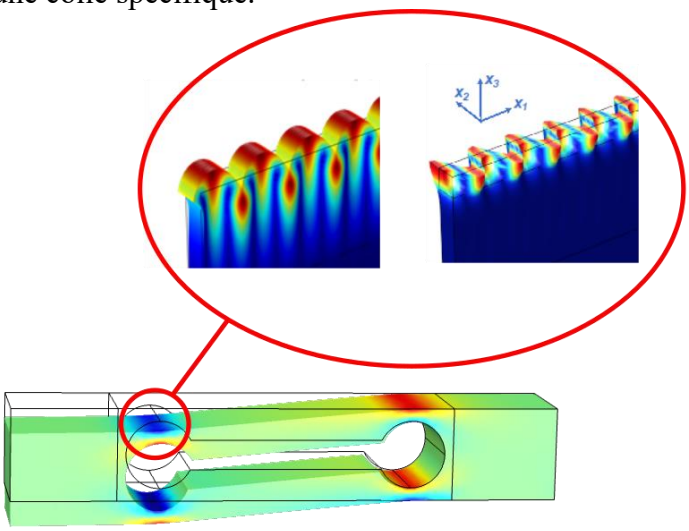

Fig. 2. Simulations multiphysiques du corps d'épreuve et des dispositifs SAW placés à la surface de ce dernier (Gauche : Onde de Rayleigh, Droite : Onde de Love).

III. Fabrication en salle blanche et caractérisations sous pointes

Les étudiants en année de spécialisation en Systèmes et Environnement Intelligents de l'Ecole Centrale de Lille, ainsi que les étudiants des Masters Télécommunications, Systèmes Communicants et E-Tech co-accrédités par Centrale Lille et l'Université de Lille, ont travaillé sur la réalisation d'une ligne à retard à ondes acoustiques de surface sur Quartz. Pour réaliser les lignes à retard, un masque de photolithographie a été fabriqué, sur lequel les motifs de la ligne à retard sont en chrome tandis que le reste du masque est transparent, permettant le passage des rayons UV de l'aligneur. Le procédé de fabrication suivant (Figure 3) a été mis en place.

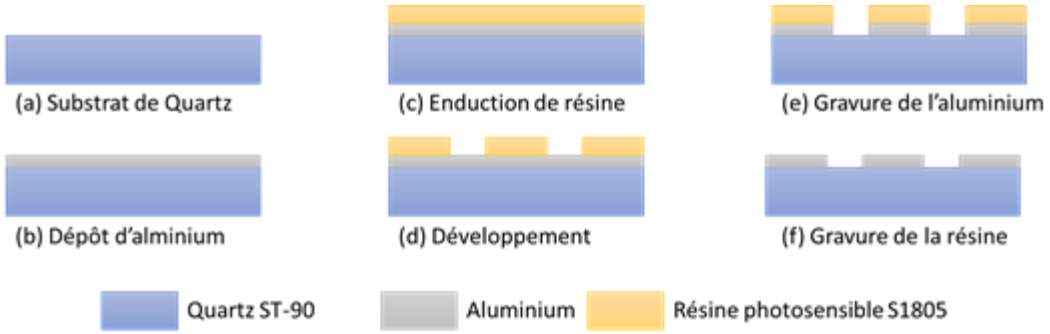

Fig. 3. Schéma du procédé de fabrication des lignes à retard.

Tout d'abord, le substrat de Quartz coupe ST-90 a été nettoyé (a) puis un dépôt d'aluminium par évaporation a été réalisé (b). Le procédé de fabrication de la ligne à retard implique donc une gravure de l'aluminium, sauf aux endroits des motifs des transducteurs interdigités. Puisque les motifs sont en chrome sur le masque de photolithographie, la résine à choisir est une résine positive. Le choix s'est porté sur la résine S1805, qui présente l'avantage de se développer rapidement dans le développeur MF-319, à base de TMAH. En effet, parmi les développeurs à base de TMAH, le MF-319 est l'un des moins concentrés. L'aluminium étant un métal sensible aux bases dont sont faits les développeurs, il est intéressant d'utiliser une résine qui se développe en environ 15 secondes dans un développeur à TMAH peu concentré.

La résine est donc déposée sur le wafer (c) puis insolée et développée (d). L'aluminium ainsi mis à découvert est alors gravé par voie chimique (e) avec un mélange de H_3PO_4, HNO_3 et H_2O. La résine est enfin enlevée par gravure dans l'acétone (f) une fois la gravure de l'aluminium achevée.

La figure 2 présente quelques réalisations des étudiants.

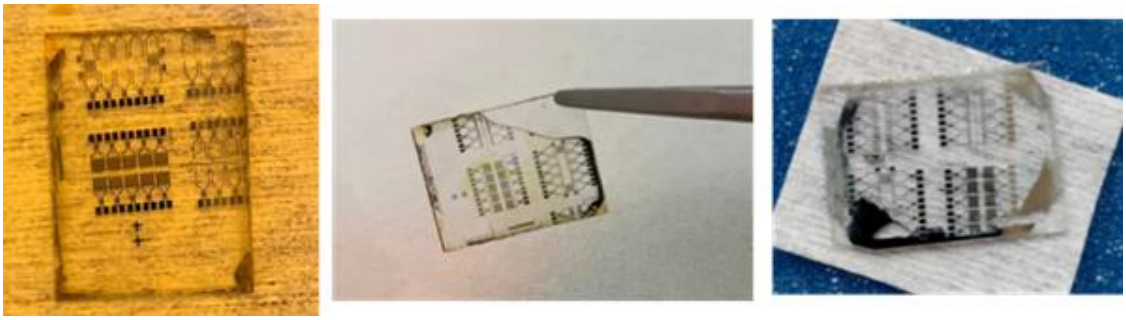

Fig.4. Photographies de quelques dispositifs réalisés par les étudiants.

Les dispositifs ont ensuite été caractérisés sous pointes (Figure 3 (a)) avec un analyseur de réseaux. La figure 3 (b) montre un zoom sur la troisième harmonique : les coefficients S12 et S21 montrent le pic de transmission correspondant.

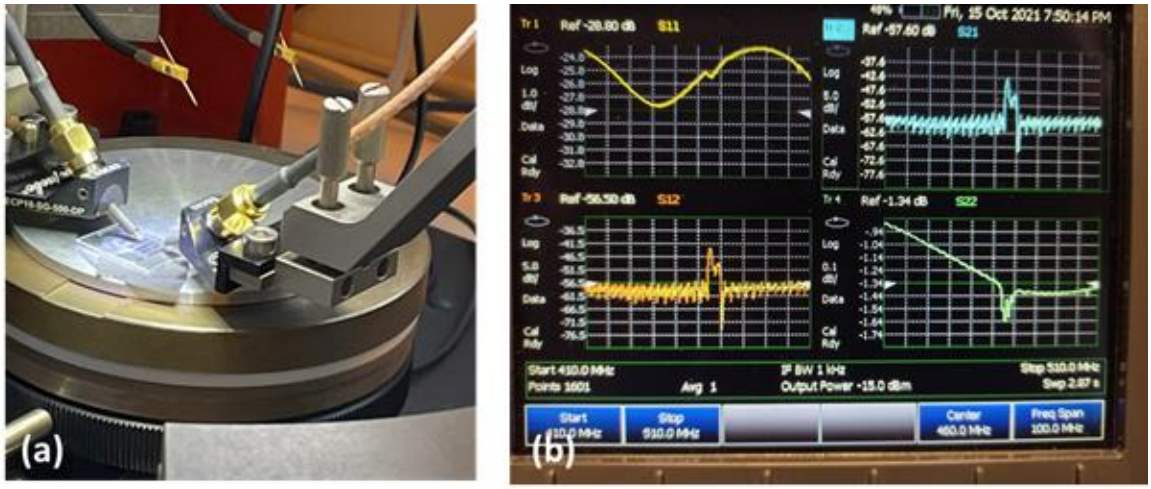

Fig. 5. (a) Montage de caractérisation sous pointes (b) Résultat de caractérisation à l'analyseur de réseaux.

Le procédé de fabrication utilisé pour les lignes à retard SAW a également été utilisé pour la réalisation des résonateurs SAW.

IV. Intégration et caractérisation pour des applications capteurs

La connectique nécessaire à la caractérisation RF des dispositifs (lignes à retard et résonateurs) a été intégrée à l'aide de procédés de fabrication électronique classiques (soudure CMS). Afin d'évaluer les performances des dispositifs en tant que capteurs de déformations, ces derniers ont ensuite été reportés sur un corps d'épreuve binoculaire commercial muni de jauges de contraintes piézorésistives. Le couplage mécanique entre le corps d'épreuve et le substrat piézoélectrique est assuré par une colle spécifique aux jauges de contraintes.

La mesure du coefficient de réflexion S11 à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel a dans un premier temps permis de mesurer la fréquence de fonctionnement au repos des dispositifs SAW (405,5MHz), puis de mesurer la variation de la fréquence, de l'amplitude ou de la phase du signal en réponse à un chargement mécanique sur le corps d'épreuve. La sensibilité maximale a ainsi pu être estimée à $1{,}2.10^{-3}$dB/g en amplitude et $1{,}2.10^{-2}$ °/g en phase. Afin d'obtenir une information plus directe sous forme de tension, un détecteur de gain/phase a également été utilisé.

V. Conclusion et perspectives

À travers l'étude complète de capteurs de déformations basés sur la technologie des ondes acoustiques de surface, les étudiants ont ainsi été amenés à envisager un processus d'innovation complet, en prenant en particulier en compte la modélisation, le dimensionnement et les contraintes technologiques de fabrication et d'intégration.

Afin d'élargir encore le spectre de cette étude, plusieurs développements sont envisagés :

- la caractérisation de la bande passante des capteurs et la comparaison aux jauges de contrainte,
- la conception et la réalisation d'antennes planaires et de l'électronique de conditionnement RF associée pour l'interrogation à distance des capteurs,

- l'intégration des capteurs dans un banc de mesure pour l'analyse des modes de vibration d'une machine électrique (Figure 6).

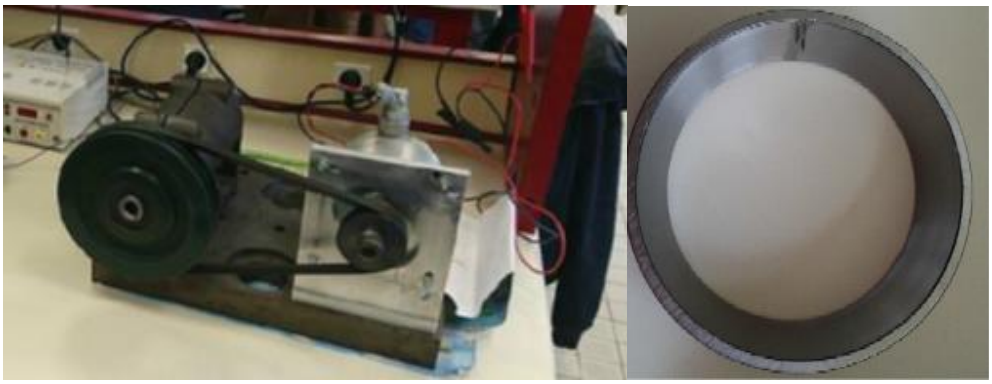

Fig. 6. Gauche : Banc de mesure de mesure pour l'analyse des modes de vibration d'une machine électrique et des défauts des roulements dans ces machines. Droite : illustration d'un roulement avec défaut.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Pôle CNFM Lille pour son aide précieuse dans la réalisation et la caractérisation des dispositifs en salle de micro- et nanofabrication.

Références

1. Siemens PLM's Vision: Realizing the Complete Digital Twin, Siemens, 2017.
2. A digital twin approach for designing cost-effective maintenance strategies, Gen. Elec, 2018.
3. F. Tao et al., Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, *Int. J. Adv. Man. Tech.*, Vol. 94, Issue 9–12, pp 3563–3576 (2018).
4. E. Glaessgen and D. Stargel, The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, 53rd Structures, Stru. Dyn., and Mat. Conf.: Special Session on the Digital Twin (2012).
5. Y. He et al., From Surveillance to Digital Twin, *IEEE SIgnal Processing Magazine* (2018).
6. A. Talbi et al, ZnO/quartz structure potentiality for SAW stress sensor, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 128 (1), pp. 78-83 (2006).
7. H. Zhou et al, Multilayer magnetostrictive structure based SAW devices, *Appl. Phys. Lett.* 104(11), 114101 (2014).
8. V. Polewczyk et al, High field unipolar and bipolar magnetic field sensors based on SAW resonators, *Physical Review Applied*, 8 (2), 024001 (2017).
9. H. Mishra et al., Intrinsic versus shape anisotropy in micro-structured magnetostrictive thin films for magnetic surface acoustic wave sensors, *Smart Materials and Structures* 28.12 (2019)
10. A. Mazzamurro et al, Giant magnetoelastic coupling in Love acoustic waveguide, *Phys. Rev. Applied* 13, 044001 (2020).