



## SUJET DE THESE

### **Analyse sans contact de contraintes résiduelles de surface et de microstructure par ultrasons laser**

Type de thèse : Contrat CIFRE avec :

- L'entreprise : CETIM (Centre Technique des industries Mécaniques).
- Laboratoire d'accueil : SATIE – UMR 8029, Cergy-Paris Université (CYU).

Ecole doctorale d'inscription : Sciences et Ingénierie (ED SI – n°417) - CYU

Lieux : Senlis (60) et Cergy (95)

Début de thèse : 1<sup>er</sup> octobre 2021

*Candidature souhaitée avant le 18 juin 2021.*

#### **1. Contexte & problématique**

L'analyse des contraintes résiduelles de surface et de la microstructure sont des sujets mécaniques de grande importance. Aujourd'hui, les méthodes d'analyse sont semi-destructives (analyse micrographique, extensométrie), ou d'application limitée quand le nombre de points à ausculter est grand (diffraction des rayons X). Les méthodes non destructives actuelles sont quant à elles souvent réservées aux géométries simples [1], et nécessitent le contact avec la pièce, ce qui limite leur champ d'application.

Les travaux effectués au CETIM [2-4] ont permis de montrer la faisabilité de l'analyse de contrainte sur surface plane, par mesure du temps de vol ultrasonore, avec une excitation des ondes par capteurs piézoélectriques en contact ou en mode de couplage par immersion locale. L'exploitation des ondes de tête (ondes de compression, ondes subsurfaciques longitudinales - LCR) créées par réfraction eau-acier, aux fréquences ultrasonores 1, 2,3, 5 et 10 MHz, a mis en lumière la présence d'échos parasites vraisemblablement créés à l'interface capteur/surface, pouvant compliquer l'identification des échos significatifs (LCR).

Si des développements de laboratoires et des commercialisations d'équipements basés sur l'exploitation des ondes ultrasonores LCR ont été faites, elles sont encore limitées par la taille de l'équipement et l'applicabilité sur surfaces planes uniquement (Veqter, Ultramars, UltraRS).

Les limitations technologiques identifiées de cette technique ultrasonore résident principalement dans l'influence importante de la qualité du couplage ultrasonore et de la forme de la surface. Par ailleurs, il existe une difficulté de réduire la taille des capteurs pour mesurer sur des congés de rayon 2 à 10mm, mais aussi la faible sensibilité de la vitesse ultrasonore aux contraintes rendant difficile la séparation de l'effet de la contrainte de celle la microstructure.

Dans un objectif de diagnostic à distance, l'utilisation de lasers pour réaliser ce type de mesures aurait l'avantage de pouvoir contrôler les pièces à longue portée, d'être applicable sur des rayons de courbure faibles, et d'améliorer la résolution spatiale. Une potentialité non encore exploitée de la mesure ultrasonore réside également dans l'influence de la fréquence sur la pénétration de l'onde. Une exploitation temps-fréquence pourrait potentiellement donner des informations sur le gradient de contraintes résiduelles. Les travaux récents du pôle SIAME (Systèmes d'Information et d'Analyse Multi-Environnement) de SATIE, que ce soit sur l'instrumentation multimodale pour le CND ou sur les analyses de signaux [5-6], ont permis de mettre en lumière comment la vibrométrie au sens large, et la vibrométrie laser 3D en particulier, permet de cartographier les champs vibrationnels tri-dimensionnels à la surface des matériaux. L'analyse de ces champs de déplacements 3D permet de remonter aux informations de contraintes, et autorise le suivi de la propagation des ondes acoustiques dans la structure et ainsi d'extraire les grandeurs physiques caractéristiques des propriétés du matériau, dans un objectif d'aide à la décision envers les acteurs des domaines d'applications [7-9].



## 2. Travaux à réaliser

Ce travail de thèse s'intéressera au développement d'une méthode de contrôle non destructive (CND) de microstructure /contraintes de surface avec une mise en œuvre sans contact et rapide, de type opto-acoustique (émission et réception laser, avec ou sans fibre optique). L'objectif à terme est de permettre l'auscultation des surfaces complexes, telles que les congés de raccordement, les dentures d'engrenage, peu aisés à analyser actuellement, avec une distance d'intégration la plus courte possible par rapport aux 15 mm actuels.

En complément de l'instrumentation à mettre en place et afin de proposer d'autres voies de diagnostic que le suivi des vitesses de propagation des ondes ultrasonores, ce travail s'intéressera aussi au développement de traitements de signaux dédiés à l'extraction de paramètres pertinents à partir des signatures acoustiques des objets analysés, en particulier l'analyse temps-fréquence pour l'accès au gradient pour la réalisation de cartographies de contraintes sur des surfaces importantes et dans des zones d'accessibilité restreinte (congés).

Une première étape de la thèse sera consacrée à une étude bibliographique sur le sujet, ainsi que l'analyse des brevets existants et de l'offre commerciale actuelle de mesure ultrasonore de contrainte. Un effort sera porté sur l'étude des moyens actuels de laser US pour la génération et la détection des ondes ultrasons sans contact.

Dans une autre étape, des études théorique, expérimentale ainsi qu'une modélisation associée, seront effectuées pour discerner le mode de propagation sensible aux phénomènes visés, des solutions d'analyse de mesure et de leurs caractéristiques (profondeur inspectée, non destructivité pour les lasers...).

Ces travaux seront appliqués à des cas concrets : analyse de contraintes sur soudure par onde LCR réfractées à la surface, analyse de taille de grain, analyse de la profondeur de traitements superficiels et du profil de contrainte près de la surface par ondes de Rayleigh.

Enfin, on visera la réalisation d'un démonstrateur permettant de mettre en évidence les avantages de la nouvelle méthodologie, en vue du déploiement industriel ultérieur de cette méthodologie.

## 3. Contacts :

- Directeurs de thèse :  
Stéphane SERFATY, Professeur des Universités - SATIE, [stephane.serfaty@cyu.fr](mailto:stephane.serfaty@cyu.fr)  
Nicolas WILKIE-CHANCELLIER, Professeur des Universités - SATIE, [nicolas.wilkie-chancellor@cyu.fr](mailto:nicolas.wilkie-chancellor@cyu.fr)
- Encadrants :  
Fan ZHANG, Ingénieur Expert référent CND - CETIM, [fan.zhang@cetim.fr](mailto:fan.zhang@cetim.fr)  
Henri WALASZEK, Expert Senior CND - CETIM, [henri.walaszek@cetim.fr](mailto:henri.walaszek@cetim.fr)  
Salah-Eddine HEBAZ, Maître de Conférences - SATIE, [salah-eddine.hebaz@cyu.fr](mailto:salah-eddine.hebaz@cyu.fr)

#### 4. Références :

- [1] T. Monnier, S. E. Hebaz, "Guided wave topological energy method for quantitative evaluation of corrosion in metal plates and tubes", the 9th Forum Acusticum, (Lyon, France), 7-11 Décembre 2020.
- [2] Saidoun, F. Zhang, S.E Hebaz, T. Monnier, C. Comas, A. Romaine, Q.A.Vu, E. Usmial, N. Godin, M. Fregonese, "Development of an innovative corrosion monitoring methodology for the French radioactive waste disposal application", 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Porto · Portugal, 30 Juin - 2 Juillet 2021.
- [3] H.Walaszek ; J.Hoblos et Al, "Ultrasonic Stress Measurement in Welded Component by Using Lcr Waves: Analysis of the Microstructure Effect", ASME PVP journal 2004
- [4] Qoam, Bourse, Walaszek et Al, "Influence des paramètres de mesure sur la détermination ultrasonore des contraintes: application au cas des assemblages soudés"; Conférences Cofrend 2008.
- [5] Loïc Martinez, Nicolas Wilkie-Chancellier, Christ Glorieux, Bart Sarens, Emmanuel Caplain, « Transient space-time waves characterization using 3D Gabor analysis », Journal of Physics : Conference Series, 2009, Vol. 195, pp.1-8.
- [6] Arciniegas, L. Martinez, A. Briand, S. Prieto, S. Serfaty, N. Wilkie-Chancellier, « Experimental ultrasonic characterization of polyester-based materials for cultural heritage applications », Ultrasonics, 2017, Vol. 81, pp. 127-134.
- [7] N. Wilkie-Chancellier, Y. Wang, L. Martinez, B. Roucaries, S. Serfaty, « Laser experimental study of the surface vibrations of EMUS sensor », Physics. Proc. 70 (2015), 961-964.
- [8] Angermuller, A. Arciniegas, L. Martinez, S. Serfaty, J.-Y. Le Huérou, N. Wilkie-Chancellier, « Ultrasonic investigation of bones with different post-mortem intervals », International Congress on Ultrasonics, Bruges, Belgium, 2019, 3-6 september.
- [9] Angermuller, A. Arciniegas, L. Martinez, N. Wilkie-Chancellier, « Experimental analysis of transient US waves inside plates from 3D vibration measurements along the surface : comparison between bone plate and aluminum plate », Forum Acusticum, Lyon, France, 2020, December 7-11.