

L'adsorption est bien observée dans le cas spécifique de la filtration de protéines avec trois étapes successives contribuant à la chute de débit de filtration :

- polarisation de concentration pendant les premières minutes,
- encrassement par adsorption et dépôt,
- dépôt convectif d'éléments insolubles [27], [33], [34].

La lutte contre l'encrassement, la diminution de la polarisation sont abordées par différentes voies :

- l'étude de la répartition des vitesses dans des canaux de différentes géométries permet d'optimiser le fonctionnement dynamique des membranes et de retarder les phénomènes de polarisation de concentration [35],
- la lutte contre l'encrassement protéique des membranes de polysulfone s'obtient par prétraitement de la surface par des polymères surfactants (cationiques, anioniques ou non ioniques) [36],
- les expériences sur des solutions de composés organiques non ioniques de différents poids moléculaires, sur un module d'ultrafiltration équipé de membranes en acétate de cellulose ou de polysulfamide, testent le taux de rejet en fonction de la pression et du composé étudié [37],
- le suivi du colmatage de différentes membranes par les protéines, qui intègre les effets de variations de pH [14],
- la modélisation de l'encrassement en fonction de la taille des particules et des valeurs de potentiel zéta [38],
- la revue bibliographique des données expérimentales et des études théoriques réalisées sur le colmatage des membranes d'ultrafiltration et d'osmose inverse. Le colmatage est dû principalement : aux polarisations de concentration, à la formation de gel, à la précipitation des sels et des particules colloïdales et à la formation d'une couche constituée de molécules à bas ou haut poids moléculaire. Le fouling biologique, c'est-à-dire le colmatage provoqué par l'encrassement des membranes par la biomasse, ne doit pas être oublié. Il se développe dans les pores de la membrane et l'empoisonne progressivement en utilisant le constituant comme milieu de culture [39].

Les moyens de prévention et d'élimination du colmatage s'exercent dans le choix des paramètres de fonctionnement [2], [40] :

- pression de fonctionnement faible,
- vitesse de circulation élevée,
- taux de conversion limitée,
- température,
- mise en pression de l'installation une fois la vitesse nominale atteinte,
- choix des contraintes telles : pression constante, débit variable ou pression variable, débit constant...

Le schéma 12 donne les évolutions des débits d'eau brute et d'eau filtrée en fonction du temps lorsque l'on applique la technique du flux pulsé pour prévenir le colmatage [10].

Seule la couche de gel formée par concentration de polarisation est normalement réversible. Le colmatage physique ou chimique nécessitera des moyens appropriés de nettoyage pour restituer à la membrane ses qualités filtrantes.

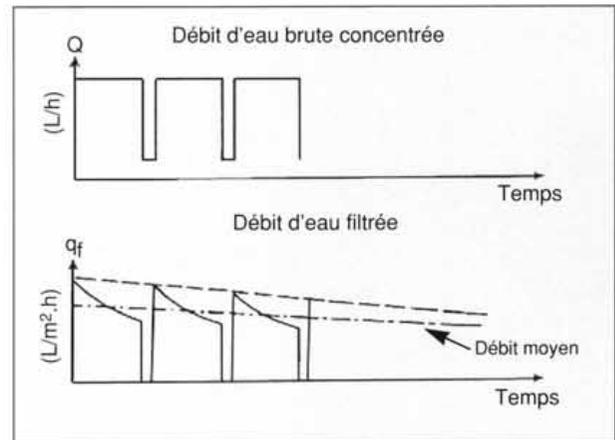


Schéma 12 : Variation des flux de concentrat et de perméat sous un procédé à flux pulsé - d'après [10]

Lorsque le débit de perméat diminue, on peut éliminer certains dépôts par nettoyage à contre-courant (back flush) en appliquant une contre-pression sur la membrane. On emploie pour cette opération une fraction du perméat que l'on dirige à travers la membrane vers le concentrat. L'efficacité de cette technique dépend du type de dépôt, de la fréquence et de l'amplitude des impulsions de la pression appliquée à contre-courant. Cette procédure est utilisée à condition qu'une bonne liaison mécanique existe entre la membrane et son support. Les modes de rétrolavage font l'objet de brevets déposés. Les Australiens ont ainsi mis au point un mode de rétrolavage original à l'air (cf. Ch 3).

Des modes de nettoyages physiques ou chimiques sont développés et optimisés. Les nettoyages chimiques sont presque toujours nécessaires. On lie la fréquence des traitements chimiques à une perte de charge maximale, à une perte de débit du perméat de 20 à 25 % du débit nominal, ou encore on l'asservit à un programme prédéterminé. Ils doivent dissoudre les dépôts sans détériorer les membranes :

- les solutions acides permettent d'éliminer les dépôts d'hydroxyde ou les dépôts carbonatés,
- les solutions basiques traitent les matières organiques,
- les détergents s'appliquent contre les dépôts de protéines et de matières organiques,
- le chlore (dans la mesure où les membranes le supportent) s'emploie dans la lutte contre les dépôts biologiques bactériens [41], [42].

On recherchera aussi, dans de nombreuses applications, à prétraiter l'eau admise dans les modules avec des coagulants, par exemple ou du charbon actif (voir le chapitre eau potable), pour limiter les dépôts et incrustations et accroître dans certains cas le flux de perméation.

Les besoins de recherche dans le domaine sont soulignés dans un rapport du Comité AWWA sur les technologies membranaires. L'amélioration des connaissances sur la constitution des dépôts et sur le transport des colloïdes dans les membranes est souhaitée. Une meilleure compréhension du rôle de la taille et de la charge électrique des particules lors des variations de débit de perméat semble aussi nécessaire, couplée avec l'étude des interactions probables aux interfaces. Le rôle des colloïdes, mais aussi des matières organiques dans les phénomènes de fouling doit être précisé. Des inhibiteurs de dépôt peuvent rendre des services notables en prévention du colmatage [40].

Les technologies à membrane ont désormais leur place dans la palette de techniques à la disposition du producteur d'eau potable.

Le recours à leur emploi est lié à plusieurs facteurs :

- l'évolution d'une législation de plus en plus sévère sur la qualité de l'eau destinée à la consommation,
- une demande croissante accompagnée dans le même temps d'une diminution du nombre de ressources classiquement potabilisables par les techniques de traitement conventionnel,
- la progression technologique qui rend aujourd'hui ces procédés concurrentiels dans certains cas de figure,
- l'absence de sous produits dans l'eau traitée puisqu'aucun réactif chimique n'est nécessaire pendant la production d'eau potable. Cette technique est en effet basée exclusivement sur une filtration physique de l'eau,
- la facilité d'automatiser les unités de traitement.

Avec les membranes, et dans certaines circonstances, nous disposons de techniques de substitution aux filières classiques de traitement d'eau et non plus additives comme cela fut le cas pour les avancées technologiques des deux dernières décennies avec l'ozonation ou la filtration sur charbon actif en grain par exemple.

La compacité des unités de traitement par membrane est enfin un atout non négligeable selon les contextes.

1) Performances des techniques membranaires

En se référant aux rapports nationaux sur la technologie des membranes, remis par 11 pays (Allemagne, Australie, Espagne, Etats-Unis, France, Inde, Japon, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Suède) à l'Association Interna-

tionale des Distributeurs d'Eau, dressons un inventaire de la situation mondiale :

- C'est l'Osmose Inverse (OI) qui a pour l'instant la meilleure implantation mondiale avec les procédés de dessalement de l'eau de mer (31 % du marché, 2 100 unités installées, 4 millions m³/j). Cette technique se trouve en concurrence avec les procédés à distillation (60 % du marché) et d'électrodialyse (ED) (5 %, 678 000 m³/j). Cependant les projets en cours, en dessalement, s'orientent de plus en plus vers l'OI. Des développements nouveaux se dessinent pour ce type de technique dans l'élimination des matières organiques, des nitrates et des pesticides, la réduction de la concentration des sulfates et des fluorures, encore que la nanofiltration soit, dans certains de ces domaines, tout aussi performante.
- La Nanofiltration (NF) est en effet employée essentiellement en adoucissement mais possède aussi des propriétés intéressantes pour éliminer couleur, précurseurs de THM, pesticides et les ions bivalents en général. Des applications pratiques se retrouvent aux Etats-Unis mais aussi en France au niveau industriel à Méry-sur-Oise.
- L'Ultrafiltration (UF) peut contribuer à l'élimination des matières organiques dissoutes à condition d'utiliser des membranes avec des seuils de coupure bas. Ce procédé est surtout utilisé pour l'élimination des matières particulaires et des micro-organismes mais tend à montrer bien d'autres capacités lorsqu'il est associé à d'autres techniques. La France, dans cette technologie, fait figure de pionnière puisque bon nombre d'usines utilisant ce procédé sont déjà installées.
- La Microfiltration (MF) se trouve aussi compétitive par rapport à l'ultrafiltration sur le plan de la clarification et de l'abattement des microorganismes même si les implantations sont, à ce jour, moins nombreuses en France.

Les recherches actuelles sur ces technologies portent plus particulièrement sur les méthodes de décolmatage dont le but est de diminuer les pertes en eau en cours d'exploita-

tion, d'accroître les durées de vie des membranes, et d'amoindrir les coûts d'entretien.

Le strippage à l'air des matières organiques volatiles grâce à des membranes ou par le biais d'un gel sur membrane ou encore à l'aide de membranes liquides est aussi un domaine de recherche. L'élimination des nitrates sur bioréacteur à membrane semble enfin être un autre débouché d'avenir.

1-1 Clarification et élimination des microorganismes [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53]

Le long d'une chaîne de traitement conventionnel l'élimination des matières en suspension et des micro-organismes s'effectue d'une part et en grande partie dans l'étape de clarification, et d'autre part en sortie de station avec la désinfection.

La filière classique coagulation-décantation-filtration délivre une eau de turbidité convenable par rapport à la norme de qualité mais la rétention des micro-organismes est souvent incomplète. Cette absence de fiabilité, notamment lorsqu'on accroît le débit de production, oblige à compléter la chaîne par un procédé de désinfection finale ; la technique de chloration qui met en oeuvre un agent chimique présente une efficacité faible sur les kystes de protozoaires (cryptosporidium notamment) ; la chloration et l'ozonation conduisent, en cas de préoxydation, à former des sous-produits tels que des chloramines et haloformes d'une part, aldéhydes et cétones d'autre part. La désinfection par UV est inefficace lorsque la turbidité de l'eau vient à s'accroître [43].

Dans tous les cas, la variabilité de la qualité de l'eau brute a souvent une incidence sur la qualité de l'eau produite.

Les techniques de microfiltration et d'ultrafiltration sont une alternative à ces procédés classiques notamment dans les cas où l'eau à traiter présente, en conditions normales, une faible concentration en matière organique (COT de l'ordre de 1 à 2 mg/l) et une turbidité de quelques NTU s'élevant, pendant les épisodes pluvieux, à plus de 10 mg/l pour le COT et au-delà de 100 NTU (cas des eaux superficielles de bonne qualité et des eaux souterraines d'origine karstique notamment). Cette dégradation de la qualité de l'eau brute est alors souvent accompagnée d'une pollution bactérienne.

Lorsque la qualité de l'eau brute évolue,

la qualité de l'eau traitée par ces membranes reste constante, exempte de ces particules en suspension et de la quasi-totalité de ces germes.

L'abattement du carbone organique par ces procédés accroît par ailleurs l'efficacité de la désinfection par les bactéricides (par exemple le chlore) en évitant la formation de composés secondaires moins actifs (par exemple les chloramines).

1.1.1 Performances de l'ultrafiltration

Les premières études ont été engagées aux Etats-Unis où les services d'eau ont pour obligation de démontrer l'efficacité de leur système de désinfection et de filtration avec un abattement d'un facteur 10 000 pour les virus et un abattement d'un facteur 1 000 pour les *Giardia* (kyste de protozoaire) ; l'intérêt pour l'ultrafiltration et la microfiltration est donc renforcé.

Les premières études ont été menées sur quatre types d'eaux de surface, deux de Californie du Nord de qualités très différentes et deux autres de Boise dans l'Idaho [44], [45].

Pour ces études, les membranes utilisées sont des fibres creuses, à base de dérivés celluloseux, avec un pouvoir de coupure d'environ 100 000 Daltons. L'eau brute avait néanmoins subi une préfiltration préalable de 200 µm avant d'être envoyée dans le module sous pression de 0,4 à 1 bar. Dans tous les cas, les coliformes totaux et thermotolérants ne sont jamais détectés dans le perméat.

Des études similaires ont été poursuivies sur des eaux souterraines de Philadelphie et ont donné les mêmes résultats [46], [47].

Plus récemment en France, un suivi régulier de la qualité de l'eau à la sortie d'une station conventionnelle, et d'unité d'ultrafiltration traitant directement la même eau a été réalisé sur une eau de surface, l'eau de Seine. Les résultats montrent que l'ultrafiltration assure une élimination complète des bactéries ensemençées de type *Pseudomonas Diminuta* (plus petite bactérie connue), des Coliformes et des Streptocoques, des kystes de *Giardia* et *Cryptosporidium*, et des virus du type Coliphage et phage de *Shigella*, les quantités respectives dans l'eau brute avant traitement étaient de $2 \cdot 10^6$ /l dans l'eau brute inoculée par *Pseudomonas*, 10^5 /100 ml et 10^4 /100 ml respectivement, pour les indicateurs de pollution fécale, quelques dizaines/l pour les kystes, de l'ordre de 100/l et 400 à 600/l pour les phages [43].

Par contre, ces mêmes germes sont parfois mis en évidence à la sortie de la filière conventionnelle (cas des germes témoins de pollution fécale et des phages) constituée successivement d'une préozonation, d'une coagulation-décantation, d'une filtration sur sable puis d'un affinage par ozone-filtration sur charbon actif en grain [Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5].

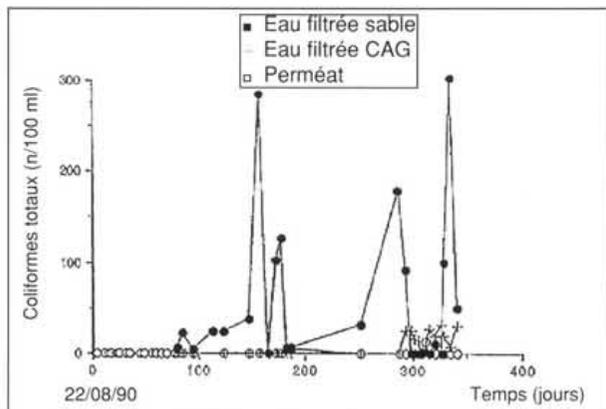


Figure 1 : Dénombrement des coliformes totaux. Comparaison ultrafiltration/traitements conventionnels - d'après [43].

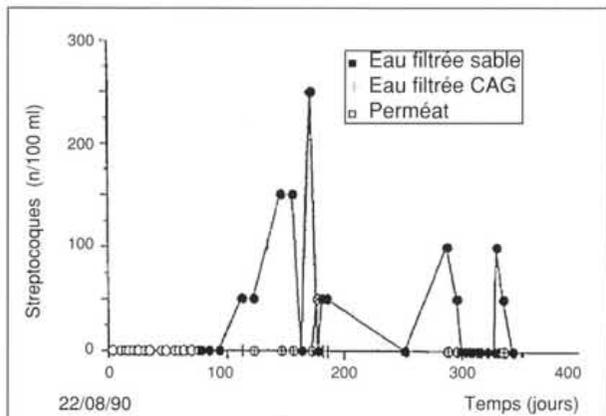


Figure 2 : Dénombrement des streptocoques fécaux. Comparaison ultrafiltration/traitements conventionnels - d'après [43].

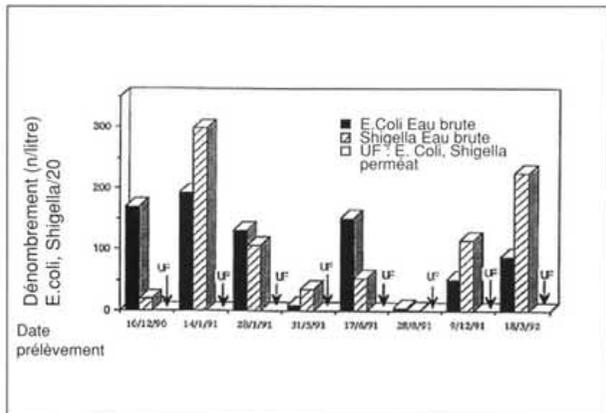


Figure 3 : Dénombrement des phages d'Escherichia Coli et de Shigella dans l'eau de Seine brute et le perméat d'après [43].

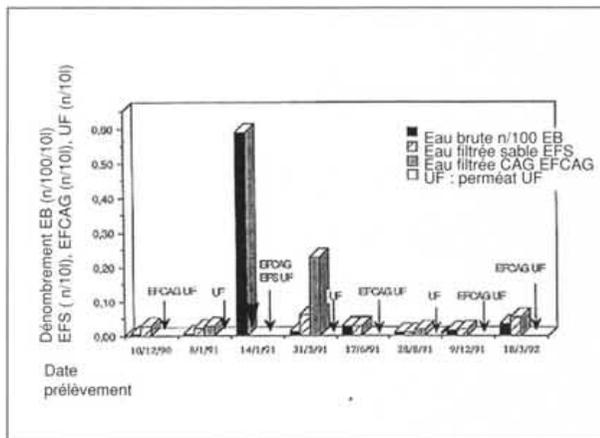


Figure 4 : Dénombrement d'entérovirus dans l'eau de Seine brute et traitée. Comparaison ultrafiltration/traitements conventionnels - d'après [43].

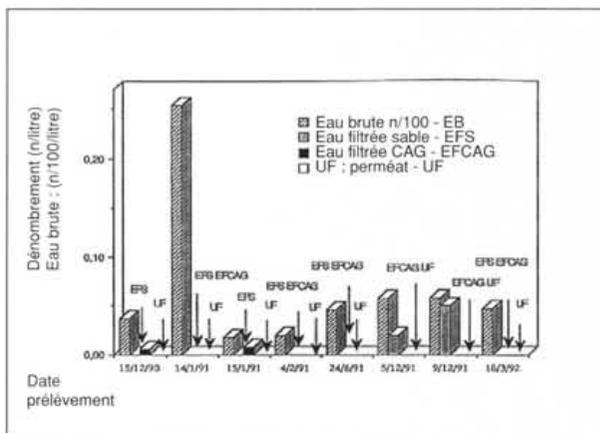


Figure 5 : Dénombrement de kystes de Giardia dans l'eau de Seine brute et traitée. Comparaison ultrafiltration/traitements conventionnels - d'après [43].

Des essais ont aussi été réalisés pour comparer une filière de coagulation sur sable et l'ultrafiltration sur une eau d'origine karstique, les résultats sont comparables sur les germes témoins puisqu'ils ne sont jamais détectés après ultrafiltration contrairement à la filière de coagulation. Dans chaque cas, la membrane utilisée (LED) a un seuil de coupure de 0,01 μm [43].

D'un point de vue clarification, la qualité des eaux produites par les premières usines de potabilisation par ultrafiltration installées à Amoncourt (160 m^3/jour) et Douchy (1 200 m^3/jour) dans des zones karstiques reste toujours inférieure à 0,2 NTU notamment pendant les épisodes pluvieux (200 NTU et 40 NTU respectivement) (Fig. 6 page 20). Par ailleurs, les membranes arrêtent totalement coliformes et streptocoques (suivi sur un an en 1989) [48].

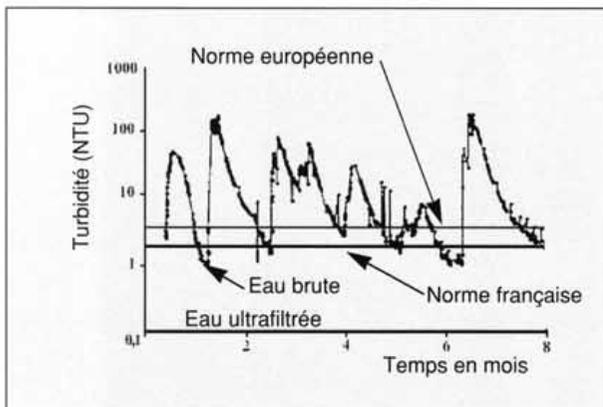


Figure 6 : Evolution de la turbidité de l'eau brute et du perméat à Amoncourt - d'après [48].

L'agrément délivré par le ministère de la Santé pour la membrane LED et le procédé AQUASOURCE mis en oeuvre sur le terrain démontre par ailleurs que ce système de potabilisation est susceptible d'être utilisé en France [49].

1.1.2 Performances de la microfiltration

OTV, filiale du groupe Générale des Eaux, avait le premier installé à Saint-Maurice-les-Châteauneuf une unité de microfiltration fonctionnant avec des membranes minérales d'une porosité moyenne de 0,2 μm , pour produire un débit de 100 m^3/h . L'eau brute d'origine karstique a une turbidité qui atteint 50 à 100 NTU pendant les épisodes pluvieux et l'usine fournit, pendant cette période qui dure 20 à 40 jours par an, une eau filtrée de 0,2 à 0,3 NTU. Notons que l'eau brute est coagulée au WAC avant d'être microfiltrée [50].

Installée en 1990 par IMECA, la station du Bosc fonctionne avec des membranes de microfiltration en céramique du type KERA-SEP™ de 0,2 μm de porosité. Aujourd'hui distribuées par TECH-SEP, montées en modules tubulaires, ces membranes traitent une eau de surface de bonne qualité (lac du Salagou dans l'Hérault). Les coliformes sont totalement éliminés, tandis que les germes totaux subsistent après traitement à une concentration de 2 à 5 par millilitre (après 24 h à 37° C ou 72 h à 22° C). La turbidité atteinte après filtration est inférieure à 0,5 NTU pour 3,5 NTU de turbidité initiale et l'oxydabilité au permanganate est diminuée de moitié (1,5 mg/l à 0,8 mg/l) [51].

Fin 1993, HYDREX, filiale d'OTV, a mis en place à Bernay-ouest, sur la résurgence d'un aquifère crayeux d'origine karstique, une usine de microfiltration équipée de

membranes MEMCOR en polypropylène de 0,2 micron de porosité.

L'abattement de la turbidité qui atteint des pointes de 300 à 700 NTU, est supérieur à 99 % et les coliformes, streptocoques et clostridiens sont totalement éliminés [52].

L'abattement des virus n'a pas été mis en évidence. A ce niveau, différentes études menées aux Etats-Unis montrent cependant que l'élimination de bactériophages par des membranes de microfiltration de même type est à la hauteur de 2 à 3 Unités Log (UL) même si elle n'est pas totale [53].

1.2 Elimination du fer, du manganèse et de l'aluminium [51] [52] [54] [55] [56] [57] [58]

Deux installations pilotes ont été mises en oeuvre sur le site de Maisons-Laffite pour traiter l'eau d'un forage présentant une teneur en fer au-dessus des limites pour l'eau potable (0,33 mg/l alors que la concentration maximale admissible est de 0,2 mg/l). Un pilote est équipé de membranes UF Romicon de diamètre de pores 0,003 μm , en forme de fibres creuses, l'autre est équipé de membranes minérales Membralox SCT de diamètre de pores 0,2 μm (MF) ou 0,05 μm (UF). Cette eau souterraine contenant du fer dissous et pauvre en oxygène est d'abord aérée pour précipiter le fer sous forme d'hydroxyde de fer, qui sera ensuite retenu par les membranes.

Ces deux pilotes ont produit de l'eau conforme aux critères de potabilité, en effet la rétention du fer est totale, et le perméat est exempt de micro-organismes [54], [55].

Les différences se révèlent au niveau :

- du colmatage : la membrane minérale (MF) se décolmate moins bien que l'organique (UF) ou la minérale (UF),
- de la consommation énergétique par m^3 d'eau produite : 0,2 kWh pour les membranes minérales et 0,1 kWh pour la membrane organique. Cette dernière nécessite une préfiltration à 100 μm et sa faible perméabilité initiale implique pour un débit donné une surface membranaire quatre fois plus élevée.

Des tests comparables ont été menés sur l'eau de Seine avec quatre membranes organiques différentes : une membrane de microfiltration de porosité 0,2 μm , et trois d'ultrafiltration dont les seuils de coupure sont respectivement 0,1 μm , 50 000 D et 13 000 D. Toutes ces membranes sont à fibres creuses.

Pour des concentrations en fer de l'eau de Seine comprises entre 110 et 1 650 µg/l, et en aluminium de l'ordre de 150 à 1 200 µg/l, les concentrations en fer et en aluminium de l'eau filtrée par les différentes membranes sont inférieures ou très proches de la limite de détection [56].

Cette rétention totale, confirmée aussi à St-Maurice-les-Chateaufort (42) et à Bernay (14) sur des membranes de microfiltration minérale et organique respectivement, est liée à la présence de ces composés sous forme particulaire [52], [57].

Ces expériences ont parallèlement montré que la membrane de microfiltration est quatre fois plus perméable que la membrane d'ultrafiltration de 0,1µm, la plus performante après 65 heures de fonctionnement, ce qui implique une surface membranaire nécessaire pour traiter un débit donné quatre fois moindre pour les membranes de microfiltration comparée à celle des membranes d'ultrafiltration.

A Stonehaugh (Grande-Bretagne), une préoxydation du fer et du manganèse présents dans une eau souterraine à la concentration de 3 mg/l et 0,35 mg/l respectivement, est réalisée par aération. La concentration de l'oxygène est ainsi proche de la saturation. Puis on injecte du permanganate de potassium, et on réalise une clarification et l'élimination des germes par membranes d'ultrafiltration. Les performances sont de moins de 0,02 mg/l pour le fer et pour le manganèse après traitement [58].

A Charcenne, on réalise une déferrisation par aspersion et facultativement une démanaganisation au KMnO4 puis une ultrafiltration. Le Fer atteint en effet une concentration de 0,59 mg/l et le Manganèse de 0,42 mg/l.

L'aération, seule, suffit à ce jour pour oxyder ces deux éléments dissous, ensuite retenus sur la membrane [58].

Les membranes céramiques KERASEP™ de porosité 1µm ont aussi été testées sur une eau souterraine ferrugineuse à 0,3 mg/l de concentration en Fer. L'eau préalablement aérée puis microfiltrée est recueillie à une concentration en Fer inférieure à 0,01 mg/l. L'intérêt de cette membrane dans ce cas repose sur le débit de filtration de près de 1 200 l/h/m2 sous 2 bars et sur le coût de production réduit [51].

1-3 Elimination des matières organiques dissoutes d'origine naturelle et des micro-

polluants organiques : résultats des recherches pilotes [50] [53] [55] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73]

Si les techniques membranaires sont plus utilisées aujourd'hui pour clarifier et éliminer les micro-organismes des eaux, il reste que leurs capacités ne s'arrêtent pas là.

Mises en oeuvre directement sur des eaux brutes de faible turbidité ou clarifiées préalablement, associées à d'autres traitements comme la coagulation-floculation, l'oxydation ou l'adsorption sur charbon actif en poudre, elles sont un outil de choix parfois inégalable pour l'élimination de molécules de faible poids moléculaire comme les précurseurs de THM, les composés organiques à l'origine de la couleur, du goût et des odeurs, et les pesticides.

Encore une fois, c'est la qualité initiale de l'eau brute et la concentration en carbone organique total qui seront déterminantes pour le choix de la technique membranaire à adopter.

Les performances des membranes dépendent de leur porosité ou de leur seuil de coupure et il s'avère que pour éliminer significativement les composés organiques de faible masse moléculaire, une porosité minimale de 0,01 µm (équivalent à un seuil de 100 000 Daltons) est nécessaire. Au-delà de cette taille de pores, une association avec d'autres techniques conventionnelles est possible mais au détriment le plus souvent des coûts d'investissement et d'exploitation.

Utilisées seules, la microfiltration (jusqu'à 0,2 µm) et l'ultrafiltration (avec une porosité de 0,1 à 0,01 µm) éliminent par exemple moins de 40 % du carbone organique total et 30 % des précurseurs de THM pour des eaux faiblement chargées en matières organiques. L'abattement des pesticides est par ailleurs quasiment inexistant si ces deux procédés ne sont pas associés à d'autres techniques [53].

Les procédés de traitement par membranes qui ont été testés directement sur des eaux chargées en matières organiques, ce qui est typiquement le cas des eaux superficielles plus exposées aux pollutions diverses, sont [53] [59] [60] [61] [62] [63] :

- la microfiltration associée à l'oxydation + coagulation + charbon actif en poudre (CAP),
- l'ultrafiltration (100 kD) associée au CAP ou à l'oxydation + CAP, technique aussi préconisée pour des eaux faiblement chargées, contaminées par des micropolluants,

- l'ultrafiltration à seuil de coupure bas de l'ordre de 600 à 800 Daltons, utilisée directement sur l'eau brute.

Dans les filières de traitement classiques, après les étapes de clarification-décantation-filtration, l'ultrafiltration associée au CAP ou la nanofiltration ont aussi donné de bons résultats en traitement d'affinage [53], [64], [65].

1.3.1 Oxydation + coagulation + CAP + MF

Pour la microfiltration, on a montré que seule cette combinaison était efficace pour éliminer la plus grande partie des matières organiques dissoutes quelles qu'elles soient (précurseurs THM, couleur, molécules à l'origine de goûts et odeurs, pesticides,...), tout en conservant des performances hydrauliques acceptables (300 l/h/m² sous 2 à 3 bars).

Associée à la MF, la coagulation avec du sulfate d'aluminium ou du chlorure ferrique, n'élimine que de l'ordre de 30 % des matières organiques dissoutes ; l'ozonation, si elle est associée, produit des dérivés qui ne sont pas retenus par la membrane ; le charbon actif en poudre peut pour sa part conduire dans certains cas à des difficultés au moment du nettoyage (colmatage de la membrane dans l'épaisseur). Notons, sur ce point, que le charbon actif en poudre n'améliore pas les caractéristiques hydrauliques et qualitatives du procédé par rapport à une combinaison oxydation + coagulation + MF [55].

1.3.2 CAP + UF ou oxydation + CAP + UF

Des trois types de membranes d'ultrafiltration testés par le CIRSEE, la membrane cellulosique est la plus performante par rapport aux membranes en polysulfone ou en polyacrylonitrile (qui sont hydrophobes) notamment, parce que les flux de filtration restent beaucoup plus élevés, pour une consommation énergétique plus basse ; les régénérations chimiques sont aussi moins fréquentes.

La coagulation associée à l'UF colmate rapidement les membranes cellulosiques, ce qui nécessite des lavages plus fréquents. Elle donne dans la plupart des cas étudiés des rendements inférieurs au CAP + UF vis-à-vis de l'abattement des matières organiques dissoutes ou des PFTHM (potentiel de formation des THM après 72 H de temps de contact avec excès de chlore) [53].

L'efficacité de la combinaison oxydation + CAP + UF est surtout reconnue pour son pouvoir d'élimination des goûts et odeurs (Fig. 7), il faudra néanmoins éviter une ozonation poussée qui délivrerait dans l'eau des composés organiques biodégradables faiblement retenus par le charbon actif. Aucun effet positif n'a été cependant constaté sur les performances hydrauliques [59].

Le charbon actif en poudre associé à l'UF a été testé en amont de Paris à Vigneux (COT de l'ordre de 3 mg/l) et en aval à Suresnes (COT de l'ordre de 4 mg/l).

Cette eau présente une concentration potable en PFTHM et pesticides (jusqu'à 2 µg/l en Atrazine).

Une préozonation de 1 g/m³ à 2 g/m³, une concentration en CAP de 20 mg/l en amont de Paris et 40 mg/l en aval conduisent après ultrafiltration à une élimination totale des pesticides et à 50 à 70 % du COT [64].

En plus des avantages sur le plan de la qualité, le charbon actif en poudre diminue le colmatage de la membrane, donc limite la fréquence de nettoyage et accroît son efficacité du fait de la consistance du "gâteau" à la surface de la peau de la membrane. On peut alors soutenir des flux de filtration plus élevés que ceux développés sans charbon actif.

1.3.3 L'ultrafiltration "basse" (500 D à 800 D)

Son intérêt réside surtout dans l'abattement de la couleur (Fig. 7). Son pouvoir de coupure vis-à-vis des pesticides de faible masse moléculaire (atrazine par exemple) est faible et de 30 à 40 % pour le COT et les matières à l'origine des goûts ou des odeurs, et variable sur les PFTHM de 40 à 70 %

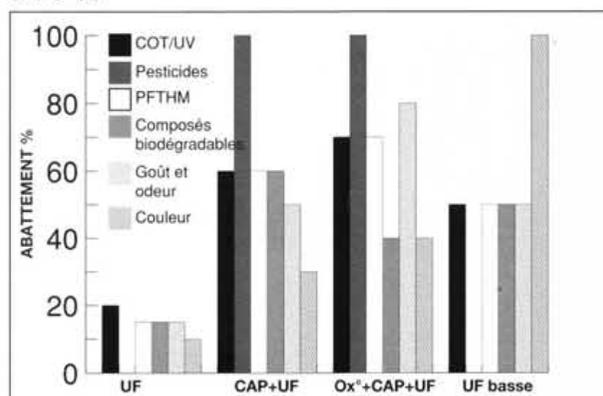


Figure 7 : Traitement d'eaux brutes superficielles - Elimination de matières organiques par ultrafiltration- d'après [53].

Elle peut être utilisée directement sur les eaux brutes sans autres traitements mais avec un flux de perméation très faible de l'ordre de 10 l/h/m².

Sur certains lacs canadiens dont la couleur atteint 60 mg/l Pt-Co, un COT de 8 mg/l et une turbidité de 1 NTU, une ultrafiltration basse (500 à 800 D) a été installée. L'abattement de la couleur est de 95 %, et les PFTHM de 80 %, la salinité parallèlement est diminuée seulement de 10 %, ce qui ne force pas à la reminéralisation (à laquelle on aurait été contraint avec la nanofiltration) [53].

1.3.4 UF ou NF associée aux filières classiques de traitement

Les techniques évoquées en 1.3.1, 1.3.2 et 1.3.3 mises en oeuvre directement sur l'eau brute sont en général beaucoup plus chères que les techniques conventionnelles.

L'ultrafiltration (à 100 kD) associée au CAP et la nanofiltration (à 300 D) sont ainsi testées en traitement d'affinage après les filières classiques de traitement (coagulation, floculation, décantation, filtration) pour éliminer COT, PFTHM, pesticides, composés responsables des goûts et des odeurs et les bactéries et virus qui subsisteraient après la clarification classique [65], [66], [67]. Une désinfection par le chlore est néanmoins toujours

maintenue après les procédés membranaires pour conserver un effet rémanent bactéricide dans le réseau.

Les avantages des procédés membranaires sont alors :

- une qualité exceptionnelle de l'eau traitée qui est constante comparativement au traitement conventionnel (ozonation + filtration sur charbon actif en grain) qui relargue parfois des résidus organiques dans l'eau traitée,
- l'élimination de l'ammoniaque qui traverse occasionnellement les filtres à sable,
- le fonctionnement à des débits importants,
- la possibilité de mettre en oeuvre la nanofiltration sans risque de colmatage conséquent puisque l'eau est quasiment exempte de particules.

La figure 8 montre les résultats obtenus sur l'eau de Seine à l'échelle pilote.

A Méry-sur-Oise, après avoir testé un pilote de nanofiltration de 5 m³/h (avec une membrane NF 70 de Dow Chemical Cie) le Syndicat des Eaux d'Ile de France et la Compagnie Générale des Eaux, son régisseur, ont mis en service un prototype de 2 800 m³/jour pour évaluer ce procédé à l'échelle industrielle [50].

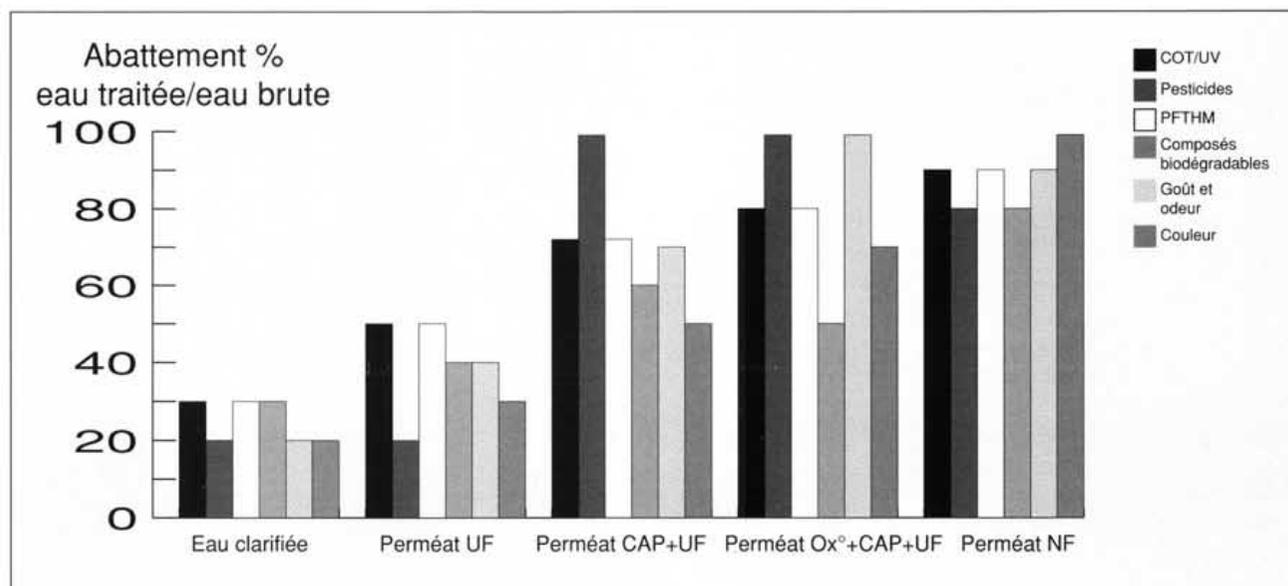


Figure 8 : Traitement d'eaux superficielles clarifiées
Élimination de matières organiques par ultrafiltration et nanofiltration - d'après [53]

L'eau qui alimente le prototype de nanofiltration est issue d'une filière de clarification classique installée sur l'Oise dont l'eau est notablement chargée en matières organiques et pesticides à certaines époques de l'année.

Après acidification et injection d'un séquestrant pour éviter la précipitation de sels dans la membrane, l'eau est préfiltrée à 5 µm et introduite sous 6 à 12 bars (fonction de la température et de l'encrassement de la membrane) dans les modules de nanofiltration [68], [69].

De mars à octobre 1993, l'abattement du COD (Carbone Organique Dissous) approchait les 95 % et le CODB (COD biodégradable) après traitement était proche du seuil de détection sur l'eau traitée ; l'atrazine a été éliminée totalement puisqu'on atteint les seuils de détection analytiques dans le perméat (Fig. 9). De plus, après nanofiltration et chloration, les halométhanes sont indétectables. Une reminéralisation et une aération sont toutefois nécessaires [70].

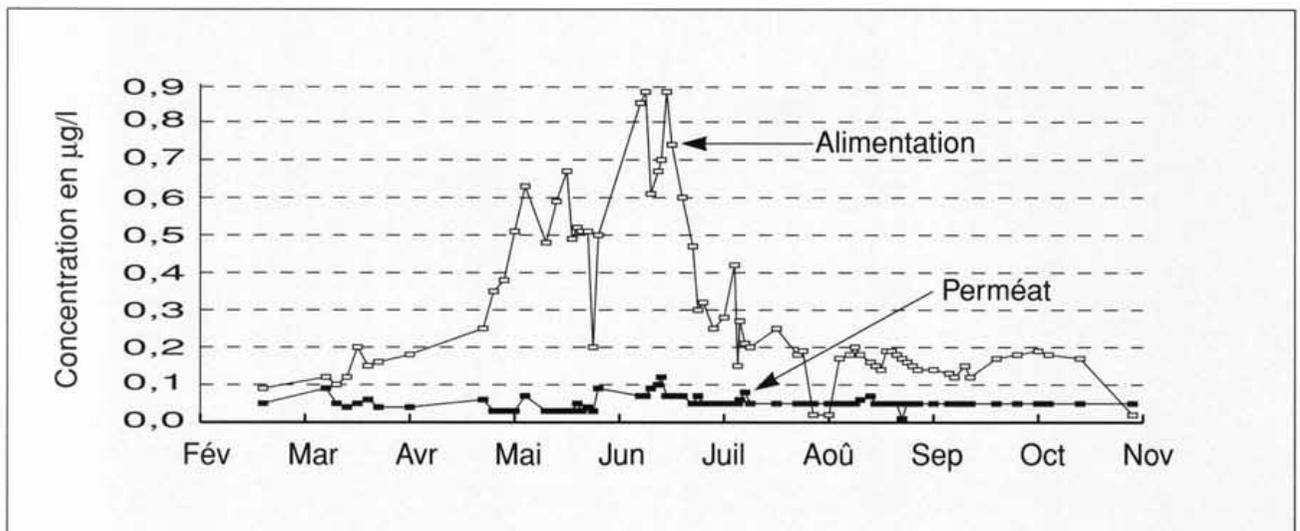


Figure 9 : Evolution de l'atrazine dans l'eau d'alimentation et dans le perméat du prototype de nanofiltration à Méry-sur-Oise - d'après [70]

Le pH d'équilibre à 8 atteint après ces traitements est supérieur au pH de l'eau distribuée habituellement de l'ordre de 7,3, ce qui aura un effet bénéfique sur le plomb en réseau qui se dissout moins à de tels pH.

Sur le réseau d'Auvers-sur-Oise qui est alimenté par cette eau nanofiltrée, on a constaté :

- une diminution des phénomènes de reviviscence bactérienne liée à un abattement de la matière organique biodégradable dans l'eau distribuée,
- une stabilité du taux de chlore tout le long du réseau de distribution avec une demande en chlore en sortie d'usine quasi nulle.

De l'utilisation des techniques membranaires en étape d'affinage, résulte

ainsi un gain en qualité pour l'eau distribuée et pour le réseau proprement dit. Une nouvelle filière de production à l'usine de Méry-sur-Oise (140 000 m³/jour) est en cours d'étude. Elle devrait intégrer un étage de nanofiltration en affinage [71].

Utilisant cette même membrane NF 70, les essais effectués sur l'eau de Seine clarifiée à Vigneux (Amont de Paris) et à Suresnes (Aval de Paris) montrent pareillement que COT, PFTHM et l'absorbance aux UV sont éliminés à hauteur de 90 %, et les herbicides (Atrazine et Simazine) à 80 %. Ces capacités d'abattement sont supérieures à celles obtenues par UF + CAP ou UF basse, testés parallèlement. Des conclusions similaires voire supérieures avaient été obtenues aux USA sur les eaux de surface du Delta de Sacramento et sur la rivière Mokelumne [65].

Les Hollandais du KIWA (organisme de normalisation des Pays-Bas) ont pour leur part testé le pouvoir d'arrêt de quatre membranes différentes vis-à-vis de la simazine, atrazine, diuron, bentazon et dinosébe, à l'échelle du laboratoire avec des concentrations de 3 à 5 µg/l. La membrane Hydranautics PVD1 élimine 90 % des pesticides alors que l'efficacité des 3 autres

(NF 70, TORAY S610, Fluid System 421 P2) est moindre, notamment sur le diuron (40 à 50 %) (Fig. 10). Ces résultats devraient conduire à concevoir une future installation d'une capacité totale de 30 millions de m³/an aux Pays-Bas qui sont confrontés à la présence de ces micropolluants dans leurs eaux souterraines en plus des problèmes de salinité [72], [73].

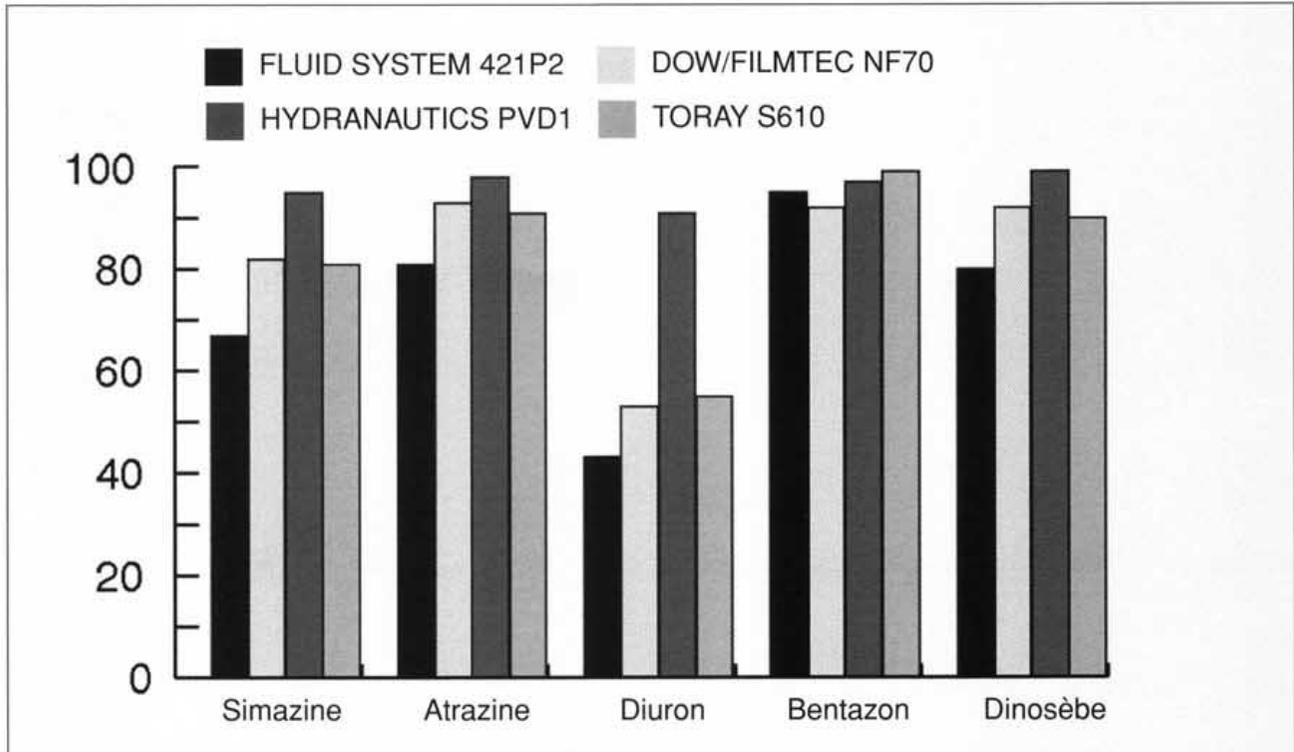


Figure 10 . Pourcentage de pesticides éliminés par membrane de nanofiltration - Taux de conversion 10 % - Concentration en pesticides dans l'eau brute de 3 à 5 µg/l - d'après [72]

1.4 Elimination de la dureté, des sels et des précurseurs de THM [53] [65] [68] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82]

1.4.1 Adoucissement et élimination de certains ions par nanofiltration

Certaines ressources naturelles présentent une dureté et une salinité parfois élevées, et de surcroît se trouvent parfois contaminées par des micropolluants organiques.

Lorsque l'indice de colmatage (IC) est inférieur à 5 et les matières en suspension absentes, par exemple sur des eaux saumâtres souterraines, la nanofiltration peut s'imposer comme une technique de choix pour adoucir ou déminéraliser partiellement l'eau. Nécessitant une préfiltration d'usage à 10 µm, une acidification et l'addition d'un

séquestrant pour éviter la précipitation des sels comme sur le prototype de Méry-sur-oise, une usine d'adoucissement par nanofiltration est aujourd'hui opérationnelle en Floride [53] [68] [74].

Le tableau 5 (page 26) montre ainsi les caractéristiques de l'eau nanofiltrée sur l'usine de Palm Beach d'une capacité de 160 m³/j . On constate que couleur, COT et PFTHM sont éliminés en grande partie et que la salinité est diminuée de plus de 60 %.

On a montré que la nanofiltration est compétitive par rapport à l'osmose inverse pour l'adoucissement ou le dessalement partiel, avec un meilleur taux de conversion que l'osmose inverse (80 à 90 %) (le taux de conversion est défini dans le glossaire en fin de cet ouvrage). Un traitement final pour rééquilibrer le PH de l'eau ainsi produite est néanmoins toujours de rigueur.

	EAU BRUTE SOUTERRAINE	EAU TRAITEE	% REDUCTION
Alcalinité CaCO ₃ mg/l		238	85
Dureté totale CaCO ₃ mg/l	316	24	92
Chlorure mg/l	64	22	65
Sulfates mg/l	20	8	60
Sodium mg/l	54	38	30
Calcium mg/l	114	9	92
Fer mg/l	14	5	64
Résidu sec mg/l	396	134	66
Couleur U. Pt. Co	38	2	95
COT mg/l	15.4	1.5	90
PFTHM mg/l	630	56	91

Tableau 5 : Caractéristiques de l'eau brute et de l'eau nanofiltrée de Palm Beach - d'après [53]

Les essais réalisés à Méry-sur-Oise avaient aussi montré que la nanofiltration est tout à fait adaptée pour abattre la concentration en ions bivalents (près de 70 à 80 % d'abattement pour le calcium et le magnésium, et 90 % pour le sulfate). L'eau a ainsi été adoucie à 5° F pour être ensuite portée à 8° F à la demande du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France. Parallèlement les ions monovalents sont beaucoup moins retenus (20 % pour les chlorures et aucun abattement pour les nitrates). Cette technique semble être préconisée pour potabiliser les eaux d'exhaure de mines (cas des mines de Lorraine chargées en sulfate) et des nappes côtières sous l'influence d'un biseau salé. Dans ce dernier cas, les tests réalisés sur pilote, sur une eau de forage, montrent l'élimination du sodium associé préférentiellement à l'ion bivalent sulfate lui aussi retenu [68].

Ces résultats de déminéralisation partielle sont confirmés au laboratoire sur des eaux de surface très chargées en matières organiques et très minéralisées mais aussi sur l'eau de Seine, toutes deux préalablement ultrafiltrées. Sodium et Chlorure sont alors éliminés à près de 50 % conjointement aux ions bivalents retenus à 85 % (pour le calcium) et 97 % (pour le sulfate). Une reminéralisation de l'ordre de 30 mg/l de CO₂ et 30 mg/l de Ca(OH)₂ est dans ces deux cas nécessaire pour mise à l'équilibre [65].

La capacité des membranes de nanofiltration à séparer sélectivement des espèces anioniques comme les nitrates et les

sulfates a aussi été utilisée en injectant le filtrat nitraté sur une résine échangeuse d'anions (chlorures). On limite avec cette méthode l'épuisement de la résine échangeuse par les sulfates [75].

1.4.2 Elimination des précurseurs de THM par nanofiltration

A l'échelle du laboratoire, il a été démontré que la NF est également efficace dans le contrôle des composés chlorés. Sept membranes ont été testées avec des seuils de coupure compris entre 100 et 40 000 Daltons [76].

Seules celles ayant des seuils inférieurs à 400 Daltons sont efficaces vis-à-vis des précurseurs de THM. C'est-à-dire qu'il faut choisir une membrane de NF, celles d'UF n'étant pas assez performantes dans ce cas. Sélectionnée pour l'expérimentation à long terme, elle travaille sous 6 à 7 bars et permet de diminuer la concentration des précurseurs de THM de 960 µg/l à 43 µg/l pour un débit d'alimentation de l'ordre de 30 l/h/m².

On a confirmé l'efficacité des membranes de nanofiltration, par rapport même à celles d'osmose inverse, pour éliminer les précurseurs de THM. Sur des eaux souterraines fortement chargées en matières organiques, on obtient ainsi un abattement de 400 à 20 µg/l de THM. La couleur est également diminuée de 29 à 1,7 unités [77], [78], [79], [80].

Pour comparer la NF à l'OI, les essais réalisés sur les huit membranes ci-dessous ont consisté à suivre l'abattement du COT, de l'absorbance à 254 nm, de la salinité et du potentiel de formation des THM. D'une façon générale, les membranes étudiées sont toutes capables d'épurer l'eau et de fournir une qualité d'eau potable acceptable mais l'intérêt du choix des membranes NF réside dans les coûts (fonctionnement et investissement) plus bas que pour celles d'osmose inverse [81], [82].

Fabricant ou revendeur	Membranes Nanofiltration	Osmose Inverse
Ionics Ultrapure (Campbell, Californie)	Filmtec NF 40	BW 30
Membrane development (Escardido, Californie)	Filmtec NFT 70	Desal Calp
Hydranautics (Santa Barbara, Californie)	Desal 5	Desal 3 VLP
	New Desal 5	
	NTR - 729 HF	

1.5 Elimination spécifique des produits organiques de synthèse et de certaines espèces minérales [73] [83] [84] [85] [86] [87] [88] [89] [90]

1.5.1 Elimination des pesticides par osmose inverse

Récemment, de nouvelles applications de l'OI apparaissent comme l'élimination des produits organiques synthétiques tels les pesticides [83]. En Allemagne, sur une installation à échelle réduite (débit de perméat 700 ml/mn) comprenant un module Dupont Permasep, et travaillant sous 14 bars, on a éliminé des pesticides à plus de 80 % (tableau 6). On a aussi cherché à obtenir l'abattement des teneurs en lindane et en atrazine sur des membranes à enroulement hélicoïdal sous des pressions de 13 bars. Aux Etats-Unis, des recherches en OI sont aussi poursuivies, les motivations pour disposer de techniques performantes d'élimination de produits organiques de synthèse sont en effet très fortes du fait de CMA très sévères [84], [85], [86].

Pesticide	Elimination en %
Acide-phénoxy carbonique	98-99
DDT	93-96
Metazachlor	93-96
Triazine	91-95
- HCH	85-90
Bromophos-méthyl	84-90
Parathion-éthyl	82-88

Tableau 6 : Elimination de différents pesticides par osmose inverse en % - d'après [87]

Il semble néanmoins que de plus en plus les traiteurs d'eau s'orientent vers la nanofiltration pour l'élimination des pesticides. La Dune Water Supply Company dans le sud de la Hollande (DZH) a engagé, par exemple, des recherches pour étudier les capacités de rétention par nanofiltration vis-à-vis de six pesticides, et l'osmose inverse, pourtant testée, n'a pas été retenue [73].

1.5.2 Elimination des nitrates par osmose inverse

Les pratiques agricoles, les rejets industriels et urbains sont les causes essentielles de la contamination des eaux superficielles et souterraines par les nitrates. Aux Etats-Unis, en Californie du Sud, le "Orange Country Water District" utilise l'osmose inverse pour diminuer la teneur en nitrates d'une eau souterraine tandis qu'aux Pays-Bas, l'élimination des nitrates envisagée par la société de distribution d'eau du Limbourg (WML) sera réalisée par électrodialyse inverse avec des membranes anioniques sélectionnées. Les essais effectués sur des eaux dures sulfatées ou non, avec des concentrations en nitrates de 125 mg/l ont montré que l'osmose inverse (membrane Hydranautics) est moins performante que les procédés d'électrodialyse [73], [88], [89].

1.5.3 Elimination des sulfates et fluorures

En Allemagne, l'installation à Duderstadt d'une usine d'OI a été financée par le Ministère Fédéral de Recherche et de Technologie pour éliminer les sulfates. Des membranes à enroulement hélicoïdal en acétate de cellulose et en fibres creuses de polyamide sont utilisées dans des filières parallèles. Les concentrations de l'effluent (100 à 425 mg/l) sont réduites à moins de 15 mg/l dans le perméat [87].

Les possibilités de l'OI à basse pression pour traiter les fluorures, quelquefois rencontrés à fortes concentrations dans les eaux naturelles, semblent aussi intéressantes [90].

1.6 Les recherches dans les techniques membranaires

[19] [91] [92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100] [101] [102] [103] [104] [105] [106] [107] [108] [109] [110]

1.6-1 Maîtrise du décolmatage

L'encrassement des membranes et les techniques de nettoyage font bien évidemment l'objet de recherches approfondies de façon à :

- limiter le plus possible le colmatage pendant les phases de production d'eau,
- accroître les performances des produits de nettoyage au moment du rétrolavage,
- mieux prévoir l'évolution du colmatage et modéliser l'encrassement en fonction du type d'eau brute.

Les avantages qui pourront être tirés de ces recherches devraient conduire à une augmentation de la durée de vie des membranes et une diminution des coûts d'exploitation en réduisant le nombre de cycle de rétrolavage.

Des modèles prédictifs reliant la rétention des particules et des colloïdes au flux de perméation sont ainsi à l'étude au laboratoire [91], ainsi que la caractérisation des produits de nettoyage et de leur capacité à régénérer plus ou moins totalement la membrane. Dans ce sens, différents bactéricides ont été testés en estimant leur efficacité par rapport à la dégradation du biofilm formé à la surface de la membrane [92], [93], [94].

La recherche d'indices permettant de mieux décrire l'évolution du colmatage et le comportement de la membrane favorisera parallèlement une meilleure exploitation [95].

D'autres laboratoires étudient les techniques électromembranaires qui devraient limiter le colmatage en profondeur des membranes de microfiltration notamment en provoquant la précipitation des substances minérales et la floculation des colloïdes présentes dans l'eau brute [96].

1.6.2 L'élimination des nitrates

1.6.2.1 De nouvelles membranes ?

Aux Pays-Bas, un procédé nouveau est à l'étude pour l'abattement des nitrates, dans le cadre du programme orienté vers l'innovation en matière de membranes. Cette technique, appelée membrane support liquide (MSL) associe l'échange d'ions avec la diffusion à travers une membrane poreuse. Les ions nitrates sont éliminés sélectivement de l'eau d'alimentation par complexation avec des sels ammoniacaux quaternaires fixés sur la membrane poreuse en polypropylène. Les nitrates complexés diffusent ensuite à travers la membrane, jusqu'à leur passage de l'autre côté (strippage). Les nitrates sont ensuite échangés avec des ions chlorures. Le point délicat de cette technologie est le choix du support complexant des nitrates (tétraoctyl ammonium trioctylméthyl). Un gel hydrophobe est également appliqué à la membrane afin de réduire les effets d'instabilité

causés par le relargage des solvants organiques des supports. On forme ainsi un gel liquide. Le stade pilote doit prochainement être réalisé pour une évaluation approfondie de l'application [97].

1.6.2.2 Bioréacteurs à membranes

Les procédés biologiques présentent l'avantage de transformer les nitrates de l'eau en azote gazeux. L'idée de combiner un réacteur biologique et une unité membranaire a déjà été développée pour les eaux usées. En travaillant le couplage bioréacteur (élimination des NO_3^-) et membranes (rétention des microorganismes et des matières organiques dans le réacteur), les recherches engagées montrent que les avantages sont multiples :

- charge volumique en nitrates élevée,
- compacité du procédé,
- excellente qualité de l'eau traitée exempte de matières sèches.

Les expérimentations sur un pilote de 20 litres permettent désormais de dégager les meilleures conditions de fonctionnement pour une membrane Aquasource (Diam. int. 0,93 mm - dérivé acétate de cellulose - 0,01 μm), le bioréacteur étant alimenté en carbone et en phosphore par de l'éthanol et de l'acide phosphorique (dénitrication biologique hétérotrophe) :

Rapport C/N = 1,2

Temps de séjour hydraulique = 30 mn

Débit = 100 l/h.m² de membranes et 75 l/h.m² sous 0,4 bar après 35 jours de fonctionnement

Age des boues = 5 jours

Rapport Biomasse/nitrates éliminés 0,6 kg MV/kg N- NO_3

Activité spécifique de dénitrification : 0,3 kg à 1 kg N- NO_3 /kg MS.j

Concentration en biomasse : 2 g/l en MS

Vitesse optimale tangentielle de circulation : 1,7 m/s.

La concentration en nitrites est toujours restée inférieure à 0,1 mg/l dans l'eau traitée sauf dans de très courtes périodes d'arrêt accidentel du pilote ou lors d'un mauvais fonctionnement de la régulation de pH. Le carbone organique biodégradable dans l'eau traitée est inférieur à la limite de détection.

La teneur en nitrates de l'eau traitée est comprise entre 1 à 20 mg/l suivant le rapport C/N adopté (1,2 à 1,5 des phases a à f)(fig. 11) ; le pilote est capable de traiter 4,5 à 6 kg NO_3 /m³.j. Cette recherche réalisée à l'échelle pilote est encore en cours et devrait être prochainement

testée au stade industriel à Douchy (45), avec un projet d'une capacité de 50 m³/h pour produire de l'eau potable [98], [99], [100].

La SOGEA a aussi mené avec l'IFTS (l'Institut

Français de Techniques Séparatives) des études de faisabilité de l'utilisation de la microfiltration tangentielle après un réacteur de dénitrification biologique [101].

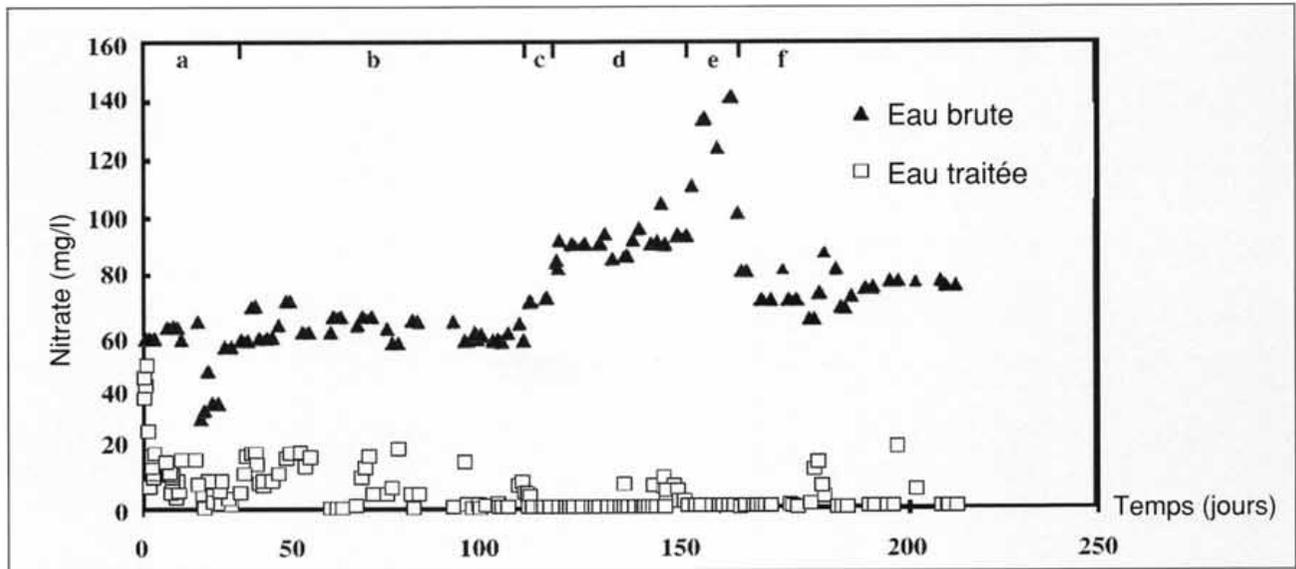


Figure 11 : Performances de la dénitrification par procédé BRM - d'après [100]

1.6.3 Membranes et strippage à l'air

L'Agence pour la Protection de l'Environnement des Etats-Unis (USEPA) a promulgué des textes sur les valeurs maximales admissibles pour des composés volatils dans l'eau potable (VOCs) : le benzène, le tétrachlorure de carbone, le dichlorobenzène, le 1.2 dichloroéthane, le 1.1 dichloroéthylène, le trichlorobenzène, le 1.1.1 trichloroéthane et le vinylchlorure [102].

Une technique membranaire est testée en laboratoire pour l'élimination de ces produits sur un principe identique à celui d'une tour d'aération. Les avantages des membranes sont de présenter une surface de transfert bien supérieure et de permettre une meilleure maîtrise des débits d'air et du traitement ultérieur de celui-ci. Les équations du transfert de masse des produits volatils au travers de la membrane, du liquide vers l'air ont été établies. Des expériences de validation ont été réalisées sur un module pilote (5 400 fibres creuses microporeuses en polypropylène, de diamètre de pore 0,03 µm, recouvertes de polyuréthane et installées dans des conduites en polycarbonate). L'eau contaminée circule à l'intérieur des fibres et l'air, à contre courant, à l'extérieur des fibres.

Les coefficients de transfert de masse sont établis pour diverses conditions de fonctionne-

ment, ainsi que les débits respectifs eau/air à respecter. Les performances de cette technique sont très supérieures aux tours d'aération classique à proportion débit eau/débit air comparable. Le gain est très net pour les composés faiblement volatils, tels que les bromoformes et bromodichlorométhanes.

Une analyse économique du strippage sur membrane après des tests en laboratoires et sur des pilotes de longue durée, souligne que le colmatage irréversible qui se produit dans ce type d'application est attribué au transfert de l'oxygène de l'air vers l'eau. Le fer, ainsi oxydé, précipite dans la membrane. Le procédé semble cependant économiquement intéressant pour les petites unités [102].

1.6.4 Membranes liquides

Ce développement original consiste à faire circuler d'un côté de la membrane l'eau brute à traiter, et une huile de l'autre côté. La membrane est en polypropylène microporeux traité pour éviter que l'huile ne pénètre dans les pores. L'étude porte sur l'élimination d'un pesticide, le lindane (γ hexachlorocyclohexane) et deux isomères de celui-ci. Le mode de fonctionnement donné dans le schéma 13 et la figure 12 (page 30) montre l'élimination du chloroforme de l'eau vers la fraction huile [103].

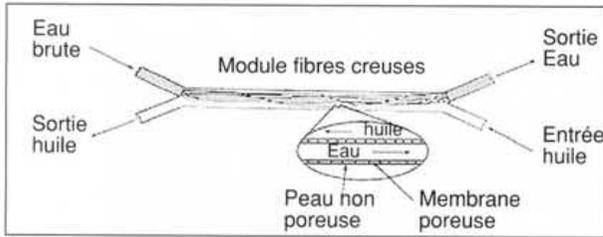


Schéma 13 : Principe de fonctionnement du module d'ultrafiltration avec circulation d'eau et d'huile à contre-courant - d'après [127]

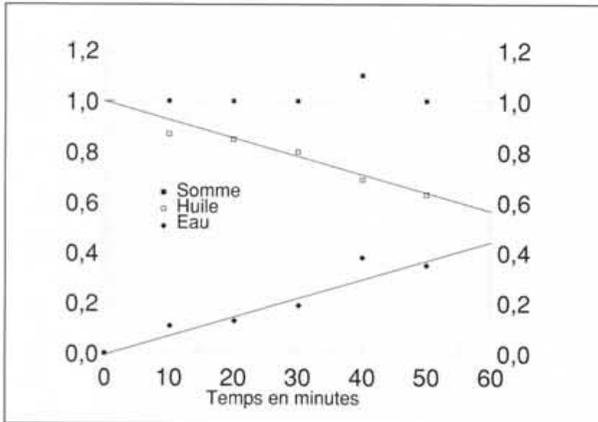


Figure 12 : Séparation du chloroforme - Concentrations dans les deux phases en fonction du temps - d'après [127]

1.6.5 Membranes composites et autres types

Les membranes composites, composées de matériaux de nature différente, ont été développées de manière à augmenter la perméabilité ou les propriétés sélectives et mécaniques des membranes [19]. Par exemple, les membranes dynamiques qui résultent de l'accumulation, réversible, de macromolécules à la surface d'un matériau poreux améliorent la sélectivité de la membrane support.

La recherche tente ainsi de mettre au point de nouvelles membranes de nanofiltration ampholytiques dont les capacités de séparation des matières organiques en solution ou des sels multivalents sont élevées tout en limitant le colmatage [104].

En France, TECH-SEP développe une membrane de nanofiltration organique et inorganique à base de polymères de phosphazène et de zirconium, capable de retenir des molécules organiques en solution de très petites tailles ainsi que les sels [105].

Le WRC (Water Research Center) conduit de son côté des recherches sur les membranes

dynamiques comparables à des membranes à OI en basse pression, régénérables in situ [106], [107].

Les canadiens s'orientent vers des membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration composées de polymères à fort pouvoir adsorbant pour la rétention des ions métalliques présents, par exemple, dans les eaux souterraines [108].

Des essais originaux ont été entrepris aux Etats-Unis en utilisant des membranes MF avec des modules enduits de terre diatomée ou d'hydroxyde d'aluminium [109], ou au Japon en ajoutant polyélectrolyte et sulfate d'aluminium à l'eau brute pour éliminer jusqu'à 80 à 99 % des acides humiques par ultrafiltration [110].

2) Procédés et réalisations

[48] [49] [51] [52] [53] [57] [58] [60] [70] [111] [112] [113] [114] [115] [116] [117] [118] [119] [120].

Les procédés de traitement membranaires ont un domaine d'application finalement assez varié puisqu'ils permettent de potabiliser des eaux brutes de qualités diverses, c'est le cas :

- des eaux à turbidité variable et parfois contaminées par des bactéries (catégorie 1),
- des eaux colorées, chargées en matières organiques dissoutes naturelles (catégorie 2),
- des eaux polluées par des micropolluants organiques (catégorie 3),
- des eaux dures ou saumâtres (catégorie 4).

Il est clair que plus une eau brute présentera ces différentes caractéristiques, plus les technologies à membrane s'imposeront comme la solution concurrentielle des techniques conventionnelles.

Par exemple, si les eaux classées dans les catégories 2 à 4 sont contaminées par des bactéries, les techniques membranaires pourront s'avérer d'autant plus comme les techniques de choix.

Les principaux procédés à membrane et réalisations aujourd'hui rencontrés en France et de par le monde, ont pour objectif de potabiliser des eaux brutes qui font en général partie de la première catégorie évoquée, et plus rarement de la seconde, si on laisse de côté, bien entendu, les membranes d'osmose inverse utilisées sur les eaux de mer ou très saumâtres et qui ne sont pas l'objet de ce document.