



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Cotutelle internationale avec :
Université Laval (Quebec)

Présentée et soutenue par :

Nicolas PHILIPPE

Le 13 février 2014

Titre :

Analyse statistique et modélisation multivariée de l'évolution long terme de la perméabilité dans un bioréacteur à membranes à échelle réelle

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie des procédés et de l'environnement

Unité de recherche :

Directeur(s) de Thèse :

Mathieu Spérandio, Professeur, LISBP-INSA toulouse
Peter Vanrolleghem, Professeur, Univ Laval, Quebec

Rapporteurs :

Alain Grasmick, Professeur Université II, Montpellier
Ingmar Nopens, Professeur, Université de Gent, Head of Biomath Group

Autre(s) membre(s) du jury :

Luis Sancho, Researcher - Environmental Engineering Dept., CEIT, San Sebastian
Claire Albasi, DR CNRS, LGC, Toulouse
Yvan Racault, DR, IRSTEA
Anne-Emmanuelle Stricker, IAE, IRSTEA
Bruno Barillon, Ingénieur de recherche, Suez Environnement.

Abstract

The membrane bioreactor (MBR) technology used for advanced domestic wastewater treatment consists of an activated sludge process, based on suspended bacterial growth for pollutant removal, followed by a membrane separation stage instead of conventional settling.

The MBR technology has become increasingly popular for full-scale applications since the beginning of the last decade due to its superior treatment efficiency, but it suffers from two main economic drawbacks. On the one hand, its energy consumption is still high, due to scouring of membranes by coarse air bubbles for mechanical fouling control. On the other hand, the process is more difficult to operate, especially due to membrane operation (chemical cleaning, operational parameter setting,...) and requires better trained operators. One of the main goals of research is to improve knowledge about membrane fouling in order to find methods to predict and slow down its evolution.

Modelling is a tool to develop, assess and numerically adjust theories on MBR behaviour, in order to perform process optimisation. The aim is to integrate the different process aspects into one equation system : filtration, biological and chemical processes, and energy consumption, using hydrodynamic and oxygen transfer models.

Even if there are many separate models (filtration models, biological models, aeration models), they are not fully compatible, nor adapted for fouling prediction. Furthermore the complexity of the described phenomena is often prohibitive and not adapted for their application in large scale and long term experiments.

This work presents a new statistical tool, designed and applied for the investigation of links between operational variables and fouling indicators. This approach, based on multivariate regressions, has been designed especially to study full-scale plants at a long term time scale. The selection of input variables remains flexible, because the data array available at full-scale and on large time-scale is more restricted than in laboratory scale studies. The model coefficients are determined for each considered filtration unit separately, because deterministic fouling laws seem to differ between plants, or even between membrane units.

The tool was applied on a full-scale MBR plant designed for 67000 person equivalent and equipped with hollow fiber membranes set up in four separate membrane tanks. The plant has been monitored for one year. Explanatory variables in this case are permeate flux, food to mass ratio, sludge retention time, iron dose, MLSS concentration and temperature. They were confronted with three fouling indicators : the daily permeability drift, the short term fouling rate within each flux step, and an indicator of hydraulic reversibility of fouling. The main conclusions are that the daily mean flux is the main contributor to long-term fouling, followed by temperature and sludge retention time. The MLSS concentration, even if positively correlated with the short-term fouling rate, is negatively correlated with the long-term fouling rate, suggesting that rapid and reversible particle deposition can build a protection against less reversible fouling.

Coefficients of this multivariate analysis were then used in a predictive model for long-term permeability evolution. Results show that it allows predicting the permeability trend for two months after a four-month calibration period. This kind of model could be used in further full-scale applications to anticipate fouling and make MBR operation easier.

Résumé

La technologie des bioréacteurs à membranes (BRMs) pour le traitement des eaux résiduaires urbaines combine le principe des boues activées, utilisant la capacité de cultures libres de bactéries à dégrader la pollution, à une séparation membranaire qui remplace la décantation.

En contrepartie de son excellente efficacité épuratoire qui a favorisé son développement à l'échelle industrielle depuis le début des années 2000, elle présente deux principaux freins économiques. Sa consommation énergétique est encore élevée, en particulier à cause de l'aération grosses bulles utilisée pour limiter le colmatage des membranes. De plus la conduite du procédé, en particulier la gestion des membranes (lavages, réglages des automatismes), est plus complexe et nécessite un personnel mieux formé. Un des enjeux de la recherche est de mieux comprendre le colmatage des membranes et de trouver des méthodes pour prédire et ralentir son évolution.

La modélisation est un moyen d'élaborer des théories sur le fonctionnement des installations, de les vérifier et de les ajuster pour ensuite les utiliser dans l'optimisation des BRM. Son objectif est d'intégrer dans un même système d'équations les différentes facettes du procédé : la filtration, les processus biologiques et chimiques en jeu dans la boue activée, et l'énergie qu'elles consomment, via des modèles hydrodynamiques et des modèles de transfert d'oxygène.

Si un grand nombre de modèles partiels (modèles de filtration, modèles biologiques, modèles d'aération...) existent, ils ne sont pas toujours adaptés pour se combiner. De plus leur complexité est souvent inadaptée à des études sur site réel et sur le long terme.

Durant la thèse, un outil statistique a été conçu et mis en application pour étudier les liens entre un jeu de variables opératoires et des indicateurs du colmatage des membranes. Cette approche basée sur des régressions multivariées a été spécialement conçue pour une étude sur des installations grande échelle et sur le long terme. Cela se traduit d'une part par une flexibilité sur la nature des variables prises en compte par la méthode car le panel des variables accessibles sur des installations grandeur réelle est plus restreint qu'en laboratoire. D'autre part la méthode est basée sur un apprentissage effectué sur chaque unité de filtration, sans a priori sur des lois physiques dont la validité semble varier suivant les modules membranaires.

La mise en application a été effectuée sur un BRM d'une capacité de 67000 équivalents habitants équipé de membranes fibres creuses installées dans quatre cellules séparées, et suivi pendant un an. Les variables explicatives utilisées ici sont le flux de perméat, l'âge de boue, la charge massique, la quantité de fer ajoutée, la concentration en MES des boues et la température du perméat. Elles ont été confrontées à trois indicateurs du colmatage : la dérive journalière de perméabilité, la vitesse de colmatage court terme interne à chaque palier de flux, et un indicateur de réversibilité par rétrolavage. Il en ressort que le flux moyen journalier est le principal contributeur des évolutions long terme de la perméabilité, suivi de la température et de l'âge de boue. La concentration en MES, bien que positivement corrélée au colmatage court terme, est en revanche inversement corrélée au colmatage long terme suggérant qu'un dépôt de particules rapide et réversible par rétrolavages protégerait la membrane contre un colmatage moins réversible.

Les coefficients de cette analyse multivariée ont ensuite été utilisés dans un modèle prédictif des évolutions long terme de la perméabilité. Les résultats permettent de prédire les tendances des évolutions de perméabilité sur deux mois après un apprentissage de quatre mois. Ils ouvrent la voie d'un outil d'anticipation utilisable sur le terrain, pour faciliter la conduite des installations.