

Outils d'aide à la décision pour le traitement des eaux usées urbaines : le développement d'un modèle hybride pour l'optimisation de la modélisation de biofiltration (2020 – 2023)

Marcello Serrao (LEESU – ENPC)

Dans le secteur d'eau, les modèles mécanistes de traitement des eaux usées décrivant les procédés de boues activées sont déjà reconnus comme des outils importants d'aide à la décision. Ils intègrent un grand nombre de paramètres et nécessitent une phase complexe de calibration préalable. Dans le cas du traitement par biofiltration, un procédé compact, réactif et largement appliqué en région urbanisée parisienne, la nécessité de modéliser les processus bio-physico-chimiques au sein du biofilm complexifie les modèles. Ces modèles mécanistes de biofiltration nécessitent une puissance de calcul relativement élevée et ne sont pas encore bien établis. En contraire, des modèles de Machine Learning (ML) basés sur les données décrivent quant à eux le système uniquement sur les informations extraites des données. Ils présentent une force d'interpolation et sont beaucoup plus rapides en calcul, ce qui les rend très intéressants pour les applications en temps réel. De plus, l'hybridation combine un modèle mécaniste qui intègre des connaissances pertinentes sur les processus, avec un modèle ML qui augmente la précision des estimations en incluant des informations sur des sous-processus mal décrits.

La thèse ambitionne d'optimiser la modélisation. L'objectif du travail est premièrement, mettre à jour le modèle mécaniste de biofiltration développé précédemment (Zhu, 2020); deuxièmement, développer un modèle de ML permettant l'identification des erreurs du modèle mécaniste; troisièmement, intégrer ces deux composantes dans un modèle hybride afin d'augmenter la précision des estimations ; et quatrièmement démontrer l'approche hybride dans un contrôle de procédé.

Le travail a été débuté avec une nettoyage et traitement des données opérationnelles acquises sur site industriel en période 2019 – 2020 (Seine aval, 6 000 000 eq.hab, gérée par le SIAAP). Une analyse de sensibilité globale a identifié les paramètres les plus influents sur la réponse du modèle : ceux qui caractérisent la composition, la filtration et les réactions biologiques. Les résultats de simulation avec les paramètres calibrés montrent que le modèle arrive pendant la calibration à prédire les variations de N-NO₃, DCO et MeS avec des performances raisonnables. Sa robustesse d'estimation avec le jeu de données de validation de N-NO₃ est cependant insuffisante sans l'apport de l'hybridation.

Ensuite, un modèle hybride parallèle coopératif a été développé dans lequel le modèle mécaniste recalibré est soutenu par un modèle de ML dans le but d'améliorer la précision d'estimation de qualité de l'effluent en sortie des biofiltres. Différentes techniques de ML ont été appliquées pour obtenir une estimation précise de l'erreur du modèle mécaniste sur les estimations de concentrations en N-NO₃, MeS et DCO. Ces modèles sont alimentés par les qualités d'effluent simulées par le modèle mécaniste, ainsi que par les informations de la qualité d'eau en entrée et les paramètres de traitement (tels les consignes). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un réseau de neurones consistant de trois couches. Les estimations obtenues sur la période de calibration et celle de validation montrent que la précision du modèle hybride est largement supérieure à celle du modèle mécaniste seul à la fois avec des données haute résolution et des moyennes quotidiennes. Finalement, la démonstration d'un modèle hybride dans le contrôle du dosage du méthanol dans un filtre de dénitrification est en cours d'élaboration plus détaillée. Les premiers résultats avec des données opératoires sont prometteurs.

Cette thèse montre qu'un modèle hybride de la modélisation d'un procédé complexe de traitement des eaux permet de mieux décrire le comportement de dénitrification d'une usine d'épuration de très grande échelle qu'un modèle mécaniste seul, améliorant ainsi sensiblement la qualité des estimations. L'hybridation est donc une approche extrêmement pertinente et une étape importante vers la conception de jumeaux numériques intégrés aux filières d'assainissement.

L'encadrement

Cette recherche est été financée par le SIAAP dans le cadre du programme Mocopée avec le soutien de modelEAU, LEESU et W-SMART. Le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada a accordé à modelEAU la « Subvention à la découverte 2021-2026 Towards digital twin based control of water resource recovery facilities - Methods supporting the use of adaptive hybrid digital twins ».