

Avis de Soutenance

Monsieur Nacer YOUSFI

Sciences et Technologies Industrielles

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Séparation Aveugle de Sources Non Linéaires pour la Surveillance de l'État de Santé des Machines Tournantes

Travaux dirigés par Monsieur Karim ABED MERAÏM et Monsieur Mohamed EL BADAoui

Ecole doctorale : Mathématiques, Informatique, Physique Théorique et Ingénierie des Systèmes - MIPTIS

Unité de recherche : PRISME - Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes et Mécanique Energétique

Soutenance prévue le **vendredi 03 avril 2026** à 9h30

Lieu : Polytech Orléans, site Galilée 12 Rue de Blois - Campus Université - Orléans - France

Salle : Amphi Turing

Composition du jury proposé

M. Karim ABED MERAÏM	Professeur des universités	Université d'Orléans	Directeur de thèse
M. Mohammed EL BADAoui	Professeur des universités	Safran Tech	Co-directeur de thèse
Mme Dao THI-BICH-HANH	Professeure des universités	Université d'Orléans	Examinatrice
M. François GUILLET	Professeur des universités	Université Jean Monnet, Saint-Étienne	Examineur
M. Remy BOYER	Professeur des universités	Université de Lille	Examineur
M. Jérôme ANTONI	Professeur des universités	Université de Lyon	Rapporteur
M. Gilles CHARDON	Professeur des universités	CentraleSupélec	Rapporteur

Mots-clés : Modélisation., Régression symbolique., Réseau de neurones., Séparation de sources, Identification de fonction de transfert, Analyse vibratoire

Résumé :

La sécurité et la fiabilité sont cruciales en aéronautique et dans d'autres industries telles que les éoliennes ou les véhicules lourds, où un fonctionnement continu est essentiel. La surveillance de l'état des machines est un domaine clé pour la détection précoce des défauts. Dans ce contexte, la surveillance vibratoire est largement utilisée pour l'évaluation de l'état de santé des composants. Cette thèse vise à développer de nouvelles méthodes de décomposition des signaux vibratoires afin d'extraire des indicateurs pertinents de l'état de santé du système, inaccessibles par des mesures directes. Les approches basées sur des modèles vibratoires comprennent plusieurs étapes principales, parmi lesquelles la modélisation phénoménologique occupe une place centrale. Cette modélisation vise à mettre en évidence des expressions analytiques adaptées aux données vibratoires, en exploitant les connaissances a priori sur la cinématique du système. Traditionnellement, ce processus repose sur une correspondance manuelle entre les fréquences caractéristiques et le contenu spectral, ce qui est à la fois chronophage et fortement dépendant de l'expertise. Cette recherche

remédie à ces limitations en proposant une approche basée sur l'analyse symbolique, capable d'identifier automatiquement des expressions mathématiques décrivant les données vibratoires, en tenant compte de la vitesse de rotation de la machine et de la cinématique. Une régression symbolique basée sur les réseaux de neurones est introduit afin de découvrir des formules analytiques compactes et interprétables, sélectionnés via un processus d'apprentissage intégrant des contraintes de parcimonie. Les informations relatives à l'état de santé contenues dans les signaux vibratoires apparaissent souvent sous forme de motifs faibles et de courte durée dans le domaine temporel, et sont déformées par la fonction de transfert du système, due à la propagation des sources d'excitation jusqu'au capteur. Par conséquent, une étape de prétraitement est utilisée pour atténuer ces effets, permettant ainsi de reconstruire des signaux plus représentatifs de l'état de santé réel. Dans ce contexte, contrairement aux approches basées sur le cepstre, qui exploitent les composantes stochastiques du signal vibratoire, nous proposons une contribution originale fondée sur la composante déterministe des données vibratoires mesurées. La méthode proposée exploite les informations spectrales structurées pour estimer la réponse impulsionnelle du système, permettant ainsi de récupérer les motifs liés à l'état de santé. De plus, la connaissance précise de la vitesse de rotation des machines est essentielle pour une analyse fine des vibrations, en particulier pour compenser les fluctuations de vitesse. Cette exigence motive la recherche visant à extraire l'information sur la vitesse de rotation directement à partir des mesures vibratoires, évitant ainsi l'installation coûteuse d'encodeurs. Contrairement aux approches probabilistes multi ordres (MOPA), qui exploitent les harmoniques multiples d'une fréquence d'intérêt, la méthode proposée utilise un modèle phénoménologique pour caractériser les spectres structurés où l'information se répartit sur plusieurs raies en raison de phénomènes de modulation. La méthode estime d'abord les pics harmoniques, puis les aligne via une optimisation robuste sur des modèles harmoniques normalisés, améliorant ainsi l'estimation de la vitesse de rotation sans supposer que la raie la plus énergétique correspond à la fréquence fondamentale, comme dans MOPA. Enfin, une séparation des sources des composantes caractéristiques est proposé afin de localiser et d'accéder directement aux informations relatives à l'état de santé. Un estimateur du maximum de vraisemblance est proposé, basé sur le modèle phénoménologique, utilisant une optimisation par moindres carrés alternés suivie d'une étape de type gradient pour suivre dans le temps les variations des sources.

Summary:

Safety and reliability are critical challenges in the aeronautical sector, affecting aircraft, helicopters, and other complex mechanical systems such as wind turbines and large vehicles, where continuous operation and high availability are essential. Condition monitoring has become a major research focus for an early machine fault detection. In this context, vibration-based condition monitoring is widely adopted, as vibration signals encode the dynamic behavior of complex mechanical systems and the interactions among their components. Moreover, vibration measurements are simple and low-cost to implement, which explains their widespread use in industry. This thesis aims to develop new methods for decomposing data from complex rotating machines to extract informative indicators of their health that cannot be measured directly due to system complexity. Vibration model-based approaches typically comprise several steps, among which phenomenological modeling plays a central role. This modeling aims to unveil analytical expressions that fit accelerometer data by exploiting prior knowledge of system dynamics, such as characteristic rotational frequencies. Traditionally, this process relies on manual matching between characteristic frequencies and spectral content, which is both time-consuming and highly dependent on expert knowledge. To address these limitations, this research proposes an approach grounded in symbolic analysis to automatically identify mathematical expressions that describe the measured vibration data, given the machine's rotational speed and kinematic parameters. Specifically, a neural network-based symbolic regression framework is introduced to unveil compact and interpretable analytical formulas selected through a learning process incorporating sparsity constraints. Health-related information in vibration signals often appears as weak, short-duration patterns in the time domain and is significantly distorted by the system transfer function, resulting from the propagation of vibrations from internal and external components to the sensor location. Consequently, a preprocessing step is commonly employed to mitigate these effects in both phase and amplitude, enabling the reconstruction of signals that are more representative of the true health state. Unlike cepstrum-based approaches that focus on stochastic components, we propose a methodology leveraging the deterministic part of the vibration signal and structured spectral information to estimate the system's impulse response and recover health-related patterns. Moreover, accurate machine rotational speed is essential for fine vibration analysis, particularly to compensate for speed fluctuations or in varying conditions. This requirement motivates research into extracting rotational speed information directly from vibration measurements, thereby avoiding costly encoder installations. Unlike Multi-Order Probabilistic Approaches that exploit multiple harmonics of a single frequency, our proposed method leverages structured line spectra model identified through phenomenological modeling. The approach begins by estimating spectral harmonic peaks and their amplitudes, followed by a robust matching optimization procedure that aligns the detected peaks with predefined normalized harmonic frequency patterns, improving estimation without assuming the highest-energy line represents the target frequency. Finally, a source separation of the vibration components is proposed in order to access directly the health state information. A maximum likelihood estimator is proposed based on the phenomenological model using alternating least square optimization followed with gradient-like step to track the sources variation. These contributions, validated through simulations and experimental data, demonstrate significant potential to enhance fault detection pipelines.