

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE  
DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ECOLE DOCTORALE N° 647  
*Sciences pour l'Ingénieur*  
Spécialité : « *Génie Electrique* »

Par

**Haroon RASHID**

## **Tidal Stream Turbine Biofouling Detection, Extent Estimation, and Performance Prognosis: A Machine Learning Approach**

Thèse présentée et soutenue à « Brest », le 07, February 2025  
Unités de recherche : UMR CNRS 6027 IRDL – Institut de Recherche Dupuy de Lôme

### **Rapporteurs avant soutenance :**

Tianzhen WANG Full Professor, Shanghai Maritime University  
S. M. MUYEEN Full Professor, Qatar University

### **Composition du Jury :**

#### **Président :**

Demba DIALLO Professeur, Université Paris-Saclay

#### **Rapporteurs :**

Tianzhen WANG Full Professor, Shanghai Maritime University  
S. M. MUYEEN Full Professor, Qatar University

#### **Examineur:**

Andrea CORADDU Professor, Delft University of Technology

#### **Invité:**

Guillaume DAMBLANS Biofouling Specialist, France Énergies Marines

#### **Co-encadrants :**

Abdeslam MAMOUNE Professeur, Université de Bretagne Occidentale  
Yassine AMIRAT Enseignant-Chercheur – HDR, ISEN Yncréa Ouest, Campus de Brest

#### **Directeur de thèse :**

Mohamed BENBOUZID Professeur, Université de Bretagne Occidentale

## Détection, Estimation de l'Etendue et Pronostic du Biofouling des Hydroliennes : Une Approche Basée sur l'Apprentissage Automatique

**Résumé**—L'énergie marémotrice, en tant que source d'énergie renouvelable et durable, offre des perspectives prometteuses pour répondre à la demande mondiale en énergie propre. Cependant, l'efficacité des hydroliennes est souvent compromise par le biofouling, un processus où des organismes marins, tels que les algues et les balanes, s'accumulent sur les surfaces des turbines. Cette croissance biologique peut nuire aux performances, augmenter les coûts de maintenance et entraîner des arrêts fréquents de fonctionnement. Alors que le secteur de l'énergie marémotrice cherche à optimiser les performances et à réduire les défis opérationnels, des stratégies efficaces de détection et de gestion du biofouling deviennent essentielles. Cette thèse présente des approches novatrices pour relever les défis de la détection, de l'estimation et du pronostic du biofouling dans les hydroliennes, apportant une contribution tant sur le plan théorique que pratique dans le domaine des énergies marines renouvelables. Un cadre d'apprentissage par transfert avec ensemble de votes pondérés a été développé, en utilisant des modèles pré-entraînés comme VGG, ResNet et MobileNet pour améliorer la précision de la détection du biofouling. En outre, un modèle Fast R-CNN personnalisé a été introduit pour la détection en temps réel, améliorant considérablement la fiabilité opérationnelle. L'application de la décomposition modale variationnelle 2D (2D-VMD) pour le traitement des images, combinée à une technique d'augmentation basée sur les réseaux antagonistes génératifs (GAN), a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de l'estimation quantitative du biofouling. Un nouvel algorithme, RegStack, intégrant les régularisations L1 et L2, a été introduit pour prédire l'impact du biofouling sur les métriques de performance des hydroliennes, facilitant ainsi une maintenance proactive et optimisant les stratégies opérationnelles. La validation expérimentale de ces modèles a été réalisée sur les plateformes de la Shanghai Maritime University et de la Lehigh University, démontrant leur robustesse dans des scénarios réels. Les modèles proposés, basés sur l'apprentissage automatique, offrent une perspective prometteuse pour la gestion du biofouling. En permettant une maintenance prédictive et en réduisant les temps d'arrêt, ces modèles contribuent à diminuer les coûts d'exploitation et à prolonger la durée de vie des turbines.

**Mots-clés**—Hydroliennes, Biofouling, Détection, Estimation, Apprentissage automatique, Algorithme RegStack, Décomposition modale variationnelle 2D.

## Tidal Stream Turbine Biofouling Detection, Extent Estimation, and Performance Prognosis: A Machine Learning Approach

**Abstract**—Tidal energy, as a renewable and sustainable energy source, holds significant promise for addressing the global demand for clean energy. However, the efficiency of tidal stream turbines (TSTs) is often compromised by biofouling—a process where marine organisms, such as algae and barnacles, accumulate on turbine surfaces. This biological growth can hinder performance, increase maintenance costs, and lead to frequent operational downtime. As the tidal energy sector seeks to optimize performance and reduce operational challenges, effective biofouling detection and management strategies become essential. This thesis presents novel approaches to address the challenges of biofouling detection, estimation, and prognosis in TSTs, contributing significantly to both theoretical and practical knowledge in the field of marine energy. A novel Soft Voting Ensemble Transfer Learning Framework was developed, using pre-trained models such as VGG, ResNet, and MobileNet to enhance biofouling detection accuracy. Additionally, a customized Fast R-CNN model was introduced for real-time biofouling detection, significantly improving operational reliability. The application of 2D Variational Mode Decomposition (2D-VMD) for image processing, combined with a Generative Adversarial Network (GAN)-based augmentation technique, advanced biofouling estimation methods. The novel RegStack algorithm, integrating L1 and L2 regularization, was introduced to predict the impact of biofouling on turbine performance metrics, facilitating proactive maintenance and optimizing operational strategies. Experimental validation of these models was conducted on platforms at Shanghai Maritime University and Lehigh University, demonstrating their robustness in real-world scenarios. The proposed machine learning-based models promise to radically change the way biofouling managed in the tidal energy industry by reducing downtime, enabling predictive maintenance, lowering operational costs, and extending turbine lifespan.

**keywords**— Biofouling, Tidal stream turbines, Detection, Estimation, Machine learning, RegStack algorithm, 2D Variational Mode Decomposition.



**Haroon RASHID** obtained his B.Sc. degree in Electrical and Electronics Engineering from the University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan, in 2016, and an M.Sc. degree in Sustainable Environment and Energy Systems from Middle East Technical University, Turkey, in 2020. He is currently pursuing a Ph.D. in Electrical Engineering at the Université de Bretagne Occidentale (UBO), France. His research focuses on fault diagnosis, condition monitoring, and performance prognosis of renewable energy systems, particularly wind and tidal stream turbines, using artificial intelligence and machine learning techniques. His broader interests include biofouling detection, predictive maintenance, and sustainable energy.

This Ph.D. thesis work is supported by the PIA 3 CMQ Industries de la Mer Bretagne (IndMer), France and has resulted in the following publications:

### Book Chapters:

- [1] H. Titah-Benbouzid, **H. Rashid**, and M. E. H. Benbouzid, *Biofouling Issue in Tidal Stream Turbines, Design, Control and Monitoring of Tidal Stream Turbine Systems*, Chap. 4, p. 181–204, ISBN-13: 978-1-83953-420-1, IET, London 2023.

### International Journals

- [2] **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.
- [3] 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.
- [4] **H. Rashid**, H. Habbouche, Y. Amirat, A. Mamoune, H. Titah-Benbouzid, and M. E. H. Benbouzid, “B-FLOWS: Biofouling focused learning and observation for wide-area surveillance in tidal stream turbines,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, n°10, 1828, pp. 1–14, October 2024.
- [5] **H. Rashid**, M. E. H. Benbouzid, H. Titah-Benbouzid, Y. Amirat and A. Mamoune, “Tidal stream turbine biofouling detection and estimation: A review-based roadmap,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, n°5, 908, pp. 1-18, April 2023. **This paper is featured on the cover of this volume.**

### International Conferences

- [6] **H. Rashid**, M. E. H. Benbouzid, Y. Amirat, W. Haider, A. Mamoune, and H. Titah-Benbouzid, “Fast R-CNN-based detection and coverage estimation of biofouling on tidal stream turbines,” in *Proceedings of the 2024 IEEE IECON*, Chicago (USA), pp. 1–6, November 2024. **This paper has received a Best Paper Presentation Award.**
- [7] **H. Rashid**, M. E. H. Benbouzid, H. Titah-Benbouzid, Y. Amirat, T. Berghout, and A. Mamoune, “Mapping a machine learning path forward for tidal stream turbines biofouling detection and estimation,” in *Proceedings of the 2023 IEEE IECON*, Singapore, pp. 1–6, October 2023..
- [8] **H. Rashid**, M. E. H. Benbouzid, Y. Amirat, T. Berghout, H. Titah-Benbouzid, and A. Mamoune, “Biofouling detection and extent classification in tidal stream turbines via a soft voting ensemble transfer learning approach,” in *Proceedings of the 2023 IEEE IECON*, Singapore, pp. 1–6, October 2023.

### National Conferences

- [9] **H. Rashid**, M. E. H. Benbouzid, Y. Amirat, T. Berghout, H. Titah-Benbouzid, and A. Mamoune, “Detection and classification of biofouling in tidal stream turbines through soft voting ensemble transfer learning of video images,” dans les *Actes de La conférence Des jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE)*, Croisic (France), pp. 1–6, Juin 2024.