

## **Prédiction de durées de vie restantes de composants aéronautiques par des approches de deep learning**

### **Mots clés:**

Prédiction de durées de vie restantes, maintenance prédictive, réseaux de neurones profonds, modélisation de séries temporelles, aéronautique

### **Contexte général:**

Le monitoring de l'état des structures et systèmes aérospatiaux devient un enjeu majeur pour améliorer leur disponibilité opérationnelle. L'instrumentation de plus en plus poussée de ces systèmes permet actuellement d'acquérir une quantité considérable de données (big data). Il y a ainsi un enjeu économique et industriel majeur dans une exploitation efficace de ces données afin de continuer à diminuer les coûts d'exploitation des avions de ligne. Un enjeu majeur consiste alors à détecter des endommagements pouvant mettre en danger la sécurité de l'aéronef à partir de ces données massives. Le projet vise à développer des algorithmes par apprentissage automatique (notamment par « deep learning ») pouvant prédire la durée de vie restante des structures à partir de données de monitoring provenant de sources multiples. Cette fusion de données multiples doit améliorer la précision des prédictions de durée de vie restante, permettant le développement de stratégies de maintenance prédictives plus efficaces.

### **Description détaillée:**

Les aéronefs ont fait preuve depuis de nombreuses décennies d'un niveau de sûreté exceptionnellement élevé. Les défaillances structurales sont ainsi extrêmement rares et souvent associées à d'autres facteurs, comme des facteurs humains. Ce haut niveau de sûreté vis-à-vis des défaillances structurales a notamment pu être obtenu par l'intégration de redondances, l'utilisation de facteurs de sécurité élevés et la définition de stratégies d'inspection et de maintenance adaptées. Cependant, tandis que ces approches ont rempli leur rôle en termes de sûreté, elles sont venues aux dépens de la performance et de l'efficacité opérationnelle. En effet, le fabricant doit garantir la sûreté de l'ensemble de la flotte et doit ainsi couvrir même le pire aéronef de la flotte. Les intervalles d'inspection structurale sont ainsi typiquement affectés d'un facteur de sécurité de trois, afin de couvrir ce pire des cas. Or la plupart des aéronefs de la flotte n'auront pas besoin d'un planning d'inspection et de maintenance aussi conservatif, sans pour autant que leur niveau de sûreté garanti n'en pâtisse. Afin de résoudre ce dilemme, des recherches actuelles s'intéressent à une personnalisation du planning d'inspection et de maintenance de chaque aéronef, ce qui permettrait des économies substantielles sur les coûts d'exploitation et de maintenance d'une flotte d'aéronefs. Cette personnalisation serait rendue possible par une instrumentation intensive des aéronefs et d'une exploitation efficace des données qui en sont issues, avec comme but une estimation la plus

précise possible de la durée de vie restante des différents composants, permettant la mise en place de stratégies de maintenance prédictives.

Un verrou scientifique majeur pour le développement de telles stratégies de maintenance prédictives réside dans une bonne estimation de la dégradation du composant et de son évolution afin de pouvoir prédire la durée de vie restante avec un bon niveau de confiance. Pour cela il existe des approches basées sur des modèles physiques (« physics based » [1]), des approches basées sur les données (« data driven » [1]) ou encore des approches basées sur une représentation symbolique des connaissances [2],[3]. Les approches symboliques et celles basées sur des modèles physiques ont été étudiées de manière extensive par les encadrants de ce projet de thèse et se sont montrées relativement efficaces pour les problèmes considérés [2]-[6]. Elles présentent néanmoins l'inconvénient d'un développement assez lourd, d'autant plus que le comportement de dégradations réel est complexe et peu étudié à l'avance. Les approches basées sur des modèles ont également plus de mal à accommoder des données provenant de multiples sources, ne mettant pas toujours en jeu la même physique. Dans ce projet nous nous orientons ainsi vers des approches basées sur les données afin de pallier à ces inconvénients. En particulier, étant donnée l'abondance de données issues de sources très variées qui est actuellement en train de devenir réalité sur les aéronefs, le but de ces travaux de thèse est d'investiguer l'efficacité de diverses approches d'apprentissage automatique (machine learning) afin d'exploiter de manière la plus efficace possible ces données massives. Nous envisageons ainsi de comparer les modèles autorégressifs, les processus gaussiens et les processus gaussiens profonds [7], les réseaux de neurones convolutionnels et les réseaux de neurones récurrents [8]. Les approches par réseaux de neurones profonds (convolutionnels ou récurrents) ont fait preuve récemment de succès retentissants et sont souvent connus sous le terme de « deep learning ». Leurs premières implémentations au sein de l'équipe d'encadrement sur la problématique connexe du diagnostic se sont révélées concluantes [9]-[10]. Ils semblent ainsi particulièrement prometteurs et une grande partie des travaux de thèse leur sera consacrée. Une question clé consistera également en la quantification de l'incertitude dans la prédiction. En effet, dans un contexte de maintenance prédictive, il faut maîtriser le risque associé à une prédiction de durée de vie restante par un algorithme d'apprentissage automatique. Pour cela, les réseaux de neurones bayésiens [11] fournissent des premières pistes en vue de la quantification des incertitudes dans la prédiction.

En termes d'applications nous considérerons trois cas d'un niveau de complexité croissant. Tout d'abord nous nous intéresserons à la prédiction de la durée de vie restante de roulements à partir de mesures de vibrations (accéléromètres) et de température. La base de données expérimentale Pronostia, sera utilisée pour ce cas d'études. Le deuxième cas d'étude concerne la prédiction de la durée de vie restante d'un panneau en Al 7075-T6 comportant une fissure de fatigue à partir de données issues de jauges de déformation et de fibres de Bragg. La base de données déjà développée par l'équipe d'encadrement sera utilisée pour ce deuxième cas d'études. Le troisième cas d'études concerne la prédiction de la durée de vie restante d'un turboréacteur à partir de mesures de 24 capteurs de nature différente, issus de la base de données du centre NASA Ames.

## References:

- [1] An, D., Kim, N. H., & Choi, J. H. (2015). Practical options for selecting data-driven or physics-based prognostics algorithms with reviews. *Reliability Engineering & System Safety*, 133, 223-236.
- [2] Vingerhoeds, R.A., Janssens, P., Netten, B.D., Aznar Fernández-Montesinos, M., «Enhancing off- and on-line monitoring and fault diagnosis», *Control Engineering Practice*, Vol. 3, Nr. 11, pp. 1515-1528, 1995.
- [3] Montero Jimenez, J.J. & Vingerhoeds, R., (2018). Enhancing operational fault diagnosis by assessing multiple operational modes, MOSIM'18 :12<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation - L'essor des systèmes connectés dans l'industrie et les services.
- [4] Patabhraman, S., Gogu, C., Kim, N.H., Haftka, R.T., & Bes, C. (2012). Skipping unnecessary structural airframe maintenance using an onboard structural health monitoring system, *Journal of Risk and Reliability*, 226(5), 549-560.
- [5] Wang, Y., Gogu, C., Binaud N., Bes C., Haftka, R.T. & N.H. Kim (2018), Predictive airframe maintenance strategies using model-based prognostics, *Journal of Risk and Reliability*, (In Press), DOI:10.1177/1748006X18757084
- [6] Wang, Y., Gogu, C., Kim, N.H., Haftka, R.T., Binaud N. & C. Bes (2018). Noise-dependent ranking of prognostics algorithms based on discrepancy without true damage information, *Reliability Engineering & System Safety*, (In Press), DOI:10.1016/j.res.2017.09.021
- [7] Damianou, A., & Lawrence, N. (2013, April). Deep gaussian processes. In *Artificial Intelligence and Statistics* (pp. 207-215).
- [8] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press.
- [9] Nietschke, C., Gogu, C. (2018). Recurrent neural networks for predicting fatigue crack growth, document technique
- [10] Wang, Y., Gogu, C., Wang, Y., Wang, Z., Feng, H., (2019). Intelligent diagnostics of lubrication states of ball screw using multiple time-frequency features with LSTM network, article soumis
- [11] Gal, Y. (2016). *Uncertainty in deep learning*. PhD thesis, University of Cambridge, UK.

## Profil recherché:

- Diplômé d'une grande école d'ingénieurs ou Master en mathématiques appliquées ou sciences pour l'ingénieur
- De bonnes connaissances en statistiques et sciences des données sont attendues
- Des connaissances en aéronautique et mécanique des structures seraient un plus
- Des expériences concrètes dans l'utilisation de réseaux de neurones profonds seraient un plus
- Bonne connaissance du langage de programmation Python attendue

**Contacts:**

Christian Gogu  
Université de Toulouse  
Institut Clément Ader  
Email : [christian.gogu@univ-tlse3.fr](mailto:christian.gogu@univ-tlse3.fr)

Rob Vingerhoeds  
ISAE-SUPAERO  
Département d'Ingénierie des Systèmes Complexes  
Email : [rob.vingerhoeds@isae-supero.fr](mailto:rob.vingerhoeds@isae-supero.fr)

Michel Salaun  
ISAE-SUPAERO  
Institut Clément Ader  
Email : [michel.salaun@isae-supero.fr](mailto:michel.salaun@isae-supero.fr)