

1 **LIMITATION DU COLMATAGE DANS LES BIORÉACTEURS À MEMBRANES À L'ÉCHELLE**
2 **INDUSTRIELLE : MODÉLISATION ET CARACTÉRISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE**

3 **FOULING MITIGATION IN INDUSTRIAL MEMBRANE BIOREACTORS: MODELLING AND**
4 **HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION**

5 **Elodie SUARD¹, Yannick FAYOLLE^{1*}, Rémi CLÉMENT², Vincent ROCHER³, Marion ALLIET⁴, Claire**
6 **ALBASI⁴, Sylvie GILLOT²**

7 ¹ Irstea, UR HBAN, Centre d'Antony, F-92761 Antony, France

8 ² Irstea, UR REVERSAAL, Centre de Lyon-Villeurbanne, F-69625 Villeurbanne Cedex, France

9 ³ SIAAP, Direction Innovation Environnement, F-92700 Colombes, France

10 ⁴ Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, F-31030 Toulouse, France

11 *Auteur de correspondance : yannick.fayolle@irstea.fr / +33 (0)1 40 96 60 32

12

13 **CATEGORIE DE L'ARTICLE : Recherche appliquée, Etat de l'art / revue de littérature, ou Retour**
14 **d'expérience**

15 **FORMAT DE L'ARTICLE : Note scientifique/technique, ou Article scientifique/technique**

16

17 **Résumé**

18 Les bioréacteurs à membranes se sont largement développés ces dernières années en assainissement des
19 eaux résiduaires urbaines. Malgré les avantages du procédé, le colmatage des membranes reste un
20 phénomène limitant majeur pouvant entraîner des coûts énergétiques et de remplacement importants.
21 Différentes stratégies de limitation du colmatage sont mises en place, dont l'aération séquencée des
22 membranes à l'aide de grosses bulles. Cependant, les mécanismes d'action de cette aération et
23 l'hydrodynamique des réacteurs restent relativement méconnus, en particulier à l'échelle industrielle et en
24 présence de boues. Un pilote semi-industriel de filtration membranaire a été conçu et installé sur l'unité de
25 traitement des jus de Seine Aval. Ce pilote a permis d'étudier l'impact de l'aération sur les performances de
26 filtration en couplant une analyse statistique (systèmes d'inférence floue) et une caractérisation de
27 l'hydrodynamique du réacteur (tomographie de résistivité électrique). Des chemins préférentiels de passage
28 des bulles (relevés à faible débit d'air et forte concentration en matières en suspension) et un confinement
29 des écoulements à proximité des sous-modules de filtration ont été observés à l'aide de la tomographie de
30 résistivité électrique. Ces observations fournissent des éléments d'explication aux résultats des arbres de
31 décision flous focalisés sur l'analyse de l'impact du débit d'air et du nombre de sous-modules aérés sur
32 l'évolution de la pression transmembranaire. Le confinement des écoulements observé, couplé aux moins
33 bonnes performances de filtration obtenues lors de l'aération de deux sous-modules sur trois, appuierait
34 l'importance de l'homogénéité de l'aération pour une bonne gestion du colmatage. Les propriétés des boues
35 semblent prédominantes pour les conditions opératoires testées et pourraient impacter l'efficacité de
36 l'aération que ce soit en termes de répartition de l'aération et/ou de relargage d'éléments colmatants. Ces
37 résultats invitent à considérer la régulation de l'aération en fonction des propriétés des boues dans les
38 procédés industriels.

39 **Mots-clés** : Eaux usées, Aération, Hydrodynamique, Tomographie de résistivité électrique, Logique floue

40 **Abstract**

41 Membrane bioreactors (MBRs) are widely used in the wastewater treatment sector. In spite of their many
42 advantages, MBRs present the inconvenient of getting clogged, which leads to important maintenance and
43 energy costs. Several strategies have been industrially developed to enhance MBR productivity, including
44 coarse bubble sequenced aeration for fouling mitigation. However, more research is needed to characterize
45 hydrodynamics in MBRs filled with activated sludge at industrial scale. A semi-industrial reactor was
46 designed, equipped with membranes and fed with activated sludge from one of the reactors of the Seine
47 Aval (SIAAP) wastewater treatment plant. This reactor was used to study the impact of aeration strategies on
48 filtration performance by coupling statistical analysis (fuzzy inference systems) and hydrodynamic
49 characterization (electrical resistivity tomography (ERT)). Preferential flow paths (at high mixed liquor
50 suspended solids concentration and low air flow rates) have been observed with ERT measurements as well
51 as containment of the air bubbles close to the aerated membrane modules. These observations give
52 explanations for the obtained decision trees focused on the impact of aeration strategies (air flow rate and
53 number of aerated membrane modules) on transmembrane pressure evolution. The observed air bubbles

54 containment linked to the worsened filtration performance is consistent with the recommendation to promote
55 aeration homogeneity to mitigate fouling. Sludge properties seem to have a major impact for the studied
56 operating conditions and could impact aeration efficiency on fouling mitigation, due to the heterogeneity of
57 aeration or the release of fouling materials. These results reinforce the interest in linking aeration parameters
58 to sludge properties, suggesting to consider control strategies for these operating parameters at industrial
59 scale.

60 **Keywords:** Wastewater, Aeration, Hydrodynamics, Electrical resistivity tomography, Fuzzy logic

61 **Introduction**

62 Les bioréacteurs à membranes sont des procédés de traitement biologique des eaux résiduaires, composés
63 d'un réacteur à boues activées couplé à une filtration membranaire. En pleine expansion lors des deux
64 dernières décennies, ce procédé présente l'avantage de produire un effluent de qualité stabilisée, en
65 comparaison d'un procédé conventionnel, mais également d'être particulièrement compact. Les membranes
66 d'ultrafiltration ou de microfiltration employées sont généralement sous forme de fibres ou de plaques,
67 disposées en modules et immergées dans des cellules membranaires pour séparation des boues
68 biologiques et de l'eau traitée.

69 Cependant, la limitation du colmatage de ces membranes, et donc le maintien au cours du temps des
70 performances de production de ces systèmes, reste la problématique principale à l'échelle industrielle. Ce
71 colmatage trouve son origine dans le couplage de plusieurs mécanismes parmi lesquels (i) le dépôt de
72 particules à la surface des membranes générant un gâteau de filtration, (ii) la constriction et le blocage des
73 pores des membranes, constituant leur colmatage interne, mais également (iii) leur prise en masse
74 [HERMIA, 1982 ; BOLTON *et al.* 2006, DUCLOS-ORSELLO *et al.*, 2006 ; WU *et al.*, 2011]. Parmi les
75 techniques utilisées pour la maîtrise de ce colmatage, l'aération sous forme de grosses bulles permet de
76 limiter le dépôt de particules à la surface des membranes en générant des turbulences à leur voisinage.
77 Ainsi, le flux de filtration peut être maintenu dans le temps, mais l'injection de cet air génère des coûts
78 énergétiques importants, au regard des procédés conventionnels [STRICKER *et al.*, 2018].

79 Malgré de nombreuses études sur l'impact de l'aération sur la limitation du colmatage, aucune stratégie
80 optimale n'est *a priori* définie, potentiellement du fait de la complexité des mécanismes de colmatage, la
81 pluralité des grandeurs pouvant l'impacter et la dépendance à l'échelle et à la matrice étudiées. L'utilisation
82 de la modélisation s'avère nécessaire pour décrire et interpréter les mécanismes mais également pour
83 prédire et optimiser le fonctionnement des installations industrielles. Tandis que les modèles déterministes
84 permettent une meilleure compréhension du colmatage à l'aide de grandeurs spécifiques, les approches
85 statistiques (telles que les arbres de décision [DALMAU *et al.*, 2015] ou les régressions linéaires multivariées
86 [PHILIPPE *et al.*, 2013]) peuvent représenter une alternative pour les études d'optimisation ou de prédiction
87 du procédé, les analyses statistiques étant particulièrement adaptées aux jeux de données industriels.
88 Néanmoins celles-ci ne décrivent pas les mécanismes et des connaissances complémentaires en
89 hydrodynamique sont nécessaires pour l'interprétation des résultats.

90 Des travaux de recherche récents se sont focalisés sur l'optimisation de l'aération des membranes, et plus
91 particulièrement sur la caractérisation de l'hydrodynamique au sein de ces réacteurs [BRAAK *et al.*, 2017].
92 Le principal objectif était de mettre en évidence les mécanismes d'action des stratégies d'aération sur la
93 limitation du colmatage telle que la turbulence générée, le mouvement des fibres et le cisaillement en
94 surface des membranes. La majorité des études sur ce type de procédé est réalisée d'une part dans un
95 milieu modèle, et d'autre part à l'échelle pilote du fait de la facilité de mise en œuvre de techniques
96 expérimentales de caractérisation des grandeurs hydrodynamiques (vitesses de liquide, tailles de bulles...).

97 Cependant, ces simplifications d'étude ne permettent pas de traduire les hétérogénéités au sein des
98 modules membranaires et les conclusions s'avèrent difficilement transposables à l'échelle industrielle
99 [BUETEHRN *et al.*, 2012]. Aussi, des techniques de mesures alternatives doivent d'être développées afin
100 de permettre d'étudier ces systèmes pour des conditions opératoires et des échelles représentatives des
101 réacteurs industriels.

102 L'objectif est d'apporter des éléments d'information sur l'impact de l'aération, en termes de conséquences
103 sur l'hydrodynamique et sur les performances de filtration, à une échelle représentative des systèmes
104 industriels. Dans cet objectif, la présente étude propose de coupler à l'échelle semi-industrielle (i) la
105 caractérisation de la dispersion du gaz au sein des faisceaux de fibres, basée sur la tomographie de
106 résistivité électrique et (ii) l'étude de l'impact des conditions d'aération sur l'évolution des performances de
107 filtration et son éventuelle dépendance aux propriétés des boues à l'aide d'un outil d'analyse statistique, le
108 système d'inférence floue. Des expérimentations ont été menées sur un pilote semi-industriel alimenté en
109 boues biologiques provenant de l'unité de traitement des jus de la station d'épuration de Seine-Aval. Ce
110 pilote, dimensionné afin de reproduire les conditions d'environnement des modules membranaires de l'unité
111 de traitement des jus (TDJ), a été instrumenté pour un suivi lors de campagnes de mesures expérimentales
112 sur une période de 8 mois. Les résultats présentés se basent sur des travaux de thèse de doctorat [SUARD,
113 2018], l'adaptation et l'application de la tomographie de résistivité électrique ayant déjà fait l'objet d'une
114 publication [SUARD *et al.*, 2019].

115 **1. Matériels et méthodes**

116 **1.1. Pilote de filtration membranaire**

117 Le pilote de filtration membranaire est constitué d'une cuve en PVC ($V_{\text{liquide}} = 2,0 \text{ m}^3$, $L \times l \times h_{\text{liquide}} = 1,23 \times$
118 $0,70 \times 2,40 \text{ m}$) équipée de trois sous-modules membranaires fibres creuses industriels (KMS Puron®,
119 PSH34, surface de filtration = $3 \times 34 \text{ m}^2 = 102 \text{ m}^2$). Un sous-module membranaire est composé de neuf
120 faisceaux de fibres. L'alimentation de la cuve se fait en continu à un débit de $3,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ avec les boues
121 prélevées en sortie des bassins biologiques de l'unité de traitement des jus (TDJ) de la station Seine Aval du
122 SIAAP (Achères, Yvelines). Les propriétés de ces boues sont dépendantes du fonctionnement de l'unité et
123 présentent des variations sur la durée du suivi du pilote (concentration en matières en suspension (MES),
124 pollution dissoute, ...).

125 Les jus présentent certaines spécificités par rapport aux eaux résiduaires urbaines classiques. Ceux-ci sont
126 issus des filtre-presses positionnés en fin de traitement des boues, après un conditionnement thermique de

127 celles-ci. Des échangeurs de chaleur sont positionnés en amont du traitement biologique. L'unité industrielle
128 fonctionne à très faible charge massique et à un âge de boues élevé, conditions propices à une nitrification
129 poussée (charge massique = $0,06 \text{ kg}_{\text{DBO}_5} \text{ kg}_{\text{MVS}}^{-1} \text{ j}^{-1}$, âge de boues = 17,5 jours, temps de séjour
130 hydraulique = 4 jours, valeurs médianes sur la durée de la campagne expérimentale). Au sein des bassins
131 biologiques, la valeur médiane de température sur la période de campagne expérimentale est de $34,2^\circ\text{C}$.

132 Un cycle de filtration est composé de 480 secondes de filtration suivies de 90 secondes de rétrolavage, le
133 flux instantané de filtration étant de $12,5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, conformément aux conditions de fonctionnement du
134 système industriel. Une aération des membranes destinée à la limitation du colmatage, est réalisée à l'aide
135 de grosses bulles injectées à la base de chaque faisceau de fibres.

136 Le pilote est instrumenté afin de suivre l'évolution des propriétés des boues et du colmatage, via le calcul de
137 la perméabilité, correspondant au ratio entre le flux de perméat et la pression transmembranaire (différence
138 de pression en amont et en aval des membranes). Le flux de filtration est corrigé en température lors du
139 calcul de la perméabilité, pour prendre en compte l'impact de ce facteur sur la viscosité du perméat, selon
140 l'équation 1 fournie par le constructeur de l'installation industrielle et utilisée par l'exploitation de l'unité de
141 traitement des jus (avec J le flux de filtration [$\text{L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$] et T la température [$^\circ\text{C}$]).

$$J_f(20^\circ\text{C}) = J_f(T) \times e^{-0.0267 \times (T-20)} \quad 1$$

142 Les capteurs positionnés dans le pilote permettent le suivi continu de la température, de la concentration en
143 MES, de la conductivité et du pH. Le débit d'air, les débits liquides d'alimentation et de filtration ainsi que la
144 pression en amont et en aval des membranes sont également enregistrés en continu. Des préleveurs
145 automatisés ont été installés pour la réalisation d'échantillons moyens 24h des boues et du perméat. Le
146 surnageant des boues et le perméat issus de ces échantillons ont fait l'objet de mesures de demande
147 chimique en oxygène (DCO).

148 1.2. Stratégies d'aération étudiées

149 Deux études complémentaires ont été réalisées sur le pilote fonctionnant en filtration.

150 La première avait pour but d'apporter des informations sur l'hydrodynamique, et plus particulièrement la
151 dispersion du gaz au sein du pilote, caractérisée à l'aide de la tomographie de résistivité électrique. Les
152 stratégies d'aération associées sont récapitulées dans le *tableau 1*. Les débits d'air ont été choisis afin de
153 correspondre à la gamme de $\text{SAD}_{\text{m instantanée}}$ (demande spécifique en aération, ratio entre le débit d'air et la
154 surface totale de filtration) préconisée par le fournisseur de membranes (entre $0,27$ et $0,60 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$),
155 excepté pour l'expérience effectuée à un seul sous-module aéré. Pour cette expérience, le débit a été choisi
156 afin de conserver un débit d'air par sous-module équivalent aux autres conditions. Lors des mesures de
157 tomographie de résistivité électrique, quatre concentrations en MES ont été testées : 0, 3, 6 et 10 g L^{-1} . Les
158 concentrations de 6 et 10 g L^{-1} correspondent aux concentrations des boues prélevées en sortie des bassins
159 biologiques sur deux périodes distinctes du suivi pilote. Pour les expériences en eau claire et à une
160 concentration en MES de 3 g L^{-1} , l'alimentation du pilote a dû être ajustée. Dans le premier cas, le pilote est

161 alimenté en eau du réseau. Dans le second, la concentration en MES de 3 g L^{-1} est obtenue en diluant les
162 boues biologiques avec de l'eau claire (eau du réseau). Le pilote est en filtration et alimenté en continu sur la
163 durée des mesures de tomographie de résistivité électrique, excepté pour l'expérience à une concentration
164 en MES de 3 g L^{-1} , afin de conserver la concentration en MES dans le pilote, celle-ci résultant d'une dilution.
165 Les valeurs moyennes de la température, de la conductivité et de la concentration en MES des boues,
166 régulièrement mesurées pendant ces expériences relatives à la caractérisation de la dispersion du gaz dans
167 le pilote, sont mentionnées dans le *tableau I* qui récapitule les stratégies d'aération étudiées. Pour chaque
168 expérience et concentration en MES étudiée, une mesure témoin sans injection d'air est réalisée.

169 L'objectif de la seconde étude était de relier les stratégies d'aération à l'évolution de la perméabilité, sur des
170 périodes allant de 1 à 2 semaines. L'étude de l'impact des stratégies mises en place ainsi que des
171 propriétés des boues (variables du fait de l'alimentation du pilote) sur l'évolution des performances de
172 filtration a été réalisée à l'aide de systèmes d'inférence floue. Les stratégies d'aération associées sont
173 listées dans le *tableau II*. Elles sont regroupées en deux scénarios, l'un s'intéressant uniquement à l'impact
174 du débit d'aération et l'autre ajoutant comme variable le nombre de sous-modules aérés. Une seule
175 condition ayant été réalisée avec deux sous-modules aérés, il a été choisi de n'intégrer à l'analyse que deux
176 conditions à trois sous-modules aérés pour le second scénario, afin d'éviter un déséquilibre important entre
177 le nombre de données relatives à chacun de ces deux modes de fonctionnement. Le choix de ces deux
178 conditions s'est porté sur celles appliquant des SAD_m instantanées encadrant celle appliquée lors de l'utilisation
179 de deux sous-modules aérés. L'expérience n°4 est identique à l'expérience n°1 en termes de stratégies
180 d'aération, et seules les propriétés des boues diffèrent du fait de l'alimentation à partir de la sortie des
181 bassins biologiques de l'unité. Celle-ci a été préférée à l'expérience n°1 pour le second scénario, les valeurs
182 de DCO du surnageant des boues étant plus proches de celles des autres conditions retenues. Pour chaque
183 condition testée, le séquençage de l'aération est de 60 secondes de fonctionnement et de 100 secondes
184 d'arrêt. Il n'y a pas eu de lavage chimique entre les différentes conditions opératoires testées, afin de ne pas
185 altérer les membranes par des nettoyages trop fréquents, la fréquence de lavage des membranes
186 industrielles suivie étant d'environ 2 mois.

187 1.3. Tomographie de résistivité électrique

188 La tomographie de résistivité électrique (ERT) est une méthode de caractérisation géophysique qui consiste
189 à décrire la structure d'un milieu à l'aide de l'injection d'un courant d'intensité connue et de la mesure de la
190 distribution du potentiel électrique obtenu. Un quadripôle de mesure est composé de deux électrodes A et B
191 sur lesquelles est injecté un courant et de deux électrodes M et N au niveau desquelles la différence de
192 potentiel générée est mesurée. La valeur de résistivité apparente (dans le cas d'un milieu hétérogène)
193 s'obtient d'après l'équation 2 (avec ρ_{app} la résistivité apparente [Ohm m], ΔV_{MN} la différence de potentiel
194 mesuré entre les électrodes M et N [V], I_{AB} l'intensité du courant injecté sur les électrodes A et B [A] et k le
195 coefficient géométrique [m]).

$$\rho_{app} = \frac{k \times \Delta V_{MN}}{I_{AB}} \quad 2$$

196 Le coefficient géométrique k dépend de la position des quatre électrodes et dans certains cas de leur taille et
197 de leur forme lorsque celles-ci ne peuvent pas être considérées comme ponctuelles [CLEMENT et
198 MOREAU, 2016]. Celui-ci peut être déterminé, expérimentalement dans un milieu homogène, ou
199 numériquement [CLEMENT *et al.*, 2018].

200 Afin de caractériser la surface ou le volume étudiés, plusieurs agencements d'électrodes sont utilisés au
201 cours d'une séquence de mesure consistant en une liste de quadripôles. Une séquence de quadripôles est
202 donc une liste d'associations de paires d'électrodes d'injection de courant (AB) et de mesure de différence
203 de potentiels électriques (MN). Pour chaque quadripôle, la surface couverte par la mesure dépend de
204 l'espacement entre les électrodes. En géophysique, les configurations d'électrodes utilisées (quadripôles)
205 sont plus ou moins sensibles au bruit et aux variations de résistivités horizontales et verticales [DAHLIN et
206 ZHOU, 2004]. La séquence de quadripôles permet donc de scanner la surface étudiée en mesurant une
207 résistivité apparente pour chaque quadripôle de la séquence. Les valeurs de résistivités apparentes
208 obtenues expérimentalement à travers cette mesure ne permettent pas d'obtenir directement une
209 cartographie représentative de la distribution des phases, du fait de l'hétérogénéité du milieu étudié. Une
210 étape d'inversion faisant intervenir le logiciel BERT est nécessaire pour obtenir à partir des valeurs
211 mesurées une distribution des résistivités électriques du système étudié.

212 Une adaptation de cette méthode de mesure pour l'application au pilote a été réalisée à l'aide d'une étude
213 numérique visant à reproduire des distributions théoriques de résistivités électriques. La méthode s'est
214 avérée pertinente pour reproduire ces distributions théoriques de résistivités électriques, l'adaptation ayant
215 abouti au choix d'une séquence de quadripôles et de paramètres d'inversion appropriés [SUARD *et al.*,
216 2019]. Quelques limites ont été relevées, telles que la diffusion de l'information, en particulier en zone
217 éloignée des électrodes et la génération d'artéfacts à proximité de fortes variations de résistivité électrique.
218 Ces artéfacts sont néanmoins identifiables, correspondant à des variations négatives de résistivités.

219 Pour l'application expérimentale au pilote, 24 électrodes (vis inox de 8 mm de diamètre) ont été implantées
220 dans les parois du réacteur, à 1,2 m du fond de celui-ci. Le matériel utilisé pour la réalisation des mesures
221 expérimentales est un résistivimètre Syscal Pro (IRIS Instrument).

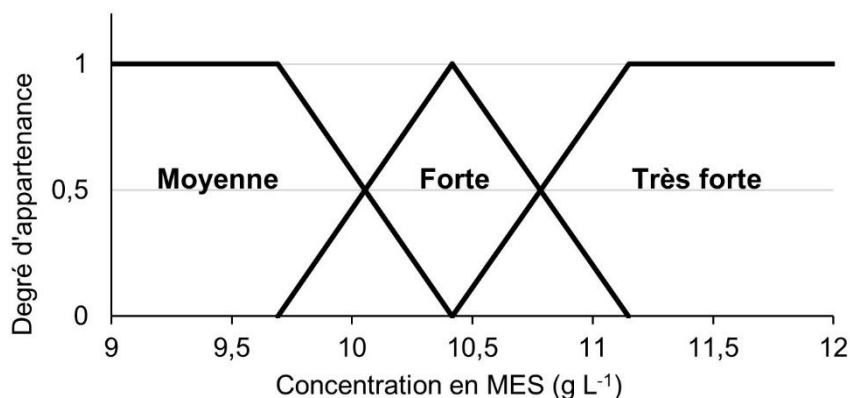
222 **1.4. Logique floue – Systèmes d'inférence floue**

223 La notion d'ensemble flou a été introduite par ZADEH [1965], un ensemble flou étant défini par une fonction
224 d'appartenance. L'appartenance d'une valeur à un ensemble flou n'est de ce fait pas binaire (i.e. appartient
225 ou n'appartient pas à cet ensemble), ce qui permet de prendre en compte l'imprécision et les incertitudes de
226 mesures.

227 Les systèmes d'inférence floue (SIF), qui sont une application de la logique floue, peuvent être utilisés pour
228 simuler les règles de fonctionnement d'un système physique ou biologique [GUILLAUME et
229 CHARNOMORDIC, 2012]. Dans un premier temps, l'étape de partitionnement découpe l'ensemble de
230 définition de chaque variable en sous-ensembles flous (SEF) auxquels sont attribués des variables
231 linguistiques. La fuzzification a ensuite pour but de transformer les valeurs numériques du jeu de données

232 en degrés d'appartenance à ces différents sous-ensembles flous. La seconde partie du SIF est constituée
233 du moteur d'inférence regroupant l'ensemble des règles qui sont de type « Si situation Alors conclusion ». La
234 partie « situation », appelée prémisse d'une règle, est une combinaison de relations sous la forme « variable
235 X_i appartient à SEF_j ». Enfin, si la variable de sortie est exprimée sous forme de sous-ensembles flous, une
236 étape de défuzzification est nécessaire si l'obtention d'une sortie numérique est souhaitée.

237 Le partitionnement en sous-ensembles flous de la concentration en MES pour l'analyse du scénario relatif à
238 l'impact du débit d'air est présenté en *figure 1* à titre d'exemple.



239

240 **Figure 1 : Partitionnement de la concentration en matières en suspension (MES) pour l'analyse du**
241 **scénario relatif à l'impact du débit d'air : degrés d'appartenance aux différents sous-ensembles flous**
242 **et variables linguistiques**

243 Dans ce cas, une concentration en MES de 10 g L⁻¹ est considérée comme moyenne avec un degré
244 d'environ 0,6 et forte avec un degré d'appartenance d'environ 0,4. Le choix des variables linguistiques a été
245 réalisé en cohérence avec le partitionnement de la concentration en MES pour le second scénario, qui
246 comprend un sous-ensemble « concentration en MES faible », la concentration en MES ayant diminué aux
247 alentours de 7,5 - 8 g L⁻¹ pendant l'expérience n°5, spécifique à ce second scénario.

248 Ces systèmes permettent de générer un ensemble de règles reliant les variables d'entrée à la sortie par
249 apprentissage à partir d'un jeu de données numériques. Les avantages de cette méthode sont l'obtention de
250 règles de raisonnement ainsi que la possibilité d'intégrer certaines connaissances expertes du domaine à
251 l'analyse de données. Certains paramètres du système d'inférence doivent néanmoins être déterminés par
252 l'utilisateur avant utilisation, tels que le nombre de partitions par variable ou la méthode d'induction des
253 règles.

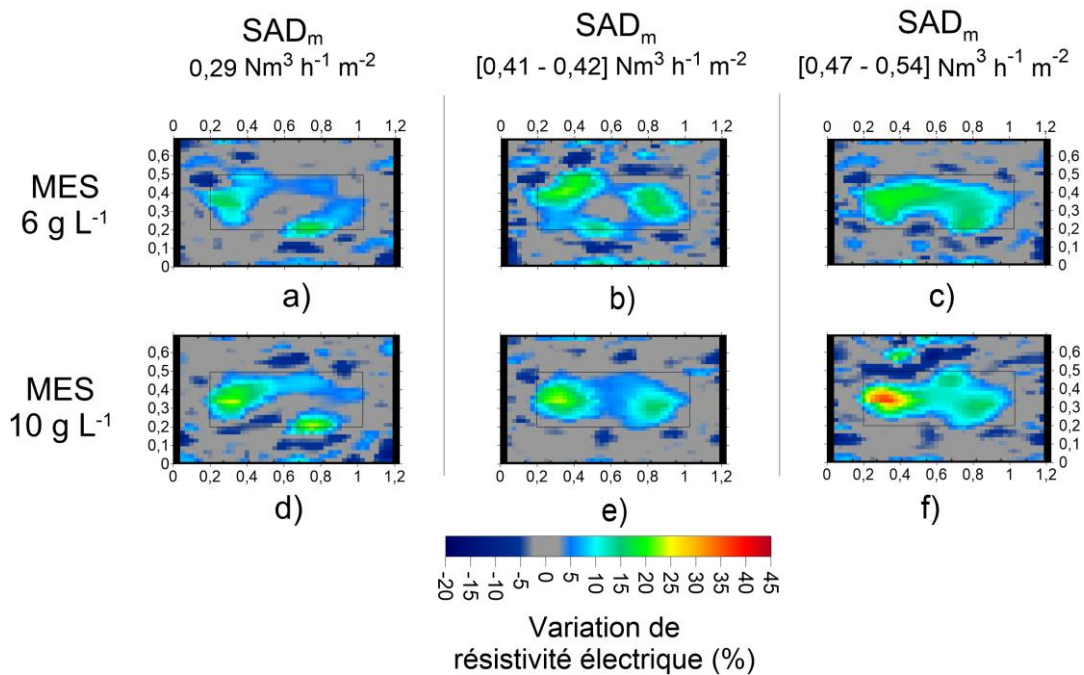
254 Le nombre de partitions par variable a été déterminé à l'aide de la méthode HFP (hierarchical fuzzy
255 partitioning), décrite dans GUILLAUME et CHARNO MORDIC [2004], qui est une méthode qui teste de façon
256 itérative un nombre croissant de SEF, une variable à la fois, pour déterminer la combinaison la plus
257 appropriée. La méthode d'induction des règles choisie est l'arbre de décision flou, décrit dans GUILLAUME
258 et CHARNO MORDIC [2011], celui-ci permettant de hiérarchiser les variables et d'obtenir des règles
259 incomplètes, c'est-à-dire ne faisant apparaître que les variables les plus pertinentes.

260 **2. Résultats et discussion**

261 **2.1 Caractérisation de la répartition du gaz dans le pilote**

262 Les résultats obtenus en eau claire (non présentés) montrent que la dispersion du gaz est homogène au
263 sein de la zone centrale du pilote correspondant à l'emplacement des sous-modules de filtration. Une
264 augmentation du débit d'air se traduit par une augmentation de la résistivité électrique, et donc de la quantité
265 d'air, au niveau de la zone de filtration. En présence de boues, les augmentations de résistivités électriques
266 sont plus faibles qu'en eau claire pour un même débit d'air et des hétérogénéités sont observées au niveau
267 des augmentations de résistivités électriques au sein de la zone membranaire, dès une concentration en
268 MES de 3 g L⁻¹.

269 La *figure 2* présente les distributions de résistivités électriques obtenues pour les trois débits d'air étudiés
270 pour les concentrations en MES de 6 et 10 g L⁻¹. Ces résultats sont présentés en variation de résistivité
271 électrique par rapport à l'expérience témoin réalisée sans injection d'air à la concentration en MES étudiée.



272

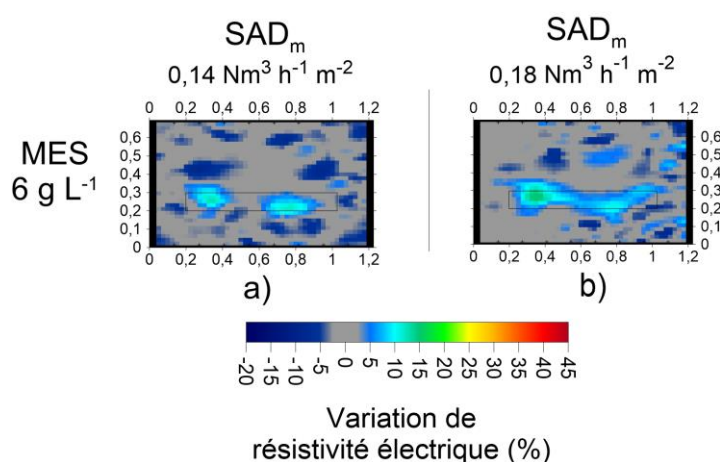
273 *MES : concentration en matières en suspension, SAD_m : demande spécifique en aération (instantanée)*

274 **Figure 2 : distributions de résistivités électriques obtenues lors de l'aération des trois sous-modules**
275 **membranaires : a) SAD_m instantanée=0,29 Nm³ h⁻¹ m⁻², [MES]=6 g L⁻¹, b) SAD_m instantanée=0,41 Nm³ h⁻¹ m⁻²,**
276 **[MES]=6 g L⁻¹; c) SAD_m instantanée=0,47 Nm³ h⁻¹ m⁻², [MES]=6 g L⁻¹, d) SAD_m instantanée=0,29 Nm³ h⁻¹ m⁻²,**
277 **[MES]=10 g L⁻¹; e) SAD_m instantanée=0,42 Nm³ h⁻¹ m⁻², [MES]=10 g L⁻¹, f) SAD_m instantanée=0,54 Nm³ h⁻¹ m⁻²,**
278 **[MES]=10 g L⁻¹**

279 En présence de boues et à faible débit d'air, des chemins préférentiels de passage de bulles sont observés.
280 Un débit d'air plus important est nécessaire à forte concentration en MES (> 6 g L⁻¹) pour que l'air soit réparti
281 sur l'ensemble de la zone membranaire (zone délimitée par un rectangle pour les distributions de résistivités

282 électriques présentées en *figure 2*), avec des hétérogénéités toutefois visibles. Ces hétérogénéités sont
 283 probablement liées aux propriétés rhéologiques spécifiques des boues. Les boues sont des fluides
 284 non-newtoniens rhéofluidifiants, leur viscosité diminue donc avec une augmentation du cisaillement ce qui
 285 est le cas avec l'augmentation de l'intensité de l'aération. Aussi, pour les débits d'air les plus faibles, la boue
 286 biologique a une viscosité plus importante qui va impacter les propriétés des bulles d'air et leur évolution au
 287 sein du réseau de fibres, avec la génération de passages préférentiels. Afin de garantir une aération
 288 homogène sur l'ensemble des membranes de filtration, le débit d'air imposé doit donc être d'autant plus fort
 289 que la concentration en MES est élevée.

290 La *figure 3* présente la distribution de résistivités électriques obtenue lors de l'aération d'un seul sous-
 291 module membranaire (résultats exprimés en variation de résistivité électrique par rapport à la distribution
 292 témoin sans injection d'air).



293

294 *MES* : concentration en matières en suspension, *SAD_m* : demande spécifique en aération (instantanée)

295 **Figure 3 : distributions de résistivités électriques obtenues lors de l'aération d'un seul sous-module**
 296 **membranaire à une concentration en MES de 6 g L⁻¹ : a) SAD_m instantanée=0,14 Nm³ h⁻¹ m⁻²,**
 297 **b) SAD_m instantanée=0,18 Nm³ h⁻¹ m⁻²**

298 Ce résultat montre un confinement de l'air au niveau du sous-module aéré (emplacement du sous-module
 299 aéré représenté par un rectangle pour les distributions de résistivités électriques présentées en *figure 3*),
 300 indiquant que l'air ne se disperse pas sur la zone environnante, limitant l'impact de l'aération sur les sous-
 301 modules à proximité.

302 2.2. Impact des stratégies d'aération sur l'évolution du colmatage

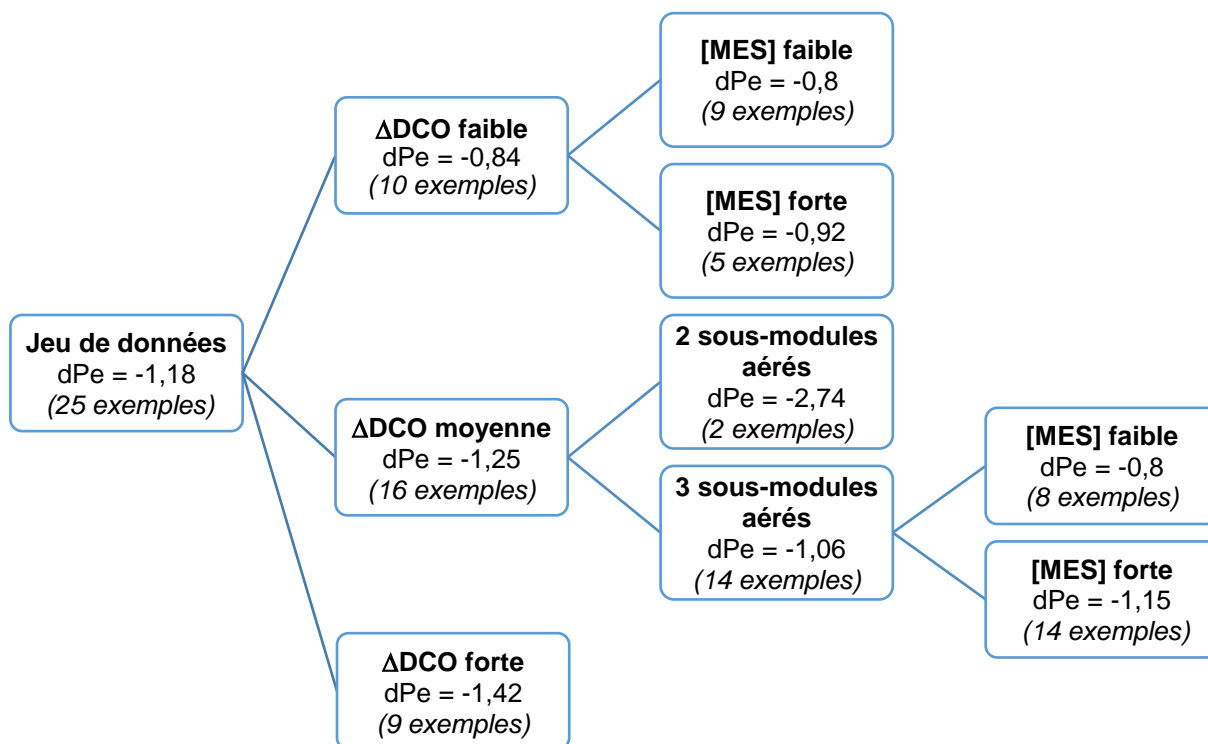
303 L'étude parallèle des propriétés des boues avec les mesures effectuées par l'exploitation de la station
 304 d'épuration a permis de valider le jeu de données obtenu lors des campagnes expérimentales réalisées sur
 305 le pilote. Une étude préliminaire de l'évolution de la perméabilité vis-à-vis des caractéristiques des boues et
 306 des conditions opératoires a mis en évidence la complexité d'interprétation des résultats due aux évolutions
 307 conjointes des différentes variables, justifiant le besoin de l'utilisation d'un outil d'analyse approprié. La
 308 variable de sortie étudiée à l'aide des systèmes d'inférence floue, caractéristique de l'évolution du

309 colmatage, est la dérive journalière de perméabilité (dPe), soit la différence de perméabilité entre deux jours
310 consécutifs de filtration, exprimée en $L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$.

311 Les grandeurs caractéristiques des boues suivies lors de la campagne expérimentale sont la concentration
312 en MES, le pH, la température, la conductivité et la DCO. La DCO fait partie, comme le carbone organique
313 total (COT), des différentes grandeurs qui permettent de décrire la charge organique d'une eau. WANG et LI
314 [2008] ont étudié le ΔCOT , qui est la différence de carbone organique total (COT) entre le surnageant des
315 boues et le perméat. Cette différence est assimilée à un nouvel ensemble de substances organiques, les
316 agrégats de biopolymères (BPC), retenus lors de la filtration membranaire. L'importance des BPC dans le
317 colmatage membranaire est discutée dans WANG et LI [2008] et SUN *et al.*, [2008], qui suggèrent une
318 relation entre ces polymères et la formation d'un gâteau imperméable résultant en un important colmatage.
319 De façon similaire au ΔCOT , la ΔDCO pourrait être une caractéristique du colmatage des membranes. Aussi,
320 la variable relative à la DCO intégrée à l'analyse statistique est la ΔDCO , différence de DCO entre le
321 surnageant et le perméat. Les autres variables caractéristiques des boues intégrées à l'analyse statistique
322 sont la concentration en MES, le pH, la température et la conductivité. Les variables associées aux
323 conditions opératoires dont l'impact sur l'évolution du colmatage est étudié sont le débit d'air instantané et le
324 nombre de sous-modules aérés.

325 Pour les deux scénarios étudiés, la température et le pH ont été écartés des variables explicatives intégrées
326 à l'analyse, leurs coefficients de variation étant inférieurs à 5 %. En effet, la méthode est basée sur un
327 apprentissage à partir d'un jeu de données et nécessite donc des variables explicatives subissant des
328 variations pour expliquer les évolutions de la sortie étudiée. La conductivité a quant à elle été écartée par la
329 méthode HFP utilisée pour définir les nombres de sous-ensembles flous par variable, le partitionnement de
330 celle-ci en plusieurs sous-ensembles flous n'améliorant pas les performances du modèle. Pour les variables
331 sélectionnées, l'ensemble des données issues du suivi pilote pour les conditions opératoires associées à un
332 scénario a été utilisé dans l'analyse, l'objectif étant ici d'apporter des éléments de compréhension et non le
333 développement d'un modèle.

334 La *figure 4* présente l'arbre de décision obtenu lors de l'étude de l'impact du débit d'air et du nombre de
335 sous-modules aérés, composé de 6 règles impliquant 3 variables parmi les 7 initiales. En effet, pour ce
336 scénario spécifique, le débit d'air n'a pas été sélectionné par la méthode HFP comme l'une des variables les
337 plus pertinentes. Les plages de variation des variables retenues relatives aux caractéristiques des boues sur
338 la période considérée sont les suivantes : 323 - 752 $mg L^{-1}$ pour la ΔDCO et 7,8 -11,5 $g L^{-1}$ pour la
339 concentration en MES. Les valeurs moyennes de température, pH et conductivité sur la période étudiée sont
340 respectivement de 34,4 °C, 6,6 et 3,4 $mS cm^{-1}$.



341

342 *dPe* : dérive de perméabilité journalière (en $L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$), ΔDCO : différence de DCO (demande chimique
343 en oxygène) entre le surnageant des boues et le perméat, [MES] : concentration en matières en suspension

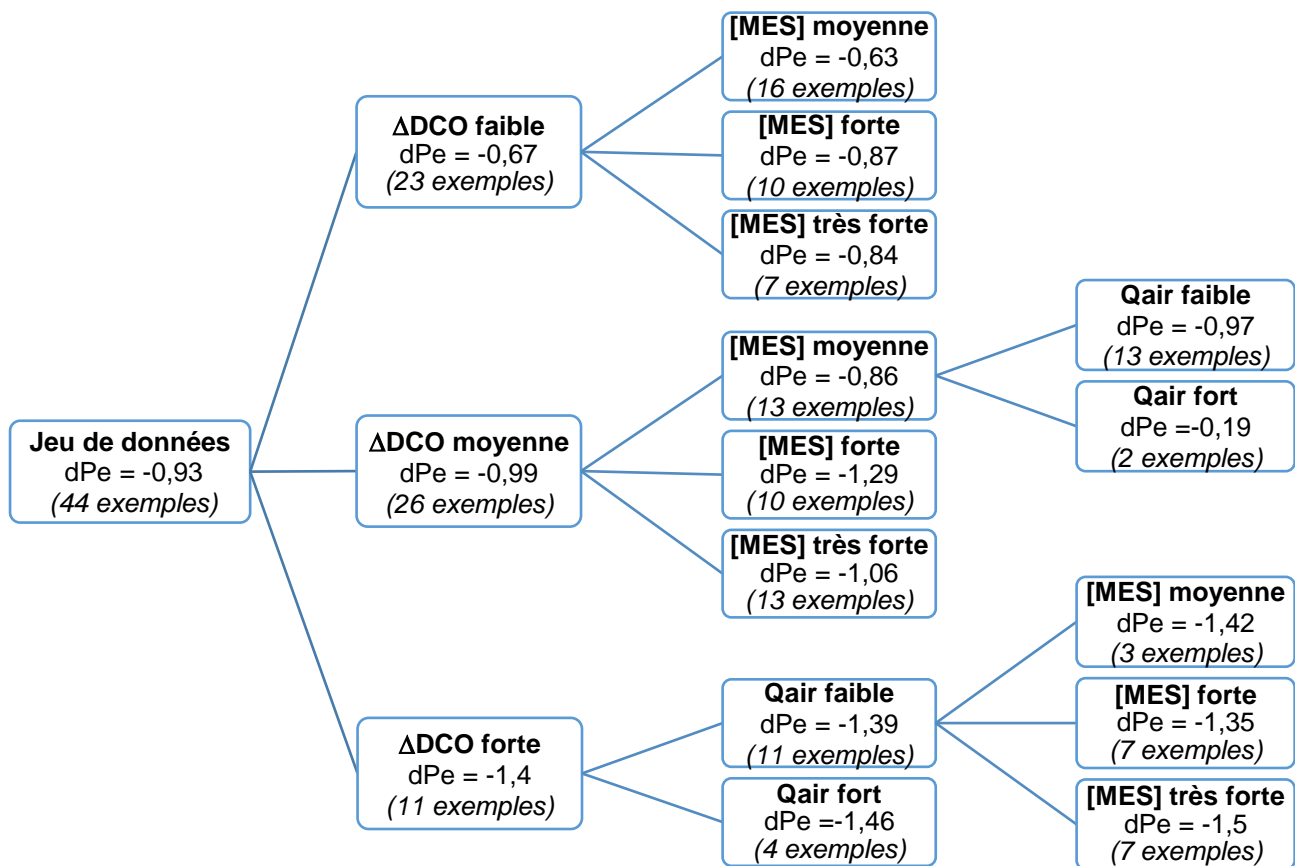
344 **Figure 4 : Arbre de décision obtenu lors de l'étude de l'impact du débit d'air et du nombre de sous-
345 modules aérés sur l'évolution de la perméabilité**

346 La variable explicative la plus influente vis-à-vis de l'évolution journalière de perméabilité est la ΔDCO , avec
347 une dégradation des performances de filtration pour des valeurs élevées de celle-ci (valeur de *dPe* négative
348 et $|dPe|$ plus élevée) de près de 70% pour les conditions opératoires et les caractéristiques de boues
349 étudiées. Figurent ensuite la concentration en MES et le nombre de sous-modules aérés : l'augmentation de
350 la concentration en MES ainsi qu'un nombre limité de sous-modules aérés sont défavorables au bon
351 fonctionnement des membranes. D'une part, la variable « nombre de sous-modules aérés » a une influence
352 particulièrement remarquable sur la chute de perméabilité (plus de 150%) à ΔDCO moyenne. Il serait
353 intéressant de compléter ces observations avec l'étude de conditions supplémentaires sur l'aération d'un
354 nombre limité de sous-modules aérés pour conforter ces premiers résultats obtenus avec un nombre de
355 données limité, et potentiellement de les nuancer selon les autres variables, notamment en termes de
356 caractéristiques des boues. D'autre part, l'augmentation de la concentration en MES est légèrement plus
357 défavorable lorsque la ΔDCO est moyenne que lorsqu'elle est faible.

358 Les résultats issus de l'ERT fournissent des pistes d'explication pour l'interprétation de ces observations. En
359 effet, il a été visualisé que l'air restait confiné au niveau du sous-module aéré limitant l'impact de l'aération
360 sur les sous-modules non aérés. Il a également été observé qu'une concentration en MES élevée était
361 responsable de l'existence de chemins préférentiels de passage de bulles, avec l'air non distribué sur
362 l'ensemble de la zone de filtration aux faibles débits d'air, ou réparti sur l'ensemble de la zone de filtration

363 mais présentant une distribution hétérogène à fort débit d'air. La concentration en MES ainsi que le nombre
364 de sous-modules aérés influent donc sur l'homogénéité de la distribution du gaz au sein des modules
365 membranaires. Cette observation associée aux conclusions de l'arbre de décision flou, semble confirmer
366 que l'homogénéité de l'aération est une condition importante pour maintenir de bonnes performances de
367 filtration et limiter le colmatage. Il serait intéressant de faire des mesures de tomographie de résistivité
368 électrique à différentes Δ DCO.

369 La *figure 5* présente l'arbre de décision obtenu lors de l'étude de l'impact du débit d'air pour 3 sous-modules
370 aérés, composé de 11 règles impliquant 3 variables parmi les 6 initiales. Les plages de variation des
371 variables retenues relatives aux caractéristiques des boues sur la période considérée sont les suivantes :
372 301 – 752 mg L⁻¹ pour la Δ DCO et 9,5 -11,5 g L⁻¹ pour la concentration en MES. Les valeurs moyennes de
373 température, pH et conductivité sont respectivement de 34,6 °C, 6,5 et 3,3 mS cm⁻¹.



374

375 dPe : dérive de perméabilité journalière (en $L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$), ΔDCO : différence de DCO entre le surnageant
 376 des boues et le perméat, [MES] : concentration en matières en suspension, Q_{air} : débit d'air instantané
 377 injecté

378 **Figure 5 : Arbre de décision obtenu lors de l'étude de l'impact du débit d'air sur l'évolution de la**
 379 **perméabilité**

380 De façon similaire à l'arbre précédent, la variable la plus influente est la ΔDCO , avec un impact négatif sur
 381 les performances de filtration à valeurs élevées. L'apparition du débit d'air après la ΔDCO et la concentration
 382 en MES dans l'arbre de décision flou indique un impact potentiellement secondaire ou dépendant des
 383 caractéristiques des boues.

384 A ΔDCO et concentration en MES moyennes, un impact positif du débit d'air sur la limitation du colmatage,
 385 mentionné dans la littérature de façon générale, est observé, avec de plus faibles chutes de perméabilité
 386 obtenues à fort débit d'air. L'homogénéité de l'aération semblant une condition nécessaire pour
 387 l'amélioration des performances de filtration, cet impact positif du débit d'air pourrait être associé à la
 388 meilleure répartition de l'aération sur l'ensemble de la zone membranaire observée à l'aide de l'ERT lors de
 389 l'augmentation de celui-ci.

390 La limitation du colmatage est plus performante dans les conditions précédentes qu'à forte ΔDCO , où les
391 dérives de perméabilité sont similaires voire indiquent de moins bonnes conditions de filtration, y compris au
392 débit d'air élevé. L'association d'un débit d'air élevé et d'une forte ΔDCO pourrait potentiellement amener à
393 mettre en évidence une déstructuration des floes entraînant un relargage d'éléments colmatants, contribuant
394 à cette forte ΔDCO et diminuant les performances de l'aération dans la limitation du colmatage. Ce
395 phénomène de relargage d'éléments colmatants à forte intensité d'aération est étudié dans BRAAK *et al.*
396 [2017].

397 D'autre part, à forte ΔDCO et faible débit d'air, l'impact de la concentration en MES semble peu prononcé.
398 Cela pourrait être lié aux distributions similaires, très hétérogènes et présentant des chemins préférentiels
399 de passage de bulles, observées dès une concentration en MES de 6 g L^{-1} à l'aide de la tomographie de
400 résistivité électrique.

401 La caractérisation de la dispersion du gaz à l'aide de l'ERT a permis d'apporter des éléments de
402 compréhension pour l'interprétation de l'analyse statistique effectuée sur les données de suivi du pilote à
403 l'aide de la logique floue, mettant en avant l'importance de l'homogénéité de l'aération et la dépendance de
404 l'efficacité de l'aération aux propriétés des boues. Ces résultats montrent l'intérêt de coupler l'étude de
405 phénomènes locaux à une analyse statistique pour faciliter la compréhension des phénomènes concurrents
406 dans la contribution de l'aération à la limitation du colmatage. En termes de conséquences opérationnelles,
407 ces résultats indiquent l'intérêt d'adapter l'aération aux caractéristiques des boues pour un fonctionnement
408 optimal.

409 **Conclusion**

410 Les résultats de l'application de la logique floue étaient ici axés sur la compréhension de l'impact de
411 l'aération et de son éventuelle dépendance aux propriétés des boues. L'analyse des arbres de décision flous
412 couplée à une étude de caractérisation de dispersion de gaz à l'aide de la tomographie de résistivité
413 électrique a mis en avant l'intérêt potentiel d'un asservissement de l'aération à ces caractéristiques des
414 boues et l'importance de l'homogénéité de l'aération, à l'aide de techniques de mesure et d'analyse
415 originales.

416 Les résultats ont été obtenus pour un type de membranes, un mode de fonctionnement de la filtration et des
417 boues biologiques spécifiques (issues du traitement biologique de jus de filtre-pressé). Les conclusions des
418 arbres de décision ne sont par conséquent pas directement transposables à n'importe quel bioréacteur à
419 membranes. Néanmoins la méthodologie appliquée est reproductible et l'apport d'éléments de
420 compréhension sur des procédés similaires à l'aide de systèmes d'inférence floue est envisageable. Vis-à-
421 vis des observations issues de la tomographie de résistivité électrique, des mesures de rhéologie ont mis en
422 évidence les similitudes de comportements des boues étudiées avec des échantillons de boues biologiques
423 de bioréacteurs à membranes traitant des eaux résiduaires urbaines classiques. Il pourrait être intéressant
424 d'effectuer des mesures complémentaires avec d'autres types de membranes, afin de comparer les
425 distributions de gaz obtenues.

426 Dans le cadre de la thèse, la logique floue a également été appliquée à l'ensemble des conditions
427 opératoires testées sur le pilote (au nombre de 12) pour le développement d'un modèle, avec le découpage
428 du jeu de données en un échantillon utilisé pour l'apprentissage et un second échantillon utilisé pour la
429 validation du modèle. Les performances de celui-ci ainsi que les informations déduites de l'analyse par
430 scénario ont montré l'intérêt potentiel d'utiliser les systèmes d'inférence floue en tant qu'outils d'aide à la
431 décision. L'étape suivante est l'application de cette analyse statistique aux données de l'unité de traitement
432 industrielle, pour évaluer son intérêt en tant qu'outil opérationnel, notamment vis-à-vis du choix de la période
433 de lavage chimique.

434 **Remerciements**

435 Ce travail de thèse a été cofinancé par Irstea et le SIAAP dans le cadre du programme de recherche
436 MOCOPEE (www.mocopee.com). Les auteurs souhaitent remercier les exploitants de l'usine Seine-Aval et,
437 plus particulièrement les agents en charge de l'exploitation de l'unité de traitement des jus, pour leur
438 disponibilité lors des mesures sur site, ainsi que Sabrina Guérin, de la Direction Innovation Environnement
439 du SIAAP, pour la récupération des données de l'unité de traitement des jus. Un remerciement particulier est
440 également adressé au personnel technique d'Irstea qui s'est fortement impliqué lors de la conception du
441 pilote semi-industriel et des campagnes de mesure sur site, ainsi qu'à Hazaël Jones et Serge Guillaume de
442 l'UMR ITAP dont l'expertise sur les systèmes d'inférence floue a été précieuse.

443 **Bibliographie**

444 BOLTON G., LACASSE D., KURIYEL R. (2006) : "Combined models of membrane fouling: Development and
445 application to microfiltration and ultrafiltration of biological fluids." *Journal of Membrane Science* 277(1-2):
446 75- 84.

447 BRAAK E., ALBASI C., ANNE-ARCHARD D., SCHETRITE S. AND ALLIET M. (2017) : "Impact of Aeration
448 on Mixed Liquor in Submerged-Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment." *Chemical Engineering &*
449 *Technology* 40(8): 1453-1465.

450 BUETEHORN S., BRANNOCK M., LE-CLECH P., LESLIE G., VOLMERING D., VOSENKAUL K.,
451 WINTGENS T., WESSLING M., MELIN T. (2012) : "Limitations for transferring lab-scale microfiltration results
452 to large-scale membrane bioreactor (MBR) processes." *Separation and Purification Technology* 95: 202-215.

453 CLEMENT R., BERGERON M. AND MOREAU S. (2018) : COMSOL Multiphysics Modelling for
454 Measurement Device of Electrical Resistivity in Laboratory test cell.

455 CLEMENT R. AND MOREAU S. (2016) : "How should an electrical resistivity tomography laboratory test cell
456 be designed? Numerical investigation of error on electrical resistivity measurement." *Journal of Applied*
457 *Geophysics* 127: 45-55.

458 DAHLIN T. AND ZHOU B. (2004) : "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode
459 arrays." *Geophysical Prospecting* 52(5): 379-398.

460 DALMAU M., ATANASOVA N., GABARRON S., RODRIGUEZ-RODA I. and COMAS J. (2015) :
461 "Comparison of a deterministic and a data driven model to describe MBR crossMark fouling." *Chemical*
462 *Engineering Journal* 260: 300-308.

463 DUCLOS-ORSELLO C., LI W. Y., HO C. C. (2006) : "A three mechanism model to describe fouling of
464 microfiltration membranes." *Journal of Membrane Science* 280(1-2): 856-866.

465 GUILLAUME S. AND CHARNOMORDIC B. (2012) : "Fuzzy inference systems: An integrated modeling
466 environment for collaboration between expert knowledge and data using FisPro." *Expert Systems with*
467 *Applications* 39(10): 8744-8755.

468 GUILLAUME S. AND CHARNOMORDIC B. (2011) : "Learning interpretable fuzzy inference systems with
469 FisPro." *Information Sciences* 181(20): 4409-4427.

470 GUILLAUME S. AND CHARNOMORDIC B. (2004) : "Generating an interpretable family of fuzzy partitions
471 from data." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 12 (3) :
472 324-335.

473 HERMIA J. (1982) : "Constant pressure blocking filtration laws - Application to power-law non-newtonian
474 fluids." *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 60(3): 183-187.

475 PHILIPPE N., STRICKER A. E., RACAULT Y., HUSSON A., SPERANDIO M. and VANROLLEGHEM P.
476 (2013) : "Modelling the long-term evolution of permeability in a full-scale MBR: Statistical approaches."
477 *Desalination* 325: 7-15.

478 STRICKER A.E., HUSSON A., PIERRE M., CANLER J.P. (2018) : "Consommation énergétique des filières
479 intensives de traitement des eaux résiduaires urbaines. " *Journées Information Eaux (23^e édition)*, Octobre
480 2018, Poitiers, France. pp.48-1-48-16

481 SUARD E.; CLÉMENT R.; FAYOLLE Y.; ALLIET M.; ALBASI C.; GILLOT S. (2019) : "Electrical resistivity
482 tomography used to characterize bubble distribution in complex aerated reactors: Development of the
483 method and application to a semi-industrial MBR in operation." *Chemical Engineering Journal*, 355, 498–
484 509.

485 SUARD E. (2018) : *Limitation du colmatage dans les bioréacteurs à membranes à l'échelle industrielle :
486 modélisation et caractérisation de l'hydrodynamique* [thèse]. Toulouse : INP. 338 p.

487 SUN F. Y., WANG X. M. AND LI X. Y. (2008) : "Visualisation and characterisation of biopolymer clusters in a
488 submerged membrane bioreactor." *Journal of Membrane Science* **325**(2): 691-697.

489 WANG X. M. AND LI X. Y. (2008) : "Accumulation of biopolymer clusters in a submerged membrane
490 bioreactor and its effect on membrane fouling." *Water Research* 42(4-5): 855-862.

491 WU J., HE C., JIANG X., ZHANG M. (2011) : "Modeling of the submerged membrane bioreactor fouling by
492 the combined pore constriction, pore blockage and cake formation mechanisms." *Desalination* 279(1-3):
493 127-134.

494 ZADEH L.A. (1965) : "Fuzzy Sets" *Information and Control* 8(3): 338-353

495 **Tableaux**

MES (g L ⁻¹)	Nombre de sous-modules aérés	SAD _{m inst} (Nm ³ h ⁻¹ m ⁻²)	T (°C)	σ (mS cm ⁻¹)
0	3	0,29/0,38/0,52	24	0,7
3	3	0,29/0,41/0,46	27	2,2
6	3	0,29/0,41/0,47	35	4,5
10	3	0,29/0,42/0,54	33	4,4
6	1	0,14/0,18	33	4,4

496 *MES : concentration en matières en suspension, SAD_{m inst} : demande spécifique en aération instantanée,*
 497 *σ : conductivité, T : température*

498 **Tableau I : Stratégies d'aération et caractéristiques des boues étudiées lors de la caractérisation**
 499 **hydrodynamique**

500

Exp	Nombre de sous-modules aérés	SAD _{m inst} (Nm ³ h ⁻¹ m ⁻²)	Q _{air inst/sous-module} (Nm ³ h ⁻¹)	Scénario d'analyse d'impact du débit d'air	Scénario d'analyse d'impact du débit d'air et du nombre de sous-modules aérés
1	3	0,29	9,9	X	
2	3	0,41	13,9	X	X
3	3	0,53	18,0	X	
4	3	0,29	9,9	X	X
5	2	0,35	18,0		X

501 *Q_{air inst/sous-module} : débit d'air instantané injecté par sous-module aéré, SAD_{m inst} : demande spécifique en*
 502 *aération instantanée*

503 **Tableau II : Stratégies d'aération étudiées lors de la campagne de suivi de l'évolution de la**
 504 **perméabilité**