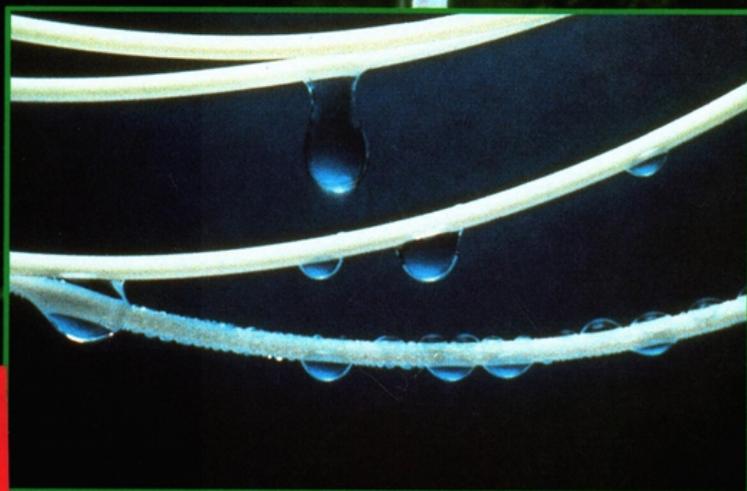


ministère de l'agriculture et de la pêche

Fonds National pour le Développement
des Adductions d'Eau

LES PROCÉDES A MEMBRANE POUR LE TRAITEMENT DE L'EAU ET L'ASSAINISSEMENT



DOCUMENTATION TECHNIQUE

FNDAE

N° 14

EAU02341

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PECHE
**DIRECTION DE L'ESPACE RURAL
ET DE LA FORET**

DOCUMENTATION TECHNIQUE
FNDAE
(Fonds National pour le Développement
des Adductions d'Eau)

eau 6 23 41

NS

N° 14

LES PROCEDES A MEMBRANE POUR LE TRAITEMENT D'EAU POTABLE ET L'EPURATION

Etude réalisée par M.H. HUSSON-MAREUX et J.A. FABY
de l'Office International de l'Eau
Direction de la Documentation et des Données
Rue Edouard Chamberland - 87065 LIMOGES CEDEX
Tél. 55.11.47.80

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Couverture : Station de Bernay (Eure) - 2 800 m³/jour (photo AQUASOURCE)

N° ISBN : 2 11 0874 26 0

SOMMAIRE

INTRODUCTION	05
I - Etat de la technologie	07
1) Les membranes	07
1-1 Généralités	07
1-2 Caractérisation des membranes	09
1-3 Membranes organiques	10
1-4 Membranes minérales	10
2) Les modules	11
3) Mise en œuvre et conditions de fonctionnement	12
3-1 Choix du type de procédé	12
3-2 Choix de la pression de fonctionnement et de la vitesse	13
3-3 Maîtrise du colmatage	14
II - Production d'eau potable	17
1) Performances des techniques membranaires	17
1-1 Clarification et élimination des microorganismes	18
1-2 Elimination du fer, du manganèse, et de l'aluminium	20
1-3 Elimination des matières organiques dissoutes d'origine naturelle et des micropolluants organiques : résultats des recherches pilotes	21
1-4 Elimination de la dureté, des sels et des précurseurs de THM	25
1-5 Elimination spécifique des produits organiques de synthèse et de certaines espèces minérales	27
1-6 Les recherches dans les techniques membranaires	27
2) Procédés et réalisations	30
2-1 Les procédés AQUASOURCE	31
2-2 Les procédés MEMTEC	32
2-3 Les procédés KERASEP™	33
2-4 Autres procédés	34
2-5 Unités mobiles	34
2-6 Quelques réalisations en France	34

3) Coûts d'exploitation et d'investissement	39
3-1 Ultrafiltration	40
3-2 Microfiltration	42
3-3 Nanofiltration	42
3-4 Coûts des techniques de filtration sur membrane en affinage	43
4) Bilan : Guide de choix	45

III - <i>Traitement des eaux résiduaires urbaines</i>	50
1) Membranes associées au traitement physico-chimique	50
2) Membranes intégrées au traitement secondaire	51
2-1 <i>Immergées dans le réacteur biologique, (Essais pilotes)</i>	51
2-2 <i>Couplage bioréacteur - Unité membranaire (Essais pilotes)</i>	52
2-3 <i>Réalisations industrielles</i>	55
3) Membranes intégrées au traitement tertiaire	58
4) Coûts d'exploitation et d'investissement en traitement tertiaire	60
5) Conclusion	60

<i>Conclusion générale</i>	62
<i>Références bibliographiques</i>	63
<i>Glossaire</i>	73
<i>Sigles</i>	75
<i>Comment sélectionner le procédé qu'il vous faut</i>	76
<i>Adresses utiles</i>	77
<i>Liste des cahiers techniques du F.N.D.A.E</i>	79

Introduction

L'eau est régulièrement soustraite du milieu naturel, utilisée et ... rejetée dans le milieu avec ou sans épuration. Quand la pollution n'est pas d'origine accidentelle, elle découle de l'activité humaine. Potabiliser l'eau, mais aussi l'épurer après utilisation sont les deux extrêmes qui régissent sa disponibilité.

Que peut-on séparer de l'eau, avec quelles performances, quels moyens et quels coûts ?

Depuis plusieurs années, des matériaux particuliers, les membranes, permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer. Séparation onéreuse mais justifiée par les cas de rareté extrême de l'eau dans certaines régions.

Parallèlement, des membranes avec des caractéristiques différentes ont trouvé des applications dans le monde industriel, insérées dans un process agro-alimentaire, en valorisation d'un sous-produit, en entretien d'un bain de travail et en dépollution.

On utilise l'osmose inverse pour éliminer le sel de l'eau de mer mais de nouvelles applications apparaissent avec la nanofiltration, l'ultrafiltration, la microfiltration.

Les fabrications de ces membranes sont maintenant mieux maîtrisées, leur mise en oeuvre également. Un savoir-faire important a été acquis avec l'expérience industrielle de fluides difficiles à traiter.

Il reste que l'application de ces techniques au traitement de l'eau potable et des eaux résiduaires urbaines en est au début de l'industrialisation. A peine une vingtaine d'unités d'ultrafiltration de l'eau en potabilisation fonctionnent en France et une dizaine en microfiltration. Des unités plus nombreuses de recyclage des eaux usées existent, mais essentiellement au Japon.

Le volet économique de leur implantation durable est essentiel. Le traitement par membranes reste cher et ne se pose comme concurrent des techniques classiques que dans quelques cas très spécifiques, pour l'instant ...

L'étude qui suit regroupe les recherches poursuivies sur les matériaux membranaires proprement dits et leur mise en oeuvre, les essais de traitement membranaires dans la production d'eau potable voire associés aux traitements conventionnels en techniques d'affinage, et présente enfin les réalisations industrielles. Pour l'essentiel, elle est réalisée d'après la base de données de la Direction de la Documentation et des Données de l'Office International de l'Eau. On s'y attache à traiter des applications en filtrations par membranes "eau potable" prioritairement, à l'exception toutefois du dessalement, mais aussi "eau résiduaire urbaine".

Note du rédacteur : à la demande de la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt et suite aux réserves émises par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, la notion de «désinfection» n'a pas été utilisée pour décrire l'élimination des microorganismes présents dans l'eau à traiter. Les membranes en elles-mêmes ne sont pas mises en cause mais plutôt les modules qui peuvent être sujets à des fuites du fait de la multiplicité des joints. L'objectif visé est aussi de bien distinguer le pouvoir d'abattement des germes (protozoaires, bactéries, virus éventuellement, ...) par les techniques membranaires et la désinfection au sens de l'injection d'un bactéricide rémanent. En d'autres termes, l'utilisation de techniques membranaires n'affranchit pas le traiteur d'eau d'une désinfection par le chlore par exemple.

NB : Un glossaire est mis à la disposition du lecteur pour les termes techniques non usuels ou spécifiques aux techniques membranaires en page 66.

Etat de la technologie

Les techniques de séparation des matières en suspension (filtration, décantation) sont connues depuis l'Antiquité, mais l'élimination des substances dissoutes n'a été abordée qu'au XX^e siècle.

Les procédés à membrane, appliqués d'abord au dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, résultent des recherches entamées dans les années 1950. Les premières membranes utilisées, qualifiées de semi-perméables, étaient en acétate de cellulose. Depuis, outre les réalisations industrielles de dessalement, on assiste à une diversification des matériaux et des applications allant de la fabrication d'eau ultra pure au traitement des eaux résiduaires d'immeubles d'habitation en vue de leur réutilisation.

1) Les membranes

[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]

1-1 Généralités

Le *tableau 1* (page 8) indique les techniques de séparation des substances dissoutes, des colloïdes ou des matières en suspension dans l'eau en fonction de leur taille (de 0,001 à 1 000 μm) ou de leur masse moléculaire. On compare les procédés de séparation à membrane avec la filtration classique ou les procédés de séparation gravitaire (centrifugation ou décantation).

1-1-1 Structure

La structure des membranes peut être homogène, asymétrique ou composite, en forme de fibre creuse ou non :

- les membranes homogènes de première génération, de perméabilité faible, sont peu développées,
- les membranes asymétriques (ou anisotropes) de seconde génération, sont constituées d'une sous-couche de 100 à 200 μm d'épaisseur recouverte d'une

- "peau" très fine de 0,1 à 1,5 μm (*schéma 1*),
- les membranes composites de troisième génération, s'obtiennent par dépôt d'une pellicule semi-perméable de 0,01 à 0,1 μm sur un support poreux de nature chimique différente (*schéma 2*).

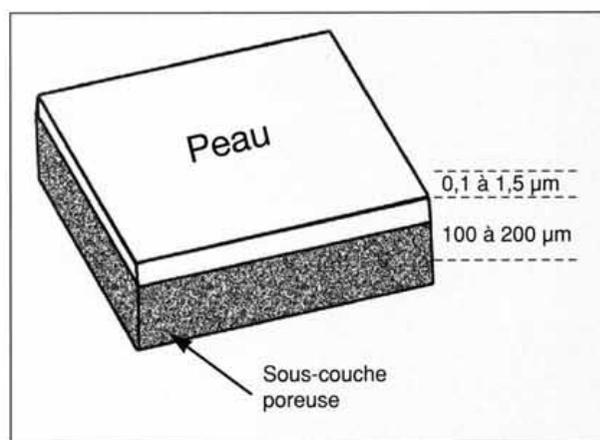


Schéma 1 : Membrane asymétrique ou anisotrope - d'après [2]

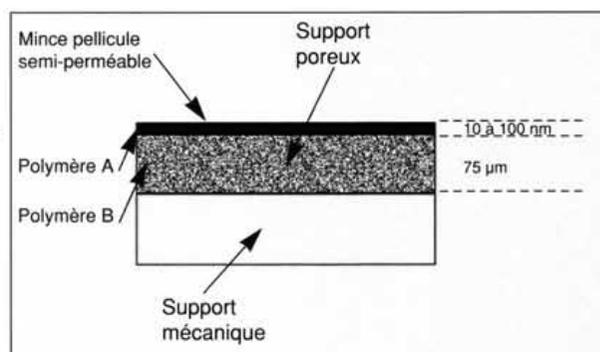


Schéma 2 : Membrane composite - d'après [2]

1-1-2 Principes de fabrication

Selon que les membranes sont organiques ou minérales, les modes de fabrications sont très différents. La séparation ou inversion de phase s'applique aux membranes organiques asymétriques. Elle consiste à ajouter un agent précipitant au mélange de base polymère et solvant (le collodion). Les membranes planes

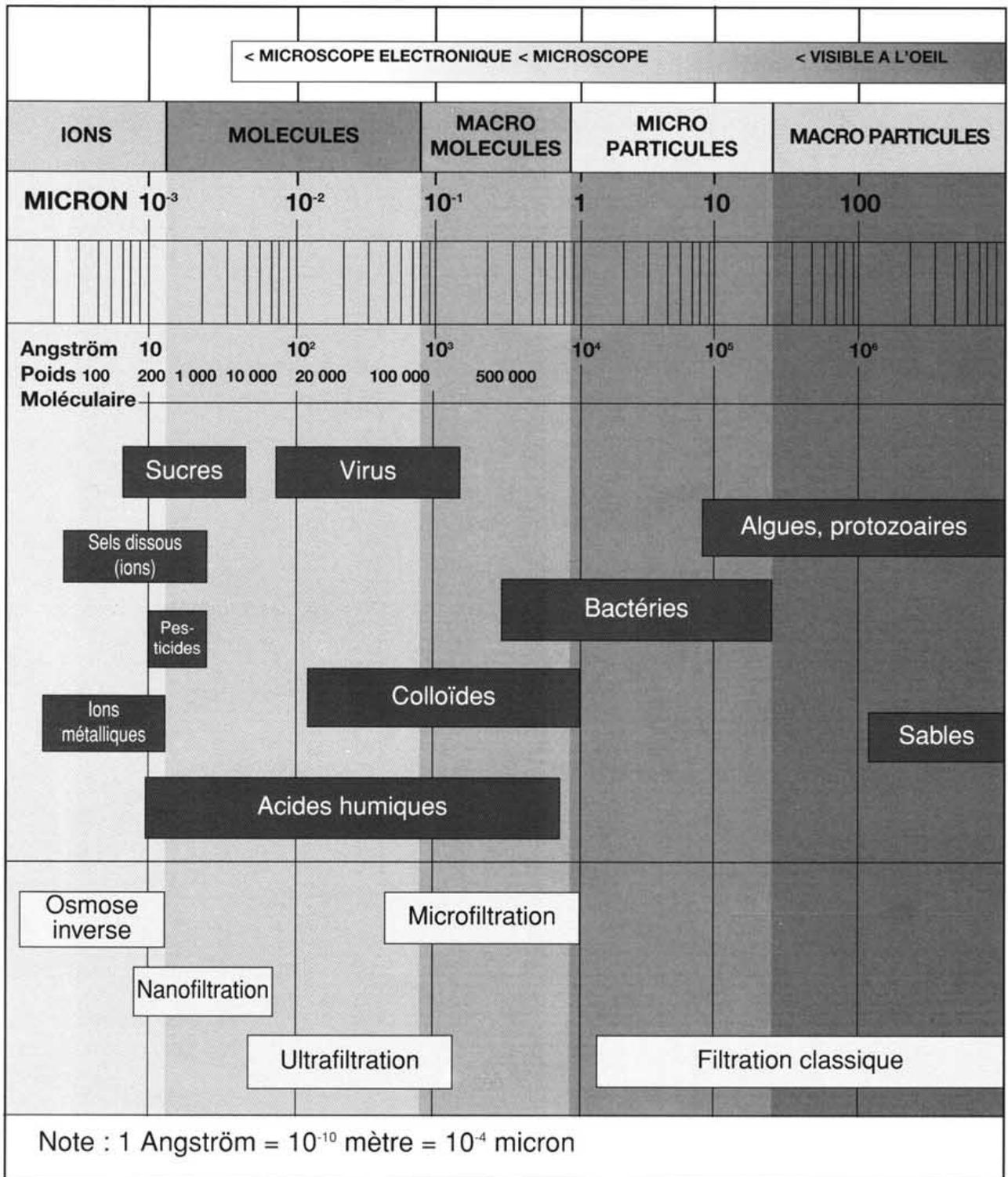


Tableau 1 : Différents composés rencontrés dans les eaux naturelles - Techniques à membranes permettant leur élimination - Documentation HYDREX

par exemple, s'obtiennent en coulant sur une plaque de verre le collodion. Puis on immerge cette plaque dans le précipitant (ou non solvant). La solution homogène au départ, se sépare en deux phases :

- une phase continue riche en polymères qui constitue la membrane proprement dite,
- une phase pauvre en polymères qui, après évaporation, constitue les pores de la membrane.

Les fibres creuses sont extrudées dans une filière annulaire et le non solvant injecté dans le canal des tubes. Elles se présentent sous forme de tubes creux, souples, de diamètre extérieur compris entre 50 et 1 000 μm , de diamètre intérieur compris entre 25 et 800 μm . On les fabrique par filage et on leur confère une structure asymétrique par des traitements ultérieurs (schéma 3).

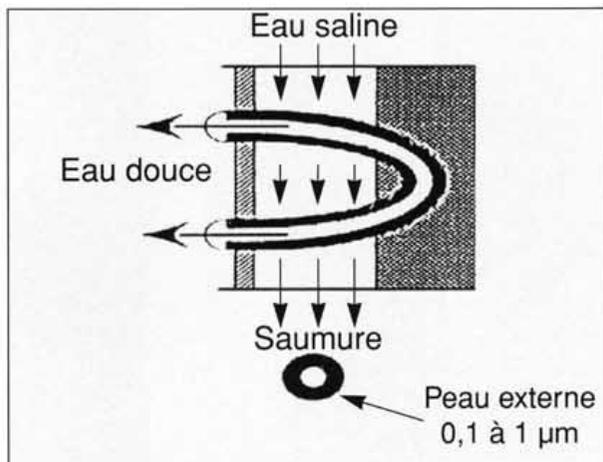


Schéma 3 : Membrane fibre creuse : principe de fonctionnement et vue en coupe - d'après [2]

On préconise même d'incorporer dans les tubes des disques ou des rondelles qui multiplient par 2,5 les performances des membranes tubulaires. Travaillant en écoulement pulsé et à faible débit, ils améliorent encore la qualité de la filtration [3], [4].

Les membranes minérales (oxydes minéraux, métaux, alliages, polymères fluorés), mises en forme par frittage (agglomération de poudre sous l'action conjuguée de la pression et de la chaleur), sont enduites de couches successives de matériau de granulométrie décroissante qui régleront la taille des pores au diamètre désiré. Chaque enduction est suivie d'un séchage et d'un traitement thermique.

Le tableau 2 regroupe les caractéristiques essentielles des membranes actuelles.

1-2 Caractérisation des membranes

On caractérise les membranes d'après l'épaisseur, la sélectivité, la porosité, le diamètre nominal de pore, la densité apparente, la surface interne, les diamètres maxima de pores...

Les caractéristiques d'une membrane performante sont :

- une grande porosité,
- une bonne stabilité mécanique, thermique, chimique,
- une large plage d'utilisation en pH,
- une insensibilité totale aux bactéries [1], [10].

	MICROFILTRATION	ULTRAFILTRATION*	OSMOSE INVERSE
Membrane	Poreuse isotrope 0,1-10 μm	Poreuse asymétrique 0,001 à 0,1 μm	Non poreuse, asymétrique ou composite
Taille des pores	0,02 - 20 μm	1 000 à 100 000 Daltons	0,0003 à 0,1 μm
Différentes gammes de porosité	0,05 - 10 μm	0,003 à 0,01 μm 0,002 - 0,05 μm 0,002 - 0,02 μm	< 0,002 μm
Mécanisme de transfert	Migration par convection	Filtration, adsorption préférentielle	Diffusion
Loi du transfert	Darcy	Darcy	Fick
Perméabilité ordre de grandeur	10 à 100 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{j})$	1 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{j})$	0,01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{j})$
Pression appliquée	1 bar	1 - 5 bars 0,7 - 10 bars	20 - 80 bars

* l'UF dite basse peut retenir des molécules allant jusqu'à 500 D de masse molaire

NB : La Nanofiltration intermédiaire entre l'Ultrafiltration et l'Osmose inverse permet le fractionnement de molécules de 100 à 1 000 Daltons. Elle est mise en œuvre avec une pression de service de 5 à 15 bars voire jusqu'à 35 bars pour des applications alimentaires. Les molécules de l'ordre du nanomètre sont retenues.

Tableau 2 : Différences entre les membranes MF, UF et OI [2], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

En ultrafiltration, la sélectivité représentée par le seuil de coupure indique la masse molaire au-delà de laquelle toutes les molécules sont retenues. En microfiltration, c'est le diamètre nominal des pores qui détermine la sélectivité.

La porosité et la distribution des tailles de pore s'étudient au microscope électronique à balayage, par thermoporométrie, par bulloscopie quantitative ou par porosimétrie (méthode au mercure). La méthode de la goutte de mercure tombante (sessile) avec augmentation de la pression donne en plus le diamètre de pore maximal et le diamètre de pore nominal. Des modèles mathématiques développent l'accès à la sélectivité et à la perméabilité des membranes d'UF par le calcul [11], [12], [13].

Le diamètre nominal de pore se caractérise aussi par la perméation de gaz ou de liquide, par la filtration de suspensions tests de taille connue (microorganismes, particules de latex ou de poussières fines). On peut compléter les informations obtenues par le microscope électronique à balayage, en filtrant des solutions de polysaccharides de bas poids moléculaire. On étudie les fractions rejetées par les membranes UF pour préciser la valeur du diamètre de pore [14].

La résistance hydrodynamique est donnée par perméation.

Les déterminations de volume et de poids permettront de connaître la densité apparente de la membrane. La méthode BET mesure la surface développée de celle-ci (en m²/g).

Les seuils absolus de filtration et la validation des membranes de microfiltration peuvent être définis en terme d'abattement en germe, vis-à-vis des bactéries "Pseudomonas diminuta" ou "Serratia marcescens" qui sont les plus petites bactéries connues. La qualification doit être complétée par des tests sur les pertes de charge initiale, la pression différentielle maximale admissible, la température... [15].

1-3 Membranes organiques

Les matériaux de base sont la cellulose, les polyamides ou les polyimides, le polysulfone, l'acide polyacrylique, le polyacrylonitrile, les polymères fluorés (PVDF, PTFE...), le polybenzoxacridone sulfuré (Bayer), une polyoléfine hydrophile (Nitto), le polypropylène (Hoechst, Celanese, Memtec, Enka), le polyfurane et le polyéthylène/imine (Osmonics) (tableau 3).

Matériau	Type d'application (1)		
	MF	UF	OI
Acétate de cellulose	X	X	X
Triacétate de cellulose	X	X	X
Mélange diacétate et triacétate de cellulose		X	
Mélange d'esters de cellulose		X	
Nitrate de cellulose	X		
Cellulose régénérée	X	X	
Gélatine	X		
Polyacrylonitrile (PAN)		X	
Polychlorure de vinyle (PVC)	X		
Copolymère à base de chlorure de vinyle	X	X	
Polyamide	X	X	X
Polysulfone (PSU)	X	X	
Polybenzimidazole (PBI)		X	
Polybenzimidazolone (PBIL)		X	
Polycarbonate	X		
Polyester	X		
Polyimide		X	X
Polypropylène	X		
Mélange de polyélectrolytes		X	
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	X		
Polyfluorure de vinylidène (PVDF)	X	X	
Polyacide acrylique + oxyde de zirconium (2)		X	X
Polyéthylène/imine + toluène diisocyanate		X	

(1) MF microfiltration
UF ultrafiltration
OI osmose inverse

(2) Membrane dynamique

Tableau 3 : Principales membranes organiques commercialement disponibles - d'après [2]

Le tableau 4 regroupe les avantages et inconvénients que confèrent aux membranes les différents matériaux de base, par rapport à la perméabilité, la sélectivité, la stabilité chimique ou thermique mais aussi la sensibilité au chlore.

Le domaine de la fabrication des membranes organiques est encore exploré par de nombreuses équipes universitaires et laboratoires de recherches

1-4 Membranes minérales

Elles ont un support carbone, en alumine, en verre poreux, en aluminium anodisé, et sont constituées d'un matériau composite ou tissées à partir de fibres de carbone [16].

Les membranes dites dynamiques sont fabriquées par l'utilisateur à partir de tubes poreux de diamètre compris entre 0,5 et 5 µm. A l'intérieur des tubes, on introduit une dispersion colloïdale de zirconium associé à des copolymères : acide polyacrylique co hydroxéthyl méthacrylate et acide polyacrylique co hydroxéthyl acrylate. En se déposant sur les tubes poreux la dispersion constitue la future membrane. Certaines de ces membranes peuvent trouver des applications en eaux usées [17], [18].

	Avantages	Inconvénients
Acétate de cellulose	Perméabilité élevée Sélectivité élevée Mise en œuvre assez aisée Adsorption des protéines faibles ⇒ colmatage moindre	Sensible à la température Sensible au pH compris entre 3 et 8 Sensible au chlore Sensible au compactage Sensible aux microorganismes
Type polyamide	Bonne stabilité chimique - thermique - mécanique	Grande sensibilité au chlore Faible perméabilité Phénomènes d'adsorption
Type polysulfone	Bonne stabilité thermique et au pH Résistance au chlore 5 mg/l fonctionnement normal 50 mg/l stockage 200 mg/l traitement de choc	Sensible au compactage Adsorptions
Matériaux acryliques	Bonne stabilité thermique - chimique Stockage à sec possible	Faible résistance mécanique Pores de diamètre assez élevés
Matériaux fluorés	Bonne résistance thermique - chimique	Faible perméabilité Microfiltration uniquement
Membranes composites	Bonnes caractéristiques : perméabilité et sélectivité Stabilité de pH 2 à 11 Bonne tenue en température	Mauvaise tenue au chlore

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des membranes organiques suivant leur composition - d'après [2]

2) Les modules [2] [19] [20]

La mise en œuvre exige le maintien mécanique des membranes sur des supports appropriés. On doit aussi pouvoir assurer la circulation sous pression de l'eau à traiter, avec un encombrement minimal.

Les modules tubulaires, à fibres creuses, plans ou spirales réalisent ce triple objectif (schémas 4, 5 et 6). La surface de membrane par unité de volume modulaire ou compacité est importante avec les fibres creuses (de 1 000 à 30 000 m²/m³). Les modules tubulaires ont eux une compacité faible de 10 à 300 m²/m³. Les membranes planes montées dans des modules plans type filtre presse sont en position intermédiaire [2].

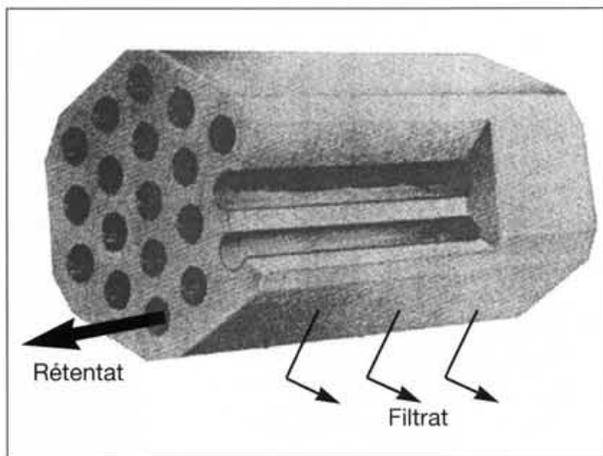


Schéma 4 : Structure d'une membrane tubulaire multicanal - d'après [19]

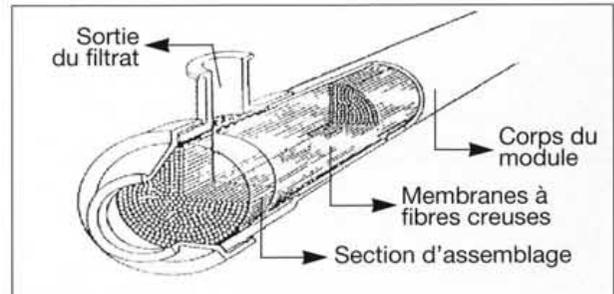


Schéma 5 : Constitution du module d'UF à fibres creuses - d'après [20]

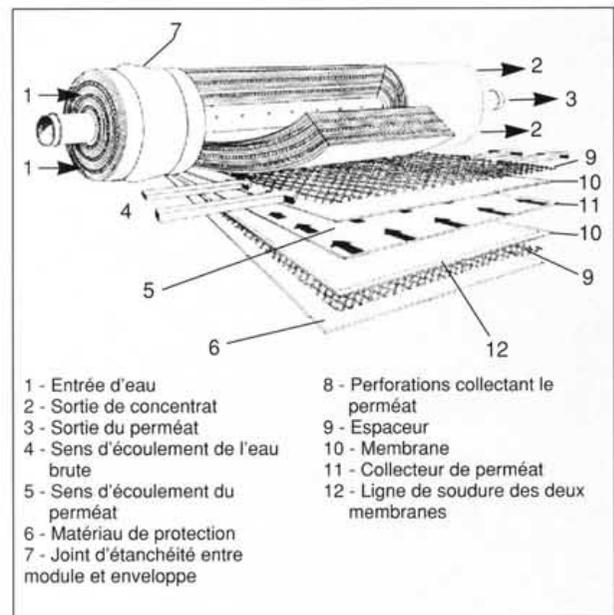


Schéma 6 : Structure interne d'une membrane plane montée en spirale - d'après [21]

3) Mise en œuvre et conditions de fonctionnement [1] [2] [7] [10] [14] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42]

Le choix des conditions de fonctionnement (pression, vitesse, température) à appliquer à l'ensemble module-membrane est primordial si l'on veut maintenir constantes le plus longtemps possible les performances du système à savoir perméabilité au niveau le plus élevé et sélectivité à la hauteur désirée.

Chaque installation comprend les éléments suivants :

- une pompe de mise en pression :
 - . OI : 20 à 80 bars,
 - . NF : 5 à 12 bars
 - . UF : 0,6 à 5 bars,
 - . MF : 0,6 à 2 bars,
- un ou des modules de filtration,
- une pompe de recirculation (suivant le mode de fonctionnement),
- une vanne de détente,
- un échangeur de chaleur (suivant les cas),
- une ou plusieurs cuves de stockage.

3-1 Choix du type de procédé

Trois procédés existent : en discontinu par lot (c'est-à-dire par "batch" pour les anglo-saxons), en continu à recyclage, en continu.

Le schéma 7 donne le principe du fonctionnement en discontinu : une solution est injectée dans le module, la partie concentrée

retourne dans le réservoir jusqu'à ce que l'on ait atteint une valeur limite recherchée.

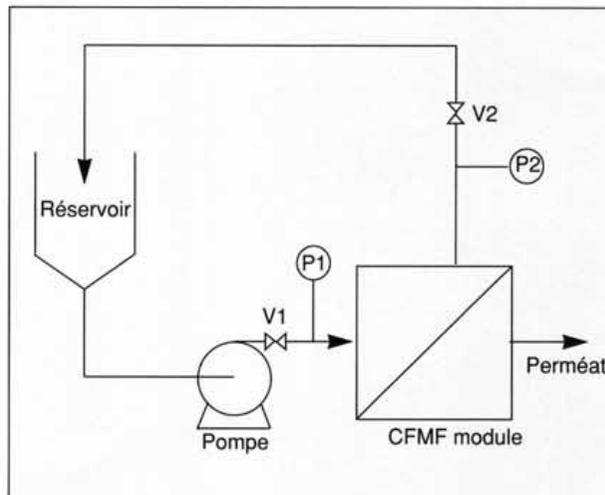


Schéma 7 : Principe de fonctionnement par procédé discontinu - d'après [10]

Le schéma 8 indique le mode de fonctionnement le plus employé en production d'eau potable par micro ou ultrafiltration en continu avec recirculation. La pompe d'alimentation envoie la solution à traiter dans une boucle, où une pompe de recirculation confère au fluide une vitesse importante. C'est la pompe d'alimentation qui donne la pression voulue. Une vanne de détente permet de régler cette pression dans la boucle de recirculation et d'évacuer le concentrat. Ce système est souple, consomme moins d'énergie que le procédé discontinu, par contre les flux de perméat sont plus faibles.

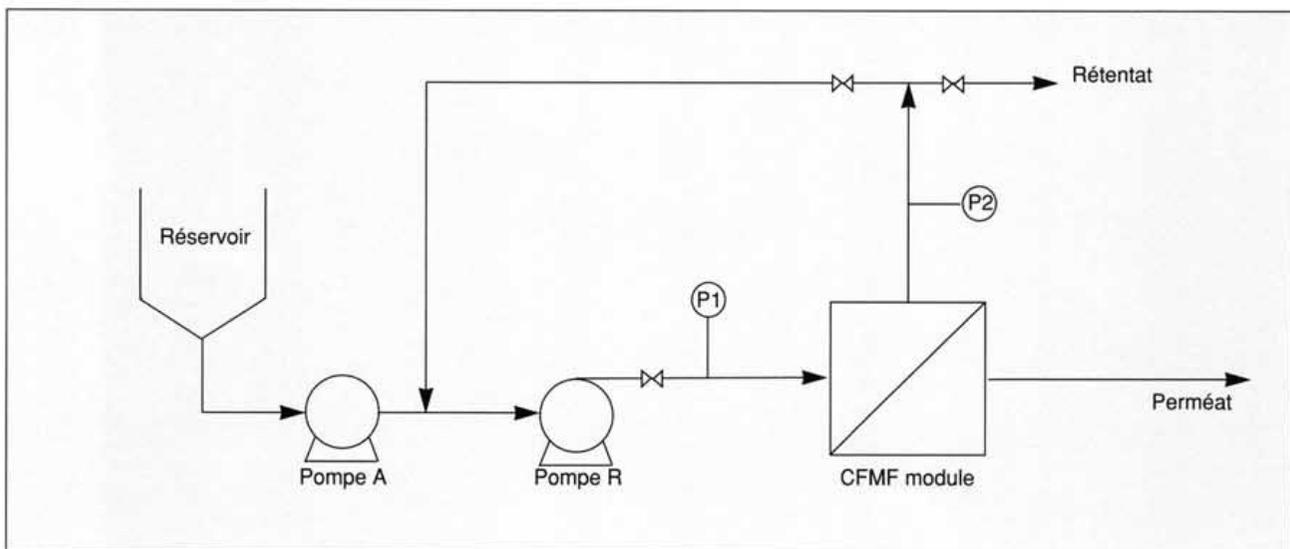


Schéma 8 : Principe de fonctionnement en continu, 1 étage, à boucle de recirculation - d'après [10]

On peut aussi travailler en continu avec un montage type série-rejet ou série-production (schéma 9). L'association de modules en plusieurs étages permet de procéder par étapes dans la purification d'eaux très chargées.

C'est donc surtout en osmose inverse que l'on rencontrera ce type de fonctionnement qui autorise des taux de conversion élevés ou permet d'effectuer des séparations avec des membranes peu sélectives.

3-2 Choix de la pression de fonctionnement et de la vitesse

Dans le cas de l'ultrafiltration ou de la microfiltration tangentielle, l'écoulement de la solution traitée est parallèle à la membrane et assure l'autonettoyage de celle-ci. Le solvant et les éléments de faible masse moléculaire que la solution contient, traversent la membrane avec un débit proportionnel à la pression appliquée (schéma 10).

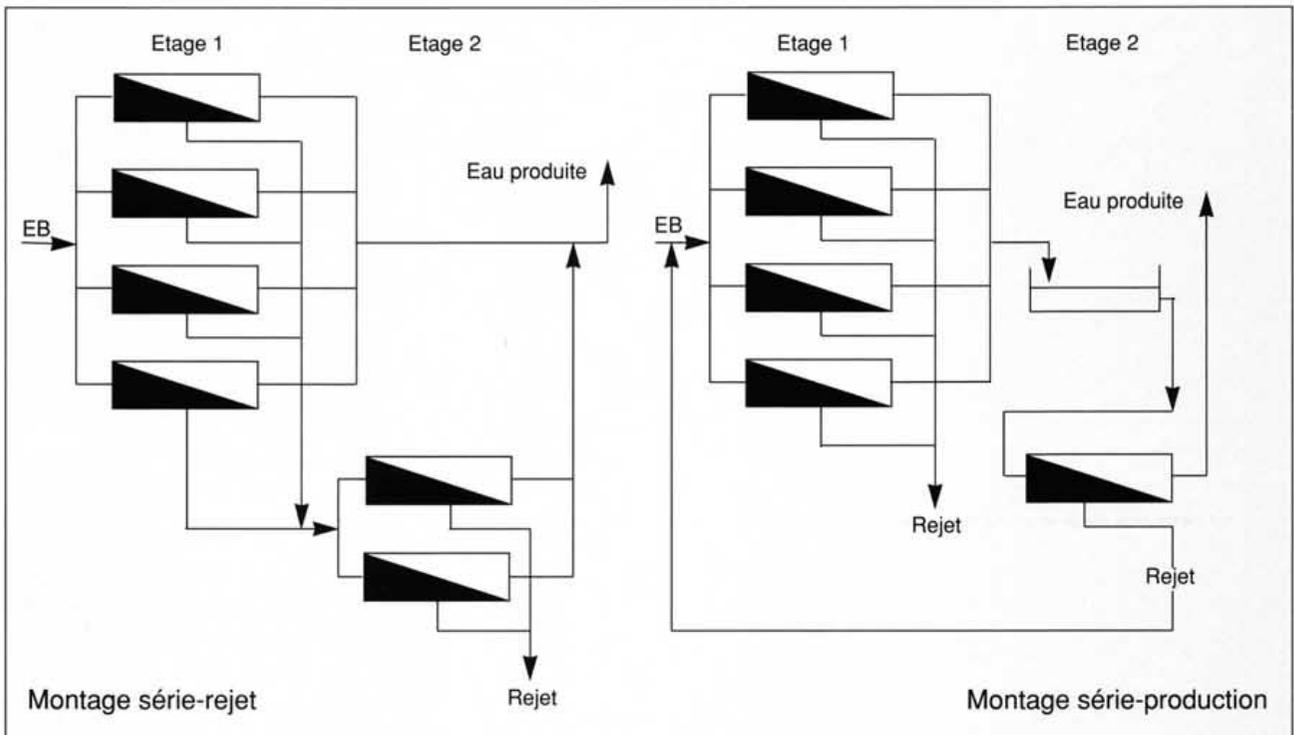


Schéma 9 : Principe du montage série-rejet ou série-production - d'après [2] et [48]

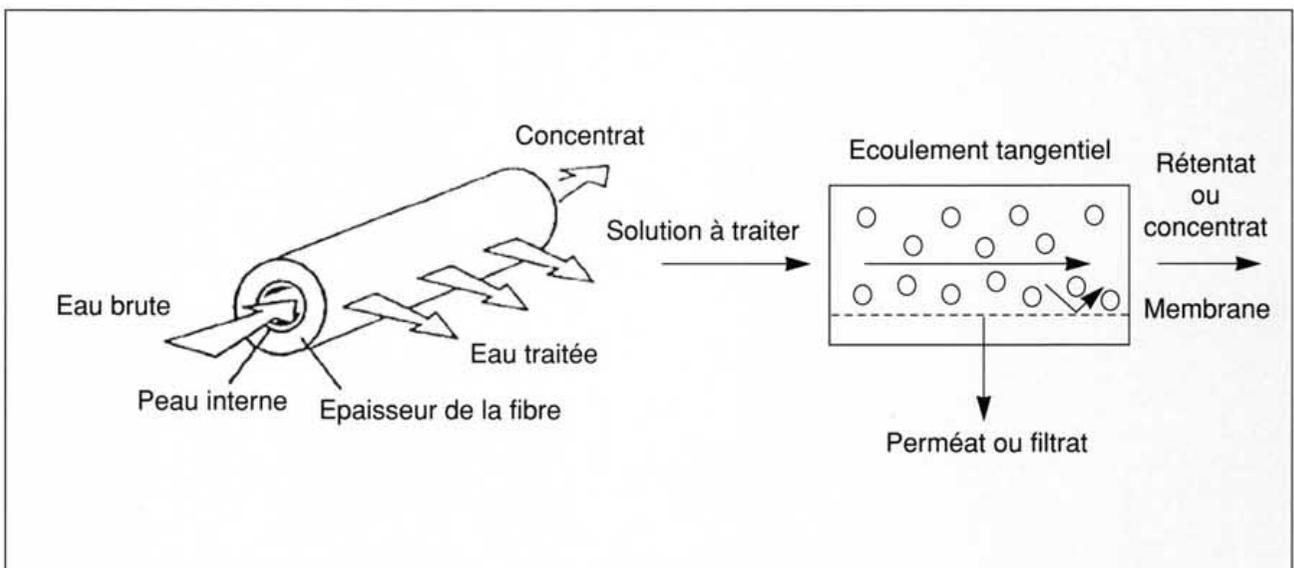


Schéma 10 : Principe de la micro et de l'ultrafiltration tangentielle - d'après [1]

Pour connaître le débit de filtrat avec un solvant pur, on applique la loi expérimentale de Darcy qui établit la vitesse d'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux en fonction de la différence de pression de part et d'autre de ce milieu (la membrane) [7] :

$$J = \frac{Bm \Delta P}{L \eta}$$

- J : Densité de flux de perméat (m/s) = Q/S
 Q : Débit instantané de perméat (m³/s)
 S : Surface totale de la membrane (m²)
 Bm : Coefficient de perméabilité du milieu poreux (m²)
 L : Epaisseur de la membrane (m)
 ΔP : Différence de pression de part et d'autre de la membrane = pression transmembranaire (Pa)
 η : Viscosité dynamique (Pa/s)

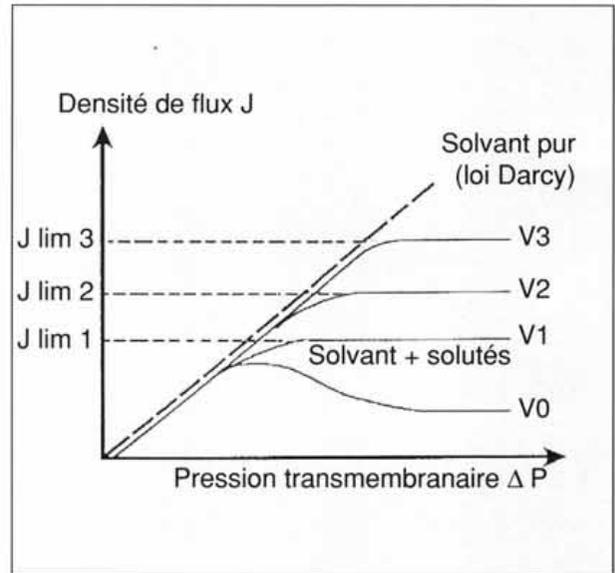
Le coefficient Bm est souvent calculé d'après les lois de Hagen-Poiseuille et Carman-Kozeny.

Les solutions réelles contiennent des molécules dissoutes et des matières en suspension, aussi les débits constatés sont-ils plus faibles. Les variations des débits ne suivent plus linéairement les variations de pression. A partir d'une valeur ΔP, on obtient un flux de perméat constant Jlim (schéma 11). Cette valeur dépend de la vitesse de circulation tangentielle appliquée V.

Plusieurs théories permettent d'expliquer ces phénomènes, essentiellement dus à différents modes de colmatage [22] (voir chapitre suivant).

En général, en ultra et microfiltration, il n'y a pas, contrairement à l'osmose inverse, de pression minimum à appliquer, puisque la pression osmotique est beaucoup moins importante avec les macromolécules qu'avec les ions. La valeur supérieure de la pression est donc imposée par les phénomènes de colmatage (ou de polarisation) et l'on a souvent intérêt à travailler à des pressions plus faibles lorsque les pores ont un diamètre élevé : 1 à 2 bars en microfiltration et 5 à 6 bars en ultrafiltration.

L'accroissement de température entraîne une diminution de la viscosité, le débit d'eau à travers la membrane augmente d'environ 3 % par degré Celsius.



Quatre vitesses de circulation de l'eau brute sont étudiées V0, V1, V2, V3. On trace pour chaque vitesse l'évolution de la densité de flux de perméat J (ou débit ramené par unité de surface, ou vitesse hydraulique) en fonction de la pression transmembranaire ΔP. Si pour un solvant pur on obtient une droite, pour un solvant contenant des solutés le débit atteint une limite qui dépend de la vitesse de circulation appliquée : Jlim 1, Jlim 2, Jlim 3. L'augmentation de pression transmembranaire ΔP ne permet pas alors de dépasser cette limite.

Schéma 11 : Densité de flux de perméat (J) en fonction de la pression transmembranaire (Δ P), pour différentes vitesses de circulation tangentielle (V) - d'après [1]

3-3 Maîtrise du colmatage

Au voisinage de la membrane se présente une couche limite, dans laquelle l'écoulement est laminaire. Dans cette zone la vitesse de l'eau passe de sa valeur initiale à une valeur nulle au contact de la paroi. Les composés retenus s'accumulent alors sur la paroi et les concentrations des produits en solution atteignent des valeurs importantes. C'est le modèle du film, ou polarisation de concentration avec formation ou non d'une couche de gel adhérente à la paroi [23], [24], [25], [26].

Cette polarisation de concentration explique la limite obtenue du débit de filtration, indépendante de la valeur prise par la pression transmembranaire. Cependant, elle n'explique pas les diminutions de flux observées au cours du temps. Ce phénomène est à attribuer au colmatage proprement dit de la membrane qui regroupe le dépôt, le blocage mécanique des pores, l'adsorption des solutés en surface, voire en profondeur [24], [27], [28], [29], [30], [31], [32].