



HAL
open science

Impact des stratégies d'aération sur les performances de filtration et caractérisation hydrodynamique d'un pilote de BaM semi-industriel: apport de la modélisation à la mesure par tomographie de résistivité électrique

Elodie Suard, Yannick Fayolle, Rémi Clément, M. Alliet, Claire Albasi, Sylvie Gillot

► To cite this version:

Elodie Suard, Yannick Fayolle, Rémi Clément, M. Alliet, Claire Albasi, et al.. Impact des stratégies d'aération sur les performances de filtration et caractérisation hydrodynamique d'un pilote de BaM semi-industriel: apport de la modélisation à la mesure par tomographie de résistivité électrique. Innover dans les pratiques de monitoring et d'exploitation des stations d'épuration. Enseignements scientifiques et techniques tirés de la phase I du programme (2014-2017). Mocopée, Astee, pp.209-220, 2018. hal-02609237

HAL Id: hal-02609237

<https://hal.inrae.fr/hal-02609237v1>

Submitted on 16 May 2020

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.

MOCOPÉE

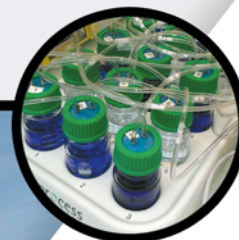
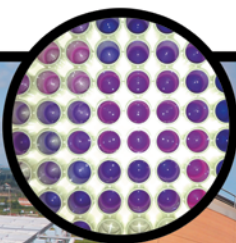
Soutenu par le Service Public de l'Assainissement Francilien (SIAAP)

MODÉLISATION, CONTRÔLE ET OPTIMISATION DES PROCÉDÉS D'ÉPURATION DES EAUX



INNOVER DANS LES PRATIQUES DE MONITORING ET D'EXPLOITATION DES STATIONS D'ÉPURATION

Enseignements scientifiques et techniques
tirés de la phase I du programme (2014-2017)



Organismes de
coordination du
programme

SIAAP
Service public de l'assainissement francilien



ISBN 978-2-490604-01-2 9782490604012

Crédits photos


REPORTAGE LCDEA/DÉCEMBRE 2012

Le bar Floréal photographie
contact@bar-floreal.com
01 43 49 55 22

LT : © Laetitia Tura/le bar Floréal.photographie
AL : © André Lejarre/le bar Floréal.photographie

Création graphique, mise en page et impression

(Couverture d'après la charte graphique du programme Mocopée)

 id bleue - Sablé (72) - www.idbleue.com

INNOVER DANS LES PRATIQUES DE MONITORING ET D'EXPLOITATION DES STATIONS D'ÉPURATION

Enseignements scientifiques et techniques
tirés de la phase I du programme (2014-2017)

Ouvrage coordonné par Anne Guillon et Vincent Rocher
Secrétariat éditorial par Muriel Auriol et Géraldine Izambart

Ouvrage introductif à la journée de restitution du programme de recherche Mocopée organisée le 4 décembre 2018 à la Cité de l'eau et de l'assainissement du SIAAP à Colombes.

Organisée par



Île-de-France

En partenariat avec



Les propos et les avis exprimés dans les articles qui suivent n'engagent que leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement l'opinion de l'Astée.

AVANT-PROPOS DU

SIAAP

Service public de l'assainissement francilien



Jacques Olivier

Directeur Général du Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap)

« Le Siaap est riche d'une capacité de recherche et développement et d'une expertise technique de qualité. Leur combinaison lui permet à la fois d'être en appui au développement de la performance de son exploitation, de maîtriser la transformation de son outil industriel et d'anticiper les évolutions réglementaires, technologiques et scientifiques. Sa démarche est fondée, d'une part sur la recherche d'une compréhension approfondie du système d'assainissement et de son environnement, et, d'autre part, sur le développement d'outils méthodologiques et technologiques répondant à ses problématiques.

Le Siaap construit sa démarche sur le long terme, tel qu'en témoigne le lancement en 2016 du projet d'entreprise Siaap 2030 qui vise notamment à maintenir une innovation dynamique et en phase avec les grands enjeux industriels et environnementaux de demain. Cette démarche s'appuie sur un réseau de partenaires scientifiques et universitaires, ainsi que des industriels de premier plan, et s'organise autour de la coordination de programmes de recherche pluridisciplinaires centrés sur les problématiques industrielles actuelles et à venir.

Construit il y a maintenant cinq ans, le programme Mocopée constitue une pierre centrale de l'édifice. Ce programme est un terrain propice à l'émergence de concepts, connaissances et solutions innovantes indispensables pour répondre aux défis de demain, mais constitue également une véritable plateforme de déploiement de l'innovation. Car mettre l'innovation au service des enjeux de l'assainissement suppose que l'on construise les solutions innovantes mais aussi que l'on raccourcisse le délai entre l'émergence de la solution et son application concrète sur le terrain. Il est essentiel que l'innovation scientifique, catalysée au sein de ces programmes R&D, percole au sein du Siaap et plus globalement au sein des organismes en charge de l'assainissement des grandes agglomérations urbaines. »

AVANT-PROPOS DE



« Dans le contexte de changement global, Irstea répond aux enjeux économiques et socio-environnementaux majeurs, en particulier sur la gestion des ressources naturelles - eau, biodiversité, bioressources, bioéconomie et économie circulaire, la maîtrise des risques naturels et environnementaux, l'adaptation des écosystèmes forestiers et aquatiques... Cette recherche finalisée, reconnue par le label Carnot depuis 2006, est conduite en partenariat avec les services de l'État, les collectivités territoriales et les acteurs économiques, et permet l'émergence de solutions concrètes et adaptées car au plus proche des enjeux sociétaux et des préoccupations des entreprises.

Référent technique et scientifique dans le domaine du traitement et de la valorisation des eaux usées, Irstea contribue à répondre aux enjeux qui s'imposent aujourd'hui avec l'introduction de la circularité dans le traitement des déchets et effluents : améliorer la qualité de l'eau épurée, réduire les impacts environnementaux des activités d'épuration et valoriser les ressources des eaux usées. Pour les scientifiques d'Irstea, l'objectif est double : améliorer les connaissances sur les procédés et accompagner les acteurs publics et privés dans la conception, l'exploitation et l'optimisation des installations de traitement et de valorisation des eaux usées.

Né de la volonté d'Irstea, du Siaap et de l'UTC de définir un programme commun de recherche en phase avec les grands enjeux industriels actuels et futurs du traitement et de la valorisation des eaux usées, le programme Mocopée (Modélisation, Contrôle et Optimisation des Procédés d'Épuration des Eaux) a relevé le défi pour faire émerger des solutions concrètes et fédérer l'ensemble des acteurs du domaine. Vous trouverez ci-après un bilan complet de cette première phase et des résultats dégagés. L'entrée du programme dans sa deuxième phase permettra de poursuivre cette démarche tout en la renforçant par l'intégration de nouveaux acteurs et l'élargissement des thématiques abordées. »

Marc Michel

Président de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea)



AVANT-PROPOS DE



Philippe Courtier

Directeur Général de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC)

« Construite sur une pédagogie de l'autonomie et une recherche technologique interdisciplinaire orientée vers l'innovation, l'UTC forme des ingénieurs, masters et docteurs aptes à appréhender les interactions de la technologie avec l'homme et la société. L'UTC propose des formations où les sciences de l'ingénierie, les sciences humaines et sociales, les sciences économiques et politiques sont intégrées harmonieusement au service de l'éducation de l'ingénieur, du scientifique, du manager du futur, innovant, humaniste.

La stratégie de recherche et d'innovation de l'UTC est le reflet de la valeur ajoutée collective et des apports spécifiques de ses laboratoires, qui incarnent son cœur scientifique. Une recherche technologique, partenariale, pluridisciplinaire, interculturelle et avant tout propice à l'innovation, à la création de valeurs et de connaissances, une recherche également en connexion avec les problèmes réels du monde socio-économique. La recherche à l'UTC est ainsi interdisciplinaire et interculturelle.

Dans un contexte technique et réglementaire évolutif très rapide et très important dans le domaine du traitement des eaux, il était naturel que l'UTC s'associe avec le Siaap et l'Irstea pour construire le programme de recherche appliquée Mocopée en phase avec les enjeux industriels du domaine de l'assainissement. L'objectif est de faire évoluer les pratiques d'exploitation et de proposer des outils de suivi et de pilotage innovants (capteurs, méthodes de caractérisation de matrices, modèles d'aide à la décision), dans le but d'accroître le niveau d'optimisation des filières de traitement. Les thématiques de recherche de l'Unité TIMR, relatives à la Chimie et au Génie des Procédés s'adressent naturellement entre autres à la métrologie et aux procédés de traitement et de valorisation des eaux et de la matière.

Le programme Mocopée constitue un remarquable exemple réussi de la volonté de l'UTC de dynamisation de la connaissance scientifique, en partenariat avec des acteurs publics et industriels dans le domaine de traitement des eaux et de la valorisation de la matière. »



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

Jacques Olivier, <i>Directeur Général du Siaap</i>	page 4
Marc Michel, <i>Président de l'Irstea</i>	page 5
Philippe Courtier, <i>Directeur Général de l'UTC</i>	page 6

VISIONS D'ACTEURS EXTÉRIEURS

Vues de l'international	page 10
Vues de collectivités françaises	page 14
Vues d'exploitants de stations d'épuration urbaines	page 19
Vues de chercheurs	page 28
Vue d'une agence de l'eau	page 34
Vue d'un éditeur scientifique et technique	page 36

DOSSIER SCIENTIFIQUE

Partie introductive	page 41
Métérologie innovante appliquée à la file de traitement des eaux	page 49
Métérologie innovante appliquée à la file de traitement des boues	page 129
Espèces intermédiaires du cycle de l'azote en station d'épuration	page 159
Modélisation des procédés de traitement en station d'épuration	page 199

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Mocopée demain : les grandes orientations de la phase II (2018-2022)	page 253
Le mot de la fin par la Présidente du comité de la recherche de l'Astee	page 264

UN MOT SUR LE COMITÉ DE PILOTAGE ET DE COORDINATION DU PROGRAMME

page 265

TABLE DES MATIÈRES DÉTAILLÉE

page 268

Impact des stratégies d'aération sur les performances de filtration et caractérisation hydrodynamique d'un pilote de BaM semi-industriel : apport de la modélisation à la mesure par tomographie de résistivité électrique

Impact of aeration strategies on filtration performances and hydrodynamic characterisation of a semi-industrial MBR: contribution of modelling to electrical resistivity tomography measurement

Elodie Suard^[1], Yannick Fayolle^{[1]*}, Rémi Clément^[2], Marion Alliet^[3], Claire Albasi^[3], Sylvie Gillot^[2]

^[1] Irstea, UR HBAN, Centre d'Antony

^[2] Irstea, UR REVERSAAL, Centre de Lyon-Villeurbanne

^[3] Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS

* Auteur de correspondance : yannick.fayolle@irstea.fr



Les bioréacteurs à membranes se sont largement développés ces dernières années en assainissement domestique urbain. A ce jour, deux installations du Siaap sont équipées de ce procédé (Seine Aval, Seine Morée). Cependant, le colmatage des membranes reste une problématique industrielle importante pouvant entraîner des coûts énergétiques et de remplacement importants. Différentes stratégies de limitation du colmatage sont mises en place, dont l'aération séquencée des membranes à l'aide de grosses bulles. Cependant, les mécanismes d'impact de cette aération restent relativement méconnus. Dans le cadre de l'axe 2 du programme de recherche Mocopée, un pilote semi-industriel de filtration membranaire a été conçu, dimensionné et installé sur l'unité de traitement des jus de Seine Aval. Ce pilote a permis d'étudier l'impact de l'aération sur les performances de filtration. La caractérisation de la dispersion des bulles au sein des réseaux de fibres a été réalisée à l'aide de la tomographie de résistivité électrique, en s'appuyant sur un protocole innovant basé sur la modélisation. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact couplé du débit d'air et de la concentration en matières en suspension sur cette dispersion du gaz. Ces résultats permettent d'envisager la régulation de l'aération en fonction de la concentration en MES dans les procédés industriels.

Bioréacteurs à membranes - Colmatage - Aération - Hydrodynamique - Tomographie de résistivité électrique

Introduction

Les bioréacteurs à membranes (BaM) sont des procédés de traitement biologique des eaux résiduaires, composés d'un réacteur à boues activées couplé à une filtration membranaire. En pleine expansion lors des deux dernières décennies, ce procédé présente l'avantage de produire un effluent de qualité stabilisée, en comparaison d'un procédé conventionnel, mais également d'être particulièrement compact. Les membranes d'ultrafiltration ou de microfiltration employées sont généralement sous forme de fibres ou de plaques, disposées en modules et immergées dans des cellules membranaires pour séparation des boues biologiques et de l'eau traitée. A ce jour, cette technologie est implantée sur deux usines du Siaap : (i) Seine-Aval sur la nouvelle file membranaire dans le cadre de la modernisation du traitement biologique, mais également sur l'unité de traitement des jus de retour issus du traitement des boues (TDJ) et (ii) Seine-Morée.

Cependant, la limitation du colmatage de ces membranes, et donc le maintien au cours du temps des performances de production de ces systèmes, reste la problématique principale à l'échelle industrielle. Ce colmatage trouve son origine dans le couplage de plusieurs mécanismes parmi lesquels (i) le dépôt de particules à la surface des membranes générant un gâteau de filtration, (ii) la constriction et (iii) le blocage des pores des membranes, constituant leur colmatage interne, mais également (iv) leur prise en masse (HERMIA, 1982 ; BOLTON *et al.*, 2006 ; DUCLOS-ORSELLO *et al.*, 2006 ; WU *et al.*, 2011). Parmi les techniques utilisées pour la maîtrise de ce colmatage, l'aération sous la forme de grosses bulles permet de limiter le dépôt de particules à la surface des membranes en générant de l'érosion au voisinage de la membrane, et plus généralement des turbulences. Ainsi, le flux de filtration peut être maintenu dans le temps, mais l'injection de cet air génère des coûts énergétiques importants, au regard des procédés conventionnels (<https://energie-step.irstea.fr>).

Les travaux de recherche récents se sont focalisés sur l'optimisation de l'aération des membranes, et plus particulièrement sur la caractérisation de l'hydrodynamique au sein de ces réacteurs (BRAAK *et al.*, 2012). Le principal objectif était de mettre en évidence les mécanismes d'impact des stratégies d'aération sur la limitation du colmatage telle que la turbulence générée, le mouvement des fibres et le cisaillement en surface des membranes. La majorité des études sur ce type de procédé est réalisée d'une part dans un milieu modèle, et d'autre part à l'échelle pilote du fait de la facilité de mise en œuvre de techniques expérimentales de caractérisation des paramètres hydrodynamiques (vitesses de liquide, tailles de bulles...). Cependant, ces simplifications d'étude ne permettent pas de traduire les hétérogénéités au sein des modules membranaires et les conclusions s'avèrent difficilement transposables à l'échelle industrielle (BUETEHOORN *et al.*, 2012). Aussi, des techniques de mesures alternatives doivent être développées afin de permettre d'étudier ces systèmes pour des conditions opératoires et des échelles représentatives des réacteurs industriels.

Dans cet objectif, la présente étude propose de (i) développer et appliquer une méthodologie de caractérisation de la dispersion du gaz au sein des faisceaux de fibres, basée sur la tomographie de résistivité électrique et (ii) étudier l'impact couplé des conditions d'aération sur les écoulements et l'évolution des performances de filtration à une échelle représentative des systèmes industriels. Ainsi, des expérimentations ont été menées sur un pilote semi-industriel alimenté en boues biologiques provenant de l'unité de traitement des jus de la station d'épuration de Seine-Aval. Ce pilote, dimensionné afin de reproduire les conditions d'environnement des modules membranaires de l'unité TDJ, a été instrumenté pour un suivi lors de campagnes de mesures expérimentales sur la période octobre 2016 – mai 2017.

1. Matériels et méthodes

1.1. PILOTE SEMI-INDUSTRIEL DE FILTRATION MEMBRANAIRE ET MESURES ASSOCIÉES AU SUIVI

Un réacteur semi-industriel en PVC ($V_{\text{liquide}} = 2,0 \text{ m}^3$, $L \times l \times h_{\text{liquide}} = 1,23 \times 0,70 \times 2,40$, Figure 1) est équipé de trois modules membranaires fibres creuses (KMS Puron, PSH 34, Surface de filtration = $3 \times 34 \text{ m}^2 = 102 \text{ m}^2$). Chaque module membranaire est constitué de neuf faisceaux de fibres. Le réacteur est alimenté en continu avec les boues activées à un débit de $3,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, prélevées dans la zone d'alimentation des cellules membranaires du TDJ. Aussi, les propriétés des boues dans le réacteur sont fixées principalement par le fonctionnement de l'unité TDJ, entraînant des variations des paramètres opératoires au cours du temps (concentration en MES, pollution dissoute...).

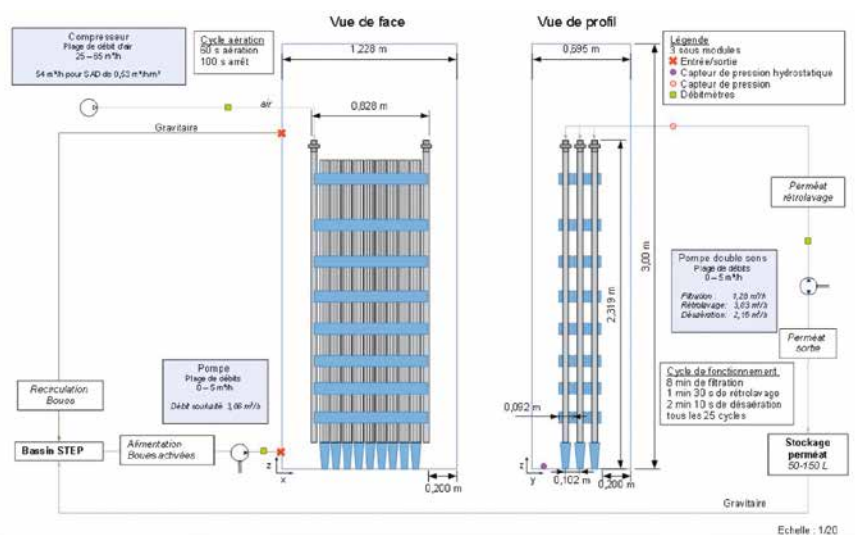


Figure 1 : Schéma du pilote semi-industriel

Le flux de filtration est fixé à un débit de $1,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Les séquences de filtration appliquées sont de 480 secondes de filtration, suivies de 90 secondes de rétrolavage.

L'ensemble des mesures associées au suivi du pilote (sondes de mesures, prélèvements ponctuels et moyens 24 h) est regroupé dans le Tableau 1. Les capteurs sont positionnés dans le pilote pour le suivi en continu des propriétés des boues circulant dans celui-ci (oxygène dissous, conductivité, potentiel d'oxydo-réduction, pH, MES), du débit d'air, des débits liquides d'alimentation et de perméat, et de la pression en aval et amont de la membrane pour la détermination de la pression transmembranaire. Des préleveurs automatisés ont également été installés afin de réaliser des échantillons moyennés sur 24 h des boues activées circulant dans le pilote et du perméat.

Localisation	Paramètre	Capteur	Prélèvement moyen 24h	Prélèvement ponctuel	Fréquence
Cuve membranaire	$[\text{O}_2]_{\text{dissous}}$ Conductivité, pH, Température, RedOx, [MES]	X			Minute
	Pression amont des membranes	X			5 secondes
	$\text{DCO}_{\text{surageant}}$ $\text{TAC}_{\text{surageant}}$		X		Journalière
	Rhéologie, MVS			X	Hebdomadaire
Perméat	DCO		X		Journalière
Alimentation en boues	$Q_{\text{alimentation boues}}$	X			5 secondes
Réseau d'air	Q_{air}	X			5 secondes
Réseau de perméat	Pression aval membrane, $Q_{\text{perméat}}$	X			5 secondes

Tableau 1 : Mesures réalisées sur le pilote semi-industriel lors du suivi

1.2 STRATÉGIES D'AÉRATION APPLIQUÉES LORS DES CAMPAGNES DE MESURE

L'injection de l'air sous forme de grosses bulles est réalisée au centre de la base de chacun des faisceaux de fibres. Les conditions opératoires de l'aération appliquées sur le pilote semi-industriel sont décrites dans le Tableau 2. Les débits ont été choisis afin de correspondre à la gamme de SADm instantanée (demande spécifique en aération, correspondant au ratio entre le débit d'air et la surface totale de filtration) entre 0,27 et $0,60 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ fixée par le fabricant de membrane (le débit maximal correspondant à celui appliqué sur l'unité TDJ). Les données présentées dans cet article concernent uniquement le débit d'air total alimentant les modules et le nombre de modules aérés.

Conditions d'aération	Période d'étude	Nombre de modules aérés	Séquence d'aération appliquée	SADm instantanée ($\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$)	Qair total ($\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$)	Qair par module ($\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$)
C1	27/10/16 - 14/11/16	3	A = 60 s / NA = 100 s	0,29	30	9,9
C2	14/11/16 - 30/11/16	3	A = 60 s / NA = 100 s	0,41	42	13,9
C3	30/11/16 - 12/12/16	3	A = 60 s / NA = 100 s	0,53	54	18,0
C4	05/01/17 - 18/01/17	3	A = 60 s / NA = 100 s	0,29	30	9,9
C5	09/05/17 - 17/05/17	2 (Module interne non alimenté)	A = 60 s / NA = 100 s	0,35	36	18,0

Avec : A = Aération ; NA = Non aération

Tableau 2 : Conditions d'aération du pilote

2. Résultats et discussion

2.1 DÉTERMINATION DE LA DISPERSION DE GAZ AU SEIN DES MODULES DE FILTRATION MEMBRANAIRE À L'ÉCHELLE SEMI-INDUSTRIELLE : ADAPTATION MÉTHODOLOGIQUE ET APPLICATION DE LA TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

2.1.1 Principe de la technique de mesure et mise en œuvre dans le cadre de l'étude

La mesure de tomographie de résistivité électrique (ERT) est une technique de caractérisation de phase au sein d'un système expérimental. Cette mesure est basée sur les propriétés de différence de conductivité des phases en présence (ici liquide [eau, boues activées] et gaz). La mesure consiste à injecter un courant continu sur deux électrodes d'injection A et B (I_{AB}) et à mesurer le potentiel résultant sur une seconde paire d'électrodes M et N (ΔV_{MN} en Volt), celles-ci étant disposées sur une même hauteur pour réaliser une coupe transversale. L'acquisition se fait sur une séquence de quadripôles (A-B/M-N) afin d'obtenir un jeu de données de résistivités apparentes (ρ_{app}).

$$\rho_{app} = \frac{k \times \Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

Le coefficient k dépend de la position des quatre électrodes (A-B/M-N), constituant le quadripôle, et la géométrie du pilote, ainsi que de la taille et la forme des électrodes.

Les valeurs de résistivités apparentes obtenues expérimentalement ne permettent pas d'obtenir directement une cartographie représentative de la distribution des phases à travers cette mesure, du fait de l'hétérogénéité du milieu étudié. Il est donc nécessaire de passer par une étape d'inversion des données. L'inversion est un processus de calcul itératif dont le but est de déterminer les caractéristiques inconnues d'un milieu à partir de résultats de mesure (Figure 2). La géométrie du milieu est créée puis discrétisée (sous le logiciel de simulation COMSOL) et une valeur de résistivité est attribuée à chaque élément. A partir de ce modèle, des données de résistivités apparentes sont déterminées numériquement à partir d'équations de propagation du courant pour ensuite être comparées au jeu de données de résistivités apparentes obtenu par la mesure. De façon itérative, la résistivité attribuée aux éléments va être ajustée de façon à minimiser l'écart entre les résistivités apparentes mesurées et simulées. Ces étapes d'inversion sont réalisées à l'aide du logiciel BERT (GUNTHER *et al.*, 2006). Il est à noter que cette étape de traitement des données engendre une certaine perte d'information et que plusieurs paramètres de calcul intervenant à ce niveau peuvent être modifiés et optimisés pour réduire cette perte d'information. La cartographie des résistivités interprétées obtenue permet ensuite de visualiser la distribution de résistivité au sein de la géométrie étudiée, et ainsi le profil des phases en présence.

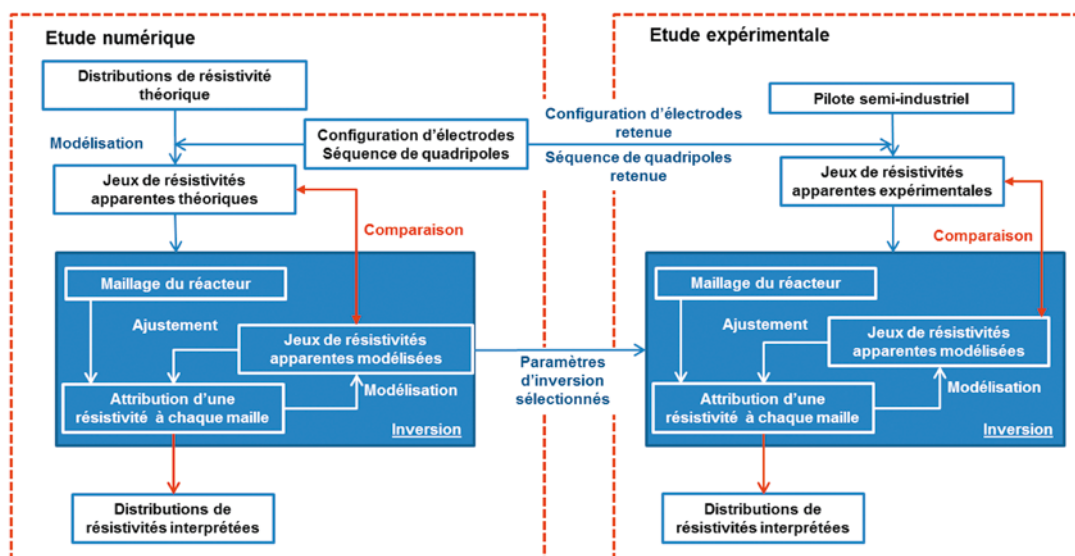


Figure 2 : Synthèse des différentes étapes de mesure par ERT mises en place pour l'étude

Cette technique de mesure est largement appliquée dans le domaine du génie chimique pour l'étude de la distribution de phases dans différents types de réacteurs (colonnes à bulles, lits fluidisés, cuves agitées ou conduites) (SHARIFI et YOUNG, 2013). Cependant, ces études sont généralement réalisées sur des systèmes de taille réduite (diamètres inférieurs à 1 m) et de géométries simples. Aussi, une méthodologie de mesure basée sur la tomographie de résistivité électrique à courant continu, issue de la géophysique, a été adaptée à l'étude de la dispersion des bulles au sein de modules de filtration membranaire.

Pour la réalisation des mesures sur le pilote semi-industriel, un ensemble de 72 électrodes en inox a été réparti sur 3 sections à des distances de 0,42 m, 1,17 m et 1,92 m du fond du pilote, afin de permettre la réalisation de mesures sur ces trois sections (dans la suite du document, uniquement les données obtenues pour 1,17 m sont présentées). Ces électrodes ont été connectées à un résistimètre multi-canal Syscal Pro (IRIS Instrument, Orléans, France), permettant de sélectionner automatiquement les quadripôles autour du réacteur. L'injection du courant est réalisée sur une durée de 250 ms, permettant de réaliser une mesure de tomographie complète d'une durée de 40 s environ (mesure basée sur environ 300 quadripôles).

La complexité du système étudié nécessite de réaliser une étape préliminaire de simulation numérique afin de déterminer la capacité de l'ERT, en lien avec les séquences de quadripôles sélectionnées, à reproduire des distributions de résistivités électriques modèles. Cette approche est basée sur l'utilisation d'outils de modélisation pour définir les stratégies de mesures permettant des temps d'acquisition courts (en adéquation avec la physique du système à étudier) et l'identification des sources d'erreurs potentielles générées par l'outil.

2.1.2 Etude numérique pour la validation de la méthodologie et des séquences de quadripôles sélectionnées

L'approche numérique a été menée en trois étapes :

- Etape A : Différentes distributions théoriques de résistivités électriques ont été imposées sur une géométrie simplifiée de dimensions équivalentes à celles du pilote semi-industriel à l'aide du logiciel COMSOL. Les différentes distributions retenues sont présentées sur la Figure 3. Ces distributions ont été définies afin de correspondre à différents cas potentiellement observables expérimentalement. A titre d'exemple, les cas B1 à B3, correspondent à une augmentation progressive et homogène de la distribution de l'air au sein des modules de filtration (en lien avec une évolution du débit d'air). Les cas C1 à C3 correspondent à des augmentations très localisées de la résistivité en lien avec une distribution potentiellement hétérogène des bulles au sein des modules de filtration dans le but de caractériser le potentiel de l'ERT à détecter de telles hétérogénéités ;

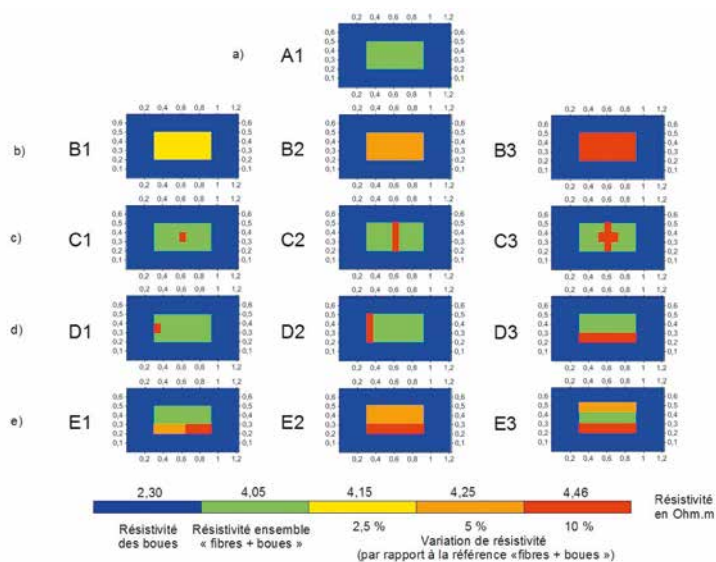


Figure 3 : Distributions de résistivités électriques imposées sur la géométrie simplifiée

- Etape B : Modélisation des distributions de champs électriques sous COMSOL pour différentes séquences de quadripôles en cherchant à minimiser le nombre de quadripôles (et donc le temps d'acquisition associé). Deux séquences de quadripôles ont été évaluées (Figure 4), correspondant à des configurations d'électrodes différentes. Ces deux configurations se distinguent principalement par la position adjacente ou opposée des électrodes d'injection pour les configurations dipôle-dipôle (DD) et gradient (GD) respectivement. A l'issue de cette étape, des bases de données de résistivités apparentes théoriques sont obtenues ;

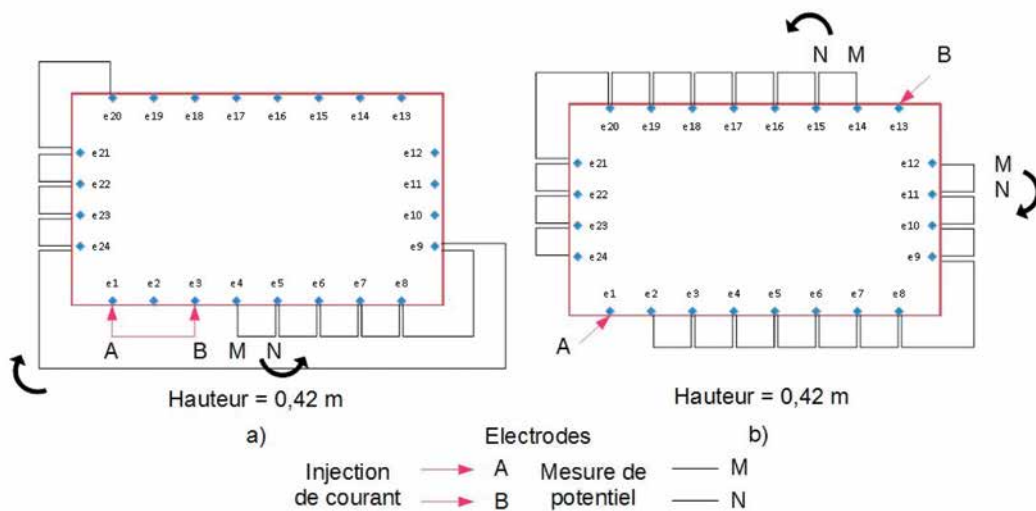


Figure 4 : Séquences de quadripôles testées (a) approche Dipôle-Dipôle [DD] et (b) approche Gradient-Dipole [GD]

➤ Etape C : Inversion du jeu de données de résistivités apparentes pour construire les champs de résistivités interprétées. L'étape d'inversion est réalisée à l'aide du logiciel BERT. Les champs de résistivités interprétées obtenus sont alors comparés aux champs de résistivités initiaux afin de valider la méthodologie. Une étude de sensibilité des résultats aux paramètres d'inversion a permis de valider un jeu de paramètres permettant de limiter la perte d'information en lien avec l'étape d'inversion.

La Figure 5 présente les champs de résistivités interprétés obtenus pour les différents cas simulés. Ces résultats sont exprimés en variation de résistivité électrique par rapport au cas A1 (modules membranaires sans aération) afin de permettre une meilleure visualisation des variations modélisées sur l'ensemble de la surface.

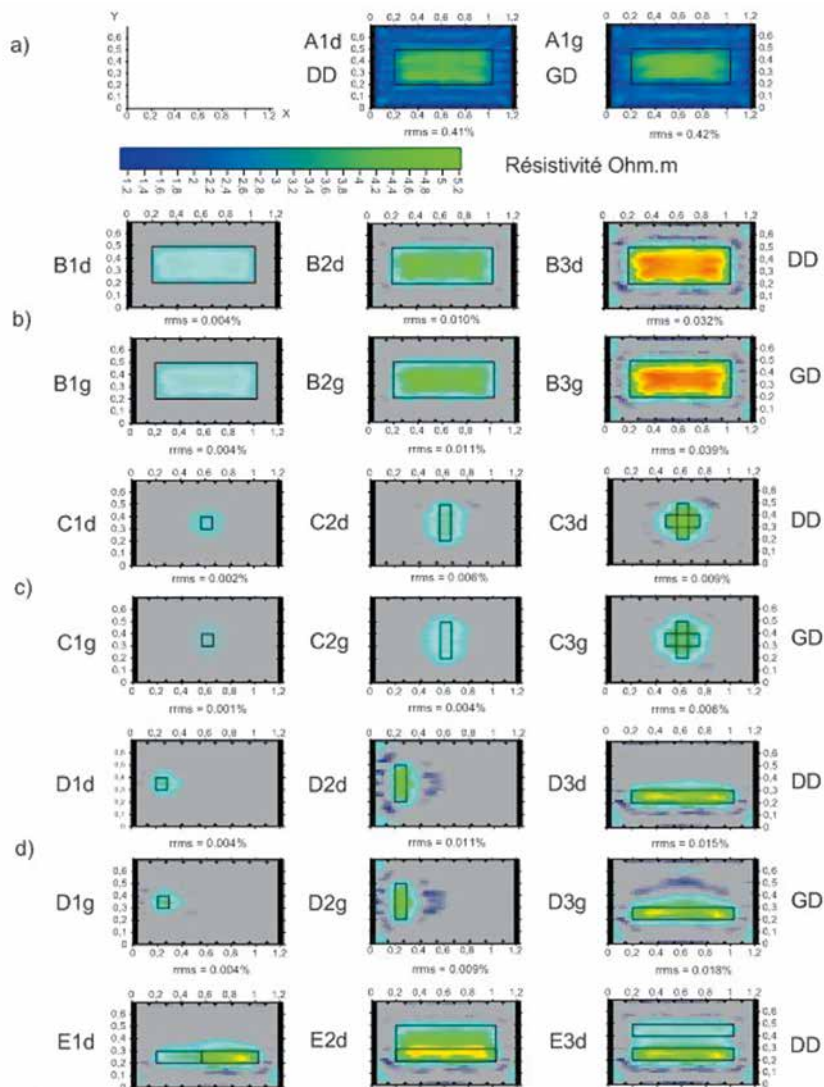


Figure 5 : (a) Champs de résistivités interprétées initiaux correspondant aux configurations A1 (sans aération/modules membranaires uniquement) et (b-e) Variations de résistivités par rapport à ces modèles initiaux pour les cas B1 à E3 pour les deux séquences de quadripôles testées (DD et GD)

Les champs de résistivités obtenus reproduisent de façon satisfaisante les champs de résistivités imposés en termes de position et d'intensité lorsque les augmentations de résistivités sont les plus importantes (cas B et E2). De plus, des augmentations de résistivité sont observées sur les contours des zones délimitées théoriques, indiquant que la méthode employée induit une légère diffusion de l'information, plus marquée dans les zones éloignées des électrodes. Ces phénomènes de diffusion étant plus importants pour la séquence de quadripôles GD, la séquence DD a été retenue à l'issue de cette étude numérique pour être appliquée lors des mesures expérimentales.

2.1.2 Caractérisation expérimentale de la dispersion du gaz au sein du pilote semi-industriel

Afin de caractériser l'impact de la concentration en MES et donc de la viscosité des boues sur la dispersion du gaz au sein des modules de filtration, des mesures complémentaires ont été réalisées en eau claire, sur des boues du TDJ, ainsi que pour des boues diluées pour atteindre une concentration intermédiaire de 3 g/L. La Figure 6 présente les distributions de résistivités obtenues après inversion pour les différents débits d'air et concentrations en matières en suspension.

En eau claire ($[MES] = 0 \text{ g/L}^{-1}$), la dispersion du gaz au sein des modules de filtration est homogène sur l'ensemble du module de filtration. De plus, une augmentation du débit d'air se traduit par une augmentation de la résistivité électrique, et donc de la quantité d'air, au sein dans la zone centrale du pilote correspondant à l'emplacement des modules de filtration. A noter que des artefacts de mesures sont observés en périphérie de la zone occupée par les membranes.

En présence de boues activées, et ce dès une concentration de 3 g/L , des hétérogénéités sont observées au niveau des augmentations de résistivités au sein des zones occupées par les modules membranaires. Pour un débit d'air donné, des hétérogénéités sont de plus en plus marquées en lien avec une augmentation de la concentration en MES. Ces hétérogénéités sont probablement liées aux propriétés rhéologiques spécifiques des boues activées. Les boues activées sont des fluides non-newtoniens rhéofluidifiants, leur viscosité diminue donc avec une augmentation du cisaillement ce qui est le cas avec l'augmentation de l'intensité de l'aération. Aussi, pour les débits d'air les plus faibles, la boue biologique a une viscosité plus importante qui va impacter fortement les propriétés des bulles d'air et leur évolution au sein du réseau de fibres. Des passages préférentiels vont alors être générés, entraînant une hétérogénéité de l'aération des membranes, d'autant plus marquée que la concentration en MES est grande (6 et 10 g/L). Afin de garantir une aération homogène sur l'ensemble des membranes de filtration, le débit d'air imposé doit donc être d'autant plus fort que la concentration en MES est élevée. De même, le séquençage de l'aération permettrait de modifier les localisations de ces passages préférentiels portant une amélioration par rapport à une aération continue, ce qui expliquerait l'intérêt de ce séquençage trouvé dans la littérature (VAN KAAM *et al.*, 2008).

Les mesures réalisées avec un unique module alimenté en air (Figure 6.e) montrent que le gaz reste très confiné au sein du module sur lequel il est injecté et ne se disperse pas sur la zone environnante de celui-ci, limitant l'impact de l'aération sur les modules à proximité.

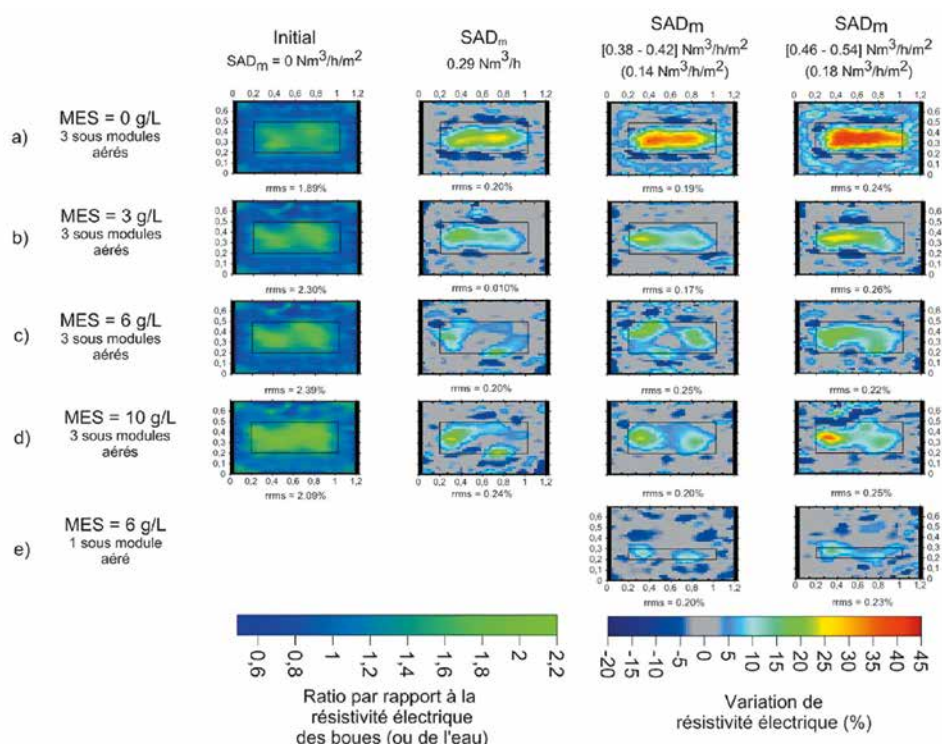


Figure 6 : Champs de résistivités interprétées initiaux sans aération [membranes seules] (1^{ère} colonne) et distribution des résistivités électriques (2^e à 4^e colonnes) pour les différentes conditions d'aération (SADm), concentrations en MES et nombres de modules aérés

2.2 IMPACT DE L'AÉRATION SUR LES PERFORMANCES DE FILTRATION DU PILOTE SEMI-INDUSTRIEL LORS DES PÉRIODES DE SUIVI

En parallèle des mesures ERT visant à caractériser la dispersion de l'air au sein des modules membranaires, le suivi en continu du pilote a été réalisé pour différentes conditions opératoires, se différenciant sur les paramètres d'aération (C1 à C5, cf. Tableau 2). A noter qu'un arrêt du pilote a été réalisé du 19 et 22 novembre 2016 lors des expérimentations correspondant à la condition opératoire C2. Les propriétés des boues ayant fortement

évoluées suite à cet arrêt, il a été décidé d'exploiter cette condition opératoire comme deux conditions distinctes C2' et C2'', correspondant aux périodes avant et après l'arrêt, respectivement.

La Figure 7 présente respectivement le flux de DCO alimentant le TDJ, la concentration en DCO du surnageant dans le pilote et la concentration en DCO dans le perméat. La Figure 8 présente la perméabilité (corrigée à 20 °C) et la concentration en MES dans le pilote lors de la campagne de mesure et pour les différentes conditions opératoires.

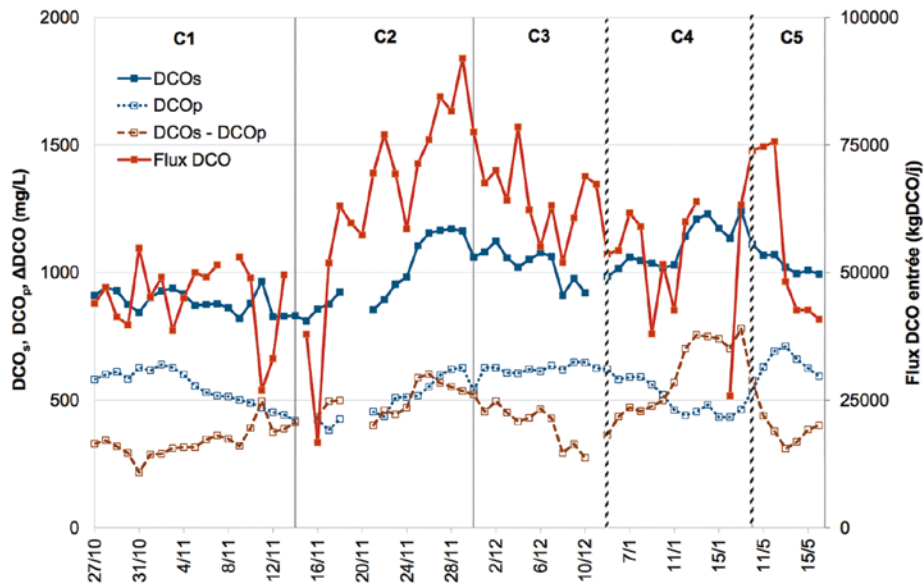


Figure 7 : Flux de DCO en entrée du TDJ, DCO dans le surnageant dans le pilote et DCO du perméat, pour l'ensemble des conditions d'aération

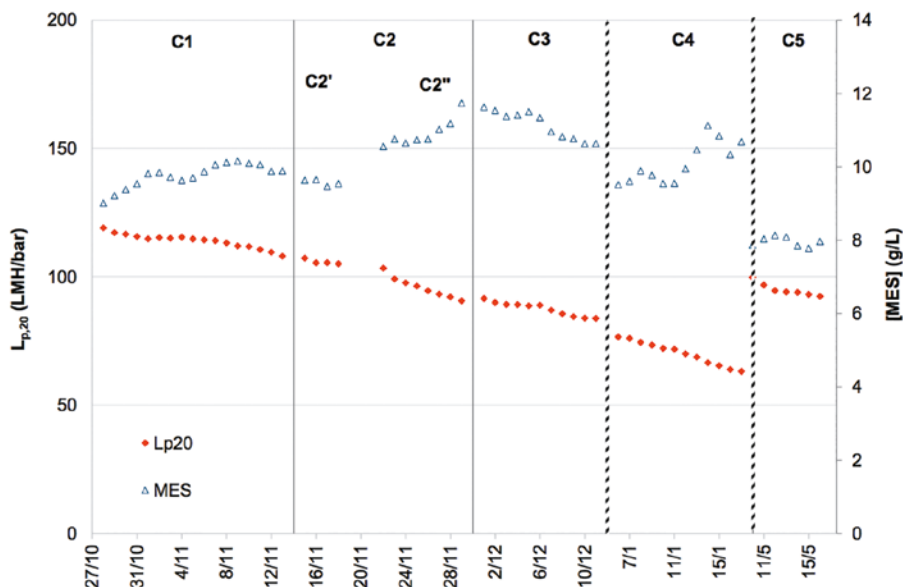


Figure 8 : Perméabilité à 20 °C et concentration en MES pour l'ensemble des conditions d'aération

Lors de la période d'investigation, le flux de DCO alimentant le TDJ a fortement varié lors des différentes conditions opératoires (de 16700 à 92030 kgDCO/j), entraînant une forte hétérogénéité de la concentration en DCO dans le surnageant des boues biologiques alimentant le pilote semi-industriel (d'une concentration moyenne de 872 à 1112 mgDCO/L pour les périodes correspondant aux conditions opératoires C1 et C4 respectivement). Logiquement, ces variations de charge ont conduit à une modification de la concentration en MES dans les boues biologiques, variant de 8,0 à 11,2 g/L pour les périodes correspondant aux conditions opératoires C5 et C3. Dans le même temps, la perte de perméabilité varie de -0,8 à -1,4 LMH/bar/j pour les périodes C3 et C2'' respectivement.

Une certaine stabilité des propriétés des boues est observée pour les périodes C2'' à C4 (MES = [10,1 - 11,1] g/L ; DCOs = [1028 - 1112] mg/L), permettant d'analyser l'impact du débit d'air alimentant les modules de filtration sur les évolutions de perméabilité. Pour une diminution de la SAD_m de 0,53 à 0,41 $Nm^3 h^{-1} m^{-2}$ (conditions C3 et C2), l'évolution de perméabilité moyenne diminue de -0,8 à -1,4 LMH/bar/j respectivement. Une diminution supplémentaire du débit d'air n'a que peu d'impact sur la diminution de perméabilité (-1,3 LMH/bar/j pour une SAD_m de 0,29 $Nm^3 h^{-1} m^{-2}$). Un impact similaire est observé pour les conditions C1 et C2', pour lesquelles l'évolution de perméabilité augmente uniquement de -0,8 à -0,7 LMH/bar/j pour une augmentation de la SAD_m de 0,29 à 0,41 $Nm^3 h^{-1} m^{-2}$ (à propriétés de boues également équivalentes). L'analyse de ces observations, au regard des mesures d'ERT présentées ci-dessus, permet de mettre en évidence l'impact de la dispersion de l'air sur ces évolutions de perméabilité. A une concentration en MES supérieure à 10 g/L, les bulles d'air au sein des faisceaux de fibres sont distribuées sur l'ensemble des trois modules uniquement pour le débit d'air le plus élevé. Aussi, l'injection d'air pour cette condition opératoire permet d'avoir un impact efficace et homogène de l'aération sur l'ensemble du réseau de fibres. Pour des débits d'air moins importants, cet impact est plus limité, en lien avec une dispersion beaucoup plus hétérogène des bulles évoluant peu en fonction du débit.

Les mesures complémentaires réalisées avec uniquement deux modules aérés (condition C5) sont difficilement comparables directement avec les autres conditions opératoires du fait d'une concentration en MES très différente (8,0 g/L). La variation de perméabilité mesurée est de -1,1 LMH/bar/j, pour une SAD_m de 0,35 $Nm^3/h^{-1}/m^{-2}$ répartie sur les deux modules extérieurs seulement (soit un débit d'air par module aéré de 18 $Nm^3 h^{-1}$ correspondant au débit d'air maximal appliqué pour la condition C3). L'aération effectuée uniquement sur deux modules permet cependant de maintenir des performances de filtration satisfaisantes bien que cette valeur soit relativement élevée au regard des débits d'air injectés, en considérant les ordres de grandeurs mesurés pour les autres conditions opératoires pour des concentrations en MES plus élevées. Cette évolution peut être expliquée par la potentielle faible contribution de l'aération des modules externes sur le module central, la dispersion des bulles restant très localisée au niveau des modules aérés comme observé lors des mesures ERT réalisées pour un module unique aéré. De plus, les données recueillies mettent également en évidence une évolution différente de la perméabilité de chacun des modules membranaires, mesurée individuellement, non observée pour les autres conditions opératoires. Ces observations indiquent une perte de perméabilité plus importante pour le module membranaire non aéré en comparaison des deux autres (résultats non présentés).

Conclusions

Dans l'objectif d'identifier des solutions d'optimisation des bioréacteurs à membranes, un pilote semi-industriel de filtration membranaire équipé de modules membranaires équivalents à ceux équipant les unités industrielles a été conçu, dimensionné et installé sur l'unité de traitement des jus de Seine Aval. Cette étude a permis notamment d'étudier l'impact des stratégies d'aération, et notamment du débit d'air, sur la dispersion du gaz dans le réacteur et sur les propriétés de filtration. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Le développement de la méthodologie innovante de caractérisation de la dispersion des bulles d'air au sein des réseaux de fibres à l'aide de la tomographie de résistivité électrique repose sur l'utilisation d'outils de modélisation permettant d'en optimiser la mise en œuvre et l'interprétation des données obtenues ;
- La répartition des bulles d'air au sein des réseaux de fibres est fortement influencée par le débit d'air injecté mais également par la concentration en matières en suspension ;
- Ces données fournissent des éléments d'interprétation aux évolutions de perméabilité observées sur le pilote semi-industriel lors de la période de suivi, en lien avec les conditions d'aération et de fonctionnement. Ces résultats conduisent à expliquer les impacts couplés du débit d'air et de la concentration en MES sur les évolutions des propriétés de filtration. Ces résultats permettent notamment d'envisager une meilleure prise en compte des conditions opératoires sur les débits d'air à injecter au niveau des cellules de filtration industrielle, et du séquençage de cette aération.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par Irstea et le Siaap, via le programme de recherche Mocopée. Les auteurs souhaitent remercier les exploitants de l'usine Seine-Aval et, plus particulièrement les agents en charge de l'exploitation de l'unité de traitement des jus, pour leur disponibilité lors des mesures sur site. Un remerciement particulier est également adressé au personnel technique d'Irstea qui s'est fortement impliqué lors de la conception du pilote semi-industriel et des campagnes de mesure sur site.

POUR EN SAVOIR PLUS

- › SUARD E., CLÉMENT R., FAYOLLE Y., ALLIET M., ALBASI C., GILLOT S. (2019) : « Electrical resistivity tomography used to characterize bubble distribution in complex aerated reactors: development of the method and application to a semi-industrial MBR in operation. » *Chemical Engineering Journal* ; 355 : 498-509.
- › SUARD E., FAYOLLE Y., ZHANG L., GUÉRIN S., JONES H., GUILLAUME S., ROCHER V., ALLIET M., ALBASI C., GILLOT S. (2017) : *Statistical interpretation and modelling of daily permeability evolution in full-scale membrane bioreactors using fuzzy inference methods*. 8th IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment.
- › SUARD E., CLÉMENT R., FAYOLLE Y., ALLIET M., ALBASI C., GILLOT S. (2017) : *Characterisation of gas dispersion in filtration modules of a membrane bioreactor using electrical resistivity tomography*. 13th International Conference on Gas-Liquid and Gas-Liquid-Solid Reactor Engineering (GLS-13).
- › SUARD E., CLÉMENT R., FAYOLLE Y., ALLIET M., ALBASI C., GILLOT S. (2016) : *Evaluation de la tomographie de résistivité électrique pour la visualisation de bulles dans des réacteurs aérés*. 10^e colloque GEOFCAN.
- › ZHANG L. (2016) : *Modeling of long-term evolution of permeability in a full-scale membrane bioreactor through fuzzy inference system* [rapport de stage de fin d'études].
- › BRUEL MULLER G.A. (2014) : *Etude du colmatage de membranes de filtration de traitement des eaux résiduaires : Analyse de données de fonctionnement d'installations réelles* [rapport de stage de fin d'études].

Bibliographie

- › BOLTON G., LACASSE D., KURIYEL R. (2006) : « Combined models of membrane fouling: Development and application to microfiltration and ultrafiltration of biological fluids. » *Journal of Membrane Science* ; 277(1-2) : 75-84.
- › BRAAK E., SCHETRITTE S., ANNE-ARCHARD D., ALBASI C., ALLIET M. (2012) : *Aeration for fouling control in submerged membrane bioreactors for wastewater treatment : Shear simulation and experimental validation*. Euromembrane Conference 2012. N. Marsh. Amsterdam, Elsevier Science Bv. ; 44 : 674-677.
- › BUETEHORN S., BRANNOCK M., LE-CLECH P., LESLIE G., VOLMERING D., VOSENKAUL K., WINTGENS T., WESSLING M., MELIN T. (2012) : « Limitations for transferring lab-scale microfiltration results to large-scale membrane bioreactor (MBR) processes. » *Separation and Purification Technology* ; 95 : 202-215.
- › DUCLOS-ORSELLO C., LI W. Y., HO C. C. (2006) : « A three mechanism model to describe fouling of microfiltration membranes. » *Journal of Membrane Science* ; 280(1-2) : 856-866.
- › GUNTHER T., RUCKER C., SPITZER K. (2006) : « Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. » *Geophysical Journal International* ; 166(2) : 506-517.
- › HERMIA J. (1982) : « Constant pressure blocking filtration laws - Application to power-law non-newtonian fluids. » *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* ; 60(3) : 183-187.
- › SHARIFI M. AND YOUNG B. (2013) « Electrical Resistance Tomography (ERT) applications to Chemical Engineering. » *Chemical Engineering Research & Design* ; 91(9) : 1625-1645.
- › VAN KAAM R., ANNE-ARCHARD D., ALLIET GAUBERT M., ALBASI C. (2008) : « Rheological characterization of mixed liquor in a submerged membrane bioreactor: Interest for process management. » *A special Issue on Membrane Reactors & Bioreactors* ; 317(1-2) : 26-33.
- › WU, J., HE C., JIANG X., ZHANG M. (2011) « Modeling of the submerged membrane bioreactor fouling by the combined pore constriction, pore blockage and cake formation mechanisms. » *Desalination* ; 279(1-3) : 127-134.