

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602

Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes

Spécialité : Génie des procédés

Par

Joris SEBILE-MEILLEROUX

Modélisation prédictive et contrôle avancé des photobioréacteurs solaires

Thèse présentée et soutenue à Saint-Nazaire, le 21 décembre 2023

Unité de recherche : Laboratoire GEPEA, UMR-CNRS 6144

Rapporteurs avant soutenance :

Oliver BERNARD Directeur de recherche, INRIA, LOV, Université Côte d'Azur, Sophia Antipolis
Cristian TRELEA Professeur, SayFood, Université Paris-Saclay, Palaiseau

Composition du Jury :

Président :

Examinatrice :
Sihem TEBBANI Professeure, L2S, Université Paris-Saclay, Palaiseau

Dir. de thèse :
Jérémy PRUVOST Professeur, GEPEA, Nantes Université, Saint-Nazaire

Co-dir. de thèse :
Mariana TITICA Maître de conférence, GEPEA, Nantes Université, Saint-Nazaire

Co-enc. de thèse :
Stéphane GRIEU Professeur, PROMES, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan

Titre : Modélisation prédictive et contrôle avancé des photobioréacteurs solaires

Mots clés : Microalgues, photobioréacteur, modélisation, contrôle, optimisation, conditions solaires

Résumé : Le but principal de cette thèse est de répondre à la problématique de l'optimisation de la production de biomasse microalgale, en conditions solaires. Pour cela, un ensemble de stratégies de contrôle a été mis au point, et testé en simulation sur la base de scénarios solaires typiques ou réels. Divers enjeux applicatifs ont été considérés dans la conception des approches stratégiques : simplicité d'implémentation, réduction des coûts, robustesse du procédé, optimisation des performances. Le modèle global développé a également permis de prendre en compte divers supports de modélisation, systèmes de culture, lieux de production, erreurs systémiques d'implémentation. En conditions simulées idéales, les stratégies retenues ont systématiquement amené à des gains de production, par rapport à une approche conventionnelle.

Les meilleures performances ont été obtenues avec une stratégie optimisant la croissance sur un horizon de deux jours, par une approche MPC basée sur le retour d'état et la prédiction du comportement du système de culture dans le temps. Pour la prédiction météorologique sur un tel horizon temporel, un modèle a été mis en place par une méthode d'apprentissage profond. Une campagne expérimentale a ensuite été menée sur deux photobioréacteurs plans identiques pilotés en continu. Cette expérimentation en conditions extérieures a conduit à une validation de production de biomasse par deux stratégies de renouvellement du milieu : dilution constante et dilution optimale actualisée chaque heure sur la base de l'approche MPC optimale. L'évaluation des performances a aussi révélé l'intérêt de suivre les paramètres biologiques dans l'obtention d'une production optimale.

Title: Predictive modeling and advanced control of solar photobioreactors

Keywords: Microalgae, photobioreactor, modeling, control, optimization, solar conditions

Abstract: The main aim of this thesis is to address the problem of optimizing microalgal biomass production under solar conditions. To this end, a set of control strategies has been developed, and tested in simulations based on typical or real solar scenarios. Various application issues were considered in the design of the strategic approaches: simplicity of implementation, cost reduction, process robustness, performance optimization. The global model developed has also enabled us to take into account various modeling supports, cropping systems, production locations and systemic implementation errors. Under ideal simulated conditions, the strategies adopted systematically led to production gains, compared with a conventional approach.

The best performance was obtained with a strategy optimizing growth over a two-day horizon, using an MPC approach based on feedback and prediction of culture system behavior over time. For a weather prediction over such a time horizon, a model was set up using a deep-learning method. An experimental campaign was then carried out, on two identical flat photobioreactors with continuous control. This experiment in outdoor conditions led to validate biomass production using two strategies of medium renewal: constant dilution and optimal dilution hourly updated by the optimal MPC approach. Performance evaluation also revealed the importance of monitoring biological parameters in achieving optimum production.