Tremplin Recherche 2026-2027

Bioimpédance et Machine Learning pour la caractérisation du vieillissement de tissus végétaux

Laboratoire d'accueil : ESYCOM, Université Gustave Eiffel

Encadrements : Abir REZGUI (abir.rezgui@esiee.fr) / Jordan ROY (jordan.roy@esiee.fr) / Olivier Français

Mots-clés : Bioimpédance, modèle de Cole-Cole, apprentissage automatique, classification et régression.

Contexte

La spectroscopie d'impédance électrique est une méthode non invasive permettant de caractériser les propriétés électriques de matériaux biologiques sur une gamme de fréquences. Dans les tissus vivants, la réponse mesurée dépend notamment de la conduction ionique, de la polarisation membranaire et des phénomènes de relaxation diélectrique. À l'aide de modèles électriques équivalents, tels que le modèle de Cole-Cole, il est possible de relier les spectres d'impédance à un nombre limité de paramètres représentatifs de l'état du tissu. Leur identification à partir de données expérimentales constitue toutefois un problème inverse sensible au bruit et aux incertitudes de mesure.

Au laboratoire ESYCOM, plusieurs travaux ont porté sur le développement de chaînes instrumentales de bio impédance et sur l'exploitation de modèles électriques pour analyser des échantillons biologiques. La thèse de Jordan Roy a notamment étudié le vieillissement de tissus végétaux à partir d'échantillons de pomme, avec des acquisitions réalisées sur plusieurs heures ou plusieurs jours afin de suivre des phénomènes de déshydratation et de décomposition. L'évolution des paramètres extraits des spectres a permis de mettre en évidence des évolutions temporelles du tissu, dans une démarche principalement exploratoire.

Les avancées récentes du Machine Learning offrent de nouvelles perspectives pour l'analyse des données de bio impédance, en particulier pour l'extraction et l'identification de paramètres à partir de spectres complexes. En complément des méthodes conventionnelles du fitting de modèles, ces approches permettent d'apprendre directement la relation entre une réponse fréquentielle et les paramètres physiques qui la caractérisent. Ce Tremplin Recherche vise à mobiliser cette compétence complémentaire afin d'évaluer l'apport du Machine Learning pour l'identification des paramètres de modèles électriques et pour l'analyse de données expérimentales issues vieillissement de tissus végétaux.

Problématique

Le projet cherchera principalement à répondre aux questions suivantes :

1. Dans quelle mesure des méthodes de Machine Learning permettent-elles d'estimer, à partir d'un spectre fréquentiel de bio impédance, les paramètres caractéristiques d'un modèle électrique tel que Cole-Cole ?

2. Les informations extraites des spectres de bio impédance permettent-elles de caractériser automatiquement les états de vieillissement de tissus végétaux à partir de données expérimentales ?

La première question portera sur la capacité des modèles à résoudre le problème inverse à partir de données synthétiques dont les paramètres sont connus. La seconde consistera à appliquer les approches développées aux données expérimentales afin d'évaluer leur capacité à extraire des paramètres pertinents et à caractériser les différents états d'évolution du tissu.

Objectifs du projet

Etape I – Modélisation, compréhension physique et génération de données synthétiques

Comprendre les principes de la bioimpédance et le rôle des paramètres du modèle de Cole-Cole avant l'introduction du Machine Learning.

- Réaliser un état de l'art sur la spectroscopie de bioimpédance, les modèles électriques équivalents ainsi que sur l'utilisation de méthodes de Machine Learning pour l'identification de paramètres et l'analyse de spectres d'impédance.
- Prendre en main les modèles de bioimpédance développés sous MATLAB dans les travaux antérieurs et reproduire les simulations associées. Étudier l'influence des différents paramètres du modèle de Cole-Cole sur la réponse fréquentielle.
- Mettre en place une chaîne de génération de données synthétiques à partir du modèle de Cole-Cole, en faisant varier les paramètres dans des plages définies et en constituant une base de spectres d'impédance dont les paramètres sont connus.

Etape 2 – Identification des paramètres par Machine Learning

Déterminer dans quelle mesure le Machine Learning permet de résoudre le problème inverse d'identification des paramètres dans un environnement contrôlé.

- Formuler le problème inverse consistant à estimer les paramètres du modèle à partir d'un spectre d'impédance, puis sélectionner.
- Mettre en œuvre plusieurs méthodes de Machine Learning adaptées à un problème de régression multivariée (régression Ridge, SVR, Random Forest et réseau de neurones multicouche).
- Entraîner et valider les modèles sur les données synthétiques, puis évaluer la précision d'estimation des différents paramètres à l'aide de métriques telles que MAE, RMSE et R^2.
- Étudier la robustesse des modèles vis-à-vis du bruit et des perturbations introduites dans les spectres.
- Comparer les performances obtenues aux méthodes de fitting standards sous MATLAB.

Etape 3 - Application aux données expérimentales de vieillissement végétal

L'objectif ici sera d'appliquer les méthodes développées aux données expérimentales de bio impédance issue de vieillissement d'échantillons de pomme.

- Appliquer les méthodes d'identification développées aux spectres expérimentaux et analyser l'évolution temporelle des paramètres estimés.
- Rechercher les paramètres ou combinaisons de paramètres les plus pertinents pour caractériser les différents états d'évolution du tissu.
- Étudier, si l'avancement du projet le permet, une approche de classification ou de régression permettant de caractériser automatiquement l'état de vieillissement à partir des spectres de bioimpédance ou des paramètres extraits.
- Analyser l'apport et les limites des méthodes de Machine Learning par rapport aux approches classiques d'identification des paramètres, et identifier les perspectives d'automatisation de l'analyse des données de bioimpédance.

Références bibliographiques

Roy, J., Sarah, U. T., Lissorgues, G., Français, O., Rezgui, A., Poulichet, P., Takhedmit, H., Scorsone, E., & Rousseau, L. (2024). Stability Study of Synthetic Diamond Using a Thermally Controlled Biological Environment: Application towards Long-Lasting Neural Prostheses. Sensors, 24(11), 3619.

S. Hamed, A. Altana, P. Lugli, L. Petti, and P. Ibba, "Supervised classification and circuit parameter analysis of electrical bioimpedance spectroscopy data of water stress in tomato plants," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 226, 109347, 2024

M. Van Haeverbeke, B. De Baets, and M. Stock, "Plant impedance spectroscopy: a review of modeling approaches and applications," *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, 2023

Ibba, P., Cantarella, G., Abera, B. D., Petti, L., Falco, A., & Lugli, P." Selection of Cole Model Bio-Impedance Parameters for the Estimation of the Ageing Evolution of Apples". International Conference Electrical Bioimpedance, 2019

Ibba, P., Falco, A., Abera, B. D., Cantarella, G., Petti, L., & Lugli, P. (2020). « Bio-impedance and circuit parameters: An analysis for tracking fruit ripening". Postharvest Biology and Technology, 2020.