HAL open science

Milli-fluidique en milieux complexes : application au bio-encrassement

Nassim Ait-Mouheb

To cite this version:

Nassim Ait-Mouheb. Milli-fluidique en milieux complexes : application au bio-encrassement. Génie des procédés. Université de Montpellier, 2021. tel-03507778

HAL Id: tel-03507778

https://hal.science/tel-03507778

Submitted on 3 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Montpellier - Ecole doctorale GAIA

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Génie des procédés

Milli-fluidique en milieux complexes : application au bio-encrassement

---

Soutenance le 28 Octobre 2021 à Montpellier par

Nassim AIT MOUHEB

Chargé de Recherche INRAE, UMR GEAU

Composition du jury :

Olivier BOIRON	*Professeur, IRPHE Marseille*	*Président*
Etienne PAUL	*Professeur, TBI - INSA Toulouse*	*Rapporteur*
Nicolas BERNET	*Directeur de recherche, INRAE LBE Narbonne*	*Rapporteur*
Pierrette GUICHARDON	*Professeur, ECM M2P2, Marseille*	*Rapporteur*
Miquel SALGOT DE MARÇAY	*Professeur, Université de Barcelona (Espagne)*	*Examinateur*
Agnès MONTILLET	*Professeur, GEPEA Saint-Nazaire*	*Examinatrice*
Mohamed NAAIM	*Directeur de recherche, INRAE Grenoble*	*Examinateur*

Texte relatif à l'intégrité scientifique :

Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche.

Table des matières

Curriulum Vitæ.....5

Publications et Travaux.....7

Contribution à la formation par la recherche.....13

Principaux contrats et collaborations.....18

Chapitre I : Contexte général et introduction des problématiques de recherche

I-1 Environnements de recherche 21

I.2 Contexte général de la réutilisation des eaux usées 23

I.3 Les technologies d'irrigation et la REUT 25

I.4 Le bio-encrassement dans les systèmes de micro-irrigation 27

I.5 Voies de recherches identifiées 30

Chapitre II. Caractérisation numérique et expérimentale de l'écoulement le long des milli-canaux en labyrinthe

II.1 Introduction 33

II.2 Approches µ-PIV et numériques mises en œuvre 35

II.2.1 Protocoles 35

II.2.3 Résultats et discussion 36

II.3 Conclusion et voies de recherches identifiées 44

Chapitre III. Mécanismes d'encrassement des milli-canaux en milieu complexe

III.1 Interaction écoulement, bio-encrassement et microbiotes 46

III.2 Écoulement, transfert de matière et effet des procédés de nettoyage 54

III.3 Conclusion et voies de recherches identifiées 56

Chapitre IV. Effet de la contrainte de cisaillement sur la cinétique de développement du biofilm et la précipitation chimique

IV.1 Introduction 58

IV.2 Approches méthodologiques 58

IV.3 Résultats et discussion 61

IV.4 Conclusion et voies de recherches identifiées 64

Chapitre V. Perspectives de recherche

V.1 Axe modélisation du colmatage 65

V.2 Axe quantification et qualification chimiométrique de l'encrassement 67

V.3 Axe cinétique du bio-encrassement et devenir du microbiome dans les agrosystèmes 68

Conclusion générale 71

Références 73

Sélection de publications 82

Curriulum Vitæ

Nassim AIT MOUHEB

Né le 27 février 1982 à Alger (Algérie)

Marié, 2 enfants

Adresse personnelle

274 rue Sonja Henie
34090 Montpellier

Tél : 06 86 74 52 17

Adresse professionnelle

INRAE UMR G-EAU Montpellier
361 rue Jean-Francois Breton
34196 Montpellier France
Tél : 04 67 16 64 03
e-mail: nassim.ait-mouheb@inrae.fr

Situation professionnelle actuelle

Chargé de Recherche INRAE UMR GEAU (depuis le 01.09.2013), section CNU : 62.
Activités de recherche : Chercheur en Génie des procédés/ Mécanique des fluides dans l'équipe Optimisation du Pilotage et des Technologies d'Irrigation : Minimisation des Intrants, Transferts Environnementaux – de l'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (INRAE - Montpellier SupAgro, IRD, CIRAD, Agroparitech).

Formations et titres universitaires

2007-2010 Doctorat de l'Université de Nantes. Spécialité : Génie des procédés
Sujet : *Caractérisation expérimentale et numérique de l'écoulement et du transfert de matière dans les micro-mélangeurs;*
Directeurs de thèse : *Agnès Montillet et Camille Solliec*

2005-2006 Master Recherche en Ingénierie Chimique Environnement et Agroalimentaire de l'Université de Nantes ;

2001-2005 Ingénieur en Génie Chimique de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger.

Expériences professionnelles

Février 2012 à Février 2013 : Post-doctorant en Mécanique des fluides au laboratoire IRPHE,

Marseille.
Sujet : *Développement expérimental pour la caractérisation in vitro du transport et du dépôt d'aérosols liquides dans un écoulement gazeux par mesures couplées DPIV/LIF -Application à la biomécanique respiratoire ;*

Septembre 2010 à Février 2012 : Post-doctorant en Génie des procédés au laboratoire LGC, Toulouse;
Sujet *: Etude de l'écoulement du CO_2 supercritique en microréacteur.*

Activités d'enseignement

- ***Depuis 2017,*** j'interviens sous forme de vacations dans le « séminaire annuel sur la réalisation des usées traitées » auprès des étudiants du Master 2 Sciences de l'Eau Parcours Eau et Agriculture de Supagro Montpellier. Ces vacations durent 7 heures eqTD environ par an.

- Durant mon doctorat, j'ai effectué des vacations à l'IUT de Nantes : TD en mécanique de fluides (40 heures eq TD au total).

- ***Depuis 2013,*** je participe à la formation initiale également à travers l'encadrement régulier de stagiaires M1 et M2, ainsi que des doctorants, au sein de l'UMR GEAU.

Activité d'intérêt collectif au sein d'INRAE et à l'extérieur

- **Depuis 2014** : Référent Sécurité Laser (RSL) au niveau d'INRAE UMR GEAU.

- **Depuis 2018 :** Membre de l'association scientifique IWA.

Animation et management de la recherche

- **Depuis 2016** : Coordinateur de la Plateforme expérimentale de réutilisation des eaux usées de Murviel Lès Montpellier **;**

- **Depuis 2018 :** Je fais partie du comité d'organisation du réseau IRSTEA et par la suite INRAE sur la réutilisation des eaux usées (https://www6.inrae.fr/reuse/Structure);

- **Depuis 2019 :** Je suis éditeur associé du journal Irrigation Science (https://www.springer.com/journal/271/editors).

Dans les références qui suivent, j'ai souligné en gras le nom des doctorants que j'ai encadrés.

I. Chapitres d'ouvrages

[Ch.1] Nassim Ait-Mouheb, Pierre-Louis Mayaux, Javier Mateo-Sagasta, Tarik Hartani, Bruno Molle. Water reuse: A resource for Mediterranean agriculture. In : Water Resources in the Mediterranean Region. (2020). https://dx.doi.org/10.1016%2FB978-0-12-818086-0.00005-4,

II. Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture

[A.1] Nassim Ait-Mouheb, Agnes Montillet, Camille Solliec, Jaromir Havlica, Patrick Legentilhomme, Jacques Comiti, and others, 'Flow Characterization in T-Shaped and Cross-Shaped Micromixers', Microfluidics and Nanofluidics, 10 (2011), 1185–97. https://doi.org/10.1007/s10404-010-0746-5

[A.2] Nassim Ait-Mouheb, Daniéll Malsch, Agnès Montillet, Camille Solliec, and Thomas Henkel, 'Numerical and Experimental Investigations of Mixing in T-Shaped and Cross-Shaped Micromixers', Chemical Engineering Science, 68 (2012), 278–89. https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.036

[A.3] Nassim Ait-Mouheb, Agnès Montillet, Camille Solliec, Patrick Legentilhomme, and Jacques Comiti, 'Diagnostic of Flow Disturbances in a Cross-Shaped Micromixer Using Wall Electrochemical Probes', Experimental Thermal and Fluid Science, 46 (2013), 20–28. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.11.011,

[A.4] Dinara Grasiela Alves, Marinaldo Ferreira Pinto, Bruno Molle, Severine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, and Tarlei Arriel Botrel. Sensibilidade Dos Microtubos à Obstrução Por Agentes Físicos, Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 9 (2015), 193–203. https://doi.org/10.7127/rbai.v9n400310

[A.5] **Nancy Rizk,** Nassim Ait-Mouheb, Guilhem Bourrié, Bruno Molle, Nicolas Roche. Parameters controlling chemical deposits in micro-irrigation with treated wastewater. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, 66 (8) (2017) 587-597. https://dx.doi.org/10.2166%2Faqua.2017.065,

[A.6] Fabrício Correia de Oliveira, Rogério Lavanholi, Antonio Pires de Camargo, José Frizzone, Nassim Ait-Mouheb, Severine Tomas, Bruno Molle. Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging. Irrigation & Drainage Systems Engineering, 6 (1) (2017) 5. https://dx.doi.org/10.4172%2F2168-9768.1000184,

[A.7] Antonio Pires de Camargo, Marinaldo Pinto, Bruno Molle, Dinara Alves, Nassim Ait-Mouheb, José Frizzone. Flow rate dynamics of pressure-compensating drippers under clogging effect. Revista

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, 21 (5), (2017) 304-309. https://dx.doi.org/10.1590%2F1807-1929%2Fagriambi.v21n5p304-309,

[A.8] **Jafar Al-Muhammad,** Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Muriel Amielh, Fabien Anselmet. Micro-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in drip irrigation. Experiments in Fluids, 59 (12) (2018) 16. https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00348-018-2633-x,

[A.9] Rogério Lavanholi, Fabrício Correia de Oliveira, Antonio Pires de Camargo, José Antônio Frizzone, Bruno Molle, Nassim Ait-Mouheb, Severine Tomas. Methodology to evaluate dripper sensitivity to clogging due to solid particles: an assessment. The Scientific World Journal, 9 (2018). https://dx.doi.org/10.1155%2F2018%2F7697458,

[A.10] Nassim Ait-Mouheb, Juliette Schillings, **Jafar Al-Muhammad**, Ryad Bendoula, Séverine Tomas, Muriel Amielh, Fabien Anselmet. Impact of hydrodynamics on clay particle deposition and biofilm development in a labyrinth-channel dripper. Irrigation Science, 37 (1) (2018) 1-10. https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00271-018-0595-7,

[A.11] Nassim Ait-Mouheb, Akiça Bahri, Bechir Ben Thayer, Boumediene Benyahia, Guilhem Bourrie, Brahim Cherki, Nicolas Condom, Rémi Declercq, Adem Gunes, Marc Héran, Nurgul Kitir, Bruno Molle, Dominique Patureau, Alfieri Pollice, Alain Rapaport, Pierre Renault, Khalifa Riahi, Bruno Romagny, Tewfik Sari, Carole Sinfort, Jean-Philippe Steyer, Samer Talozi, Bulent Topcuoglu, Metin Turan, Nathalie Wéry, Ertan Yıldırım, Jérôme Harmand). The reuse of reclaimed water for irrigation around the Mediterranean Rim: a step towards a more virtuous cycle?. Regional Environmental Change, 18 (3) (2018) 693 – 705. https://dx.doi.org/10.1007%2Fs10113-018-1292-z,

[A.12] **Jafar Al-Muhammad,** Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Muriel Amielh, Fabien Anselmet Experimental and numerical characterization of the vortex zones along a labyrinth milli-channel used in drip irrigation. International Journal of Heat and Fluid Flow, 80 (2019). https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijheatfluidflow.2019.108500,

[A.13] Correia Fabrício De Oliveira, Rogério Lavanholi, Antonio Pires De Camargo, Nassim Ait-Mouheb, Séverine Tomas, Bruno Molle. Clogging of Drippers Caused by Suspensions of Kaolinite and Montmorillonite Clays. Irrigation Science, 11 (2019). https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00271-019-00652-4,

[A.14] **Nancy Rizk,** Nassim Ait-Mouheb, Bruno Molle, Nicolas Roche). Treated wastewater Reuse in micro-irrigation: effect of shear stress on biofilm development kinetics and chemical precipitation. Environmental Technology, (2019) 1-29. https://dx.doi.org/10.1080%2F09593330.2019.1625956,

[A.15] **Kevin Lequette,** Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wery. Drip irrigation biofouling with treated wastewater: bacterial selection revealed by high-throughput sequencing. Biofouling, 35 (2) (2019). 217-229, https://dx.doi.org/10.1080%2F08927014.2019.1591377,

[A.16] Antonio Pires de Camargo, Gustavo Lopes Muniz, Nicolas Duarte Cano, Nassim Ait-Mouheb, Séverine Tomas, Diego José de Sousa Pereira, Rogério Lavanholi, José Antônio Frizzone, Bruno Molle.

Applications of computational fluid dynamics in irrigation engineering. Revista Ciência Agronômica 51, (2020) 5.

[A.17] Rayana Manasfi, Monica Brienza, Nassim Ait-Mouheb, Nicola Montemurro, Sandra Perez, Serge Chiron. Impact of long-term irrigation with municipal reclaimed wastewater on the uptake and degradation of organic contaminants in lettuce and leek. Science of the Total Environment (2020). https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.142742,

[A.18] Julie Trottier, Régis Darques, Nassim Ait-Mouheb, Emma Partiot, William Bakhache, Maika Deffieu, Raphael Gaudin. Post-lockdown detection of SARS-CoV-2 RNA in the wastewater of Montpellier, France. One Health (2020). https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.onehlt.2020.100157,

[A.19] Diego José de Sousa Pereira, Rogério Lavanholi, Ana de Araújo, Antonio de Camargo, Nassim Ait-Mouheb, José Frizzone, Bruno Molle. Evaluating Sensitivity to Clogging by Solid Particles in Irrigation Emitters: Assessment of a Laboratory Protocol. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 146 (11) (2020), https://dx.doi.org/10.1061%2F%28ASCE%29IR.1943-4774.0001509,

[A.20] Latifa Azeb, Tarik Hartani, Nassim Ait-Mouheb, Ludivine Pradeleix, Nouredddin Hajjaji, Soumaya Aribi. Life cycle assessment of cucumber irrigation: unplanned water reuse versus groundwater resources in Tipaza (Algeria). Journal of Water Reuse and Desalination (2020).

[A.21] **Kevin Lequette**, Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wéry. Hydrodynamic effect on biofouling of milli-labyrinth channel and bacterial communities in drip irrigation systems fed with reclaimed wastewater. Science of the Total Environment, 738 (2020). https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.139778,

[A.22] Ni-Bin Chang, Uzzal Hossain, Andrea Valencia, Jiangxiao Qiu, Qipeng Zheng, Lixing Gu, Mengnan Chen, Jia-Wei Lu, Ana Pires, Chelsea Kaandorp, Edo Abraham, Marie-Claire ten Veldhuis, Nick van de Giesen, Bruno Molle, Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Deborah Dotta, Rémi Declercq, Martin Perrin, Léon Conradi, Geoffrey Molle. Integrative technology hubs for urban food-energy-water nexuses and cost-benefit-risk tradeoffs (II): Design strategies for urban sustainability View supplementary material. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. (2020). https://dx.doi.org/10.1080%2F10643389.2020.1761088,

[A.23] Ni-Bin Chang, Uzzal Hossain, Andrea Valencia, Jiangxiao Qiu, Qipeng Zheng, Lixing Gu, Mengnan Chen, Jia-Wei Lu, Ana Pires, Chelsea Kaandorp, Edo Abraham, Marie-Claire ten Veldhuis, Nick van de Giesen, Bruno Molle, Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Deborah Dotta, Rémi Declercq, Martin Perrin, Léon Conradi, Geoffrey Molle. Integrative technology hubs for urban food-energy-water nexuses and cost-benefit-risk tradeoffs (I): Global trend and technology metrics. Critical Reviews in Environmental Science and Technology (2020). https://dx.doi.org/10.1080%2F10643389.2020.1759328,

[A.24] Rogério Lavanholi, Antonio Pires de Camargo, Wagner Bombardelli, Antônio Frizzone, Nassim Ait-Mouheb, Eric da Silva, Fabrício Correia de Oliveira Prediction of pressure-discharge curves of trapezoidal labyrinth channels from nonlinear regression and artificial neural networks. Journal of

Irrigation and Drainage Engineering, 146 (8) (2020). https://dx.doi.org/10.1061%2F%28ASCE%29IR.1943-4774.0001485,

[A.25] **Kévin Lequette,** Nassim Ait-Mouheb, Nicolas Adam, Marine Muffat-Jeandet, Valérie Bru-Adan, Nathalie Wéry. Effect of chlorination and pressure flushing of drippers fed by reclaimed wastewater on biofouling" Science of the Total Environment Jr. (2021).

[A.26] Miquel Duran-Ros, Carles Solé-Torres, Nassim Ait-Mouheb, Bruno Molle, Gerard Arbat, Jaume Puig-Bargués. Media filter fouling assessment using optical coherence tomography: new methodology, Biosystems Engineering Jr. (2021).

Articles Soumis :

[A.27] Regis Darques, Julie Trottier, Raphael Gaudin, Nassim Ait-Mouheb, Addressing the COVID-19 Outbreak in France Through Time-Space Analysis and Clustering, Applied Geography.

[A.28] Nassim Ait-Mouheb, Annabelle Mange, Geoffrey Froment, **Kévin Lequette,** Valérie Bru-Adan, Jean-claude Maihol, Bruno Molle, Nathalie Wéry. Untreated or treated urban wastewater drip-irrigation for lettuces and leeks: effect on yield, soil properties and fecal indicators, Science of the Total Environment.

[A.29] **Sara Bekaddour,** Nassim Ait-Mouheb, Tarik Hartani. The re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in Algerian M'zab cities. Journal of Water Reuse and Desalination.

[A.30] **Julien Petit,** Nassim Ait-Mouheb, Sílvia Mas García, Maxime Metz, Bruno Molle, Ryad Bendoula. Potential of Visible/Near Infrared Spectroscopy combined with chemometric methods for clogging estimation and discrimination in drip irrigation emitters. Biosystems Engineering Jr.

III. Colloques, congrès, séminaires

III.1 Communications à des congrès et colloques internationaux : communication orale

[C.1] Nassim Ait Mouheb, Camille Solliec, Agnès Montillet, Jacques Comiti, Patrick Legentilhomme. Jaromir Havlica (2008-06-23). Numerical study of the flow and mass transfer in micromixers, The Sixth International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels ICNMM2008, Darmstadt, Germany.

[C.2] Nassim Ait Mouheb, Camille Solliec, Agnès Montillet, Jacques Comiti, Patrick Legentilhomme, Dalmit Snita (2009-06-22). Characterisation of flow and mass transfer in cross shape and T-shape micromixers. The Seventh International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels ICNMM2009, Pohang, South Korea.

[C.3] Nassim Ait Mouheb, Joelle Aubin, Séverine Camy, J. S Condoret, Martine Poux (2012-05-14) Visualization experiments of supercritical CO_2 flows in microchannels, ISSF 2012: 10th International Symposium on Supercritical Fluids, SanFrancisco, United States.

[C.4] Nassim Ait Mouheb, Lucie Bailly, Olivier Bertrand, Olivier Boiron (2013-04-06), Local aerosol deposition and gas−flow in vitro measurements using PIV−PLIF techniques, 19th Congress of the International Society for Aerosols in Medicine (ISAM), Chapel Hill, United States.

[C.5] Séverine Tomas, Félix Felis, Christophe Stevenin, **Jafar Al-Muhammad,** Nassim Ait Mouheb, Marielle Amielh, Fabien Anselmet, A Vallet (2014-06-24), Experimental characterization of flows through PIV-PTV: irrigation technology case, ICAIM, Leipzig, Germany.

[C.6] **Jafar Al-Muhammad,** Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Mariel Amielh, Fabien Anselmet (2014-07-08), µ-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in micro-irrigation" 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon.

[C.7] **Nancy Rizk,** Nassim Ait Mouheb, Bruno Molle, Nicolas Roche (2015-09). Characterization of chemical and biological clogging and there interaction in a micro-irrigation system in the context of treated waste water reuse. ECCE10, Nice, France.

[C.8] Juliette Schillings., Nassim Ait Mouheb, **Jafar Al-Muhammad,** Ryad Bendoula, Séverine Tomas (2016-09-28). Characterization of fluid dynamic and clogging in drip-irrigation with treated wastewater reuse International conference on Recycling and Reuse ICRR 2016", Istanbul, Turquie.

[C.9] Khalida Bara, Tarik Hartani, Nassim Ait-Mouheb, Kalid Laib (2018-04-24). L'expérimentation agronomique à l'heure du matériel lowcost : cas de la plaine agricole de Chenoua (Tipaza). Colloque Smart Farming : Un challenge à l'agriculture algérienne, Batna, Algeria.

[C.10] **Kevin Lequette,** Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wery (2018-10-04). Microirrigation biofouling with treated wastewater: Influence of hydrodynamic conditions on the structure and microbial communities of biofilms. 27, Managing water scarcity in river basins: Innovation & sustainable development, Agadir, Morocco.

[C.11] Annabelle Mange, Nathalie Wéry, Nassim Ait-Mouheb (2019-06-16). Urban raw or treated wastewater drip-irrigation for lettuce and leek crops: chemical and microbiological properties of soil and plants. IWA Water Reuse 2019. IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany,

[C.12] Anne-Laure Collard, Nassim Ait-Mouheb, Rémi Barbier (2019-06-16). The REUSE, as a reinvention of wastewater ? IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, June 2019, Berlin, Germany,

[C.13] **Kevin Lequette,** Nassim Ait Mouheb, Nathalie Wéry (2019-09-15). Drip irrigation with treated wastewater: sanitary issues of biofouling. 202 p., 20. Symposium on health-related water microbiology (HRWM), Vienne, Austria.

III.2 Communication à des congrès et colloques internationaux: Format Poster

[CP.1] Latifa Azeb, Tarik Hartani, Carole Sinfort, Bruno Molle, Nassim Ait-Mouheb (2017-06-28). Applicability of the concept of life cycle analysis to agriculture when irrigated with treated wastewater, the example of Tipaza, Algeria. First International Congress of Environmental Science and Technology ICEST'2017, Hammamet, Tunisia.

[CP.2] **Kevin Lequette**, Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wéry (2019-06-16). Drip irrigation biofouling with treated wastewater: Influence of hydrodynamic conditions on microbial communities and pathogen persistence. IWA Water Reuse 2019. IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany.

[CP.3] Nassim Ait-Mouheb, Jueying Qian, Michelle Wagner, Harald Horn (2020-09-29). Interaction of flow field and biofilm formation in a dripper supplied by reclaimed wastewater. biofilms 9 conference, Karlsruhe, Germany.

III. 3 Conférences nationales: communication orale

[C.14] Fathi Aloui, Rehemi F., Nassim Ait Mouheb, Ben Nasralah S., Doubliez (2006-09-19) Étude expérimentale de la dynamique des structures tourbillonnaires cohérentes générées par un obstacle de forme cylindrique ou carrée centre entre deux plans parallèles horizontaux, CFTL 2006, Toulouse, France.

[C.15] Nassim Ait Mouheb, Camille Solliec, Agnès Montillet, Jacques Comiti, Patrick Legentilhomme (2009-08-28) Caractérisation des écoulements et des transferts de matière dans les micromélangeurs, 19ème Congrès Français de Mécanique CFM'09 Marseille, France.

[C.16] **Kevin Lequette**, Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wéry (2017-12-05). Biofilms en micro-irrigation alimentés avec des eaux usées traitées. 8ème Colloque du Réseau National Biofilms, Clermont-Ferrand, France.

IV. Organisation de conférences

- J'ai organisé et coordonné le financement du workshop "**International REUSE MUSE Workshop: Agricultural Water Reuse - How to address health and environnemental challenges?"** : https://sites.google.com/view/workshop-reuse/main-page
Workshop financé par MUSE université de Montpellier-KIM WATERS et organisé entre le 02-04 Octobre 2019 avec 19 chercheurs d'institutions internationales et entreprises. Sur les 3 jours, il y a plus 70 participants.

Contribution à la formation par la recherche

I. Thèses co-encadrées

En cours

1. ***Doctorant Vincent Moulia (Octobre 2020- en cours),***
Sujet : « Devenir des contaminants et du microbiome du système d'irrigation au sol lors de la réutilisation des eaux usées traitées », co-encadrement à 50% avec Marc Heran (Univ Montpellier, IEM) et Nathalie Wéry (INRAE LBE). Ecole doctorale GAIA, Montpellier.
Financement : Université de Montpellier (I-site Muse)

La thèse s'inscrit dans le projet MUSE ALLEA : 'Adaptons le traitement de l'eau usée pour un usage agronomique'. ALLEA a pour ambition d'apporter une vision transversale et multi-échelle sur le développement et la consolidation des connaissances sur le devenir des flux de polluants biologiques et chimiques le long du continuum eau usée/système d'irrigation/sol/plante.
Dans ce contexte, trois laboratoires du pôle Montpelliérain proposent une approche pluridisciplinaire (génie des procédés, microbiologie, chimie environnementale, physique) pour évaluer l'influence des écosystèmes et de la qualité des eaux usées en aval du traitement sur le devenir des contaminants biologiques. Les relations tripartites entre matière organique/communautés microbiennes/ contaminants seront étudiées de la sortie du traitement au sol (en intégrant le rôle des biofilms des réseaux d'irrigation). Des expérimentations terrain sur la plateforme de Murviel-lès-Montpellier seront complétées par des dispositifs laboratoires en conditions contrôlées afin de quantifier l'impact de cette ressource en eau sur la diversité microbienne en sortie du système d'irrigation et dans le sol, le devenir de la matière organique dissoute et colloïdale et les mécanismes de développement de biofilm.
L'originalité du sujet de thèse est de suivre la diversité microbienne et la qualité chimique des eaux non pas seulement en sortie de la station d'épuration, mais également lors de son transport jusqu'au point d'usage et dans la matrice sol.

2. ***Doctorant Julien Petit (Octobre 2019- en cours),***
Sujet : « Caractérisation des mécanismes et développement d'un capteur d'encrassement en micro-irrigation dans un contexte de réutilisation des eaux usées traitées », co-encadrement à 50% avec Ryad Bendoula (INRAE UMR ITAP). Ecole doctorale GAIA, Montpellier.
Financements : Région Occitanie / INRAE

Le projet de thèse a pour objectif d'approfondir nos connaissances sur les mécanismes de colmatage et le développement d'une méthodologie innovante d'analyse pour la détection de l'encrassement par mesure optique.
La première étape est de quantifier (cinétique) et de qualifier (composition) l'encrassement physiques, chimiques et biologiques selon la qualité d'eaux d'irrigation (concentration de

particule ou eaux usées traitées) dans le cas de goutteur modèle. Afin d'atteindre cette objectif, un ensemble de méthodes optiques sera mobilisé et comparé pour déterminer la cinétique à l'aide de la tomographie optique cohérente (OCT) et la composition par spectroscopie optique diffuse. Dans un second temps, la ou les méthodes optiques présentant les meilleurs résultats seront retenus afin de développer la preuve de concept d'un capteur d'encrassement adapté au contexte de l'irrigation et de la réutilisation des eaux usées traitées.

3. Doctorante Sara Bekaddour (Octobre 2017-en cours),

Sujet : « Le déverrouillage des eaux non conventionnelles pour l'irrigation : vers de nouveaux modèles hydro-agricoles en milieu aride», co-encadrement à 50 % avec Tarik Hartani (CUTipaza, Algérie).

Financement : Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique algérien

Cette thèse se propose de dresser un diagnostic des pratiques et innovations apportées par la réutilisation des eaux usées dans les villes du Sud de l'Algérie afin d'en dégager les vigueurs et les fragilités.

Par ailleurs, beaucoup de parcelles irriguées reçoivent indistinctement des eaux souterraines de qualités diverses et des eaux non conventionnelles sans que l'on sache la part de chacune dans la production et cela d'autant plus que les analyses prospectives annoncent des volumes croissants mis en jeu et des risques de pollution des nappes. C'est pourquoi, on se propose d'estimer les impacts et de produire les connaissances nécessaires pour orienter les politiques publiques dans ce domaine. Au niveau local et parcellaire, l'effet de la réutilisation des eaux usées sur les agrosystèmes, les techniques d'irrigation et le rendement agricole devra être également étudié.

Thèses Soutenues

4. Doctorant Kévin Lequette (Mars 2017- Septembre 2020),

Sujet : « Biofilms dans les systèmes de micro-irrigation alimentés par des eaux usées traitées : cinétique de développement et dynamiques microbiennes ». Co-encadrement à 50 % avec Nathalie Wéry (INRAE LBE). Ecole doctorale GAIA, Montpellier.

Publications: [A.15], [A.21], [A.25]. Communications : [C.10], [C.13], [C.16]

Financement : Agence de l'Eau RMC (Projet Reuse Murviel Lès Montpellier)

La thèse s'appuyait sur une caractérisation expérimentale de la cinétique de développement et activités microbiennes par la réutilisation des eaux usées traitées en micro-irrigation. A l'échelle laboratoire, les biofilms formés lors du passage des eaux usées dans les systèmes de micro-irrigation sous conditions contrôlées ont été analysés avec les outils moléculaires. Ceci permettait d'évaluer les différences de vitesse de formation et de structure des communautés microbiennes en fonction de la qualité des eaux usées (différentes charges en C, N et P), mais également des procédés de nettoyage. Dans une seconde série d'expérimentations, la capacité des biofilms à inactiver ou au contraire favoriser le développement de contaminants microbiologiques ont été évaluée.

5. ***Doctorante Nancy RIZK (Avril 2014- Juillet 2017).***

« Caractérisation du colmatage chimique et biologique et leurs interactions au sein d'un dispositif de micro-irrigation dans le contexte de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation ». Co-encadrement à 70% avec Nicolas Roche (Université Aix-Marseille- CEREGE). Ecole Doctorale Sciences de l'Environnement (Aix-en-Provence).

Publications : [A.5], [A.14]. Communication : [C.7]
Financements : ONG TERRE Liban/Projet FP7 Water4Crops

Dans un contexte de stress hydrique, la micro-irrigation avec des eaux usées traitées constitue une solution visant à réduire les dépenses en eau. Cependant, le colmatage des goutteurs constitue une contrainte à l'utilisation de ces eaux bien chargées à cause des précipitations chimiques et du développement de biofilm. Les objectifs de cette étude sont de: a) Caractériser la précipitation des sels dissous en fonction des conditions opératoires, b) étudier le développement des biofilms sous différentes conditions hydrodynamiques, c) analyser l'interaction entre le carbonate de calcium et le développement du biofilm. En premier lieu une étude fut conduite sur l'impact de la température le pH et la pression partielle du CO_2 sur la précipitation chimique. Cette étude a permis de quantifier l'augmentation de la masse du carbonate de calcium en fonction du pH et de la température. Les résultats expérimentaux ont permis de valider et de calibrer un modèle numérique (PHREEQC) qui permet de prédire la précipitation chimique pour une qualité d'eau donnée dans des conditions opératoire variées. Des expérimentations ont ensuite été réalisées à l'aide d'un banc d'essai d'irrigation pour étudier l'influence du carbonate de calcium sur la croissance des biofilms au niveau des conduites et des goutteurs. En parallèle un réacteur de Taylor-Couette fut utilisé pour étudier l'influence de la contrainte de cisaillement sur le développement des biofilms. Le biofilm a tendance à se développer selon la plus forte contrainte de cisaillement (4.4 Pa comparée à des contraintes de 2.2 et 0.7 Pa). Une précipitation du carbonate de calcium a été observée en interaction avec la croissance du biofilm.

6. ***Doctorant Jafar AL-MUHAMMAD (Octobre 2012- Décembre 2016),***

« Ecoulement dans un canal millimétrique : étude numérique et expérimentale »
Co-encadrement à 25 % avec Fabien Anselmet (IRPHE/ Université Aix-Marseille) et Séverine Tomas (INRAE UMR GEAU). Ecole doctorale : Sciences pour l'ingénieur. Mécanique et physique des fluides

Publications : [A.8], [A.10], [A.12]. Communications : [C.5], [C.6], [C.8]
Financement : Projet FP7 Water4Crops

La caractérisation de la topologie de l'écoulement dans le labyrinthe du goutteur doit être décrite pour analyser la sensibilité du goutteur au colmatage qui réduit considérablement ses performances. Des expériences utilisant la µ-PIV et un ensemencement avec des particules de 1 µm sont menées sur dix motifs répétitifs pour analyser les régions qui peuvent être sensibles au colmatage. Le nombre de Reynolds varie de 400 à 800. Ainsi, cette étude expérimentale a permis d'analyser le régime d'écoulement et son influence. Une attention particulière a été apportée à la validation de la technique µ-PIV et aux courbes débit-pression qui quantifient la performance globale du goutteur. Plusieurs modèles de turbulence, implémentés dans ANSYS/Fluent, ont été utilisés pour modéliser l'écoulement au sein du labyrinthe. Les résultats

des expériences de µ-PIV et des modélisations sont comparés afin de valider le modèle numérique. Puis, des méthodes avancées d'analyses tourbillonnaires ont été utilisées pour détecter précisément la vorticité et les zones de recirculations. L'objectif global de ce manuscrit est d'identifier le meilleur modèle qui permettra ensuite de prédire et analyser les zones sensibles au colmatage afin de les réduire grâce à l'optimisation de géométrie.

II. Post-doctorants co-encadrées

1. ***Post-doctorant Andres Sauvetre (Novembre 2019- Décembre 2020),***
"Innovative Decentralized and low cost treatment systems for Optimal Urban wastewater"
Co-encadrement avec Serge Chiron (IRD, HSM).
Financements : Projet JPI IDOUM/ Université de Montpellier (I-site MUSE)

Le projet visait à développer de nouvelles technologies hybrides de traitement des eaux usées afin de fournir une eau de qualité optimale pour une réutilisation ultérieure non potable.
Les objectifs étaient d'étudier (i) l'abattement et le métabolisme des antibiotiques choisis après traitement des eaux par filtres plantés bio-augmentés et couplés à des processus Fenton hétérogènes, (ii) le métabolisme des antibiotiques dans les plantes et des communautés microbiennes de la rhizosphère et (iii) l'impact des antibiotiques sur ces communautés microbiennes et la dissémination de gènes d'antibiorésistance dans le système.

2. ***Post-doctorante Monica Brienza (décembre 2017- Octobre 2019),***
« Rôle des biofilms et de la rhizosphère dans l'atténuation de l'occurrence de produits pharmaceutiques et de l'antibiorésistance lors de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation ». Co-encadrement avec Serge Chiron (IRD, HSM) et Nathalie Wéry (INRAE LBE).
Financement : Université de Montpellier (I-site MUSE)

Ce projet avait pour but d'étudier des processus d'atténuation biologique de polluants pharmaceutiques (PPs) contenus dans les eaux usées traitées dans les systèmes d'irrigation et dans la rhizosphère en prenant en compte l'adaptation microbienne dans les biofilms y compris les phénomènes d'antibiorésistance et la capacité de champignons endémiques du sol (Trichoderma) pour dégrader les PPs.

Les objectifs étaient d'étudier (i) les cinétiques de développement des biofilms et leurs impacts sur la (bio)transformation des PPs le long des systèmes de micro-irrigation et dans la rhizosphère et (ii) les processus d'antibiorésistance et leur évolution temporelle lors de la formation des biofilms en lien avec la capacité de ces derniers à dégrader les PPs.

III. Encadrements d'étudiant.es BAC+4, BAC+5

2021 : Loic Kechichian **«Modélisation de l'humidité dans un sol et suivi de croissance de plantes irriguées par de l'eau usée traitée »,** Montpellier Université, Master 2 Sciences de l'Eau, « Eau et agriculture ». Co-encadrement : Jérôme Harmand (INRAE, LBE).

2021 : Morgane Brites **« Adaptation des pratiques et des dispositifs de réutilisation des eaux usées traitées »,** ISTOM, 5ème année ingénieure. Co-encadrement : Patrice Garin (INRAE, UMR GEAU).

2020 : Fanta Zouré, **« Retour sur des projets de REUT : motivations et intérêts »,** Montpellier Université, Master 1 Sciences de l'Eau, « Eau et société ». Co-encadrement : Anne Laure Collard (INRAE, UMR Geau).

2020 : Manon Rumeau, **« Etude de l'impact de la fertilisation à l'urine humaine sur une culture d'épinard, les pools de nutriments et les propriétés du sol »** Ingénieur Supgro Montpellier, spécialité : Production Végétale Durable. Co-encadrements : Chiara Pistocchi et Claire Marsden (INRAE, UMR Eco&Sol).

2020 : Yasmine Razavi Ebrahimi, **« Potentiel de la Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) pour le suivi temporel de l'azote dans le sol »,** Montpellier université, Master 1 Sciences de l'Eau « eau et agriculture ». Co-encadrement : Ryad Bendoula (INRAE, UMR ITAP).

2019 : Audrey BIGOURDAN, **« Colmatage biologique dans les systèmes de micro-irrigation : effet de la qualité des eaux usées »** Montpellier Université, Master 2 Biologie-Agrosciences, Montpellier. Co-encadrant : Kévin Lequette (INRAE, UMRGEAU).

2018 : Maria Magana, **« Trajectoire des eaux usées traitées. Etude de cas Saint Mathieu de Tréviers»,** Montpellier Université, Master 2 Sciences de l'Eau, « Eau et société ». Co-encadrement : Anne Laure Collard (INRAE, UMR Geau).

2017 : Youcef Khalainou **« Etude numérique de l'interaction fluide/structure et du développement de biofilm dans un ajutage pour l'irrigation »,** Université de Franche-Comté, Master 2 SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTE. Co-encadrement : Jean Denis Mathias (INRAE, LISC).

2016 : Clément Sicard, **« Epandage d'effluent vinicole au moyen d'un système de micro-irrigation : performances hydrauliques, cinétique de colmatage et solution de prévention »** Supagro Montpellier, Master 2 Eau et Agriculture. Co-encadrements : Société Aquadoc et Bruno Molle (INRAE, UMR GEAU).

2015 : Juliette Schillings **« Etude de la cinétique de dépôt de particules et du développement des biofilms dans des goutteurs en micro-irrigation** » Université de Montpellier, Master 2 Génie des Procédés. Co-encadrement : Ryad Bendoula (INRAE, UMR ITAP).

Principaux contrats et collaborations

Ne sont détaillés ici que les projets importants et fédérateurs pour mes questions de recherches et les partenaires nationaux et internationaux depuis mon recrutement à l'IRSTEA en 2013.

a) Partenaire Projet Européen FP7 Water4Crops (2012-2016)- Budget IRSTEA 250k euros **http://www.water4crops.org/**

Water4Crops est un projet de collaboration euro-indien cofinancé par le département de biotechnologie du gouvernement indien et la Commission européenne qui abordait : "la réutilisation et la gestion des eaux usées ". Water4Crops signifie "intégration de la réutilisation et de la valorisation des eaux usées bio-traitées avec une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau pour soutenir l'économie verte en Europe et en Inde". Le projet rassemble un consortium indo-européen de 36 organisations [14 indiennes et 22 européennes] appartenant à des institutions de recherche, des universités, des grandes industries et des PME.
Dans le cadre de ce projet j'ai co-encadré deux thèses en collaboration avec l'Université Aix-Marseille : Jafar Al-Muhammad et Nancy Rizk.

b) Coordination du projet Mistrals -SICMED REUT-med (2015 - 2017)- Budget IRSTEA 20k euros

Entre 2015-2017, j'ai coordonné avec J. Harmand (INRAELBE) le projet de réseau méditerranéen de recherche REUT-med. Nous cherchons dans ce projet SICMED à comprendre les phénomènes en jeu dans la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) pour mieux en contrôler les impacts : impact environnemental sur les sols et les nappes, sur les performances des systèmes de production et de traitement. Ce projet cherchait également à comprendre la manière dont se structure concrètement l'action publique autour de la REUT dans les différents états méditerranéens. Nos recherches se basaient en partie sur des retours d'expérience et de pratiques dans des projets de REUT en région méditerranéenne mais également sur l'utilisation des outils de la modélisation et de l'automatique.
Dans le cadre de ce projet, j'ai eu différent échange multidisciplinaire avec l'université YU&Yeditepe Sağlık Turquie, l'IAV Maroc, WEEC en Jordanie et avec l'Université de Khemis- Miliana Algérie.

c) Partenaire projet Européen H2020 Mad4water (2016-2020) - Budget IRSTEA 200k euros
https://www.madforwater.eu/fr/

L'objectif général de MADFORWATER est de développer un ensemble intégré d'instruments technologiques et de gestion pour l'amélioration du traitement des eaux usées, la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation et l'efficacité de l'eau dans l'agriculture. Il vise à réduire la vulnérabilité de la ressource en eaux dans les bassins sélectionnés en Egypte, au Maroc et Tunisie.
Ce projet avait débuté en juin 2016 et j'étais mobilisé en lien avec l'industriel Rolland dans le développement d'un ajutage anti-vidange qui limitera la déperdition d'énergie à la reprise du cycle d'irrigation. Ce dispositif devait également limiter les risques de colmatage par différents types d'eaux usées. A cette fin, j'utilisais différentes méthodes de mesures optiques et numériques afin de limiter la formation de zones d'écoulement à faible cisaillement et d'étudier les propriétés anti-vidanges de ce nouveau ajutage d'irrigation.

d) Partenaire au projet USP-Cofecub (2016-2019)- Budget de mission France-Brésil

Le projet avait permis de consolider la collaboration de recherche et d'échange entre INRAE et l'Université Sao Paulo ESALQ-USP sur les questions de mécanique des fluides en efficience et le colmatage des systèmes de micro-irrigation. Les travaux m'avaient mobilisé dans le suivi des travaux d'une thèse brésilienne et pour l'évaluation de la procédure de test proposée par le laboratoire Français comme base à la norme ISO.

e) Coordination de la plateforme expérimentale de réutilisation d'eaux usées traitées en irrigation Murviel-lès-Montpellier (Hérault) (2017-2021)- -Financement Agence de l'eau AERMC- Budget total projet : 800k euros, pour INRAE 185k euros.
http://www.g-eau.fr/index.php/fr/recherche/plateformes-experimentales/item/1012-plateforme-experimentale-de-reutilisation-d-eaux-usees-en-irrigation-murviel-les-montpellier-herault

Le projet concerne la mise en place et le suivi d'une plateforme expérimentale permettant d'étudier la faisabilité technique et d'évaluer les impacts agronomiques, sanitaires et environnementaux d'une filière de réutilisation des eaux usées traitées par l'irrigation en goutte à goutte enterré, dans le but de réduire la pression de pollution sur le milieu sensible. Le consortium comprend les laboratoires : LBE, IEM, HSM, IRSTEA Lyon et la métropole de Montpellier.
La thèse de Kévin Lequette s'inscrit dans les objectifs de ce projet.

f) Partenaire projet Massire (2019-2023)- Financement : FIDA, 9 partenaires Franco-maghrébin. Budget total : 800 k euros, pour Irstea : 35 keuros.
https://massire.net/

Le projet MASSIRE (2019-2023) vise à renforcer les capacités des acteurs des zones oasiennes et arides du Maghreb pour développer et mettre en œuvre des innovations permettant un développement durable de ces territoires. Pour ce faire, il va identifier, caractériser et tester des innovations techniques et institutionnelles et des pratiques innovantes liées à la gouvernance de l'eau, aux systèmes agricoles et au développement rural.

La thèse de Sara Bekaddour que je co-encadre en Algérie s'inscrit dans les objectifs de ce projet.

g) Partenaire projet ALLEA (2020-2023)- Financement : MUSE Université de Montpellier ; 5 partenaires avec INRAE-LBE, IRD-HSM, société BRL, Coordination Univ Montpellier-IEM. Budget total : 400k euros, pour INRAE: 100 keuros.

Le projet MUSE ALLEA permettra de renforcer l'analyse de la qualité des eaux usées dans continuum Eau/Sol/Plante. Ainsi ALLEA sera focalisé sur le suivi du chemin réactionnel (sorption, dégradation, volatilisation, internalisation dans les plantes,...) des éléments indésirables (pathogènes et polluants médicamenteux) comme de leurs impacts sur la vie endémique du sol.

La thèse de Vincent Moulia s'inscrit dans les objectifs de ce projet.

h) Partenaire projet VITIREUT (2020-2023)- Financement : Région Occitanie et Agence de l'EAU RMC, 3 partenaires avec IFV, société BRL. Budget total : 300 k euros, pour INRAE GEAU: 170k euros.

L'objectif de ma participation dans ce projet est triple :

1. Acquérir des connaissances techniques et scientifiques sur l'incidence de l'irrigation à partir d'eaux usées urbaines traitées sur la vigne par la mise en place et le suivi d'expérimentations sur les deux sites existants de Roquefort des Corbières et de Murviel-lès-Montpellier.
2. Optimiser la mise en œuvre technique du la réutilisation des eaux usées traitées, notamment pour ce qui concerne les systèmes d'irrigation et la gestion de nutriments.
3. Etudier la faisabilité technique et économique d'utiliser des effluents vinicoles traités pour l'irrigation.

i) Partenaire projet Régl'eaux (2021-2023). Financement : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (RMC). Partenaires : INRAE UMR GEAU

L'ambition de ce projet est d'interroger de manière diachronique en quoi les réglementations successives ont façonné, normé, défini la pratique de REUT et la production de connaissances à partir de plusieurs cas d'étude plus ou moins anciens, situés sur le territoire de l'Agence de l'eau RMC.
Pour cela, trois axes organisent le projet:
1. Comprendre en quoi les normes sanitaires et leur durcissement modifient, voire constituent un frein à l'adhésion des agriculteurs aux projets de REUT;
2. Etudier comment les dispositifs techniques et les pratiques culturales ont été adaptés localement en réponse aux changements réglementaires et les effets de ces adaptations sur les milieux;
3. Caractériser la dialectique entre l'élaboration du cadrage réglementaire et la production des connaissances scientifiques à partir des sites pilotes de REUT.

Ma carrière en chiffres entre 2005 et 2021:

Recherche
26 publications dans des revues internationales à comité de lecture
1 chapitre de livre
≈19 communications nationales et internationales
9 projets nationaux et internationaux comme partenaire ou coordinateur
6 thèses et 2 post-doctorants co-encadrés
10 stages de niveau master encadrés
20 articles expertisés pour des revues internationales
1 comité scientifique de colloques et congrès
>10 journées scientifiques organisées
Formation
≈70 heures eqTD pour formation initiale
≈15 heures pour formation continue
Mandats et responsabilités
Référent sécurité laser pour mon laboratoire
Membre du comité d'organisation du réseau Reuse INRAE
Editeur associé journal Irrigation Science

Chapitre I : Contexte général et introduction des problématiques de recherche

I-1 Environnements de recherche

Mon cursus universitaire était spécialisé en génie des procédés avec un axe important en mécanique des fluides à partir du Master de Recherche effectué à l'université de Nantes. Dans mes travaux antérieurs de recherche en thèse et post-docs, je me suis investi à résoudre diverses problématiques de caractérisation de l'écoulement (en phase gazeuse, liquide ou supercritique) et d'optimisation du transfert de matière en micro-fluidique. Dans l'ensemble, mes travaux étaient plutôt de nature expérimentale et basés sur des techniques optiques, cependant une part non négligeable de mon doctorat a concerné la simulation numérique de micro-mélangeurs.

Depuis 2013, j'ai rejoint comme Chargé de Recherche IRSTEA UMR GEAU. L'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) était alors un EPST sous la double tutelle des ministères de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et de l'Agriculture. En 2020, IRSTEA a fusionné avec l'INRA pour former INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement).
Dans l'UMR GEAU, j'ai intégré l'équipe OPTIMISTE (Optimisation du Pilotage et des Technologies d'Irrigation: Minimisation des IntrantS, Transferts Environnementaux ») qui rassemble 11 chercheurs, 6 ingénieurs et techniciens et 4 à 5 Personnels sous contrat et des doctorants. Les grands enjeux qui structurent les recherches de l'équipe sont l'adaptation des systèmes de production agricole face aux changements climatiques, le recyclage des eaux en agriculture, le nexus « eau-énergie-alimentation », les transitions agro-écologiques.

Ainsi les thèmes de recherche de l'équipe portent principalement sur :

- La productivité de l'eau dans les agro-systèmes, notamment en territoires irrigués, et l'optimisation des intrants (eau, fertilisants, énergie)
- Les impacts/services environnementaux et les risques sanitaires liés à l'irrigation
- La durabilité/l'amélioration des performances des technologies d'irrigation, avec des eaux de qualités diverses.

Dans le cadre des axes scientifiques de l'équipe OPTIMISTE, mes travaux de recherche depuis mon recrutement concernent les problématiques d'efficience des systèmes d'irrigation et la réutilisation des eaux non-conventionnelles en agriculture. Sont ici considérées comme « Non-conventionnelles » les eaux usées traitées, mais également les eaux grises ou les urines (fertigation) par exemple. Ma formation et les compétences que j'ai acquises antérieurement en génie des procédés et en micro-fluidique m'ont permis de m'impliquer rapidement dans l'encadrement et les projets menées par l'équipe OPTMISTE dans le domaine de la caractérisation des mécanismes induisant l'encrassement

en micro-irrigation et leurs possibles solutions. Mon équipe OPTMISTE étant investie dans la recherche technologique, c'est cette problématique très concrète qui a généré les thématiques ou axes de recherches que j'expose dans ce manuscrit.
J'ai ainsi centré mon activité sur ces problématiques, mais avec plusieurs angles d'attaques multidisciplinaires tels que la caractérisation de l'écoulement, de la cinétique du développement des biofilms et de son interaction avec la précipitation chimique ou les pathogènes. Grace à différentes collaborations avec des équipes en France et à l'international, j'aborde mes problématiques de recherche, sous différentes échelles d'analyses en me basant sur des méthodes numériques mais aussi des méthodologies expérimentales menées de l'échelle laboratoire ou des enquêtes semi-directives sur le terrain. A titre d'exemple, je citerais le suivi des pratiques et des impacts sur les agrosystèmes de l'irrigation par les eaux usées auprès des agriculteurs au Maghreb (co-encadrement de thèse de Sara Bekaddour en cours en Algérie).

Depuis mon entrée à IRSTEA, je pense que cette vision élargie de mes questions de recherche est largement facilitée du fait de mon appartenance à l'UMR GEAU. L'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages, regroupe 70 chercheurs et ingénieurs permanents de toutes disciplines travaillant ensemble sur les questions de gestion intégrée et adaptative de l'eau. Elle conduit des recherches sur les trajectoires des socio-hydro-systèmes et leur régulation; elle contribue à la conception et à l'évaluation des outils facilitant la mise en œuvre de politiques publiques innovantes concernant l'eau ; elle participe à une formation pluridisciplinaire d'étudiants dans le domaine de l'eau.
L'interdisciplinarité des recherches de mon UMR explique en partie mon implication dans des collaborations et publications pluridisciplinaires, notamment sur les problématiques de réutilisation des eaux usées (Ait-Mouheb et al., 2018 ; Ait-Mouheb et al., 2020). La réutilisation de ce type d'eaux dans le milieu rural ou urbain s'inscrit plus que jamais dans un contexte de changement climatique, de développement de l'irrigation et d'accroissement de la population augmentant ainsi la pression sur les ressources en eau, tant en termes de quantité que de qualité. Je reviendrai plus en détail sur ces aspects au cours de la partie suivante I.2. Cette problématique des eaux dite « non-conventionnelles » est intrinsèquement pluridisciplinaire (mobilisant les disciplines de génie des procédés, mécanique des fluides, chimie, microbiologie, agronomie...etc) car elle concerne des questions liées à la santé aussi bien qu'aux performances agronomiques et techniques d'irrigation, mais intéresse également les sciences humaines et sociales sur des aspects économiques, d'équité ou d'acceptabilité par exemple. Pendant mes recherches, je me suis pour ainsi dire passionné pour le domaine de la REUSE. J'ai souhaité donc prendre en compte la diversité des pratiques et usages des acteurs sur le terrain tout en faisant le lien entre nos problématiques technologiques et les impacts potentiels des qualités des eaux d'irrigation.

La spécificité interdisciplinaire de l'UMR GEAU et de mon équipe OPTIMISTE implique également que à la grande différence des laboratoires que j'ai connus (CNRS) je suis le seul porteur de ma discipline, le Génie des Procédés, dans mon l'UMR. Il m'a donc fallu développer mon activité, en identifiant des voies de recherches en lien avec les recherches appliquées de l'équipe que j'intégrais (en agronomie, hydraulique et mécanique des fluides...). J'ai aussi mis en place un laboratoire d'optique et d'analyses physico-chimiques, ainsi que coordonné la création de la plateforme de réutilisation des eaux usées

de Murviel Les Montpellier[1], objets indispensables à mon activité de recherche. Cette plateforme que je cordonne depuis 2017 réunit différents partenaires et la métropole de Montpellier 3M pour lever un certain nombre de verrous que j'aborderai dans la partie suivante I.2.

Mes questions de recherche se sont également enrichies de solides collaborations avec différents laboratoires en France notamment lors de co-encadrements de projet de thèse ou post-docs (principalement avec l'UMR HSM, UR LBE et UMR ITAP), mais également à l'international au Maghreb (Université de Tipaza en Algérie et l'IAV Rabat au Maroc) et au Brésil (l'Université de Sao Paolo (ESALQ) et l'Université de Campinas dans le cadre d'un projet USP-Cofecub).
Dans les points suivants, j'introduirai le contexte global de mes travaux de recherche autour de la réutilisation des eaux usées et les risques associés en micro-irrigation. Ce qui me permettra de détailler ma problématique et mes approches de recherche.

I.2 Contexte général de la réutilisation des eaux usées

La réutilisation de l'eau est probablement aussi ancienne que l'existence des villes elles-mêmes. D'après (Angelakis and Gikas, 2014) les eaux usées domestiques (eaux d'égout) ont été utilisées pour l'irrigation par un certain nombre de civilisations depuis le début de l'âge du bronze (vers 3200-1100 avant J.-C.), ainsi que dans des villes en Égypte, en Mésopotamie et en Crète. Plus tard, (vers 1000 avant J.-C. - 330 après J.-C.), les eaux usées ont été utilisées pour l'irrigation et la fertilisation par les civilisations grecque et romaine, en particulier autour des grandes villes comme Athènes et Rome. Tout au long de l'histoire de l'humanité, le terme "réutilisation" a fait référence à l'utilisation d'eaux usées brutes ou seulement partiellement traitées à des fins bénéfiques, principalement dans l'agriculture.

Ces dernières décennies, un changement fondamental a eu lieu, car la diffusion des stations d'épuration a permis à la réutilisation des eaux traitées (REUT) de devenir un objet des politiques publiques. De nombreux pays considèrent désormais la réutilisation de l'eau comme une composante importante de la gestion intégrée des ressources en eau, principalement pour le secteur agricole, car les surfaces irriguées continuent de s'étendre (Chittoor Jhansi and Kumar Mishra 2013) Des pays comme la Jordanie, où 87 % des eaux usées traitées en toute sécurité sont désormais réutilisées directement ou avec une faible dilution, Israël, où les eaux usées traitées représentaient 40 % de toute l'eau utilisée pour l'irrigation en 2011, et dans une moindre mesure la Tunisie, où environ 25 % des eaux traitées sont désormais réutilisées, sont devenus des leaders reconnus dans ce domaine en pleine expansion (Lazarova and Akica, 2004). Cependant, malgré les améliorations récentes, le traitement des eaux usées est encore loin d'être universel dans le monde. En conséquence, nous assistons actuellement à un large éventail de modes de réutilisation qui vont de l'utilisation non planifiée et à petite échelle des eaux usées brutes dans les zones périurbaines du Maroc, de l'Algérie ou de l'Égypte, à l'utilisation sophistiquée d'eau ultra-purifiée pour des cultures sensibles comme les légumes en Italie.

[1] http://www.g-eau.fr/index.php/fr/recherche/projets-en-cours/item/862-plateforme-experimentale-de-reutilisation-d-eaux-usees-traitees-en-irrigation-murviel-les-montpellier-herault

En ce qui concerne les questions agronomiques, plusieurs études sur la réutilisation de l'eau en agriculture ont été réalisées sur différentes cultures, dont certaines consommées crues, comme la laitue (Urbano et al., 2017) et la tomate (Cirelli et al., 2012). Les auteurs de ces études ont conclu qu'au-delà des avantages, tels que l'apport des nutriments et l'augmentation du rendement des cultures, selon le niveau de traitement des eaux usées, certains inconvénients, notamment la salinisation du sol et la perte de la capacité d'infiltration du sol, restent préoccupants (Levy et al., 2011). En ce qui concerne les nutriments, dans leur étude, Qadir et al., 2007 ont rapporté que pour chaque 1 000 m^3 d'eaux usées traitées, on pourrait recycler 4 à 24 kg de phosphore, 16 à 62 kg d'azote, 2 à 69 kg de potassium, plus 18 à 208 kg de calcium, 9 à 110 kg de magnésium et 27 à 182 kg de sodium. Ainsi si l'utilisation des eaux usées est bien gérée, il s'agit d'une forme de fertirrigation qui peut réduire le besoin d'engrais chimiques et faire des économies.

Concernant l'impact de l'irrigation avec des eaux usées sur la santé, lorsque le processus de traitement des eaux usées n'est pas efficace ou est inexistant, on soupçonne que de nombreux micro-organismes pathogènes (bactéries, parasites, virus) sont transportés et disséminés par les eaux usées, ce qui peut entraîner des maladies ou la contamination des agriculteurs et des consommateurs. Cette situation est rendue encore plus complexe par la variabilité de la composition microbiologique des eaux usées en fonction de la saison, de l'origine de l'eau collectée et de l'état de santé de la population. En outre, les technologies d'irrigation et le type de culture (par exemple, si la partie comestible est en contact avec le sol) joueront un rôle clé dans le niveau de transmission de ces micro-organismes pathogènes. La détection et la quantification exhaustive de ces microorganismes pathogènes sont très difficiles. C'est la raison pour laquelle seuls les indicateurs doivent être surveillés (Lazarova and Bahri, 2004; Jiménez, 2006). Dans les réglementations ou les directives sur la réutilisation de l'eau, cela concerne principalement (Lazarova and Bahri, 2004):

- Les virus bactériophages (coliphages somatiques, coliphages ARN-F),
- Bactéries (coliformes thermotolérants, Escherichia coli, entérocoques intestinaux),
- Protozoaires (Clostridium perfringens)
- Helminthes (œufs d'ascaride).

Les principaux facteurs d'exposition aux agents pathogènes sont l'ingestion d'eaux usées, la consommation d'aliments ayant été en contact avec des eaux usées ou l'inhalation de bioaérosols contaminés par des agents pathogènes. Plusieurs questions restent à résoudre, notamment la quantification des effets de barrière après traitement ou stockage, la dynamique des contaminants pendant le transport de l'eau et l'irrigation (Lequette et al., 2019) et les effets sur le microbiote du sol, qui ont également été ignorés dans la plupart des études sur l'irrigation avec réutilisation de l'eau.

Outre les microorganismes, il convient de noter que, malgré les réglementations nationales, les eaux usées industrielles sont rarement prétraitées ou séparées des eaux usées urbaines dans la région méditerranéenne. Ainsi, les micro-contaminants sont également largement présents dans les eaux usées urbaines, notamment les produits pharmaceutiques, les antibiotiques, les produits chimiques des produits de soins personnels, les composés perturbant le système endocrinien, les plastifiants, les retardateurs de flamme, les tensioactifs, les drogues illicites, les produits de transformation, les

pesticides, entre autres. Bien que les concentrations soient généralement très faibles (de l'ordre d'une concentration nanomolaire), leurs effets et particulièrement les effets cumulés sur les écosystèmes et la santé humaine n'ont pas été étudiés de manière approfondie jusqu'à présent. Dans le cas des composés perturbant le système endocrinien, par exemple, ceux-ci peuvent imiter l'activité de certaines hormones et interférer avec le fonctionnement du système endocrinien. Les antibiotiques et leurs métabolites sont principalement détectés dans les effluents des hôpitaux. Les caractéristiques de ces eaux usées, qui sont également riches en micro-organismes, peuvent fournir des conditions idéales pour l'évolution des écosystèmes, notamment par le transfert et le développement de gènes de résistance (Manasfi et al., 2020). La persistance de ces composés accélère le développement de gènes de résistance et de résistance bactérienne qui peuvent augmenter la pression de sélection sur les microorganismes de l'environnement (problématique abordée dans le projet ALLEA).

Nous reviendrons sur le concept d'effets barrières (de la filière de réutilisation) dans mes travaux sur les interactions biofilms et pathogènes dans le chapitre III du manuscrit et en perspective de mes recherches pour les polluants émergeants.

I.3 Les technologies d'irrigation et la REUT

Trois méthodes d'irrigation distinctes sont disponibles pour l'application de l'eau en agriculture : l'irrigation de surface/gravitaire, par aspersion et goutte à goutte (ou micro-irrigation), et sous pression (Figure. 1). Au niveau parcellaire, ces trois méthodes sont capables d'atteindre un bon niveau d'efficacité de distribution de l'eau (généralement jusqu'à plus de 90% pour le goutte à goutte et l'aspersion, 75% pour l'irrigation gravitaire). A noter que l'efficience de l'irrigation peut être définie comme la proportion d'eau appliquée qui est effectivement utilisée par la culture pour sa croissance. Le coût est également très variable, principalement en termes de main d'œuvre pour l'irrigation de surface, et surtout en capital pour l'irrigation sous pression.

a b c

Figure. 1: (a) Irrigation de surface sur les oliviers, Maroc, (b) Irrigation par aspersion sur des pommes de terre, France, (c) Irrigation en goutte-à-goutte sur les vignes avec des eaux usées traitées, France.

La durée de vie des systèmes d'irrigation varie également beaucoup en fonction de l'entretien, de la qualité de l'eau et de la sensibilité de la technique. Chacun présente des avantages et des risques dans les cas de réutilisation des eaux usées. Ces sources de variabilité dans les performances technologiques peuvent être contrôlées efficacement en appliquant des pratiques de gestion et de maintenance appropriées. Dans le cas de l'utilisation des eaux usées, cela implique des contraintes supplémentaires sur l'exploitation agricole. Par exemple, selon le processus de traitement, les systèmes d'irrigation doivent être conçus pour tenir compte des concentrations en nutriments et des solides en suspension (Capra and Scicolone, 2004), ou de la dispersion involontaire de polluants indésirables (pathogènes, bactéries et gènes de résistance aux antibiotiques, etc.).

Au niveau d'INRAE UMR GEAU, en lien avec mes compétences et thématiques antérieures de recherche en micro-fluidique, je me suis principalement focalisé sur la technique d'irrigation goutte à goutte ou micro-irrigation. Ce type d'irrigation est largement encouragé comme moyen d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau au niveau de la parcelle (Lamm et al., 2002), ce qui est vrai lorsque l'équipement est neuf mais d'autre part dépend également des pratiques des agriculteurs (Benouniche et al., 2014). Cette efficacité par rapport aux autres techniques d'irrigation s'explique par le fait que l'eau est appliquée directement à proximité immédiate de la plante, ce qui augmente l'efficience d'un point de vue distribution de l'eau à la plante (Lamm, 2013). Les systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte peuvent également améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments (grâce à la fertirrigation), réduire les besoins énergétiques et améliorer les pratiques culturales (Luquet et al., 2005). En matière de réutilisation de l'eau, cette technologie est considérée comme la meilleure option en termes de protection contre la dispersion et le contact avec des agents pathogènes.

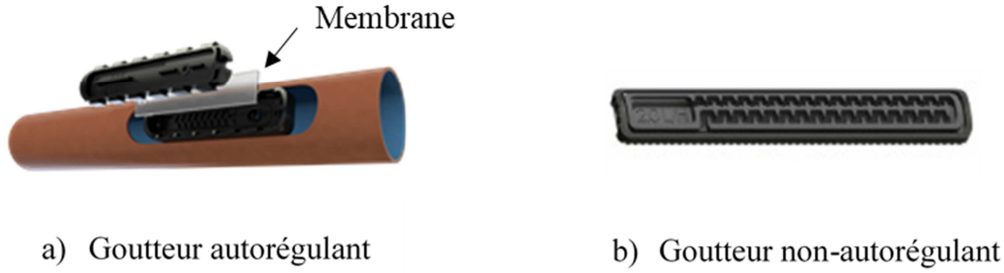


Figure. 2 : Catégories des goutteurs. Le goutteur autorégulant ou « à pression compensée » (a) est composé d'une membrane en silicone permettant de maintenir le débit attendu, quelle que soit la pression en entrée. Les goutteurs non autorégulant (b) se composent d'un labyrinthe qui va favoriser la perte de charge et l'énergie de turbulence, permettant de délivrer le débit attendu en sortie.

Les goutteurs peuvent être à « pression compensée » (ou autorégulant) ou non (Figure.2). Les goutteurs à pression compensée facilitent le contrôle de l'apport de l'eau par la présence d'une membrane en silicone qui va se déformer en réponse à des variations de pression. Cette déformation va permettre de maintenir le débit limitant l'effet des variations de pression en entrée (Goyal, 2017). Les goutteurs non autorégulant (Figure. 2) sont les plus utilisés dans le monde. Ils sont constitués de canaux en labyrinthe de faibles sections d'écoulement (de l'ordre du mm²) qui favorisent la perte de charge, la dissipation de l'énergie cinétique de turbulence et diminuent le débit de l'eau en sortie du goutteur (Al-Muhammad et al., 2016; Feng et al., 2018b).
Néanmoins, la durabilité à long terme de l'irrigation au goutte-à-goutte n'est pas encore assurée. La présence de nutriments et d'ions dans les eaux usées augmente la possibilité de précipitation

chimique et de développement d'un biofilm dans les goutteurs (Rizk et al., 2019). De plus, le colmatage dû à la sédimentation des solides en suspension peut rapidement entraîner une diminution significative des performances de distribution (Lamm et al., 2007; Bounoua et al., 2016; Lavanholi et al., 2020). Au niveau du terrain, la spécificité de ces eaux usées par rapport à l'eau conventionnelle n'est pas nécessairement prise en compte dans la conception et l'installation des équipements (goutteurs à haut débit, filtration, etc.) ou dans les protocoles de maintenance des systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte (par chloration et acidification). Cela peut se traduire par une perte rapide de l'investissement pour l'installation du goutte-à-goutte ou par l'utilisation massive de systèmes de goutteurs jetables (3 à 6 mois de durée de vie), ce qui n'est pas satisfaisant sur le plan environnemental car ceux-ci ne sont pas ou mal recyclés. Ainsi malgré ses avantages, la micro-irrigation est sensible au colmatage qui dépend notamment de la qualité de l'eau d'irrigation mais également de l'hydrodynamique le long de ces milli-systèmes fluidiques.

I.4 Le bio-encrassement dans les systèmes de micro-irrigation

Les biofilms sont des systèmes complexes hébergeant une communauté de microorganismes installée dans une matrice protectrice extracellulaire associée à une surface. Ils peuvent être formés à partir d'une ou plusieurs espèces (Flemming and Wingender, 2010). Ces biofilms fonctionnent comme des « super-organismes », ce qui sous-tend un haut niveau d'organisation et la mise en place de mécanismes de communication et d'interaction entre les cellules afin de maintenir l'intégrité de ces structures microbiennes. Les biofilms constituent le mode de vie privilégié des bactéries dans la nature, alors que la phase planctonique ne serait qu'un passage permettant la dissémination vers de nouvelles surfaces (Kolter and Greenberg, 2006).

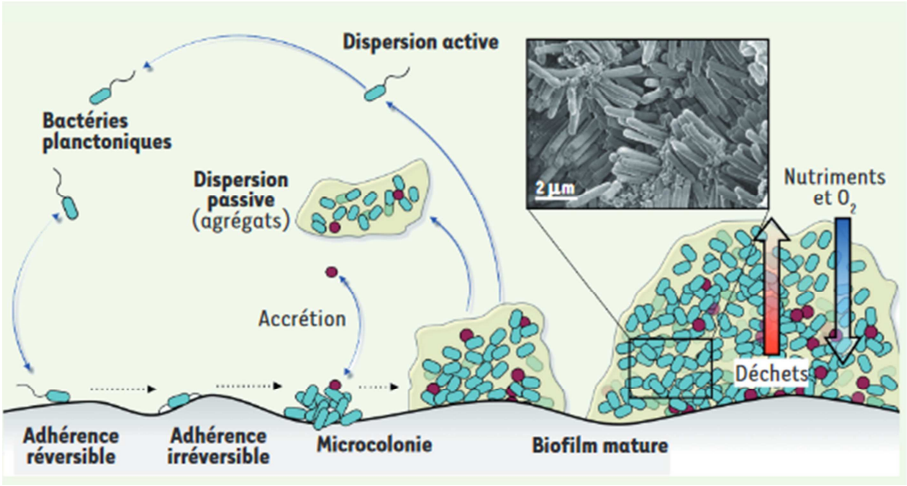


Figure. 3 : Étapes de formation d'un biofilm bactérien (Lebeaux and Ghigo, 2012). Après les phases d'adhérence réversible puis irréversible, la bactérie fonde une microcolonie qui produit une matrice extracellulaire (en jaune) et qui peut accueillir d'autres espèces microbiennes par accrétion. Le biofilm mature est le site de gradients inverses en nutriments (flèche bleue) et en déchets (flèche rouge) définissant des niches physiques et chimiques. Il peut se disperser et libérer des bactéries mobiles (dispersion active) ou des agrégats bactériens entourés de matrice (dispersion passive). Une photographie de microscopie électronique d'un biofilm d'*E. coli* développé in vivo sur cathéter est présentée en insert.

La matrice extracellulaire est essentiellement composée d'eau (jusqu'à 97 %), et de substances polymériques sécrétées par les microorganismes (EPS, Exopolysaccharides ou Extracellular Polymeric Substances) rassemblant des polysaccharides, des protéines, des d'acides nucléiques (ADN, ARN), des phospholipides et des acides humiques, ainsi que des produits de dégradation et de substances provenant du milieu extérieur (Mansour and Elshafei, 2017). Les EPS aident à la formation du biofilm en créant des ponts avec les cations multivalents et par le maintien des interactions hydrophobes. Ils jouent un rôle dans les phases d'adhérence du biofilm à la surface et assurent la protection des bactéries face aux conditions environnementales défavorables. Ils influencent aussi la capture des nutriments de l'environnement externe au biofilm par les bactéries (Flemming et al., 2016). Des canaux et des pores permettent l'écoulement de l'eau et le transfert des ions et des nutriments dans les différentes couches des biofilms. Durant les processus de formation du biofilm, les bactéries vont alterner entre deux différents phénotypes : sessiles et planctoniques. Le passage au mode planctonique permet de coloniser d'autres environnements lorsque les conditions sont nécessaires (besoin de nutriments, forte compétitivité, etc.). La figure. 3 présente le modèle type de développement au cours du temps d'un biofilm. Ces différentes phases de formation du biofilm mettent en jeu des mécanismes intrinsèquement liés à la coopération et à la compétition cellulaire en lien avec l'écoulement et le transfert de matière.

Le colmatage biologique des goutteurs est causé par la présence naturelle de nombreux micro-organismes dans notamment les eaux usées. Une haute concentration en matière organique dissoute et la présence de bactéries vont induire la formation de biofilm. La formation des biofilms dans les systèmes d'irrigation est une source importante de colmatage. En effet, sa présence augmente l'adhérence des dépôts physiques et chimiques tels que le carbonate de calcium ou les particules qui sont en suspension dans l'eau d'irrigation (Adin and Sacks, 1991) ce qui accentue le problème de colmatage. Le chapitre IV de ce manuscrit sera en partie dédié à ces interactions biofilm et précipitation chimique. Ainsi, la compréhension des mécanismes participant à la mise en place du colmatage biologique est considérée comme un facteur clé afin d'optimiser les méthodes de contrôle.

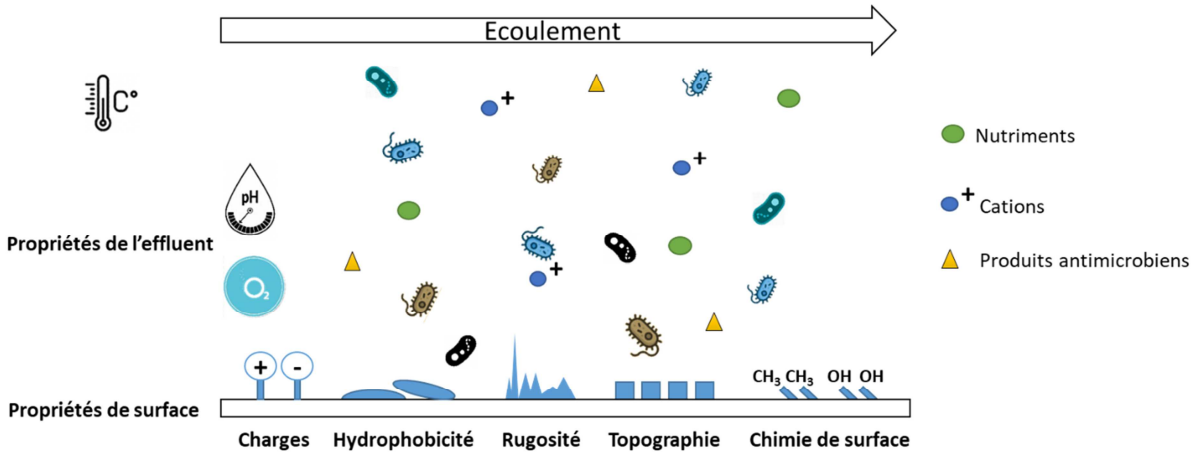


Figure. 4: Illustration schématique des différents paramètres influençant l'adhésion bactérienne et le développement des biofilms (Thèse Lequette, 2020).

Dans le cadre des systèmes d'irrigation, plusieurs paramètres peuvent conditionner l'adhésion et le développement des biofilms (résumés dans la figure 4) tels que le pH, la température de l'eau, la quantité de nutriments, les paramètres hydrodynamiques, les propriétés de surface des matériaux utilisés (Stoodley et al., 1999). Par exemple, la température de l'eau régule directement l'activité métabolique, la croissance des microorganismes et leurs activités et donc joue un rôle essentiel dans l'activité globale des biofilms (Brunke and Gonser, 1997; Friberg et al., 2013). A noter que la température dans les conduites d'irrigation peut atteindre plus de 50 °C sur le terrain (Gamri et al., 2014). Les paramètres hydrodynamiques le long des labyrinthes (ex. section de l'écoulement, longueur du labyrinthe, géométrie des chicanes) des goutteurs sont étroitement liés aux risques de colmatage (Feng et al., 2018). D'un point de vue géométrie et écoulement, les approches utilisées pour limiter le colmatage consistent à optimiser l'auto-nettoyage des zones tourbillonnaires en augmentant l'énergie de cinétique de turbulence ou le cisaillement dans ces parties (Niu et al., 2010; Wei et al., 2005). Ainsi, Li et al. 2019a ont mis en évidence que la vitesse moyenne au niveau de la section transversale (v) des goutteurs était corrélée au degré de colmatage. Je reviendrai plus en détail sur l'effet de l'écoulement sur les mécanismes d'encrassement dans la suite de ce manuscrit.

En pratique agricole, les méthodes de nettoyage de type purge hydrique (augmentation de pression) ou chloration et injection d'acide sont les plus couramment utilisés pour leur coût et leur facilité de mise en place. Cependant, l'effet de la chloration sur les cinétiques de formation des biofilms a été peu étudié dans les systèmes d'irrigation. Une des rares études sur le sujet a montré que, malgré l'efficacité de la chloration à maintenir les débits et à étendre la durée de vie du système d'irrigation, elle ne permet pas de supprimer totalement le biofilm qui peut, en cas d'arrêt des procédures de traitement, croître plus rapidement (Katz et al., 2014). La présence de biofilm dans des environnements traités au chlore est souvent associée à la résistance des microorganismes aux désinfectants. Ainsi, Song et al., (2019) ont montré une diminution de la concentration en acides gras phospholipidiques (PLFAs, Phospholipid-derived fatty acids, utilisés comme biomarqueurs) dans les biofilms des goutteurs alimentés avec des eaux usées traitées, mais une augmentation de l'abondance relative des Firmicutes (Bactéries Gram +) au fil du temps, groupe connu pour inclure des bactéries résistantes au chlore (Wang et al., 2015; Zhao et al., 2020). Identifier les microorganismes résistants à la chloration apparaît nécessaire pour comprendre les limites de ce traitement.

Comme pour la chloration, la fréquence de la purge (hebdomadaire à mensuelle) influence directement l'efficacité de la méthode et la durée de vie du système (Lamm, 2013; Li et al., 2015, 2018; Puig-Bargués et al., 2010). Il est donc recommandé de purger le système aussi souvent que possible, mais cela peut aussi favoriser le développement d'un biofilm résistant (Li et al., 2015). Ceci s'explique par la résistance de certains microorganismes face à l'augmentation des forces de cisaillements et à la capacité du biofilm à s'adapter face à des conditions environnementales défavorables. Li et al., (2015) ont observé que la concentration en EPS des biofilms était plus faible avec une purge bi-hebdomadaire plutôt qu'hebdomadaire, mais que l'activité microbienne des biofilms était plus élevée avec une purge hebdomadaire. Ils n'ont cependant observé aucun effet significatif sur la composition microbienne de ces biofilms analysée par la caractérisation des PLFAs.

D'un point de vue méthodologique, l'évaluation de ces paramètres sur le colmatage des goutteurs est généralement réalisée au travers la mesure des débits en sortie et il y a peu d'information

concernant les cinétiques de formation du colmatage au cours du temps. Généralement, on se contente d'un suivi de la variation des débits en sortie selon la méthode classique développée par Karmeli, (1998) afin de comparer par exemple les effets de la qualité des eaux d'irrigation ou le type de dispositifs commerciaux. Ce qui m'a semblé limitant pour appréhender les cinétiques temporelles et les zones préférentielles d'obstruction en lien avec le transport de particules ou le développement de biofilm. Ceci s'explique par le fait que pour visualiser et analyser la composition du colmatage, dans la majorité des recherches, les goutteurs commerciaux sont généralement extraits de gaine d'irrigation en fin de cycle ne permettant pas de suivre son évolution dans le temps. Nous verrons dans ce manuscrit que cette approche n'est pas suffisante pour analyser les phases d'encrassement.

I.5 Voies de recherches identifiées

Comme détaillé dans les parties précédentes de mise en contexte, la détermination des différents phénomènes de colmatage selon la qualité des eaux d'irrigation a fait l'objet de nombreux travaux. Paradoxalement, les approches développées dans la communauté micro/milli-fluidique ont été rarement mobilisées dans le domaine de l'irrigation pour améliorer la compréhension des mécanismes d'encrassement et la durabilité de ces systèmes. Et ce bien que ce type d'irrigation se base principalement sur un dispositif milli-fluidique appelé goutteur ayant une section d'écoulement environ 1 mm^2 afin de dissiper l'énergie et produire en sortie des gouttelettes (les débits varient entre 0,6 à 4 $l.h^{-1}$).

De même qu'introduire dans ces systèmes milli-fluidiques des milieux complexes que constituent les eaux non-conventionnelles, une matrice composite d'éléments chimiques et biologiques, est également originale. Travailler avec des eaux usées non synthétiques permet notamment de répondre à la capacité des biofilms formés dans les systèmes d'irrigation à inactiver des espèces microbiennes 'en transit' : effet d'épuration naturelle par action des bactéries indigènes (effet 'barrière'). Une approche encouragée par l'OMS pour les projets de réutilisations des usées traitées en agriculture comme complément à la désinfection au même titre que le microbiome du sol mais qui n'a fait le sujet de très peu d'étude.

Plus largement le suivi et la compréhension du colmatage dans le domaine de la micro-fluidique ou micro-procédés, quelles que soient les applications, ont rarement été abordés dans littérature, comme le soulève l'article de Dressaire and Sauret, 2017. Ce qui pourra être un autre champ d'investigation des travaux et approches que je présente dans ce manuscrit.

Partant de ces différents verrous scientifiques, les recherches qui sont exposées dans mon dossier d'HDR ont pour objectif de développer une meilleure connaissance des caractéristiques de l'écoulement et des phénomènes en jeu lors du bio-encrassement dans les dispositifs de micro-irrigation avec des eaux non-conventionnelles. Je propose notamment d'évaluer le lien entre hydrodynamique dans les systèmes milli-fluidiques en labyrinthe (dispositif goutteur) et développement des biofilms: vitesse de colonisation, structure des communautés microbiennes et présence éventuelle de bactéries pathogènes. L'impact des procédés de nettoyage (chloration, purge hydrique) sera également évalué. J'aborderai également dans le

chapitre IV l'effet de la contrainte de cisaillement sur la cinétique de développement du biofilm en lien avec la précipitation chimique.

Ainsi notant que les phénomènes d'encrassement sont intiment liées à l'hydrodynamique, mon premier axe de recherche a été d'approfondir la compréhension de l'écoulement caractéristique des milli-canaux en labyrinthe (détaillé dans le chapitre II).
Deuxièmement, dans le milieu complexe que constitue les eaux non-conventionnelles, je me suis focalisé sur l'étude du développement du biofilm et des communautés bactériennes associées (ou bio-encrassement) en interaction avec les paramètres d'écoulement et les différents contaminants bactériologiques présents dans l'eau (cet aspect est détaillé dans le chapitre III).
Dans la partie suivante du manuscrit (chapitre IV), je m'intéressai à l'effet spécifique du cisaillement à la paroi sur la cinétique de croissance du biofilm en lien avec précipitation chimique à l'aide d'un réacteur Taylor-Couette. Dans mes recherches, le fil conducteur a été de consolider le lien entre ces différents axes interdépendants.

La figure. 5 synthétise les problématiques et les approches de recherche qui sont développées dans ce manuscrit.

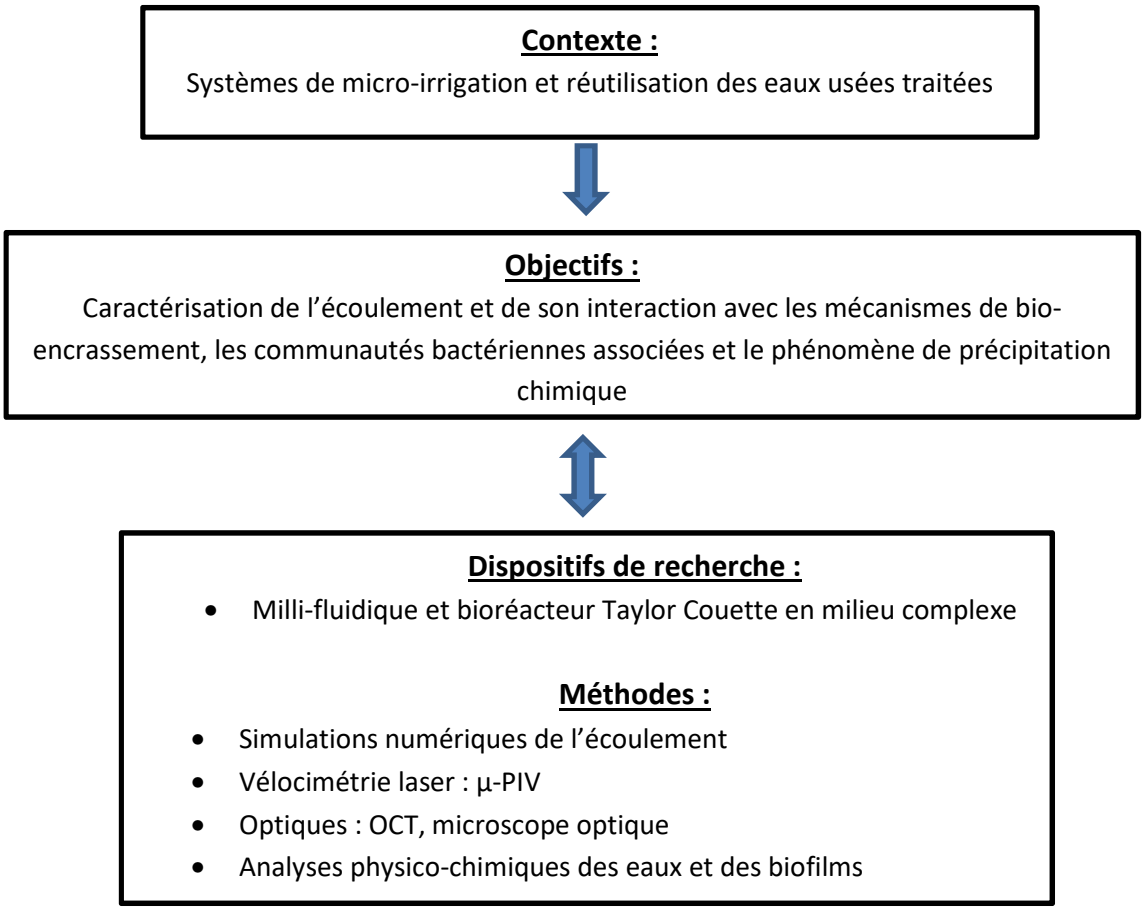


Figure. 5 : Schéma synthétique des voies et démarches de recherche identifiées.

Dans ce manuscrit, pour chaque chapitre, je m'attacherai d'abord à décrire les méthodologies et les outils développés, puis je présenterai succinctement les résultats obtenus en s'appuyant sur des

articles et travaux de thèse. Je conclurai ce mémoire en exposant mes perspectives de recherche. Les cinq articles suivants ont été choisis comme représentatifs de ces recherches. Ils seront référencés spécialement dans le texte et sont livrés intégralement en annexe :

1. **Kévin Lequette,** Nassim Ait-Mouheb, Nicolas Adam, Marine Muffat-Jeandet, Valérie Bru-Adan, Nathalie Wéry. Effect of chlorination and pressure flushing of drippers fed by reclaimed wastewater on biofouling" Science of the Total Environment Jr (2021).

2. **Kevin Lequette,** Nassim Ait-Mouheb, Nathalie Wéry. Hydrodynamic effect on biofouling of milli-labyrinth channel and bacterial communities in drip irrigation systems fed with reclaimed wastewater (2020). Science of the Total Environment, 738 139778, https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.139778

3. **Jafar Al-Muhammad,** Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Muriel Amielh, Fabien Anselmet. Experimental and numerical characterization of the vortex zones along a labyrinth milli-channel used in drip irrigation. International Journal of Heat and Fluid Flow, 80 (2019) https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijheatfluidflow.2019.108500

4. **Nancy Rizk,** Nassim Ait-Mouheb, Bruno Molle, Nicolas Roche. Treated wastewater Reuse in micro-irrigation: effect of shear stress on biofilm development kinetics and chemical precipitation. Environmental Technology, 1-29 (2019). https://dx.doi.org/10.1080%2F09593330.2019.1625956

5. **Jafar Al-Muhammad,** Séverine Tomas, Nassim Ait-Mouheb, Muriel Amielh, Fabien Anselmet. Micro-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in drip irrigation. Experiments in Fluids, 59 (12), 16 (2018). https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00348-018-2633-x

Chapitre II. Caractérisation numérique et expérimentale de l'écoulement le long des milli-canaux en labyrinthe

II.1 Introduction

Une compréhension précisée de l'écoulement dans les goutteurs est nécessaire pour analyser les mécanismes susceptibles d'aboutir à un colmatage.

Une des premières questions que l'on peut se poser : Comment déterminer et caractériser le régime d'écoulement dans de tels systèmes ? Les débits attendus en sortie des goutteurs d'irrigation sont généralement compris entre 0,6 et 4 $l.h^{-1}$ pour des pressions en entrée comprises entre 50 et 400 kPa (Goldberg et al., 1976). Ces faibles valeurs de débit sont obtenues en générant des pertes de charge à l'aide d'un canal d'écoulement généralement de géométrie en labyrinthe et d'une section transversale d'environ 1 mm^2. Par conséquent, le nombre de Reynolds en entrée, sur la base de la vitesse moyenne et du diamètre hydraulique, est de l'ordre de 300 à 2220.

Le nombre de Reynolds, Re, est défini par :

$$Re = \frac{\rho|\overline{u}|_{entrée} D_h}{\mu} \qquad (1)$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$), ρ est la densité du fluide ($kg.m^{-3}$), u ($m.s^{-1}$) est la vitesse à l'entrée et D_h (m) le diamètre hydraulique.

Dans une conduite circulaire lisse et droite, un écoulement établi est considéré comme étant laminaire pour un nombre de Reynolds Re ≤2300, turbulent pour Re≥4000 et transitoire entre ces deux valeurs du nombre de Reynolds. Ainsi, pour un débit moyen dans un goutteur de 2 $l.h^{-1}$, on peut estimer en entrée que le nombre de Reynolds varient entre 500 à 600, ainsi l'écoulement serait en principe laminaire selon la classification standard. Cependant, dans la littérature, notamment dans le domaine de l'irrigation, le régime d'écoulement est souvent considéré comme étant turbulent en raison de la spécificité de l'hydrodynamique des milli-canaux en labyrinthe. Ces derniers étant composés de plusieurs chicanes qui présentent autant de singularités pour l'écoulement et rendent beaucoup plus complexe le calcul du nombre de Reynolds critique. Néanmoins, on peut citer les travaux de Nishimura et al., (1984) qui ont étudié un canal à paroi ondulée symétrique (Figure 6). Ils ont constaté que la transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent se produit lorsque le nombre Reynolds atteint 350. Par analogie, on peut également citer les travaux qui s'intéressent aux régimes d'écoulement dans des milieux poreux. Le fluide subit en effet lors de la traversée d'un pore des variations de vitesse et des changements de direction. Dans ces systèmes,

les changements de régimes d'écoulement sont caractérises avec des nombres de Reynolds qui sont définis en fonction de ces spécificités.

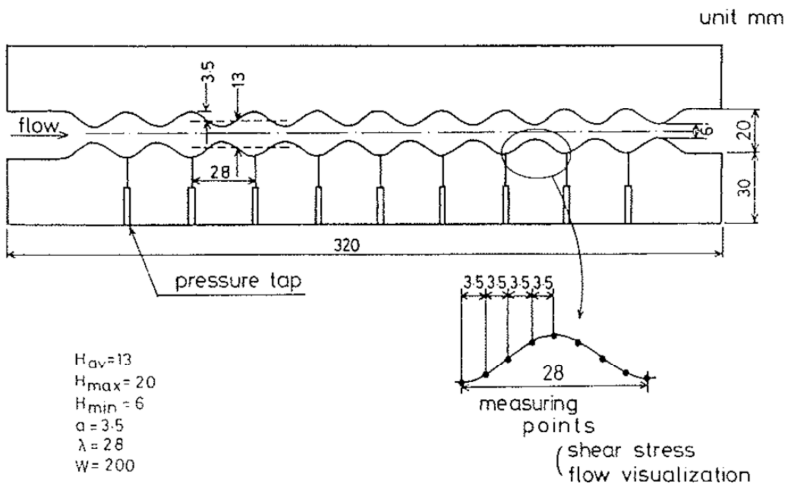


Figure.6: Schéma du canal à paroi ondulée symétrique étudié par Nishimura et al., (1984).

De fait, presque toutes les études de l'écoulement réalisées sur la géométrie du goutteur à canal en labyrinthe ont été réalisées par calcul numérique et à l'aide de modèles turbulents tels que le modèle k-ϵ (Wei et al., 2012; Ait-Mouheb et al., 2019). Généralement, les modèles supposent que l'écoulement est isotrope c'est-à-dire que les composantes du champ turbulent sont toutes équivalentes et donc $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$ dans les trois directions spatiales x, y et z (Pope, 2000). Quelques études utilisent cependant des modèles non isotopiques comme le modèle Reynolds Stress Transport Model (RSM) (Zhang et al., 2007). D'un point de vue expérimental, actuellement seuls quelques travaux ont été réalisés sur la caractéristique de l'écoulement du fluide dans le goutteur à canal labyrinthe, mais pas forcément en déterminant le régime d'écoulement. Ce manque d'études expérimentales peut être justifié par la difficulté d'effectuer ces mesures à cette échelle. On peut donner comme exemple la méthode Vélocimétrie Laser Doppler (LDV) utilisée par Zhang et al., (2007) ou la vélocimétrie par image de particules (PIV) utilisée par Li et al., (2008) pour évaluer les caractéristiques de l'écoulement.
Il est à noter que d'autres auteurs décrivent l'écoulement tridimensionnel au sein des systèmes micro-fluidiques en labyrinthe comme de l'advection chaotique en régime laminaire. Ceci s'explique parfaitement par la théorie des systèmes dynamiques (Cartwright et al., 1999), où l'on montre qu'un champ de vitesse très simple mais instationnaire peut entrainer des trajectoires complexes en trois dimensions, dites trajectoires chaotiques. Ainsi, un écoulement laminaire siégeant dans un milli-canal serpentin peut, selon Lin and Yang, 2007, créer du chaos dans les trajectoires pour des nombres de Reynolds allant de 6 à 70.

A partir de ce constat, tout l'enjeu a été de clarifier et d'améliorer notre compréhension de cet écoulement spécifique. Dans ce chapitre, je vais présenter les travaux que j'ai mené numériquement et expérimentalement afin d'y répondre. Ces études ont été menées notamment dans le cadre de la thèse de Jafar Al-Muhammad.

II.2 Approches µ-PIV et numériques mises en œuvre

II.2.1 Protocoles

Afin d'analyser l'écoulement dans un goutteur, les méthodes retenues ont été la simulation numérique et la µ-PIV. La Vélocimétrie par Image de Particules ou PIV est une technique de mesure non-intrusive basée sur la diffusion de la lumière et qui permet de mesurer les deux composantes planes de la vitesse dans une section de l'écoulement (2D). Elle repose sur l'ensemencement de l'écoulement par des particules-agissant comme traceur, l'enregistrement à deux instants distincts de leurs positions et la mesure de leur déplacement. Pour travailler à ces micro-échelles de mesure (de l'ordre du mm^2), l'équipement PIV a été complété par des dispositifs optiques de grossissement. Une cellule milli-fluidique en plexiglas de qualité optique adaptée aux mesures µ-PIV a été réalisée pour reproduire en partie la géométrie d'un goutteur intégré turbulent (Ce type de goutteur est le plus répandu dans l'irrigation goutte à goutte). Le goutteur commercial est composé de 60 chicanes. Nous avons simplifié la géométrie du canal en labyrinthe à dix chicanes dans la cellule transparente illustrée sur la figure 7. Les mesures ont été effectuées pour des nombres de Reynolds d'entrée allant de 345 à 690 (respectivement, des débits de 1,44 $l.h^{-1}$ et 2,88 $l.h^{-1}$).

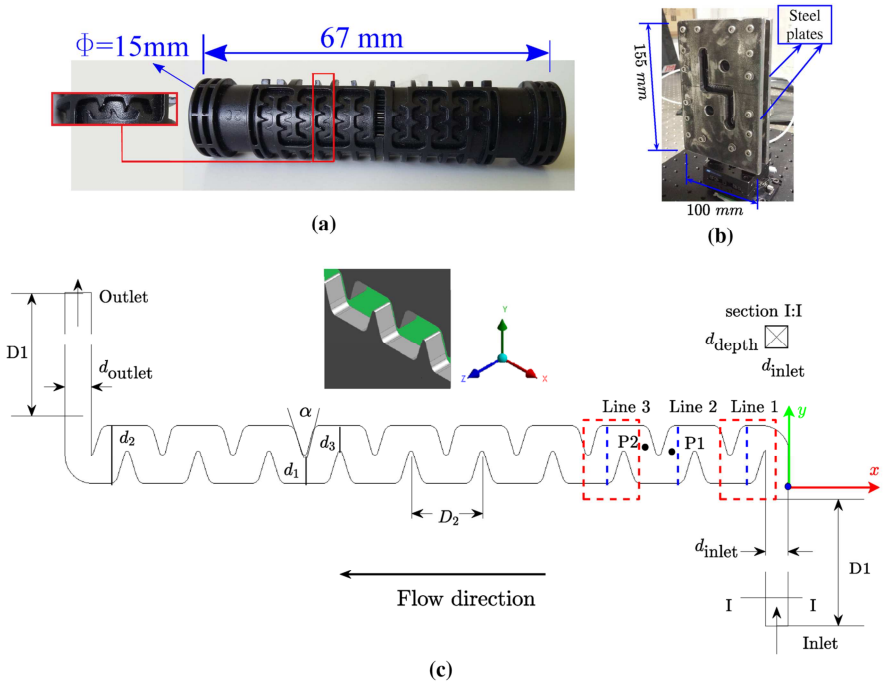


Figure. 7: Dispositif micro-fluidique et goutteur étudié. A) Géométrie industrielle du goutteur avec un zoom de l'unité de base constituée de trois déflecteurs (unité à canal labyrinthe). B) Goutteur par prototype utilisé pour effectuer l'analyse de µ-PIV. C) Dix déflecteurs à canal labyrinthe constitutifs du prototype de goutteur. Les points P1 et P2, les lignes et les rectangles colorés représentent les zones où les résultats seront analysés.

Pour nos simulations numériques, comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, il n'existait pas de modèle de turbulence établie dans la littérature pour nos écoulements en labyrinthe. Ainsi avant comparaison avec les résultats de la µ-PIV, nous avons donc testé différents modèles de

turbulence k-ϵ (k-ϵ standard et k-ϵ bas nombre de Reynolds) et Reynolds Stress Transport Model (RSM). D'autres modèles plus complexes tels que le modèle LES (large eddy simulations) ont été utilisés par la communauté scientifique (Wu et al., 2013). Mais, ces modèles sont plus coûteux en temps de calcul et en mémoire.

Les modèles k-ϵ bas nombre de Reynolds se basent sur une modification du modèle k-ϵ standard pour tenir compte des effets visqueux en proche paroi. Les modélisations proposées consistent à introduire des fonctions d'amortissement dans l'expression de la viscosité turbulente et dans l'équation du taux de dissipation pour forcer la décroissance de la turbulence dans la zone de proche paroi. Ainsi, dans la gamme de nombre de Reynolds en jeu dans nos goutteurs (entre 400 et 800), les modèles k-ϵ bas nombre de Reynolds semblaient opportun et ont été comparés: [Abid] (Abid, 1991), [LS] (Launder and Sharma, 1974), [AKN] (Abe et al., 1994) et [CHC] (Chang et al., 1995). On ne présente ici qu'une partie des résultats des simulations numériques effectuées durant la thèse de Jafar Al-Muhammad 2016.

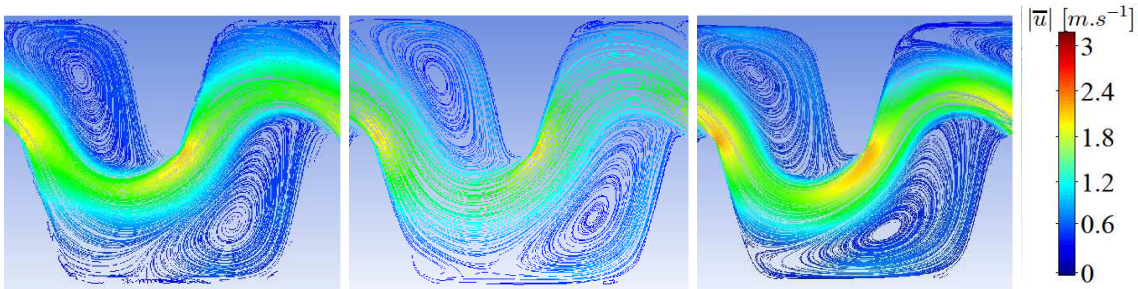
Contrairement aux modèles k-ϵ, le modèle Reynolds Stress Transport Model (RSM) suppose une turbulence anisotrope. Par conséquent, l'hypothèse de Boussinesq n'est pas utilisée dans le modèle RSM. Ce modèle ferme les équations de Navier-Stokes moyennes de Reynolds en résolvant des équations de transport pour les contraintes de Reynolds, ainsi qu'une équation pour le taux de dissipation ϵ. Le modèle RSM tient compte des effets de la courbure de la ligne, de la rotation et des changements rapides de la vitesse de déformation, il a un plus grand potentiel pour donner des prévisions précises pour des écoulements en milli-labyrinthe.

Les simulations de l'écoulement ont été effectuées en régime stationnaire sur une géométrie du milli-labyrinthe en trois dimensions (3D) à l'aide du le logiciel CFD ANSYS/Fluent.

II.2.3 Résultats et discussion

Effets des modèles numériques de turbulence sur l'écoulement

Premièrement afin d'illustrer l'effet des modèles de turbulence k-ϵ standard, Launder et Sharma [LS] et RSM sur nos résultats de simulation numériques, les lignes de courant obtenues, pour un nombre de Reynolds en entrée valant à 800, sont présentées sur la figure 8.



(a) RSM **(b) k-ϵ Standard** **(c) LS**

Figure. 8: Les champs du module de vitesse moyenne obtenus numériquement pour Re=800 et les modèles de turbulence LS, k-ϵ standard et RSM.

Après le canal d'entrée, les champs de vitesse le long du milli-labyrinthe se partagent en deux configurations d'écoulement. Ainsi sous l'effet des courbures du canal, le fluide se répartit en une zone d'écoulement préférentiel au centre et de plusieurs zones de recirculation dans les recoins du milli-canal en labyrinthe. Ces dernières zones sont caractérisées par une faible valeur de vitesse (Figure 8 et 9). Ces résultats sont corroborés par différents travaux de la littérature (Zhang et al., 2007; Wu et al., 2013).

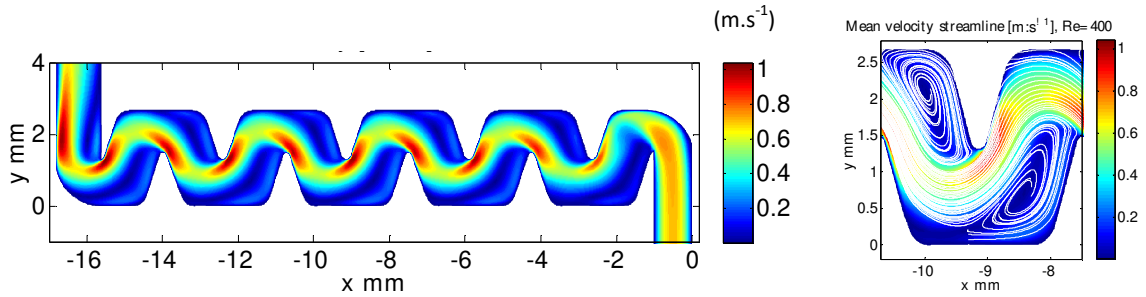
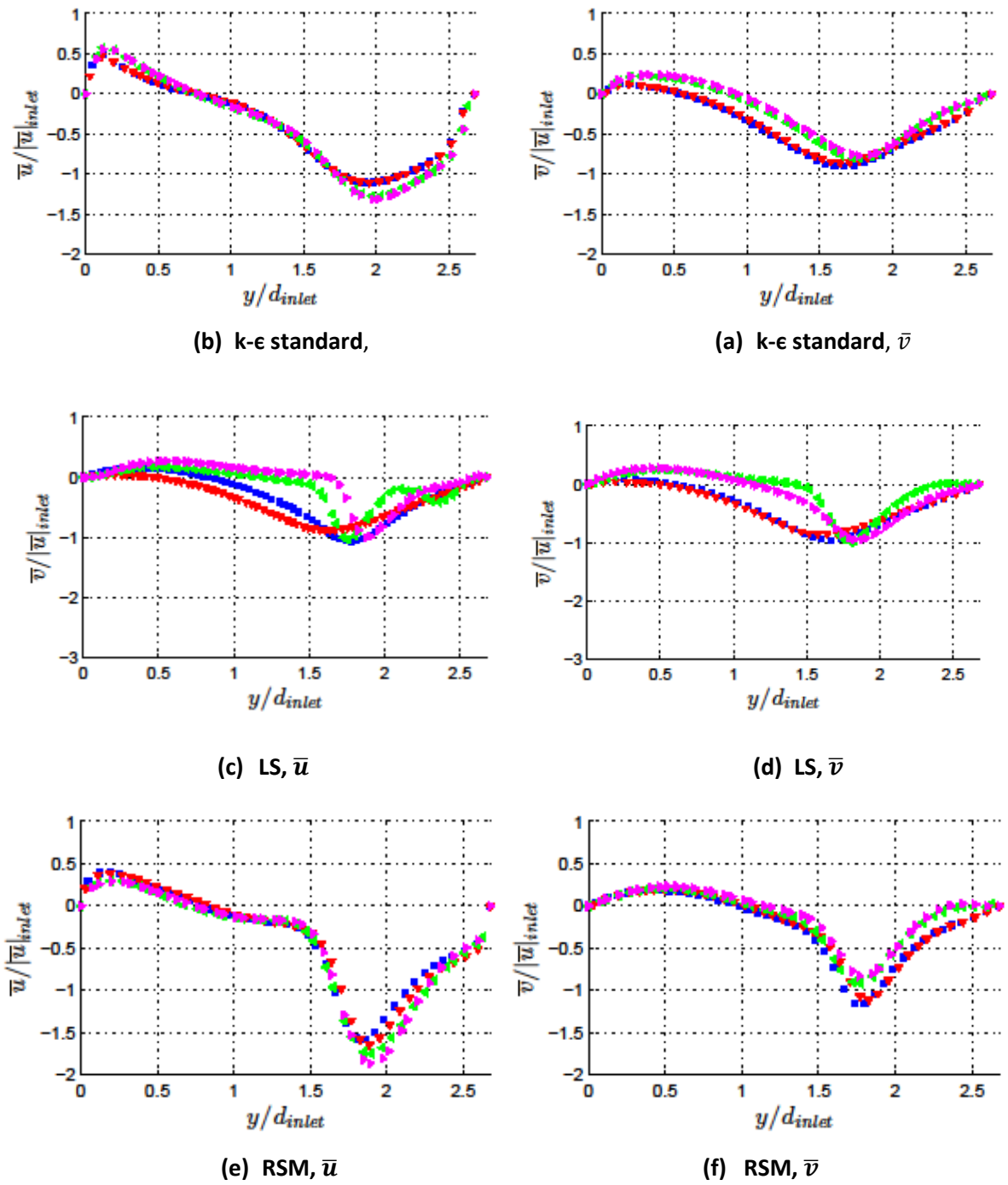


Figure. 9 : Champs de vitesse moyens obtenus numériquement par modèle k-ϵ standard le long du canal du labyrinthe et lignes de vitesse dans le 3ème chicane à z=0,5 mm et Re=400.

Mais selon les modèles de turbulence sélectionnés, on note que les contours des lignes de courants correspondant aux zones tourbillonnaires sont de deux types, soit de forme ovale telle que pour les modèles k-ϵ standard et RSM, ou de forme oblique, allongée et large pour modèle [LS] et [CHC]. Le tracé des profils de vitesse moyenne normalisés par rapport à la vitesse d'entrée permet de mieux comprendre l'évolution de l'écoulement et l'influence des modèles numériques de turbulence (Figure 10). Pour Re= 800, tous les profils $\bar{u}$ et $\bar{v}$ normalisés ont deux pics et un creux qui est situé au centre du tourbillon. Les valeurs des pics et des creux varient d'un modèle à l'autre. Ainsi du fait de l'occupation variable des zones tourbillonnaires, la vitesse de l'écoulement préférentiel central est également plus ou moins élevée (conservation de la masse). Sur la figure 10, on peut observer également que la vitesse pour plusieurs modèles varie le long du canal (entre la ligne 2 à la ligne 3 de la figure 7). C'est à dire que l'écoulement n'est pas encore constant et qu'il change d'une chicane à l'autre comme pour les modèles [LS] et [CHC]. Un état développé semble être atteint juste après la première chicane pour les modèles k-ϵ standard et RSM. A noter que la différence entre les résultats obtenus à l'aide des modèles k-ϵ bas nombre de Reynolds peut être liée à la variabilité des fonctions d'amortissement introduites dans l'expression de la viscosité turbulente et dans l'équation du taux de dissipation pour forcer la décroissance de la turbulence dans la zone de proche paroi.

Ainsi la fluctuation des résultats numériques selon les modèles de turbulence ne peut être tranchée qu'après une validation expérimentale avec des mesures locales en µ-PIV.



(b) k-ϵ standard, **(a) k-ϵ standard, $\overline{v}$**

(c) LS, $\overline{u}$ **(d) LS, $\overline{v}$**

(e) RSM, $\overline{u}$ **(f) RSM, $\overline{v}$**

Figure. 10 : Évolution des profils $\overline{u}$ et $\overline{v}$ normalisés du module de vitesse moyenne sur les lignes 2 (■) et 3 (■) pour Re = 800 et les trois modèles k-ϵ standard, LS et RSM.

Analyse expérimentale de l'écoulement

De la même manière que les simulations numériques, selon les mesures µ-PIV, le fluide se répartit également en une zone d'écoulement préférentiel au centre et plusieurs zones tourbillonnaires dans les angles du milli-canal en labyrinthe. Ces dernières zones sont caractérisées par une faible valeur de vitesse (Figure. 11). Dans le cas de l'étude Al-Muhammad et al., (2018) , le module de vitesse moyen varie dans les zones tourbillonnaires de 0,05 à 0,2 m.s^{-1} pour Re = 345 (0,1 à 0,4 m.s^{-1} pour Re = 690). A noter que, dans la gamme des débits étudiés, les pourtours des zones tourbillonnaires ne sont pas

modifiés par l'augmentation du débit en entrée. Dans la zone d'écoulement préférentiel la vitesse atteint 1,2 m.s $^{-1}$ pour Re = 345 (2,2 m.s^{-1} pour Re = 690). A noter que si on se focalise seulement que sur cette section d'écoulement, le nombre de Reynolds atteint environ 1200 (pour Re= 690 en entrée du canal).

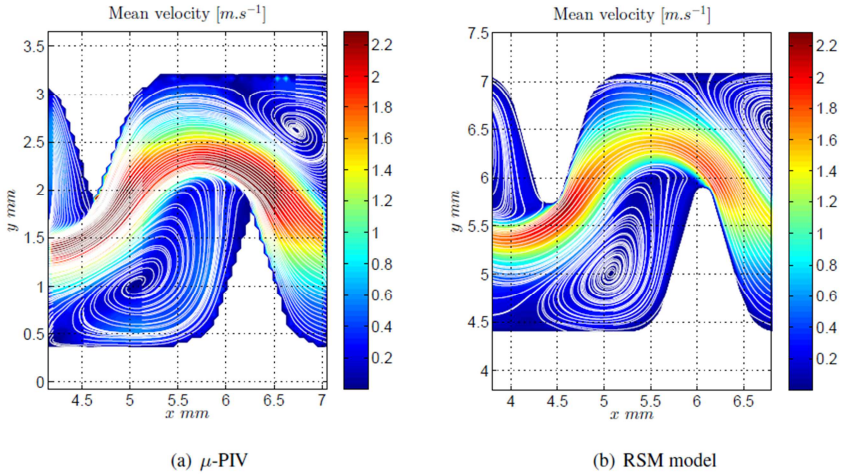


Figure. 11 : Lignes de courant et module de vitesse obtenus par CDF (modèle RSM) et µ-PIV pour Re= 690 en entrée.

En se déplaçant le long du milli-canal, on observe expérimentalement que l'écoulement devient établi à partir de la 2ème chicane, comme pour le modèle numérique k-ϵ standard et RSM. Je reviendrai sur l'importance de ce point dans les mécanismes d'encrassement dans le chapitre III. Une discussion approfondie de l'ensemble des résultats est disponible dans la section "Results and Disussion" de l'article Al-Muhammad et al., 2018. Mais afin de valider l'hypothèse d'un régime turbulent dans notre système milli-fluidique, ce paragraphe présente les résultats obtenus sur les contraintes de Reynolds en relation avec le gradient de vitesse moyen.

Les contraintes de Reynolds $\overline{u'v'}$ et les champs du second ordre de la vitesse $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ sont calculés et tracés à l'intérieur de la troisième chicane pour Re = 345 et Re = 690 (Figure 12). Les contraintes de Reynolds expriment l'influence des fluctuations sur l'écoulement moyen. On peut observer que les contraintes de Reynolds sont 3 à 4 fois plus élevées pour Re = 690 en comparaison avec Re = 345. Dans les 2 conditions, $\overline{u'^2}$ et $\overline{v'^2}$, dans la direction respectivement x et y, sont maximales dans l'écoulement principal près de la zone de séparation. Les contraintes de Reynolds sont faibles et même proche de zéro (pour $\overline{u'v'}$) dans les zones de recirculation. On note également que les échelles de grandeur des fluctuations de vitesse de second ordre sont dans la première chicane moins importants par rapport à la troisième chicane, par exemple, $\overline{u'^2}$ =0,15 m^2.s^{-2} et 0,5 m^2.s^{-2} respectivement.

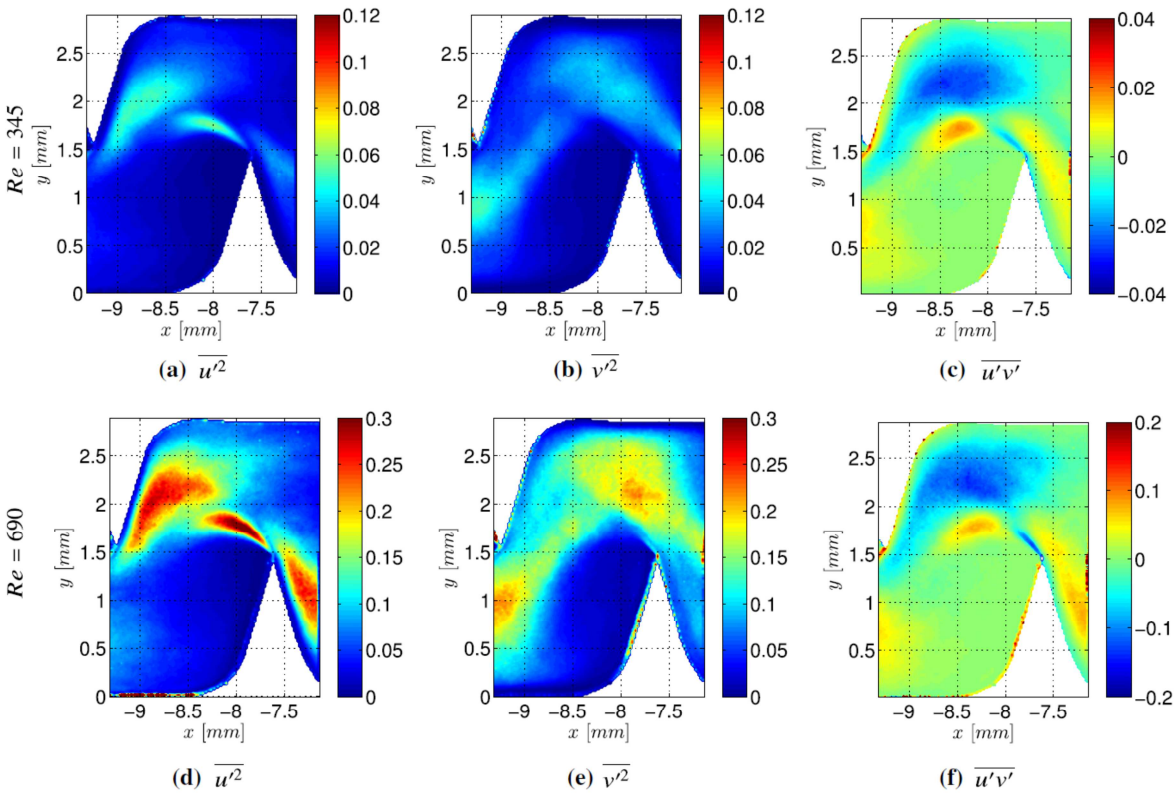
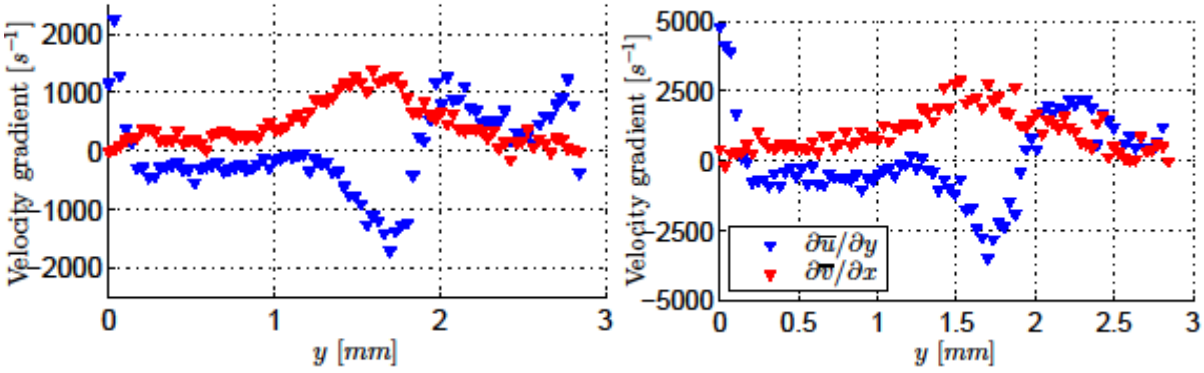


Figure. 12: Profils des contraintes de Reynolds et les champs du second ordre de la vitesse à l'intérieur de la 3ème chicane du labyrinthe, obtenus par µ-PIV pour Re = 345 (a-c), Re = 690 (d-f).

Dans les écoulements turbulents, la contrainte moyenne de cisaillement est composée de deux termes, $\tau = \tau_{visc} + \tau_{turb}$ ou $\tau_{visc} = \mu(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x})$ et $\tau_{turb} = \overline{-\rho u' v'}$ est lié au gradient de vitesse, par l'hypothèse de Boussinesq.



a) Re=345 b) Re=690

Figure. 13 : Dérivées de la vitesse moyenne le long de la ligne 3 pour: a) Re = 345 et b) Re = 690.

Les profils de $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ *et* $\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}$ sont tracés sur la ligne 3 pour déterminer le terme dominant et/ou les valeurs du terme dans ce sens. $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ *et* $\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}$ ont la même ampleur. En proche paroi, lorsque y = 0, $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ est égal à

2200 et 5000 s^{-1} et donc τ = 2,2 et 5 Pa, pour Re = 345 et Re = 690, respectivement. En conséquence, les valeurs de - $\overline{u'v'}$ sont égales à 0,0022 et 0,005 $m^2.s^{-2}$.

Analyse de l'isotropie

Un des paramètres importants pour la compréhension de notre écoulement est son caractère ou non isotrope. Cette caractéristique est notamment importante pour le choix des modèles numériques mais également influence les mécanismes d'encrassement et de transfert de matière. Le rapport $\overline{u'^2}/\overline{v'^2}$ a été calculé dans la troisième chicane de notre labyrinthe. Dans la figure 14, les valeurs positives de $\log_{10}(\overline{u'^2}/\overline{v'^2})$ correspondent aux régions où $\overline{u'^2}$est supérieur à $\overline{v'^2}$ alors que les valeurs négatives sont pour le cas contraire. Ainsi pour Re = 690, la valeur maximale de $\log_{10}(\overline{u'^2}/\overline{v'^2})$ est égale à 0,8, ce qui donne $\overline{u'^2}/\overline{v'^2}$= 6,31. Cela indique que le l'écoulement est fortement anisotrope, avec une substitution périodique des contributions majeures de u et v, comme on peut le voir très près des parois (où les niveaux de rouge et de bleu alternent).

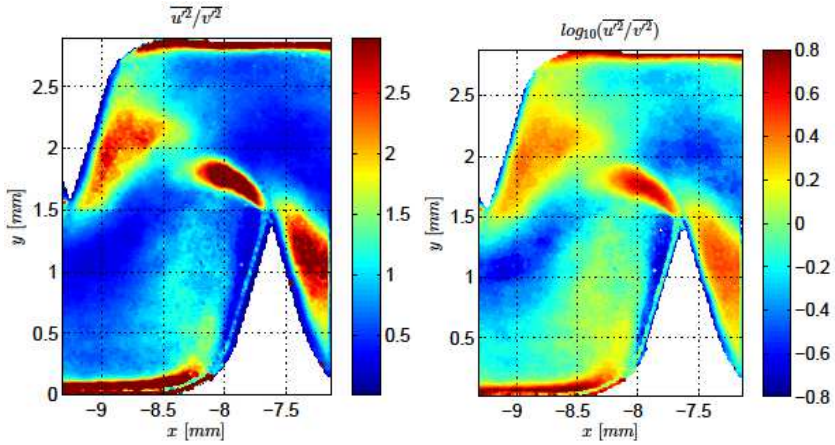


Figure. 14: Profils du rapport $\overline{u'^2}/\overline{v'^2}$et $\log_{10}(\overline{u'^2}/\overline{v'^2})$ calculés dans la troisième chicane à Re = 690.

Notre étude expérimentale valide l'hypothèse d'un écoulement turbulent et non-isotrope dans notre système d'étude malgré la relativement faible valeur du nombre de Reynolds en entrée. Le confinement de l'écoulement dans une géométrie présentant de faibles sections et le changement brusque dans la direction de l'écoulement peuvent expliquer ces résultats. Numériquement il est donc important de prendre en compte ces caractéristiques dans le choix des modèles CFD en vue par exemple de l'optimisation de la fonction dé-colmatation de l'hydrodynamique du design des goutteurs (des perspectives d'études que j'aborderai dans le chapitre V).

Comparaison numérique et µ-PIV de l'écoulement

D'après les conclusions sur l'écoulement turbulent et non-isotrope discuté précédemment, on a retenu pour les résultats de l'étude numérique que ceux obtenus par le modèle de Reynolds Stress Transport Model (RSM) dérivé par Launder and Reece (1975) .
En premier, l'étude numérique ou expérimentale démontre à travers le tracé des lignes de courant une répartition similaire entre une zone d'écoulement préférentielle au centre et plusieurs zones de

recirculation (Figure 11). Le modèle RSM prédit approximativement la même zone de recirculation que la µ-PIV, même si le centre du tourbillon n'est pas exactement dans la même position.
Si on compare dans la Figure 10 les champs de module de vitesse moyens obtenus par le µ-PIV et les simulations numériques, on remarque que les vitesses sont plus importantes pour les résultats de la µ-PIV : 1,65 et 1,55 fois plus grand pour Re = 345 et Re = 690 respectivement. Expérimentalement, l'erreur d'estimation peut être liée à des effets de gradients de vitesse locaux qui dépendent de plusieurs paramètres parmi lesquels le nombre de particules d'ensemencement dans la fenêtre d'interrogation (Westerweel, 2000). Ce nombre n'est pas bien contrôlable dans la zone du vortex observée durant les expériences de µ-PIV, compte tenu de la complexité de la géométrie.

Le modèle numérique surestime légèrement également la vitesse dans l'écoulement principal. Il est caractérisé par une vitesse du fluide plus élevée, pour par exemple Re = 690, de 5 % par rapport aux valeurs expérimentales. Cette faible différence semble toutefois liée aux zones de recirculation, où le modèle sous-estime de 75% le module vitesse moyenne par rapport aux valeurs expérimentales. En effet, la forme des tourbillons est légèrement modifiée. Numériquement, les centres des tourbillons sont plus proches de la paroi. A noter que ces conclusions prennent en compte nos tests préalables d'indépendance du maillage. Ces résultats soulèvent l'importance de ces zones de recirculation sur les paramètres globaux d'écoulement (débit en sortie des goutteurs, perte de charge et dissipation..). Ce qui nous a incités à introduire des méthodes avancées d'analyse des zones de recirculation afin de distinguer notamment la taille des tourbillons.

Extraction des zones tourbillonnaires par critère Q

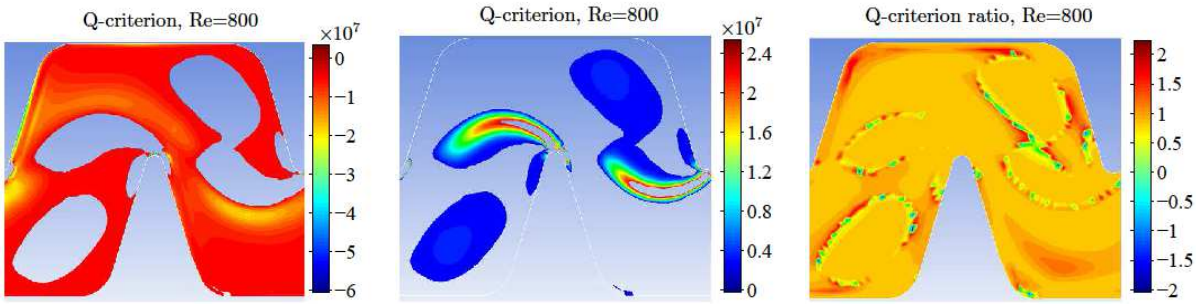
Afin d'identifier avec plus de précision les zones de mouvement tourbillonnaire et de cisaillement, il existe différents critères et méthodes mathématiques permettant d'identifier les structures turbulentes cohérentes (tourbillons) de manière quantitative. Il n'existe à ce jour aucune méthode universellement acceptée pour identifier une structure cohérente (Haller, 2005; Green et al., 2007). Nombre de ces méthodes font appel au tenseur du gradient de vitesse moyenne (Chakraborty et al., 2005 ; Green et al., 2007). Dans ce paragraphe, je vais discuter nos résultats obtenus spécifiquement avec le critère Q (le critère λ_2 est détaillé dans l'article Al-muhammad et al., 2019) .

Le critère Q défini selon Green et al., (2007) :

$$Q = \frac{1}{2}(\|\bar{\Omega}\|^2 - \|\bar{S}\|^2) \qquad (2)$$

Où Ω est le terme de rotation du tenseur $\nabla\bar{u}$ et S le terme de cisaillement du tenseur $\nabla\bar{u}$.

Le critère Q définit un vortex comme une " région d'écoulement reliée avec un second invariant positif de $\nabla\bar{u}$ ". Les tourbillons cohérents sont alors définis comme des régions de l'écoulement ayant des valeurs positives de Q et une pression inférieure à celle de l'environnement immédiat (Chakraborty et al., 2005), celles-ci peuvent facilement être visualisées comme des iso-surfaces. En examinant la définition du second invariant, nous pouvons voir que Q représente l'équilibre local entre le taux de déformation par cisaillement et l'ampleur du tourbillon (Hunt et al., 1988 ; Kolàr, 2007).



a **b** **c**

Figure. 15: Critère Q normalisé – (a) taux moyen de déformation (Q>0) et (b) de vorticité (Q<0), (c) rapport Q3D/Q2D pour Re= 690, modèle RSM en 3D.

Les champs de critères Q obtenus numériquement sont présentés pour un nombre de Reynolds en entrée de 800 sur la figure 15. Le critère Q aide à séparer et à distinguer la zone de tourbillon de la zone de cisaillement. Il apparaît que les intensités varient linéairement avec le nombre de Reynolds, tandis que la taille et la position de la zone de recirculation varient très légèrement avec Re. Le critère Q confirme ce qui a été observé précédemment par les lignes de courant : la taille et la position des structures tourbillonnaires dépendent très peu du nombre de Reynolds dans la gamme étudiée. Néanmoins, les limites de ces zones de tourbillons sont quelques peu imprécises puisque les valeurs Q y sont très faibles. Par conséquent, le rapport entre Q en 3D et Q en 2D a également été calculé numériquement. Dans la figure 15, le rapport Q3D/Q2D met en évidence les limites de la zone de tourbillon où les petites valeurs positives en 3D deviennent de petites valeurs négatives en 2D lorsque la troisième composante est éliminée (comme avec les données µ- PIV).
Ainsi, le critère Q permet de distinguer entre le taux de déformation par cisaillement et les zones tourbillonnaires, ce paramètre sera ainsi essentiel dans une perspective également d'optimisation des fonctions dé-colmatation des goutteurs tout en gardant la fonction dissipation d'énergie des milli-canaux en labyrinthe.

Analyse numérique de la turbulence

Ce paragraphe introduit le nombre de Reynolds des turbulences locales et une échelle de temps caractéristique t_L obtenue uniquement numériquement. L'objectif est d'analyser les variations de ces paramètres dans les différentes régions de l'écoulement déjà mentionnées, telles que l'entrée, l'écoulement principal et les zones tourbillonnaires.

Le nombre de Reynolds de turbulence Re_t est calculé par l'équation :

$$Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \qquad (3)$$

Une analyse détaillée des termes constituant ce ratio permet de comprendre le résultat de la figure 16:

$$\frac{Re_t}{Re} = \frac{k}{\varepsilon}\frac{k}{|\overline{u}|^2}\frac{|\overline{u}|}{d} \qquad (4)$$

Les profils de Re_t/Re sont tracés le long de la ligne 3 (Figure 7) et présentés dans figure 16. Ils sont presque identiques aux deux nombres de Reynolds étudiés, même si Re_t/Re pour Re = 345 est

légèrement plus élevé que pour Re = 690 dans la région d'écoulement préférentiel. Cependant, près des parois, le rapport tend vers 0 car Re_t est nul à la paroi.

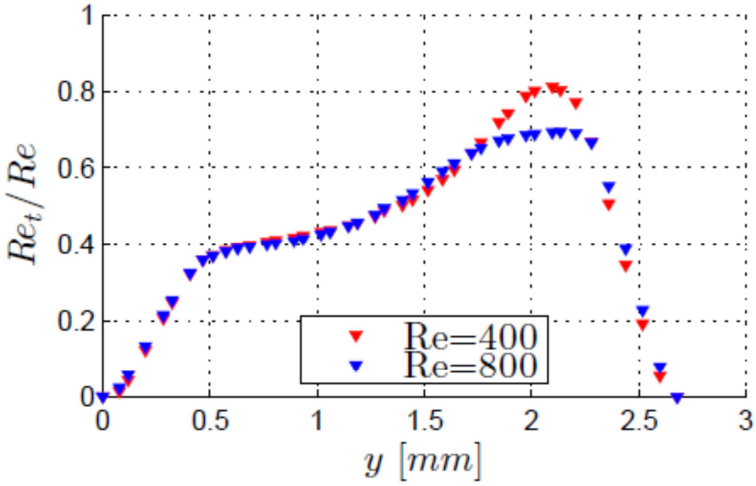
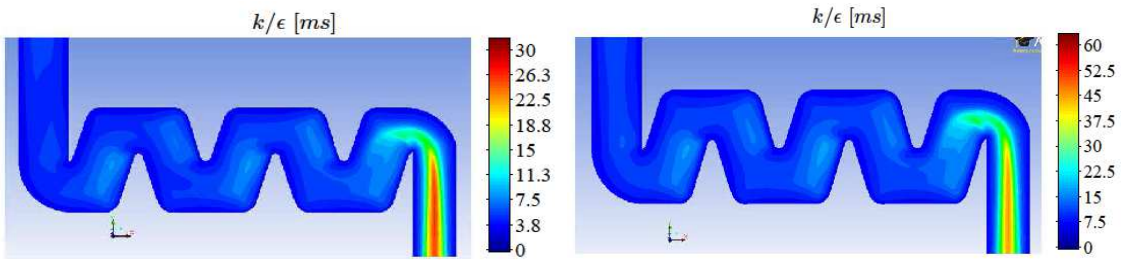


Figure. 16: Rapport du nombre de Reynolds de turbulence Re_t au nombre de Reynolds Re le long de la ligne 3 pour le modèle RSM en 3D.

Le rapport k/ϵ est présenté dans la figure 17 pour Re=400 et Re=800. Une échelle de temps (notée t_L), plus le temps de mélange est faible, plus l'écoulement est agité et turbulent. Cette échelle de temps est dans notre cas plus grande dans le canal d'entrée (Re_t~0), par rapport aux zones d'écoulement principal dans les chicanes. En outre, cette échelle de temps est également relativement plus grande dans la zone de recirculation que dans l'écoulement préférentiel. Par conséquent, l'hydrodynamique de l'écoulement, l'énergie cinétique de turbulence k et du temps de mélange sont des paramètres primordiaux dans les mécanismes, notamment de transport de particules ou des nutriments, et l'interprétation de l'encrassement des goutteurs (des facteurs discutés en détails dans la section II sur l'étude du colmatage).



(a) Re=400 (b) Re=800

Figure. 17 : k/ϵ rapport pour le modèle RSM en 3D.

II.3 Conclusion et voies de recherches identifiées

Pour autant que nous sachions, c'est la première fois qu'une telle technique de µ-PIV est mise au point pour analyser l'hydrodynamique dans un milli-canal labyrinthe constituant des goutteurs

d'irrigation. La caractérisation combinée µ-PIV et simulations numériques permet de déterminer avec une grande précision les différents paramètres hydrodynamiques notamment les champs de vitesse moyens et fluctuants selon les nombres de Reynolds en entrée.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le régime d'écoulement dans notre géométrie est turbulent et non isotrope, ce qui est lié à la faible section des canaux et au changement brusque de direction du fluide. Il est donc conseillé d'utiliser un modèle numérique qui peut prendre en compte les effets anisotropes, tel que le modèle RSM.

- Le long du canal, l'écoulement est composé d'une zone préférentielle et d'une zone de recirculation. Chacune de ces zones induisent des valeurs et des topologies spécifiques d'un point de vue hydrodynamique (sur les vitesses d'écoulement, paramètres de turbulence et le temps de mélange notamment) qui vont interagir sur le transport de particules et le développement de biofilm.

- Le critère Q a permis de différencier les contours tourbillonnaires de la zone d'écoulement préférentiel. Le critère Q permet de faire la distinction entre le mouvement de cisaillement et les zones de vortex. En conclusion, juste en aval de la chicane, il y a, comme prévu, une région tourbillonnaire mais de faible intensité par rapport à l'écoulement principal, où la forte valeur de vorticité est générée par le changement de direction de l'écoulement.

Les premiers résultats numériques obtenus avec la méthode proposée et développée sont très prometteurs car ils valident l'écoulement observé expérimentalement dans la maquette et offrent ainsi de nouvelles perspectives pour optimiser la géométrie des goutteurs. Cette optimisation doit tenir compte de l'équilibre entre l'amélioration du goutteur vis-à-vis du colmatage et l'obtention d'une bonne performance débit/perte de charge dans le même temps. Afin d'enrichir la compréhension de l'écoulement et du transport de particules, des expériences par méthode Particle Tracking Velocimetry (PTV) seraient intéressantes pour caractériser les trajectoires des particules ainsi que les phénomènes d'agglomération et de dépôt. Ces expériences pourront être également couplées à des travaux numériques de suivi de particules avec une approche lagrangienne ou eulérienne, en utilisant le modèle de turbulence RSM (partie détaillée dans le chapitre V des perspectives).

Les travaux que nous mènerons dans le chapitre III prendront en compte l'effet de notre écoulement sur les cinétiques de développement du biofilm et communautés bactériennes associés.

Chapitre III. Mécanismes d'encrassement des milli-canaux en milieu complexe

Dans ce chapitre, je vais présenter les travaux que j'ai conduits autour de l'analyse des phénomènes d'encrassement biologiques en interaction avec l'écoulement et les indicateurs pathogènes dans le cadre de la thèse de Kévin Lequette (2017-2020). Cela sera illustré à travers 2 exemples qui sont détaillés dans les articles (Lequette et al. 2020 et Lequette et al. 2021):

- Une première étude menée à l'échelle du laboratoire sur l'effet de l'écoulement et des débits sur la cinétique de mise en place et la composition microbienne des biofilms des goutteurs : le postulat est que la cinétique de développement dépend de l'hydrodynamique et que les microorganismes impliqués dans la mise en place du biofilm varient donc d'un type de goutteur à l'autre, illustrant l'effet de sélection induit par les caractéristiques de l'écoulement.

- Le deuxième exemple porte sur l'effet des méthodes de nettoyage (chloration et purge hydrique, combinées ou non) sur le contrôle du colmatage. Plusieurs études ont mis en évidence que bien que ces méthodes soient efficaces pour rallonger la durée de vie des systèmes de micro-irrigation, elles ne permettent pas de supprimer le biofilm du fait des mécanismes d'adaptation et de résistance des bactéries. L'hypothèse de travail est que la purge comme la chloration vont induire une sélection des microorganismes insensibles au traitement. Enfin un objectif opérationnel a été de définir le meilleur traitement : purge, chloration, ou la combinaison des deux.

III.1 Interaction écoulement, bio-encrassement et microbiotes

Approches couplées méthodes optiques et quantification des communautés microbiennes

Avant ces travaux, les caractérisations physico-chimiques et biologiques des biofilms des goutteurs étaient réalisées en extrayant les goutteurs commerciaux d'une conduite d'irrigation. L'extraction des goutteurs de la conduite d'irrigation est laborieuse et peut endommager le biofilm et affecter sa structure et composition. De plus, ceci ne permet pas de suivre les cinétiques de formation du biofilm étant donné que les goutteurs sont placés dans une conduite d'irrigation opaque noire. Pourtant, caractériser les dynamiques temporelles est nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents au colmatage des goutteurs. C'est pourquoi afin d'avoir une idée sur les cinétiques de formation des biofilms, il est possible d'utiliser des systèmes en flow-cell transparents dans lesquels sont gravés des labyrinthes mimant la géométrie des labyrinthes des goutteurs (Azeredo et al., 2017; Qian et al., 2017; Ait-Mouheb et al., 2018). Cependant, la conception de ces systèmes est coûteuse et le nombre de répliques est limité. De plus, les caractéristiques de surface (tension de surface, rugosité…) des matériaux utilisés pour la construction des flow-cells sont

différentes des celles des goutteurs. Sachant que le type de matériau et ses paramètres physico-chimiques influencent le développement des biofilms (Rochex et al., 2008; Gamri et al., 2015), l'utilisation de dispositif couplant des goutteurs commerciaux et un accès optique à l'aide d'une conduite transparente (Figure 18) nous semblait plus pertinente pour appréhender les mécanismes conduisant au colmatage. Ainsi, la conception d'un système optique a permis pour la première fois de suivre le développement du colmatage dans des goutteurs réels avec la méthode tomographie par cohérence (TCO ou OCT en anglais). Cette méthode optique permet de suivre le développement des biofilms de manière non invasive et non destructive à l'échelle du millimètre, permettant ainsi d'avoir des informations spatiales globales sur la distribution du colmatage dans les labyrinthes des goutteurs. La tomographie par cohérence optique repose sur le principe de l'interférométrie à partir d'une source lumineuse de faible cohérence pour détecter le contraste de diffusion dans un échantillon à partir d'un faisceau de référence (Figure 18).

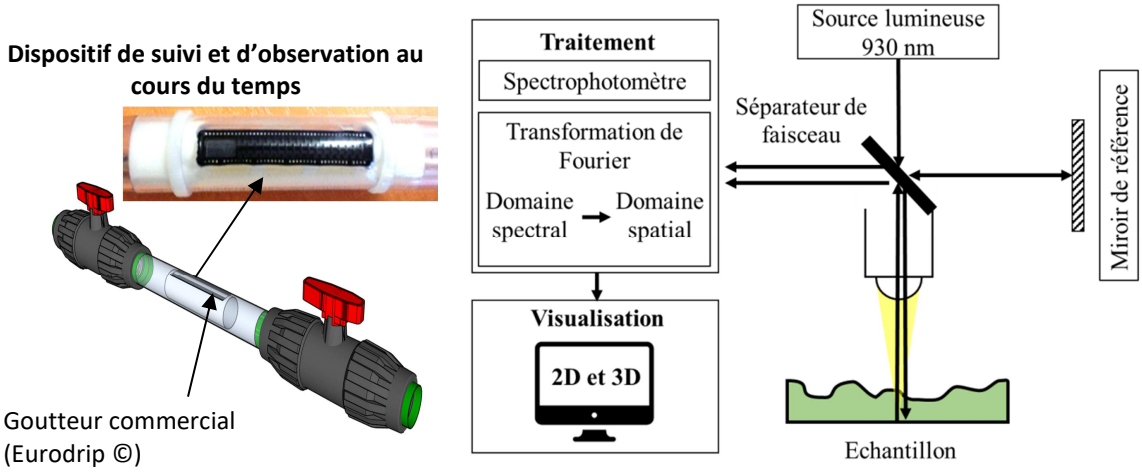


Figure. 18: Dispositif de suivi milli-fluidique et principe de la méthode OCT.

D'un point de vu méthodologique, il faut noter que la microscopie électronique à balayage (SEM) est l'une des techniques les plus utilisées pour caractériser la morphologie des biofilms. Elle permet de mettre en relation la topographie des biofilms avec la surface. D'autres technologies ont été développées incluant la microscopie confocale laser à balayage (CLSM), l'imagerie par résonnance magnétique (IRM) et la microscopie à transmission aux rayons X (STXM). Cependant, ces méthodes permettent de détecter et de suivre le biofilm à une échelle microscopique plutôt que mesoscopique (Wagner et al., 2010) (Figure 19). De plus, ces méthodes sont souvent invasives et non conservatrices vis-à-vis de l'échantillon, ce qui ne permet pas de suivre les cinétiques de développement du biofilm dans le temps. Morgenroth and Milferstedt, (2009) ont abordé l'importance des propriétés structurelles du biofilm à la mésoéchelle (échelle millimétrique), en particulier lorsque les biofilms doivent être compris plus en détail, par exemple, en ce qui concerne les aspects de la structure du biofilm, de sa fonction et des mécanismes de développement du biofilm. L'OCT permet de travailler à cette échelle (Figure 19). Néanmoins en perspective, il sera pertinent d'associer les méthodes microscopiques (CLSM ou microscope epifluorescence par exemple) pour approfondir la compréhension des mécanismes et la composition des biofilms.

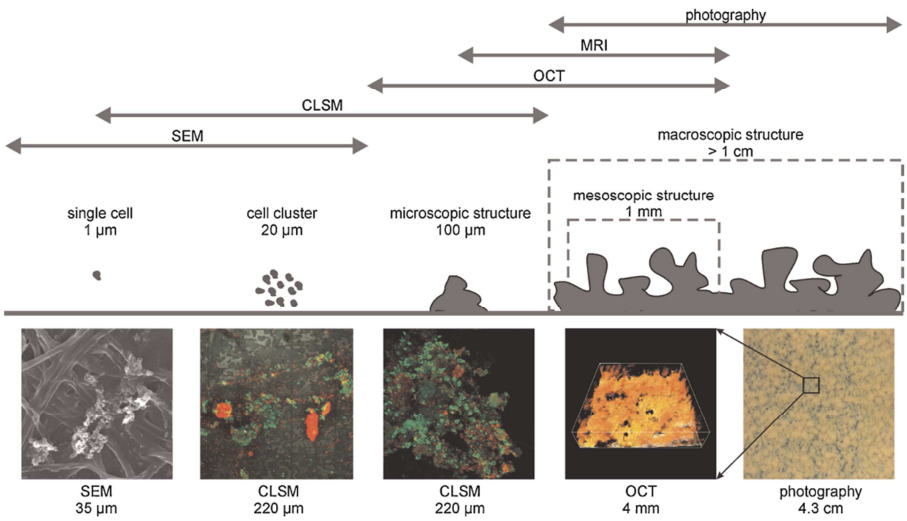


Figure. 19 : Techniques permettant d'étudier la structure des biofilms à différentes échelles. On peut noter que la résolution diminue de gauche à droite alors que le champ de vision augmente. SEM, Microscopie électronique à balayage ; CLSM, Microscopie confocale à balayage laser ; TCO ou « OCT », Tomographie par cohérence optique. (Wagner et al., 2010).

Ainsi, en parallèle et en collaboration avec le laboratoire INRAE LBE, l'objectif a aussi été de décrire la structure et la composition du microbiote par méthode de séquençage haut débit illumina pour identifier les microorganismes responsables du colmatage des goutteurs et l'effet des paramètres étudiés, tout en couplant ces informations aux données OCT. Des microorganismes d'intérêt sanitaire ont également été recherchés pour évaluer leur concentration en fonction des paramètres étudiés. L'objectif était de vérifier la possible concentration des pathogènes dans les biofilms ce qui pourrait constituer un potentiel risque dans le cas de détachement.

Dans le domaine de l'irrigation, ce couplage entre l'étude des cinétiques de croissance et des communautés associées a rarement été mobilisé pour la compréhension des facteurs d'encrassement biologique par des eaux usées traitées. Cela semble très innovant, associé à la caractérisation de l'hydrodynamique développée dans le chapitre II.

Effet de l'écoulement sur l'encrassement biologique des goutteurs

Au niveau d'une parcelle agricole, l'écoulement au sein d'un système d'irrigation goutte à goutte est différent suivant le dispositif considéré (conduite ou goutteur par exemple). Dans une étude préliminaire de Lequette et al., (2019), nous avons ainsi démontré que le microbiote associé aux biofilms des conduites d'irrigation était différent de celui associé aux biofilms des goutteurs. Ceci peut s'expliquer par le fait que le régime de l'écoulement était laminaire dans la conduite alors qu'il était turbulent dans les goutteurs. Ce qui nous a incités à approfondir l'approche sur différents débits de goutteurs.

Dans cette partie, je présente les résultats obtenus selon l'effet de l'écoulement de goutteurs, alimentés par des eaux usées traitées pendant 4 mois, sur le microbiote, les cinétiques et les zones préférentielles d'encrassement biologique selon les débits en sortie : 1, 2 et 4 $l.h^{-1}$ (Re=305, 579 et

926, respectivement). A noter que les débits en sortie des goutteurs dépendent des géométries et des sections des canaux (Tableau 1).

Tableau 1 : Paramètres des goutteurs étudiées

q ($l.h^{-1}$)	*L* (mm)	*W* (mm)	*h* (mm)	D_h	Volume total du labyrinthe (mm^3)	Re (entrée)	Géométries des Goutteurs
1	103.4	1.01	0.8	1.02	127	305	
2	94.1	1.03	0.9	1.12	142	579	
4	47.4	1.35	1.1	1.17	129	926	

L : longueur du trajet d'écoulement, W : largeur du canal, h : profondeur canal, q : débit, D_h : diamètre hydraulique.

Sur la figure 20, nos résultats démontrent que les zones les plus sensibles au colmatage pour 3 types de goutteurs étaient la zone d'entrée, la partie de retour (dans le cas du 1 et 2 $l.h^{-1}$), la fin du labyrinthe dans un moindre niveau. Au sein de ces trois zones, les coins des chicanes (zones de recirculation) constituent des points d'accumulation. Ces trois zones favorables au colmatage étaient également observées lors de l'étude portant sur l'effet de méthodes de nettoyage (chloration et/ou purge hydrique) pour limiter le colmatage (section III.2).

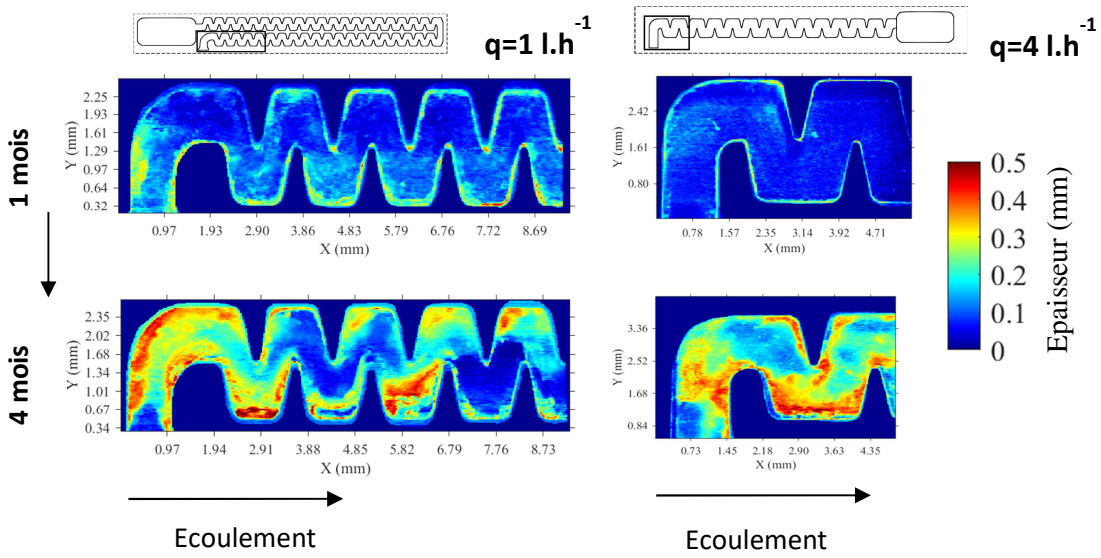


Figure.20: Cartographie de l'épaisseur du biofilm mesurée par la méthode OCT à l'entrée des goutteurs de 1 et 4 $l.h^{-1}$ mesurée après 1 et 4 mois.

En particulier, le colmatage commençait principalement au niveau de la première chicane d'entrée et des zones d'écoulement tourbillonnaire puis diminuait jusqu'à la zone de retour. Concernant cette dernière zone, les premières simulations de l'écoulement dans les goutteurs 1 et 2 $L.h^{-1}$ suggèrent

que les conditions hydrodynamiques (vitesse du fluide et énergie cinétique de turbulence) dans cette partie sont similaires à ceux en entrée du labyrinthe. En complément sur la figure 21, le calcul du volume d'occupation par méthode OCT spécifiquement dans la zone d'entrée démontre également l'effet des paramètres géométriques des milli-canaux et les débits de sortie.

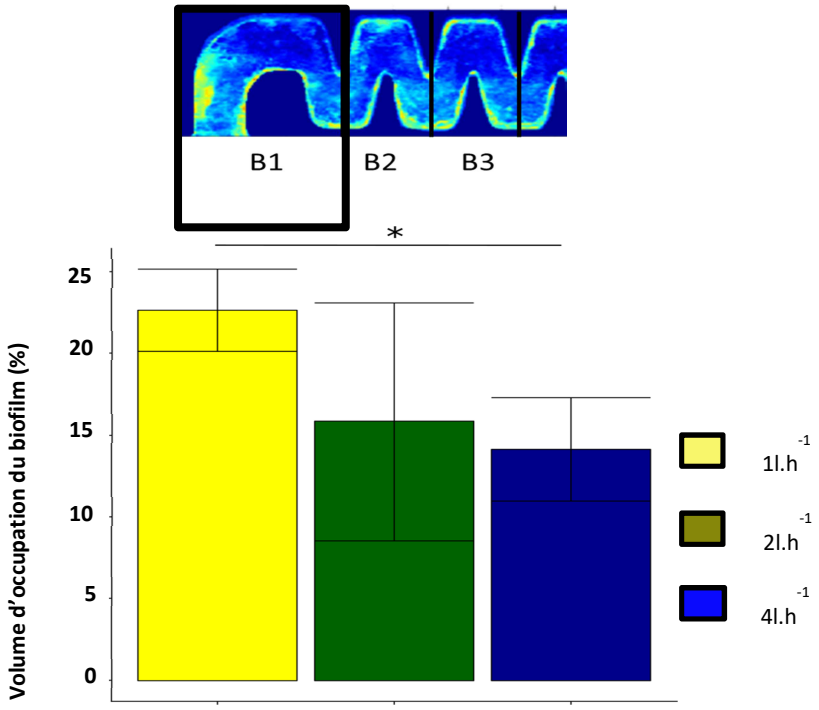


Figure 21: Volume d'occupation du biofilm dans le labyrinthe d'entrée pour des goutteurs de 1, 2 et 4 $l.h^{-1}$ après 4 mois de fonctionnement.

A pression constante en entrée, nous avons en parallèle constaté que malgré l'augmentation de l'encrassement, jusqu'à plus de 20% en entrée, les débits en sortie de nos goutteurs restent inchangées (Figure 22). Notre approche optique illustre ainsi que le biofilm peut être bien développé; cela ne se traduit pas forcément par une baisse de l'efficience de l'irrigation (jusqu'à un certain seuil qui reste à déterminer). Ainsi la méthode classique utilisée dans le domaine de l'irrigation ou sur le terrain pour caractériser l'état d'encrassement n'est pas suffisante pour améliorer la compréhension ou déterminer le niveau du colmatage.

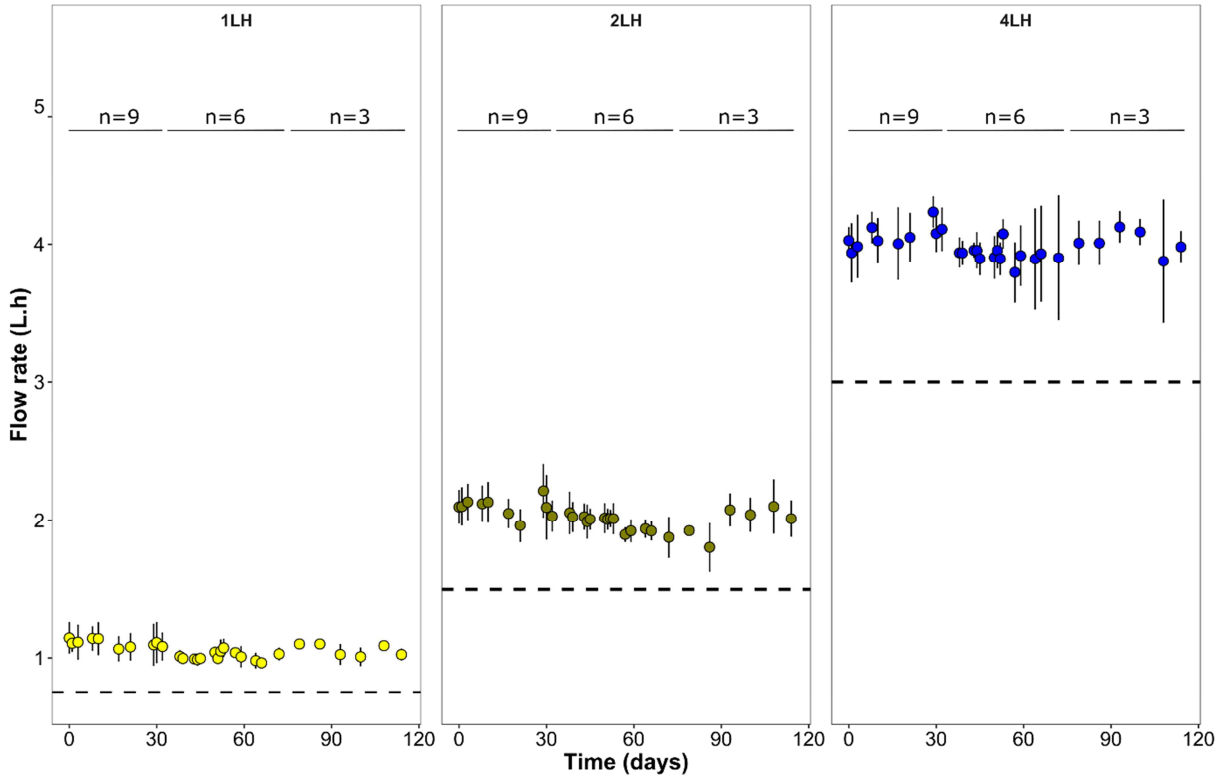


Figure. 22 : Débit moyen (et erreur type) en fonction du goutteur. Les goutteurs sont considérés comme colmatés lorsque le débit prévu était inférieur à 75% (ligne pointillée). n fait référence au nombre de goutteurs des lignes et réduit au fil du temps en raison des prélèvements pour l'analyse microbienne.

En lien avec ce que j'ai présenté en chapitre II, les études numériques et expérimentales de l'hydrodynamique le long des labyrinthes des goutteurs démontrent que l'écoulement en entrée n'est pas encore établi (ce n'est le cas qu'à partir de la 3ème chicane). En comparaison avec les autres parties, dans la zone d'entrée et de retour, les paramètres vitesses, temps de mélange (t_L) et énergie cinétique turbulente sont caractérisés par des valeurs favorables pour la croissance de biofilm (Ait-Mouheb et al., 2018; Al-Muhammad et al., 2019). Ces paramètres peuvent alors faciliter l'adhésion des bactéries ainsi que le transfert des nutriments vers les biofilms (Araújo et al., 2016). Pour autant, ce transfert sera favorable jusqu'à une certaine limite. Par exemple, Li et al., (2012) ont montré qu'en dessous de 0,45 m.s^{-1} dans des conduites, la formation des biofilms était principalement contrôlée par le transport des nutriments et des particules en suspension. Au-dessus, c'est principalement le taux de cisaillement qui contrôle le développement des biofilms.

De nombreuses études rapportent que les biofilms se développant sous vitesse et cisaillement faibles sont moins denses et plus poreux. Cette porosité va ainsi faciliter le transfert des nutriments dans le biofilm. À l'inverse, les biofilms se développant sous condition de vitesse et de cisaillement élevés sont plus denses et moins poreux (Wagner et al., 2010). Aussi, une concentration élevée de nutriments favorise la croissance du biofilm, mais s'accompagne d'une force adhésive relativement faible (Liu et al., 2019). En reprenant les travaux de (Stoodley et al. 1999), on peut alors voir se dégager des liens entre hydrodynamique, croissance de biofilm et transfert de nutriments en fonction de la zone où l'on se trouve dans le labyrinthe:

- Le long des parois de la zone d'écoulement principal, la contrainte de cisaillement est si élevée que l'épaisseur du biofilm est resté faible.

- Dans le canal d'entrée et les zones tourbillonnaires des premières chicanes et de retour, les conditions hydrodynamiques et le transfert des nutriments sont plus favorables au développement du biofilm.

- A partir de la chicane 3, dans les zones tourbillonnaires, bien que caractérisées par de faibles contraintes de cisaillement, le renouvellement limité des nutriments restreint le développement du biofilm. Cette dernière supposition devra être confirmée par une étude numérique ou expérimentale du transfert de matière.

Au cours de ces travaux, bien que nous n'ayons pas qualifié et quantifié la densité et la porosité des biofilms des goutteurs, nous avons pu noter que les biofilms se développant dans les goutteurs 1 $l.h^{-1}$ semblaient visuellement moins denses et plus poreux que les biofilms des goutteurs 4 $l.h^{-1}$. L'analyse de la densité et de la porosité, en mesurant le nombre de pixels/voxels « vides » dans le biofilm, permettrait d'approfondir la compréhension de l'effet de l'écoulement sur la structure des biofilms et le transfert des nutriments, comme proposé par Gierl et al., (2020) et Rosenthal et al., (2015). De plus, les biofilms ont des propriétés viscoélastiques qui leur permettent de se déformer afin de résister par exemple à des changements brusques dans les conditions hydrodynamiques (Picioreanu et al., 2018). Ceci peut expliquer pourquoi, dans le cadre de l'expérimentation « Nettoyage », l'utilisation de la purge seule n'a pas eu d'effet sur le volume et la distribution du biofilm le long du labyrinthe ainsi que sur le microbiote des biofilms des goutteurs 1 $l.h^{-1}$ par rapport à la chloration.

Effet du type de goutteur sur la structure de la sous-communauté bactérienne regroupant des genres incluant des espèces pathogènes

Combinée à la méthode optique OCT, la méthode de séquençage haut débit, nous a permis pour la première fois de relier une cinétique de formation du colmatage en micro-irrigation à une communauté microbienne spécifique. L'analyse de la structure de la communauté des OTUs associés aux genres bactériens incluant des espèces pathogènes (Figure 23) a confirmé l'effet du type de goutteur (à 115 jours d'essai, Adonis test, r^2=0,41, p-value < 0,05) ainsi que une évolution dans le temps pour chaque type de goutteur (Adonis test, r^2 =0,61 pour 1 $l.h^{-1}$, r^2=0,73 pour 2 $l.h^{-1}$, r^2=0,69 pour 4 $l.h^{-1}$, p-value < 0,05).

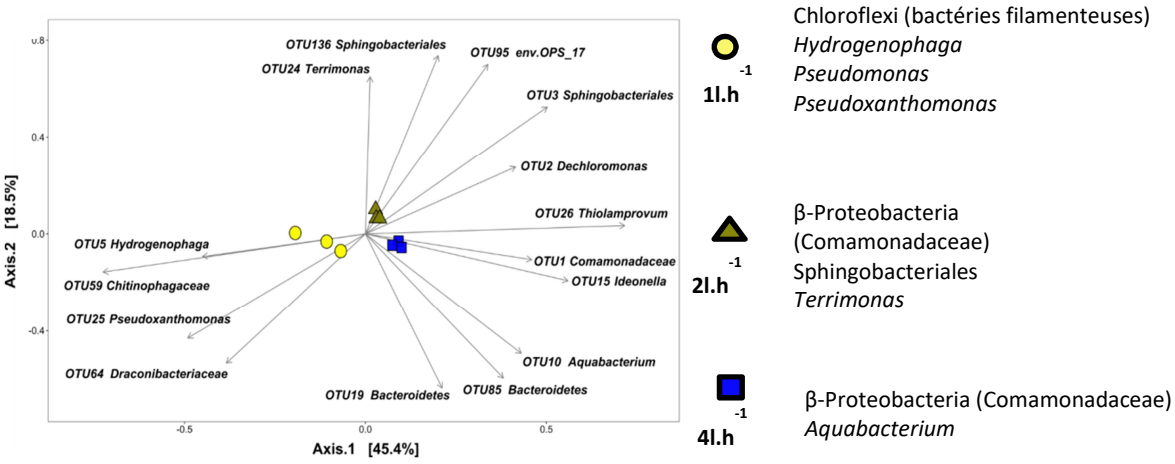


Figure. 23: L'analyse en coordonnées principales des communautés bactériennes trouvées dans les biofilms de goutteurs 1 $l.h^{-1}$ (●), 2 $l.h^{-1}$ (▲) et 4 $l.h^{-1}$ (■) à 115 jours de l'étude. L'analyse était basée sur les coefficients de similarité de Bray-Curtis. Les flèches indiquent l'orientation et la contribution des UTO (les contributeurs les plus importants expliquant 50% de la divergence bactérienne globale).

À 115 jours, les OTUs 308 (*Mycobacterium*) et 50 (*Pseudomonas*) étaient principalement associés au goutteur 4 $l.h^{-1}$ alors que les OTUs 1124 (*Legionella*) et 92 (*Pseudomonas)* se retrouvent représentés dans les goutteurs 2 $l.h^{-1}$. Au cours du temps, les spécificités par type de goutteur évoluaient. Ainsi, les résultats des analyses de la structure et de la composition des communautés microbiennes des biofilms ont montré que les microbiotes étaient influencés par les paramètres d'écoulement, et que les goutteurs avec une section et une vitesse d'entrée faible favorisaient la présence du phylum des *Chloroflexi*. Le type d'écoulement influençait également la présence des bactéries pathogènes ciblées par qPCR, à savoir *Pseudomonas aeruginosa* et *Aeromonas hydrophila*. Ainsi ces pathogènes colonisaient préférentiellement les biofilms des goutteurs fonctionnant à 1 $l.h^{-1}$ comparativement à ceux fonctionnant à 4 $l.h^{-1}$. L'effet de l'écoulement hétérogène en régime turbulent, associé au type de goutteur, est donc à prendre en considération si l'on veut limiter le volume de biofilm ainsi que la présence de bactéries indésirables dans les biofilms du système. En perspective, il serait donc intéressant d'étudier le microbiote à une échelle plus localisée (par zones de labyrinthe, entrée, retour et sortie par exemple) de manière à évaluer l'effet de cet écoulement hétérogène sur la répartition des communautés microbiennes le long d'un goutteur. Cela permettrait peut-être d'identifier que l'entrée, en plus d'être une zone sensible au colmatage, favorise également l'installation des certains phyla ou genres bactériens.

Afin de la valider la présence de bactéries pathogènes opportunistes dans les biofilms, des qPCR ciblées ont été réalisées, en parallèle de la quantification des indicateurs de contamination fécale *E. coli* et *Enterococcus spp*., sur les bactéries pathogènes *L. pneumophila*, *P. aeruginosa* et A. hydrophila. Les concentrations de *L. pneumophila* étaient en dessous de la limite de détection pour tous les échantillons testés. Les bactéries entériques montrent des comportements différents de ceux des espèces pathogènes *P. aeruginosa* et *A. hydrophila*, notamment concernant l'influence du type de goutteur ou la capacité à coloniser le biofilm. Ainsi, *P. aeruginosa* et *A. hydrophila* étaient difficilement quantifiables, voir indétectables dans l'effluent, mais quantifiable dans les biofilms des goutteurs, à l'inverse d'*E. coli*. Une étude récente a montré la présence de *P. aeruginosa* dans l'eau

usée traitée ainsi qu'à la surface des cultures irriguées avec des abondances supérieures à l'effluent (Obayomi et al., 2019), suggérant un effet de la colonisation du réseau sur la contamination de la culture. Les indicateurs de contamination fécale sont utilisés pour rendre compte de la présence de pathogènes d'origine entérique et ne permettent pas d'estimer le devenir des autres pathogènes, notamment dans les biofilms, ce qui est en accord avec plusieurs études (Dietrich et al., 2007; Winward et al., 2008). Nos analyses optiques des cinétiques de développement des biofilms a mis en évidence des évènements de détachement, principalement dans les goutteurs 1 $l.h^{-1}$, où les concentrations en *P. aeruginosa* ont tendance à augmenter au cours du temps et à être les plus élevées. Il serait important de comparer les concentrations en *P. aeruginsa* en sortie de goutteur, comparativement à d'autres ressources en eau utilisées en agriculture et d'estimer les risques sanitaires associés.

Cependant, les cinétiques de formation des biofilms données par l'OCT ne corrèlent pas forcément avec les quantifications des bactéries. Ainsi les mesures optiques montrent que la quantité de biofilm augmente alors que la concentration en bactéries totales donnée par la concentration en ADNr 16S reste constante. Ceci pourrait être dû au fait que le signal ADN prend en compte les cellules non viables. Cependant, les changements temporels des communautés valideraient l'approche moléculaire. La différence entre l'observation OCT et la concentration ADNr 16S est donc probablement liée au fait que l'OCT mesure à la fois les cellules et la matrice exopolymérique (EPS). Un des manques de cette étude est de ne pas avoir pu quantifier les EPS, qui auraient permis de relier les observations en OCT avec ces concentrations en ADN. Nous n'avons pas pu réaliser cette quantification du fait du volume trop faible de biofilm dans nos systèmes milli-fluidiques. Il faudrait pour cela augmenter le nombre de goutteurs analysés (entre 25-50) et regrouper ces goutteurs pour en analyser le contenu (Zhou et al., 2013; Li et al., 2019b). Cependant, avec cette méthode, il ne serait pas possible de prendre en compte la variabilité observée en termes de volume de colmatage d'un goutteur à un autre. Une autre solution serait alors de coupler la méthode OCT à une méthode de marquage (Leitgeb and Baumann, 2018) permettant de déterminer la quantité en EPS *in situ* par spectrométrie par exemple.

III.2 Écoulement, transfert de matière et effet des procédés de nettoyage

Après avoir étudié le rôle de l'hydrodynamique sur la cinétique de développement du biofilm dans nos systèmes milli-fluidiques, nous avons appliqué cette dernière approche sur les procédés de nettoyage. Ainsi, l'effet de l'écoulement et le transfert de matière est également un facteur clef que nous avons abordé sur la mise en place des biofilms et leurs compositions microbiennes lors des procédés de chloration et de purge hydrique. Pour cela, des goutteurs 1 $l.h^{-1}$, identifiés précédemment comme les plus sensibles au colmatage, ont été utilisés. Des lignes d'irrigations ont été placées sur un banc d'essai alimenté avec de l'eau usée traitée pendant 3 mois et ont été traitées soit par chloration (1,5 $mg.l^{-1}$ de chlore libre (NaOCl, 9%)), soit par purge hydrique (augmentation de la pression dans la ligne d'irrigation à 0.18 MPa) ou par la combinaison de ces deux méthodes.

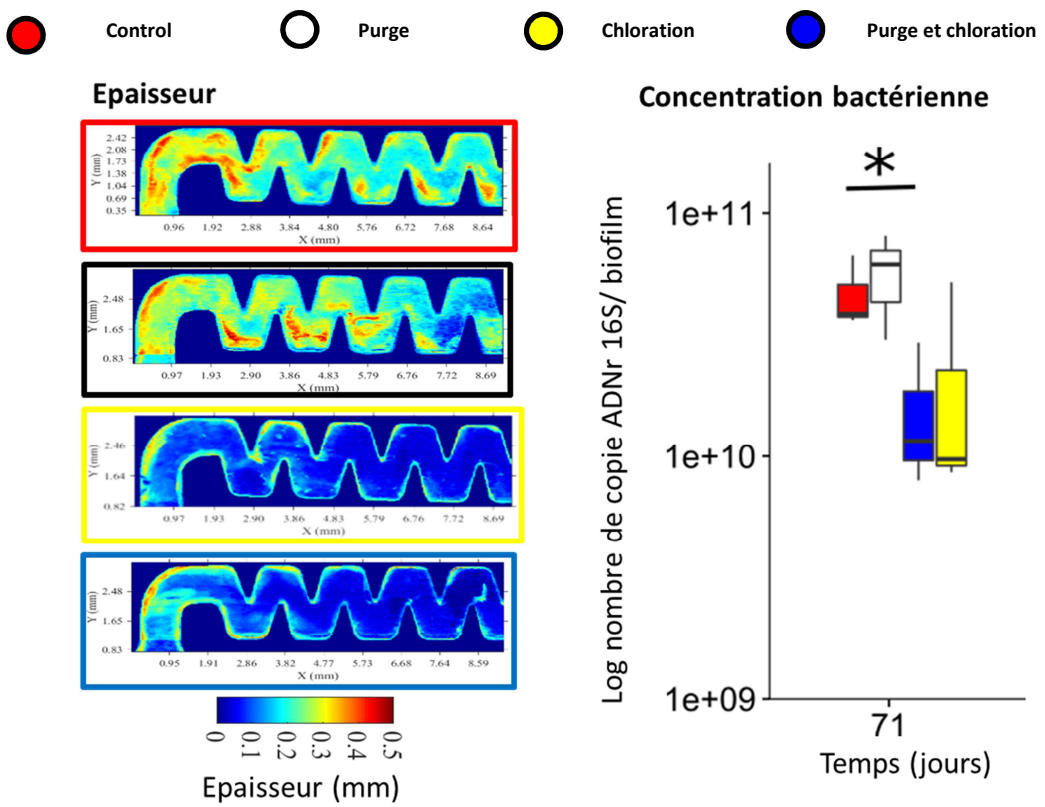


Figure. 24: Épaisseur du biofilm à l'entrée des goutteurs mesurées après 15 semaines et évolution des quantités bactériennes enregistrées pour chaque goutteur selon la méthode de nettoyage utilisée dans des conditions de C (contrôle), Purge (rinçage sous pression), Cl (chloration) et Purge et chloration (rinçage sous pression/chloration).

La chloration était plus efficace que la purge seule pour limiter le colmatage des goutteurs notamment en réduisant le colmatage de la zone centrale, où la vitesse d'écoulement est plus importante (Figure 24). Par contre, l'épaisseur du biofilm au niveau des zones tourbillonnaires restait plus élevée, même avec la chloration, que dans la zone centrale. L'utilisation conjointe de la chloration avec la purge hydrique était la solution la plus efficace pour limiter le développement du colmatage. De nouveau, l'hydrodynamique de la zone centrale favorise le transfert de matière du chlore vers le biofilm, expliquant ainsi sa réduction. À l'inverse, ce transfert était probablement réduit au niveau des zones de recirculation à cause des vitesses plus faibles. Ainsi, si on revient à nos conclusions sur l'analyse de l'écoulement en chapitre II, la caractéristique de l'écoulement, l'énergie cinétique de turbulence k et le temps de mélange dans ces zones déterminent l'efficacité de traitement utilisé en irrigation. En perspective, l'étude du transfert du chlore à travers le biofilm dans les systèmes d'irrigation goutte à goutte permettrait de mieux comprendre l'effet du chlore ainsi que les mécanismes de résistance. Ceci pourrait être réalisé en utilisant des microélectrodes comme proposées par Lee, (2014) qui permettent de mesurer la diffusion du chlore dans le biofilm. Quoi qu'il en soit, l'utilisation conjointe de la chloration avec la purge hydrique était la solution la plus efficace pour limiter le développement du colmatage. Le dispositif développé pourrait également permettre d'évaluer le bénéfice de technologies de traitement de l'eau telles que l'ozonation et les traitements UV dont l'objectif est de réduire la charge en microorganismes, mais qui pourraient être avantageuses aussi pour la prévention du colmatage des goutteurs.

L'analyse des communautés bactériennes révèle que la chloration réduit la diversité, la concentration en bactéries dans les biofilms et modifie la structure et la composition microbienne des biofilms. A l'inverse, la purge seule ne modifie la composition microbienne des biofilms par rapport à la ligne contrôle. Les biofilms chlorés sont principalement composés de la famille des *Comamonadaceae* et des genres *Flavobacterium* et *Pseudomonas* connus pour résister au chlore. A l'inverse, le phylum des *Chloroflexi* prédomine dans les biofilms des goutteurs non chlorés (purge). Bien que la chloration limite le colmatage des goutteurs, la diversité des genres incluant des espèces pathogènes, ainsi que les concentrations en *P. aeruginosa* et *A. hydrophila* étaient plus élevées dans les biofilms des goutteurs chlorés. L'arrêt des traitements entraîne une augmentation de la diversité bactérienne des biofilms initialement chlorés et une convergence des communautés vers les biofilms non chlorés, bien que des différences de structure subsistent. Cela indique qu'à l'arrêt des traitements, la colonisation reprend et le biofilm s'enrichit de nouvelles espèces, mais la communauté à l'échelle globale conserve la « mémoire » de la chloration.

III.3 Conclusion et voies de recherches identifiées

En milieu complexe, la méthode développée (combinant mesures optique et analyse des communautés bactériennes associées) a apporté des réponses aux différents cas d'écoulement goutteur et méthodes de nettoyage rencontrées en irrigation. On peut les synthétiser dans les points suivants :

- Dans les milli-canaux en labyrinthe, les conditions hydrodynamiques identifiées dans le chapitre II conditionnent la formation du biofilm. Ainsi les zones d'entrée, de retour et tourbillonnaires sont les configurations favorables au colmatage biologique, la géométrie du canal à 1 $l.h^{-1}$ étant le plus sensible. Les paramètres vitesse d'écoulement, énergie cinétique de turbulence et le cisaillement peuvent faciliter l'adhésion des bactéries ainsi que le transfert des nutriments. Une étude approfondie de l'effet des conditions hydrodynamiques sur le transfert de matière des solutés en lien avec la formation des biofilms permettrait donc de mieux comprendre pourquoi ces biofilms se développent préférentiellement dans ces zones. Cela souligne également que la présence d'une zone de retour dans un goutteur n'est pas conseillée afin de limiter les risques de colmatage.

- Le type de goutteur utilisé influençait également la structure et la composition bactérienne des biofilms des goutteurs. L'abondance des *Chloroflexi* était plus élevée dans les goutteurs 1 $l.h^{-1}$. Ceci pourrait être lié au fait qu'il y a plus d'EPS synthétisés et utilisables par les *Chloroflex*i. Le type de goutteur induisait également les concentrations des bactéries pathogènes dans les biofilms des goutteurs. Par exemple, les concentrations en *P. aeruginosa* étaient plus élevées dans les biofilms des goutteurs 1 $l.h^{-1}$. Les concentrations de *A. hydrophila* tendaient à diminuer avec l'augmentation du débit des goutteurs. Ces premiers résultats démontrent la potentielle accumulation des pathogènes dans les biofilms en réutilisation des eaux usées traitées. Ce qui pose la question la question du risque lors des phénomènes de détachement.

- L'utilisation de la chloration associée à la purge hydrique permet de réduire significativement le développement des biofilms dans les goutteurs. La chloration réduit la diversité, la concentration en bactéries dans les biofilms et modifie la structure et la composition microbienne. A l'inverse,

la purge seule ne modifie pas la composition microbienne des biofilms par rapport à la ligne contrôle. Les biofilms chlorés sont principalement composés de la famille des Comamonadaceae et des genres *Flavobacterium* et *Pseudomonas* connus pour résister au chlore. Au contraire, le phylum des Chloroflexi prédomine dans les biofilms des goutteurs non chlorés (purge). Bien que la chloration limite le colmatage des goutteurs, la diversité des genres incluant des espèces pathogènes, ainsi que les concentrations en *P. aeruginosa* et *A. hydrophila* étaient plus élevées dans les biofilms des goutteurs chlorés.

- L'arrêt des traitements entraîne une augmentation de la diversité bactérienne des biofilms initialement chlorés et une convergence des communautés vers les biofilms non chlorés, bien que des différences de structure subsistent. Cela indique qu'à l'arrêt des traitements, la colonisation reprend et le biofilm s'enrichit de nouvelles espèces, mais globalement la communauté conserve la « mémoire » de la chloration.

Sachant que le colmatage d'origine chimique (ex. précipitation de sels) peut aussi influencer la formation des biofilms et inversement (Rizk et al., 2017), des études complémentaires sont aussi nécessaires pour qualifier et quantifier le colmatage physique, chimique et biologique pour dégager la part de chacune de ces origines dans le colmatage des goutteurs.

Chapitre IV. Effet de la contrainte de cisaillement sur la cinétique de développement du biofilm et la précipitation chimique

IV.1 Introduction

Ce dernier chapitre IV se concentre sur nos travaux menés pendant la thèse de Nancy Rizk concernant la compréhension de l'effet spécifique du cisaillement à la paroi généré dans les systèmes d'irrigation sur la croissance du biofilm et la précipitation chimique.

Sans reproduire la topologie hétérogène de l'écoulement dans les systèmes d'irrigation goutte à goutte détaillée dans le chapitre II et III, notre objectif a été d'étudier la réponse de l'encrassement par les eaux usées traitées à la contrainte de cisaillement, en se basant sur un réacteur Taylor-Couette (TCR). Car expérimentalement, nos systèmes milli-fluidiques en labyrinthe ne permettent pas de contrôler l'effet des contraintes de cisaillement le long du canal. Deuxièmement, il est difficile à l'heure actuelle d'analyser le type de colmatage chimique, physique et biologique à partir de la très faible quantité de biofilm produite dans les milli-canaux (limite de quantification). Le TCR utilisé est un bioréacteur annulaire rotatif (BAR) qui permet une distribution constante des contraintes de cisaillement sur la paroi. Dans la littérature, les réacteurs Taylor-Couette (TCR) ont été largement étudiés dans les recherches sur l'impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm en régime laminaire ou turbulent (Gagnon and Slawson 1999; Tsai et al., 2004 ; Rochex et al., 2008, Paul et al., 2012, Pechaud et al., 2012 ; Derlon et al., 2013). Là encore, dans les conditions spécifiques des systèmes d'irrigation alimentés par des eaux usées traitées, notre approche est originale.

Une présentation détaillée des résultats et une discussion approfondie est disponible dans l'article Rizk et al., 2018.

IV.2 Approches méthodologiques

Nous avons étudié la cinétique de développement du biofilm dans un réacteur Taylor-Couette co-axial (TCR) dans des conditions de contrainte de cisaillement sélectionnées correspondant à un écoulement dans des conduites d'irrigation (de diamètre interne 16mm) ou dans des goutteurs turbulents (à partir des simulations numériques du chapitre II). Pour un suivi dans le temps, le cylindre intérieur du TCR a été entouré de cinq anneaux amovibles en polychlorure de vinyle (PVC) provenant directement d'une conduite d'irrigation (afin de reproduire les propriétés de surface de ce

matériau). La surface totale disponible pour la croissance du biofilm était de 0,1216 m^2 (0,0243 m^2 pour chaque plaque : longueur = 0,605 m et largeur = 0,04 m).

Dans un TCR, la vitesse de rotation du cylindre intérieur et les rayons des deux cylindres (dans notre cas noté R_{int} et R_{ext}) définissent le régime d'écoulement. La contrainte de cisaillement est régie par l'entrefer entre les cylindres (dans notre cas, e = R_{ext}-R_{int} = 0,013 m), et par la vitesse angulaire du cylindre interne (Ω). Le nombre de Reynolds dans le réacteur TCR est exprimé comme suit dans le cas d'un réacteur co-axial :

$$Re = \frac{\Omega R_{int}\,(R_{ext} - R_{int})}{\nu} \qquad (5)$$

Où Ω est la vitesse angulaire du cylindre interne (rad.s^{-1}) et ν est la viscosité cinématique de l'eau.

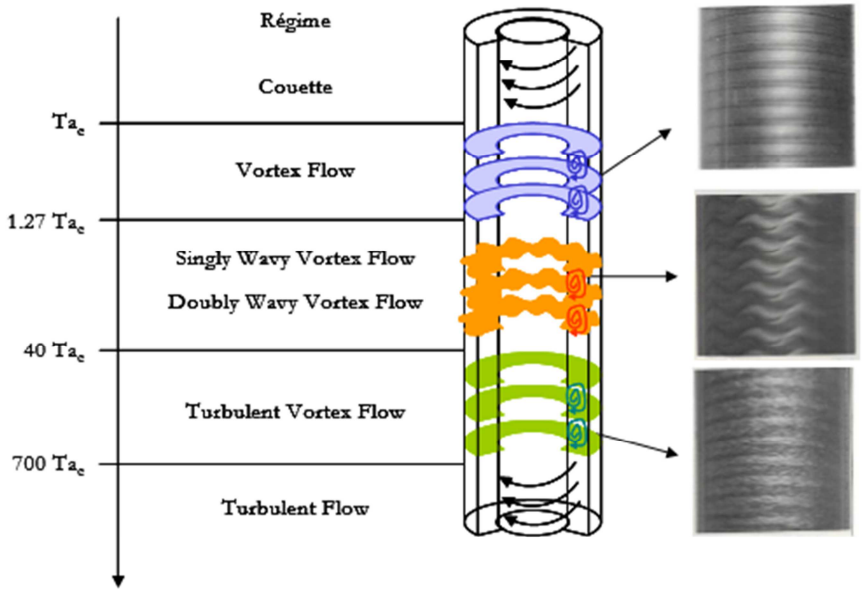


Figure. 25 : Les régimes d'écoulement et les valeurs de transition dans un réacteur Taylor-Couette (Coufort, 2004).

Les régimes d'écoulement dans l'espace annulaire des deux cylindres sont également dépendants du nombre sans dimension de Taylor (Ta). Ce paramètre correspond au rapport des forces centrifuges sur les forces visqueuses (Duvet, 1935). La force centrifuge est plus grande près du cylindre intérieur que dans le cylindre extérieur. Le nombre de Taylor dépend de la vitesse de rotation du cylindre intérieur. L'expression du nombre de Taylor présentée par Racina and Kind, 2006 a été adoptée dans ce chapitre :

$$Ta = \frac{\Omega Re^{0.5} e^{1.5}}{\nu} \qquad (6)$$

Coufort 2004 distingue six régimes d'écoulement dans l'anneau du réacteur (de l'écoulement laminaire au turbulent), comme résumé dans la figure 25. Cette figure montre les différents régimes

et transitions basés sur une valeur critique du nombre de Taylor Ta_c. Ce terme Ta_c est déterminé par une vitesse angulaire critique Ω_c du cylindre intérieur correspondant à l'apparition d'instabilités dans le fluide. Ainsi si la vitesse de rotation augmente pour dépasser Ta_c, l'écoulement devient instable ou tourbillonnaire. Cette instabilité survient lorsque des phénomènes antagonistes, tels que l'inertie du fluide en mouvement (forces centrifuges générées par la rotation qui dans ce cas sont plus importantes sur le cylindre intérieur que sur le cylindre extérieur) et la viscosité du fluide, deviennent si importants que la symétrie de l'écoulement se rompt. Des tourbillons appelés « tourbillon de Taylor » sont créés (Ohmura et al., 1997) avec deux tourbillons adjacents (Figure 25). Si la vitesse de rotation augmente, cet écoulement change de configuration, notamment au niveau des frontières des anneaux tourbillonnaires, et de nouveaux types de régimes font leur apparition jusqu'au régime turbulent qu'est atteint autour de 700 Ta_c.

Le seuil Ta_c introduit par Mehel, 2006 sera utilisé dans notre étude :

$$Ta_c = Re_c . \sqrt{\frac{e}{R_{int}}} \qquad (7)$$

Pour pouvoir calculer le Ta_c, il faut donc déterminer au préalable le nombre de Reynolds critique Re_c. L'équation la plus utilisée a été proposée par Esser and Grossmann, 1996 définie par :

$$Re_c = \frac{1}{\alpha^2} \frac{(1+\eta)^2}{2\eta\sqrt{(1-\eta)(3+\eta)}} \qquad (8)$$

avec α= 0, 1556 et $\eta = R_{int}/R_{ext}$

L'équation de la vitesse de rotation critique Ω_c. a défini dans Coufort, 2004 par:

$$\Omega_c = \frac{41.3\,\nu}{R_{ext}^{0.5}(R_{ext}-R_{int})^{1.5}} \qquad (9)$$

Compte tenu des paramètres du banc d'essai TCR qui a été utilisé dans notre étude, les valeurs de Re_c, Ta_c et Ω_c sont 127,39, 44,505 et 0,08 rad/s, respectivement.

Extrapolation des contraintes cisaillements des systèmes d'irrigation au réacteur couette

Expérimentalement, afin de reproduire les valeurs de la de contrainte de cisaillement (τ), retrouvée dans une conduite d'irrigation et un goutteur, sur la surface du cylindre interne de notre réacteur TCR, il est nécessaire de déterminer une vitesse de rotation correspondante. Par rapport à la littérature, les relations utilisées dans les travaux de Rochex et al., (2008) ont été sélectionnées ayant une configuration de réacteur avec un rapport de rayon ($\eta = R_{int}/R_{ext}$ = 0,808) proche du TCR utilisées de nos recherches:

$$\tau = 2.13 \frac{\left(\mathrm{Rint}/(\mathrm{e}+\mathrm{Rint})\right)^{3/2}}{\left(\mathrm{e}/(\mathrm{e}+\mathrm{Rint})\right)^{7/4}} \mathrm{Re}^{1.445} \frac{\rho \upsilon^2}{2\pi \mathrm{Rint}^2} \quad \text{pour Re} > 8.10^2 \qquad (10)$$

$$\tau = 0.113 \frac{(\mathrm{Rint}/(\mathrm{e}+\mathrm{Rint}))^{3/2}}{(\mathrm{e}/(\mathrm{e}+\mathrm{Rint}))^{7/4}} \mathrm{Re}^{1.764} \frac{\rho \upsilon^2}{2\pi \mathrm{Rint}^2} \quad \text{pour Re} > 10^4 \qquad (11)$$

Avec τ : la contrainte de cisaillement exprimée en unités de pression (Pa); ρ : la densité de l'eau (1000 $kg.m^{-3}$).

La première contrainte de cisaillement étudiée a été fixée à 0,7 Pa et rencontrée dans une conduite d'irrigation (16 mm de diamètre interne) lorsque la vitesse de l'eau en entrée est de 0,4 $m.s^{-1}$ (vitesse découlement conseillée en irrigation pour limiter le dépôt de particule) à partir de la formule de Blasius en écoulement turbulent (Chadwick et al. (1993)):

$$\tau = 0.0395 * Re^{-0.25} * \rho * V^2 \qquad (12)$$

avec V : vitesse d'écoulement ($m.s^{-1}$).

Les deux autres valeurs étudiées de contrainte de cisaillement moyen (2,2 et 4,4 Pa) ont été estimées à partir des simulations numériques présentées en chapitre II dans un millicanal en labyrinthe selon deux débits d'entrée valant 1,44 l h^{-1} et 2,88 l h^{-1} (respectivement, Re=400 et 800).

Contrainte de cisaillement	Nombre de Reynolds Couette Taylor	Ta/Ta_c	Ω (rad/s)	Ω (RPM)
0.7	9.71E+03	76.2	7.0	67
2.2	1.86E+04	128.5	13.4	128.5
4.4	2.76E+04	216.7	19.9	190.5

Table 2 : La contrainte de cisaillement, nombre de Reynolds Couette Taylor, Ta/Ta_c et de la vitesse de rotation du cylindre intérieur (Ω) utilisés dans notre étude.

Le table 2 résume les paramètres hydrodynamiques calculés pour les 3 contraintes de cisaillement sélectionnées 0,7, 2,2 et 4,4 Pa et qui correspondent à des vitesses de rotation égalent à 67, 128,5 et 190,5 RPM respectivement. Selon le rapport Ta/Tac, cela nous induit, dans les 3 cas, à un écoulement de type « Turbulent Vortex Flow » selon (Coufort, 2004) dans note réacteur Taylor-Couette.

IV.3 Résultats et discussion

L'expérimentation TCR a été conduite pendant une période de huit semaines avec une alimentation en eau usée traitée pour les trois contraintes de cisaillement différentes. En premier lieu, le biofilm a été quantifié en mesurant la matière sèche (MS), alors que le rapport organique/inorganique a été

déterminé en mesurant la matière volatile solide (MVS). Deuxièmement, la composition et la forme cristalline de la partie inorganique a été analysée afin de mieux interpréter le lien entre biofilm et précipitation chimique. Les résultats de cette étude sont détaillés dans l'article Rizk et al., (2018).

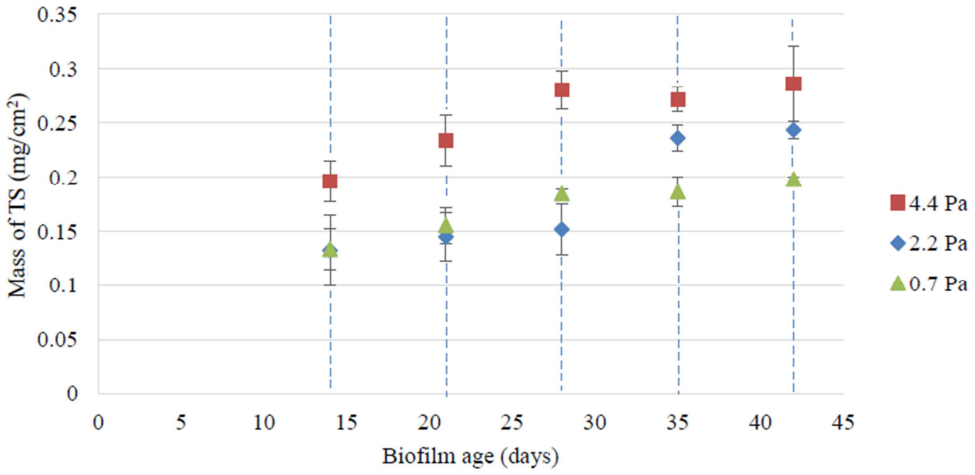


Figure.26: Évolution de la quantité de matière sèche (MS) de l'encrassement par rapport à la surface dans le temps pour des contraintes de cisaillement de 0,7, 2,2 et 4,4 Pa.

Dans la figure 26, on peut observer qu'après la phase d'initiation (14 jours), toutes les courbes suivent la même tendance pour 0,7, 2,2 et 4,4 Pa, respectivement. Cette phase, qui dure en général 10 jours, correspond à la phase de latence, au cours de laquelle la fixation des bactéries sur le support est initiée (Characklis, 1981). Par la suite, les courbes peuvent être divisées en deux phases : la première phase entre 14 et 28 jours d'âge du biofilm avec une augmentation constante des quantités de MS et une seconde phase après 28 jours (35 jours pour 2,2 Pa) d'âge du biofilm où un début de stabilisation, où un plateau, a été observé. Dans la deuxième phase, la quantité collectée varie cependant, probablement en raison du détachement. Le développement maximal du biofilm pour les trois conditions de contrainte de cisaillement semble avoir été atteint à la fin de l'expérience (jour 42). Sur l'ensemble de l'expérience, les quantités de MS sont plus élevées pour une valeur de contrainte de cisaillement égale à 4,4 Pa par rapport aux autres conditions. Nos résultats de la figure 25 rejoignent les travaux de Belkhadir et al., (1988) qui ont observé que la cinétique de croissance des biofilms est divisée également en plusieurs phases décrivant une courbe sigmoïde. La croissance des bactéries commence par une phase de latence. Elle est suivie d'une phase de croissance exponentielle de la population bactérienne où le biofilm se développe rapidement et gagne en épaisseur. Puis vient une phase où le développement ralentit pour atteindre le stade de la maturation puis du détachement.

En complément, la mesure des matières volatiles solides (MVS) de l'encrassement permet d'analyser l'effet de la contrainte de cisaillement sur la proportion inorganique/organique du développement de l'encrassement. Nos données mettent en évidence la composition minérale dominante des échantillons. C'est un point important car cela démontre que dans un contexte de réutilisation des eaux usées traitées le colmatage des goutteurs peut être principalement composé de matière inorganique. Nous n'avons pas pu analyser dans nos systèmes milli-fluidiques en raison, comme indiqué précédemment, des limites de quantifications.

A la fin de notre expérimentation, le pourcentage de matière organique (MO) accumulé pour une valeur de contrainte de cisaillement de 4,4 Pa (29,5 %) est supérieur à celui de 2,2 Pa (22,7 %) qui, à son tour, est supérieur à celui de 0,7 Pa (16,5 %). Ces résultats valident également que la quantité de biofilm qui se développe à 4,4 Pa est plus élevée que celle développée à 2,2 Pa et même plus élevée que celle à 0,7 Pa. Comme discuté dans le chapitre III, dans le cas de l'écoulement dans nos milli-canaux en labyrinthe, afin de résister aux fortes conditions hydrodynamiques, les biofilms doivent développer une structure plus dense (Kwok et al., 1998; Picioreanu et al., 2001). Melo and Vieira, (1999) ont également montré que pour des écoulements en régime turbulent (des nombres de Reynolds entre 4200 et 12000), les vitesses d'écoulement élevées favorisent le développement d'un biofilm plus compact et plus stable qui est plus résistant au détachement. Ainsi ces derniers résultats à l'aide du TCR ne semblent pas en corrélation avec nos résultats OCT observés sur les volumes d'encrassement avec l'augmentation des débits des goutteurs (1, 2 et 4 $l.h^{-1}$) dans le chapitre III. Même si ce n'était pas l'objectif, cela souligne la limite de l'extrapolation de l'hydrodynamique d'un réacteur TCR dans le cas des goutteurs. Car comme on l'a indiqué dans le chapitre II, l'augmentation du nombre de Reynolds en entrée des milli-canaux en labyrinthe ne semble pas se traduire par un changement de l'écoulement ou un renforcement de la contrainte de cisaillement dans les zones tourbillonnaires favorables au développement du biofilm.

Variation de la composition chimique de l'encrassement selon le cisaillement

Selon nos résultats, l'encrassement est principalement composé de matières minérales (> 70%). Par conséquent, une certaine connaissance de la composition de la précipitation est importante pour établir un lien entre l'encrassement biologique et chimique. La diffraction des rayons X (DRX) nous a permis de déterminer la minéralogie et la phase cristalline de la précipitation chimique produite lors de l'encrassement.

L'analyse DRX de nos échantillons inorganiques après calcination à 550°C démontre principalement la présence de $CaCO_3$ sous forme calcite pour les trois valeurs de contrainte de cisaillement. Selon l'étude précédente de Rizk et al., (2017) sur l'effet de la température et du pH, la calcite était le constituant le plus abondant dans les éléments chimiques précipités dans notre cas à partir des eaux usées traitées de la station d'épuration de Mauguio. Mais ces précipitations du $CaCO_3$ n'ont été obtenues à température ambiante qu'après augmentation du pH à plus 9. Alors que nos expériences en TCR ont été réalisées à pH < 8 et une température ambiante de l'effluent. Cela rejoint l'état de l'art qui démontre l'interaction possible entre le biofilm et le Ca^{2+} induisant la précipitation. Ainsi, Tourney and Ngwenya, (2013) ont constaté que les substances polymères extracellulaires (EPS) des biofilms favorisent la saturation du carbonate de calcium. C'est ce qu'ont également observé Obst et al., (2009), qui ont montré qu'une production importante d'EPS était le principal facteur d'accélération de la minéralisation des carbonates. D'autres travaux ont travaillé sur le processus de biominéralisation, notamment en ce qui concerne la précipitation du carbonate de calcium (Benzerara et al., 2006 ; Wei et al., 2015). Ce processus est souvent associé aux structures de surface des cellules microbiennes et aux activités métaboliques, alors que les EPS microbiennes jouent un rôle très important dans la morphologie et la minéralogie de la précipitation du carbonate de calcium. Les EPS peuvent piéger et lier le calcium pour faciliter la précipitation (Arp et al., 1999).

IV.4 Conclusion et voies de recherches identifiées

Dans ce chapitre, nous avons étudié comment différentes conditions de contrainte de cisaillement, rencontrées dans les systèmes d'irrigation, influencent le développement et la cinétique du bio-encrassement en se basant sur un dispositif de réacteur de Taylor-Couette (TCR).

On peut conclure certains points :

- Jusqu'à certain seuil, une contrainte de cisaillement élevée favorise l'apport de substrat dans les biofilms, et par conséquent leur développement conduisant à un biofilm plus dense et plus rigide qui peut résister aux détachements.

- La caractérisation de l'encrassement montre que tous les échantillons sont principalement composés de carbonate de calcium sous forme de calcite. Ce qui témoigne le caractère inorganique de l'encrassement avec des eaux usées traitées qu'on retrouvera également dans les goutteurs et qui justifier des stratégies de nettoyage mêlant acidification et chloration.

- Plus la proportion de matière organique contenue dans l'échantillon est importante, plus elle peut précipiter la calcite. Cela est dû à la présence des EPS qui peut piéger et lier de $CaCO_3$ et faciliter la précipitation de la calcite.

Cependant, certaines questions nécessitent de mener une étude plus approfondie. Il serait intéressant par exemple d'analyser la cinétique de développement du colmatage expérimentalement en reprenant le dispositif TCR ou milli-fluidique alimenté par une eau usée synthétique avec et sans carbonate de calcium pour mieux comprendre le lien entre précipitation et croissance du biofilm. Pendant la thèse de Nancy Rizk, nous n'avons pas eu encore la possibilité d'utiliser la méthode tomographie par cohérence optique (OCT) ou la microscopie à balayage laser mais il aurait été pertinent de coupler ces méthodes aux analyses des communautés bactériennes pour quantifier l'hétérogénéité spatiale du développement du biofilm selon les contraintes de cisaillement d'un point de vue épaisseur et densité par exemple.

Chapitre V. Perspectives de recherche

Ce mémoire a présenté la démarche de recherche que j'ai employé pour améliorer notre compréhension de l'hydrodynamique et des mécanismes d'encrassement dans les dispositifs de micro-irrigation dans le contexte de la réutilisation des eaux usées traitées. Une analyse de la problématique m'a amené à dégager trois voies de recherche : caractérisation numérique et expérimentale de l'écoulement le long des milli-canaux en labyrinthe ; interactions de l'écoulement avec la cinétique de développement du biofilm, communautés bactériennes associées et précipitation chimique. L'étude de ces voies a permis d'ouvrir nombre de perspectives, pour résoudre les problématiques de recherche qui subsistent et que je souhaite aborder à court terme (projets et thèses en cours) et à moyen terme. A noter que les différentes approches numériques ou expérimentales abordées dans ce manuscrit d'HDR autour de l'objet micro-irrigation seraient extrapolables plus largement aux problématiques d'encrassement des dispositifs micro-fluidiques et micro-procédés (Dressaire and Sauret, 2017).

V.1 Axe modélisation du colmatage

Nous avons pu montrer qu'une modélisation numérique fine de l'écoulement constitue une des clefs pour améliorer l'analyse de l'écoulement et des mécanismes d'encrassement. C'est pourquoi je vais poursuivre cette voie de recherche en mettant l'accent sur le couplage des différentes physiques en jeu dans les dispositifs de micro-irrigation (hydrodynamique, transport de solutés et mécanique des structures).

Premièrement, l'approche que je propose se base sur l'hypothèse que la structure géométrique du biofilm interagit également avec l'hydrodynamique le long du labyrinthe. Ainsi, bien que l'écoulement initial détermine les zones sensibles et la cinétique de développement des biofilms, la modification de la géométrie et des sections d'écoulement lors de l'encrassement des milli-canaux peut aussi modifier les paramètres hydrauliques du goutteur. En reprenant la méthodologie développé dans Picioreanu et al., (2018), il serait intéressant donc de coupler l'évolution tridimensionnelle des géométries du bio-encrassements observés dans le temps à l'aide de la méthode OCT (résultats du chapitre III) à la modélisation numérique de l'écoulement (à partir des modèles développés dans le chapitre II). En introduisant dans les simulations, des propriétés d'élasticité des parois selon les contraintes de cisaillement et le degré de colmatage, cela permettra d'améliorer nos connaissances sur l'effet du biofilm notamment sur les régimes d'écoulement, les pertes de charge et la répartition de l'énergie cinétique de turbulence. On peut supposer également qu'on répondra ainsi pourquoi il faut atteindre un certain seuil de colmatage avant de perturber le débit en sortie de goutteur.

Par ailleurs, il sera également envisageable de simuler le développement des communautés bactériennes et le biofilm à l'aide d'outils numériques. Cette étude aura pour objectif d'adapter et d'introduire les modèles de croissance du biofilm à notre écoulement hétérogène en labyrinthe en vue d'optimiser la géométrie et les conditions d'écoulements le long des milli-canaux pour limiter le colmatage biologique. On peut citer les modèles individus centrés qui permettent d'étudier les

interactions entre les dynamiques individuelles à l'échelle microscopique et les structures spatiales macroscopiques en lien avec les comportements globaux de l'écoulement. L'approche de modélisation basée sur les individus centrés (Kreft et al., 1998) fournit une représentation de la biomasse comme étant composée de multiples agents sphériques qui agissent indépendamment, de façon analogue à des cellules bactériennes individuelles des biofilms. Dans cette approche ascendante, le comportement des agents est défini explicitement par un ensemble de conditions qui imitent le comportement des cellules bactériennes individuelles, c'est-à-dire la croissance par la consommation de substrat, la reproduction par la division cellulaire, la production de métabolites, etc. La dynamique à grande échelle du biofilm simulé est implicitement dérivée comme une propriété émergente des interactions entre les agents (micro-organismes) lorsqu'ils croisent et se reproduisent (Figure 27). Dans la littérature, plusieurs modèles individus centrées peuvent être identifiés tel que BacSim (Kreft et al., 1998), le modèle développé par Picioreanu (Picioreanu et al., 1998) ou encore le modèle développé par Alpkvist (Alpkvist et al., 2006).

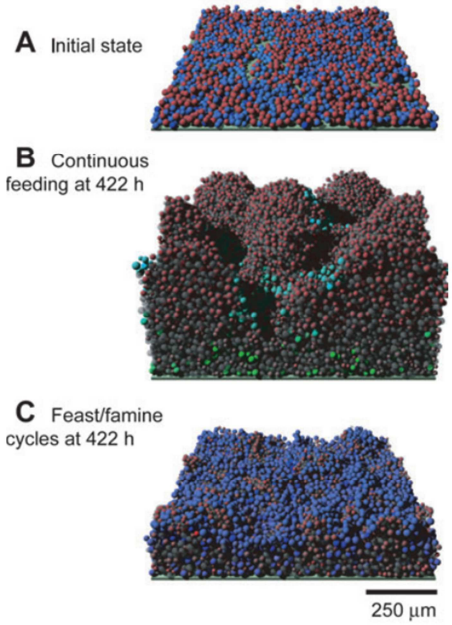


Figure.27 : Structures du biofilm issues de simulations numériques en 3D à base de modèle individu centré. A) État initial b) Alimentation de nutriment en continue c) Cycles de festin/famine (Xavier et al., 2005).

Deuxièmement, dans le contexte de colmatage physique, il s'agira de poursuivre mes travaux sur le sujet (Lavanholi et al., 2018; Ait-Mouheb et al., 2019) en introduisant le suivi de particules par approche eulérienne et lagrangienne dans nos simulations numériques. Je souhaite ainsi approfondir notre compréhension des mécanismes de dépôt et des interactions fluide/particules, particules/particules et particules/parois en commençant par des particules inertes / sphériques de type sable, avant de complexifier par la suite les modèles en introduisant des mécanismes d'agrégation des argiles communément retrouvés dans les eaux d'irrigation (Bentonite ou kaolinite par exemple). En reprenant le dispositif optique µ-PIV, les résultats numériques seront comparés à des mesures par méthode Particle tracking velocimetry (PTV), qui contrairement à la PIV, obtient

chaque vecteur vitesse en suivant une particule individuelle. En complément, afin de déterminer la cinétique de dépôt, d'accumulation et de dé-colmatage des particules solides dans les zones tourbillonnaires, la méthodologie optique développée à l'aide de l'OCT lors de la thèse de Kévin Lequette (Chapitre III) sera intéressant également à dupliquer.

Finalement de manière plus générale, dans mon manuscrit et mes travaux de recherche sur les systèmes de micro-irrigation, je me suis focalisé sur un type de goutteur non-autorégulent (NPC) n'incluant pas d'effet des membranes sur l'hydrodynamique (Figure.2). Les goutteurs à compensation de pression (PC) permettent une distribution uniforme de l'eau à toutes les cultures d'un champ en régulant le débit du goutteur, mais ils nécessitent généralement des pressions de pompage élevées, ce qui contribue à des coûts d'investissement et d'exploitation élevés pour la pompe et l'alimentation électrique. Dans le cadre de cet axe perspective modélisation, à moyen terme, je souhaite inclure ainsi les mécanismes d'interaction fluide structure des goutteurs membranaires dans mes simulation notamment afin de travailler sur la prédiction de la pression d'activation (pression seuil dans les lignes d'irrigation permettant une régulation des débits en sortie). Une nouvelle conception des goutteurs PC pour un fonctionnement à plus basse pression pourrait permettre des systèmes d'irrigation plus efficaces sur le plan énergétique et plus abordables.

V.2 Axe quantification et qualification chimiométrique de l'encrassement

En plein champ, en dehors de symptômes visibles sur les plantes, la mise en évidence du colmatage reste difficile en raison du grand nombre de points d'émission, d'une forte hétérogénéité de comportements des goutteurs et des difficultés d'observations dans les goutteurs fermés. Une méthodologie efficace pour la détection de l'encrassement dans les systèmes de micro-irrigation est primordiale mais n'est pas encore développée (Talozi and Hills, 2001), en particulier dans le cas de l'irrigation souterraine en goutte à goutte, qui a le meilleur potentiel en termes d'efficience de distribution de l'eau aux plantes. Quelles qu'en soient les causes, la détection précoce du colmatage permettra le lancement des protocoles de nettoyage ou de rinçage (injection des produits chimiques, chasses hydrauliques) dès l'apparition de l'encrassement, ce qui optimisera l'efficacité du procédé en particulier dans le cas des biofilms (Gamri et al., 2013).

A ma connaissance, seules des méthodes indirectes basées sur la relation débit des goutteurs et la pression dans conduites ont été étudiées dans le cadre de la micro-irrigation par Camargo et al., (2014). Cependant, ces solutions ne donnent pas d'informations sur la nature du colmatage et les capteurs de pressions sont incapables de détecter les stades précoces de l'encrassement. Par ailleurs, les dimensions des canaux dans les systèmes de goutte à goutte (entre 800 et 1300 µm) et le relatif bas coût de ces dispositifs limitent considérablement le nombre de méthodes pouvant être envisagées pour des mesures de colmatage in situ et non destructives. Par exemple, les capteurs électriques étudiés par Pavanello et al., 2011 ; Turolla et al., 2019) sont adaptés à la détection du biofilm et du carbonate de calcium. Cependant, ces méthodes nécessitent le dépôt du matériau colmatant sur une surface en acier. Le capteur optique développé par Mendret et al., (2006) est capable de quantifier l'épaisseur de l'encrassement dans la filtration membranaire mais sans possibilité de discrimination les matériaux constituant le colmatage.

La spectroscopie d'absorption pourrait offrir de nouvelles opportunités de mesures non-destructives et in-situ. En effet, les travaux de Berho et al., (2004) ont montré que l'utilisation de la spectroscopie ultraviolette (UV) et visible (VIS) permet de détecter les précipités chimiques et les argiles dans l'eau. Pour les biofilms, Tidwell et al., (2015) ont utilisé la spectroscopie dans l'infrarouge moyen (MIR) pour la discrimination des bactéries. Dans le contexte spécifique de l'irrigation par goutte à goutte, Tarchitzky et al., (2013) ont déjà montré l'intérêt de la spectroscopie dans l'infrarouge moyen (MIR) pour l'analyse du colmatage biologique et physique. Cependant, les équipements MIR ne semblent pas adaptés à une application dans les parcelles agricoles, principalement en raison de leur complexité et de leur coût. Dans la zone spectrale ultraviolet/du visible-proche infrarouge (UV/Vis-NIR), la spectroscopie peut néanmoins être adaptée pour une surveillance in situ à faible coût (Zimmerleiter et al., (2020)). Cette technique est généralement associée à des modèles chimiométriques afin de prédire les caractéristiques des échantillons analysés.

Dans le cadre de la thèse de Julien Petit (commencé en octobre 2019 et co-encadré avec Ryad Bendoula de UMR ITAP), je souhaite ainsi développer une méthodologie innovante d'analyse et de détection de l'encrassement basée sur de la spectrométrie UV/Vis-NIR. L'hypothèse est que selon les gammes spectrales et traitement associés, les mesures optiques et les principes physiques associés pourront permettre de détecter les cinétiques et le type d'encrassement. L'objectif à moyen terme sera un capteur optique adapté à la micro-irrigation pour qualifier et quantifier l'épaisseur selon le type de colmatage physique, chimique et biologique. Ainsi en parallèle de mesures OCT de référence, différentes méthodes optiques en spectroscopie seront testées. Il s'agira tout d'abord de tester la spectroscopie optique diffuse dite « classique » (mesure de l'ensemble du signal rétrodiffusé par l'échantillon) qui renferme une information globale. En parallèle seront testés deux principes de spectrométries, permettant de séparer l'information chimique et physique contenue dans le spectre. Les méthodes retenues sont la spectroscopie diffuse de polarisation et la spectroscopie résolue spatialement. A partir de ses trois signatures spectrales, une analyse multivariée combinée à une mesure temporelle devrait nous permettre d'analyser la composition et la formation de l'encrassement selon les conditions d'écoulement et les qualités des eaux d'irrigation.

A partir de ces choix techniques, un prototype de capteur en laboratoire adapté au contexte de la micro-irrigation sera développé. Ce système sera validé sur des milieux modèles, puis une analyse fine des limites de ce capteur seront effectués selon le type d'eaux d'irrigation.

V.3 Axe cinétique du bio-encrassement et devenir du microbiome dans les agrosystèmes

Du point de vue de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture, mon objectif est de poursuivre nos travaux sur les effets barrières amorcés avec le projet de thèse de Kévin Lequette (chapitre III). Cela rejoint également des travaux que je mène sur les impacts des eaux non-conventionnelles sur les agrosystèmes et l'environnement (Manasfi et al., 2020; Azeb et al., 2020). Les textes réglementaires suivent les recommandations préconisées par l'OMS en proposant quatre types d'eaux usées traitées (A, B, C et D, adoptée par la nouvelle règlementation Européenne) basés sur des concentrations ou abattements d'indicateurs microbiologiques ainsi que des usages associés. Dans la littérature, un certain nombre de procédés et de combinaisons de traitement ont été testés selon leurs efficacités à éliminer des agents pathogènes (Thayanukul et al., 2013; Mohr et al., 2020) .

Nous proposons d'aller plus loin, après la barrière des procédés de traitement, en mettant les biofilms le long des dispositifs de micro-irrigation et le sol au premier plan. L'originalité sera également de prendre en compte les diversités des qualités des eaux usées réutilisées : eaux usées brutes, traitements secondaires et tertiaires. En complément de ce que j'ai détaillé sur l'effet du bio-encrassement dans le chapitre III et résumé dans la figure 28, le sol est aussi un système vivant et les composés qu'il va recevoir par une irrigation avec des eaux usées traitées vont séjourner sur une durée bien supérieure (de 2 à 8 mois) au temps de rétention dans les systèmes de traitement. Il est donc légitime de s'interroger et de mesurer la biorémédiation que permet le sol. En effet, l'analyse des communautés microbiennes a révélé un fort impact de l'irrigation sur la structure de celles-ci avec notamment l'émergence de groupes indicateurs d'une fertilisation du sol. Les dernières recherches confirment que l'irrigation des sols par des eaux usées entraîne une modification significative des communautés microbiennes et que celles-ci s'adaptent à la présence régulière d'antibiotiques soit par l'acquisition de gènes de dégradation soit par l'acquisition de gènes d'antibiorésistance. On peut donc s'attendre à une évolution des cinétiques de biodégradation en fonction du temps et en fonction de l'évolution des communautés microbiennes.

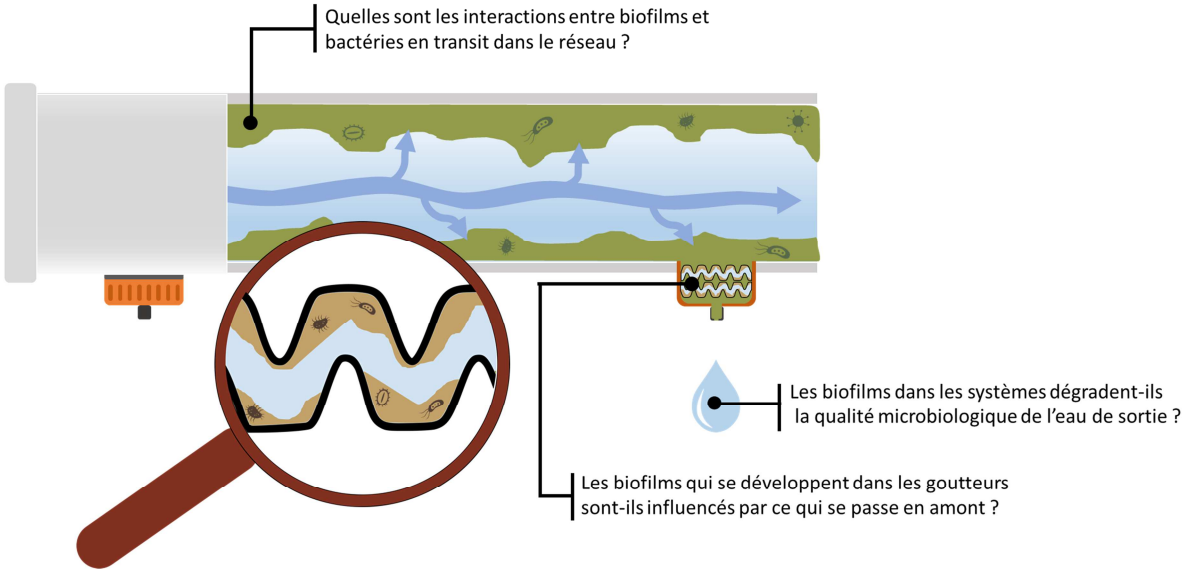


Figure.28 : Possibilités d'Interaction biofilm, contaminants et microbiome le long du système de micro-irrigation lors de la réutilisation des eaux usées traitées (Lequette 2020).

À court terme dans le cadre du projet ALLEA et la thèse de Vincent Moulia (co-encadrement avec Marc Heran IEM et Nathalie Wéry, LBE), les caractéristiques microbiologiques et chimiques seront évaluées en sortie de traitement, le long d'un réseau de micro-irrigation et lors du retour au sol. Selon l'approche synthétisée dans la figure 28, l'impact du de l'encrassement du réseau d'irrigation sur la diversité microbienne et sur les caractéristiques chimiques des eaux (matière organique dissoute et colloïdale, composition inorganique) seront évalués sur le terrain par :

(i) des bilans entrée-sortie (métagénomique, qPCR, chromatographie liquide)

(ii) la caractérisation du développement des biofilms présents dans les conduites et les goutteurs (diversité microbienne par séquençage NGS, microscopie, tomographie en cohérence optique, quantification des EPS),

(iii) la mesure du détachement des biofilms à l'aide d'un granulométre en ligne.

Concernant la matrice 'sol', la modification des communautés microbiennes sera évaluée lors des irrigations avec différentes qualités des eaux usées sur une parcelle et des bacs hors-sol de la plateforme de Murviel Lès Montpellier[2]. Enfin, à l'échelle laboratoire à l'aide de colonnes de sol, on évaluera comment ces changements affectent la capacité d'inactivation des contaminants en modifiant la pression biotique (prédation, compétition pour les nutriments). Concernant les sels et la matière organique, des analyses de sols, ainsi que des bilans entrée-sortie, apporteront des informations sur le devenir de ces indicateurs pathogènes dans le sol tout comme l'impact de ces éléments sur les communautés bactériennes du sol. Il serait très intéressant en reprenant les approches développées dans ces conditions contrôlés d'investir d'autres terrains agricoles de réutilisations des eaux usées ayant une antériorité d'irrigation plus longue en France ou d'autres pays.

[2] http://www.g-eau.fr/index.php/fr/recherche/plateformes-experimentales/item/1012-plateforme-experimentale-de-reutilisation-d-eaux-usees-en-irrigation-murviel-les-montpellier-herault

VI. Conclusion générale

Au cours de mon parcours de recherches, j'ai progressivement construit et élargi mon objet de recherche allant d'un objet technique (les micro-mélangeurs pendant ma thèse et les goutteurs par la suite) à un objet socio-technico-environnemental (la pratique de la réutilisation des eaux usées traitées et ses impacts environnementaux), passant des disciplines mécanique des fluides et génie des procédés à l'agronomie et les démarches intégrant les acteurs à base d'enquêtes, de dispositifs d'échelles micro-fluidiques à la parcelle agricole. Cependant l'idée de présenter mon mémoire d'HDR autour de **l'hydrodynamiques dans les milli-systèmes en lien avec les milieux complexes et le bio-encrassement** s'est imposée depuis plusieurs années déjà : par goût, par conviction et parce que c'est bien le fil conducteur de mes travaux de recherche.

Ainsi, je dirais que mon identité scientifique peut se résume en trois points :

1. un fort ancrage expérimental,
2. l'hydrodynamique comme base de toute étude de procédé,
3. un penchant vers la construction de projets inter /pluridisciplinaire.

Afin d'atteindre mes objectifs, j'ai notamment contribué et coordonnée la mise en place d'une plateforme expérimentale de réutilisation des eaux usées. Ce qui m'a fortement mobilisé depuis 2016. L'exercice n'a pas toujours été simple, car il fallait jongler entre la construction du consortium de laboratoires, les contraintes techniques et budgétaires, l'habileté technologique et expérimentale des doctorants et stagiaires. Mais cette plateforme je la vois comme un outil précieux qui a su fédérer différentes équipes pour lever un certain nombre de verrous scientifiques et a permis de produire un certain nombre de résultats et publications. C'est pourquoi j'ai présenté la problématique réutilisation des eaux usées en irrigation en détails dans ce mémoire et dans mes perspectives de recherche sur l'eau circulaire.

Au fil des pages qui précèdent également transparait également la question transversale et importante **de la mesure**: moyens analytiques ou capteurs; mesures quantitatives ou qualitatives; approches locales ou globales; mesures en ligne ou hors ligne. Plus généralement, la question du choix de la mesure pertinente revient en permanence lorsque l'on mène des campagnes expérimentales, notamment aux échelles micro et milli-fluidiques. Elle est présente en amont de la modélisation, quand il s'agit de comprendre des phénomènes et qu'il se pose une fois encore le problème du « bon degré » de simplicité. Elle est tout aussi nécessaire en aval de cette modélisation, lors de l'étape de validation, où il n'est pas toujours possible de mesurer les grandeurs que prédit le modèle et où il faut souvent établir un pont entre ce que l'on calcule et ce que l'on est capable de mesurer avec un niveau de confiance suffisant pour être susceptible, soit de réfuter le modèle, soit de le conforter.

En complément, comme mentionné en préambule, l'interdisciplinarité de l'UMR GEAU engendrée par nos recherches au tour de la gestion de l'eau implique d'aborder et de résoudre un ensemble de questions associées aux différentes disciplines (génie des procédés, agronomie, économie et

sociologie par exemple). A mon arrivée à Irstea, il m'a donc fallu dans un premier temps appréhender et comprendre ce microcosme, comprendre les problématiques et les questions scientifiques. Cette longue et indispensable étape m'a permis de trouver ma place dans l'équipe, de créer un langage commun et de dégager des questions scientifiques pertinentes qui alimentent aujourd'hui mon axe de recherche en tant que CR à INRAE. J'espère avoir donc montré tout au long de ce manuscrit d'HDR **ma capacité à identifier les enjeux d'un problème scientifique, déployer une stratégie adaptée aux ressources disponibles pour traiter ce problème, obtenir des résultats grâce à cette stratégie, faire une analyse critique de ces résultats et les transférer vers l'utilisateur auquel ils étaient destinés**. J'entends ici par ressources, non seulement les moyens techniques et financiers à disposition pour mener à bien l'étude, mais aussi les ressources humaines, avec leurs qualités et leurs compétences propres, mais aussi leur disponibilité. J'ai eu la chance également de co-encadrer six doctorants au cours de ces sept dernières années de recherche. Trois thèses ont été soutenues et associées à une production scientifique significative. Tous ces docteurs ont obtenu un emploi dans la continuité de leurs travaux de thèse ou en conformité avec leurs nouvelles aspirations.

Je terminera qu'après quelques années de carrière en recherche et avoir exploré des thématiques, des lieux et des organismes variés au gré de mes affectations, je pense que le moment est bien choisi pour opérer ce basculement que marque l'obtention d'une HDR : l'accès vers un niveau de responsabilité plus important, dans un rôle académique mieux établi.

VII. Références

Abid R (1991) A modified low-Reynolds-number turbulence model applicable to recirculating flow in pipe expansion. Technical report AIAA-91-a781, AIAA 22nd fluid dynamics, plasma dynamics and laser conference.

Abe K, Kondoh T, Nagano Y (1994) A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows-I. Flow field calculations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 37: 139-151.

Adin A, Sacks M (1991) Dripper-clogging factors in wasterwater irrigation. J. Irrig. Drain. Eng. 117, 813–826.

Ait-Mouheb N, Schillings J, Al-Muhammad J, et al (2019) Impact of hydrodynamics on clay particle deposition and biofilm development in a labyrinth-channel dripper. Irrig Sci 37:. doi: 10.1007/s00271-018-0595-7

Ait-Mouheb N, Mayaux PL, Mateo-Sagasta, Hartani T, Molle B (2020) book chapter: Water Reuse: a resource for Mediterranean Agriculture, in Water Resources in the Mediterranean Region book, Elsevier, 107-136. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818086-0.00005-4

Al-muhammad J, Anselmet F, Tomas S, et al (2019) Experimental and numerical characterization of the vortex zones along a labyrinth milli-channel used in drip irrigation. International Journal of Heat and Fluid Flow. 80.

Al-Muhammad J, Tomas S, Ait-Mouheb N, et al (2018) Micro-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in drip irrigation. Exp Fluids 59:. doi: 10.1007/s00348-018-2633-x

Al-Muhammad J, Tomas S, Anselmet F (2016) Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: case of micro-irrigation. Irrig Sci 34:361–377. doi: 10.1007/s00271-016-0508-6

Alpkvist E, Picioreanu C, van Loosdrecht MCM, Heyden A (2006) Three-dimensional biofilm model with individual cells and continuum EPS matrix, Biotech. & Bioeng. 94 (5) 961-979.

Angelakis AN, Gikas P (2014) Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. Water Util J 8:67–78. doi: 10.1117/12.740168

Araújo PA, Malheiro J., Machado I., Mergulhão F, Melo L, Simões M (2016) Influence of Flow Velocity on the Characteristics of Pseudomonas fluorescens Biofilms. J. Environ. Eng. 142, 04016031. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001068

Arp G, Thiel V, Reimer A, et al. (1999) Biofilm exopolymers control microbialite formation at thermal springs discharging into the alkaline Pyramid Lake, Nevada, USA. Sediment Geol.; 126:159–176

Azeb L, Hartani T, Ait-Mouheb N, Pradeleix L, Hajjaji N, Aribi S (2020) Life cycle assessment of cucumber irrigation: Unplanned water reuse versus groundwater resources in Tipaza (Algeria),

Journal of Water Reuse and Desalination,

Azeredo J, Azevedo NF, Briandet R, et al (2017) Critical review on biofilm methods. Crit Rev Microbiol 43:313–351. doi: 10.1080/1040841X.2016.1208146

Belkhadir R, Capdeville B, Roques H (1988) Etude descriptive fondamentale et modélisation de la croissance d'un film biologique Etude descriptive fondamentale de la croissance d'un film biologique. Water Research, 22(1):59-69.

Benouniche M, Kuper M, Hammani A, Boesveld H (2014) Making the user visible: analysing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance. Irrig Sci 32:405–420. doi: 10.1007/s00271-014-0438-0

Benzerara K, Menguy N, Lopez-Garcia P, et al. (2006) Nanoscale detection of organic signatures in carbonate microbialites. Proc Natl Acad Sci USA.103:9440–9445.

Berho C, Pouet MC, Bayle S, Azema N, Thomas O (2004) Study of UV-vis response of mineral suspensions in water. Colloids and Surfaces, 248, 9–16.

Bounoua S, Tomas S, Labille J, et al (2016) Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches. Irrig Sci 34:327–342. doi: 10.1007/s00271-016-0506-8

Brunke M, Gonser T (1997) The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. Freshw. Biol. 37, 1–33. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00143.x

Capra A, Scicolone B (2004) Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. Agric Water Manag 68:135–149. doi: 10.1016/j.agwat.2004.03.005

Cerqueira F, Matamoros V, Bayona JM, et al (2019) Antibiotic resistance gene distribution in agricultural fields and crops. A soil-to-food analysis. Environ Res 177:108608. doi: 10.1016/J.ENVRES.2019.108608

Cartwright JHE., Feingold M, Piro O (1999) An Introduction to Chaotic Advection. In: Chaté H., Villermaux E., Chomaz JM. (eds) Mixing. NATO ASI Series (Series B: Physics), vol 373. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4697-9_13

Chadwick A, Morfett J (1993) Hydraulics in civil and environ- mental engineering. 2nd ed. New York: Chapman and Hall.

Chakraborty P, Balachandar S, Adrian RJ (2005) On the relationships between local vortex identication schemes. Journal of Fluid Mechanics, 535,189–214.

Chang KC, Hsieh WD, Chen CS (1995) A two-equation turbulence model for compressible flows. Journal of fluids Engineering. 117: 417-423.

Characklis WG (1981) Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. Biotechnology and Bioengineering, 23(9):1923-1960.

Chen MJ, Zhang Z, Bott TR (2005) Effects of operating conditions on the adhesive strength of Pseudomonas fluorescens biofilms in tubes. Colloids Surfaces B Biointerfaces 43, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2005.04.004

Chittoor Jhansi S, Kumar Mishra S (2013) Wastewater Treatment and Reuse: Sustainability Options. J Sustain Dev 10:1–15. doi: http://dx.doi.org/10.7916/D8JQ10Q1.

Cirelli GL, Consoli S, Licciardello F, et al (2012) Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. Agric Water Manag 104:163–170. doi: 10.1016/J.AGWAT.2011.12.011

Coufort C (2004) Analyse expérimentale de la floculation en réacteur de Taylor-Couette : Influence de l'hydrodynamique sur les phénomènes d'agglomération et de rupture. INSA Toulouse.

de Camargo AP, Molle B, Tomas S, Frizzone JA (2014) Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: Proposing a monitoring and detection protocol. Irrig Sci 32:181–191. doi: 10.1007/s00271-013-0423-z

Derlon N, Massé, A, Escudié R, Bernet N, Paul P (2008) Stratification in the cohesion of biofilms grown under various environmental conditions, Water Research. 42(8–9):2102-2110

Dressaire E, Sauret A (2016) Clogging of microfluidic systems, Soft matter 13: 37-48 .

Dietrich JP, Loge FJ, Ginn TR, Başagˇaogˇlu H (2007) Inactivation of particle-associated microorganisms in wastewater disinfection: Modeling of ozone and chlorine reactive diffusive transport in polydispersed suspensions. Water Res. 41, 2189–2201. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.038

Esser A, Grossmann S (1996). Analytic expression for Taylor–Couette stability boundary. Phys.Fluids 8, 1814–1819.

Feng J, Li Y, Liu Z, et al (2018a) Composite clogging characteristics of emitters in drip irrigation systems. Irrig Sci 0:0. doi: 10.1007/s00271-018-0605-9

Feng J, Li Y, Wang W, Xue S (2018b) Effect of optimization forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system. Irrig Sci 36:37–47. doi: 10.1007/s00271-017-0561-9

Flemming H, Wingende J (2010) The biofilm matrix. Nat. Rev. Microbiol. 8, 623–33. https://doi.org/10.1038/nrmicro2415

Friberg N, Bergfur J, Rasmussen J, Sandin L (2013) Changing Northern catchments: Is altered hydrology, temperature or both going to shape future stream communities and ecosystem processes? Hydrol. Process. 27, 734–740. https://doi.org/10.1002/hyp.9598

Gagnon GA, Slawson RM (1999) An efficient biofilm removal method for bacterial cells exposed to drinking water in Journal of Microbiological Methods 34(3):203-214.

Gamri S, Soric A, Tomas S, et al (2015) Effects of pipe materials on biofouling under controlled

hydrodynamic conditions. J Water Reuse Desalin jwrd2015037. doi: 10.2166/wrd.2015.037

Green MA, Rowley CW, Haller G (2007) Detection of Lagrangian coherent structures in three dimensional turbulence J. Fluid Mech. 572: 111-120.

Goyal MR (2017) Micro irrigation Management, Apple Acad. Taylor & Francis Group, USA.

Haller G (2005) An Objective De nition of a Vortex. J. Fluid Mech 1-26.

Hunt JCR, Wray AA, Moin P (1988) Eddies, stream, and convergence zones in turbulent ows. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, 193-208.

Jiménez B (2006) Irrigation in Developing Countries Using Wastewater. 6:229–250.

Karmeli D (1977) Classification and flow regime analysis of drippers. J. Agric. Eng. Res. 22, 165–173. https://doi.org/10.1016/0021-8634(77)90060-9

Katz S, Dosoretz C, Chen Y, Tarchitzky J (2014) Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. Irrig Sci 32:459–469. doi: 10.1007/s00271-014-0442-4

Kolter R, Greenberg EP (2006) Microbial sciences: The superficial life of microbes. Nature 441:300–302. https://doi.org/10.1038/441300a

Kreft JU, Booth G, Wimpenny JWT (1998) Bacsim, asimulator for individual-based modelling of bacterial colonygrowth.http://www.eeb.yale.edu/ginger/bacillus/node1.html.

Kwok W, Picioreanu C, Ong S, Van Loosdrecht M, Ng W, Heijnen J (1998). Influence of biomass production and detachment forces on biofilm structures in a biofilm airlift suspension reactor. Biotechnology and Bioengineering, 58(4): 400-407.

Lamm FR (2013) Effect of Flushing Velocity and Flushing Duration on Sediment Transport in Microirrigation Driplines. Trans ASABE 56:1821–1828. doi: 10.13031/trans.56.10293

Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS (2007) Maintenance. In: Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS (eds) Microirrigation for crop production: design, operation, and management, 13th edn, 13th edn. Elsevier B.V., Amsterdam, 1–643.

Lamm FR, Trooien TP, Stone LR, et al (2002) Using livestock wastewater with SDI. A status report after four seasons. 8–15.

Launder BE (1989) Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 9: 963-985.

Launder BE, Sharma BI (1974) Application of the energy-disssipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. Lett. Heat Mass Transfer. 1: 131-138.

Launder BE, Reece GJ, Rodi W (1975) Progress in the development of Reynolds-Stress turbulence closure. J. Fluid Mech. 68, 537–566.

Lavanholi R, Camargo AP De, Wilson W, et al (2020) Prediction of Pressure – Discharge Curves of Trapezoidal Labyrinth Channels from Nonlinear Regression and Artificial Neural Networks. 146:1–10. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001485

Lavanholi R, Oliveira FC, Camargo APD, et al. (2018) Methodology to Evaluate Dripper Sensitivity to Clogging due to Solid Particles: An Assessment. Sci World J 2018:. doi: 10.1155/2018/7697458

Lazarova V, Akica B (2004) Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turf Grass.

Lebeaux D, Ghigo J (2012) Infections associées aux biofilms. médecine/sciences 28:727–739. doi: 10.1051/medsci/2012288015

Lee WH (2014) Needle-type environmental microelectrode sensors for biofilm study in aqueous systems, in: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. IEEE, pp. 185–190. https://doi.org/10.1109/ICNSC.2014.6819623

Leitgeb RA, Baumann B (2018) Multimodal optical medical imaging concepts based on optical coherence tomography. Front Phys 6:. doi: 10.3389/fphy.2018.00114

Lequette K, Ait-Mouheb N, Wéry N (2019) Drip irrigation biofouling with treated wastewater: bacterial selection revealed by high-throughput sequencing. Biofouling 1–13. doi: 10.1080/08927014.2019.1591377

Levy GJ, Fine P, Bar-tal A (2011) Treated Wastewater in Agriculture and Crops Use andIimpacts on the Soil Environment and Crops, edited Wiley-Blackwell.

Li N, Kang Y, Li X, et al (2019a) Lateral flushing with fresh water reduced emitter clogging in drip irrigation with treated effluent. Irrig Sci 37:627–635. doi: 10.1007/s00271-019-00637-3

Li Y, Feng J, Xue S, et al (2019b) Formation mechanism for emitter composite-clogging in drip irrigation system. Irrig Sci 37:169–181. doi: 10.1007/s00271-018-0612-x

Li Y, Song P, Pei Y, Feng J (2015) Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. Irrig. Sci. 33, 235–245. https://doi.org/10.1007/s00271-015-0462-8

Lin KW, Yang JT (2007) Chaotic mixing of fluids in a planar serpentine channel. Int J Heat Mass Transf 50:1269–1277. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.016

Luquet D, Vidal A, Smith M, Dauzat J (2005) 'More crop per drop': how to make it acceptable for farmers? Agric Water Manag 76:108–119. doi: 10.1016/J.AGWAT.2005.01.011

Manasfi R, Brienza M, Ait-Mouheb N, et al (2020) Impact of long-term irrigation with municipal reclaimed wastewater on the uptake and degradation of organic contaminants in lettuce and leek. Sci Total Environ 142742. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142742

Mansour R, Elshafei A (2017) Protection of Metal Surfaces from Microbial Colonization. Annu. Res. Rev. Biol. 14, 1–8. https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/34452

Mehel A, Gabillet C, Djeridi H (2006) Bubble Effect on the structures of Weakly Turbulent Couette Taylor Flow. J. Fluid Eng. 128 (4):819-831.

Melo L, Vieira M (1999) Physical stability and biological activity of biofilms under turbulent flow and low substrate concentration. Bioprocess Engineering. 20(4):363-368.

Mendret J, Guigui C, Schmitz P, Cabassud C., Duru P (2007). An optical method for in situ characterization of fouling during filtration. AIChE Journal, 53(9), 2265–2274. https://doi.org/10.1002/aic.11257

Mohr M, Dockhorn T, Drewes JE, et al (2020) Assuring water quality along multi-barrier treatment systems for agricultural water reuse. J Water Reuse Desalin 10:332–346. doi: 10.2166/wrd.2020.039

Morgenroth E, Milferstedt K (2009) Biofilm engineering: Linking biofilm development at different length and time scales. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 8, 203–208. https://doi.org/10.1007/s11157-009-9163-1

Nakayama FS, Bucks DA (1991) Water quality in drip/trickle irrigation: A review. Irrig Sci 12:187–192. doi: 10.1007/BF00190522

Niu W, Yu L, Wu P (2010) Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content. Trans. Chinese Soc. Agric. Mach. 26, 14–20.

Obayomi O, Ghazaryan L, Ben-Hur M, Edelstein M, Vonshak A, Safi J, Bernstein N, Gillor O (2019) The fate of pathogens in treated wastewater-soil-crops continuum and the effect of physical barriers. Sci. Total Environ. 681, 339–349. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.378

Obst M, Dynes J, Lawrence J, et al. (2009) Precipitation of amorphous $CaCO_3$ (aragonite-like) by cyanobacteria: a STXM study of the influenceofEPS on thenucleation process. Geochim Cosmochim Acta. 73:4180– 4198.

Ohmura, N., Kataoka, K., Shibata, Y., Makino T (1997) Effective mass diffusion over cell boundaries in a Taylor-Couette flow system, Chemical Engineering Science, Volume 52, Issue 11, Pages 1757-1765

Paul E, Ochoa JC, Pechaud Y, Liu Y, Liné A (2012) Effect of shear stress and growth conditions on detachment and physical properties of biofilms. Water research 46:5499-5508.

Pavanello G, Faimali M, Pittore M, Mollica A, Mollica A, Mollica A (2011) Exploiting a new electrochemical sensor for biofilm monitoring and water treatment optimization. Water Research, 45(4), 1651–1658.

Pechaud Y, Marcato-Romain CE, Girbal-Neuhauser E, Queinnec I, Bessiere Y, Paul E (2012) Combining hydrodynamic and enzymatic treatments to improve multi-species thick biofilm removal. Chemical Engineering Science. 80:109–118

Picioreanu C, Van Loosdrecht MC, Heijnen JJ (2001). Two-dimensional model of biofilm detachment caused by internal stress from liquid flow. Biotechnology & Bioengineering. 72(2):205-218.

Picioreanu C, Blauert F, Horn H, Wagner M (2018) Determination of mechanical properties of biofilms by modelling the deformation measured using optical coherence tomography. Water Res 145:588–598. doi: 10.1016/j.watres.2018.08.070

Pope SB (2000) Turbulent flows. Cambridge university press.

Puig-Bargués J, Arbat G, Elbana M, Duran-Ros M, Barragán J, de Cartagena FR, Lamm FR (2010) Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. Agric. Water Manag. 97, 883–891. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.019

Qadir M, Sharma BR, Bruggeman A, et al (2007) Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. Agric Water Manag 87:2–22. doi: 10.1016/J.AGWAT.2006.03.018

Qian J, Horn H, Tarchitzky J, et al (2017) Water quality and daily temperature cycle affect biofilm formation in drip irrigation devices revealed by optical coherence tomography. Biofouling 7014:1–11. doi: 10.1080/08927014.2017.1285017

Racina A, Kind M (2006) Specific power input and local micro mixing times in turbulent Taylor–Couette flow. Exp. Fluids 41: 513–522.

Rizk N (2017) Characterization of chemical and biological clogging and their interactions within a micro irrigation system in the context of the reuse of treated effluents in irrigation. Université Aix-Marseille

Rizk N, Ait-mouheb N, Molle B, Roche N (2019) Treated wastewater reuse in micro-irrigation : effect of shear stress on biofilm development kinetics and chemical precipitation. Environ Technol 0:1–11. doi: 10.1080/09593330.2019.1625956

Rochex A, Godon JJ, Bernet N, Escudié R (2008) Role of shear stress on composition, diversity and dynamics of biofilm bacterial communities. Water Res 42:4915–4922. doi: 10.1016/j.watres.2008.09.015

Song P, Zhou B, Feng G, Brooks JP, Zhou H, Zhao Z, Liu Y, Li Y (2019) The influence of chlorination timing and concentration on microbial communities in labyrinth channels: implications for biofilm removal. Biofouling 35, 401–415. https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1600191

Stoodley P, Dodds I, Boyle JD, Lappin-Scott HM (1999) Influence of hydrodynamics and nutrients on biofilm structure. J Appl Microbiol Symp Suppl 85:19–28. doi: 10.1111/j.1365-2672.1998.tb05279.x

Talozi SA, Hills DJ (2001) Simulating emitter clogging in a microirrigation subunit. Transactions of the ASAE 44 (6) 1503.

Tarchitzky J, Rimon A, Kenig E, Dosoretz CG, Chen Y (2013). Biological and chemical fouling in drip

irrigation systems utilizing treated wastewater. Irrigation Science, 31(6), 1277–1288.

Thayanukul P, Kurisu F, Kasuga I, Furumai H (2013) Evaluation of microbial regrowth potential by assimilable organic carbon in various reclaimed water and distribution systems. Water Res 47:225–232. doi: 10.1016/j.watres.2012.09.051

Tidwell JE, Dawson-Andoh B, Adedipe EO, Nkansah K, Dietz MJ (2015) Can near-infrared spectroscopy detect and differentiate implant-associated biofims? Clinical orthopaedics and related research 473 (11) 3638-3646.

Tourney J, Ngwenya BT (2009) Bacterial extracellular polymeric substances (EPS) mediate $CaCO_3$ morphology and polymorphism. Chemical Geology 262 :138–146.

Turolla A, Di Mauro M, Mezzera L, Antonelli M, Carminati M (2019). Development of a Miniaturized and Selective Impedance Sensor for Real-Time Slime Monitoring in Pipes and Tanks. Sensors and Actuators B: Chemical, 281, 288–295. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.107

Tsai HF, Bard M, Izumikawa K, Krol, AA, Sturm AM, Culbertson NT, et al. (2004). Candida glabrata erg1 mutant with increased sensitivity to azoles and to low oxygen tension. Antimicrob. Agents Chemother. 48, 2483–2489. doi: 10.1128/AAC.48.7.2483-2489.2004

Urbano VR, Mendonça TG, Bastos RG, Souza CF (2017) Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. Agric Water Manag 181:108–115. doi: 10.1016/j.agwat.2016.12.001

Wagner M, Taherzadeh D, Haisch C, Horn H (2010) Investigation of the mesoscale structure and volumetric features of biofilms using optical coherence tomography. Biotechnol. Bioeng. 107, 844–853. https://doi.org/10.1002/bit.22864

Wang H, Hu C, Li X (2015) Characterization of biofilm bacterial communities and cast iron corrosion in bench-scale reactors with chloraminated drinking water. Eng. Fail. Anal. 57, 423–433. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.016

Wei Z, Cao M, Liu X, et al (2012) Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. Chinese J Mech Eng (English Ed 25:729–737. doi: 10.3901/CJME.2012.04.729

Wei S, Cui H, Jiang Z, et al (2015) Biomineralization processes of calcite induced by bacteria isolated from marine sedi- ments. Braz. J. Microbiol. 46:455–464.

Westerweel J (2000) Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry. Experiments in Fluids. Springer-Verlag. 29:S3-S12.

Winward GP, Avery LM, Stephenson T, Jefferson B (2008) Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. Water Res. 42, 483–491. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.042

Wu D, Li Y, k, Liu HS, Yang PL, Sao HS, Liu YZ (2013) Simulation of the flow characteristics of a drip

irrigation emitter with large eddy methods. Math Comput Model 58:497–506

Xavier JB, Picioreanu C, van Loosdrecht MCM (2005) A framework for multidimensional modelling of activity and structure of multispecies biofilms. Environ Microbiol7:1085–1103.

Zhao L, Liu YW, Li N, Fan XY, Li X (2020) Response of bacterial regrowth, abundant and rare bacteria and potential pathogens to secondary chlorination in secondary water supply system. Sci. Total Environ. 719, 137499. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137499

Zhang J, Zhao W, Wei Z, et al (2007) Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels. Comput Electron Agric 56:120–129. doi: 10.1016/j.compag.2007.01.007

Zhou B, Li Y, Pei Y, et al (2013) Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. Irrig Sci 31:1251–1263. doi: 10.1007/s00271-013-0402-4

Zimmerleiter R, Leiss-Holzinger E., Wagner E., Kober-Rychli K, Wagner M, Brandstetter M (2020) Inline biofilm monitoring based on near-infrared spectroscopy with ultracompact spectrometer technology. NIR News, 31(7-8), 9–13. https://doi.org/10.1177/0960336020978716

VIII. Sélection de publications