

Sujet de thèse :

Développement d'outils d'intelligence artificielle adaptés à la végétronique pour la biosurveillance environnementale

Établissement d'inscription : Ecole Centrale de Lyon

École doctorale : ED 160 EEA de Lyon

Unité de recherche : Laboratoire Ampère, UMR CNRS 5005

Financement :

Directeur de thèse : Laurent NICOLAS (laurent.nicolas@cnrs.fr)

Co-directeur de thèse : Naoufel HADDOUR (Naoufel.Haddour@ec-lyon.fr)

Domaine et contexte scientifiques :

La pollution environnementale des milieux naturels, en particulier des sols agricoles et des cours d'eau, est devenue une préoccupation majeure pour la santé humaine et la préservation des écosystèmes. Les pratiques agricoles intensives et les effluents industriels contribuent significativement à la pollution des sols et des eaux par l'apport excessif de nutriments, de pesticides et d'autres substances chimiques. Ces polluants peuvent entraîner l'eutrophisation des cours d'eau, la perte de biodiversité et des impacts négatifs sur la qualité de l'eau potable (Wilkinson et al., 2022). Le suivi et la surveillance en temps réel de la qualité des sols et des eaux de surface sont essentiels pour détecter rapidement les sources de pollution et mettre en place des mesures correctives. Cependant, les méthodes traditionnelles d'analyse sont souvent coûteuses, complexes et inadaptées pour une surveillance continue sur le terrain. **Les Plant Microbial Fuel Cells (PMFC)**, ou biopiles microbiennes à base de plantes, offrent une alternative innovante pour la surveillance environnementale (Haddour et al. 2022). Les PMFC exploitent l'interaction symbiotique entre les plantes et les micro-organismes du sol pour générer de l'électricité à partir de la matière organique exsudée par les racines des plantes (Bataillou et al. 2024). Le signal électrique produit est sensible aux conditions physicochimiques du sol et à la présence de polluants, et il convient alors d'analyser le signal obtenu avec des outils issus de l'intelligence artificielle, par apprentissage automatisé par exemple, pour remonter aux données environnementales. Ceci permet d'envisager l'utilisation des PMFC comme capteurs environnementaux autonomes et autoalimentés (Strik et al., 2008).

L'objectif de ce travail de thèse est de développer les outils d'intelligence artificielle permettant d'analyser les signaux électriques produits par les PMFC en vue du suivi en temps réel de la qualité des sols et des eaux de surface dans les zones agricoles et naturelles. Intégrés dans une plateforme mobile et communicante, les capteurs issus de ces travaux permettront de détecter les variations des paramètres environnementaux et la présence de polluants, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources naturelles.

Ce travail de thèse s'inscrit dans un cadre plus général de végétronique, nouveau domaine de recherche relatif à l'interfaçage entre l'électronique et le végétal.

Mots-clefs : biosurveillance environnementale, intelligence artificielle, piles microbiennes à base de plantes, système communicant.

Objectifs de la thèse :

Ce travail de thèse se concentre sur l'analyse par intelligence artificielle (IA) des signaux électriques produits par des biopiles à base de plantes, en vue de les corrélérer aux données physico-chimiques du milieu dans lequel elles baignent, et ainsi remonter aux données environnementales. Il s'appuie sur les travaux antérieurs de thèse de Grégory Bataillou, qui a conçu et développé des PMFC à partir de matériaux conducteurs biosourcés (Bataillou et al. 2022). Il s'appuie également sur les travaux actuels de thèse de Ambre Chabbert, débutés en octobre 2024, qui ont pour objectif de développer un système autonome à base de biopiles pour la détection de stress chez les plantes. Il se situe dans le cadre du projet CNRS BioPlant, qui se focalise sur la détection de stress abiotique chez des plantes modèles en exploitant les signaux électriques reçus par des biopiles alimentées par les exsudats racinaires de ces plantes.

Dans un premier temps, une étude approfondie de la réponse électrochimique des PMFC sera menée dans des milieux synthétiques, à partir de la variation des paramètres physicochimiques des milieux tels que le pH, la conductivité, la concentration en oxygène, et la température. Une base de données exhaustive sera constituée, regroupant les signaux électriques des PMFC en fonction des différentes conditions environnementales testées et en présence de polluants typiques des activités agricoles, comme les nitrates, les phosphates, les pesticides et les métaux lourds.

Sur la base de ces données, des modèles issus de l'IA, tels que le Machine Learning, seront développés et comparés afin d'interpréter les signaux des PMFC et de mieux comprendre les relations entre les paramètres du sol, la présence de polluants et la réponse électrique.

Une plateforme mobile et communicante, constituée par des biopiles et mettant en œuvre l'algorithme le plus adapté au traitement des signaux électriques issus de celles-ci, sera ensuite conçue et mise en œuvre. En particulier, deux stratégies seront comparées : intégration de l'IA au plus près du capteur constitué par la biopile, ou transmission des données brutes puis traitement par IA.

Enfin, des tests en conditions réelles seront réalisés dans des zones agricoles et naturelles pour évaluer les performances des capteurs et du modèle d'IA mis en œuvre. Ces tests terrains, menés en collaboration avec des partenaires locaux et des programmes de biosurveillance environnementale, notamment dans le cadre de l'équipex TERRA FORMA, permettront de valider l'efficacité et la fiabilité du système dans des environnements opérationnels. Cette approche intégrée vise à fournir une solution innovante et durable pour la surveillance continue de la qualité des sols et des eaux de surface, contribuant ainsi à une gestion plus responsable des ressources naturelles et à la protection des écosystèmes.

Verrous scientifiques et technologiques :

Ce travail de thèse fait face à plusieurs verrous scientifiques, technologiques et numériques majeurs :

- Variabilité des conditions environnementales : les sols et les cours d'eau sont des milieux complexes et hétérogènes. La variabilité des conditions physicochimiques rend difficile l'interprétation des signaux électriques des PMFC et nécessite une modélisation sophistiquée.

- Sélectivité et sensibilité des PMFC : il s'agit de déterminer comment les PMFC réagissent spécifiquement à différents polluants en présence de variations naturelles des paramètres du milieu est un défi important pour assurer la fiabilité des mesures et de leur traitement.
- Intégration dans une plateforme mobile et communicante : le développement d'une plateforme mobile, communicante, robuste, durable et autonome, capable de fonctionner dans des conditions extérieures variables, nécessite une forte optimisation, notamment des systèmes de communication.
- Analyse des données et intelligence artificielle : la mise au point de modèles d'apprentissage automatique capables de traiter de grandes quantités de données hétérogènes et d'extraire des informations pertinentes pour la détection des polluants représente un défi technologique et scientifique.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

1^{ère} année :

- Travail bibliographique sur les méthodes d'IA adaptées à l'analyse de signaux électriques issus des biopiles
- Etude expérimentale en environnement contrôlé : Mise en place d'expériences en modulant systématiquement les paramètres physicochimiques du sol et en introduisant des polluants modèles. Collecte des données électriques et environnementales. Ce travail sera mené en collaboration avec Ambre Chabbert, doctorante au Laboratoire Ampère.
- Développement du système d'acquisition : Mise en place d'un système d'acquisition et de transmission des données, compatible avec les technologies de l'IoT (Internet of Things).

2^{ème} année :

- Enrichissement de la base de données : Poursuite des expériences pour couvrir un large spectre de conditions environnementales et de concentrations en polluants. Ce travail sera en particulier mené en collaboration avec Ambre Chabbert, doctorante au Laboratoire Ampère.
- Développement du ou des modèles de Machine Learning : Application d'algorithmes d'apprentissage supervisé et non supervisé pour modéliser les relations entre les signaux électriques et les paramètres environnementaux. Optimisation des modèles pour améliorer la précision et la robustesse.

3^{ème} année :

- Développement de la plateforme mobile et communicante, intégrant les capteurs à base de biopiles, les systèmes d'acquisition et mettant en œuvre l'algorithme d'apprentissage.
- Tests en conditions réelles : Déploiement des capteurs dans des zones agricoles et naturelles sélectionnées. Collecte des données en continu et évaluation des performances du système.
- Analyse et interprétation des données : interprétation des données collectées sur le terrain. Ajustement du modèle en fonction des retours d'expérience.
- Valorisation des résultats : Rédaction de la thèse, préparation de publications scientifiques et présentations dans des conférences internationales.

Encadrement scientifique :

Laurent Nicolas, DR CNRS (50 %) : Ampère site ECL
Naoufel Haddour, MCF (50 %) : Ampère site ECL

Compétences recherchées

- **Compétences en Informatique et en Data Science** : Le cœur de la thèse implique la conception et l'intégration d'outils d'IA, notamment Machine Learning, pour l'analyse des données. Le/La doctorant(e) développera des compétences en programmation, analyse de données et modélisation statistique. Cette expertise sera essentielle pour la conception et l'optimisation des algorithmes d'apprentissage utilisés pour interpréter les réponses des PACM.
- **Compétences techniques** : En parallèle de ce travail principal sur l'IA, le/La doctorant(e) pourra acquérir des compétences en biotechnologie, chimie analytique, électrochimie, et ingénierie des matériaux, de par sa collaboration forte avec Ambre Chabbert, doctorante au Laboratoire Ampère, qui travaille sur les biopiles. Il pourra apprendre à manipuler des outils de caractérisation physicochimique sophistiqués, à mener des expériences dans des environnements de laboratoire contrôlés, et à interpréter des données complexes.
- **Compétences transversales** : La gestion de projet, la résolution de problèmes, et la pensée critique sont des compétences clés qui seront développées tout au long de la thèse. Le/La doctorant(e) apprendra également à communiquer efficacement ses résultats, tant à l'écrit qu'à l'oral, à travers des publications scientifiques et des présentations à des conférences.
- **Collaboration et travail en réseau** : Travaillant en collaboration avec d'autres chercheurs et doctorant du Laboratoire Ampère, ainsi qu'avec des chercheurs d'autres laboratoires de recherche dans le cadre de projets collaboratifs, le/La doctorant(e) développera des compétences en travail d'équipe et en réseautage professionnel.

En termes de perspectives professionnelles, ce doctorat ouvre la voie à plusieurs carrières possibles :

- **Recherche académique** : Une carrière dans la recherche académique, avec la possibilité de poursuivre des travaux post-doctoraux et de contribuer à des projets de recherche innovants dans le domaine de l'environnement, de l'IoT et des technologies durables.
- **Industrie et secteur privé** : Des opportunités dans l'industrie, en particulier dans les entreprises de technologie environnementale, où les compétences en développement de capteurs et en traitement des données sont très recherchées.
- **Innovation et entrepreneuriat** : Les compétences et connaissances acquises pourraient également servir de tremplin pour des initiatives entrepreneuriales, notamment dans le développement de nouvelles technologies environnementales ou de solutions de monitoring.

Références bibliographiques :

- Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. PNAS, 119, e2113947119.
- Haddour, N., Azri, Y. M., 2022 Recent Advances on Electrochemical Sensors based on Electroactive Bacterial Systems for Toxicant Monitoring: A Mini Review. Electroanalysis, 34: 1-11.
- Bataillou G., Ondel O., Haddour N. (2024). 900-Days long term study of plant microbial fuel cells and complete application for powering wireless sensors. Journal of Power Sources 593, 233965.
- Strik, D. P., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2008). Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms. Trends in Biotechnology, 26(8), 450-459.
- Bataillou, G., Lee, C., Monnier, V., Gerges, T., Sabac, A., Vollaïre, C., Haddour, N., 2022 Cedar Wood-Based Biochar: Properties, Characterization, and Applications as Anodes in Microbial Fuel Cell. Applied Biochemistry and Biotechnology, 194: 4169–4186.