

## Thèse de doctorat ANR Omicron

### Sujet : Analyse micromécanique des matériaux par Microscopie Micro-ondes à Balayage (SMM)

#### Contexte et objectifs du travail de recherche

L'objectif du travail de recherche est de développer une méthode innovante, la Microscopie Micro-ondes à Balayage (SMM : Scanning Microwave Microscopy) permettant d'analyser l'état micromécanique, en particulier les contraintes résiduelles, dans les matériaux à très petite échelle (du nm au mm). Ce projet vient d'obtenir de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) un financement pour une durée de 4 ans avec, comme partenaires, l'Université de Bourgogne (ICB : Institut Carnot de Bourgogne), l'Université de Technologie de Troyes (LASMIS : Life Assessment of Structures, Mechanics, Materials and Integrated Systems) et les sociétés C&K components et ARDPI.

Une première étape de faisabilité montre que le signal observé en SMM est bien corrélé aux contraintes résiduelles (figure 1, à droite) mais, avant d'obtenir un statut de méthode de mesure fiable et maîtrisée, de nombreux verrous doivent être levés. On peut citer notamment l'étalonnage de la méthode, le type de composante de contrainte mesuré, la sensibilité de la méthode à d'autres phénomènes (écrouissage) ou à la microstructure du matériau. Le projet présente donc un équilibre entre différents aspects :

- Des aspects fondamentaux : il s'agit d'une méthode nouvelle mettant en jeu des couplages multiphysiques.
- Des aspects applicatifs : la méthode doit être appliquée au contrôle qualité des micro-interrupteurs élaborés par la société C&K components (figure 1, à gauche). Parallèlement les aspects instrumentaux seront développés par la société ARDPI (figure 1, au centre).
- Des aspects mécaniques au travers de la modélisation et la réalisation d'essais mécaniques permettant de mieux comprendre les possibilités de la méthode.
- Des aspects matériaux en analysant l'influence de la microstructure sur la mesure et en comparant les résultats de SMM à d'autres méthodes de caractérisation (diffraction des rayons X, nano-indentation...).

- Des aspects de traitement des données, de traitement du signal et de métrologie.

Même si tous ces points seront abordés dans la thèse, l'accent pourra être mis sur certains d'entre eux en fonction des compétences et des intérêts du doctorant.

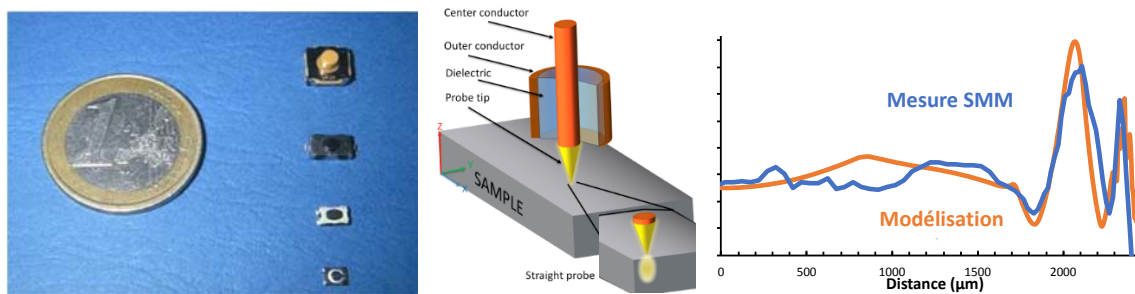


Figure 1 : micro-interrupteurs fabriqués par la société C&K Components (à gauche), schéma de principe d'une pointe SMM (au centre), corrélation entre le profil de contraintes modélisé et le signal SMM (à droite, graphe volontairement adimensionné)

Le principe de la mesure consiste à envoyer un signal micro-ondes sinusoïdal dans le matériau à l'aide d'une pointe qui joue le rôle d'une antenne émettrice. Ces ondes créent des courants induits qui vont interagir avec le matériau et réémettre de nouvelles ondes contenant des informations sur son état micromécanique. Celles-ci vont, à leur tour, être collectées par la pointe qui joue donc également le rôle d'une antenne réceptrice. La fréquence du signal permet de contrôler la profondeur explorée.

Le LASMIS possède une expertise reconnue dans le domaine des contraintes résiduelles, du développement de méthode de caractérisation et de la modélisation des procédés de fabrication.

L'ICB possède une expertise reconnue dans l'utilisation des ondes électromagnétiques pour la nano et la micro caractérisation des matériaux et le développement de micro-capteurs. C'est dans l'équipe OSNC de l'ICB que la technique SMM a été développée.

### Description prévisionnelle du travail de thèse

Le doctorant devra concevoir et mettre en œuvre des essais mécaniques, ex-situ et in-situ, en contrainte résiduelle et en contrainte appliquée, permettant d'étudier précisément l'effet des contraintes résiduelles sur le signal SMM (étalonnage de la méthode, influence de la nature tensorielle de la contrainte, effet de la plasticité, effet du signe de la contrainte, etc.). Des modélisations mécaniques par éléments finis en élasticité et en élastoplasticité seront nécessaires, suivies de la réalisation des mesures SMM. Des modélisations du couplage mécanique/électromagnétisme seront développées pour comprendre comment la contrainte est moyennée sur le volume analysé par la sonde SMM.

Les matériaux/échantillons de l'étude seront caractérisés d'un point de vue microstructural par les techniques usuelles (diffraction X, microscopie optique et électronique, microtopographie...) et d'un point de vue micromécanique par des techniques éprouvées (diffraction X, indentation instrumentée, méthodes photomécaniques...).

Le procédé d'estampage sera étudié au travers des mesures et des modélisations par éléments finis afin de comprendre les évolutions des caractéristiques mécaniques des dômes au cours du procédé de fabrication et au cours de leur mise en service.

## Organisation de la thèse

La thèse se déroulera sous la co-direction de :



*Manuel François*, professeur des universités  
+33 (0) 325 71 56 57, [manuel.francois@utt.fr](mailto:manuel.francois@utt.fr)  
Institut Charles Delaunay (ICD, CNRS-UTT) Equipe LASMIS  
Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie, 10000 Troyes



*Eric Bourillot*, maître de conférences HDR  
+33 (0) 380 39 60 21, [Eric.Bourillot@u-bourgogne.fr](mailto:Eric.Bourillot@u-bourgogne.fr)  
Institut Carnot de Bourgogne (ICB, CNRS-Univ. Bourgogne) Equipe OSNC  
Université de Bourgogne Franche Comté, 9 Av. Savary, 21000 Dijon

Le doctorant (H/F) sera inscrit à l'école doctorale de l'UTT et sera basé essentiellement à Troyes. Des séjours et des déplacements à Dijon seront à prévoir (1h45 de route). En fonction du processus de recrutement, la thèse pourrait démarrer début janvier 2020.

## Compétences du candidat

Connaissances spécifiques :

- Mécanique des matériaux et des structures
- Comportement élastoplastique, fatigue, fissuration, procédés de mise en forme des matériaux...
- Microstructure des alliages métalliques
- Méthodes expérimentales (caractérisations, mesures, analyse de données...)
- Méthodes numériques (éléments finis, différences finies...)

Formation :

- Diplôme d'Ingénieur et/ou Master mécanique, génie mécanique, matériaux

Aptitudes personnelles :

- Rigueur et curiosité scientifique
- Créativité, capacité d'innovation
- Capacité d'implication forte
- Relationnel développé
- Bon niveau d'anglais

Le sujet proposé présentant un bon équilibre entre expérimentation et simulation, le candidat devra présenter un attrait pour ces deux aspects

### Procédure pour candidater

Envoyez votre candidature par voie électronique à [manuel.francois@utt.fr](mailto:manuel.francois@utt.fr) :

- CV avec coordonnées de personnes référentes
- lettre de motivation
- relevés de notes des deux dernières années d'étude
- classement du Master ou du diplôme d'ingénieur
- éventuellement, lettres de recommandation

### Quelques références bibliographiques :

- G. Binnig et al. Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- G. Meyer et al, Appl. Phys. Lett. 57, 2089 (1990). <https://doi.org/10.1063/1.103950>
- L. W. Kessler, in ASM Handbook Vol. 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control (1989).
- G. Mills et al, Ultramicroscopy 80, 7 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(99\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(99)00047-9)
- T.M. Lavelle, Microwaves in non-destructive testing, Materials Evaluation, 25, 254-258, (1967).
- K. Lai et al, Review of Scientific Instruments, 79, (2009). <https://doi.org/10.1063/1.2949109>
- V. Castel et al, J. Appl. Phys., 106, 064312, (2009). <https://doi.org/10.1063/1.3225567>
- R. F. Soohoo, J. Appl. Phys., 33, 1276-1277, (1962). DOI: 10.1063/1.1728690
- Ash et al., Nature, vol. 237, pp 510-512, 1972. DOI: 10.1038/237510a0
- C.Plassard, et al., Phys.Rev.B, 83, 121409-1-4, (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.121409
- J.Rossignol et al., Sensors and Actuators, 186, 219 (2012). [doi.org/10.1016/j.sna.2012.06.027](https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.06.027)
- V.Optasanu et al., Nanoscale, 6, 14932-14938, (2014). IF 6.73 DOI: 10.1039/c4nr04017a
- E.Bourillot et al, Characterization of Minerals, (2015). DOI: 10.1002/9781119093404.ch8
- V. Optasanu et al, Oxydation of Metals, 1-12, (2016). DOI : 10.1007/s11085-016-9678-0
- M.Morozov et al., (2013). <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2013.785544>
- M.C.Shapiro et al., Phys.RevB 92, 235147, (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.235147>