

# Proposition de Projet de Fin d'Études (PFE)

## Modélisation, et optimisation des dynamiques de communautés microbiennes

### Interactions algues-bactéries pour la résilience, la dégradation de polluants et l'adaptation aux changements environnementaux

Groupe d'étudiants : P. Nom, P. Nom P. Nom

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Option Mathématiques pour la Sciences des Données  
M2 d'ingénierie mathématiques, Valrose (Nice)

Encadrant : Walid Djema (Centre Inria d'Université Côte d'Azur)  
[walid.djema@inria.fr](mailto:walid.djema@inria.fr)      [www.waliddjema.fr](http://www.waliddjema.fr)



Décembre 2024

## **Table des matières**

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                    | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>Les principaux objectifs du PFE</b> | <b>4</b> |

# 1 Introduction

Les micro-organismes, tels que les microalgues, jouent un rôle fondamental dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. En fixant le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) par photosynthèse, elles contribuent à la régulation du cycle du carbone et constituent la base de nombreuses chaînes alimentaires. La survie et le bon fonctionnement de ces microalgues, souvent en interaction avec d'autres populations de micro-organismes, sont essentiels à la pérennité de la vie sur Terre. Cependant, leur développement est influencé par divers facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité des nutriments. Ces microorganismes vivent dans des communautés complexes, où leurs interactions dynamiques rendent leur étude et leur modélisation particulièrement délicates. Malgré ces défis, ils offrent des opportunités exceptionnelles dans des applications biotechnologiques, notamment dans la purification des eaux usées, la bioénergie et la production de composés bioactifs, mettant en lumière l'importance cruciale de comprendre et d'exploiter ces systèmes vivants.

Les micro-organismes tels que les microalgues et les bactéries interagissent dans de nombreux environnements naturels et artificiels. Ces interactions peuvent être de différents types :

- *Compétition* : lorsque les organismes se disputent des ressources limitées comme les nutriments.
- *Mutualisme* : lorsque les deux parties tirent un bénéfice réciproque.
- *Allélopathie* : lorsque des substances chimiques produites par un organisme inhibent la croissance d'un autre.
- *Symbiose* : une interaction durable et bénéfique pour les deux organismes, comme la production de vitamines essentielles par le microbiome pour les algues, ou l'utilisation des exsudats carbonés des algues par les bactéries.

Dans le contexte des milieux pollués, ces consortia d'algues et de bactéries présentent des mécanismes de résilience remarquables : ils peuvent non seulement se protéger mutuellement mais également dégrader certains polluants environnementaux. Ce potentiel est exploité dans des applications biotechnologiques, comme la purification des eaux usées.

- Les défis de modélisation et la complexité des dynamiques des microalgues dans les applications biotechnologiques : voir référence [1]
- La complexité des relations entre microalgues et bactéries, en particulier en ce qui concerne les interactions symbiotiques qui se développent face aux polluants : voir référence [2]

---

**Remarque :** Les étudiants travailleront sur un rapport LaTeX préparé et développé à l'aide d'Overleaf, un outil collaboratif en ligne dédié à LaTeX. Ce document Overleaf, partagé avec l'ensemble des membres du groupe, servira de support principal pour le suivi et l'avancement du projet. Les encadrants pourront fournir un retour en temps réel directement dans le document, facilitant ainsi les échanges et les ajustements nécessaires. De plus, Overleaf permet de suivre les contributions individuelles de chaque étudiant, offrant une transparence sur la répartition des tâches et le travail accompli par chaque membre du groupe. Les codes informatiques, les images, les références bibliographiques, ainsi que tout autre matériel pertinent seront intégrés directement dans ce document, garantissant une organisation cohérente et une collaboration efficace tout au long du projet.

## 2 Les principaux objectifs du PFE

— **Analyse de données de croissance microbienne** : Étudier la croissance de microorganismes d'intérêt, en particulier les communautés phytoplanctoniques et leurs microbiomes associés. Analyser l'influence de facteurs clés tels que la température et la lumière sur leur développement. À partir de ces analyses, dériver des modèles mathématiques déterministes et empiriques pour représenter ces dynamiques (voir références [3, 4]). Ces modèles incluront des descriptions détaillées de l'effet non linéaire de la lumière (par exemple, via une fonction de type Haldane) et de la température sur la croissance microbienne.

— **Interactions algues-bactéries et applications environnementales** : Étudier et modéliser les interactions dynamiques entre microalgues et bactéries, notamment dans des environnements pollués. Ces interactions incluent des relations symbiotiques, mutualistes ou compétitives, et leur impact sur la résilience face aux polluants sera analysé. Faire un état de l'art sur l'utilisation de ces consortia microbiens dans des applications de dépollution, telles que le traitement des eaux usées ou la remédiation des sols contaminés.

Les étudiants réaliseront une recherche bibliographique sur :

- La modélisation des dynamiques microbiennes ([7, 5]).
- L'influence de paramètres clés comme la température et la lumière sur les microalgues.

Un modèle dynamique algues-bactéries sera construit en tenant compte :

- De la photosynthèse (fonction de Haldane pour la lumière).
- Des interactions algues-bactéries.
- De l'impact des polluants sur la croissance et les interactions.

— **Formulation de problèmes d'optimisation et de contrôle optimal** : Dans des contextes biotechnologiques, formuler des problèmes visant à :

- Maximiser le rendement de cultures artificielles impliquant ces consortia.
- Renforcer leur résilience dans des environnements hostiles (en présence de polluants).
- Optimiser leur capacité à neutraliser et dégrader des polluants, comme dans les procédés de traitement des eaux usées.
- Étudier les mécanismes de sélection naturelle et artificielle dans des bioprocédés impliquant plusieurs souches de microorganismes, afin d'identifier les souches les plus performantes selon les conditions expérimentales.

— **Développement d'outils numériques pour l'analyse et l'optimisation** : Mettre en œuvre des approches d'optimisation directe (Voir référence [6], Section 2), en utilisant des scripts en langage Julia basés sur la bibliothèque JuMP et le solveur IpOpt [8]. Ces outils permettront de résoudre numériquement les problèmes d'optimisation formulés et d'explorer différents scénarios pour comprendre les dynamiques optimales des systèmes étudiés.

(voir les exemples dans : <https://ct.gitlabpages.inria.fr/gallery/notebooks.html>)

Les scénarios suivants seront étudiés dans le cadre de ce PFE :

- Scénario 1 : Maximisation de la fitness du consortium en présence de polluants.
- Scénario 2 : Maximisation de la neutralisation et dégradation des polluants.
- Scénario 3 : Étude des phénomènes de compétition et sélection entre différentes souches phytoplanktoniques. (voir [? ])
- Scénario 4 : Optimisation de la production de biomasse utile dans des environnements dégradés. Analyse sous des conditions climatiques variées.
- Scénario 5 : Détection des seuils critiques où les polluants deviennent insoutenables.

- Scénario 6 : Optimisation des conditions pour une production maximale de lipides dans un contexte de bioénergie.
- Scénario 7 : Analyse des dynamiques des communautés sous des conditions extrêmes pour des applications spatiales ou polaires.
- **Proposition de stratégies et élaboration de recommandations** : Interpréter les résultats obtenus pour proposer des stratégies concrètes visant à améliorer la productivité et la résilience des bioprocédés étudiés. Ces recommandations serviront de lignes directrices pour optimiser les procédés biotechnologiques, notamment dans le cadre de la dépollution et de la bioénergie.
- **Exploration d'ouvertures avancées** :
  - Développer des modèles dynamiques hybrides combinant une partie mécaniste déterministe et une partie neuronale (réseau de neurones). La composante neuronale permettra de capturer les phénomènes stochastiques ou les effets difficilement quantifiables dans un modèle purement mécaniste.
  - Intégrer des techniques de contrôle prédictif basé sur un modèle (Model Predictive Control, MPC) pour affiner les stratégies optimales obtenues et permettre une adaptation dynamique des solutions dans des environnements changeants.

## Références

- [1] Bernard, O., 2011. Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO<sub>2</sub> mitigation and biofuel production. *Journal of Process Control*, 21(10), pp.1378-1389.
- [2] Ashraf, N., Ahmad, F. and Lu, Y., 2023. Synergy between microalgae and microbiome in polluted waters. *Trends in microbiology*, 31(1), pp.9-21.
- [3] Darvehei, P., Bahri, P.A. and Moheimani, N.R., 2018. Model development for the growth of microalgae : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, pp.233-258.
- [4] Singh, S.P. and Singh, P., 2015. Effect of temperature and light on the growth of algae species : A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, pp.431-444.
- [5] Dochain, D. ed., 2013. Automatic control of bioprocesses. John Wiley & Sons.
- [6] Caillau, J.B., Ferretti, R., Trélat, E. and Zidani, H., 2023. An algorithmic guide for finite-dimensional optimal control problems. In *Handbook of Numerical Analysis* (Vol. 24, pp. 559-626). Elsevier.
- [7] Smith, H.L. and Waltman, P., 1995. The theory of the chemostat : dynamics of microbial competition (Vol. 13). Cambridge university press.
- [8] Wächter, A. and Biegler, L.T., 2006. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical programming*, 106, pp.25-57.
- [? ] Djema, W., Bayen, T. and Bernard, O., 2022. Optimal darwinian selection of microorganisms with internal storage. *Processes*, 10(3), p.461.