

MEMBRANES D'ULTRAFILTRATION

LA PRÉSENCE DE BIOFILMS: UN AVANTAGE POUR STABILISER LE FLUX ET AUGMENTER LA QUALITÉ DU PERMÉAT

L'utilisation de systèmes composites combinant une couche biologique (le biofilm) supportée par une barrière physique (la membrane) a de multiples avantages pour le traitement des eaux (production d'eau potable, recyclage des eaux grises). Cet article présente comment tirer profit de la microbiologie des biofilms afin d'améliorer la qualité du perméat et faire fonctionner des systèmes membranaires à flux constant pendant plusieurs années, et ce sans maintenance.

Nicolas Derlon*; Wouter Pronk, Eawag, Département Technologie des procédés

Eberhard Morgenroth, Eawag, Département Technologie des procédés et ETH Zurich, Institute of Environmental Engineering

ZUSAMMENFASSUNG

BIOFILME AUF ULTRAFILTRATIONSMEMBRANEN: VORTEILHAFT ZUR STABILISIERUNG DES TRANSMEMBRANFLUSSES UND ZUR ERHÖHUNG DER QUALITÄT DES PERMEATS

Wachstum von Biofilmen führt zum Verstopfen von Membranen (Fouling) und behindert den Betrieb von Membrananlagen (reduzierter Flux und erhöhter Bedarf an Energie und Chemikalien). Bei der Membranfiltration werden Biofilme deshalb als unerwünscht eingestuft. Eine vollständige Vermeidung von Biofilmen bei der Aufbereitung von Wasser und Abwasser ist in der Praxis fast unmöglich.

In diesem Beitrag stellen wir ein neues Paradigma für den Betrieb von Membrananlagen vor, bei dem Biofilme auf Membranoberflächen gezielt genutzt und als gekoppeltes System betrachtet werden. Für den Einsatz von solchen gekoppelten Biofilm-Membran-Systemen muss die Mikrobiologie der Biofilme verstanden werden. Die mikrobielle Zusammensetzung und Funktionen der Biofilme bestimmen sowohl die Menge als auch die Qualität des Permeats. Im gekoppelten System fungiert der Biofilm als biologischer Filter, während die Membran Partikel zurückhält. In den Biofilmen leben nicht nur Bakterien, sondern auch Metazoen wie Nematoden und Oligochäten. Metazoen fressen Bakterien im Biofilm (Prädation), was zu heterogenen Biofilmstrukturen und höherem Flux führt. Bakterien im Biofilm helfen, organische Verbindungen (Stoffe, die an der Membrane sorbieren und zum Fouling führen, mikrobielle

BIOFILMS: PRÉJUDICIALE OU AVANTAGEUX?

LA VIEILLE ÉCOLE: LE COLMATAGE PAR LES BIOFILMS EST PRÉJUDICIALE

La formation de biofilms à la surface des membranes résulte à la fois de l'accumulation de produits microbiens solubles et de la croissance bactérienne. Les bactéries présentes à la surface des membranes se nourrissent des composés biodégradables contenus dans l'eau d'alimentation, et forment une matrice d'exo-polymères (en anglais: *extracellular polymeric substances*, EPS) pour former une structure appelée «biofilm». La matrice d'EPS agit comme une colle qui maintient les bactéries attachées entre elles et à la surface membranaire, augmentant ainsi la résistance hydraulique [1]. Il est communément admis que les biofilms colonisent inévitablement les membranes, réduisant ainsi les performances de filtration [2].

La formation de biofilms au sein de systèmes membranaires est détectée indirectement, via son impact sur les performances du procédé (réduction du flux de perméat ou augmentation de la pression transmembranaire) [1]. En pratique, le nettoyage des membranes intervient lorsque le flux de perméat diminue de plus de 10-15% de sa valeur initiale [3]. Différentes stratégies de contrôle des biofilms sont dès lors appliquées: nettoyages chimiques, rétro-lavage, cisaillement, etc. L'utilisation de bio-

* Contact: nicolas.derlon@eawag.ch

cides vise à tuer les bactéries attachées à la surface des membranes. Cependant, «tuer» n'est pas «nettoyer», et tuer seul ne signifie pas que la surface des membranes est nettoyée [3]. En outre, l'utilisation de biocides est associée à des coûts d'exploitation supplémentaires non négligeables. L'application de rétro-lavages et de conditions de cisaillement aide à détacher le biofilm, et donc à limiter son accumulation. Mais ces stratégies sont malheureusement très énergivores. De plus, le retour d'expérience sur l'utilisation de systèmes membranaires en traitement des eaux indique qu'il est impossible d'éviter la formation de biofilms, et que finalement, ce sont toujours les biofilms qui l'emportent. On peut donc naturellement s'interroger sur la pertinence des approches visant à contrôler la formation des biofilms membranaires au détriment d'une grande quantité d'énergie/de produits chimiques, et ultérieurement pour des résultats mitigés en termes de contrôle de la perméabilité.

NOUVEAU PARADIGME: LA PRÉSENCE DE BIOFILMS À LA SURFACE DE MEMBRANES DE FILTRATION A DES AVANTAGES

Historiquement, la présence de biofilms à la surface des membranes a donc toujours été considérée comme préjudiciable. Mais cette vision conservatrice a récemment été remise en question. Plusieurs études ont en effet démontré qu'il est pertinent de tolérer et tirer avantage de la présence de biofilms à la surface des membranes, plutôt que de les combattre en vain [3, 4]. En d'autres termes, nous proposons que l'utilisation de systèmes composites «biofilm-membrane» revête de nombreux avantages par rapport à l'utilisation de systèmes membranaires classiques (basés sur des membranes seules). Récemment, plusieurs systèmes de traitement des eaux basés sur l'utilisation de composites biofilm-membrane ont été développés par l'Eawag (fig. 1): (a) le Filtre Safir pour la production d'eau potable, (b) les toilettes Blue Diversion Autarky ou encore les procédés de traitement des eaux mis en œuvre au sein de (c) l'unité de vie autonome Self Unit et du (d) bâtiment NEST.



Fig. 1 (a) Filtre Safir pour la production d'eau potable (avec la permission de Wouter Pronk, Eawag), (b) toilettes Blue Diversion Autarky, (c) unité de vie autonome Self Unit et (d) bâtiment NEST. Plus d'informations sur le Filtre Safir pour la production d'eau potable: www.eawag.ch/GDM, sur les toilettes Blue Diversion Autarky: www.autarky.ch, sur l'unité de vie autonome Self Unit: www.empa.ch/web/self/self ou sur le bâtiment NEST: www.eawag.ch/waterhub

(a) Safir-Filter für die Trinkwasserproduktion (mit freundlicher Genehmigung von Wouter Pronk, Eawag), (b) Blue Diversion Autarky-Toilette, (c) autonome Wohneinheit «Self Unit» und (d) NEST-Gebäude. Zusätzliche Informationen zum Safir-Filter für die Herstellung von Trinkwasser: www.eawag.ch/GDM, zu den Blue Diversion Autarky-Toiletten: www.autarky.ch, zur autonomen Wohneinheit «Self Unit»: www.empa.ch/web/self/self oder zum NEST-Gebäude: www.eawag.ch/waterhub

Production d'eau potable

Les systèmes composites biofilm-membrane peuvent être utilisés avec succès pour la production d'eau potable (tab. 1), à partir d'eaux de surface (Filtre Safir) ou d'eaux de pluie (unité de vie autonome Self Unit). Le Filtre Safir est un système «domestique»

Systèmes	Eau potable		Eaux grises/usées	
	Ultrafiltration classique	Filtre Safir pour la production d'eau potable ou unité de vie autonome Self Unit	Ultrafiltration classique	Toilettes Blue Diversion Autarky ou bâtiment NEST
Usage: – Domestique (décentralisé) – Communautaire (décentralisé) – Centralisé, grande échelle	Tout usage	Usage domestique et communautaire	Tout usage	Usage communautaire
Demande en énergie et produits chimiques	Élevée	Nulle ou faible	Élevée	Faible
Pression transmembranaire (bar)	0,2–1	0,02–0,1	0,05–0,3	0,02–0,1
Mécanismes de colmatage	Biofilm, adsorption à la surface des pores, blocage des pores, etc.	Biofilm	Formation d'un gâteau de filtration	Biofilm
Contrôle du colmatage: Application d'une contrainte de cisaillement, nettoyages chimiques, rétro-lavages, relaxation, etc.	Oui	Non	Oui	Non
Stabilisation du flux de perméat (pendant plusieurs mois/années)	Non	Oui	Non	Oui

Tab. 1 Comparaison entre l'ultrafiltration classique et l'ultrafiltration gravitaire avec biofilm toléré (en anglais: gravity-driven membrane, GDM) pour la production d'eau potable ou pour le traitement des eaux grises/usées [5, 6].

Vergleich der konventionellen Ultrafiltration mit schwerkraftgetriebener Ultrafiltration mit toleriertem Biofilm (in Englisch: gravity-driven membrane, GDM) für die Produktion von Trinkwasser oder zur Behandlung von Grau-/Abwasser [5, 6].

utilisé pour la production décentralisée d'eau potable dans les pays en voie de développement [7].

L'unité de vie autonome Self Unit est une plate-forme de démonstration pour technologies innovantes, utilisées dans la construction des futures habitations. Un accent particulier est mis sur les économies d'eau (traitement des eaux de pluie).

Recyclage des eaux grises

Les systèmes composites biofilm-membrane sont également utilisés avec succès pour le recyclage des eaux grises, dans les toilettes Blue Diversion Autarky ou au sein du bâtiment NEST (tab. 1). Les toilettes Blue Diversion Autarky ont été développées dans le cadre du programme «Reinvent The Toilet Challenge», financé par la fondation *Bill & Melinda Gates* [8]. Les toilettes Blue Diversion Autarky fonctionnent «hors connexions», c'est-à-dire sans rattachement à un réseau (de distribution d'eau, d'assainissement, ou d'électricité). Ces toilettes séparent à la source l'urine, les matières fécales et les eaux grises (générées lors du lavage des mains et des surfaces). Les eaux grises sont traitées sur place avant d'être réutilisées.

Le bâtiment NEST est un bâtiment d'innovation où différentes nouvelles technologies sont testées. Au sein du bâtiment NEST, l'Eawag développe le principe de séparation à la source à l'échelle d'une communauté, pour réduire la consommation d'eau et récupérer des produits à valeur ajoutée (engrais, eau recyclée). Le

traitement et la réutilisation des eaux grises ont le potentiel de réduire la consommation en eaux de plus de 50%. L'Eawag développe actuellement un nouveau procédé de recyclage des eaux grises: la filtration membranaire gravitaire avec composite biofilm-membrane combinée à un post-traitement biologique/adsorption (en anglais: *biological activated carbon*).

Pour l'ensemble des systèmes mentionnés ci-dessus, la formation de biofilms à la surface des membranes est non seulement tolérée, mais surtout désirée. Les systèmes composites biofilm-membrane fonctionnent sans aucun contrôle du biofilm (tab. 1). Les besoins en maintenance sont donc considérablement réduits par rapport à la filtration membranaire classique car le biofilm s'autorégule et permet un fonctionnement à flux constant pendant plusieurs années. Des flux de perméat de 4 à 20 l m⁻² h⁻¹ et de 0,5 à 3 l m⁻² h⁻¹ sont respectivement observés lors de l'ultra-filtration gravitaire d'eaux de rivière et lors du recyclage d'eaux grises. Au contraire, les systèmes classiques d'ultrafiltration membranaire subissent des nettoyages chimiques/physiques fréquents qui permettent de maintenir un flux de perméat plus élevé (de l'ordre de 25-150 l m⁻² h⁻¹), mais à un coût opératoire bien plus important. Tolérer la formation de biofilms à la surface des membranes de filtration présente donc plusieurs avantages:

- un fonctionnement du système membranaire à flux constant,
- une amélioration de la qualité du perméat.

CONCEPT DE STABILISATION DU FLUX DE PERMÉAT

La formation de biofilms à la surface des membranes permet un fonctionnement à un flux faible mais constant sur une période allant jusqu'à plusieurs années (fig. 2). Ce concept de Stabilisation du flux [7] s'applique à des échelles de temps plus longues que celles du concept de Flux critique [10] largement utilisé en filtration membranaire.

CONCEPT DE FLUX CRITIQUE

Le concept de Flux critique s'applique uniquement à des échelles de temps de l'ordre de quelques minutes à quelques heures. Un fonctionnement au-dessus de la valeur de Flux critique résulte en un colmatage instantané de la membrane et donc en une augmentation importante de la résistance hydraulique (fig. 2a). Un fonctionnement en-dessous de la valeur seuil du Flux critique permet de limiter l'augmentation de résistance hydraulique due au colmatage pendant les premières minutes/heures de filtration et donc d'obtenir un flux de perméat quasi stable pendant cette période (fig. 2b). Cependant, il est important de noter que le concept de Flux critique ne s'applique qu'à la mise en route du système, soit uniquement aux premières minutes/heures de filtration [10]. Au-delà de cette période, le flux de perméat diminue inévitablement en l'absence de nettoyage.

CONCEPT DE STABILISATION DU FLUX

Le concept de Stabilisation du flux s'applique quant à lui aux systèmes membranaires fonctionnant sans contrôle du biofilm [7]. Selon ce concept, une diminution importante du flux de perméat intervient pendant les premiers jours de filtration mais celui-ci se stabilise après environ une semaine (fig. 2c). Cette stabilisation du flux de perméat résulte de l'activité microbienne du biofilm qui permet de lutter contre l'accumulation néfaste de composés colmatants, comme par exemple les polysaccharides.

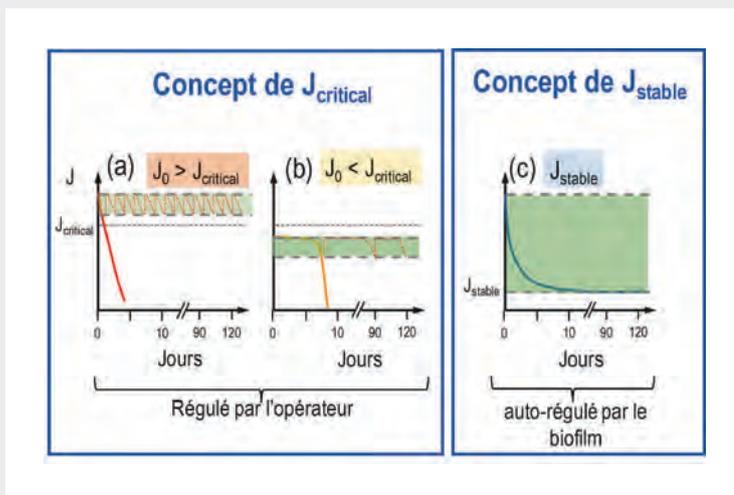


Fig. 2 Concept de Flux critique (à gauche) vs. concept Stabilisation du flux (à droite). La zone verte indique la gamme de flux dans laquelle le colmatage est toléré, et les lignes rouges pointillées représentent la tendance attendue du flux de perméat lorsque des stratégies de contrôle du colmatage sont appliquées (a et b). Pour les systèmes membranaires classiques, le colmatage d'origine biologique est contrôlé lorsque le flux initial de perméat est réduit de 10 à 15% [9]. Pour les systèmes composites biofilm-membrane, une réduction de 90% du flux initial est tolérée car les biofilms permettent de faire fonctionner le système à flux stable (c: zone verte).

Zwei Konzepte: Kritischer (links) und stabiler Flux (rechts). Der grün hinterlegte Bereich zeigt den Betriebsbereich, in dem Fouling toleriert wird, und die rot gestrichelten Linien stellen den typischen Verlauf des Fluxes dar, wenn regelmässig gereinigt wird (a und b). Bei herkömmlichen Membransystemen wird dem Fouling durch Reinigung der Anlage entgegengewirkt, wenn der Flux um 10-15% gesunken ist [9]. Bei gekoppelten Biofilm-Membran-Systemen wird eine Reduktion des Fluxes von bis zu 90% von Anfang an toleriert (c). Dabei führen die Biofilme zu einem stabilen Betrieb ohne Reinigung (Betrieb im grösseren grün hinterlegten Bereich)..

Selon le concept de Stabilisation du flux, un flux de perméat constant peut être maintenu pendant plusieurs années sans maintenance.

DIFFÉRENCE ENTRE LES CONCEPTS

Une autre différence clé entre les concepts de Flux critique et de Stabilisation du flux réside dans le contrôle de la résistance hydraulique. La zone verte présentée sur la *figure 2* illustre la gamme de flux dans laquelle les systèmes membranaires classiques (*fig. 2a* et *b*) ou systèmes composites biofilm-membrane (*fig. 2c*) fonctionnent. Pour des systèmes membranaires classiques, le colmatage est toléré tant que la diminution du flux reste inférieure à 10-15% de sa valeur initiale (zone verte - *fig. 2a* et *b*). Au-delà de cette valeur, un contrôle des biofilms est déclenché pour maintenir un flux de perméat élevé (ligne rouge pointillée - *fig. 2a* et *b*). Les systèmes membranaires classiques sont donc régulés par les opérateurs, en fonction de l'impact du biofilm sur les performances de filtration. Pour les systèmes composites biofilm-membrane, c'est le biofilm lui-même qui régule la résistance hydraulique. Les systèmes composites biofilm-membrane peuvent donc être considérés comme des systèmes autorégulés. Une diminution du flux de perméat beaucoup plus importante que pour des systèmes classiques (jusqu'à 90%) est par conséquent consentie car l'objectif est un fonctionnement à flux de perméat constant sur le long terme (zone verte - *fig. 2c*).

LA CLÉ DU SUCCÈS – LA MICROBIOLOGIE DES BIOFILMS

LA MICROBIOLOGIE DES BIOFILMS DÉTERMINE LEUR RÉSISTANCE HYDRAULIQUE

Plusieurs facteurs influencent la résistance hydraulique des biofilms formés sur les membranes:

- la composition de l'eau à traiter [11],
- les conditions opératoires telles que la pression transmembranaire [12] et plus particulièrement,

- la composition des communautés microbiennes se développant au sein des biofilms [13, 14].

La communauté microbienne du biofilm affecte sa structure physique à l'échelle de quelques microns à quelques millimètres, et donc sa résistance hydraulique. La formation de biofilms ayant une structure homogène et compacte se traduit par un flux de perméat relativement faible d'environ $5 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ [14]. À l'inverse, la formation de biofilms poreux et hétérogènes se traduit par des valeurs de flux de perméat plus élevées allant jusqu'à $20 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ [14].

La formation de biofilms hautement perméables résulte de la présence d'eucaryotes, en particulier des métazoaires. La prédation par les métazoaires a été identifiée comme un mécanisme clé qui augmente la perméabilité du biofilm [13]. En moyenne, la prédation par les nématodes et les oligochètes engendre une augmentation du flux de perméat de l'ordre de 100% par rapport aux valeurs mesurées en l'absence de prédation (*fig. 3*). Les nématodes et les oligochètes créent des biofilms plus perméables en raison de leur action de «pâturage», de leur motilité et de la construction de micro-habitats. Ainsi, la résistance hydraulique du biofilm n'est pas seulement liée à son épaisseur moyenne mais aussi à son hétérogénéité locale [15]. Après avoir mis en évidence l'influence des métazoaires sur le flux de perméat, nous avons émis l'hypothèse que ce type de micro-organismes pourrait être utilisé pour moduler la résistance hydraulique des biofilms.

Dans une nouvelle phase expérimentale, nous avons tenté d'enrichir des biofilms bactériens avec l'oligochète *Aelosoma hemprichi* et le nématode *Plectus aquatilis* [16]. Nous avons observé une augmentation du flux de 50% suite à l'ajout d'oligochètes (*Aelosoma hemprichi*) et jusqu'à plus de 150% suite à l'ajout de nématodes (*Plectus aquatilis*). Ces résultats démontrent que la présence d'eucaryotes peut être manipulée afin d'ajuster la résistance hydraulique du biofilm.

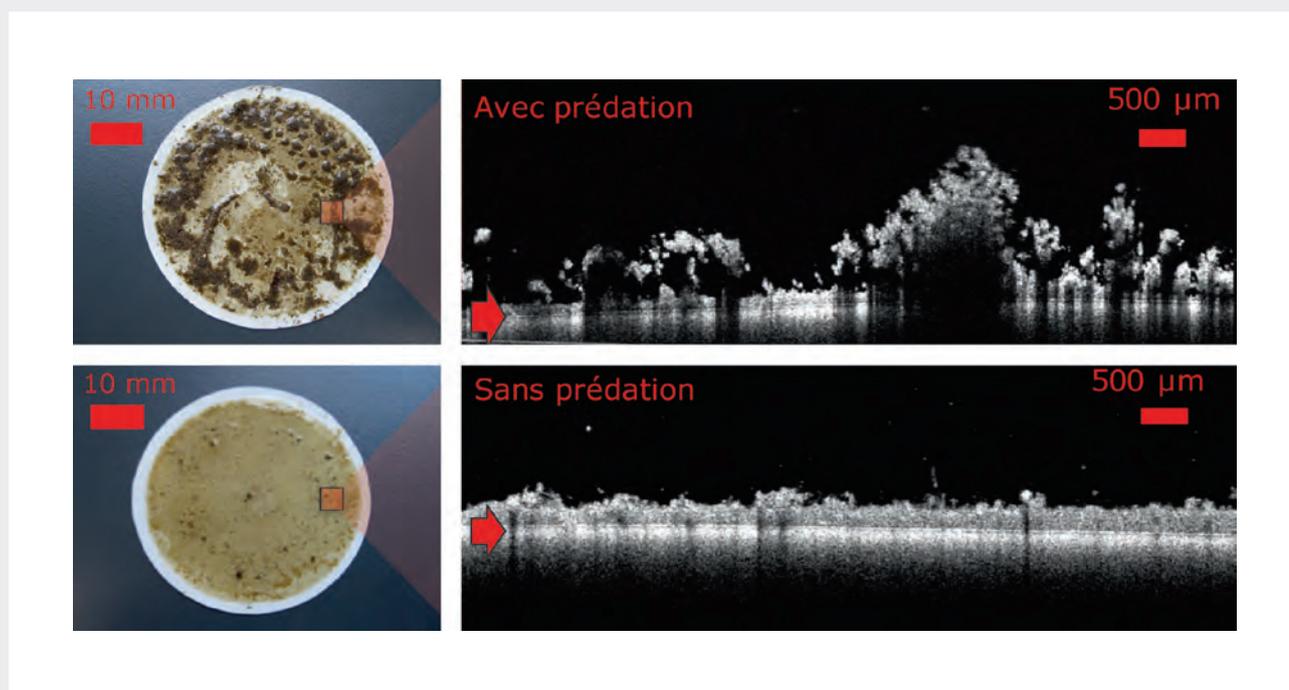


Fig. 3 Effet de la prédation par des eucaryotes sur la structure des biofilms développés à la surface d'une membrane d'ultrafiltration.

Einfluss der Prädation durch Eukaryonten (z. B. Metazoen) auf die Biofilmstruktur (oben: mit Eukaryonten, unten: ohne Eukaryonten).

LES FONCTIONS MICROBIENNES DU BIOFILMS AMÉLIORENT LA QUALITÉ DU PERMÉAT

Lors de la filtration membranaire classique, la rétention de composés par la membrane seule (vierge ou nettoyée) est principalement gouvernée par un processus physique: l'exclusion de taille. Ainsi, les composés de taille supérieure à la taille de pore de la membrane sont retenus alors les composés de taille inférieure la traversent. La rétention de composés est plus grande pour les systèmes composites biofilm-membrane grâce à la combinaison de processus biologiques et physiques. L'utilisation de systèmes composites biofilm-membrane permet en effet d'augmenter la rétention:

- du carbone organique assimilable (AOC) [4],
- de toxines microbiennes telles que les cyanotoxines [17, 18],
- de polymères organiques comme par exemple les polysaccharides [19].

Augmentation de la stabilité microbienne du perméat

Le carbone organique assimilable est un indicateur de la stabilité microbienne d'une eau, c'est-à-dire une mesure du risque de croissance bactérienne. Plus la concentration en carbone organique assimilable est faible, plus le risque de croissance bactérienne est limité. En règle générale, une quantité importante de carbone organique assimilable passe à travers les membranes, entraînant ainsi un risque important de développement de bactéries pathogènes dans l'eau filtrée [20]. La perméation du carbone organique assimilable à travers les membranes de filtration est généralement assez élevée: de l'ordre de 80-100% pour des membranes d'ultrafiltration [4], de 5-90% pour des membranes de nanofiltration [21] et même de 80% pour certaines membranes d'osmose inverse [22].

Contrairement aux systèmes basés sur des membranes seules, la rétention du carbone organique assimilable par des composites biofilm-membrane est gouvernée à la fois par des processus biologiques et physiques. Une élimination du carbone organique assimilable de plus de 80% a ainsi été mesurée lors de la filtration d'eaux de rivière avec un système composite biofilm-membrane [4]. Une partie du carbone organique assimilable est utilisée par les bactéries se développant au sein du biofilm pour leur croissance, réduisant ainsi la concentration de ces composés dans le perméat. La présence de biofilms sur les membranes est donc particulièrement pertinente pour dégrader de petites molécules facilement biodégradables qui ne sont pas retenues par les membranes seules. La présence d'un biofilm à la surface de la membrane permet donc d'améliorer la qualité du perméat en réduisant le risque de croissance microbienne dans l'eau filtrée. Cependant, l'accumulation de matières organiques dans le système de filtration et leur hydrolyse peut entraîner un faible relargage de carbone organique assimilable. Cette observation suggère qu'un drainage intermittent pourrait être nécessaire afin de réduire la présence de matières organiques (et donc indirectement leur hydrolyse) et d'assurer une bonne qualité de perméat.

Dégradation de toxines microbiennes

Les communautés microbiennes se développant au sein du biofilm aident également à dégrader des toxines microbiennes, en particulier les métabolites cyanobactériens appelés microcystines [17, 18]. En effet, les microcystines ne sont pas retenues par les membranes seules. Lorsqu'elle se développe en présence

de microcystines, la communauté microbienne du biofilm membranaire s'enrichit en bactéries capables d'utiliser ces toxines comme source de carbone. Différentes bactéries aérobies (e.g., *Variovorax paradoxus*) et anaérobies (*Aeromonas hydrophila*) sont ainsi capables de dégrader des microcystines [18]. L'adaptation de la communauté microbienne des biofilms membranaires permet une élimination complète des microcystines. Après l'établissement d'une communauté microbienne adaptée, une concentration en toxine inférieure à la limite recommandée ($1 \mu\text{g l}^{-1}$ selon les directives de l'Organisation mondiale de la santé) a été mesurée dans le perméat de systèmes composites biofilm-membrane. À l'inverse, ces mêmes microcystines ne sont pas du tout retenues par des membranes seules du fait de leur faible poids moléculaire et se retrouvent ainsi en forte concentration dans l'eau filtrée. De même que pour les observations faites pour le carbone organique assimilable, les biofilms membranaires contribuent également à augmenter la qualité du perméat grâce à la dégradation de toxines microbiennes.

Dégradation de polymères et protection de la membrane du colmatage irréversible

Les biofilms membranaires agissent comme une première barrière biologique et protègent la membrane de l'adsorption de composés responsables du colmatage irréversible, tels que les polysaccharides [19]. La communauté microbienne qui se développe à l'intérieur des biofilms est capable de dégrader complètement les polysaccharides de faible poids moléculaire (plus petits que la taille des pores de la membrane). La dégradation des polysaccharides par la communauté microbienne du biofilm protège la membrane de leur adsorption sur les parois des pores et donc du colmatage irréversible. La communauté microbienne permet également de retenir/hydrolyser/dégrader les polysaccharides ayant un large poids moléculaire (c'est-à-dire plus gros que la taille des pores de la membrane). L'hydrolyse/dégradation des polysaccharides de large poids moléculaire protège cette fois la membrane contre le blocage des pores. Là encore, nous démontrons que les biofilms membranaires ont un rôle positif car ils agissent comme une couche protectrice contre les molécules responsables du colmatage irréversible de la membrane.

ÉLARGIR LE CONCEPT À TOUS LES SYSTÈMES MEMBRANAIRES?

Les avantages liés à la formation de biofilms à la surface de membranes, et plus généralement au colmatage d'origine biologique, ne se limitent pas uniquement aux systèmes membranaires décentralisés ou de petite taille. En effet, les avantages du colmatage d'origine biologique sur le rejet de divers solutés ont également été observés pour des bioréacteurs à membrane (BaM) installés au sein de stations de traitement des effluents pollués de grandes tailles. Pour les BaMs, réduire le contrôle du colmatage d'origine biologique augmente la résistance hydraulique, mais contribue également à augmenter le rejet d'antibiotiques tels que l'ampicilline [23] ou de virus modèles tels que les phages MS2 [24]. Dans les BaMs anaérobies, un contrôle réduit du colmatage d'origine biologique aide également à réduire la perméation du méthane à travers la membrane et finalement les rejets dans l'atmosphère [25]. Si le colmatage d'origine biologique augmente les capacités de rejet des systèmes membranaires, son contrôle doit être effectué avec prudence. Un équi-

libre adéquat entre la réduction du flux de perméat, la réduction des demandes énergétiques/chimiques et l'amélioration de la qualité du perméat doit notamment être identifié.

CONCLUSIONS

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'article:

- Tolérer la formation de biofilms à la surface des membranes de filtration, en utilisant des systèmes composites biofilm-membrane, présente de nombreux avantages par rapport à l'utilisation de systèmes basés sur des membranes seules.
- La microbiologie des biofilms développés à la surface des membranes permet de faire fonctionner les systèmes à flux constant sur de longues périodes (plusieurs mois/années), et ce sans maintenance.
- Les fonctions microbiennes des biofilms membranaires permettent d'augmenter la qualité du perméat grâce à la dégradation de divers composés organiques (e.g., carbone organique assimilable, polymères responsables du colmatage, toxines microbiennes).
- Tirer avantage des communautés microbiennes qui se développent à la surface des membranes représente une approche pertinente pour une large gamme de systèmes membranaires: centralisés et décentralisés, appliqués à la production d'eau potable, au recyclage des eaux grises ou au traitement des eaux usées municipales.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Flemming, H.-C. (2011): *Microbial Biofouling: Unsolved Problems, Insufficient Approaches, and Possible Solutions*. In: *Biofilm Highlights*, Springer Series on Biofilm, 5. eds.

[2] van Loosdrecht, M. C. M. et al. (2012): *New approaches to characterizing and understanding biofouling of spiral wound membrane systems*. *Water Science and Technology* 66: 88–94

[3] Dreszer, C. et al. (2014): *In-situ biofilm characterization in membrane systems using Optical Coherence Tomography: Formation, structure, detachment and impact of flux change*. *Water Research* 67: 243–254

[4] Derlon, N. et al. (2014): *Presence of biofilms on ultrafiltration membrane surfaces increases the quality of permeate produced during ultra-low pressure gravity-driven membrane filtration*. *Water Research* 60: 164–173

[5] Crittenden, J. C. et al. (2012): *MWH's Water Treatment: Principles and Design. Third Edition*, John Wiley & Sons, Inc.: I–XVIII

[6] Judd, S. (2011): *The MBR Book (Second Edition)*. Oxford, Butterworth-Heinemann

[7] Peter-Varbanets, M. et al. (2010): *Stabilization of flux during dead-end ultra-low pressure ultrafiltration*. *Water Research* 44: 3607–3616

[8] Larsen, T. A. et al. (2015): *Blue Diversion: a new approach to sanitation in informal settlements*. *Journal of Water, sanitation and Hygiene for Development* 5: 65–71

[9] Dreszer, C. (2014): *Hydraulic Resistance of Biofilms in Membrane Filtration Systems*. PhD Thesis, Universität Duisburg-Essen

[10] Field, R. W. et al. (1995): *Critical Flux Concept for Microfiltration Fouling*. *Journal of Membrane Science* 100: 259–272

[11] Desmond, P. et al. (2018): *Linking composition of extracellular polymeric substances (EPS) to the physical structure and hydraulic resistance of membrane biofilms*. *Water Research* 132: 211–221

[12] Derlon, N. et al. (2016): *The composition and compression of biofilms developed on ultrafiltration membranes determine hydraulic biofilm resistance*. *Water Research* 102: 63–72

[13] Derlon, N. et al. (2013): *Activity of metazoa governs biofilm structure formation and enhances permeate flux during Gravity-Driven Membrane (GDM) filtration*. *Water Research* 47: 2085–2095

[14] Derlon, N. et al. (2012): *Predation influences the structure of biofilm developed on ultrafiltration membranes*. *Water Research* 46: 3323–3333

[15] Martin, K. J. et al. (2014): *Effect of fouling layer spatial distribution on permeate flux: A theoretical and experimental study*. *Journal of Membrane Science* 471: 130–137

[16] Klein, T. et al. (2016): *Biological control of biofilms on membranes by metazoans*. *Water Research* 88: 20–29

[17] Kohler, E. et al. (2014): *Biodegradation of Microcystins during Gravity-Driven Membrane (GDM) Ultrafiltration*. *Plos One* 9(11): <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111794>

[18] Silva, M. O. D. et al. (2017): *Priming of microbial microcystin degradation in biomass-fed gravity driven membrane filtration biofilms*. *Systematic and Applied Microbiology*: 10.1016/j.syapm.2017.11.009

[19] Chomiak, A. et al. (2015): *Biofilm increases permeate quality by organic carbon degradation in low pressure ultrafiltration*. *Water Research* 85: 512–520

[20] Prest, E. et al. (2016): *Biological stability of drinking water: controlling factors, methods and challenges*. *Frontiers in Microbiology* 7: 45

[21] Liikanen, R.; Miettinen, I.; Laukkanen, R. (2003): *Selection of NF membrane to improve quality of chemically treated surface water*. *Water Research* 37: 864–872

[22] Park, S.K.; Hu, J. Y. (2010): *Assessment of the extent of bacterial growth in reverse osmosis system for improving drinking water quality*. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 45: 968–977

[23] Shen, L. et al. (2014): *Positive impact of biofilm on reducing the permeation of ampicillin through membrane for membrane bioreactor*. *Chemosphere* 97: 34–39

[24] Lu, R. Q.; Mosiman, D.; Nguyen, T.H. (2013): *Mechanisms of MS2 Bacteriophage Removal by Fouled Ultrafiltration Membrane Subjected to Different Cleaning Methods*. *Environmental Science & Technology* 47: 13422–13429

[25] Smith, A. L.; Skerlos, S. J.; Raskin, L. (2015): *Membrane biofilm development improves COD removal in anaerobic membrane bioreactor wastewater treatment*. *Microbial Biotechnology* 8: 883–894

> FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

Toxine) abzubauen. Der Biologische Abbau von organischen Stoffen führt zu einer signifikanten Verbesserung der Permeatqualität (verringertes Risiko von mikrobiellem Wachstum, Abwesenheit von mikrobiellen Toxinen). Das große Potenzial von gekoppelten Biofilm-Membran Systemen wurde zuerst in sehr einfachen Systemen eingesetzt (z.B. Haushaltsfilter für Trinkwasser), die hauptsächlich in Entwicklungsländern verwendet werden. Es gibt aber Potenzial für andere Anwendungsgebiete (z.B. Grauwasseraufbereitung) und auch für die konventionelle Trinkwasseraufbereitung in kleinen Anlagen in der Schweiz.