



Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Projet de Thèse

Acronyme du projet: TWIST (Twin-based Watch for Integrated Surveillance of Turbines)

Intitulé : Jumeau numérique basé sur l'apprentissage automatique pour le diagnostic et le pronostic des défaillances et du biofouling des hydroliennes

Title: A machine learning-based digital twin technology for tidal stream turbine failures and biofouling diagnosis and prognosis

Encadrement

Nom du laboratoire d'accueil : Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), UMR CNRS 6027

Nom de l'équipe de recherche : PTR4 | Systèmes énergétiques et procédés

Directeur de thèse : Mohamed BENBOUZID, mohamed.benbouzid@univ-brest.fr

Co-encadrant : Youcef BELKHIER, youcef.belkhier@univ-brest.fr

Présentation du projet

Le projet TWIST vise à améliorer la production énergétique et à prolonger la durée de vie des hydroliennes tout en réduisant les coûts opérationnels [1]. Il repose sur des avancées combinant hydrodynamique, intelligence artificielle et ingénierie marine, répondant ainsi aux enjeux industriels de durabilité et d'efficacité énergétique.

Le projet TWIST ambitionne de développer une solution de surveillance intelligente et prédictive pour les hydroliennes, favorisant une réduction des pannes imprévues et une optimisation de leur maintenance. Ce projet répond à plusieurs enjeux clés :

- Augmentation de la fiabilité : Une surveillance prédictive pour anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent.
- Réduction des coûts d'exploitation : Une maintenance prédictive permettant de diminuer les interventions inutiles et onéreuses.
- Optimisation du rendement énergétique : Une gestion améliorée du biofouling pour maintenir des performances optimales.
- Soutien à la transition énergétique : Contribution au développement des énergies marines renouvelables.

Le jumeau numérique (digital twin), réplique virtuelle d'une hydrolienne, intégrera des données en temps réel issues de capteurs et des modèles analytiques/machine learning pour surveiller, diagnostiquer et prédire le comportement du système. Il permettra de modéliser et simuler les dynamiques physiques d'une hydrolienne dans divers scénarios et intégrera ses données opérationnelles (vibrations, pression, vitesse des courants, etc.) pour anticiper les dysfonctionnements. Dans ce cadre, nous nous appuyerons sur nos récents travaux sur le développement d'un jumeau numérique dédié à la surveillance du multiplicateur (gearbox) d'une éolienne [2].

Les méthodes d'apprentissage automatique (machine learning), en tant que cœur du jumeau numérique, permettront :

(1) Le diagnostic avancé : Détection précoce des signes précurseurs de défaillances ou d'accumulation de biofouling. Une nouvelle approche de deep learning (multiverse recurrent expansion) [3-4], en continuité avec nos travaux sur le diagnostic et l'estimation de l'étendu du biofouling dans une hydrolienne [5-6].



Il nous faudra aussi lever le verrou de la gestion efficace des signaux multidimensionnels pour distinguer avec précision les différents modes de défaillance, même en cas de chevauchement entre les frontières de leur classe. Au regard de ces contraintes, le quantum computing et plus particulièrement les deep quantum inspired neural networks (DQINN) semble être une piste à explorer compte tenu de la capacité inhérente de ces réseaux de neurones à gérer les classes chevauchantes [7].

(2) Le pronostic prédictif : Estimation des états futurs des composants et des effets à long terme du biofouling sur les performances.

(3) L'adaptation continue : Amélioration dynamique des modèles machine learning grâce aux nouvelles données collectées, augmentant la précision du diagnostic et du pronostic au fil du temps. Pour augmenter le niveau de précision aussi bien du diagnostic du pronostic (estimation de la durée de vie de l'hydrolienne), il est proposé de développer un générateur de données (équivalent de data augmentation) dédié aux systèmes de récupération des énergies marines renouvelables [3], [8].

Une validation de ce jumeau numérique est également envisagée sur notre plateforme d'émulation et de simulation temps-réel OPAL-RT (CPER ECO-SYS-MER). Cette validation permettra de tester et d'affiner les modèles en conditions quasi réelles, garantissant ainsi leur robustesse et leur applicabilité aux systèmes hydroliens existants.

Références:

- [1] M.E.H. Benbouzid, (Ed), Design, Control and Monitoring of Tidal Stream Turbine Systems, ISBN-13: 978-1-83953-420-1, 226 p., IET, London 2023.
- [2] H. Habbouche, Y. Amirat, T. Benkedjouh and M.E.H. Benbouzid, "Digital twin-based gearbox fault diagnosis using variational mode decomposition and dynamic vibration modeling," Measurement, vol. 246, Article 116669, pp. 1–13, March 2025.
- [3] T. Berghout and M.E.H. Benbouzid, "AI-driven degradation analysis of oscillating water column turbines under uncertainty," in Proceedings of the 2024 IEEE IECON, Chicago (USA), pp. 1–6, November 2024.
- [4] T. Berghout and M.E.H. Benbouzid, "What are recurrent expansion algorithms? Exploring a deeper space than deep learning," Computer Sciences & Mathematics Forum, vol. 7, n°10, 10, pp. 1–6, June 2023.
- [5] H. Rashid, M.E.H. Benbouzid, Y. Amirat, T. Berghout, H. Titah-Benbouzid and A. Mamoune, "Biofouling detection and classification in tidal stream turbines through soft voting ensemble transfer learning of video images," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 138, Part A, Article 109316, December 2024.
- [6] H. Habbouche, H. Rashid, Y. Amirat, A. Banerjee and M.E.H. Benbouzid, "A 2D VMD video image processing-based transfer learning approach for the detection and estimation of biofouling in tidal stream turbines," Ocean Engineering, vol. 312, Part 3, Article 119283, November 2024.
- [7] Z. Gao, C. Ma, D. Song, Y. Liu, "Deep quantum inspired neural network with application to aircraft fuel system fault diagnosis," Neurocomputing, vol. 238, pp. 13-23, May 2017.
- [8] T. Berghout and M.E.H. Benbouzid, "PrognosEase: A data generator for health deterioration prognosis," SoftwareX, vol. 23, Article 101461, pp. 1–7, July 2023.

The Ph.D. Project?

The TWIST (Twin-based Watch for Integrated Surveillance of Turbines) project aims to enhance energy production and extend the lifespan of tidal *stream* turbines while reducing operational costs [1]. It is based on advancements combining hydrodynamics, artificial intelligence, and marine engineering, addressing industrial challenges related to sustainability and energy efficiency.

The TWIST project seeks to develop an intelligent and predictive monitoring solution for tidal turbines, reducing unexpected failures and optimizing maintenance. This project addresses several key challenges:

- Increased reliability: Predictive monitoring to anticipate failures before they occur.
- Reduction of operational costs: Predictive maintenance to minimize unnecessary and costly interventions.
- Optimization of energy efficiency: Improved biofouling management to maintain optimal performance.
- Support for the energy transition: Contribution to the development of marine renewable energy.

The digital twin, a virtual replica of a tidal *stream* turbine, will integrate real-time sensor data and analytical/machine learning models to monitor, diagnose, and predict system behavior (*prognosis*). It will enable the modeling and simulation of a tidal *stream turbine* physical dynamics under various scenarios and will incorporate operational data (vibrations, pressure, *tidal stream* speed, *etc.*) to *anticipate failures*. This work will build upon our recent research on developing a digital twin for monitoring a wind turbine gearbox [2].

Machine learning methods, as the core of the digital twin, will enable:

(1) Advanced diagnosis: Early detection of precursor signs of failures or biofouling accumulation. A new deep learning approach (multiverse recurrent expansion) [3-4] will continue our research on diagnosing and estimating the extent of biofouling in a tidal turbine [5-6]. Additionally, an essential challenge is effectively managing multidimensional signals to accurately differentiate various failure modes, even when class boundaries overlap. Given these constraints, quantum computing, particularly deep quantum-inspired neural networks (DQINN), appears to be a promising avenue due to their inherent ability to handle overlapping classes [7].

(2) Predictive prognosis: Estimation of future component states and the long-term effects of biofouling on performance.

(3) Continuous adaptation: Dynamic improvement of machine learning models using newly collected *data*, *increasing diagnosis and prognosis* accuracy over time. To further enhance both *diagnosis* and *prognosis* precision (including tidal *stream* turbine lifespan estimation), we propose developing a data generator (similar to data augmentation) tailored for marine renewable energy recovery systems [3], [8].

A validation of this digital twin is also planned on our OPAL-RT real-time emulation and simulation platform. This validation will allow for testing and refining models under near-real conditions, ensuring their robustness and applicability to existing tidal energy systems.

Profil souhaité du candidat

- Master en génie électrique, automatique, informatique industrielle ou intelligence artificielle.
- Compétences en systèmes embarqués et acquisition de données capteurs.
- Maîtrise des algorithmes de machine learning et deep learning (CNN, QML).
- Expérience en modélisation des systèmes (Matlab/Simulink).
- Programmation en Python pour l'IA et la simulation numérique.
- Compétences en maintenance prédictive et surveillance des systèmes.
- Expérience souhaitée dans les énergies marines renouvelables ou systèmes électriques intelligents.
- Compétence avancée en rédaction et maîtrise de l'anglais écrit.