

Pour les deux dernières catégories, les essais sont concluants à l'échelle pilote, ou dans de rares cas prototypes (cas de Méry-sur-Oise) mais n'ont pas encore donné lieu à des réalisations industrielles significatives et compétitives d'un point de vue coût (certaines réalisations sont néanmoins en cours à Soiron et Jarny) ; dans ces deux cas de figure, l'objectif est plutôt de substituer les techniques membranaires aux techniques d'affinage classique sur des grandes stations (plusieurs millions de m³/an) plutôt que de les mettre en oeuvre à l'échelle de collectivités rurales par exemple.

Même si dans des contextes extrêmement spécifiques pour éliminer certains ions (cas des eaux de process), ou pour adoucir une eau saumâtre, la nanofiltration a un avenir certain, comme les usines de Floride le montrent bien, l'essor des technologies membranaires passe d'abord par la microfiltration et l'ultrafiltration appliquées à des collectivités de quelques centaines à quelques milliers d'habitants.

Le tableau page 35 montre bien que les débits traités par des membranes jusqu'alors ne dépassent pas 5 000 m³ par jour, ce qui démontre encore une fois l'aptitude de ces technologies en zone rurale ou pour alimenter des villes à population variable (en projet cas d'Avoriaz et surtout de Cannes qui sera alimentée en 1995 par des modules membranaires AQUASOURCE avec un débit de 25 000 m³/j, à partir d'une eau superficielle de bonne qualité) [53].

Dans tous les cas lorsque les membranes sont utilisées, il faut avoir conscience de l'accroissement de la qualité des eaux distribuées et le plus souvent de la diminution du taux de chlore à introduire en tête de réseau du fait d'une clarification et d'un abattement de la matière organique plus efficaces que ce qu'ils sont pour les techniques classiques [70]. C'est là aussi sans doute un des principaux intérêts des techniques membranaires.

Présentons ici les principaux types de procédés proposés en France et adaptables tout particulièrement sur la première catégorie d'eaux brutes énoncée (qualité variable et contamination bactériologique).

2.1 Les procédés AQUASOURCE

2.1.1 Le procédé classique

Sur ce procédé, la membrane d'ultrafiltration en dérivé cellulosique hydrophile a un seuil de coupure de 0,01 micron, elle est du type fibre creuse poreuse. Ces fibres sont montées par dizaines de milliers dans sept faisceaux et

fixées à chaque extrémité du module par une résine époxy qui assure l'étanchéité. Les modules proposés sont de deux types de 50 m² de surface de filtration (module L1B35 avec des fibres de 0,9 mm) ou 70 m² de surface de filtration (module L1D35 avec des fibres de 0,7 mm). La longueur des modules montés dans un carter est de 1,30 m de long sur 30 cm de diamètre. Fin 1992, le Ministère de la Santé a agréé ces modules pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine [49].

Le fonctionnement s'opère en ultrafiltration tangentielle ou frontale. L'eau brute pré-filtrée à 200 µm, est injectée à l'intérieur des modules sous une pression de 0,5 à 1,2 bar et circule à l'intérieur de la fibre creuse. La filtration se fait de l'intérieur vers l'extérieur et c'est la paroi interne de la fibre qui participe à la filtration.

En fonctionnement tangentiel, l'eau est recirculée car le flux traité est de l'ordre de 15 % dans la boucle de filtration. La pompe de gavage introduit l'eau brute dans le circuit qui est mise en circulation par la pompe. Le débit d'alimentation de la boucle est égal au débit de production.

Les membranes se colmatent progressivement et provoquent alors une chute du débit qui est aussitôt compensée par une augmentation de la pression de filtration appelée pression transmembranaire. La vitesse de circulation de l'eau dans les fibres est de l'ordre de 0,3 à 1,5 m/s et ajustée de façon à éroder le "gâteau" de matières accumulées sur la membrane.

En fonctionnement frontal, mis en oeuvre lorsque la ressource est moins chargée en matières donc lorsque le colmatage est plus lent, l'eau se répartit tout le long de l'intérieur des fibres pour traverser "de front" la paroi poreuse sous l'action de la pression. Seule la pompe d'alimentation est en fonctionnement, la recirculation n'a plus lieu. Cette procédure de filtration consomme moins d'énergie (de l'ordre de 0,1 à 0,2 kWh/m³) qu'en mode tangentiel (de l'ordre de 0,3 à 0,6 kWh/m³).

Quel que soit le mode d'exploitation, à intervalle régulier contrôlé par automatisation, les membranes sont décolmatées par rétrolavage qui consiste en une injection d'eau ultrafiltrée chlorée à 5 mg/l de l'extérieur vers l'intérieur de la fibre (sens inverse de la filtration). D'une durée d'environ 45 secondes à 1 minute, ce rétrolavage entraîne le gâteau et détruit avec le chlore les matières organiques ou bactéries qui pourraient subsister sur la paroi intérieure. Les eaux de rétrolavage sont rejetées dans le milieu naturel, le chlore ayant été pour une grande part consommé.

La boucle de circulation est purgée de son concentrat qui est en général 20 à 40 fois plus concentré en matières que l'eau brute.

Le rétrolavage est déclenché après un temps déterminé (de 30 minutes à 1 heure) ou si la pression dépasse une pression maximale fixée par l'exploitant.

Les pertes en eau sont donc de l'ordre de 3 à 10 % suivant cette périodicité en fonction de la qualité de l'eau brute à traiter.

En flux stabilisé, la perméabilité des membranes est de 140 à 180 l/h/m² sous une eau à 20°C (rappelons l'influence de la température sur le débit soit 3 % d'augmentation pour un degré supplémentaire).

Le nettoyage lessiviel est effectué suivant les cas de 2 à 6 fois par an, il s'effectue avec un détergent adapté à la hauteur de 70 grammes par m² de membrane. Celui-ci doit être récupéré après usage. Les membranes retrouvent, après ce nettoyage, leur capacité de production initiale.

La maintenance du dispositif où rétrolavage et nettoyage lessiviel s'opèrent automatiquement, ne nécessite pas plus d'une visite hebdomadaire par semaine (contrôle des paramètres et recharge en chlore) sur une durée de 1 à 2 heures.

S'il y a lieu, le contrôle de l'intégrité des fibres doit être réalisé par un compteur de particules, la turbidité n'étant pas toujours un critère suffisant.

Cependant, la défaillance d'une fibre n'a semble-t-il jamais été observée.

La durée de vie des membranes, évaluée par le constructeur, est à ce jour de 5 ans.

2.1.2 Procédé avec traitements combinés

L'élimination du fer et du manganèse est réalisée à Stonehaugh et Charcenne avec une injection préalable de permanganate de potassium et une aération. Les précipités d'oxyde de fer et de manganèse ainsi obtenus sont retenus sur la membrane.

L'utilisation de charbon actif pour éliminer les matières organiques dissoutes n'a été envisagée jusqu'alors que sur unité mobile (à Hourtin) et pas encore à poste fixe [58].

2.2 Les procédés MEMTEC [52] [111]

Mis en oeuvre par HYDREX en France, ce procédé utilise une membrane de microfiltration de 0,2 µm en polypropylène sous forme de fibre creuse à paroi poreuse.

Celles-ci sont assemblées par faisceaux de 12 500 dans un module qui dispose alors d'une surface de filtration de 10 m². La filtration s'effectue de l'extérieur vers l'intérieur de la fibre (inversement au procédé AQUASOURCE) et les particules sont donc retenues sur la surface extérieure de la fibre et dans l'épaisseur de la paroi. Le perméat est ainsi récolté à l'intérieur de chaque fibre. L'eau brute est en général préfiltrée à 500 µm (cas de Bernay-Ouest).

Le fonctionnement s'opère toujours en frontal sous une pression de 0,7 à 1,1 bar, ce qui a pour avantage de limiter la consommation d'énergie par rapport à une filtration tangentielle dotée d'une recirculation. Le flux de perméation est de l'ordre de 120 l/h/m².

L'originalité du procédé tient à l'utilisation d'air sous pression pour décolmater les fibres à contre courant (*schéma 14*). L'air, préalablement filtré à 0,01 µm, séché et déshuilé est injecté par un compresseur dans un réservoir. Avec une périodicité de 1 à 4 fois par heure, on expulse les matières retenues à la surface extérieure de la membrane et dans l'épaisseur de la paroi par l'air comprimé délivré sous 6 bars dans le canal central de chaque fibre. La détente le fractionne en bulles microscopiques qui traversent la paroi en chassant les impuretés vers l'extérieur. Une phase de réhumidification est ensuite nécessaire pour réhumecter la membrane. Les particules décolmatées sont rejetés dans le milieu naturel avec l'eau de rinçage après transit dans une cuve de décolmatage. Ce nettoyage n'a donc pas nécessité l'emploi d'additif chimique. (*Voir schéma 14 page ci-contre.*)

La fréquence des décolmatages est ici aussi fonction de la qualité de l'eau brute.

L'intégrité des membranes est par ailleurs testée par essai sous pression d'air (principe du point de bulle). Toute défaillance d'une fibre est ainsi détectée automatiquement ou au moment de la visite de contrôle si le test est lancé sous commande manuelle. Le module contenant la fibre rompue peut aisément être isolé des autres avant d'être remplacé. La fibre défaillante sera ensuite tout simplement obstruée avant de remettre le module en service.

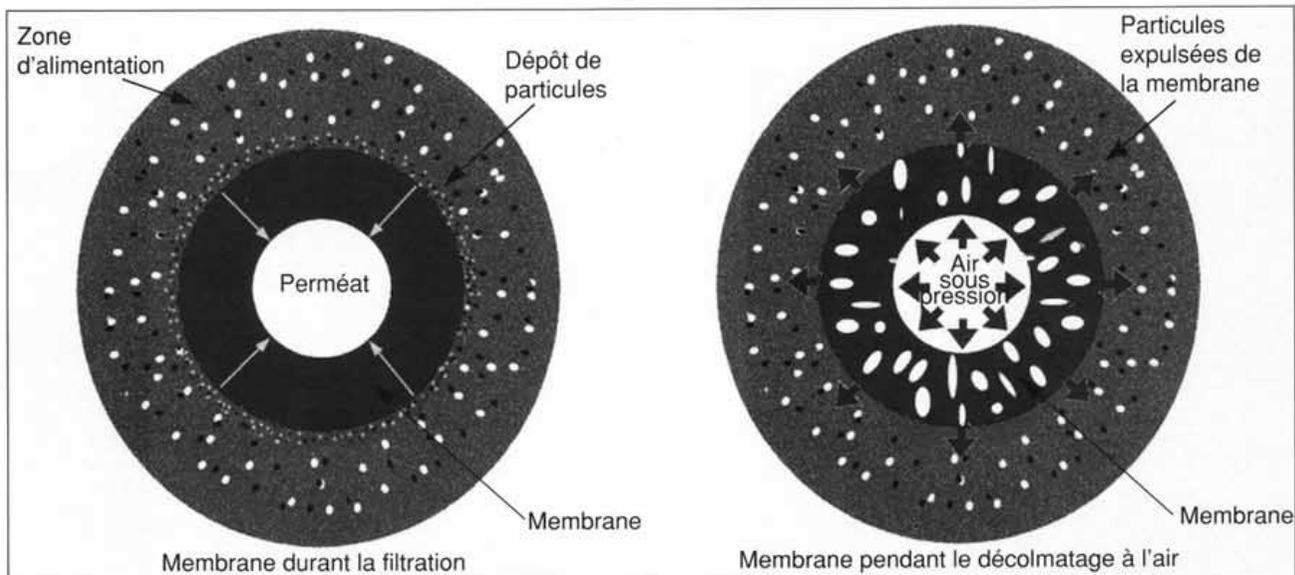


Schéma 14 : Décolmatage à l'air d'une fibre MEMCOR (procédé MEMTEC) - Document HYDREX

Le débit de production assuré par une pompe centrifuge est régulé par des variations de fréquence qui permettent d'optimiser le bilan énergétique du fonctionnement tout en conservant un débit de production constant.

Lorsque, après décolmatage à l'air, on ne récupère plus la capacité de filtration des modules sauf en augmentant la pression transmembranaire au-delà des pressions admises, il est nécessaire de procéder à un nettoyage lessiviel à base de soude et d'acide citrique. Ce nettoyage réalisé de l'ordre d'une fois par mois, dure environ deux heures. Les produits utilisés sont neutralisés avant rejet ou récupérés par l'exploitant.

La consommation énergétique de l'installation liée essentiellement à la compression de l'air et à la mise en pression de l'eau brute ne dépasse pas 200 Wh/m³ et les pertes en eau sont acceptables (de l'ordre de 5%).

La durée de vie estimée des membranes est de 5 ans.

2.3 Les procédés KERASEPTTM [51]

Mis en oeuvre désormais par TECH-SEP, ce procédé utilise une membrane céramique monolithique en oxyde métallique (Al₂O₃ - TiO₂), en configuration multicanaux. Cette technologie est donc très différente des techniques précédentes en fibre creuse. Les membranes sont montées dans des modules tubulaires de 0,8 à 1,2 mètre de long. Les canaux de 2,5 à

6 mm de diamètre sont au nombre de 7 ou 19 par monolithe suivant les gammes. Le monolithe a un diamètre de l'ordre de 20 à 25 mm.

Le seuil de coupure des membranes est de 0,1, 0,2 ou 0,45 micron en microfiltration voire 1µm. Notons néanmoins que, en UF, cette membrane céramique existe aussi avec un seuil de coupure de 15 à 300 kD. Les membranes monolithes disposées dans les modules (jusqu'à 99 monolithes dans un seul module) développent une surface de filtration de 0,08 à 25 m² ce qui correspond à des débits d'eau de 0,3 à 70 m³/h. Le débit de filtration très élevé est en effet un des points forts de ce procédé puisqu'il peut atteindre 1500 l/h/m² sous 2 bars. En fonctionnement normal, il est plutôt de l'ordre de 300 à 600 l/h/m². Comme la membrane est très résistante, la pression de service peut aller jusqu'à 10 bars mais est de l'ordre de 2 à 3 bars généralement.

Le fonctionnement des modules s'opère en filtration tangentielle sous une vitesse de l'ordre de 3 à 5 m/s. Une recirculation est nécessaire.

Une coagulation est presque toujours associée à la microfiltration KERASEPTTM de façon à améliorer la qualité de l'eau filtrée (50 à 70 % d'élimination pour le COT contre 15 à 20 % pour la MF seule).

Le rétrolavage à contre courant s'opère sous une pression de 6 à 8 bars et dure quelques secondes toutes les demi-heures. Le nettoyage lessiviel s'effectuant une fois par semaine, les

produits lessiviels utilisés peuvent être divers étant donné la grande résistance de la céramique à différents solvants et de 0 à 14 en unités pH. Seul l'acide fluorhydrique ne doit pas être employé.

Les pertes en eau sont faibles, de 1 à 3 %.

La consommation d'énergie assez importante du fait des pressions de service élevées pour la filtration et le rétrolavage est de 1300 à 2600 Wh/m³.

La société TECH-SEP avance néanmoins une consommation de 500 Wh/m³ pour réaliser la déferrisation d'une eau souterraine avec une membrane KERASEPTM de 1µm.

La durée de vie des membranes serait de 8 ans (donnée TECH-SEP).

2.4 Autres procédés [112]

Les membranes ROMICON en Ultrafiltration notamment et ABCOR ont été utilisées tout particulièrement par la SAUR en France. Les publications sur les procédés mis en oeuvre avec ces membranes ne sont pas cependant suffisantes pour pouvoir les développer ici.

2.5 Unités mobiles

Les unités mobiles trouvent leur application en cas de pollution accidentelle, de disparition de la ressource traditionnelle, d'augmentation de la demande. On peut traiter les eaux souterraines, de rivière, de lacs ou de barrage.

La société Aquasource commercialise l'unité Sirocc'eau. Cette unité se présente sous forme compacte de 7,15 x 2,5 x 2,6 m. Elle pèse 5 tonnes (sans eau), 10 tonnes (en eau). Deux modules assurent une production de 5 à 10 m³/h à 20° C et 4 modules de 10 à 20 m³/h à 20° C, soit l'alimentation en eau de 1 500 à 3 000 personnes par jour. L'installation requiert une journée de mise en place et le pilotage est géré automatiquement. L'alimentation électrique peut être assurée en triphasé : 20 KW (380 V) pour 2 modules, 35 KW (380 V) pour 3 modules.

Cette unité, pendant l'été 92, a fourni 15 m³/h dans la commune de Chailland (Mayenne) à partir d'une rivière voisine : l'Ernée, le forage ayant connu une baisse de production importante (200 m³/j au lieu de 600 m³/j). A Gallargues le Montueux (Gard) des pollutions par les nitrates et les pesticides du forage et du puits ont amené la commune à prélever l'eau

dans le canal du Bas-Rhône-Languedoc et à la traiter par l'ultrafiltration.

La Société SAUR a effectué aussi des essais sur site avec des unités mobiles de capacité 15 m³/h, par exemple à Manosque, à Barneville Carteret dans la Manche, à Kerneuhel dans les Côtes d'Armor, et à Maison Rouge en Haute-Saône (fin 92). Les membranes étudiées font partie des produits Romicon (rachetés par Koch International), Memtec, et Abcor.

Notons que l'unité mobile de secours (UMS avec membranes de microfiltration) mise au point par OTV n'est désormais plus utilisée sauf pour la dépollution des eaux industrielles.

2.6 Quelques réalisations en France

En France, la société Imeca, spécialisée dans le traitement de produits industriels, a démontré la première la faisabilité des techniques membranaires pour la production d'eau potable. L'activité membranes céramiques d'IMECA (marque KERASEPTM) a ensuite, en 1992, été reprise par la société TECH-SEP, filiale de RHONE-POULENC spécialisée dans la filtration tangentielle dans divers domaines d'activités (agroalimentaires, industrielles, ...).

Parallèlement, la Lyonnaise des Eaux-Dumez (LED) et la Compagnie Générale des Eaux (CGE) ont aussi consacré beaucoup d'efforts pour développer les techniques à membranes [113]. La Lyonnaise en particulier à l'aide de fonds attribués dans le cadre d'un projet au niveau de la Communauté Economique Européenne appelé Recherche Fondamentale pour la Technologie Industrielle en Europe (BRITE), a commencé des recherches dans ce domaine en 1986. Depuis lors, ce groupe a participé au projet EUREKA dont le but est d'appliquer, à l'échelle industrielle, les résultats de recherches fondamentales.

De son côté, la Compagnie Générale des Eaux a commencé par orienter ses investigations vers l'application de la microfiltration tangentielle au traitement des eaux potables, avec l'utilisation de membranes en céramique puis s'est liée à MEMTEC pour développer la microfiltration sur membrane organique. La nanofiltration est aussi un des domaines d'investigation de ce groupe.

Suivant leurs efforts respectifs, ces deux groupes ainsi que la SAUR ont construit des usines qui actuellement fournissent aux consommateurs de l'eau filtrée sur membrane.

Notons enfin qu'en 1993, TECH-SEP a signé

un accord avec le groupe LED pour commercialiser les fibres creuses FLOSEP™ qui n'ont pas encore donné lieu à publication.

Le tableau suivant présente l'inventaire des réalisations françaises et de quelques réalisations étrangères en service ou en projet depuis 1987.

DATE DE MISE EN SERVICE	MEMBRANES	SITUATION	EAUX BRUTES	PRODUCTION m ³ /jour	
89	MF Membranes céramiques	St Maurice les Chateaufort, France	Eaux souterraines	2000	
91		Bagneux, France	"	250	
*		Montrouge, Chatillon, France	"	-	
*		Vallée de l'Aulne, France	"	-	
*		Saint Gervais, France	"	240	
*		Le Monastier, France	"	600	
*		Rarecourt, France	"	240	
*		Le Bosc, France	"	2400	
		MF Membranes organiques	Keystone, Colo. USA	"	105
87			Lake Crakenback, NSW, Australie	"	945
89	Tooborac, Victoria, Australie		"	170	
91	Little River, Calif. USA		"	190	
fin 92	Hinds, Calif. USA		"	50	
fin 92	Eagle Moutain, Calif. USA		"	110	
fin 92	Iron Moutain, Calif. USA		"	110	
fin 92	Gene, Calif. USA		"	140	
fin 92	Witsell, Calif. USA		"	50	
fin 93	Bernay, France		Eaux souterraines	1000	
fin 94	Noroy-le-Bourg, France		"	720	
95	Besancourt, France		"	4500	
	UF Membranes organiques		Amoncourt, France	"	240
88			Douchy, France	"	1200
89			Suresnes, France	"	190
90			Le Baizil, France	"	120
90			Gracay, France	"	770
90		Macao, Southeast Asia	"	2900	
91		Stonehaugh, England	"	60	
91		Blomac, France	Eaux superficielles	195	
91		Sauve, France	Eaux souterraines	1900	
91		Osselle France	"	195	
92		Lausanne, Switzerland	Eaux superficielles	95	
92		Saint Cassien, France	"	195	
92		Biarritz, France	"	4800	
92		Hourtin, France	"	50	
92		Villefranche de Panat, France	"	195	
fin 92		Charcenne, France	Eaux souterraines	605	
fin 92		Fongombault, France	"	4800	
fin 92		New Rochelle, New York, USA	Eaux superficielles	480	
93		La Filière, France	Eaux souterraines	2400	
93		Urzy, France	"	1200	
93		Saint Jean D'Arvey, France	Eaux souterraines	400	
93		Avoriaz, France	Eaux superficielles	3000	
93		Bernay, France	Eaux souterraines	2800	
93-94		Pardee Center, Calif. USA	Eaux superficielles	440	
93-94		Pardee Recreational Area USA	"	440	
93-94		South Shore Camanche. USA	"	2230	
94		Chermisey, France	Eaux souterraines	200	
94		Grande Fontaine, France	"	800	
94		Luçay-le-Mâle, France	"	600	
94		East Bay Mud USA	Eaux superficielles	400	
95		L'Apier-St-Cassien, France**	"	25000	
*		NF Nanofiltration	Méry sur Oise, France	Eaux superficielles	2800
95			Jarny, France	Eaux souterraines	2500
95			Soiron, France	Eaux souterraines	2500

* Pas de données disponibles

** A l'étude ou en construction

- Production non communiquée

Usines de microfiltration, d'ultrafiltration, de nanofiltration en service ou en projet depuis 1987 - d'après [53] modifié

2.6.1 Amoncourt (Haute-Saône) et Douchy (Loiret)

Les stations d'Amoncourt (70) et Douchy (45) ont été les premières usines d'ultrafiltration installées en France par le groupe Lyonnaise des Eaux-Dumez. Elles ont contribué à une meilleure maîtrise du procédé d'un point de vue technique et économique [48], [51], [114], [115], [116].

. Amoncourt - (Haute-Saône) 320 habitants

Débit : 160 m³/j et 180 m³/j en pointe

Ressource : source située dans la ceinture karstique du bassin parisien.

Caractéristiques : la turbidité moyenne atteint 5 NTU et le COT 3 mg/l. Lors des épisodes de pluie, on observe des pointes jusqu'à 200 - 300 NTU en turbidité et 9 mg/l pour le COT.

Etude de la mise en place d'un traitement classique : la mise en place d'une chaîne de traitement complète (coagulation - décantation - filtration) adaptée à la qualité de l'eau était, dans ce contexte de débit modeste, économiquement irréaliste et surdimensionnée, compte tenu du caractère intermittent des problèmes de turbidité.

. Douchy - (Loiret) 2000 habitants

Débit : 1200 m³/j

Ressource : source d'origine karstique

Caractéristiques : des difficultés similaires à celles d'Amoncourt avec des pics de turbidité de 50 NTU maximum mais accompagnés de pollution bactérienne lors des épisodes pluvieux.

Traitement antérieur : l'usine en place était constituée d'une coagulation sur filtre au sulfate d'aluminium, difficile à régler avec une eau de qualité variable et surtout présentant des postfloculations donc des fuites d'aluminium dans le réseau.

	Amoncourt	Douchy
Débit nominal (m ³ /h)	10	50
Nombre de modules	2 x 10	2 x 8
Surface filtrante (m ² /module)	7	50
Mise en route	Nov. 1988	Sept. 1989
Pression de filtration (bar)	0,4 à 1,2	0,5 à 1,2
Vitesse de circulation (m/s)	0,75	0 à 0,9

L'installation d'Amoncourt comporte un prétraitement par filtre de 200 µm. Pour les deux installations, quelle que soit la charge de l'eau à traiter, la qualité de l'eau traitée est

constante (inférieure à 0,2 NTU) ; la qualité bactériologique de l'eau est toujours préservée comme le montre par exemple la fig. 13 sur les streptocoques fécaux.

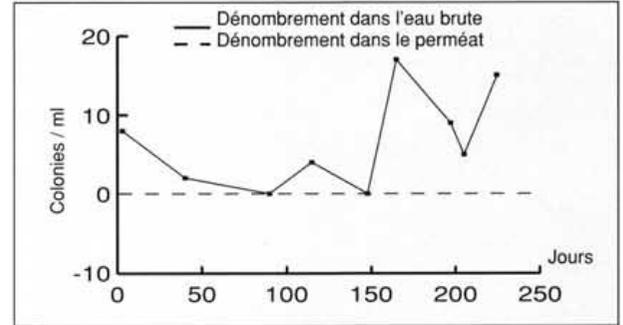


Figure 13 : Elimination des streptocoques fécaux à Douchy - d'après [48]

L'aluminium et le fer ont aussi été suivis particulièrement dans les deux cas et sont totalement éliminés. Le suivi analytique des THM formés a également montré que sur l'eau traitée, dans le cas d'Amoncourt on ne retrouve pas plus de 10 µg/l alors que les potentiels de formation de l'eau brute indiquent des valeurs de 10 à 45 µg/l.

Exploitation : en l'absence de fortes turbidités, les rétrolavages sont déclenchés après une heure de filtration à Amoncourt, après trois heures à Douchy. On constate que lorsque la turbidité de l'eau brute augmente jusqu'à 300 NTU, la pression transmembranaire doit augmenter jusqu'à 1 bar alors qu'elle est de 0,5 à 0,6 bar en période normale (0 à 50 NTU) (fig. 14).

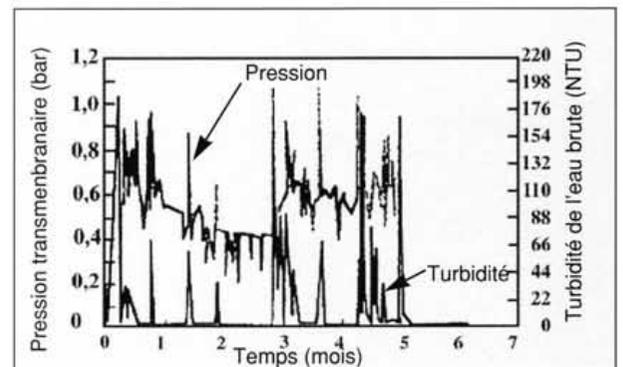


Figure 14 : Variations de la pression transmembranaire en fonction du temps et de la turbidité de l'eau brute - d'après [48]

A Amoncourt, les deux lignes de modules ont été nettoyées quatre fois et la station de Douchy n'a pas encore été régénérée. Cette fréquence de régénération dépend bien sûr de la qualité de la ressource.

L'expérience acquise sur ces usines montre que la régénération doit s'opérer après une production comprise entre 200 et 600 m³ pour un m² de membrane et la consommation en lessive est alors de 70 g/m² de membranes.

Des études précises ont par ailleurs été menées sur la consommation énergétique notamment à Douchy. La fig. 15 montre que les différents postes ont été différenciés et que l'optimisation du procédé peut être réalisée :

- en limitant les pertes en eau en espaçant les rétrolavages (encore fonction de la qualité de l'eau brute),
- en diminuant la vitesse de recirculation, jusqu'à travailler en frontal (vitesse de recirculation nulle) lorsque la qualité de l'eau brute est mauvaise. Dans ce cas, la fréquence de rétrolavage s'accroît mais enrayer le colmatage des membranes et le gain énergétique de 0,5 à 0,6 kWh lié à la non-recirculation compense l'énergie dépensée pour les rétrolavages.

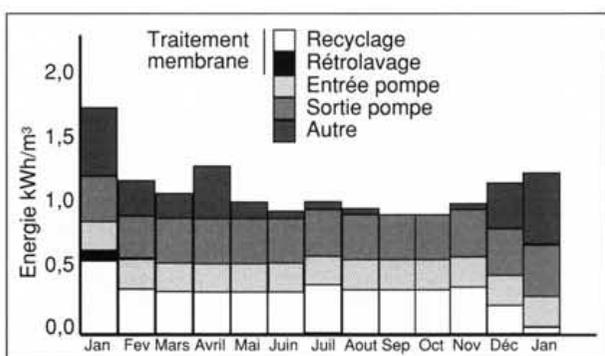


Figure 15 : Consommation d'énergie à Douchy pour un fonctionnement tangentiel-frontal - d'après [48]

On constate que l'énergie nécessaire au gavage, à la filtration et au rétrolavage est de l'ordre de 0,25 kWh/m³ et atteint 0,6 kWh/m³ pour le refoulement. La consommation totale maximale a atteint 1,6 à 1,75 kWh/m³ sur

Douchy et Amoncourt y compris le chauffage et le refoulement vers le château.

La main d'oeuvre a été évaluée pour la première année d'exploitation à 72 h/an pour Amoncourt et 98 h/an pour Douchy.

La dose de chlore en tête de réseau est de 0,1 mg/l dans les deux cas au lieu de 0,4 à 1 mg/l avant l'installation des membranes à Douchy.

2.6.2 Saint-Maurice-Les-Chateauneuf (Loire)

Mise en service en février 1990
Fonctionnant avec des membranes minérales, elle a les caractéristiques suivantes : [57][60] [117] [118] [119] [120]

Débit : 2000 m³/j (débit nominal 100 m³/h, débit maximal 150 m³/h)

Ressource : sources d'origine karstique
Caractéristiques : très sensible aux perturbations météorologiques, l'eau subit de grandes variations de turbidité, très brutales. Les caractéristiques des eaux en périodes normales et critiques sont reportées sur le tableau qui suit.

Traitement antérieur : mélange en période critique de l'eau des sources (turbides) avec l'eau de la nappe alluviale de la Loire.

Configuration des membranes

L'élément filtrant se présente sous forme d'une bougie comportant 19 canaux de 4 mm de diamètre pour 850 mm de longueur dans lesquels circule l'eau à traiter. La surface filtrante par élément est de 0,2 m². Ces éléments sont regroupés au sein de modules cylindriques en acier inox. Un module contient 19 éléments, la filtration s'effectue sous mode

Caractéristiques physico-chimiques de l'usine de Saint-Maurice (hors périodes de troubles)		Caractéristiques (en périodes critiques)		Périodes			
				1	2	3	4
Turbidité (NTU)	0,75	Turbidité (NTU)		55	100	100	95
Couleur (Mg/l Pt-Co)	> 5	MES (mg/l)		20	100	300	260
Conductivité (µs/cm)	327	COT (mg/l)		4,2	10	4	6,5
pH	7,8	Fe (mg/l)		0,36	5,9	2,4	3,6
Oxydabilité en milieu acide (mg O ₂ /l)	0,3	Mn (mg/l)		0,03	0,4	0,42	0,28
THT (°F)	17,6	Al (mg/l)		1,1			
TAC (°F)	16,2	Germes (20° C nb/ml)		>1000		560	
Fe (mg/l)	0,06	Germes (37° C nb/ml)		>1000		200	
Mn (mg/l)	< 0,01						
Al (mg/l)	< 0,02						

tangentiel, la vitesse de circulation retenue est de 3 m/s et la pression transmembranaire au maximum de 3 bars. Le flux de perméat obtenu atteint alors 100 l/m²/h.

Caractéristiques techniques :

Un turbidimètre mesure en continu la turbidité des sources. Lorsqu'elle atteint le seuil critique, une injection de WAC (120 ppm) est réalisée au refoulement des pompes d'alimentation et l'eau est ensuite conduite vers l'installation de microfiltration.

Surface membranaire : 121,6 m²
 32 modules de surface unitaire 3,8 m² installés sur 2 skids.
 Pompe d'alimentation : 60 à 90 m³/h
 Pompe de circulation : 196 m³/h
 Vitesse de circulation nominale : 3 m/s
 Pression transmembranaire : 3 à 4 bars
 Porosité moyenne : 0,2 µm

L'opération délicate consiste à déconcentrer régulièrement la boucle de concentration et elle doit être effectuée en même temps que les lavages à flux inversé ou séparément.

Des nettoyages chimiques à la soude (à 3 %) puis à l'acide nitrique (à 3 %) sont effectués lorsque le colmatage des membranes devient irréversible.

En conclusion, aucune baisse de la capacité de filtration n'a été à ce jour observée et la phase de démarrage des skids est encore étudiée (à l'eau claire) ainsi que la régulation du dosage de coagulant.

Cette station, notons le tout de même, ne fonctionne que 20 à 40 jours par an quand la qualité de la ressource se dégrade brusquement.

2.6.3 La Nive (Pyrénées Atlantiques)

Mise en service en mai 1992
 Débit : 5000 m³/j
 Ressource : Eaux de rivière de la Nive
 Caractéristiques de la ressource : en moyenne la turbidité est de 5 NTU et le COT de 3 mg/l.

La Nive est une rivière qui prend sa source près de Saint-Jean Pied de Port et qui subit l'influence des orages fréquents dans le pays basque. Les épisodes conduisent alors à une augmentation de la turbidité (80 à 140 NTU), de la concentration en matières organiques (10 mg/l de COT), et la teneur en fer de cette eau superficielle [58].

La station dessert Bayonne, Biarritz et des

communes environnantes en appoint d'une usine de traitement classique de 51000 m³/j.

Membranes installées : membranes d'ultrafiltration AQUASOURCE, disposées en 3 x 14 modules de 50 m² qui fonctionnent 20 h/24.

Caractéristiques techniques : l'eau ultrafiltrée est mélangée au reste de la production ; les nettoyages lessiviels sont réalisés tous les 2 à 4 mois du fait de dégradations de la qualité de l'eau brute assez fréquentes.

2.6.4 Avoriaz (Haute-Savoie)

Mise en service en novembre 1993

Débit : de 200 à 3300 m³/jour

Ressource :

- Eaux superficielles venant de deux lacs collinaires d'altitude (1700 et 2000 m) alimentés par des eaux de ruissellement chargées en matières en suspension (pluie et fonte des neiges) et parfois polluées bactériologiquement. En été, ces ressources ne sont pas utilisables de façon continue.
- Eaux de sources captées en priorité en toute saison.

Caractéristiques de la ressource : Pendant les périodes pluvieuses, des problèmes de turbidité et la présence d'indicateurs de pollution fécale ont été constatés. [58]

	TEMPERATURES		TURBIDITE MOYENNE	TURBIDITE EN POINTE
	ETE	HIVER		
SOURCES	6° C	1° C	0,3 à 4 NTU	200 NTU
LACS	10° C	3° C	1 à 10 NTU	150 NTU

Membranes installées : 2 unités AQUASOURCE équipées de 14 modules d'UF de 70 m². Une télésurveillance a été installée (FLUTECH).

Caractéristiques techniques : en haute saison, la population sur la commune de Morzine-Avoriaz atteint 15000 habitants alors qu'elle est de moitié en moyenne saison.

En pointe, pendant la saison touristique en particulier, la station fonctionne 20 à 24 heures par jour.

La fréquence de visite sur la station est d'une fois par semaine et la dose de chlore en entrée de réseau à 0,1 mg/l est quasi-

ment conservée en tous points du réseau (0,08 mg/l).

Rappelons que l'efficacité du chlore, comme désinfectant, diminue quand la température baisse, ce qui renforce l'intérêt de ce traitement par ultrafiltration pour ces eaux souvent contaminées.

Une bache de stockage d'eau de rétrolavage a été mise en place à côté des installations d'UF.

2.6.5 Bernay ouest

Mise en service octobre 1993.

Débit : 1 000 m³/j.

Ressources : eaux souterraines issues d'une résurgence d'un aquifère crayeux d'origine karstique.

Caractéristiques : de qualité très sensible aux conditions météorologiques, forte élévation de la turbidité, du nombre de germes banaux et témoins de pollution fécale, des teneurs en fer, en aluminium et en matières organiques pendant les épisodes pluvieux.

Membranes installées : membranes organiques de microfiltration MEMCOR en polypropylène de 0,2 µm. 42 modules sont en place présentant une surface de filtration de 420 m².

La Compagnie Fermière de Services Publics (CFSP) a mis à disposition du Syndicat d'alimentation en eau potable de la région de Bernay-Ouest (environ 1 650 abonnés), cette unité de traitement par microfiltration. Réalisée par HYDREX, cette station, dite de Val Monard, délivre une eau filtrée d'une turbidité inférieure à 0,1 NTU jusqu'à 0,3 NTU, même pendant les

conditions climatiques défavorables où la turbidité de l'eau brute monte jusqu'à 300 à 700 NTU. Dans cette situation, l'abattement en fer et aluminium est supérieur à 98 %, et l'élimination du COT et des matières organiques dosées en milieu acide, de l'ordre de 75 %.

La qualité bactériologique de l'eau brute et de l'eau traitée est représentée pour quelques cas dans le tableau ci-dessous.

La station dispose d'une bache d'eau brute (avant traitement), d'une cuve de nettoyage pour la préparation des réactifs, de deux réserves de stockage d'air filtré (rétrolavage à l'air) alimentées par deux compresseurs, et d'une cuve de récupération des eaux de décolmatage.

Les réactifs de nettoyage sont neutralisés avant rejet vers le milieu naturel.

3) COÛTS D'EXPLOITATION ET D'INVESTISSEMENT [52] [53] [65] [74] [79] [103] [121] [122] [123] [124] [125] [126] [127]

Si les applications des membranes d'osmose inverse connaissent des évaluations régulières d'un point de vue coût, il en est autrement des applications de microfiltration, d'ultrafiltration et de nanofiltration parce que ces techniques sont beaucoup plus récentes.

L'osmose inverse, dans le domaine du dessalement, est une technique déjà ancienne, confrontée à la concurrence de la distillation flash ou à effets multiples, et les nécessaires études de coûts sont ainsi souvent réactualisées [103], [121], [122].

Paramètres	Unités	4/11/1993		8/12/1993		27/01/1994	
		EB	ET	EB	ET	EB	ET
Germes totaux 20° C	nb/ml	61200	50	228	73	1080	32
Germes totaux 37° C	nb/ml	62400	0	19	3	960	0
Coliformes totaux	nb/100ml	900	0	9	0	1300	0
Coliformes thermotolérants	nb/100ml	8	0	75	0	100	0
Streptocoques fécaux	nb/100ml	4	0	3	0	74	0
Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices	nb/20ml	0	0	0	0	30	0

Qualité bactériologique de l'eau brute et de l'eau traitée par les membranes de microfiltration de l'unité de traitement de Bernay ouest d'après [52]

EB : Eau brute - ET : Eau traitée

Pour leur part, les procédés de filtration sur membrane (MF, UF, NF) ont commencé à être mis en oeuvre dans le courant des années 80 à travers le monde, et depuis ces dernières années en France. Les coûts d'exploitation et d'investissement sont désormais mieux cernés pour ces techniques puisque l'expérience des constructeurs et des exploitants s'affirme progressivement. Nous avons ainsi réuni un certain nombre de données chiffrées sur chacune des techniques et les comparerons entre elles pour quelque cas, pour un même type d'eau traitée. Cette présentation s'inspire d'une synthèse présentée en 1993 à une conférence de l'A.I.D.E. à Budapest [53].

3.1 Ultrafiltration

3.1.1 Traitement direct d'eaux brutes par les modules AQUASOURCE

Cette technique est désormais utilisée en France depuis 1988 et des études économiques de plus en plus précises ont ainsi été publiées. En effet plus d'une vingtaine de stations ont été installées à ce jour par AQUASOURCE et les coûts sont donc beaucoup mieux maîtrisés. Par ailleurs, un récent rapport réalisé aux Etats-Unis pour le compte de l'AWWARF a permis de la même façon de déterminer plus précisément les coûts liés à l'investissement ou à l'exploitation [123].

Rappelons qu'une usine d'UF comprend :

- les modules de fibres creuses,
- le système automatique pour gérer les rétro-lavages composé de : débitmètres, manomètres et pressostats, pompes de rétro-lavage, armoire de commande,
- les pompes d'alimentation et de recirculation,
- les bacs ou réservoirs de chlore pour le rétro-lavage, et bac de nettoyage (lessive),
- le bâtiment et les infrastructures intérieures.

Les coûts d'exploitation se répartissent en :

- frais proportionnels au volume d'eau traitée à savoir :
 - . la consommation énergétique liée à l'alimentation, la recirculation et le rétrolavage, la dépense énergétique liée à la recirculation étant beaucoup plus importante que celle relative à la mise en pression.

L'énergie nécessaire aux pompes d'exhaure et de refoulement vers les réservoirs ou châteaux d'eau, ainsi que celle pour l'éclairage et le chauffage ne sont pas prises en compte en général dans les données fournies,

. la consommation en réactifs que sont le chlore et la lessive pour les nettoyages hebdomadaires ou mensuels (suivant les cas),

- frais de maintenance :

. coût de la main-d'oeuvre pour le suivi de la station et sa maintenance,

. petit matériel de base qui comprend tout ce qui doit être changé sur l'installation (joints, pièces mécaniques, ...) ainsi que le consommable (huile pour les pompes, ...),

- enfin les frais de renouvellement des membranes puisque la durée de vie des membranes est limitée dans le temps à 5 ans pour les membranes L1B35 d'AQUASOURCE.

Ces coûts dépendent toujours intrinsèquement de la qualité de l'eau brute.

Les stations de Blomac, Sauve et Osselle ont ainsi donné lieu en 1991 à un bilan d'exploitation complet qui montrait que [124] :

- les frais proportionnels sont de l'ordre de 0,20 à 0,40 F/m³ pour l'énergie, 0,01 à 0,05 F/m³ pour les réactifs,
- les frais de maintenance de l'ordre de 0,15 à 0,30 F/m³ comprenant une main-d'oeuvre de 100 à 200 h/an et l'entretien de base,
- les frais de renouvellement de 0,30 à 0,65 F/m³.

Globalement, les premiers bilans de fonctionnement permettaient de considérer que le coût global d'exploitation était donc situé entre 0,70 à 1,40 F/m³, ce coût variant en fonction de la taille de l'usine et de la teneur moyenne en matières organiques de l'eau à traiter : Blomac par exemple, alimenté par une eau de rivière qui contient beaucoup de matières organiques et de colloïdes, et qui subit des crues importantes, a le coût d'exploitation le plus fort par rapport à Sauve et Osselle où les stations traitent une eau souterraine issue d'une nappe karstique.

En 1994, AQUASOURCE considère désormais que le calcul de renouvellement des membranes peut s'effectuer sur la base de

6 ans (du fait de l'exemple d'Amoncourt qui rentre dans sa sixième année de fonctionnement) ce qui donnerait de 0,2 à 0,4 F/m³ sur ce poste, le coût énergétique peut parallèlement être abaissé à 0,10 F/m³ en améliorant la procédure de filtration (frontale ou tangentielle suivant la qualité de l'eau brute, cas de Douchy et Gracay). Cet aspect nécessite un suivi technique plus soutenu au départ (donc plus de main-d'oeuvre) mais rentabilisé par la suite ; les coûts de maintenance restent pour leur part situés autour de 0,30 F/m³ [125].

En conséquence, pour clarifier et désinfecter une eau brute à faible concentration en matières organiques, les coûts d'exploitation seraient aujourd'hui de 0,6 à 0,9 F/m³. De récentes publications vont même jusqu'à indiquer des coûts de 0,4 F/m³ pour des stations dont la capacité de production serait de l'ordre de 1000 m³/h [53], [123].

Les coûts d'investissement pour des usines produisant de 100 à 5000 m³ par jour ont été calculés suivant le type de module choisi (50 m² ou 70 m²) et pour un flux de 100 à 150 l/h à une température de 10°C [126].

La figure 16 montre ainsi que pour des petites stations traitant moins de 500 m³ par jour, le prix varie avec la taille de l'usine, alors qu'il se stabilise pour des capacités supérieures. Il est situé autour de 1500 à 2500 F/m³/jour pour une production d'environ 500 m³/jour, de 1200 à 1400 F/m³/jour au-delà de 1000 m³/jour si l'eau est très faiblement chargée (flux de 150 l/h/m² soutenu) ou 1600 à 1800 F/m³ si l'eau est un peu plus concentrée en matières organiques (flux de 100 l/h/m²).

La différence entre les deux types de module est faible (200 à 300 F/m³/jour).

Notons que ces coûts incluent l'équipement, les modules et le montage.

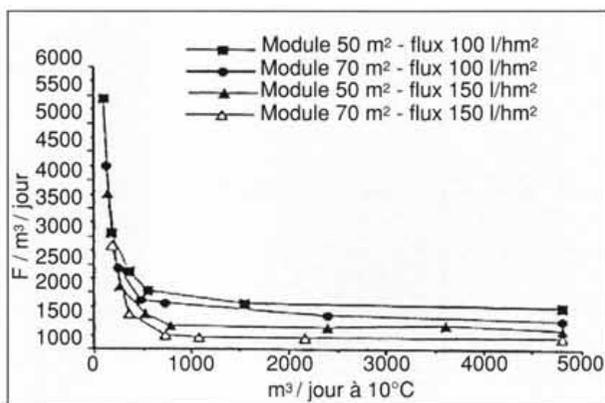


Figure 16 : Coût d'investissement des modules AQUASOURCE - d'après [126]

3.1.2 - Traitement direct d'eaux brutes combiné avec l'emploi de CAP et l'oxydation

Pour des eaux brutes de bonne qualité (faible turbidité) et contaminées par des micropolluants organiques tels que les pesticides, la technique combinant le charbon actif en poudre et l'ultrafiltration a un coût d'exploitation complémentaire de 0,1 à 0,2 F/m³ à ajouter au coût d'exploitation de l'ultrafiltration, ceci pour un flux de l'ordre de 140 l/h/m² et un taux de dosage de 5 à 10 g/m³ en CAP. Le coût d'investissement à ajouter serait de 100 à 300 F/m³/jour en plus de l'investissement lié à l'ultrafiltration [53].

Pour des eaux brutes superficielles plus chargées en matières organiques et contaminées par des pesticides (exemple de l'eau de Seine en amont de Paris), ces coûts seraient plus élevés parce que le flux diminuerait (environ 100 l/h/m²) ainsi que la dose de CAP (de l'ordre de 30 à 40 g/m³). Aucune donnée chiffrée n'est cependant aujourd'hui présentée sur ce point.

Rappelons néanmoins qu'un poste de traitement seul au charbon actif en poudre est évalué autour de 0,35 F/m³ (coûts d'amortissement et de fonctionnement compris) [127].

Si une oxydation, par exemple à l'ozone, est adjointe en plus du traitement au CAP, (ce qui peut-être le cas encore une fois sur une eau superficielle chargée et pour éliminer tout particulièrement les matières responsables de goûts et d'odeurs), les coûts d'investissement atteindraient 3500 F/m³/jour environ pour une capacité de production de 15 m³/h et 2100 F/m³/jour à partir de 150 m³/h et au-delà, le coût d'exploitation fluctuant dans tous les cas autour de 1,20 F/m³.

3.1.3 - Traitement direct d'eaux colorées faiblement turbides avec l'ultrafiltration basse (500 Daltons)

Plus performante que l'ultrafiltration à 100 kD associée au charbon actif en poudre et que la nanofiltration, l'ultrafiltration basse a été mise en oeuvre sur des eaux de lac colorées au Canada. Le bilan d'exploitation fut de l'ordre de 1900 F/m³/jour pour le coût d'investissement, et 0,85 F/m³/jour pour le coût d'exploitation ce qui est très concurrentiel par rapport aux deux techniques précédemment évoquées, donnant une eau de moins bonne qualité pour l'UF + CAP ou nécessitant d'être reminéralisée pour la NF [53].

3.2 Microfiltration

Concurrente de l'ultrafiltration, la microfiltration nécessite un équipement comparable à la différence de deux points :

- elle fonctionne le plus souvent en filtration frontale moins consommatrice d'énergie (cas de Bernay-Ouest),
- la technique du nettoyage peut être mise en oeuvre par injection d'air (produit qui "ne coûte rien" encore que le coût de lessive est minime pour l'UF et que l'air doit être séché, filtré et deshuilé).

Par ailleurs, les membranes peuvent dans certains cas soutenir des débits plus importants et leur durée de vie atteindre plus de 5 ans (en céramique notamment beaucoup plus résistante aux lessives).

Associée à la coagulation, elle peut traiter des eaux brutes chargées ; on utilisera alors des membranes de MF minérales plutôt qu'organiques.

3.2.1 Traitement direct d'eaux brutes faiblement chargées par les modules MEMTEC

Pour l'installation de Bernay-Ouest mise en route fin 1993, nous connaissons les éléments de coûts suivants :

- le coût de renouvellement des membranes calculé sur la base de 5 ans, est de 0,21 F/m³, ce qui revient à environ 9000 F par module,
- la consommation énergétique est de 0,2 kWh/m³ environ et le coût de nettoyage est estimé à 0,01 F/m³ ce qui doit donner globalement un coût de l'ordre de 0,10 à 0,15 F/m³ [52],
- les coûts de main-d'oeuvre ne nous sont pas communiqués mais il faut envisager une visite par semaine pour le nettoyage lessiviel et le contrôle de l'installation, ce qui équivaut à environ 150 heures par an,
- le coût de maintenance (équipement électromécanique) doit aussi être intégré au total, mais n'est pas communiqué aujourd'hui.

Globalement, le coût d'exploitation est donc supérieur à 0,40 F/m³.

Pour une membrane de même type (polypropylène fibre creuse à 0,2 µm), les résultats publiés récemment par la Lyonnaise des Eaux-Dumez à la conférence de l'A.I.D.E. à Buda-

pest donnent un coût d'exploitation de 0,75 F/m³ et d'investissement d'environ 1500 F/m³/jour (pour 15 m³/h) et 1200 F/m³/jour (pour 150 m³/h) pour une eau brute faiblement chargée en matières organiques [53].

Cette technique est donc concurrentielle de l'UF aussi bien d'un point de vue coût (avec semble-t-il un coût d'investissement initial inférieur) et d'un point de vue qualitatif (comme nous l'avons vu page 20).

3.2.2 Traitement direct d'eaux brutes faiblement chargées par coagulation + MF minérale

Pour éliminer davantage le COT et doubler la capacité de filtration, la coagulation a été associée à la microfiltration sur membrane minérale.

Les données sur ce type d'installation sont beaucoup plus rares parmi les différentes installations spécifiées dans le *tableau 13* page 48. Encore une fois, la synthèse réalisée par Lyonnaise des Eaux-Dumez, montre que les coûts de ce procédé pour une membrane minérale en oxyde de titane (support alumineux Al₂O₃) sont les suivants :

- coût d'investissement de 2000 à 4000 F/m³/jour pour une capacité de 15 m³/h et 1400 à 3000 F/m³/jour au-delà d'une capacité de 150 m³/h,
- coût d'exploitation de 0,60 à 1,50 F/m³.

Ces données fournissant des chiffres du simple au double mériteraient d'être affinées pour pouvoir les comparer à ceux obtenus pour l'ultrafiltration. Il semble néanmoins que le coût d'investissement soit dans tous les cas beaucoup plus conséquent.

L'installation de Saint-Maurice-les-Chateaufort fonctionnant sur ce principe ne peut fournir des résultats concluants sur ce point puisqu'elle n'est utilisée que 1 à 2 mois par an.

3.3 Nanofiltration

La nanofiltration utilisée pour le traitement d'eau potable est mise en oeuvre, nous l'avons vu, dans quelques cas spécifiques à travers le monde pour un dessalement partiel, voire en France pour des eaux de procédé (exemple de la Française de Brasserie).

Les expérimentations de Méry-Sur-Oise n'ont jusqu'alors pas fourni d'éléments chiffrés quant au coût.

Par ailleurs, la technique de nanofiltration nécessite toujours un prétraitement (acidification, injection de séquestrant, préfiltration à 10 μm) et un post-traitement pour rééquilibrer l'eau.

Nous disposons ainsi des expériences industrielles suivantes pour fournir des éléments économiques :

- l'installation industrielle réalisée à titre expérimental pendant plus de 6 mois à Sept Îles et Rawdon (Québec) sur des membranes fibres creuses Zenon de type polysulfone (essai à 5000 et 500 m^3/jour),
- les installations américaines de Floride sur des eaux saumâtres,
- les installations mises en oeuvre dans l'industrie (Eaux de process ou Eaux de tour de refroidissement).

3.3.1 Traitement direct d'eaux brutes douces de faible turbidité, colorées et chargées en précurseurs de THM

L'évaluation économique réalisée sur le pilote de nanofiltration des eaux du lac de Sept Îles est très complète ; elle montre que le coût d'investissement de 11,6 MF (en prenant un taux de conversion de 5 F pour le Dollar canadien en 1990) pour une capacité d'usine de 500 m^3/j , implique un coût initial de l'ordre de 2000 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$ [79].

Les coûts d'exploitation sont répartis en 0,10 F/m^3 pour l'énergie, moins de 0,01 F/m^3 pour le nettoyage chimique, 0,15 F/m^3 pour le renouvellement sur la base d'une durée de vie de 6 ans, 0,35 F/m^3 pour la maintenance globale de l'installation soit au total environ 0,65 F/m^3 .

Le flux de traitement est de 35 $\text{l}/\text{h}/\text{m}^2$ à 13° C et l'énergie requise de 0,45 kWh/m^3 .

Le coût des membranes, à savoir 150 F/m^2 pris comme base de calcul, et proposé par le fabricant, est néanmoins discuté par les auteurs .

3.3.2 - Traitement direct d'eaux saumâtres chargées en précurseurs de THM

Mise en oeuvre sur différentes installations en Floride avec toutes les étapes de prétraitement évoquées précédemment, la nanofiltration réalisée avec une membrane spiralée d'un seuil de coupure de 300 D, a fourni les résultats suivants [74] :

- coût d'investissement : 4000 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$ pour une capacité de 15 m^3/h à 2000 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$

- pour une capacité de 1000 m^3/h ,
- coût d'exploitation : 1,50 à 1 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$ en passant de 15 m^3/h à 1000 m^3/h .

Le flux de filtration était de l'ordre de 30 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$ et la consommation énergétique de 0,6 kWh/m^3 .

3.3.3 Bilan effectué sur les eaux de procédé

Une courbe de coût d'investissement pour les unités de traitement de nanofiltration dans le domaine des eaux de procédé (par exemple destinées à la dilution de boisson telles que les bières) a été proposée. Elle inclut le coût lié au génie civil, et de prétraitement. Pour la Française de Brasserie, celui-ci comportait une coagulation sur filtre, une acidification à l'acide sulfurique, l'injection d'hexamétophosphate de calcium, puis un dégazage du CO_2 dissous [65].

La figure 17 (page 44) montre que les coûts évoluent de 4000 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$ sur des installations de capacité inférieure à 50 m^3/h à 2000 $\text{F}/\text{m}^3/\text{jour}$ pour une capacité de 4000 m^3/h . On voit que ceux-ci ne sont pas très éloignés de ceux évoqués au paragraphe précédent.

Une comparaison entre la nanofiltration et l'osmose inverse a été effectuée dans la préparation d'une eau industrielle destinée à alimenter une tour de refroidissement d'une capacité de 4500 m^3/jour .

Pour une capacité de 4000 m^3/jour , on retiendra que :

- le coût d'investissement est de l'ordre de 3,3 MF ; le système de recirculation est plus coûteux pour l'osmose inverse mais les membranes de NF sont 20 % plus chères,
- le coût d'exploitation est de 1,70 F/m^3 pour la NF et 1,90 F/m^3 pour l'OI en prenant un taux de conversion de 6 F pour le dollar américain.

3.4 Coût des techniques de filtration sur membrane en affinage

Comme nous l'avons évoqué au chapitre II.1.3, les techniques d'ultrafiltration + CAP et de nanofiltration sont désormais comparées aux techniques classiques utilisées aujourd'hui pour affiner l'eau après clarification et filtration à savoir la peroxydation ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) suivie d'une filtration sur charbon actif en grain (CAG).

Le tableau 7 (page 44) montre que les chaînes de traitement avec membrane coûtent beaucoup plus cher que le traitement conventionnel mais que cette différence diminue pour des stations de plus faible capacité [65].

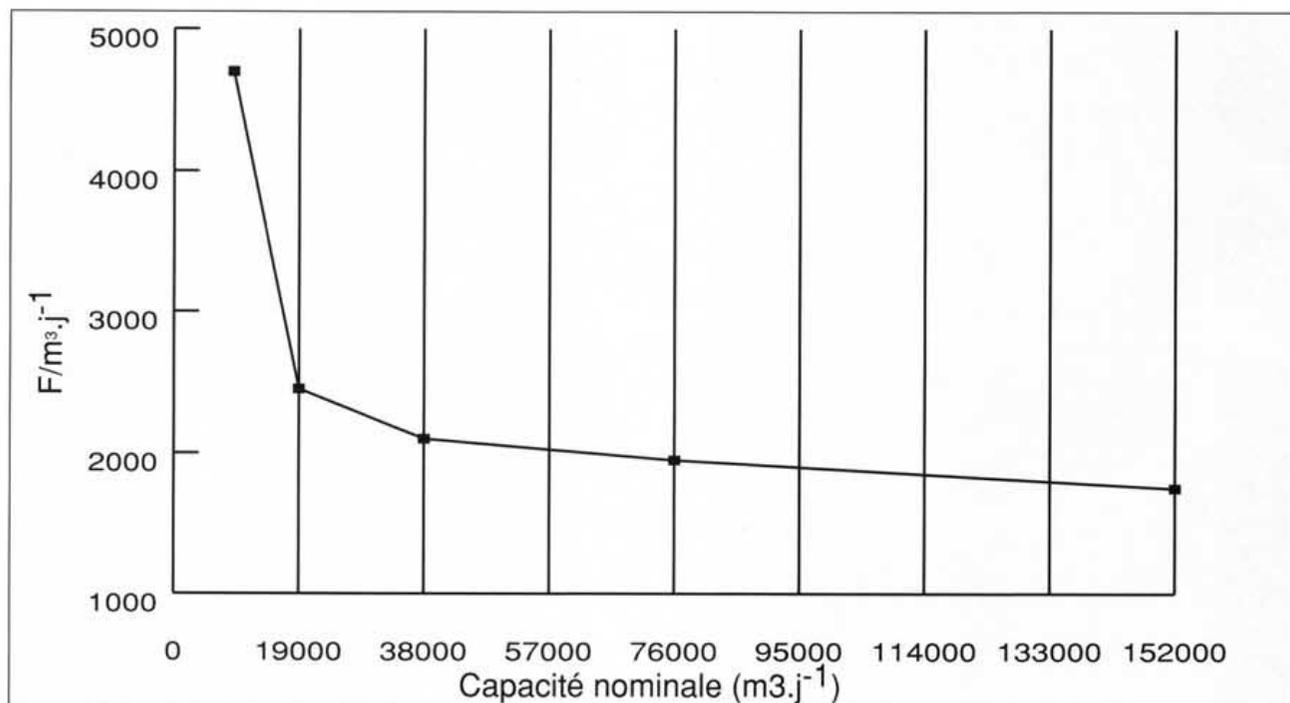


Figure 17 : Nanofiltration - Coût d'investissement - d'après [65]

CAPACITE DE L'INSTALLATION	CHAINE DE TRAITEMENT	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m³/jour	COUTS D'EXPLOITATION F/m³ *
2300 m³/h 10 millions m³/an	Préozonation/ décantation/filtration sable/pérozonation (O ₃ /H ₂ O ₂) filtration sur CAG	1400	0,40
	Préozonation/ décantation/ filtration, pérozonation (O ₃ /H ₂ O ₂) combinaison de traitement UF+CAP	1800	0,75
	Préozonation/ décantation/filtration/ nanofiltration	2250	1,10
50 m³/h 250 000 m³/an	Décantation, filtration, CAG	3600	0,40
	Décantation, filtration combinaison de traitement CAP+UF	3500	0,60
	Décantation, filtration, nanofiltration	3800	1,20

* Hors coûts de main d'oeuvre et d'amortissement de l'investissement

Tableau 7 : Comparaison des coûts d'investissement des chaînes de traitement conventionnel et des chaînes incluant des membranes - d'après [65]

L'affinage par nanofiltration en comparaison d'un affinage par combinaison UF + CAP coûterait plus cher de 25 % en termes d'investissement et près de 50 % en termes de fonctionnement. Ceci est grandement lié aux pré-traitements et post-traitements nécessaires. Pour certains chercheurs, l'UF + CAP présenterait en plus l'avantage de mieux éliminer les pesticides, ce qui reste à démontrer au stade industriel à grande échelle.

L'extension future de Méry-sur-Oise pourrait sur ce point apporter bien des éléments de jugement nouveaux.

4) Bilan : guide de choix [51] [53] [111] [126]

De manière à exploiter l'ensemble des données fournies dans ce chapitre, il nous paraît judicieux de réaliser un guide de choix représenté par les tableaux 8, 9, 10, 11, 12, 13 (pages 46 à 48) ; celui-ci, rappelant les coûts et les modes de fonctionnement des procédés, présente les différents types d'eaux pour lesquelles les techniques de filtration sur membranes ont un réel intérêt en vue de leur potabilisation et sont économiquement viables par rapport aux techniques conventionnelles.

Dans certains cas, plusieurs techniques sont présentées dans un souci d'exhaustivité, mais aussi de façon à éviter un parti pris. La qualité des eaux traitées n'est pas rappelée mais il suffit de se référer au chapitre II - 1 pour retrouver les données qualitatives. Cependant, les techniques sélectionnées pour traiter un type d'eau donnée délivrent toutes une eau de qualité comparable (pouvoir d'élimination ou d'abattement proche pour les paramètres visés).

La présentation de ce guide s'appuie enfin en grande partie sur la synthèse réalisée par le CIRSEE en 1993, mais est réduite de manière à être plus directement exploitable. Les données ont néanmoins été comparées à d'autres publications pour rechercher l'impartialité.

Le choix d'un procédé membranaire est fonction de la qualité de la ressource d'eau brute, de l'objectif visé d'un point de vue qualité d'eau traitée, du coût d'investissement et de production. Les performances de technologies membranaires ne doivent pas cependant faire oublier la nécessité d'agir de façon préventive dans tous les cas sur la qualité de l'eau brute contaminée. Pour une pollution bactériologique, par exemple, dont l'origine peut être décelée en amont (rejets d'eaux usées mal maîtrisés, ...), il sera plus cohérent de lutter à la source que d'installer des modules membranaires aussi performants soient-ils [51], [53], [111], [126].

Les procédés de traitement par membranes sont donc intéressants notamment lorsque la pollution est chronique, (eaux brutes turbides après des événements pluvieux, eaux colorées par des matières organiques dissoutes, présence de précurseurs de THM, ...) et lorsque l'affinage s'avère absolument nécessaire du fait de contamination organique ou minérale spécifique (pesticides, ions prédominants au-delà des concentrations admissibles, ...).

Par ailleurs, pour soutenir des pointes de consommation en eau potable, ce qui est notamment le cas pour des collectivités à vocation touristique (stations balnéaires ou stations de ski, ...), des skids de modules membranaires facilement transportables et automatisables peuvent être une solution envisageable.

Les considérations économiques montrent en effet que pour de petites stations (jusqu'à 150 m³/h), l'ultrafiltration et la microfiltration sont compétitives pour traiter certaines eaux brutes par rapport aux techniques conventionnelles.

L'ultrafiltration combinée au charbon actif en poudre semble aussi bien placée par rapport à l'affinage classique, tout comme la nanofiltration qui pourra sans doute s'appliquer aussi à des cas singuliers de pollution minérale.

PROCEDES MEMBRANAIRES	CARACTERISTIQUES	DEBIT m³/h	COUTS D'EXPLOITATION F/m³	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m³/jour	FONCTIONNEMENT
ULTRAFILTRATION 100 kD	Fibre creuse cellulosique	15 m³/h > 150 m³/h	0,60 à 0,90 voire 0,45 (1) 0,60 à 0,90 voire 0,40 (1)	1500 - 2500 (2) 1100 à 1400	Flux : 100 à 140 l/h/m² Nettoyage lessiviel: 2 à 6 fois/an Perte en eau : env. 5 % Pression : 0,6 bar Rétrolavage : 1 fois/semaine
ULTRAFILTRATION (0,005 µm) + COAGULATION	Fibre tubulaire oxyde de titane + zirconium Dosage du coagulant : -	15 m³/h > 150 m³/h	1,20 à 2,80 1,20 à 2,65	3200 à 6000 2800 à 6000	Flux : 150 à 300 l/h/m² Nettoyage lessiviel: 1 fois/semaine Perte en eau : env. 5 % Pression : 1 bar Rétrolavage : -
MICROFILTRATION (0,2 µm)	Fibre creuse polypropylène	15 m³/h > 150 m³/h	0,75 (1)- > 0,40 (3) idem	env. 1500 env. 1100	Flux : 120 l/h/m² Nettoyage lessiviel : 6 à 16 fois/an Perte en eau : - Pression : 0,5 à 1 bar Rétrolavage : 1 à 2 fois/heure
MICROFILTRATION (0,2 µm) + COAGULATION	Tubulaire oxyde de titane Dosage du coagulant	15 m³/h > 150 m³/h	0,70 à 1,60 (4) 0,65 à 1,45	2100 à 4000 1400 à 3000	Flux : 300 à 600 l/h/m² et jusqu'à 1500 l/h/m² (4) Nettoyage lessiviel: 1 fois/semaine Perte en eau : env. 5 % Pression : 1 à 2 bar Rétrolavage : -

- : Données non communiquées

Tableau 8 : Traitabilité des eaux brutes de bonne qualité (COT faible) à turbidité variable

Exemple : - Eaux de surface peu chargées en matières organiques ou minérales

- Eaux souterraines d'origine karstique

d'après (1) [53] - (2) [126] - (3) [111] - (4) [51]

PROCEDES MEMBRANAIRES	CARACTERISTIQUES	DEBIT	COUTS D'EXPLOITATION F/m³	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m³/jour	FONCTIONNEMENT
ULTRAFILTRATION + CAP	. Fibre creuse cellulosique . 5 à 10 mg/l de CAP . Préfiltration à 200 µm nécessaire	15 m³/h > 150 m³/h	0,60 à 1,10 0,50 à 1,10	Env. 2300 à plus 1200 à 1500	Flux : 140 l/h/m² Nettoyage lessiviel : 2 fois/an Perte en eau : env. 5 % Pression : - Rétrolavage : -

- : Données non communiquées

Tableau 9 : Traitabilité des eaux brutes de bonne qualité contenant des pesticides