

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Analyse expérimentale et numérique de la fiabilité des systèmes SHM par ondes guidées pour la revalidation des lanceurs spatiaux

Référence : **MAS-DMAS-2024-17**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : octobre 2024

Date limite de candidature : 31/05/2024

Mots clés

SHM (Structural Health Monitoring), RLV (*Reutilisable Launcher Vehicles*), capteurs, ondes guidées, matériaux composites, *transfer learning*

Profil et compétences recherchées

Ingénieur en 3^e année de Grande Ecole et/ou titulaire d'un Master 2 Recherche

Physique des ondes, traitement du signal, capteurs, mathématiques appliquées,

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

La réutilisation des lanceurs est devenue aujourd'hui une exigence majeure pour réduire les coûts d'accès à l'espace et de renforcer la compétitivité de l'Europe face aux différents acteurs, tant dans le secteur public (NASA, ISRO, CNSA, Roscosmos, JAXA) que dans le privé (SpaceX, Blue Origin). Pour répondre à ce besoin, le CNES et l'ONERA envisagent d'instrumenter les lanceurs avec des systèmes de contrôle de santé structurale (SHM - *Structural Health Monitoring*) dans le but d'optimiser les opérations de maintenance des lanceurs, et autoriser/sanctionner leur redécollage entre deux missions. Des réseaux de capteurs de type piézoélectrique (PWAS, *Piezoelectric Wafer Active Sensor*) et fibres à réseaux de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*), intégrés aux structures, seront utilisés au sol en tant que moyen de contrôle non-destructif (mode actif utilisant les ondes guidées), et pendant la mission, en mode passif, pour détecter des événements acoustiques signalant l'apparition possible d'endommagements. Cette démarche de contrôle permet l'accès à des zones pour lesquelles un contrôle non-destructif conventionnel s'avérerait économiquement prohibitif, et de recueillir des enregistrements en temps réel pour enrichir la connaissance des environnements auxquels les lanceurs sont exposés et améliorer le diagnostic lors des phases de revalidation du lanceur.

L'un des défis principaux du SHM consiste à garantir la fiabilité des capteurs embarqués, qui doivent maintenir leurs performances malgré les fortes contraintes thermomécaniques et vibratoires rencontrées par les lanceurs lors des missions spatiales. Ces contraintes varient en fonction des zones surveillées, pouvant atteindre des températures cryogéniques ($\approx -250^{\circ}\text{C}$) ou élevées ($> 300^{\circ}\text{C}$), auxquelles peuvent s'ajouter des fortes amplitudes vibratoires à basse fréquence. Que ce soit au sol en mode actif lors de la phase de revalidation ou en mode passif pendant le vol, les capteurs embarqués doivent remplir leur fonction primaire tout au long de la vie opérationnelle du lanceur (vols de courte durée, périodes d'inactivité de quelques semaines à quelques mois et un nombre de réutilisations pouvant aller jusqu'à dix).

L'objectif principal de cette thèse est de développer des approches expérimentales et numériques pour évaluer la capacité d'un réseau de capteurs SHM par ondes guidées, à détecter et localiser des dommages après avoir été soumis à des sollicitations thermomécaniques et vibratoires complexes. Cela implique l'évaluation des dysfonctionnements résultant de la dégradation des capteurs SHM en termes de perte d'informations, de génération de fausses alarmes et de diminution des performances de détection et de localisation des dommages (augmentation de la taille minimale des dommages détectables, localisations moins précises).

Cette thèse consistera de deux axes de travail : expérimental et numérique. Dans un premier temps, des réseaux de capteurs SHM seront évalués en tant que moyens de contrôle santé intégré par génération d'ondes guidées. Des expériences seront menées pour localiser des dommages de différents types

(délaminages ou fissures) induits sur des structures simples (métalliques ou en composite), et pour évaluer les nuisances que la dégradation des capteurs peut entraîner sur la localisation des défauts. Différents algorithmes de localisation existants ou à développer pendant la thèse seront testés à cet effet. Ces travaux s'appuieront sur les nombreux moyens disponibles à l'ONERA, d'une part pour la génération accélérée des dégradations (enceintes climatiques, Lasers de chauffe, dispositifs vibratoires, machine d'impact) et d'autre part pour le diagnostic des capteurs (vibrométrie Laser, impédancemètre électrique, interrogateurs FBG). A l'issue de ces essais, une compréhension des mécanismes de défaillance et des dérives des capteurs sous les environnements auxquels ils seront exposés sera acquise. Ces résultats contribueront à la définition de modèles numériques représentatives des systèmes SHM considérés dans des conditions saines et vieilles. Des modélisations numériques seront mises en œuvre sur les logiciels COMSOL et CIVA pour simuler la propagation des ondes guidées générées par les capteurs PWAS et évaluer les nuisances que la dégradation des capteurs (PWAS et FBG) peut entraîner sur la localisation des dommages.

Le deuxième axe de travail sera consacré à l'évaluation des performances des systèmes SHM en considérant des métriques adéquates, telles que les probabilités de détection et de localisation, et les erreurs de localisation. Pour ce faire, une approche numérique MAPOD (*Model Assisted Probability of Detection*), communément utilisée dans le domaine du contrôle non-destructif, permettra de développer un modèle de substitution qui facilitera l'évaluation de différents scénarios d'endommagement (type de dommage, position, étendue) tout en prenant en compte les diverses sources de variabilité inhérentes aux propriétés des capteurs, de la structure ou de l'environnement. Étant donné l'impossibilité de tester expérimentalement l'ensemble de ces variabilités, une approche par transfert d'apprentissage (*transfer learning*), offrant la possibilité d'utiliser les connaissances acquises sur une base de données riche (simulation) pour les transférer vers une base plus pauvre en données (expérimentale), sera en outre mise en place pour adapter les résultats issus de la modélisation MAPOD à un cas d'utilisation spécifique défini en collaboration avec le CNES.

Références :

- L. Mastromatteo, L. Gavérina, F. Lavelle, JM. Roche, FX. Irisarri, "Thermal Cycling Durability of Bonded PZT Transducers Used for the SHM of Reusable Launch Vehicles", European Workshop on Structural Health Monitoring 2022 - Volume 2, 254, Springer International Publishing, pp.727-736, 2023.
- H. Postorino, E. Monteiro, M. Rébillat & N. Mechbal, "Cross-structures Deep Transfer Learning through Kantorovich potentials for Lamb Waves based Structural Health Monitoring", Journal of Structural Dynamics, 2, pp. 24-50, 2023.
- C. Fendzi, N. Mechbal, M. Rebillat, and M. Guskov, "A General Bayesian Framework for Ellipse-based and Hyperbola-based Damage Localisation in Anisotropic Composite Plates," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 27 (3), pp. 350-374, 2016

Collaborations envisagées

CNES (thèse cofinancée)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contacts : Jesus Eiras, Ludovic Gaverina

Tél. : 01 46 73 45 06 Email : jesus.eiras_fernandez@onera.fr

Tél. : 01 46 73 45 43 Email : ludovic.gaverina@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Nazih MECHBAL

Laboratoire : ENSAM

Tél. : 01 44 24 64 58

Email : nazih.mechbal@ensam.eu

Co-Directeur de thèse

Nom : François-Xavier IRISARRI

Laboratoire : ONERA

Tél. : 01 46 73 45 20

Email : francois-xavier.irisarri@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>