

ANALYSE DYNAMIQUE ET STATISTIQUE DES EVOLUTIONS DE PERMEABILITE SUR UN BIOREACTEUR A MEMBRANES A PLEINE ECHELLE

Nicolas Philippe^a, Yvan Racault^a, Anne-Emmanuelle Stricker^a, Alain Husson^a, Mathieu Spérandio^b
et Peter A. Vanrolleghem^c

a: Irstea, UR REBX, 50 Avenue de Verdun, F-33612 Cestas CEDEX, France
Tel : +33 (0)5.57.89.08.00
Fax : +33 (0)5.57.89.08.01

b: Université de Toulouse; INSA, UPS, INP; LISBP, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse,
France
Tel : +33 (0)5 61 55 97 55
Fax : +33 (0)5 61 55 94 00

c: modelEAU, département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec, QC G1V
0A6, Canada
Tel: +1 418 656 5085
Fax: +1 418 656 2928

I) INTRODUCTION

Les bioréacteurs à membranes (BRM) pour le traitement des effluents urbains connaissent un développement important depuis une dizaine d'années en France. Ce procédé allie la dégradation biologique par boues activées et la technologie membranaire pour séparer l'eau interstitielle des boues. Il présente l'avantage de produire une eau traitée (perméat) de haute qualité de façon fiable et stable dans le temps. Sa compacité permet également une implantation dans des zones exigües ou à forte pression foncière. Un des principaux enjeux de son développement réside dans la diminution de sa consommation énergétique qui reste aujourd'hui plus élevée que celle des boues activées classiques avec décantation. Ce surplus est en partie dû aux stratégies mises en place pour freiner le colmatage : l'aération grosses bulles qui provoque des turbulences au voisinage des membranes et les rétrolavages dans le cas des fibres creuses. Pour diminuer ce poste de consommation sans nuire au fonctionnement des membranes, une bonne connaissance des mécanismes de la filtration et de l'influence des variables opératoires sur le colmatage est requise.

La perméabilité des membranes est une des variables les plus courantes pour représenter l'état de colmatage des membranes. Elle sert autant en recherche que dans la surveillance des caractéristiques de la filtration par les exploitants. Son suivi précis dans les BRM permet une meilleure connaissance de l'état de colmatage des membranes et une gestion plus éclairée des interventions de l'exploitant (gestion des rétrolavages, déclenchement des actions de lavages curatives, ou encore répartition du débit entre plusieurs files de filtration le cas échéant. Plus particulièrement son analyse précise est essentielle à la mise en relation de la perméabilité avec les variables opératoires du procédé et la compréhension des mécanismes sous-jacents qui provoquent sa diminution ou son augmentation.

La majorité des travaux de recherche à ce sujet s'appuient sur des expériences réalisées en laboratoire ou sur des BRM pilotes dans lesquels les variables opératoires sont bien maîtrisées. Ils débouchent sur une classification des mécanismes du colmatage par leur réversibilité, leur échelle de temps et leur nature. Ces trois classifications sont étroitement liées, et de manière générale en ce qui concerne l'échelle de temps, on peut y considérer deux grands types de colmatage :

- Le colmatage à court-terme (évolutions de la perméabilité sur quelques minutes) est souvent considéré comme étant dû à un dépôt de particules (flocs) à la surface de la membrane. Il est contrôlé par des approches hydrauliques (les turbulences provoquées par l'aération grosses bulles ainsi que par les rétrolavages).
- Le colmatage à long-terme (évolutions de la perméabilité sur plusieurs jours, voire plusieurs mois) est relié à un dépôt non réversible par voie hydraulique de particules très fines, mais aussi d'espèces solubles à l'intérieur et à la surface de la membrane, par interactions physico-chimiques, précipitation ou développement de biofilm. Ce colmatage est éliminé par lavage chimique (à l'acide et/ou à l'hypochlorite de sodium).

La compréhension de ces mécanismes et de leurs relations est complexe du fait des difficultés à identifier les différents types de substances colmatantes et l'influence de l'hydrodynamique sur leur propension à colmater.

Parmi les composants des boues, les produits microbiens, composés solubles (PMS) ou colloïdaux issus de l'activité et de la lyse bactérienne, sont largement reconnus comme un des principaux composants participant au colmatage des membranes. L'état de floculation des boues aurait une influence déterminante sur la concentration en PMS et sur la propension des particules à s'attacher à la membrane (Van den Broeck *et al.*, 2012). Il est lui-même influencé par l'âge des boues (Al-Halbouni *et al.*, 2008; Miyoshi *et al.*, 2009; Kimura *et al.*, 2009, Su *et al.*, 2011...), les ajouts de chlorure ferrique (Koseoglu *et al.*, 2008; Iversen *et al.*, 2009), ou encore la charge massique

(Trussel *et al.*, 2006). La température aurait aussi une influence sur la cinétique de production ou de dégradation des PMS (Guglielmi *et al.*, 2010; Lyko *et al.*, 2008; Al-Halbouni *et al.*, 2008). Cependant, il n'existe pas encore de modèles éprouvés sur des installations grandeur réelles qui parviennent à donner leur concentration de façon fiable. D'autres phénomènes plus fins et plus difficiles à mettre en valeur même à l'échelle d'un réacteur de laboratoire semblent aussi influencer le colmatage. Parmi eux, la composition chimique des PMS (De la Torre *et al.*, 2008), l'influence des taux de cisaillement sur la cohésion des floccs (Delgado *et al.*, 2008), ou encore la protection de la membrane par un colmatage particulaire superficiel (Meng *et al.*, 2009).

L'objectif de cette étude est d'étudier le comportement de la perméabilité des membranes d'un BRM grandeur réelle à fibres creuses, l'une des techniques dominantes du marché, en tenant compte des difficultés liées à l'échelle du terrain expérimental. Une attention particulière est portée sur le calcul fin de la perméabilité et d'autres indicateurs du colmatage. Cette approche a pour but d'aider à l'interprétation des évolutions des paramètres de la filtration pour l'amélioration de l'exploitation avec les données déjà acquises sur le site. Une étude statistique vise à relier les variables opératoires au colmatage des membranes tout en se limitant aux variations de ces paramètres imposés par les contraintes d'exploitation.

II) MATERIEL ET METHODES

II.1. Description du site et suivi expérimental

Le suivi expérimental porte sur un BRM de 60 000 E.H. Après un dégrillage, dessablage/dégraissage et tamisage à 0.8 mm, les eaux usées sont réparties sur deux files anoxie/anaérobie/aérobie. La boue est ensuite mélangée avant d'être répartie gravitairement sur quatre cellules membranaires (CM) équipées de fibres creuses (Zenon ZW500d). Les détails de la configuration sont présentés sur le schéma de la station (Figure 1) et dans le Tableau 1. Chaque CM contient trois modules membranaires développant une surface de filtration de 1500 m² chacun reliés à la même conduite de perméat, sur laquelle sont mesurés flux et pression (Figure 2).

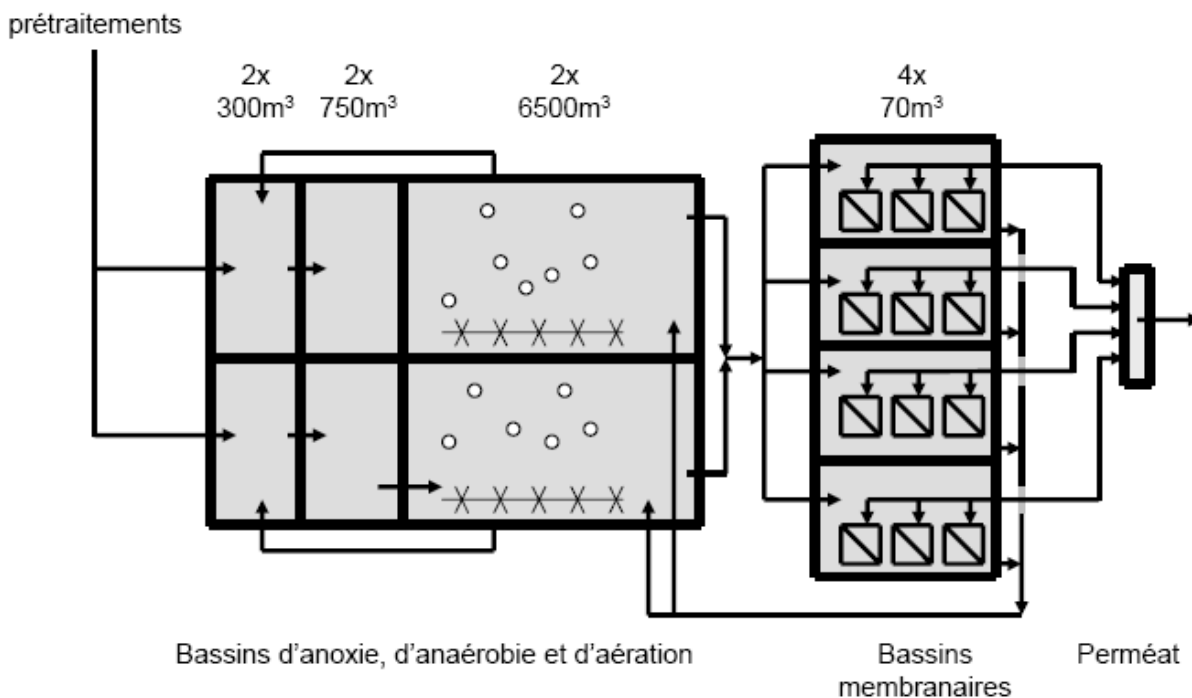


Figure 1: Schéma simplifié du BRM suivi

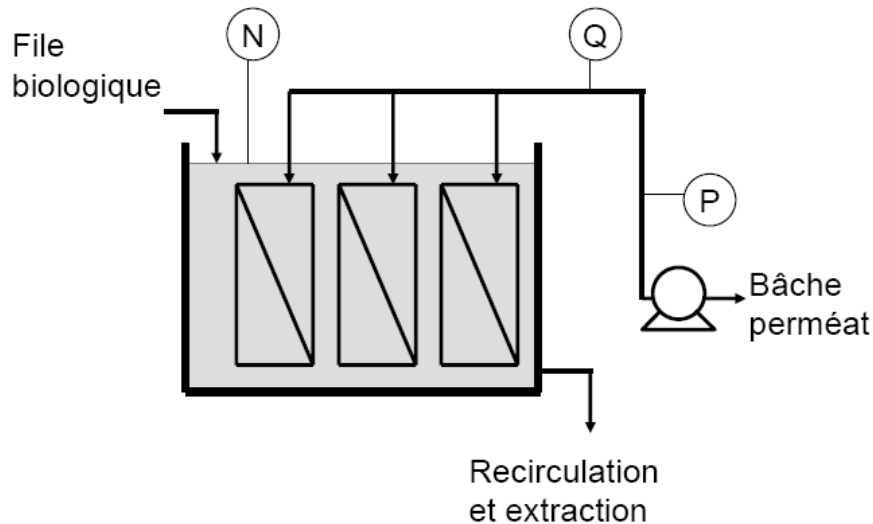


Figure 2: Schéma en coupe d'une cellule membranaire avec le capteur de pression (P), le capteur de débit (Q) et le capteur de niveau (N)

Tableau 1: Principales caractéristiques du BRM

ésGénéralit	Capacité nominale	60 000 E.H.
	Débit moyen d'entrée	8200 m ³ .j ⁻¹
	Volume des files biologiques (anoxie + anaérobie + aérobie)	2 x 7550 m ³
	Volume des cellules membranaires	4 x 70 m ³
	Prétraitements	Dessablage, dégraissage et tamisage 0.8mm
	Age de boue	50 – 70 jours
	Temps de séjour hydraulique	38 h
nesMembra	Type de membranes	Fibres creuses ZEEWEED 500d (GE-Zenon)
	Taille des pores	0.04µm
	Matériau	PVDF
	Surface totale	4 x 4550 m ²
	Flux de filtration	10 - 50 LMH
	SAD _m instantané	0.62 Nm ³ .m ⁻² .h ⁻¹ (50% du temps)
sactivéeBoues	Charge organique moyenne	4200 kgDCO.j ⁻¹
	Charge massique moyenne	0.052 kgDCO.kgMVS ⁻¹ .j ⁻¹
	MES (bassins d'aération)	5 – 9 g.L ⁻¹
	MES (cellules membranaires)	6 – 10 g.L ⁻¹
	Température	10 – 21 °C
	Injections de fer	90 kgFe.j ⁻¹ (hiver) : 8.8 mgFe/L d'eau traitée 140 kgFe.j ⁻¹ (période d'été) 18 mgFe/L

Pendant la période janvier-août 2011, l'étude a eu lieu en parallèle avec un suivi des transferts d'oxygène dans le même BRM. Les mesures nécessaires ont été faites pour pouvoir élaborer le plus précisément possible des bilans de masse dans toute la station, ce qui donne accès à une connaissance précise des âges de boue ainsi que des flux de DCO et azote. En plus des mesures de flux en entrée déjà en place sur la station, des capteurs de DCO et MES (sonde S:CAN Messtechnik GmbH, Autriche) et NH₄ (électrode ionique sélective S:CAN) ont été placés en aval des tamis pour

caractériser en continu l'influent. L'oxygène dissous, la concentration des boues, le pH et la concentration en NH_4 (Hach Lange, Allemagne) dans un des bassins d'aération ont aussi été suivis en continu, ainsi que la DCO et les nitrates dans la bache de perméat. La concentration des boues a également été mesurée en ligne dans la bache de recirculation membrane-bassins biologique, afin de déterminer la concentration réelle moyenne dans les bassins membranaires. Toutes ces mesures en ligne ont été calibrées et validées par des analyses effectuées en laboratoire à une fréquence quasi-hebdomadaire, sur des échantillons récoltés par des préleveurs automatiques en entrée et sortie station, et des prélèvements ponctuels.

Les PMS ont également été suivis pendant le début de la période de filtration (méthode BCA pour les protéines et méthode à l'antrone pour les polysaccharides). Les faibles valeurs obtenues (en dessous ou autour de la limite de quantification : 5mg/L équivalent glucose pour les polysaccharides et $\leq 10\text{mg/L}$ équivalent SAB pour les protéines) ont conduit à stopper les analyses. La supervision du BRM a permis de recueillir toutes les données provenant des capteurs de l'installation, tous les débits mesurés et les marche/arrêts de tous les appareils (pompes de recirculation, surpresseurs...). Les exploitants ont fourni par ailleurs des données supplémentaires sur leurs interventions, les quantités de réactifs utilisées (FeCl_3 , produits de nettoyage des membranes) et les quantités de boue extraites (pesées des bennes). En dépit de la grande quantité de données, quelques incertitudes persistent sur certains débits (répartition entre les deux files biologiques, entre les quatre files membranaires) et sur les quantités de réactifs injectés (débits calculés à l'aide de relevés de niveau sur les cuves, peu précis et espacés dans le temps).

II.2. Conditions de fonctionnement de l'installation

Les évolutions des principales variables opératoires pendant la période du suivi sont présentées sur la Figure 3. De janvier à août 2011, les capteurs supplémentaires installés ont fourni suffisamment d'informations pour pouvoir calculer de façon précise et fiable les productions de boue et la charge entrante (flux de DCO, d'azote), donc l'âge de boue et la charge massique. L'âge de boue a été calculé de façon dynamique (Takacs *et al.*, 2008). A partir du 23 août 2011 et jusqu'à la fin de l'étude, seules les données fournies par l'exploitant sont utilisées et se limitent à des mesures de DCO et NH_4 ponctuelles en entrée et de matières sèches dans les bassins d'aération, ainsi que toutes les informations disponibles sur la supervision. Des estimations à partir des quantités de boue extraites et de ces données sur la charge entrante se substituent aux données manquantes.

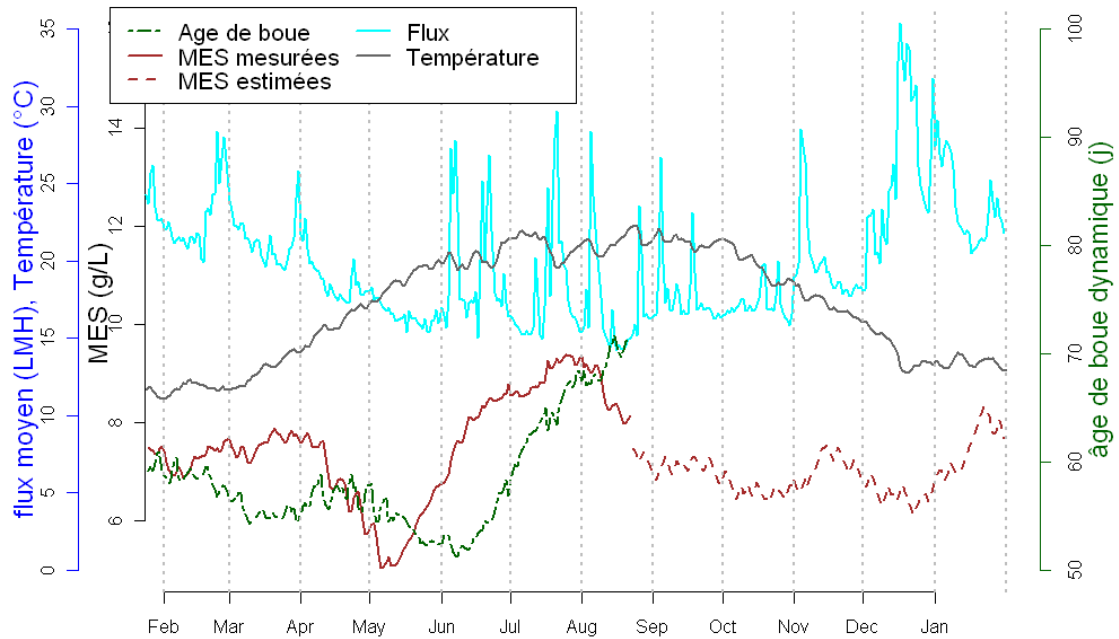


Figure 3: Evolutions des principales variables opérationnelles. Sur la deuxième moitié de la période, les MES ont été estimées

II.3. Calcul de la perméabilité

L'étude de la filtration s'est faite sur la base des valeurs de flux et de pression transmembranaires (PTM) fournies par la supervision. Initialement, les calculs de perméabilité de l'exploitant se faisaient sur la base d'une acquisition par minute. Les enregistrements ont été intensifiés à un pas de temps de 10s car les variations de flux étaient trop rapides. En effet, le petit volume des cellules membranaires relativement au débit d'alimentation induit de fortes variations de niveau dans les cellules. Pour éviter leur débordement ou le dénoyage du haut des modules membranaires, la régulation du flux sur la base du niveau d'eau dans la cellule conduit à de fortes variations de flux, donc de PTM (voir exemple Figure 4).

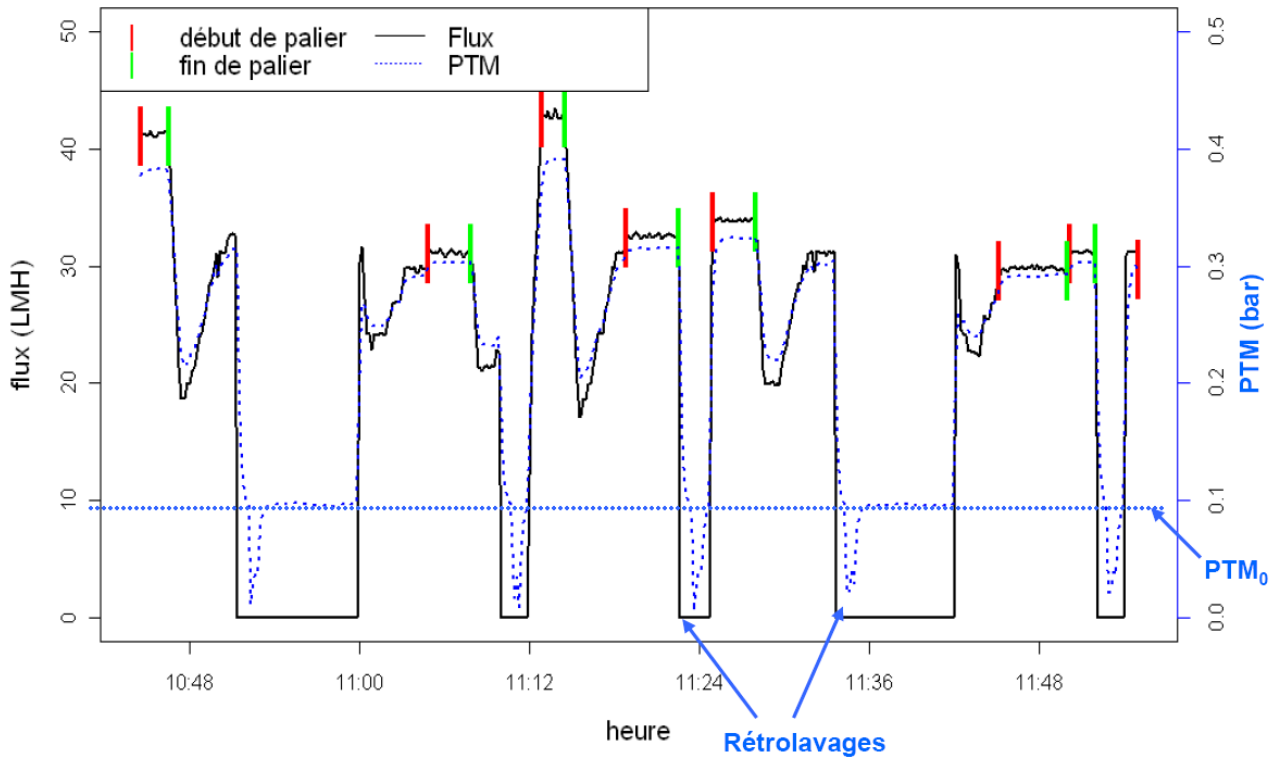


Figure 4: Flux et PTM enregistrées sur la supervision (exemple de la CM 1 pendant une heure le 24 octobre 2011). Les barres verticales représentent le début et la fin des paliers de flux détectés sur cette période

La perméabilité est la grandeur utilisée pour décrire l'état de colmatage des membranes :

$$L_p = \frac{J}{PTM} \quad \text{Equ 1}$$

Où :

- L_p : perméabilité (LMH.bar⁻¹)
- J : flux transmembranaire (LMH = L.m⁻².h⁻¹)
- PTM : pression transmembranaire (bar)

Cependant, pour pouvoir comparer l'état de colmatage des membranes dans des conditions de fonctionnement différentes, il convient d'effectuer quelques corrections. Dans le logiciel de supervision de la station, les corrections suivantes sont déjà effectuées :

- Calcul de la pression transmembranaire par différence entre la pression mesurée par le capteur situé dans la conduite de perméat et la différence de hauteur entre le niveau d'eau dans le bassin et le placement du capteur (Figure 2).
- Correction de température pour prendre en compte la variation de la viscosité du perméat. On calcule ainsi le flux théorique que l'on aurait à une température standard de 20°C et la perméabilité associée. Cette correction est toujours faite dans la littérature et dans les logiciels de supervision car c'est un élément important lors du dimensionnement des membranes.

Le calcul de perméabilité a été affiné. Tout d'abord, un programme a été développé avec le logiciel R pour écarter du calcul les périodes où la mesure de PTM est instable, puis calculer des données plus ciblées. Ce programme effectue les étapes suivantes :

- Il détecte des paliers de flux stable (écart-type sur 10 mesures consécutives inférieur à 0.5 LMH). Ces paliers sont représentés sur la Figure 4 et leur début et fin sont signalés par les barres verticales.
- Les 6 premiers points des paliers de flux sont écartés (stabilisation de la PTM)

- Si le flux est supérieur à 0.5 LMH (on détecte une période de filtration), on calcule sa perméabilité moyenne (Equ 2)
- Si le flux moyen du palier est inférieur à 0.5 LMH (on détecte une relaxation), ce palier est utilisé pour calculer la PTM à flux nul (PTM_0).

Des corrections supplémentaires ont ensuite été effectuées sur la PTM. La Figure 5 illustre l'impact de ces corrections successives. Elle représente la perméabilité calculée sur tous les paliers de flux détectés sur la CM 2 entre le 5 et le 14 août 2011 en fonction de leur flux. La première courbe (Figure 5a) est corrigée en température seulement, la seconde (Figure 5b) est corrigée en température et PTM_0 , la troisième (Figure 5c) prend également en compte les pertes de charge. La nature exacte de ces corrections est la suivante :

- Lorsque le flux est nul pendant plus de 5 minutes, on peut considérer que la PTM est nulle. On calcule alors une moyenne glissante sur 5 jours de la PTM_0 (Figure 4), que l'on retranche à la PTM mesurée pour le calcul de la perméabilité. Cela revient en fait à un calage du zéro de la mesure de PTM. (Figure 5b)
- Prise en compte des pertes de charges dans la conduite de perméat entre la membrane et le capteur de pression. (Figure 2 et Figure 5c)

La perméabilité fournie par l'équation 2 est utilisée dans le reste de l'étude.

$$L_p = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \frac{J}{PTM_{sup} - PTM_0 - \alpha J^2 L_{tuyau}} \quad \text{Equ 2}$$

Où :

- μ_T : viscosité de l'eau à la température T (Pa.s)
- μ_{20} : viscosité de l'eau à 20°C : (Pa.s)
- PTM_{sup} : PTM fournie par la supervision (bar)
- PTM_0 : PTM mesurée à flux nul (bar)
- L_{tuyau} : longueur équivalente de la conduite de perméat entre la membrane et le capteur (m)
- α : coefficient de pertes de charge ($\text{bar.m}^3.\text{h}^2.\text{L}^{-2}$) (valeur obtenue via des abaques d'hydraulique de Lencastre, 1961)

De manière générale, le traçage de la perméabilité en fonction du flux sur une période assez courte est un bon indicateur de la nécessité de procéder à des corrections. Ces corrections conduisent à des valeurs de perméabilité indépendantes des variations rapides de flux membranaire sur des courtes périodes de filtration (figure 5c). La perméabilité gagne de l'intérêt car elle peut mieux décrire l'état de la membrane indépendamment des valeurs instantanées des variables opératoire (ici le flux). Cette méthodologie est particulièrement intéressante pour des procédés où le système de régulation génère des variations de flux très fréquentes.

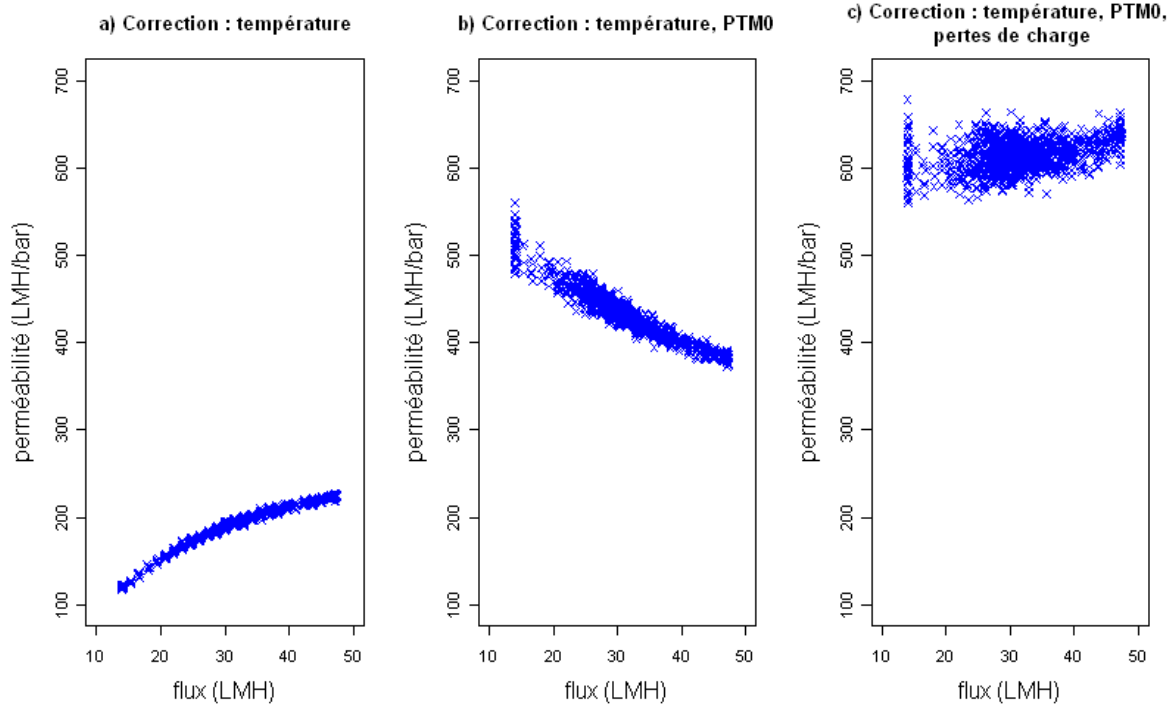


Figure 5: Perméabilité en fonction du flux après chaque correction appliquée.

II.4. Indicateurs supplémentaires du colmatage

Pour tirer une information plus complète sur le colmatage, on cherchera à différencier des indicateurs de colmatage court-terme (variation de la perméabilité en quelques minutes et influence des rétrolavages effectués toutes les 10 minutes) du colmatage long terme (évolution des moyennes journalières de perméabilité). Une telle différenciation donne notamment une indication sur le niveau de réversibilité du colmatage par rétrolavage. Ainsi trois indices de colmatage ont été définis et évalués sur toute la période du suivi :

- La dérive journalière de perméabilité (dPE) ($\text{LMH}\cdot\text{bar}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) : différence entre la moyenne des perméabilités des paliers d'un jour et celle du jour précédent
- La dérive instantanée de perméabilité (iPE) ($\text{LMH}\cdot\text{bar}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) : sur chaque palier, on fait une régression linéaire sur la perméabilité calculée en chaque point du palier, cet indice peut ensuite être confronté à différentes données telles que le flux du palier ou moyenné sur une journée
- L'indicateur d'impact des rétrolavages (iBW) ($\text{LMH}\cdot\text{bar}^{-1}$) : lorsqu'un rétrolavage est précédé et suivi de deux paliers à moins de deux minutes, la différence entre la perméabilité du palier qui suit le rétrolavage et la perméabilité de la fin du palier qui le précède donne en LMH/bar l'impact de ce rétrolavage.

II.5. Etude statistique

La mise en relation de ces indicateurs de colmatage avec les variables opératoires est un enjeu important pour pouvoir améliorer la gestion du procédé. La mise en évidence de corrélations entre les variables opératoires que l'exploitant peut mesurer voire maîtriser et ces indicateurs de colmatage servira dans la conduite du procédé. Pour déterminer ces relations, une étude statistique a été menée. La méthode des moindres carrés partiels (partial least square regression ou PLS) a été choisie pour mettre en évidence des corrélations entre les évolutions de perméabilité et les variables opératoires (flux, température, MES, charge massique, âge de boues, injections de fer et pH dans le bassin d'aération). C'est un outil statistique qui permet de réduire la complexité d'un jeu de données en faisant une régression multilinéaire entre la ou les variables à modéliser (les indicateurs du colmatage) et des variables issues de combinaisons linéaires entre les variables d'entrée (variables

opératoires). Ces combinaisons linéaires sont choisies de manière à représenter au mieux le jeu de variables de sortie. Les données utilisées pour cette étude sont les moyennes journalières des variables opératoires et les dérivées journalières de perméabilité.

III) RESULTATS

III.1. Valeurs de la perméabilité corrigée

Les corrections de perméabilité ont eu un fort impact sur l'amplitude et les valeurs obtenues. Le fait de corriger la perméabilité par la PTM0 l'a significativement augmenté, pour obtenir une valeur très haute par rapport à d'autres études réalisées sur des installations utilisant le même type de membranes (voir Tableau 2).

Tableau 2 : valeurs de perméabilité sur des BRM grandeur réelle pour des fibres creuses trouvées dans la littérature

Référence	Gamme de perméabilité (LMH/bar)	Modèle de membrane
Lyko <i>et al.</i> , 2008	100-280	Zenon Zeeweed 500c
Van Bentem <i>et al.</i> , 2010	200-480	Zenon ZeeWeed 500d
Brepols <i>et al.</i> , 2010a	150-200	Zenon ZeeWeed 500c et 500d
Garcès <i>et al.</i> , 2007	60-160	Zenon ZeeWeed 500c
Engelhardt and Lindner 2006	100-250	Zenon ZeeWeed 500c
Wintgens <i>et al.</i> , 2003	60-370	Zenon ZeeWeed ??
Cette étude	150-600	Zenon ZeeWeed 500d

Plusieurs hypothèses ont été formulées pour expliquer ces fortes valeurs de perméabilité. D'une part, le débit d'air spécifique par surface de membrane (SAD_m , voir tableau 1) se situe dans la même gamme que dans les autres études, mais quand on ramène ce débit au volume des bassins membranaires particulièrement faible dans cette installation, le débit d'air spécifique devient très élevé. Cela pourrait favoriser un décolmatage par aération grosses bulles plus efficace que dans les autres configurations. D'autre part, la quantité de chlorure ferrique ajoutée en été est plus élevée que les doses usuelles car la norme sur les phosphates en sortie de STEP est très restrictive (0.4mgPt/L en période d'étiage). Or cet ajout est aussi parfois considéré comme un exhausteur de perméabilité. De plus, la filtrabilité de la boue est bonne d'après certains tests faits dans une étude parallèle. Cela correspond aussi aux faibles concentrations en PMS obtenues au début de l'étude. Enfin certaines de ces corrections qui ont tendance à relever la valeur obtenue ne sont probablement pas faites dans les études présentées dans le Tableau 2.

III.2. Comparaison avec la perméabilité de la supervision

Les apports de ces corrections supplémentaires se traduisent surtout par une meilleure lisibilité des évolutions de perméabilité après correction. La Figure 6 montre la différence des moyennes journalières de perméabilité obtenues avec les corrections faites par l'exploitant et les corrections supplémentaires que nous effectuons. Les flèches verticales marquent les lavages de régénération. D'octobre à décembre 2010, la perméabilité n'a pas pu être calculée selon notre méthode car la période d'acquisition du flux était trop longue (1 minute). En plus d'une sensibilité au flux amoindrie et de l'augmentation des gammes de perméabilité, la différenciation entre les courbes des quatre cellules membranaires est plus marquée. Cela rend le signal plus facile à interpréter.

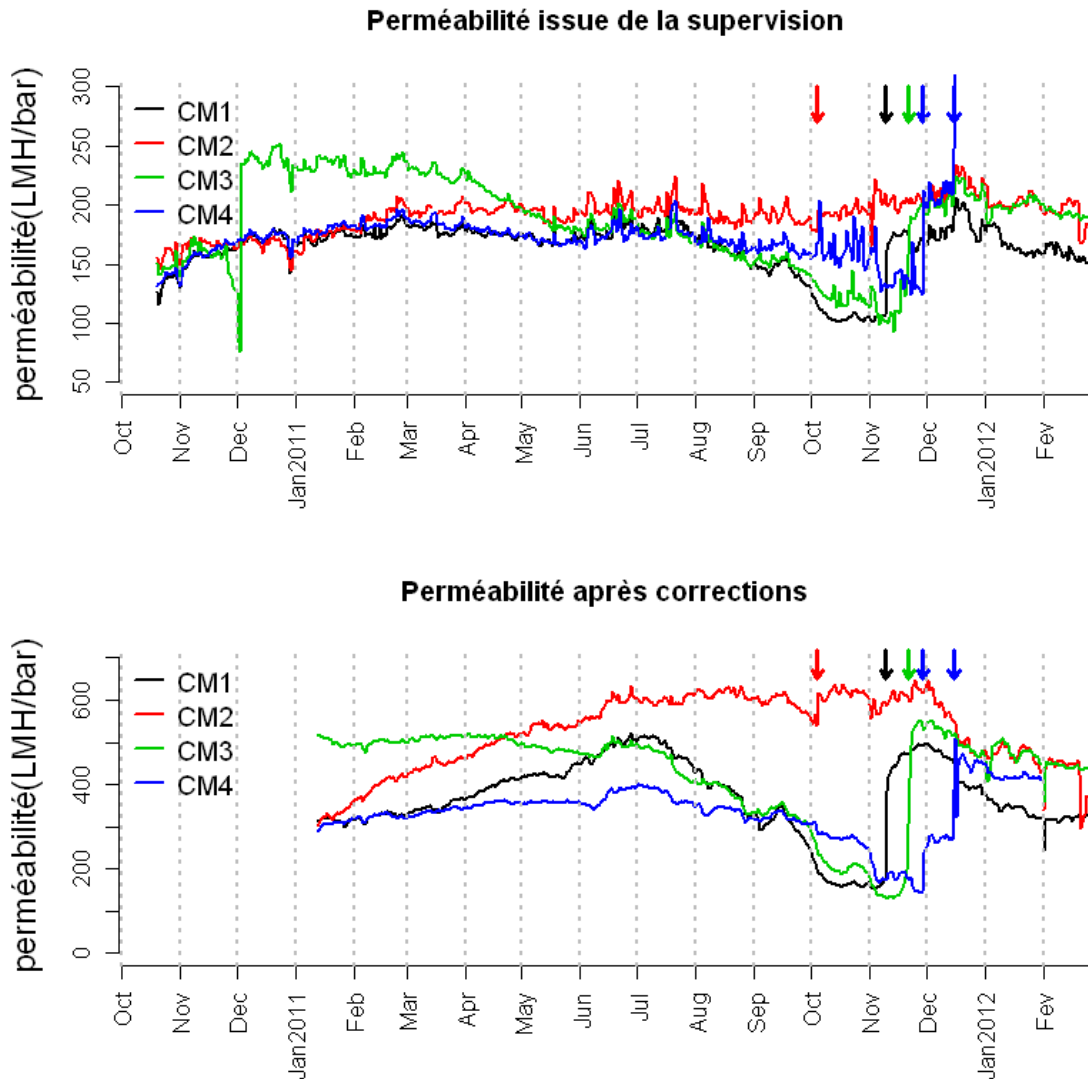


Figure 6 : Evolution de la température et des perméabilités moyennes journalières obtenues avec la supervision et après corrections

Les quatre cellules membranaires (CM) ont des comportements différents. En effet, même si une tendance globale se démarque (augmentation de janvier à juillet, puis diminution qui s'accélère en octobre et novembre), les quatre évolutions de perméabilité ne suivent pas toutes les mêmes tendances en même temps. La boue filtrée y est la même mais les flux membranaires diffèrent. Le flux le plus différent est pour la cellule CM 4 qui a un flux inférieur de 20 à 40% par rapport aux autres. Les hypothèses émises à ce sujet sont (i) un historique différent des incidents de fonctionnement, (ii) les dates des lavages de régénération (iii) une dilution différente des produits utilisés pour les lavages de maintenance et de régénération (des désamorçages de pompes de produits de lavages ont été constatés).

Si l'exploitant avait eu accès à la perméabilité ainsi corrigée, une conduite des opérations différente aurait pu être adoptée. Par exemple, les lavages de régénération n'ont pas été faits dans l'ordre idéal. La CM 2 n'aurait pas été lavée en premier si l'exploitant avait su que sa perméabilité était la plus élevée, ce qui aurait probablement évité le colmatage sévère d'une autre cellule membranaire. Cependant, les évolutions long-terme de la perméabilité dans un bassin membranaire sont visibles sur la courbe initiale mais moins marquées que sur la courbe corrigée, et le colmatage rapide des membranes à l'automne est visible dans les deux cas. De plus, le fait que la valeur corrigée soit plus élevée participe à l'amplification des variations observées.

III.3. Indicateurs du colmatage court terme.

Les indices iPE et iBW indiquent si les évolutions sur le long terme de la perméabilité peuvent être corrélées à des mécanismes court-termes. Les Figure 7 et Figure 8 donnent un aperçu des principales tendances de ces indices pendant toute l'année 2011. Les valeurs de ces indicateurs étant très dispersées autour du zéro, des boîtes à moustaches ont été choisies pour les représenter. Chacune de ces boîtes à moustaches représente une semaine de données, avec la valeur médiane symbolisée par le trait noir gras, la boîte contenant les deux quartiles intermédiaires (25%-75%), et les traits de chaque côté les deux quartiles externes.

On remarque 3 tendances :

- Les impacts des rétrolavages (Figure 7) ont tendance à être plus marqués quand la perméabilité est élevée ou dans une phase d'augmentation sur le long terme.
- Les vitesses instantanées de colmatage (Figure 8) sont moins élevées quand la perméabilité augmente, ou au contraire quand elle est au minimum.
- Les vitesses instantanées de colmatage sont moins élevées quand la perméabilité est au minimum.

Il est donc intéressant de noter qu'il existe des périodes (ici fev-juin) d'amélioration de la perméabilité qui se caractérisent par un indicateur d'impact des rétrolavages important et des vitesses instantanées de colmatage relativement faibles. Durant ces périodes, les rétro-lavages successifs permettent donc d'éliminer des dépôts formés précédemment. Ensuite une baisse de la perméabilité est tout d'abord associée à une augmentation de la vitesse instantanée de colmatage (ou en résulte). Enfin en dessous d'un certain seuil de perméabilité il semble que l'indice d'impact des rétrolavages chute, ce qui peut s'expliquer par la formation d'un dépôt de plus en plus irréversible hydrauliquement. Après nettoyage chimique (lavage de régénération) l'indice d'impact des rétrolavages remonte aussitôt.

Il semble donc y avoir un lien entre les mécanismes du colmatage court-terme et les mécanismes à long-terme. En résumé, en considérant que le colmatage court-terme est principalement déterminé par le dépôt de gâteau, lorsque ce dernier se dépose et est mal retiré par les rétrolavages, il aura un impact sur le colmatage à long-terme. Cependant, certains points ne sont pas expliqués par ce lien, comme par exemple le fait que le colmatage court-terme soit très faible quand la perméabilité atteint ses plus bas niveaux. Si ce colmatage sévère était dû à un dépôt de particules réversible par rétrolavages, alors la surface effective de filtration serait diminuée (une partie de la membrane occupée par un gâteau), les flux locaux de filtration seraient plus forts (concept de flux critique, expliqué dans Le-Clech *et al.* (2006)), ce qui favoriserait un colmatage court-terme plus fort. Ce n'est pas le cas ici.

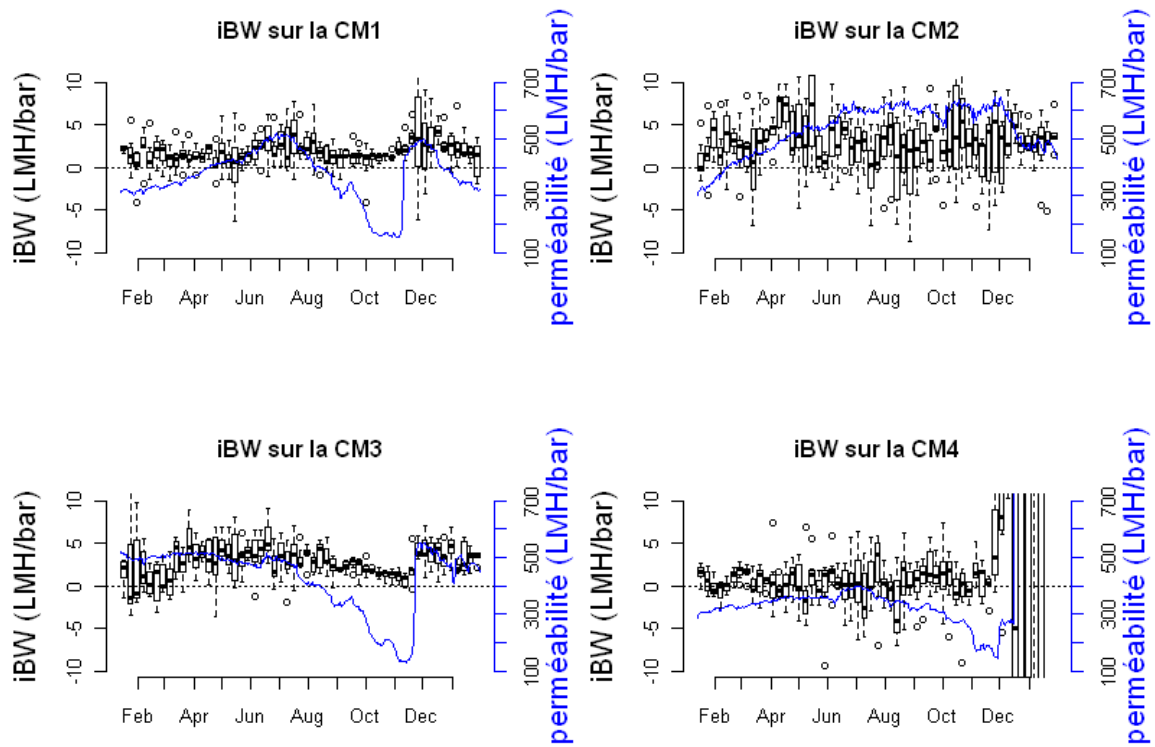


Figure 7: Impact des rétrolavages sur les quatre cellules membranaires. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de iBW calculées pendant une semaine. Les courbes bleues sont les perméabilités moyennes journalières

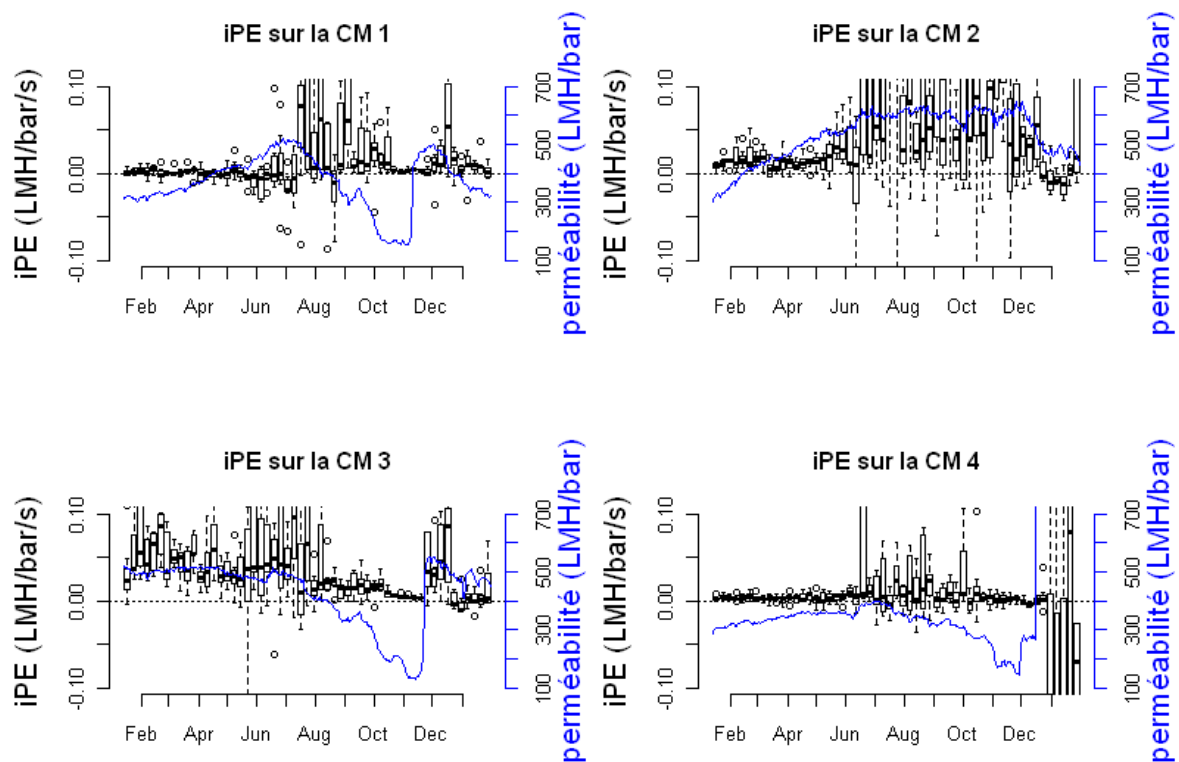


Figure 8: Evolution instantanée de la perméabilité sur les quatre cellules membranaires. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de iPE calculées pendant une semaine. Les courbes pleines sont les perméabilités moyennes journalières

III.4. Résultats de l'étude statistique

Un des objectifs de notre étude est de déterminer quelles variables opératoires influencent le colmatage et dans quel sens. L'étude statistique menée avec les données de la station permet de relier les évolutions du colmatage aux variables opérationnelles suivantes : flux, température, MES, charge massique, âge de boues, dosage du fer et pH dans le bassin d'aération. Le Tableau 3 donne les résultats de cette étude. Un coefficient négatif signifie que la variable est inversement corrélée avec les évolutions de perméabilité. Il faut garder en tête à la lecture de ces résultats que les variables d'entrée de l'étude (citées ci-dessus) peuvent être corrélées entre elles. On remarque ici aussi une forte variabilité des coefficients entre les 4 cellules membranaires.

Tableau 3: Poids de chacune des variables opératoires dans les évolutions de la perméabilité à long terme (dPE) des membranes.

	CM1	CM2	CM3	CM4	Moyenne	Écart-type / moyenne
Flux	-1.57	-1.05	-2.23	-0.764	-1.4	46%
Temp	-0.785	-1.08	-1.6	-0.514	-0.995	47%
Cm	-0.906	-0.716	-1.23	-0.643	-0.874	30%
Âge de boue	-1.2	-0.407	-1.04	-0.724	-0.843	42%
pH	-1.3	-0.359	-0.959	-0.659	-0.819	49%
MES	0.514	0.155	0.5	0.0644	0.308	75%
Fer	0.336	0.068	-0.135	0.222	0.123	166%

Les corrélations suivantes ressortent entre la dérive journalière de perméabilité (dPE) et les variables opératoires :

- dPE est inversement corrélée au flux, comme c'est admis largement dans la littérature. C'est le principal facteur le plus sensible, même si la tendance est moins marquée dans la CM 4.
- dPE est inversement corrélée à l'âge de boue. La principale tendance dans la littérature est opposée (Al-Halbouni *et al.*, 2008; Miyoshi *et al.*, 2009; Kimura *et al.*, 2009, Su *et al.*, 2011...), mais dans des gammes d'âge plus faible (10-30 jours, contre 50-70 jours dans notre étude).
- dPE est inversement corrélée à la charge massique. Dans la littérature, une explication est qu'à faible Cm, les composants colmatants contenus dans les eaux brutes seraient mieux dégradés (Trussel *et al.*, 2006).
- dPE est inversement mais faiblement corrélée à la concentration de la boue. Ce constat est cohérent avec la littérature dans la mesure où la fraction particulaire de la boue est peu impliquée dans le colmatage. Cela est confirmé par les faibles valeurs de iBW et iPE.
- dPE est inversement corrélée à la température. C'est en contradiction avec les données de la littérature, mais dans notre cas la température est inversement corrélée au flux et à la charge massique, ce qui a pu introduire un biais : l'effet de la température sert alors de compensation à l'effet du flux ou de la charge. Dans ce cas l'effet du flux serait surestimé.
- dPE est corrélée au dosage de chlorure ferrique (sauf dans la CM 3). Cela tend à confirmer que la capacité du fer à favoriser la floculation entrainerait une diminution du colmatage, même si ce résultat est faible.
- dPE est inversement corrélée au pH. La valeur de ce résultat est surprenante du fait de la très faible plage de variations du pH (entre 7.1 et 7.6) et pourrait provenir d'une très forte corrélation constatée entre le pH et l'âge de boue.

IV) CONCLUSION

Les corrections apportées à la pression transmembranaire permettent de mieux appréhender les variations de perméabilité en supprimant l'influence des variations de flux. Un traitement automatique des flux et PTM mesurés qui isole les paliers de filtration stables permet d'affiner la précision du calcul de perméabilité et d'accéder à d'autres indicateurs de la nature du colmatage, basé sur différentes échelles de temps.

Après avoir effectué ces calculs, les principales observations suivantes sont obtenues : d'une part, les variations de perméabilités (différentes dans chaque cellule de filtration) dépendent tout autant du flux et des conditions spécifiques de filtration de chaque cellule que des propriétés du fluide (commun aux cellules de filtration). Cela démontre l'importance de mesurer le flux de filtration spécifique à chaque cellule de filtration pour développer une stratégie de conduite.

Ensuite, les périodes d'amélioration progressive de la perméabilité semblent dus à l'efficacité des rétrolavages successifs.

Enfin, les corrélations obtenues entre les évolutions long terme de la perméabilité et les variables opératoires confirment que le flux est la variable prépondérante dans les évolutions de perméabilité, que le dosage de fer a une influence positive et que la charge massique a une influence négative. Cependant, contrairement aux résultats de la littérature, une approche statistique par PLS donne une corrélation négative entre température et évolutions long-terme de perméabilité. De même pour l'âge de boue, ce qui est moins étonnant car leurs valeurs sur le BRM étudié sont plus élevées que dans les autres études publiées.

L'objectif de cette approche statistique serait de prévoir le comportement de la perméabilité des membranes dans un module sans en connaître les causes exactes, mais en se basant sur les évolutions passées. Elle pourrait permettre aux exploitants de mieux connaître les interactions entre leurs membranes et la biologie des boues, et ainsi adapter la conduite des opérations, et en particulier choisir des modes de fonctionnement moins énergivores.

V) RÉFÉRENCES

- Al-Halbouni, D.; Traber, J.; Lyko, S.; Wintgens, T.; Melin, T.; Tacke, D.; Janot, A.; Dott, W. & Hollender, J. Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena *Water Research*, **2008**, *42*, 1475-1488
- van Bentem, A.; Nijman, N.; Schyns, P. & Petri, C. MBR Varsseveld : 3 years of operational experience *Water Practice & Technology*, **2010**, *5*, 1
- Brepols, C.; Drensla, K.; Janot, T.; Engels, T. & Engelhardt, N. Performance improvement of full scale membrane bioreactors *IWA Regional Conference an Exhibition on Membrane technology and Water Reuse, Istanbul-Turkey*, **2010**
- den Broeck, R. V.; Dierdonck, J. V.; Nijskens, P.; Dotremont, C.; Krzeminski, P.; van der Graaf, J.; van Lier, J.; Impe, J. V. & Smets, I. The influence of solids retention time on activated sludge bioflocculation and membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR) *Journal of Membrane Science*, **2012**, *401-402*, 48-55
- Engelhardt, N. & Lindner, W. Experiences with the world's largest Municipal Waste Water treatment plant Using Membrane Technology *Water Practice & Technology*, **2006**, 7-1
- Guglielmi, G.; Chiarani, D.; Saroj, D. P. & Andreottola, G. Sludge filterability and dewaterability in a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment *Desalination*, **2010**, *250*, 660-665
- Iversen, V.; Koseoglu, H.; Yigit, N. O.; Drews, A.; Kitis, M.; Lesjean, B. & Kraume, M. Impact of membrane flux enhancer on activated sludge respiration and nutrient removal in MBRs *Water Research*, **2009**, *43*, 822-830

- Koseoglu, H.; Yigit, N.; Iversen, V.; Drews, A.; Kitis, M.; Lesjean, B. & Kraume, M. Effects of several different flux enhancing chemicals on filterability and fouling reduction of membrane bioreactor (MBR) mixed liquors *Journal of Membrane Science*, **2008**, *320*, 57-64
- Kimura, K.; Naruse, T. & Watanabe, Y. Changes in characteristics of soluble microbial products in membrane bioreactors associated with different solid retention times: Relation to membrane fouling *Water Research*, **2009**, *43*, 1033-1039
- Le-Clech, P.; Chen, V. & Fane, T. A. G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment *Journal of Membrane Science*, **2006**, *284*, 17-53
- Lyko, S.; Wintgens, T.; Al-Halbouni, D.; Baumgarten, S.; Tacke, D.; Drensla, K.; Janot, A.; Dott, W.; Pinnekamp, J. & Melin, T. Long-term monitoring of a full scale municipal membrane bioreactor - Characterisation of foulants and operational performance *Journal of membrane science*, **2008**, *317*, 78-87
- Miyoshi, T.; Tsuyuhara, T.; Ogyu, R.; Kimura, K. & Watanabe, Y. Seasonal variation in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater. *Water Research*, **2009**, *43*, 5109-5118
- Su, Y.; Pan, J.; Huang, C. & Chang, C. Impact of sludge retention time on sludge characteristics and microbial community in MBR *Water Science & Technology, IWA Publishing*, **2011**, *63*, 2250-2254
- Takacs, I.; Stricker, A.-E.; Achleitner, S.; Barrie, A.; Rauch, W. & Murthy, S. Do You Know Your Sludge Age *Proceedings of the Water Environment Federation*, **2008**, *2008*, 3639-3655
- Trussell, R. S.; Merlo, R. P.; Hermanowicz, S. W. & Jenkins, D. The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater *Water Research*, **2006**, *40*, 2675-2683
- Wintgens, T.; Rosen, J.; Melin, T.; Brepols, C.; Drensla, K. & Engelhardt, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment *Journal of Membrane science*, **2003**, *216*, 55-65