

# Filtration membranaire: solution d'avenir pour la potabilisation des eaux karstiques

**La filtration membranaire ouvre de nouvelles perspectives financièrement avantageuses pour la potabilisation des eaux de sources dans les régions karstiques. La mise à l'essai de différents procédés de filtration sur membrane pour le traitement des eaux karstiques à forte densité colloïdale montre que tous ces procédés permettent d'obtenir de l'eau potable de qualité irréprochable. Il faut toutefois tenir compte des processus de colmatage qui limitent le champ d'application et la durée de vie des membranes. Parmi les procédés examinés, l'ultrafiltration, avec adjonction si nécessaire de poudre de charbon actif, s'est révélée adéquate pour la potabilisation de l'eau.**

## Sources karstiques: sources de problème

Dans les régions karstiques, la potabilisation des eaux de source pose plusieurs problèmes d'ordre quantitatif et qualitatif. A cet égard, le Jura est un exemple typique: nombreuses sont les petites communes dont l'approvisionnement en eau est menacé par la pollution des eaux brutes. Cette pollution est d'origine naturelle (colloïdes, sulfate) ou d'origine anthropique (lixiviats, agriculture). Les principaux problèmes de qualité sont les suivants: turbidité, teneur bactérienne élevée, parasites, défauts organoleptiques, teneur élevée en nitrate et en ammonium, concentrations (localement) élevées en chlorohydrocarbures ou en pesticides. La plupart des paramètres caractérisant l'eau de source dépendent des conditions météorologiques, de sorte que leurs variations peuvent être aussi imprévisibles que considérables.

L'eau potable devant répondre à des critères de qualité bien définis, l'eau brute passe par une filière de traitement complexe, dont les différents paliers sont les suivants: floculation, filtration, ozonation, filtration sur charbon actif, protection du réseau. A cet égard, la filtration membranaire offre des perspectives intéressantes puisqu'elle permet de simplifier considérablement le traitement de l'eau. Cette technologie se développe à une vitesse fulgurante et est encore peu répandue dans le secteur du traitement de l'eau. Ses avantages tant techniques qu'économiques

contribueront sans aucun doute à sa généralisation dans ce secteur.

## Les membranes au banc d'essai

Les expériences effectuées jusqu'à présent montrent que l'efficacité de la filtration membranaire est étroitement dépendante de la qualité de l'eau brute. En général non pertinents, certains paramètres qualitatifs tels que granulométrie des particules en suspension, nanométrie des matières organiques dissoutes, concentration des sels dissous, etc. deviennent décisifs pour le comportement longue durée des membranes. L'exploitation d'une installation pilote sur place pendant au moins une année est nécessaire pour évaluer la performance et la rentabilité des différentes solutions à l'échelle industrielle.

Il s'agit de comparer les caractéristiques hydrauliques et qualitatives de la microfiltration, de l'ultrafiltration et de la nanofiltration. A cet effet, trois installations pilotes

de marques différentes ont été testées pendant deux ans dans la commune de Cornol (JU), forte de quelque 800 habitants (cf. tableau 1). Ces essais étaient en particulier conçus pour analyser le colmatage des membranes.

## Modes d'exploitation

Comme son nom l'indique, la filtration membranaire fonctionne à l'aide d'une membrane. Les autres éléments de l'installation sont la préfiltration, la pompe de surpression, le bassin de perméat et la pompe de lavage à contre-courant.

Les impuretés sont retenues et concentrées par la membrane. Lorsque le perméat est produit sans lavage à contre-courant, on parle de filtration directe. Dans ce cas, il se forme peu à peu une couche de matériau particulière à la surface de la membrane, de sorte qu'il faut augmenter proportionnellement la pression transmembranaire. Cette couche particulière ne peut être réduite que par lavage à contre-courant.

Une autre solution consiste à faire recirculer plusieurs fois le concentré particulière avec l'eau brute à travers le module de filtrage. Cette recirculation génère des courants tangentiels assez forts à la surface de la membrane, de sorte qu'une grande partie des particules restent en suspension, ralentissant ainsi le colmatage de la membrane. On parle ici de filtration à flux croisé. Ce mode d'exploitation permet d'utiliser les membranes soit plus longtemps, soit pour des eaux brutes plus chargées. Même régulier, le lavage à contre-courant ne permet

### Microfiltration, ultrafiltration et nanofiltration

Plus les pores d'une membrane sont petites,

- plus les particules retenues sont petites,
- plus le débit membranaire est petit (flux membranaire),
- plus la pression transmembranaire doit être élevée (consommation d'énergie).

La **microfiltration** (pores d'env. 0,2 µm) sert à filtrer les particules en suspension et permet d'obtenir une eau exempte de tout germe bactérien.

L'**ultrafiltration** (pores d'env. 0,01 µm) sert à éliminer les microparticules en suspension, de même que les virus et les molécules organiques de grande taille.

La **nanofiltration** (pores d'env. 0,001 µm) convient à l'élimination des sels minéraux (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>), des anions indésirables (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et des molécules organiques plus petites. L'eau brute ne doit toutefois contenir aucune phase particulière.

pas d'éviter totalement la baisse du débit membranaire ni l'augmentation correspondante de la pression transmembranaire. De temps à autre, il faut donc opérer un lavage chimique de la membrane, en utilisant des détergents, des oxydants et autres produits chimiques pour rétablir le débit membranaire d'origine.

Enfin, la microfiltration et l'ultrafiltration peuvent être précédées de l'adjonction de poudre de charbon actif dans l'arrivée d'eau brute. D'abord adsorbées par le charbon actif, les microparticules organiques sont ensuite retenues avec la poudre de charbon par la membrane.

## Performances de filtration

Les performances de filtration sont consignées dans le tableau 2. On voit que la microfiltration et l'ultrafiltration se distinguent essentiellement au niveau des particules extrêmement petites, telles que les virus par exemple. Beaucoup plus compliquée, la nanofiltration est surtout efficace pour éliminer les sels minéraux, le sulfate, le nitrate et les microparticules organiques. L'adjonction de charbon actif en poudre permet d'améliorer considérablement les performances de la microfiltration et de l'ultrafiltration, notamment en ce qui concerne les matières organiques dissoutes.

## Les crêtes de turbidité favorisent le colmatage des membranes

Qu'il soit rapide ou lent, le colmatage de la membrane peut résulter de différents processus. Tant que le lavage à contre-courant permet de rétablir le niveau du débit membranaire initial et, partant, la pression transmembranaire initiale, l'exploitation peut être considérée comme normale. Mais si, en dépit des nettoyages chimiques, la performance de la membrane baisse, il faut s'attendre à des dérangements et à un abrègement de la durée de vie de la membrane. Pour minimiser le colmatage à long terme, on peut prétraiter l'eau brute, modifier le processus de lavage à contre-courant ou baisser le débit membranaire.

Tant la microfiltration que l'ultrafiltration réagissent négativement aux crêtes de turbidité caractéristiques de l'eau de source. L'augmentation rapide de la turbidité de <1 FTU (Formazin Turbidity Unit) à plus de 150 FTU en moins de quelques heures a provoqué une augmentation subite de la pression transmembranaire, et ce, pour les deux types d'installation. Le colmatage des membranes n'a pas pu être évité en dépit de l'intensification des lavages.

	Microfiltration Memtec	Ultrafiltration Aquasource	Nanofiltration Filmtech Dow
Type de membrane	Polypropylène	Dérivé cellulosique	Polyamide
Pores [µm]	0,2	0,01	≈ 0,001 (200 Dalton)
Type de module	Module capillaire	Module capillaire	Module en spirale
Pression de service [bar]	1–3	1–3	8–9
Flux d'eau pure [l/m <sup>2</sup> ·h]	300	240	40

Tab. 1  
Caractéristiques des membranes testées.

	Microfiltration	Ultrafiltration avec CAP*	Nanofiltration	
Turbidité	97–100%	97–100%	–	
Bactéries	100%	100%	100%	100%
Virus	2–3 log	>7 log	>7 log	>7 log
COD	12%	12%	40%	90%
Trichloroéthylène	0%	0%	75%	90%
Perchloroéthylène	0%	0%	80%	90%
Atrazine	0%	0%	98%	90%
Calcium	0%	0%	0%	95%
Sulfate	0%	0%	0%	99%
Nitrate	0%	0%	0%	35%

log = réduction en fonction du nombre d'unités logarithmiques

Tab. 2  
Filtration de divers composants présents dans l'eau au moyen de différents procédés membranaires.

Mode d'exploitation	Microfiltration		Ultrafiltration		Nanofiltration (après microfiltration)
	Filtration directe	Recirculation à flux croisé	Filtration directe	Recirculation à flux croisé	Recirculation à flux croisé
Flux initial (eau pure)	300	–	240–	–	40
Turbidité basse (<10 FTU)	125	85	120–140 110 (+CAP*)	90	33
Turbidité moyenne (10–60 FTU)	80	75 (+CAP*)	–	75 90 (+CAP*)	–
Turbidité élevée (>60 FTU)	60	–	–	60	–
Problèmes d'exploitation	Colmatage dû aux colloïdes		Colmatage dû aux matières organiques		Prétraitement et régulation du pH nécessaire

\* CAP = adjonction de charbon actif en poudre, diamètre env. 15 µm

Tab. 3  
Débit du perméat en l/(m<sup>2</sup>·h) dans différentes conditions d'exploitation (20 °C).

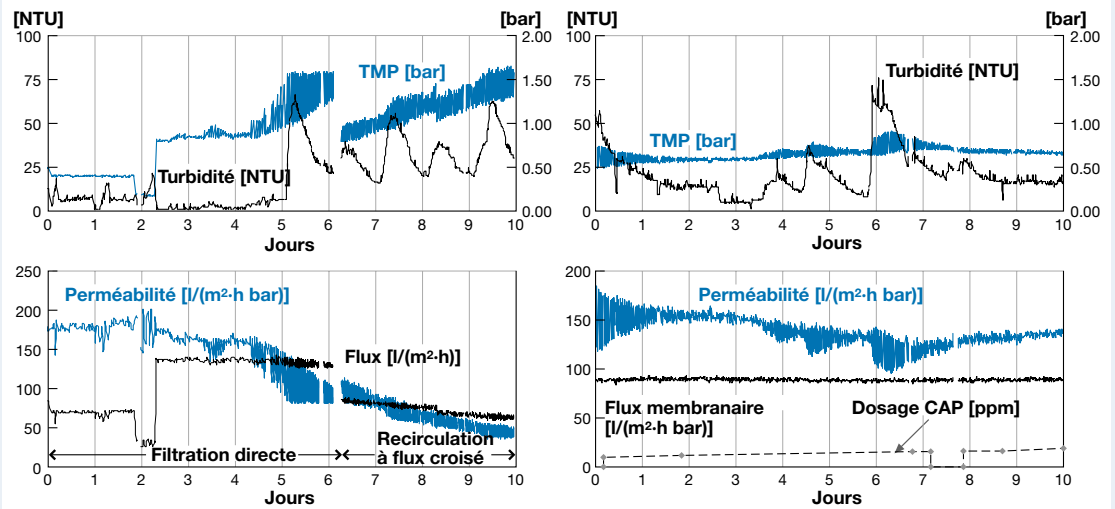
## Colmatage: causes diverses

En y regardant de plus près, on voit que le processus de colmatage ne résulte pas du même mécanisme dans le cas de la microfiltration et dans celui de l'ultrafiltration. Selon les analyses de la phase particulaire durant les crêtes de turbidité, une partie non négligeable des particules ont un diamètre inférieur à 0,2 µm, soit un diamètre inférieur à celui des pores de la membrane de microfiltration. Ces particules s'introduisent donc dans le microfiltre et y restent en partie accrochées. Au fil du temps, ce phénomène de colmatage se développe de manière irréversible. Plus le nombre de crêtes de turbidité est élevé, plus le phénomène de colmatage s'accroît. Même les lavages chimiques ne permettent pas de restaurer

complètement les performances de la membrane.

Dans le cas de l'ultrafiltration, les pores de la membrane ont un diamètre de 0,01 µm et retiennent par conséquent même les particules les plus fines du côté concentré. Selon les mesures effectuées durant les crêtes de turbidité, la concentration de matières organiques naturelles en solution (et notamment du carbone organique dissous, COD) augmente en parallèle à l'augmentation de la turbidité. Lors d'études préliminaires, l'ultrafiltration ne présente aucune perte de performance jusqu'à 1500 mg de substance sèche par litre (SS/l) (soit environ 900 FTU), pour autant que l'eau soit pratiquement exempte de COD. Lors des essais *in situ* toutefois, le colmatage des membranes

**Fig. 1**  
Evolution de la pression différentielle transmembranaire et des débits spécifiques de perméat dans le cas de l'ultrafiltration, durant une période où de fortes crêtes de turbidité se sont succédées à un rythme rapide; à gauche: maîtrise de l'exploitation en adaptant le flux membranaire et la recirculation à flux croisé; à droite: réduction du colmatage par adjonction préalable de charbon actif en poudre.



ultrafiltrantes s'est déclaré dès que les crêtes de turbidité ont dépassé 60 FTU. De toute évidence, le COD joue un rôle capital dans le fonctionnement de l'ultrafiltration. La fig. 1 (à gauche) illustre le comportement typique d'une membrane d'ultrafiltration pendant une série de crêtes de turbidité. La courbe du débit membranaire montre que le passage de la filtration directe à la filtration à flux croisés ainsi que la diminution du débit d'arrivée ont permis de maintenir l'exploitation de la membrane (lavage toutes les 30 minutes).

L'adjonction de charbon actif en poudre en amont de la filtration sur membrane s'est révélée particulièrement avantageuse, en particulier dans le cas de l'ultrafiltration. Le charbon actif adsorbe en effet une partie du carbone organique dissous (COD) et d'autres micropolluants organiques tels que trichloroéthylène, perchloroéthylène et atrazine. De la sorte, on obtient non seulement un meilleur débit, mais aussi un meilleur filtrage (fig. 1, à droite).

### Nanofiltration: prétraitement nécessaire

Les essais de nanofiltration ont clairement démontré qu'un prétraitement suffisant (par microfiltration ou, encore mieux, par ultrafiltration) est la seule solution pour garantir l'exploitation normale du nanofiltre. Dans le cas de la nanofiltration, les pores des membranes ont un diamètre d'environ 0,001 µm (soit 200 Dalton). Celles-ci réagissent dès lors à toutes les sortes de microparticules les plus infimes. Même la turbidité quasiment impossible à mettre en évidence dans le perméat de la microfiltration préalable pendant les crêtes de turbidité suffit pour provoquer le colmatage du nanofiltre. Afin de réduire ce colmatage, imputable aux colloïdes et aux produits de précipitation, il

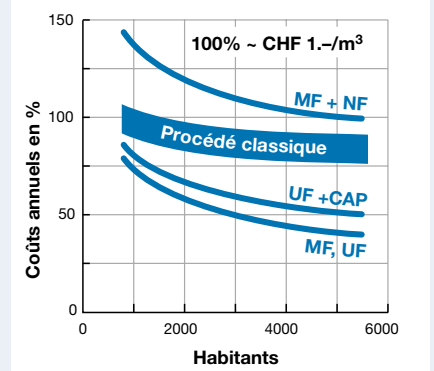
a fallu abaisser artificiellement le pH par adjonction d'agents chimiques.

### Solution pour la potabilisation des eaux karstiques

La fig. 2 illustre les coûts annuels estimés pour les petits distributeurs d'eau, en fonction de la population approvisionnée. Ces estimations sont entachées d'une certaine incertitude parce qu'il n'existe en Suisse encore aucun point de comparaison concernant les installations industrielles de filtration.

Pour que la filtration membranaire atteigne des résultats satisfaisants, il faut soigneusement analyser dans chaque cas en particulier les options technologiques, les performances nécessaires et la rentabilité des installations. De manière générale, on peut dire que la filtration membranaire est concurrentielle par rapport à d'autres procédés classiques lorsque le traitement de l'eau s'avère complexe. Toutefois, il faut ici aussi soigneusement analyser le problème des coûts en tenant compte de l'incertitude subsistant quant à la durée de vie des membranes.

Les essais menés à l'échelle semi-industrielle dans le Jura, région karstique par excellence, ont démontré que les eaux de sources de qualité instable peuvent malgré tout être potabilisées grâce à la technologie des membranes. Les problèmes de colmatage qui se sont manifestés exigent une adaptation dynamique et précise des flux membranaires et des autres paramètres d'exploitation en fonction de l'évolution de la qualité des eaux de source. L'ultrafiltration, éventuellement combinée avec l'adjonction préalable de charbon actif en poudre, s'est révélée être la solution la plus efficace, tant au niveau technologique que financier.



**Fig. 2**  
Technique de traitement classique et techniques de filtration membranaire: dégression des coûts en comparaison.  
MF = microfiltration  
UF = ultrafiltration  
CAP = charbon actif en poudre  
NF = nanofiltration



**Markus Boller**  
Ingénieur, chercheur spécialisé dans le domaine de l'épuration des eaux et de la production d'eau potable. Travaille actuellement dans le domaine de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux de pluie; professeur titulaire, chargé de cours sur l'approvisionnement en eau potable et la technologie de l'eau à l'EPFZ, chef du processus «Gestion des eaux urbaines» à l'EAWAG.

**Coauteurs:** Roberto Pianta (ingénieur, élabore des projets de recherche dans le domaine de la production d'eau potable, notamment concernant les techniques de filtration membranaire dans le cadre du processus «Gestion des eaux urbaines» à l'EAWAG).

- [1] Pianta, R., Boller, M., Janex, M.L., Chappaz, A., Birou, B., Ponce, R., Walther, J.L. (1998) – Micro- and ultrafiltration of karstic spring water, *Desalination* 117, 61–71.  
[2] Boller, M. (1998) – Membranverfahren: Bereit für den grosstechnischen Einsatz, *Kommunalmagazin* 7/8, 23–28.

Le projet «Filtration membranaire pour la potabilisation de l'eau» a été mené de concert avec le Bureau d'ingénieurs RWB à Porrentruy, VA TECH WABAG AG à Winterthur et la Lyonnaise des Eaux (CIRSEE) à Paris. Il a bénéficié du soutien financier de l'OFEFP, des cantons JU, BE, BL, BS, SO et de la SSIGE.