

SHM à l'Institut de Soudure: développements et applications récents et perspectives

Slah Yaacoubi

s.yaacoubi@isgroupe.com

Responsable équipe R&D en Monitoring & Intelligence Artificielle

Institut de Soudure
Espace Cormontaigne
4, bd Henri Becquerel
57970 Yutz
France

Cet article concerne le contrôle santé intégré des structures. Il décrit brièvement les principaux développements récents effectués au sein de l'Institut de Soudure dans ce domaine. Ces développements sont de nature matérielle aussi bien que logicielle.

1 Introduction

La surveillance de l'intégrité d'une structure vise à contrôler périodiquement (voire en temps réel) l'état de santé d'une structure afin de détecter les défauts (ou mode de défaillance) les plus petits possibles et le plus tôt possible [1]. Ceci offre donc la possibilité à l'exploitant de la structure en question de décider à temps. Cette discipline peut être trouvée dans certaines références françaises sous la dénomination « Contrôle santé intégrée ». Elle est bien connue par son appellation anglaise « Structural Health Monitoring » et son acronyme SHM. Elle peut être définie comme une évolution du contrôle non destructif. Pour assurer le rôle attendu du SHM, la structure à monitorer doit être équipée, le temps qu'il faut, par une chaîne de mesure. Pour des raisons de gestion de coût, seuls les capteurs (traducteurs) doivent vivre en permanence avec la structure. On peut parler ainsi de contrôle embarqué. L'interrogation des capteurs est périodique et la chaîne de mesure (à l'exception des capteurs) est amovible. La période peut être fixe ou variable et dépend fortement de plusieurs paramètres tels que les contraintes thermomécaniques que la structure peut subir.

Différentes techniques peuvent être utilisées en SHM telles que la mesure d'épaisseur (notamment par le biais de l'ultrason conventionnel), les ondes ultrasonores guidées, la tomographie ultrasonore, l'émission acoustique, l'impédance électromécanique, les jauges de déformation et de contraintes, l'analyse vibratoire, la fil-fissure (connue par son appellation anglaise crack-wire), la fibre optique, les micro-ondes, la technique de différentiel de pression (Comparative Vacuum Monitoring en anglais). L'Institut de Soudure (IS) a notamment développé celles se basant sur les ultrasons et l'émission acoustique [2, 6].

Les avantages du monitoring sont multiples dont les principaux peuvent être déclinés comme suit :

- Améliorer la sensibilité de détection à travers l'analyse relative de données
- Faciliter/assurer la surveillance des zones inaccessibles: certaines structures ne sont accessibles que dans la phase d'installation du site,
- Éviter le montage/ démontage des traducteurs (voire toute la chaîne de mesure), ce qui permet :
 - o la réduction du nombre d'arrêts du site
 - o l'augmentation de la fréquence de prise de mesures (autant qu'il faut)
 - o la réduction du coût de contrôle,

Les exemples d'applications sont nombreux. Le monitoring des tuyauteries dans une raffinerie en est un : il y a besoin d'échafaudages une seule fois et ce, pour pouvoir placer les traducteurs.

- Meilleure assurance de la santé des structures que le contrôle :
 - o la période de contrôle et donc, de l'intervention si besoin est plus courte, et
 - o facilement modifiable (vis-à-vis de l'évolution d'un éventuel défaut, qui est généralement non prédictible), évitant les ruptures.

Dans ce cas, le pronostic est plus aisé à établir.

Il y a toutefois des verrous notamment technologiques à lever, à l'instar de :

- Coût (traducteur + installation) relativement élevé, selon l'état de l'art actuel. Il est cependant à noter que cela est fort tributaire de l'application (types de la structure à monitorer, accès, ...)
- Impact des agents extérieurs à la chaîne de mesure et du spécimen sous surveillance:
 - o conditions environnementales
 - o conditions opérationnelles
- Durabilité de la chaîne de mesure, notamment les traducteurs
- Étalonnage des traducteurs
- Autonomie en énergie
- Redondance
- Dimensions des traducteurs (pour certaines structures)
-

Cette conférence se propose de décrire succinctement quelques développements mis au point récemment à l'IS en termes de capteurs de monitoring, de design électronique d'unités de génération et réception des ondes ultrasonores, de traitement de signal et d'images et techniques statistiques pour la gestion des fausses alarmes. Une idée sur le TRL (Technology Readiness level) de chacun de ces produits sera présentée. La méthodologie adoptée, pour aboutir à de tels développements, marie la recherche académique à l'ingénierie, et varie en fonction de chaque type de structures à monitorer.

2 Brève description de l'Institut de Soudure

L'Institut de Soudure est une association loi 1901. Elle a pour objet l'étude, l'amélioration et le développement du soudage et des techniques connexes, pour ses membres et pour les industries mécaniques et transformatrices de métaux en tant que Centre technique industriel (CTI) français du soudage et des contrôles associés. L'association mène pour cela des activités de recherche, de support, de développement industriel et d'enseignement.

Le monitoring de structures est devenu depuis environ une dizaine d'années l'un des principaux axes de R&D de l'IS. Son implication dans plusieurs projets collaboratifs et sa proximité du milieu industriel ont amené à la mise au point de produits d'un TRL avancé et à la proposition de solutions originales.

3 Historique du monitoring au sein de l'Institut de Soudure

L'Institut de Soudure possède une dizaine d'années d'expérience en monitoring de structures, exploitées dans différents domaines tels que l'énergie et la pétrochimie. Différents projets collaboratifs et études industrielles sur lesquels a opéré l'Institut de Soudure ces dernières années. On site dans l'ordre chronologique :

- MOSCO: Système de MONitoring de Structures Offshores vis-à-vis de leur endommagement par la CORrosion (2007- 2010),
- H2E : Horizon Hydrogène Energie (mi 2008 - mi 2016) visant entre autres le monitoring des réservoirs composites [7],
- MoniOG: MONItoring Ondes Guidées (2010 - 2012) concernant le monitoring des pipelines,
- SWIS I et II: Smart Weld Institut de Soudure (2010 - 2011) et (2014 - 2016) dont l'objectif est le développement d'un capteur exploitant la soudure ou un dépôt,
- CRM: Composite Repairation Monitoring (2014 - 2015) se focalisant sur le monitoring des réparations composites de pipelines,
- SAFE-WIND: Structural Health Monitoring self-Powered of Wind turbine (2015 – 2016),

Ces programmes sont parmi ceux sur lesquels l'IS a mené et/ou mène des recherches et développement. Une quinzaine d'enveloppes Soleau dans ce domaine (à l'instar de réf. 479344, réf. 479336, réf. 479337, réf. 479345, réf. 479320, etc.) et six brevets ont été déposés ou validés pour certains ou sont en cours de dépôt, pour les autres.

De point de vue institutionnel, l'IS travaille à vulgariser le monitoring et ce, à travers des développements tangibles et à le rapprocher du large public. Dans ce contexte, une quinzaine de stagiaires (stages de master II, projet de fin d'études d'écoles d'ingénieurs, ou encore Licence et DUT) et deux doctorants (jusqu'à présent), effectuant leur travaux sur différentes tâches parmi celles qui ont été menées dans le cadre de ces programmes ont acquis au moins les notions de base du monitoring de structures.

4 Exemples de développement

4.1 Développements matériels

Le développement matériel dans le monitoring de structures peut être effectué au niveau de tous les composants de la chaîne de mesure (couplant, traducteur, connectique, amplificateur, système de génération de signaux et d'acquisition de données, mode d'alimentation, transmission de données, etc.). L'IS a travaillé entre autres sur la mise au point de nouveaux capteurs [3], sur l'élaboration d'un système de génération/ réception d'ondes guidées (en collaboration avec des partenaires européens), sur le développement de structures intelligentes à travers une intégration appropriée de capteurs développés sur mesure [8,9]. La figure suivante montre un exemple de développement.



Figure 1 : Exemple de développement de structures intelligentes (en l'occurrence, bouteille composite dédiée à contenir de l'hydrogène sous haute pression).

4.2 Développements logiciels

Le succès du monitoring de structures est fortement tributaires de la mise au point de logiciels fiables. Les informations collectées le long de la durée du monitoring (*i. e.* en réalité des dizaines années !) risquent, pour de multiples raisons, d'être bruitées, de contenir des gammes de fréquences inutiles ou nuisant à la détection des défauts éventuels, etc. Des outils remédiant à ces problèmes doivent être développés. D'autres outils offrant la possibilité d'améliorer la détectabilité des défauts, à coût bien optimisé, est nécessaire. De surcroît, la masse de données collectées, en fonction de la taille de la structure à monitorer et la fréquence de monitoring, est susceptible d'augmenter considérablement dans le temps. Ceci constitue un sujet de haute importance et dont doivent être conscients les développeurs de solutions de SHM. L'IS a travaillé sur des sujets en ce sens, comme [10,22] :

- traitement des données (signal, image, ...)
- gestion des fausses alarmes
- fusion de données et fouille de données
- gestion des données volumineuses

La figure suivante en est une illustration. Cet exemple argumente le réel besoin du développement algorithmique.

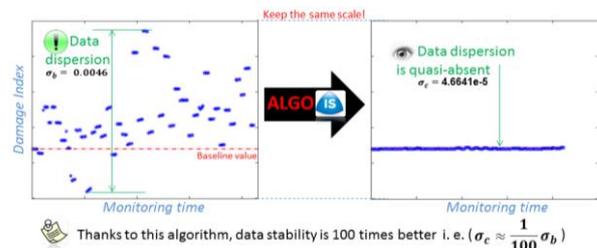


Figure 2 : Résultat d'un algorithme développé pour améliorer la stabilité des données collectées durant le monitoring (des mois en l'occurrence), se caractérisant par une large dispersion. Cet exemple montre que la dispersion a été réduite d'un facteur 100.

4.3 Modèles théoriques

La modélisation (formulation théorique, calcul semi-analytique et simulation numérique) aide entre autres à :

- comprendre les phénomènes physiques en vue d'améliorer l'interprétation/analyse des solutions obtenues et rendre par conséquent le monitoring plus fiable,
- simuler plusieurs scénarios et donc, effectuer des études paramétriques sans besoin de maquettes. Ceci permet par conséquent de proposer une solution de monitoring la plus efficace possible, à des coûts les plus bas possibles.

La Figure 3 montre un exemple de développement effectué dans le cadre du projet H2E, portant en partie sur le monitoring des bouteilles composites. L'objectif de la simulation numérique en question est d'optimiser certaines caractéristiques du traducteur émetteur, à savoir sa forme, sa taille et son emplacement.

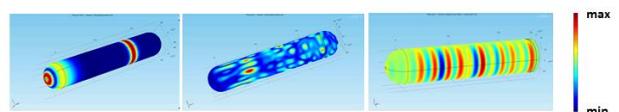


Figure 3 : Exemple de résultats de modèles mis au point pour étudier le comportement des ondes propagées dans une bouteille et optimiser le traducteur émetteur (forme, taille et emplacement).

5 Un pas vers le déploiement...

La majorité des travaux sont effectués sur des structures de grandes échelles (échelle 1/1). La Figure 4 montre un exemple d'installation de capteurs dans une chaufferie afin de monitorer certains tubes. Bien que les capteurs soient à l'abri de l'exposition à l'environnement extérieur (pluie, neige, humidité, risque de chutes d'objets, etc.), ce type d'installation est choisi parce que la température de l'eau (fluide acheminé) évolue tout au long de l'année. Le débit de l'eau est susceptible également de varier.



Figure 4 : Capteurs de monitoring de structures tubulaires via la technique des ondes ultrasonores guidées installés en l'occurrence dans une chaufferie, dans les locaux de l'Institut de Soudure de Yutz (57).

L'exemple suivant montre, quant à lui, un résultat de détection de l'apparition d'un défaut et le suivi de l'augmentation de sa taille. Ce défaut simule une corrosion interne dans un tube. Le monitoring a été assuré dans ce cas par le biais des ondes ultrasonores guidées. Il est à noter que ce défaut a été créé dans une zone tellement atténuante qu'il ne peut être détecté en contrôle usuel (analyse absolue des données acquises). Cet exemple démontre l'intérêt du monitoring en termes de sensibilité de détection de défauts.

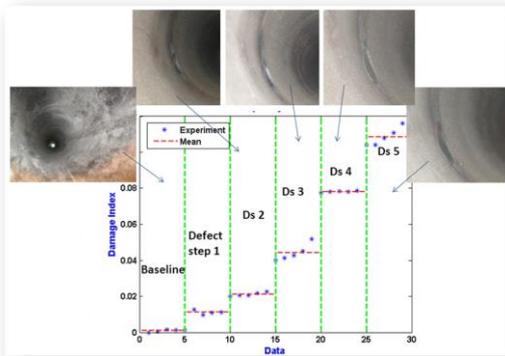


Figure 5 : Détection et suivi, en mode de monitoring, d'un défaut simulé une corrosion interne (sa taille a été augmentée en 5 étapes imitant une évolution dans le long terme)

6 Stratégie de l'Institut de Soudure

La stratégie de l'Institut de Soudure concernant le Monitoring de structures peut se résumer comme suit :

- R&D et innovation,
 - o développement de capteurs innovants et
 - o création de logiciels, à coût optimisé
- Installation de systèmes de monitoring sur site

- Suivi :
 - o Collecte de données,
 - o Gestion d'alarmes et
 - o Intervention si besoin (au cas par cas)

7 Conclusion et perspectives

Le domaine du monitoring de structures peut être considéré encore comme émergent. Bien que les travaux académiques (théoriques et expérimentaux à l'échelle de laboratoire) soient nombreux, ceux élaborés à plus grande échelle et concernant le déploiement restent limités. Le nombre d'établissements proposant des solutions industrielles dans le monde reste encore disproportionné par rapport au nombre d'installations nécessitant ledit monitoring. L'IS en fait partie : Il vise à mettre au point des solutions opérationnelles *in-situ* tout en maintenant un trait d'union solide avec la R&D. Cet article a montré certains récents développements. La prochaine étape, qui est une suite naturelle au développement actuel, est le déploiement tout en continuant à chercher à proposer des solutions à d'autres problèmes (non décrits dans le présent article).

Remerciements

L'auteur remercie tous les collègues, les stagiaires et doctorants qui ont contribué à la réalisation de ces développements. Les remerciements vont également aux partenaires industriels et académiques et aux établissements (publics et privés) qui ont permis, à travers leurs supports financiers et leurs confiances renouvelées, à ces développements d'avoir vu le jour.

Références

- [1] S. Yaacoubi et D. Chauveau, Concernant le monitoring de l'intégrité des structures tubulaires par ondes guidées: partie 1 – Généralités sur le SHM, *Contrôles Essais Mesures* 53, 85-90 (2015).
- [2] S. Yaacoubi, W. K. Yaacoubi, P. Dainelli et D. Chauveau, Les ondes ultrasonores guidées pour le contrôle non destructif des structures métalliques, *Traitements & Matériaux*, 417, Août – septembre 2012, pp 31-38
- [3] F. Dahmene, S. Yaacoubi, and M. El Mountassir, On the modal acoustic emission testing of composite structures, *Composite Structures* 140, 446–452 2016
- [4] F. Dahmene, S. Yaacoubi, M. El mountassir, C. Langlois, and O. Bardoux, Towards efficient acoustic emission testing of COPV, without Felicity ratio criterion, during hydrogen-filling, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 2, 1359–1368 (2016)
- [5] F. Dahmene, S. Yaacoubi, and M. El Mountassir, Felicity effect and ratio in multilayer composite overwrapped pressure vessel, *18th International congress of composites structures*, Lisbon, Portugal, June 15 – 18, (2015).
- [6] F. Dahmene, S. Yaacoubi, and M. El Mountassir, On the modal acoustic emission testing of composite structure, *18th International congress of composites structures*, Lisbon, Portugal, June 15 – 18, (2015).

- [7] <http://www.horizonhydrogeneenergie.com/>
- [8] S. Yaacoubi, D. Chauveau, M. El Mountassir et F. Dahmene, Concernant le monitoring de l'intégrité des structures tubulaires par ondes guidées: partie 2 – exemples de développements au sein d'IS Groupe, *Contrôles Essais Mesures* 54, 74-78 (2016).
- [9] S. Yaacoubi, D. Chauveau, F. Dahmene, and M. El Mountassir, On the way to use welds for monitoring of structures integrity, *IIW International Conference Structural Health Monitoring*, Helsinki, Finland, 1-3 July (2015).
- [10] C. Levacher, S. Yaacoubi, W. K. Yaacoubi et D. Wolf, Algorithme automatisé pour la détection et la localisation d'échos de défauts dans des acquisitions ultrasonores, *Journées membres industriels, Université de Nancy II*, septembre 2012.
- [11] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, Apport de l'analyse temps-fréquence dans le contrôle par la technique des ondes guidées– partie 3 : De la réallocation, *Soudage et technique Connexes*, Janvier – Février, V 69, N°1/2, (2015).
- [12] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, Investigation on the use of artificial neural networks to overcome the effects of environmental and operational changes on guided waves monitoring, *11th International Conference on Damage Assessment of Structures*, DAMAS 2015, Ghent University, Belgium, 24-26 August, 2015. Publié dans *Journal of Physics*, doi:10.1088/1742-6596/628/1/012127, (2015).
- [13] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, Detection of structural damage using an unsupervised learning algorithm under variational environmental and operational conditions, *11th International Conference on Damage Assessment of Structures*, DAMAS 2015, Ghent University, Belgium, 24-26 August, 2015. Publié dans *Journal of Physics*, doi:10.1088/1742-6596/628/1/012126
- [14] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, F. Dahmene, Investigations on Monitoring Algorithmes for an Optimal False Calls Management, *IIW International Conference Structural Health Monitoring*, Helsinki, Finland, July 1-3 (2015),
- [15] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, "Support Vector Machine statistical technique for reliable damage detection in SHM context", *7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-7)*, Torino – Italy, on July 1-3, (2015).
- [16] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, "Undesirable effects of operational and environmental change variations on structural health monitoring: what are the remedies?", *7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-7)*, Torino – Italy, on July 1-3, 2015.
- [17] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, Novelty detection in tubular structures Monitoring: A case of study", *International Congress of Ultrasonics*, Metz, May 10 – 14, 2015.
- [18] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, and F. Dahmene, KNN for Detection and Classification of in Service Damages in Structures Operating at Harsh Conditions, *International Congress of Ultrasonics*, Metz, May 10 – 14, 2015.
- [19] M. El Mountassir, S. Yaacoubi, F. Dahmene, D. Maquin, G. Murot, L'analyse factorielle discriminante appliquée aux données de monitoring par le biais des ondes guidées : cas d'étude", *Journées doctorales de la COFREND*, IFSTTAR Marne la Vallée, 15-16 juin (2015).
- [20] P. McKeon, S. Yaacoubi, and N. F. Declercq, "Guided Waves Modeling in Composite Structures to Optimize an NDT System", *International Congress of Ultrasonics*, Metz, May 10 – 14, (2015).
- [21] P. McKeon, S. Yaacoubi, and N. F. Declercq, "Simple finite element algorithm to determine propagating modes in a multi-layer waveguide", *International Congress of Ultrasonics*, Metz, May 10 – 14, (2015).
- [22] P. McKeon, S. Yaacoubi, N. F. Declercq, S. Ramadan, and W. K. Yaacoubi, Baseline subtraction technique in the frequency–wavenumber domain for high sensitivity damage detection, *Ultrasonics*, 54, 2, 592-603 (2014).