

## AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE

**Monsieur Ihab ALAZZAM** est autorisé à présenter ses travaux en vue de l'obtention du diplôme national de DOCTORAT délivré par l'école CENTRALE de MARSEILLE

**Le jeudi 29 octobre 2026 à 14h00**

Lieu : Salle de séminaire 1, IRPHE – UMR 7342, 49 Rue Frédéric Joliot Curie, 13013 Marseille, France.

Titre : **Modélisation du biofilm avec suivi des bactéries dans un canal milli-labyrinthique de systèmes d'irrigation goutte à goutte utilisant des eaux usées récupérées**

Ecole doctorale : ED 353 - Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur : spécialité Mécanique et Physique des Fluides

### Composition du jury :

|                          |                                         |                       |
|--------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
| M. Olivier BOIRON        | ECM                                     | Directeur de thèse    |
| M. Nassim AIT-MOUHEB     | INRAe, UMR-GEAU                         | Co-directeur de thèse |
| M. Khaldoun SHATANAWI    | University of Jordan (JU)               | Président             |
| M. Harald HORN           | Karlsruhe Institute of Technology (KIT) | Rapporteur            |
| M. Sakir AMIROUDINE      | Université de Bordeaux                  | Rapporteur            |
| Mme Pierrette GUICHARDON | ECM                                     | Examinatrice          |
| M. Mathias JEAN-DENIS    | INRAe, LISC                             | Examineur             |

### Résumé (FR)

L'irrigation goutte à goutte alimentée par des eaux usées récupérées (EUT) constitue une stratégie efficace pour réduire la demande en eau douce en agriculture. Cependant, les canaux milli-labyrinthiques des goutteurs restent sensibles au biofouling en raison de leur géométrie d'écoulement complexe et des charges microbiennes et organiques présentes dans les EUT. Cette thèse étudie les mécanismes régissant l'adhérence des particules et des bactéries et le développement du biofilm dans un canal milli-labyrinthique à section carrée ( $0,63 \text{ mm}^2$ ), en combinant des approches expérimentales et numériques. L'hydrodynamique du canal a été caractérisée par vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) et dynamique des fluides numérique (CFD). Le modèle standard  $k-\epsilon$  a reproduit le champ d'écoulement expérimental avec un écart relatif (ER) inférieur à 8 %, contre jusqu'à 39 % pour le modèle SST  $k-\omega$ , et a donc été retenu pour l'analyse du transport particulaire et bactérien. Le transport et l'attachement initial ont ensuite été étudiés par CFD-DPM avec des particules mimétiques d'E. coli (ECPs), et par vélocimétrie par suivi de microparticules (PTV) avec des particules passives (PPs) et des Escherichia coli marquées par la protéine fluorescente verte (GFP). Les ECPs présentant une probabilité de piégeage supérieure à 0,5 ont été prédits comme étant piégées près du premier déflecteur d'entrée, tendance confirmée expérimentalement pour les PPs et les E. coli marquées par la GFP. Les PPs se sont attachées aux parois exposées à l'écoulement principal, tandis que les E. coli marquées par la GFP ont privilégié les zones de vortex en aval, indiquant que l'attachement bactérien dépend à la fois du transport hydrodynamique et du comportement biologique. Le modèle couplé transport-croissance, simulé sur 24 heures (2 heures d'irrigation suivies de 22 heures sans irrigation), a prédit un épuisement rapide de la demande chimique

en oxygène (DCO), identifiée comme le substrat limitant, le long du canal en raison de la consommation microbienne et d'une diffusion axiale limitée. Pendant la période sans irrigation, l'eau résiduelle permettait la poursuite du développement bactérien malgré l'absence d'écoulement. L'accumulation du biofilm était ainsi concentrée près de l'entrée du canal, où la disponibilité en nutriments était la plus élevée. L'épaisseur maximale prédite atteignait 2  $\mu\text{m}$  en conditions d'apport continu de nutriments, contre 1,05–1,18  $\mu\text{m}$  en conditions d'entrée fermée et de drainage. Ces résultats montrent que le biofouling des goutteurs alimentés en EUT résulte du couplage entre transport hydrodynamique et croissance microbienne induite par les nutriments, soulignant l'importance de la conception des goutteurs et de la stratégie de drainage pour une irrigation goutte à goutte durable avec des EUT.

**Mots-clés :** Biofouling, Suivi des particules, Suivi d'E. coli, Modélisation du biofilm, EUT, Émetteurs milli-labyrinthiques

## Abstract (EN)

Drip irrigation supplied with Reclaimed Wastewater (RWW) offers an effective strategy to mitigate freshwater demand in agriculture. Yet milli-labyrinth channels in drip emitters remain susceptible to biofouling because of their complex flow geometry and the microbial and organic loads in RWW. This thesis investigates the mechanisms governing particle and bacterial attachment and subsequent biofilm development in a square-cross-section milli-labyrinth channel (0,63 mm<sup>2</sup>), using a combination of experimental and numerical approaches. Channel hydrodynamics were first characterised using micro-Particle Image Velocimetry (PIV) and Computational Fluid Dynamics (CFD). The standard Turbulent Kinetic Energy–Epsilon Model ( $k$ – $\epsilon$ ) reproduced the experimentally measured flow field with Percentage Difference in Range (PDR) below 8%, outperforming the SST Turbulent Kinetic Energy–Omega Model ( $k$ – $\omega$ ) model (PDR up to 39%); accordingly, the standard  $k$ – $\epsilon$  model was adopted for subsequent particle and bacterial-tracking analysis. Particle and bacterial transport and initial attachment were examined using a CFD–Discrete Phase Model (DPM) with E. coli-mimicking particles (ECPs) and micro-Particle Tracking Velocimetry (PTV) using both passive particles (PPs) and Green Fluorescent Protein (GFP)-Escherichia coli (E. coli). ECPs with a trapping probability above 0.5 were predicted to be trapped near the first inlet baffle, a trend confirmed experimentally: both PPs and GFP-E. coli accumulated in the region near the first inlet baffle. PPs attached to walls facing the mainstream flow, whereas GFP-E. coli favoured the vortex regions behind the mainstream flow, indicating that bacterial attachment is shaped by motility and biological behaviour, not hydrodynamic transport alone. Subsequently, the coupled transport–growth model, over a 24-hour simulation period, comprising 2 hours of irrigation followed by 22 hours of non-irrigation, predicted that Chemical Oxygen Demand (COD), identified as the limiting substrate, was rapidly depleted along the channel due to microbial consumption and limited axial diffusion. During the non-irrigation period, residual water in the channel continued to provide the conditions required for bacterial development despite the absence of flow. Biofilm accumulation was therefore concentrated near the channel inlet, where nutrient availability was greatest. The predicted peak biofilm thickness reached 2  $\mu\text{m}$  under continuous nutrient supply, compared with 1.05–1.18  $\mu\text{m}$  under closed-inlet and drained conditions. These findings demonstrate that biofouling in drip emitters using RWW arises from the coupling of hydrodynamic transport and nutrient-driven microbial growth, underscoring the importance of emitter design and drainage strategy for the sustainable operation of drip irrigation supplied with RWW.

**Keywords:** Biofouling, Particle tracking, E. coli tracking, Biofilm modelling, RWW, Milli-labyrinth emitters