

Offre de thèse – INSA de Lyon

Sujet : Surveillance autonome et robuste des paliers à roulements par analyse vibratoire et IA

Descriptif

Contexte. Etant destinés à transmettre des efforts importants par le biais d'éléments roulants sur des surfaces de contact réduites, les paliers à roulements figurent parmi les composants les plus fragiles de la boîte de transmission principale d'un hélicoptère ; ils nécessitent par conséquent une surveillance constante, qui fait partie intégrante du HUMS (Health and Usage System) des hélicoptères. Par ailleurs, les solutions actuellement développées pour la réduire la consommation d'énergie dans l'aéronautique visent une augmentation du rendement des machines et donc des efforts transmis, accroissant en contrepartie les risques de défaillance. La surveillance des paliers à roulements a fait l'objet de nombreux travaux recherche au cours des dernières années, poussés par les progrès réalisés en instrumentation, en puissance de calcul et en analyse de données [1][2]. Il subsiste cependant plusieurs verrous technologiques qui empêchent le transfert des solutions développées en laboratoire vers le milieu industriel.

- Les méthodes développées dans les laboratoires de recherche sont extrêmement performantes, mais au prix d'une grande complexité ; elles impliquent typiquement le réglage délicat de plusieurs paramètres et donc l'intervention d'un expert humain en amont de la chaîne de traitement.
- Le principe des méthodes de surveillance est d'être les plus sensibles possible à l'apparition de signes de dégradation, de manière à anticiper l'occurrence de défaillances ; par conséquent, elles sont aussi peu robustes par rapport à des utilisations en environnement non-contrôlés, caractérisés par des régimes de fonctionnement fortement non-stationnaires comme c'est le cas pour les hélicoptères.
- Les algorithmes de traitement du signal et d'analyse des données sont développés dans un cadre théorique général, de manière à couvrir le champ d'application le plus large possible et pouvoir être déployés sur différents types de machine. Il en résulte cependant une sous-optimalité si les spécificités propres à chaque hélicoptère ne sont pas prises en compte.

Objectifs. La combinaison de ces difficultés explique que des méthodes a priori à la pointe de l'état de l'art peuvent sembler difficiles à mettre à œuvre, voire inefficaces lors de tentatives d'implémentation. La finalité de cette thèse est de débloquent ces verrous de manière à garantir leur plein potentiel aux solutions développées par la communauté scientifique. Nous distinguons pour cela trois objectifs scientifiques.

1) *Apprentissage automatique des hyperparamètres à partir des données.* Le réglage des hyperparamètres d'un algorithme est une tâche critique lorsqu'il est déployé sur site, car fortement dépendant de la nature des données destinées à être traitées. L'idée est de réaliser un autoréglage des hyperparamètres selon les principes de l'apprentissage statistique de l'IA [3-7], en reproduisant le processus d'apprentissage d'un expert. Il est ainsi attendu de proposer des solutions « plug-in and play », dont l'intégration in situ ne nécessite que peu, voire pas, d'intervention de la part d'un expert humain.

2) *Auto-adaptation aux conditions opérationnelles*. L'optimalité des algorithmes de traitement du signal nécessite souvent la connaissance de variables opérationnelles qui caractérisent le fonctionnement de l'hélicoptère [8][9] (vitesse de l'appareil, consignes de puissance et de couple, températures, etc.). L'objectif est de rendre les algorithmes auto-adaptables aux conditions opérationnelles sur la base des méthodes d'apprentissage machine, afin qu'ils puissent être utilisés dans des configurations de fonctionnement de l'hélicoptères les plus diversifiées possibles.

3) *Décision en contexte incertain*. En relâchant des degrés de liberté dans les méthodes de manière à ce qu'elles s'ajustent mieux aux données, les actions décrites ci-dessus introduisent des incertitudes inhérentes à l'apprentissage des hyperparamètres et l'adaptation aux variables opérationnelles. Ces incertitudes doivent être prises en compte dans l'étape finale de décision menant au diagnostic pour ne pas fausser les probabilités de détection ou de classification. Il est proposé de quantifier leur effet sur la prise de décision dans un cadre probabiliste adéquat [10], au travers de la chaîne de traitement.

Mots clés : Traitement du signal, apprentissage machine, IA, maintenance prédictive, analyse vibratoire, ingénierie mécanique.

Partenariats industriels : La thèse de doctorat est partiellement financée et hébergée par Airbus Helicopters. Le doctorant sera salarié de l'entreprise dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche.

Retombées pour le futur docteur : Le projet permettra au doctorant d'acquérir des compétences de haut niveau en traitement des données et du signal, en IA et ses applications en ingénierie mécanique, dans un environnement de recherche à la fois académique et industriel. La formation par et à la recherche lui permettra d'intégrer, par exemple et parmi de nombreuses autres possibilités, un service R&D au niveau international.

Prise de fonction et durée : 3 ans à compter du démarrage prévu entre septembre et novembre 2025.

Financement : Contrat CIFRE (<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/la-convention-industrielle-de-formation-par-la-recherche-cifre-47772>)

Lieu : Site de l'INSA de Lyon et site d'Airbus Helicopters

- Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA) UR677 <https://lva.insa-lyon.fr/>, 25 bis avenue Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex
- Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels (LASPI), centre Pierre Mendès France, 12 Av. de Paris bâtiment B, 42300 Roanne (laboratoire partenaire dans le projet)
- Airbus Helicopters, 13700 Marignane

Établissement d'inscription en thèse : INSA de Lyon

École doctorale de rattachement : Ecole Doctoral MEGA (ED 162)

Encadrants & contacts : Codirection par Jérôme Antoni (LVA, jerome.antoni@insa-lyon.fr), Mohamed El Badaoui (LASPI, mohamed.elbadaoui@univ-st-etienne.fr) et Hervé Morel (Airbus Helicopters)

Date limite de candidature : 30 juillet 2025

Profil recherché : Candidat de niveau Bac+5 ou plus avec une première expérience en recherche (projet en Master Recherche ou stage en laboratoire), avec une solide formation théorique permettant d'aborder des problématiques en traitement du signal, apprentissage statistique et IA.

Bibliographie

- [1] Robert Bond Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, First published: 19 December 2010, ISBN:9780470747858, Online ISBN:9780470977668, DOI:10.1002/9780470977668
- [2] R.B. Randall and J. Antoni, "Rolling Element Bearing Diagnostics – A Tutorial", *Mechanical Systems and Signal Processing* Vol. 25(2), 2011, pp.485-520.
- [3] P. Borghesani, N. Herwig, J. Antoni, W. Wang, A Fourier-based explanation of 1D-CNNs for machine condition monitoring applications, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 205, 2023, 110865, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110865>.
- [4] Nico Herwig, Pietro Borghesani, Explaining deep neural networks processing raw diagnostic signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 200, 2023, 110584, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110584>.
- [5] Marx, D. G., Liu, C., Antoni, J., & Gryllias, K. (2022). Deep learning implementations of cyclo-stationary signal processing methods. In *Proceedings of ISMA2022 International Conference on Noise and Vibration Engineering USD2022 & International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics* (pp. 661–678). KU Leuven; Heverlee, Belgium.
- [6] M. Leiber, Y. Marnissi, A. Barrau and M. E. Badaoui, "Differentiable Adaptive Short-Time Fourier Transform with Respect to the Window Length," *ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Rhodes Island, Greece, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10095245.
- [7] Marx, D., & Gryllias, K. (2023). Differentiable Short-Time Fourier Transform Window Length Selection Driven by Cyclo-Stationarity. *Annual Conference of the PHM Society*, 15(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2023.v15i1.3566>
- [8] Mauricio, A., Qi, J., Smith, W., Randall, R., Gryllias, K. (2019). Vibration Based Condition Monitoring of Planetary Gearboxes Operating Under Speed Varying Operating Conditions Based on Cyclo-non-stationary Analysis. In: Cavalca, K., Weber, H. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM . IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science*, vol 61. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_19
- [9] Mauricio, A., Helm, D., Timusk, M., Antoni, J., and Gryllias, K. (February 21, 2022). "Novel Cyclo-Nonstationary Indicators for Monitoring of Rotating Machinery Operating Under Speed and Load Varying Conditions." *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*. April 2022; 144(4): 041018. <https://doi.org/10.1115/1.4049778>
- [10] Christian P. Robert, *Le choix bayésien : Principes et pratique*, Springer-Verlag Paris 2006, <https://doi.org/10.1007/2-287-31120-3>