

PROCEDES MEMBRANAIRES	CARACTERISTIQUES	DEBIT	COUTS D'EXPLOITATION F/m3	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m3/jour	FONCTIONNEMENT
ULTRAFILTRATION UF (100 kD) + CAP	. Fibre creuse cellulosique . 20 à 40 mg/l de CAP	15 m³/h > 150 m³/h	- -	- -	Flux : 100 l/h/m² Nettoyage lessiviel: 6 fois/an Perte en eau : 15 à 20 % Pression : 0,8 bar jusqu'à 1,5 bar Rétrolavage : 2 fois/heure
OXYDATION + COAGULATION + MF (0,2 µm)	. Fibre d'oxyde de titane sur support Al ₂ O ₃ . Dosage du coagulant : 50 à 150 mg/l . Ozonation à 2,3 mg/l	15 m³/h > 150 m³/h	2,15 env. 2,0	4500 3000 - 3500	Flux : 300 l/h/m² Nettoyage lessiviel : - Perte en eau : 5 % Pression : - Rétrolavage : 2 fois/heure
OXYDATION +CAP + UF (100 kD)	. Fibre creuse cellulosique . CAP à 30 mg/l . Ozonation à 3 mg/l (NB : élimine les problèmes de goûts et d'odeurs)	15 m³/h > 150 m³/h	1,35 1,10 à 1,30	3000 2000 - 2200	Flux : 100 l/h/m² Nettoyage lessiviel : 4 à 8 fois/an Perte en eau : 15 à 20 % Pression : 0,8 jusqu'à 5 bars Rétrolavage : 2 fois/heure

- : Données non communiquées

Tableau 10 : Traitabilité des eaux brutes de qualité moyenne contenant des pesticides et/ou des précurseurs de THM

PROCEDES MEMBRANAIRES	CARACTERISTIQUES	DEBIT	COUTS D'EXPLOITATION F/m3	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m3/jour	FONCTIONNEMENT
ULTRAFILTRATION BASSE (500 D)	. Fibre creuse polysulfone . Préfiltration à 100 µm	> 150 m³/h	0,85	Env. 1900	Flux : 35 l/h/m² Nettoyage lessiviel: 1 fois/mois Perte en eau : env. 25 % Pression : - Rétrolavage : -

NB : - La nanofiltration qui nécessite toujours des prétraitements n'est pas économique sauf si les eaux considérées sont dures ou contiennent des ions bivalents à fortes concentrations. Elle élimine toujours néanmoins la couleur de l'eau.

- Les précurseurs de THM sont aussi éliminés en ultrafiltration basse.

- : Données non communiquées

Tableau 11 : Traitabilité des eaux brutes de bonne qualité faiblement turbides colorées

PROCEDES MEMBRANAIRES	CARACTERISTIQUES	DEBIT	COUTS D'EXPLOITATION F/m3	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m3/jour	FONCTIONNEMENT
NANOFILTRATION (300 D)	. Produit composite spiralé . Séquestrant . Acidification . Préfiltration à 10 µm . Aération après traitement	15 m³/h > 150 m³/h	1,50 1 à 1,30	4000 2000 à 3000	Flux : 30 l/h/m² Nettoyage lessiviel: 2 fois/an Perte en eau : 15 à 20 % Pression : 5 à 10 bars Rétrolavage : -

- : Données non communiquées

Tableau 12 : Traitabilité des eaux dures ou saumâtres contenant éventuellement des pesticides et/ou des précurseurs de THM

PROCEDES	CARACTERISTIQUES	DEBIT	COUTS D'EXPLOITATION F/m ³	COUTS D'INVESTISSEMENT F/m ³ /jour	FONCTIONNEMENT
OXYDATION + CAP + UF (100 kD)	. Fibre creuse cellulosique . CAP dosé à 10 ou 20 mg/l . Ozonation à 2 mg/l (problèmes d'odeurs et de goûts notamment)	15 m ³ /h > 150 m ³ /h	0,85 0,60 à 0,80	2800 1600 à 1800	Flux : 180 l/h/m ² Nettoyage lessiviel : 2 fois/an Perte en eau : 15 % Pression : - Rétrolavage : 1 fois/2 à 3 heures
NANOFILTRATION (300 D)	. Produit composite spiralé . Prétraitement et post-traitement	15 m ³ /h > 150 m ³ /h	- 1,10 à 1,30	- 2000 à 3700	Flux : 25 l/h/m ² sous 7 bars Nettoyage lessiviel : 2 fois/an Perte en eau : 20 % Pression : 7 bars Rétrolavage : aucun

- : Données non communiquées

Tableau 13 : Traitabilité des eaux clarifiées
Traitement d'affinage pour éliminer les pesticides ou des molécules organiques



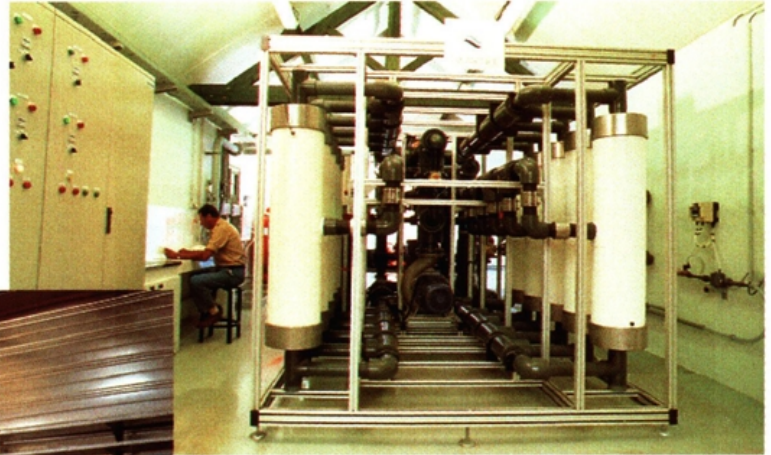
1



2



3



4



5

1 - Rétention de particules à la surface d'une membrane de microfiltration (photo HYDREX)

2 - Station d'ultrafiltration d'Avoriaz - Haute Savoie (3 000 m³/jour) (photo AQUASOURCE) (voir p. 38)

3 et 4 - Station d'ultrafiltration d'Urzy - Nièvre (1 200 m³/jour) (photo AQUASOURCE)

5 - Pilote de nanofiltration de Méry-Sur-Oise - Val-d'Oise (photo SEDIF - Compagnie Générale des Eaux)

L'emploi des membranes en traitement des eaux résiduaires contribue à résoudre plusieurs problèmes délicats des stations biologiques conventionnelles : la séparation de la biomasse dans les clarificateurs, la nécessité de dimensionner les bioréacteurs avec des volumes élevés (la biomasse active ayant une croissance faible), la rigueur croissante des législations sur le rejet des effluents de station d'épuration et enfin la possibilité de recycler ou de réutiliser les eaux usées dans certains pays déficitaires [10], [128], [129].

L'application des techniques membranaires a été envisagée à plusieurs niveaux dans les filières :

- après la sédimentation primaire (UF, MF),
- dans un traitement physico-chimique de coagulation floculation (MF),
- en traitement secondaire, incluses dans le bassin de boues activées (MF) ou conçues comme un ouvrage remplaçant le décanteur secondaire (UF, OI, MF, ED),
- en traitement tertiaire à la suite d'une décantation secondaire (UF, NF, OI, MF, ED).

Il reste que certaines études sont difficiles à classer suivant la position de l'unité membranaire au sein de la filière. Par exemple, on trouve des implantations de membranes asso-

ciées à un bassin de boues activées et remplissant également des objectifs de traitement tertiaire. On rappelle donc le mode de classement retenu : le traitement secondaire permet d'éliminer DCO, DBO, MO (voire de l'azote et du phosphore dans certains cas) ; le traitement tertiaire intervient sur un effluent clarifié et vise le traitement des bactéries.

1) Membranes associées au traitement physico-chimique [10] [130]

Des essais d'UF ou de MF ont été réalisés sur des eaux décantées (issues d'une décantation primaire) mais cette solution n'a pas été retenue pour des raisons techniques, en effet, les matières organiques colmatent très rapidement les membranes en acétate de cellulose.

La microfiltration tangentielle, couplée à une coagulation-floculation, a été testée sur des eaux usées. Différents taux de traitement au sulfate d'aluminium sont appliqués à l'eau. On cherche à promouvoir la formation de microflores avant passage sur les modules de filtration. La DCO, la couleur, la turbidité, le dénombrement d'"Escherichia Coli" sont les paramètres de suivi du traitement. Les résultats sont regroupés dans le *tableau 14* et témoignent d'une épuration efficace [10], [130].

Taille des pores µm	Flux l/m ² .h	DCO mg O ₂ /l		Escherichia Coli nbre/100 ml		Couleur degré Hazen		Turbidité NTU	
		Eau brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée
0,45	230	125	40	1 x 10 ⁸	10	200	< 5	25	0,1

Vitesse : 5,14 m/s - Pression transmembranaire : 0,9 bar - Membrane en acétate de cellulose - T = 32,5° C
Eaux usées de l'Institut Technologique d'Asie, Bangkok

Tableau 14 : Performances de la microfiltration tangentielle sur des eaux usées, couplée à une coagulation-floculation - d'après [130]

2) Membranes intégrées au traitement secondaire [2]

L'emploi d'une membrane en complément du réacteur biologique, soit immergée dans le réacteur lui-même, soit située en aval dans un ouvrage individualisé, amène à concentrer la biomasse dans le réacteur sans avoir à gérer les problèmes d'épaississement insuffisant.

La limite au développement des techniques membranaires dans ce domaine semble être les faibles débits à travers les membranes, qui se situent aux environs de 30 l/h/m², sur les systèmes aérobies et 60 l/h/m² sur les systèmes anaérobies, qui conduit à la mise en oeuvre de surfaces de membranes élevées [2].

2.1 Immersées dans le réacteur biologique, essais pilotes [10] [131] [132] [133] [134] [135]

On a étudié le comportement de fibres creuses immergées dans le réacteur alimenté avec une eau usée synthétique [131].

Le fonctionnement des membranes est assuré par succion sous basse pression (0,1 bar).

L'expérience porte sur l'évolution de la DCO et de la turbidité dans un procédé aérobie, pendant une durée de 50 jours. La charge dans le réacteur est de 1 kg DCO/m³/jour. L'effluent obtenu a toujours une

DCO inférieure à 10 mg/l, pour une DCO à l'entrée de 90 à 140 mg/l. La turbidité de 18 à 25 NTU avant traitement est réduite à 2 à 3 NTU après traitement.

Les membranes peuvent être immergées également dans des bassins anaérobies. Le schéma 15 représente le montage du pilote. Les performances sont évaluées soit en fonction des temps de rétention hydraulique appliqués, soit en fonction du suivi des débits de perméat (les débits sont élevés si les temps de rétention sont courts), soit enfin grâce au suivi de la pression transmembranaire. Le contrôle du traitement consiste à suivre les valeurs de la DCO, l'azote Kjeldahl, l'ammonium et les orthophosphates [132].

Dans cette comparaison entre les bassins aérobies et anaérobies il apparaît que les réacteurs anaérobies sont plus intéressants au plan énergétique dès lors que les temps de rétention sont compris entre 3 et 6 heures et les réacteurs aérobies seront préférés si les temps de rétention restent inférieurs à 1 heure (l'aération limite le colmatage des membranes). Les performances, par contre, sont équivalentes quel que soit le réacteur, à savoir une DCO de l'eau traitée inférieure à 20 mg O₂/l et pas d'élimination des orthophosphates. L'azote Kjeldahl est éliminé à 70 - 90 % en conditions anaérobies et à plus de 95 % en conditions aérobies.

Le traitement en bassin anaérobie a ainsi été expérimenté sur les eaux usées domestiques de l'Institut Technologique d'Asie à Bangkok sur plusieurs jours.

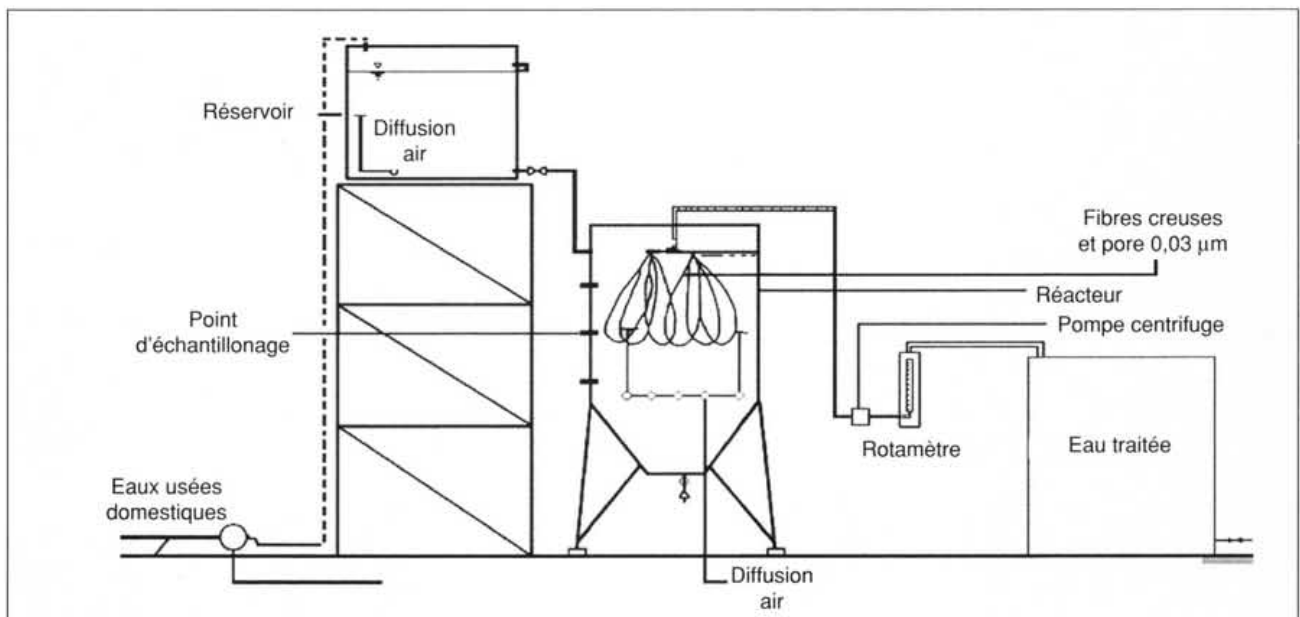


Schéma 15 : Réacteur biologique équipé de membranes - d'après [132]

La turbidité de l'eau brute oscille entre 15 et 35 NTU dans la journée, l'effluent atteint une turbidité constante de 0,5 NTU. L'élimination de la DCO est bien assurée : pour une eau brute de 70 à 280 mg O₂/l, l'eau traitée est caractérisée par une DCO de l'ordre de 5 à 10 mg O₂/l. L'étude complète du réacteur comprend les évolutions de l'azote en fonction des conditions opératoires. Si un tel procédé est effectivement plus onéreux que les traitements conventionnels, l'eau produite est cependant de meilleure qualité et l'encombrement est réduit.

D'autres expériences ont été menées pour des eaux domestiques ; on a proposé un traitement à l'échelle individuelle avec l'implantation de membranes dans des fosses septiques (équivalentes à des décanteurs-digesteurs). Il

semblerait que ces applications n'aient pas pour l'instant dépassé le stade de la faisabilité, essentiellement en raison des phénomènes de colmatage des membranes [10], [133], [134], [135].

2.2. Couplage bioréacteur - Unité membranaire (Essais pilotes) [2] [99] [136] [137] [138] [139] [140] [141] [142] [143] [144] [145]

Le bioréacteur à membrane (BRM) consiste à associer un réacteur biologique et une membrane d'ultra ou de microfiltration (schéma 16), [99] [136].

Le schéma 17 décrit ce principe. La membrane située à l'extérieur du bioréacteur retient la biomasse qui est ainsi recyclée en intégralité.

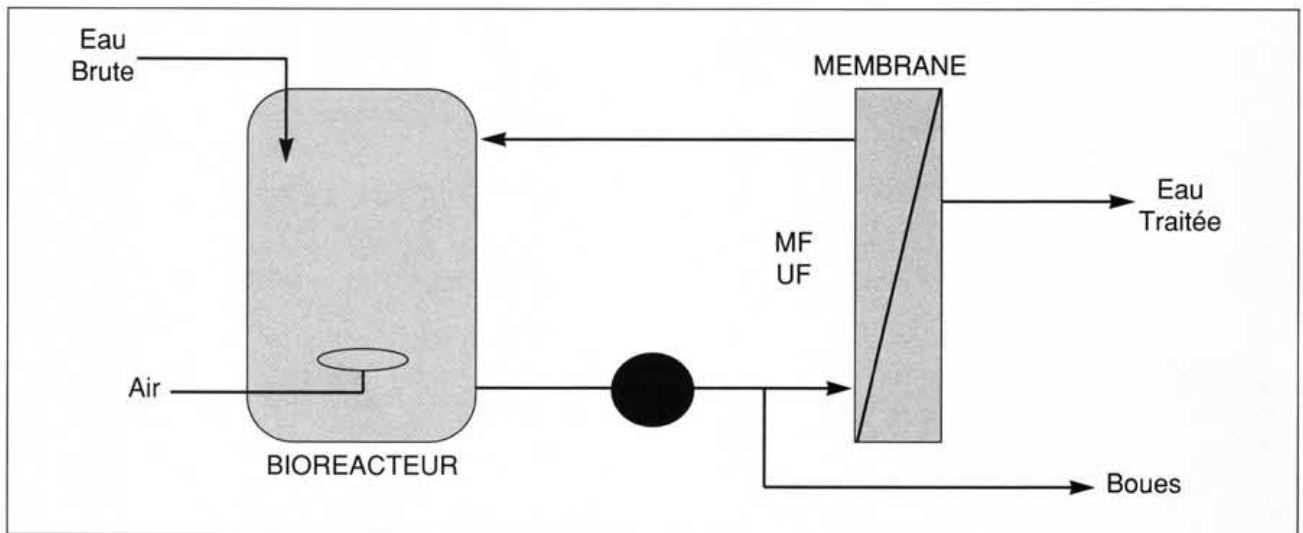


Schéma 16 : Principe du bioréacteur à membrane - d'après [136]

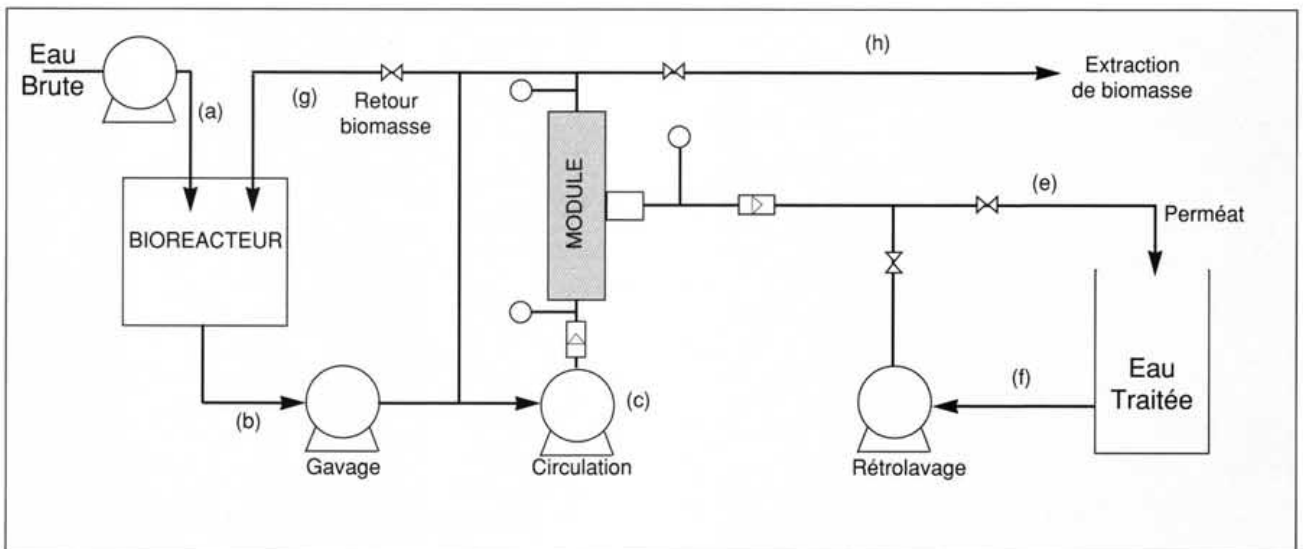


Schéma 17 : Schéma de principe du bioréacteur à membrane de 1ère génération - d'après [136]

L'eau brute est injectée dans le bioréacteur (a), mise ainsi en contact avec la biomasse. Ce mélange est pompé vers la membrane (b). Tandis que le perméat est collecté et stocké dans la bache d'eau traitée (e), la biomasse retenue est réinjectée dans le bioréacteur (g). Le colmatage est contrôlé en appliquant une vitesse de transit élevée dans le module grâce à la pompe de circulation (c). Le décolmatage est assuré par rétrolavage avec l'eau traitée (f) ou par traitement chimique.

Ainsi les BRM permettent à la fois de réaliser un traitement biologique et une élimination des microorganismes présents dans l'effluent, de contrôler d'une part le temps de séjour hydraulique et d'autre part le temps de séjour de la biomasse (en purgeant le système éventuellement (h)). Ceci implique une grande souplesse d'utilisation notamment au niveau des variations de charges hydrauliques du système, et du contrôle de l'âge des boues.

Les forts taux de biomasse obtenus autorisent des charges volumiques conséquentes, donc une grande compacité du système.

Dans tous les cas, pour des applications sur bioréacteurs aérobies, anoxies ou anaérobies de type "complètement mélangés", la concentration élevée en biomasse nécessitera des vitesses tangentiels de circulation de 1,5 à 2 m/s de façon à éviter le colmatage rapide des membranes.

La consommation énergétique et les coûts d'investissement dépendants du flux de perméat et du coût de la membrane nécessiteront d'être optimisés pour que ces techniques puissent être concurrentielles des techniques classiques. Parallèlement, des réactions biologiques dans un espace confiné, tel qu'un BRM, devront être mieux comprises pour atteindre des rendements intéressants.

Dans le cadre du projet japonais "Renaissance 90", des études systématiques de modules membranaires ont ainsi été réalisées en site industriel (fermentation alcoolique, papeteries, eaux résiduares urbaines). Les performances de certaines membranes et les consommations énergétiques ont été ainsi évaluées [137].

Deux pilotes respectivement, de 20 m³/j et 10 m³/j ont été implantés sur les stations d'épuration des villes Kujisawa et Arigusaki, avec des réacteurs anaérobies.

Le schéma 18 indique la filière de traitement sur Fujisawa. Les résultats énergétiques sont bons puisqu'on annonce 0,37 kWh/m³ de perméat [137], [138], [139] pour un abattement de DCO de 1500 à 2200 mg d'O₂/l en entrée à 30 à 70 mg d'O₂/l en sortie.

On a aussi développé un modèle de calcul de flux de perméat en fonction de la teneur en MES, d'un effluent provenant d'un réacteur biologique de dénitrification traitant les excréments humains. Ce modèle a été appliqué sur le pilote présenté dans le schéma 19 (page 54). Celui-ci montre la présence de deux modules membranaires montés en série et le tableau 15 (page 54) donne les résultats obtenus par exemple pendant la saison d'automne. Le réacteur de dénitrification est alimenté en discontinu avec l'effluent brut aéré. Le pH et le potentiel d'oxydo-réduction sont régulés automatiquement.

On notera que le rapport DBO/azote de l'effluent brut prétraité est faible mais que l'ultrafiltrat ne contient plus que 30 mg/l d'azote environ. La concentration en MES dans la liqueur mixte est forte : environ 12 g/l et le temps de rétention des boues est long. La DCO du filtrat n'est plus que de 200 à 250 mg/l [140], [141].

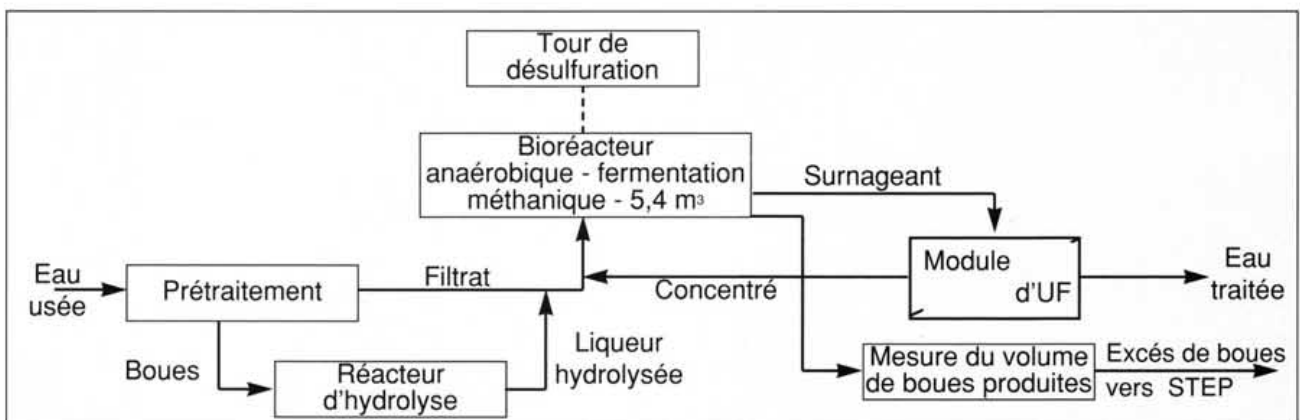


Schéma 18 : Filière de traitement de l'usine de Fujisawa 20 m³/h - d'après [137]

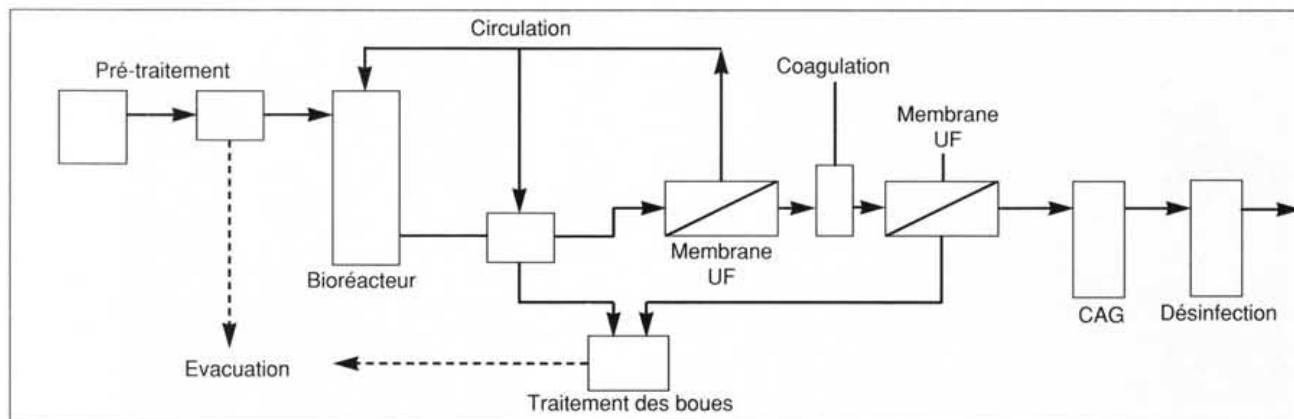


Schéma 19 : Schéma de principe de l'installation - d'après [140]

Caractéristiques de l'effluent brut (excréta humains)	
pH	7,8
DBO ₅ (mg/l)	10 200
DCO (mg/l)	5 200
MS (mg/l)	11 700
NGL (mg/l)	3 600
Caractéristiques de l'effluent prétraité	
pH	8
DBO ₅ (mg/l)	6 300
DCO (mg/l)	2 800
MS (mg/l)	4 500
NGL (mg/l)	2 700
Caractéristiques de l'eau ultrafiltrée	
pH	7,7
DBO ₅ (mg/l)	-
DCO (mg/l)	185
MS (mg/l)	< 2
NGL (mg/l)	30

NGL = Azote global
MS = Matières Sèches

Tableau 15 : Performances obtenues en Automne par une unité d'ultrafiltration couplée à un réacteur biologique de dénitrification - d'après [140]

A Danske Sukker, un module d'ultrafiltration a été associé à un réacteur biologique pour optimiser les concentrations en biomasse, les temps de rétention hydraulique et les temps de rétention de boues.

Les meilleurs résultats épuratoires s'obtiennent avec un temps de rétention hydraulique de l'ordre de 2 h et un temps de rétention des boues de l'ordre de 100 jours [142].

En France, les bioréacteurs à membrane de

première génération ont été mis en oeuvre par le CIRSEE, notamment dans les Yvelines sur des eaux résiduaires urbaines dégrillées et dessablées collectées par un réseau unitaire [136].

Le réacteur d'un volume de 1000 litres est aéré par "grosses bulles" et les boues sont filtrées tangentiellement sur 1 m² de membranes céramiques d'un seuil de coupure 0,1 µm. L'âge des boues étant fixé à 25 jours sur une période de 6 mois, deux charges volumiques de 0,19 kg DBO₅/m³.j et 0,45 kg DBO₅/m³.j ont été testées.

A 0,19 kg DBO₅/m³.j, la biomasse s'est stabilisée à 1,7 kg MVS/m³.j soit une charge massique de 0,07 kg DBO₅/kg MVS.j et la production de boues dans ces conditions atteignait 0,53 kg MVS/kg DBO₅.

La capacité d'élimination de la matière organique a ainsi été jugée supérieure à celle d'une boue activée classique pour un âge de boue comparable de 25 jours (cas d'une aération prolongée), avec des performances de filtration de 60 à 100 l/h/m² à 20° C, ce qui dépasse tous les résultats connus obtenus jusqu'à présent.

La qualité de l'eau traitée présentée *tableau 16* montre que près de 98 % de DCO est éliminée et que la nitrification est complète, la charge éliminée dépassant 0,035 kg N/m³.jour.

	EAU BRUTE	EAU TRAITÉE
MES (mg/l)	216 ± 157	absence
DCO (mg/l)	488 ± 143	20 ± 8
DBO ₅ (mg/l)	182 ± 56	< 10
N-NH ₃ (mg/l)	35 ± 6	<1
Coliformes totaux	non déterminés	absence dans 100 ml

Tableau 16 : Qualité de l'eau traitée lors du traitement d'ERU par BRM - d'après [136]

L'institut de technique sanitaire de l'université de Stuttgart a aussi de son côté développé des réacteurs pilotes à biomembrane pressurisée mais pour traiter des eaux usées industrielles. Pour mémoire, notons que des valeurs de DCO de 100 mg/l ont été obtenues pour des DCO initiales de 43000 mg/l sur des eaux usées d'industries alimentaires.

Le groupe de génie de procédés de l'université de Montpellier a par ailleurs récemment montré par des études pilotes que [143] [144] :

- la vitesse d'épuration carbonée obtenue sur un bioréacteur aérobique couplé à la microfiltration pouvait atteindre sous certaines conditions opératoires de circulation et de culture 4 g DCO/gMVS.j, l'efficacité de l'épuration étant de l'ordre de 80 % en DCO (les essais ont été réalisés en réacteur fermé).

L'intensification des réactions biologiques du fait de la recirculation des boues est ainsi confirmée : l'augmentation de la concentration moyenne en MVS influe positivement sur la vitesse de dégradation du substrat,

- la déstabilisation chimique ou électrochimique des eaux usées (électrocoagulation-flottation par exemple) préalablement au traitement par procédé membranaire MF permet de limiter le colmatage des membranes et d'obtenir des flux de perméation de l'ordre de 300 l/h/m² jamais atteints et intéressants industriellement. En fait, la distribution "granulométrique" des particules présentes dans les eaux usées influencerait notablement sur le colmatage de la membrane, et un tel prétraitement diminuerait la fraction particulaire supracolloïdale ou inférieure à 1 µm qui serait la cause principale du colmatage.

2.3 Réalisations industrielles [2] [50] [99] [137] [139] [144] [145] [146]

Le Japon confronté à un problème particulier de traitement d'eau en site urbain s'est le premier intéressé à ces techniques d'épuration par bioréacteurs. En effet, la réglementation japonaise impose aux constructeurs d'immeubles la mise en place de dispositifs permettant un traitement sur place des eaux utilisées. Le coût de l'eau potable représente environ le double du prix français (20 à 22 F/m³) et contribue à promouvoir la recherche de solutions de recyclage performantes.

Pour effectuer le traitement, les constructeurs installent dans le sous-sol des immeubles, des systèmes de traitement physico-chimiques comme la floculation, l'oxydation biologique en bassin fermé (contraintes de place, problèmes d'odeurs ou d'aérosols toxiques), la filtration, l'adsorption.

Le Ministère International du Commerce et de l'Industrie Japonais a développé depuis 1985, et pour six ans, le projet Aqua-Renaissance 90, programme ambitieux de recherche et de développement technologique. Les objectifs concernent les économies d'énergie et d'espace nécessaire aux procédés biologiques. Les techniques membranaires qui produisent une eau recyclable dans les chasses d'eau des toilettes à partir d'eaux résiduelles sont donc particulièrement intéressantes. L'eau potable est distribuée par un réseau différent. Ainsi la société japonaise Mitsui Petrochemical Industry (MPC) a-t-elle acheté la licence des modules d'ultrafiltration plan Pléiade (membranes organiques), à la société Tech-Sep et développé ce système pour :

- le recyclage des eaux usées d'immeubles (Système UBIS, Ultra Biological System),
- le traitement des effluents provenant des fosses étanches (ASMEX) dont les charges en DBO et DCO sont plus importantes [137].

2.3.1 Système UBIS (schéma 20)

En 1989, on comptait 80 installations UBIS implantées au Japon (2 000 m² de membranes) [2], [139], [144], [145].

Ce système permet de traiter les eaux provenant des cuisines, lavabos, lavages de sol et toilettes qui sont introduites dans un bioréacteur agité, à boues activées fortement concentrées (15 - 20 g/l). Le temps de séjour de l'eau est de 1 heure. L'agitation importante délite les boues. A la sortie du module on procède à une injection d'air. Ces deux facteurs contribuent à améliorer l'efficacité du traitement.

Les boues ainsi délitées ne peuvent pas sédimenter facilement, c'est une des premières fonctions du module d'UF que de séparer l'eau des boues. L'eau filtrée a une teneur nulle en matières en suspension, virus et bactéries. Elle est stockée dans un bac tampon, légèrement javellisée avant d'être réutilisée dans les chasses d'eau pour les toilettes.

Le *tableau 17* (page 56) donne les valeurs moyennes de qualité de l'eau brute et de l'eau ainsi régénérée.

Le nettoyage n'intervient que lorsque le débit passe de 120 l/h.m² à 100 l/h.m², environ tous les 45 jours. Les lavages chimiques et les rinçages nécessitent environ 1 à 2 heures. La consommation énergétique est de l'ordre de 3 kWh/m³ d'eau traitée.

Le rejet des boues en excès est déshydraté par filtre presse ou acheminé vers un digesteur de boues. Le volume à traiter est toujours faible (7,5 kg MS/j pour 100 m³/j) ;

Caractéristiques principales d'une installation UBIS traitant 500 m³/j :

Surface au sol : 125 m²

Surface de membranes (4 modules UFP70) : 175 m²

Volume du bioréacteur : 31 m³

Temps de démarrage du bioréacteur : 2 semaines

Production de boues : 40 kg sec /j

Temps nécessaire au nettoyage : 70 h/an

Temps de maintenance : 35 h/an

Consommation énergétique : 3 kWh/m³

Consommation de produit de nettoyage : 0,95 F/m³

Durée de vie des membranes : 3 à 5 ans
 Prix du m³ traité avec amortissement de l'installation sur 15 ans : 10 à 12 F

Caractéristiques	Unité	Eau brute Moyenne	Eau régénérée Moyenne
Température	°C	19,5	26,3
pH	-	6,6	6,8
DCO	mg O ₂ /l	89,1	12,0
DBO	mg O ₂ /l	349	3,7
MES	mg/l	96,5	0
n-hexane extraction	mg/l	11,7	< 1
MBAS (couleur)	ppm	6,5	0,3
COLON BACILLI (Escherichia Coli)	UFC/ml	18,5 x 10 ⁴	non détecté

NB : la DCO, aux normes japonaises, est mesurée par l'oxydation au KMnO₄

Tableau 17 : Tableau de qualité de l'eau - d'après [145]

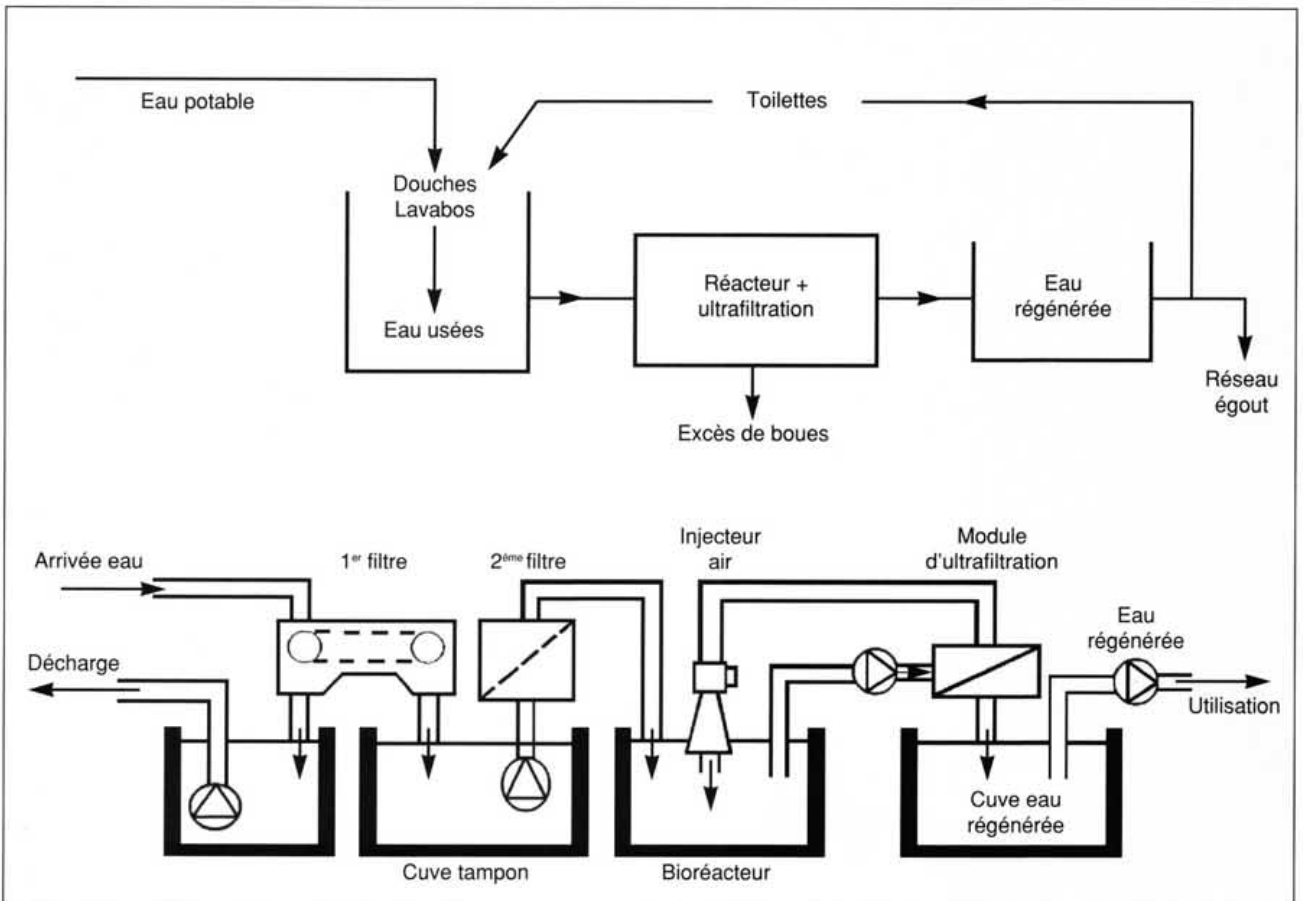


Schéma 20 : Système UBIS (Ultra bio system). Schéma général de fonctionnement - d'après [145]

2.3.2 Système ASMEX (schéma 21)
(Activated Sludge and Membrane Complex System)

Au Japon, les petites maisons individuelles ne sont pas reliées au tout à l'égout et les toilettes se déversent dans les fosses d'aisance. Tous les mois environ, des camions vidangeurs vident ces fosses pour les véhiculer aux centres de traitement. Pour économiser la surface dans ces centres, le couplage du bioréacteur à boues activées et de l'ultrafiltration a été réalisé.

La DBO des effluents bruts est de 13000 mg/l. Dans le cas du système UBIS elle était de 600 environ.

Les excréments sont déversés dans les réservoirs de stockage, tamisés pour éliminer le papier, puis envoyés dans un bioréacteur à boues activées comportant plusieurs bacs spécifiques. Le dernier bac servira de bac de travail au module d'UF. La pompe assure une vitesse de circulation de 2,5 m/s. L'ultrafiltrat passe ensuite sur des colonnes de finition :

- charbon actif qui retient la couleur,
- résines de déphosphatation (breveté).

Le temps de séjour est de 6 à 9 jours dans le bioréacteur. La teneur des boues en matière sèche est de l'ordre de 17 à 20 g/l. A la sortie du bioréacteur, la DBO est réduite de 13000 à 20 mg/l, la DCO de 7000 à 150 mg/l, l'abattement du phosphore est effectué à 75 %.

2.3.3 Essais réalisés en France au niveau industriel

Le recyclage et la réutilisation des eaux

usées urbaines en immeuble ont aussi fait l'objet d'essais industriels en France mais n'ont pas été autorisés par le Ministère de la santé. A Paris, par exemple, la Compagnie des Eaux de Paris, filiale de la Compagnie Générale des Eaux, avait installé un procédé de traitement des eaux usées et des eaux vannes en provenance d'un immeuble ; après un premier traitement biologique sur filtre Biocarbone, l'effluent était injecté dans 10 modules de microfiltration MEMCOR de 1 m² de surface. Le débit traité de 5 m³/j soit 50 % des volumes moyens d'eaux usées rejetées par l'immeuble, était enfin affiné sur charbon actif [50], [146].

Après microfiltration, la DCO, de 75 mg/l après le filtre Biocarbone, est réduite de 40 mg/l, la DBO₅ passe de 15 à 8 mg/l, la turbidité de 6 à 0,5 NTU et la couleur de 110 à 40 U.Pt.Co. Les dénombrements des germes témoins de pollution fécale indiquent l'absence de coliformes dans l'eau traitée. Le coût de revient s'approche globalement des chiffres cités sur les installations japonaises de 20 F/m³.

Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France n'a cependant pas autorisé le recyclage de cette eau dans les chasses d'eau de l'immeuble.

A Monaco, début 1994, un appel d'offre pour le traitement d'eaux usées et d'eaux vannes a néanmoins été lancé en vue de réutiliser les effluents traités pour l'irrigation de cultures et l'arrosage d'espaces verts. Il n'a donné lieu qu'à une seule proposition (OTV-HYDREX).

Notons enfin que ce sont surtout en France les centres d'enfouissement techniques (C.E.T.) qui, produisant des effluents très concentrés en sel et en matières organiques, ont donné lieu à l'installation de BRM couplé à des unités d'osmose inverse (cas d'Arnouville-les-Mantes) [99].

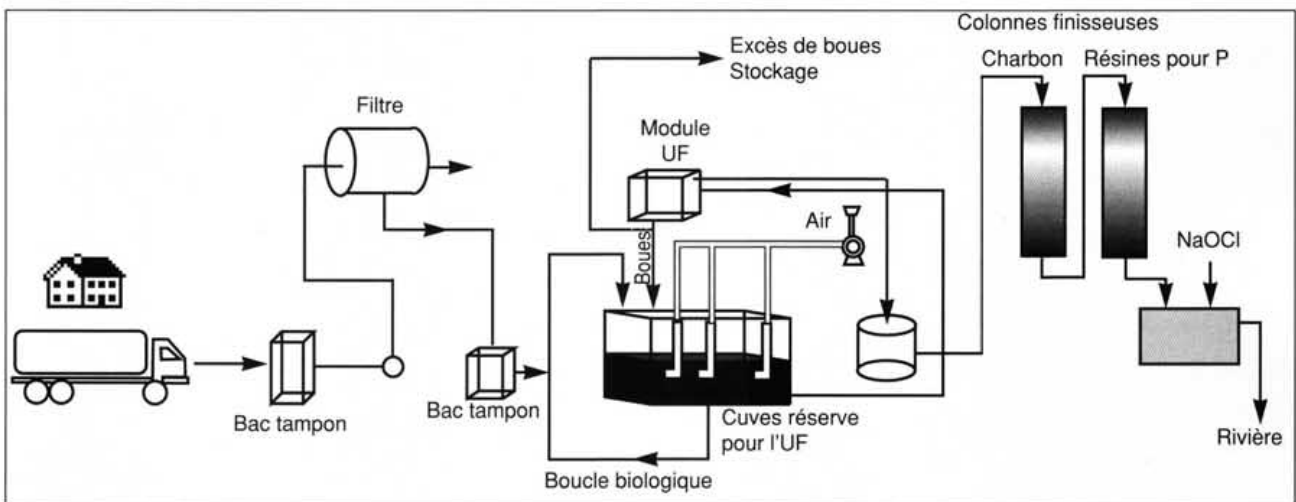


Schéma 21 : ASMEX - Schéma général - d'après [139]

3) Membranes intégrées au traitement tertiaire [146] [147] [148] [149] [150]

Dans les cas évoqués ci-dessous nous avons rassemblé les recherches effectuées sur des unités de filtration à membranes alimentées par des effluents déjà clarifiés. L'objectif visé est la désinfection. Les autorités sanitaires recommandent, par exemple, que l'eau réutilisée en irrigation contienne moins de un oeuf d'helminthe (en moyenne arithmétique) et moins de 1 000 coliformes thermotolérants par litre (1991).

Avec ces contraintes, il faut donc envisager de désinfecter une eau épurée avant l'emploi en agriculture. Dans d'autres cas la désinfection tend à protéger l'usage de l'eau dans les stations balnéaires.

A Sydney, en Australie, 412 millions de m³ d'eaux contaminées par des bactéries et virus, contenant 106 000 tonnes de matières solides, 25 000 tonnes d'huile et de graisse et 9 tonnes d'organochlorés sont déversés annuellement dans l'océan. Pour faire face à cette pollution, plusieurs solutions de type classique ont été avancées. Mais pour accroître la qualité de l'eau traitée rejetée, la société MEMTEC a proposé une étude avec les membranes MEMCOR sur deux usines, la première dotée d'un clarificateur et l'autre d'une filtration. Les unités de microfiltration, situées en traitement final de la filière, assurent la désinfection de l'eau et l'élimination des dernières MES, huile et graisse encore présentes. L'originalité de cette application réside dans le mode de rétrolavage avec la technique d'injection de gaz pour limiter le colmatage. La construction d'une usine à Blackheath d'une capacité de 2 950 m³/j a été programmée à la suite des essais concluants de cette étude.

En France, on relèvera parmi les travaux les plus récents ceux de OTV et du CIRSEE-LPRAI qui recherchent, sur des eaux issues du traitement secondaire, les configurations membranaires les plus intéressantes vis-à-vis de la désinfection [146], [147].

Les essais réalisés par OTV sur des effluents en provenance de filtre Biocarbone, contenant de l'ordre de 10⁹ coliformes totaux, 10⁶ à 10⁹ coliformes fécaux, 10⁶ à 10⁸ streptocoques fécaux, montrent que l'abattement des indicateurs est total sur 360 heures de fonctionnement après microfiltration sur membranes MEMCOR de 0,2 µm. Le flux de perméation avait été soutenu à 80 l/h/m². Les oeufs de Ténia et d'Ascaris sont eux aussi totalement éliminés.

Par contre, il semblerait que la barrière de la membrane ne soit pas parfaite vis-à-vis des kystes d'amibes de taille inférieure à 3 µm. Suivant l'expérimentation, on élimine de 65 à 100 % de ces kystes. Parallèlement les paramètres physico-chimiques : turbidité, DCO, DBO₅ et surfactants anioniques, ont subi des transformations notables (60 à 70 % pour les DCO et DBO₅). La couleur, elle, reste inchangée.

A Asnières-sur-Oise, le CIRSEE a réalisé pour l'Agence de l'eau Seine-Normandie une étude comparée de la désinfection d'eaux résiduaires urbaines par membranes d'ultrafiltration et de microfiltration : trois membranes ont ainsi été évaluées durant des essais. Il s'agit de la membrane d'ultrafiltration à 0,01 µm LED, des membranes planes DDS (Dow Danmark Separation System) avec un seuil de coupure de 25 à 100 kD, de la membrane de microfiltration MEMTEC en polypropylène de 0,2 µm [148].

Chaque pilote traite l'effluent issu d'une clarification secondaire (situé après un prétraitement, un décanteur primaire et un traitement biologique assurant partiellement l'élimination de la pollution azotée).

Le *tableau 18* présente les paramètres hydrauliques de fonctionnement de chaque pilote, les conditions de fonctionnement et leur consommation énergétique. Cette dernière a été suivie minutieusement en effectuant un bilan au niveau du gavage, de la recirculation et du rétrolavage dans chaque cas. Cette recirculation n'a pas lieu pour le pilote MEMTEC qui travaille en frontal.

Les résultats montrent que les flux maintenus sur les trois types de membrane sont relativement proches de 55 à 70 l/h/m² même si le flux mesuré immédiatement après le rétrolavage à l'air est de 80 à 100 l/h/m² pour la microfiltration. La microfiltration ne permet donc pas d'obtenir à priori un gain sur le flux de production par rapport à celui des membranes d'UF. Néanmoins le procédé de rétrolavage à l'air limite la perte en eau à 5 % pour la MF contre 20 % pour l'UF.

La surface de membrane à installer par m³ pour l'eau traitée est quasi similaire pour chaque installation puisqu'elle est de 25, 19 et 20 m²/m³ respectivement pour les membranes LED, DDS et MEMTEC.

La fréquence des régénérations chimiques (nettoyage lessiviel) varie de une régénération tous les 10 jours pour la MF à une tous les 20 à 30 jours pour l'UF.

	LED MODULE LIB35	DDS RC MEMBRANE	MEMTEC
Surface filtrante (m ²)	50	30	1
Débit de circulation par module (m ³ /h)	32	15-20	0,5
Pression d'entrée maxi (bar)	2	3,5	1
Pression d'entrée moy. (bar)	0,8	0,5	1,1
Flux du perméat (l/hm ²) à 10° C	55	70	55
Pression transmembranaire (bar)	0,5	0,55	0,2-1,1
Perte de charge (bar)	0,6	0,2	-
<u>Rétrolavage</u>	(eau)	(eau)	(air)
- Pression	2,3	0,5	5
- Fréquence	30	30	30
- Durée (s)	45	60	60
- Chloration (mg/l)	5	5	0
- Lessive (mg/l)	0	10 (ultrasil)	0
<u>Prétraitement</u>			
- Préfiltration en µm	200	25	200
- Préchloration (mg/l)	0	2	0
Taux de conversion de l'installation	0,77	0,79	0,95
Surface à installer m ² /m ³ d'eau traitée	25	19	20
<u>Perte en eau</u>			
- Purge continue (l/h/m ²)	0	7,2	0
- Rétrolavage (l/h/m ²)	12	607	3
Fréquence de lavage chimique (semaines)	4	3	1,5
Consommation énergétique (wh/m ³)	470	200-400	620

Tableau 18 : Récapitulatif des paramètres hydrauliques LED module L1B35, DDS et MEMTEC
- d'après [148]

La consommation énergétique se situerait autour de 0,4 à 0,6 kWh/m³, la consommation énergétique du pilote DDS RC étant a priori sous estimée.

Au niveau qualitatif, l'UF et la MF permettent quelle que soit la qualité de l'effluent de la station (en général autour du niveau e-NK2) d'éliminer les MES et la turbidité (inférieure à 0,2 NTU après traitement), et d'atteindre une DBO de 5 mg/l et une DCO de 35 mg/l, la coloration obtenue étant toujours inférieure à 40 mg/l de Pt.Co.

Ceci correspond à des abattements de près de 100 % pour les MES, 30 à 40 % pour la DBO et DCO en période normale, et 90 % en pointe. L'élimination de la couleur est de l'ordre de 80 % mais toujours plus élevée pour l'UF. Notons qu'aussi bien pour l'UF que la MF, la partie dissoute de la matière organique n'est pas éliminée.

Par ailleurs, il faut bien voir que les eaux de rétrolavage et les concentrats devront nécessiter un traitement spécifique ou un renvoi en tête de station.

D'un point de vue bactériologique, l'UF (pour les deux pilotes) et la MF éliminent totalement l'ensemble des bactéries (y compris les

pathogènes), les kystes de Giardia et de Cryptosporidium, soit un abattement minimum de 5 unités log (UL), même si dans certaines circonstances, juste après rétrolavage, des coliformes ont parfois été mis en évidence en MF.

L'abattement des virus est de 6 UL pour l'UF et 1 à 2 UL pour la MF.

Globalement, la réutilisation d'une eau ultrafiltrée en traitement tertiaire ne présenterait donc aucun risque épidémiologique, alors que la désinfection ne serait que partielle pour la MF d'un point de vue virologique.

La combinaison UF/NF a aussi été testée en traitement tertiaire à Asnières-sur-Oise (UF à 0,01 µm LED et NF par membrane spiralée composite). L'ajout de complexant et d'acidifiant au perméat d'UF était encore nécessaire. Des flux de 25 l/h/m² ont aussi pu être maintenus en NF durant plusieurs mois avec un lavage chimique tous les deux mois. La DCO s'est vue ainsi éliminée à la hauteur de 98 % ainsi que les PFTHM, les sulfates et le calcium. La concentration du COT atteignait alors 0,5 mg/l.

Aux Pays-Bas, les procédés membranaires ont aussi fait l'objet d'essais en traitement tertiaire à Winterswijk. La microfiltration (Stork Friesland B. V. à 0,2 µm) combinée à une coagulation par chlorure ferrique sur un effluent secondaire a ainsi permis d'éliminer 90 % du phosphore et la totalité des MES [149].

En Grande-Bretagne, une membrane dynamique RENOVEXX a aussi récemment été mise au point sur un pilote de 50 m³/j afin de déterminer le dimensionnement d'une station d'épuration de 1000 m³/j à Berwick STW équipée d'un traitement tertiaire. Les performances obtenues sur le plan bactériologique, virologique, et d'un point de vue physico-chimique (élimination du P, des MES et de la DBO) sont tout aussi remarquables que celles évoquées précédemment. Ce traitement nécessitera l'ajout préalable de sulfate d'aluminium à faible dose [150].

4) Coûts d'exploitation et d'investissement en traitement tertiaire [140] [145] [148] [149]

Lors de l'étude réalisée à Asnières-sur-Oise, les coûts estimés pour des unités dont la capacité d'épuration serait comprise entre 1000 habitants (150 m³/j) et 75000 habitants (11250 m³/j) ont été cernés pour les trois types de membranes testées :

Nbre. Hab	DEBIT m³/jour	UF LED F/hab	UF DDS F/hab	MEMTEC F/hab
1000	150	Inv 600 Exp 46	- -	Inv 700 Exp 34
5000	750	Inv 340 Exp 37	- -	Inv 520 Exp 26
25000	3750	Inv 320 Exp 35	Inv 395 -	Inv 580 Exp 25
75000	11250	Inv 292 Exp 34	Inv 360 -	Inv 778 Exp 24

Les coûts d'investissement présentés ne comprennent pas le génie civil, et les coûts d'exploitation sont calculés en prenant en compte la consommation énergétique, le coût des réactifs et du renouvellement des membranes, le coût de la main-d'oeuvre pour les régénérations chimiques.

Les coûts d'investissement pour l'UF sont dans tous les cas de figure inférieurs à la MF mais les coûts d'exploitation sont supérieurs [149].

Par rapport aux techniques de désinfection conventionnelles appliquées aux eaux résiduaires urbaines, telles que la chloration, l'ozonation, et l'irradiation par UV, les techniques membranaires ont l'avantage de ne pas former de sous-produits, de détruire 3 à 4 UL de germes tests, et de délivrer dans le milieu naturel un effluent exempt de micro-organismes donc n'induisant pas de reviviscence bactérienne. Par ailleurs, aucun résiduel de désinfectant ne subsiste dans l'effluent ce qui ne nuit pas à l'environnement.

L'efficacité du traitement par membrane est par ailleurs indépendante de la qualité de l'effluent, et le traitement de désinfection est donc extrêmement stable dans le temps.

Le tableau 19 permet ainsi une analyse comparée aussi bien d'un point de vue efficacité que d'un point de vue coût.

Les coûts de l'UF restent supérieurs mais la technique est beaucoup plus efficace. Par rapport à l'ozonation, les coûts d'investissement et d'exploitation ne sont pas très éloignés et ceci jusqu'à des installations de taille inférieure à 25000 équivalents habitants [148].

La filtration sur membrane a donc sa place comme procédé alternatif de désinfection pour les eaux usées tout comme les autres nouvelles techniques actuellement développées (irradiation par faisceau d'électrons, ...)

En ce qui concerne les bioréacteurs à membranes, la technique est trop récente pour disposer de coût précis. Notons cependant que les procédés membranaires UF utilisés au Japon pour la dénitrification des effluents de fosses septiques étanches sont, sur la base de 100 m³/j, d'un coût à peu près équivalent à la dénitrification classique en décanteur (aussi bien pour les coûts de fonctionnement que pour les coûts de construction), l'argument majeur dans l'implantation des techniques membranaires au Japon étant le gain de place appréciable [140].

5) Conclusion

Les techniques membranaires ont démontré leur efficacité sur des fluides industriels difficiles à traiter mais aussi en épuration des eaux usées. L'exemple du Japon démontre la fiabilité technique et aussi l'intérêt économique de l'emploi de ces matériaux.

L'extrapolation en France pourrait s'envisager dans un premier temps sur des petites

	ULTRA FILTRATION LED	EAU DE JAVEL	OZONE	UV	CHLORE GAZEUX
Action bactéricide	+	+	+	+	+
Action virucide	+	-	+	+	-
Reviviscence bactérienne	non	oui	non	oui	non
Toxicité résiduelle	non	oui	oui	non	oui
Sous-produits formés	non	oui	oui	non	oui
Coût d'exploitation*F/hab	37	20	26	9	20
Coût d'investissement F/hab	340**	125	245	108	150

+ élevé - modéré

* Le coût d'exploitation ne comprend pas l'amortissement de l'installation.

** Génie civil non inclus

Tableau 19 : Comparaison des différentes techniques de désinfection et des coûts - d'après [151]

Les coûts d'investissement et d'exploitation ont été définis avec les hypothèses suivantes : stations 5000 eq/hab. Une régulation amont/aval par dispositif électronique a été considérée pour les traitements conventionnels. L'objectif de qualité visé par les traitements conventionnels est une concentration en coliformes totaux par 100 ml. inférieure à 1000.

stations à fonctionnement intermittent, par exemple les stations balnéaires, les stations de ski. Un développement plus conséquent ne sera possible qu'avec une diminution des coûts ou sous une plus grande pression pour améliorer l'épuration, y compris bactériologique.

Les contrats de baie qui se mettront en place en France dans les années qui viennent,

conduiront aussi probablement à adjoindre un traitement tertiaire à certaines stations littorales, et les procédés membranaires fourniront alors des solutions intéressantes et compétitives dans bon nombre de cas.

CONCLUSION GENERALE

Les procédés à membranes sont une barrière physique pour les substances rencontrées dans l'eau. Suivant les qualités de membranes (osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration), on sépare de l'eau les ions (OI, partiellement avec NF), les virus (UF) même si les résultats obtenus doivent encore être confirmés, les bactéries et les matières en suspension (UF et MF). Il est quelquefois nécessaire de mettre en oeuvre des combinaisons de traitement (charbon actif en poudre, oxydant, coagulant) pour améliorer les performances de traitement.

En France, la qualité des eaux naturelles se dégrade, et au mieux, ne s'améliore pas. Les nouvelles réglementations plus sévères pour la qualité de l'eau potable, la variabilité de composition des eaux brutes (les périodes pluvieuses augmentent la turbidité des eaux de surface ou du karst) donnent de forts arguments en faveur des procédés à membrane.

La recherche appliquée prend désormais le relais de la recherche fondamentale pour :

- améliorer l'efficacité du traitement,
- diminuer le volume des installations (ou augmenter la surface utile des membranes),
- mettre au point des modules pour assurer une souplesse d'exploitation des installations,
- limiter les risques d'encrassement des membranes,
- obtenir des coûts d'investissement et de fonctionnement compétitifs avec les méthodes classiques de traitement des eaux potables ou des eaux usées.

L'expérience aidant, la multiplicité des installations (près de 30 en France en 1994) permettra aussi d'optimiser les paramètres hydrauliques et les conditions de fonctionnement pour accroître les performances à moindre coût.

Pour les eaux usées domestiques, les procédés à membrane ne sont guère utilisés en dehors du Japon. Par contre les contraintes plus grandes vis-à-vis des rejets entraîneront le recours au traitement tertiaire pour éliminer les micro-organismes et certains sels indésirables comme les phosphates et les nitrates. Sur ce plan, on peut penser que les procédés membranaires et les bioréacteurs à membrane en particulier, fourniront à l'avenir des solutions de plus en plus performantes.