



Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc.

Siège social et station expérimentale
142, Rang Lainesse
Saint-Norbert d'Arthabaska
Québec G0P 1B0
Téléphone : (819) 369-4000
Télécopieur : (819) 369-9589

REVUE DE LITTÉRATURE

**PROCÉDÉS DE SÉPARATION MEMBRANAIRE ET LEUR
APPLICATION DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE**

Par : Alfa Arzate, Ph.D.

Cette recherche a été réalisée grâce à une aide financière accordée dans le cadre du Programme d'appui financier aux regroupements et aux associations de producteurs désignés du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.



TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES FIGURES	5
AVERTISSEMENT	6
INTRODUCTION	7
GÉNÉRALITÉS DES PROCÉDES DE SÉPARATION MEMBRANAIRE	8
PRÉSENTATION DES PROCÉDÉS DE SÉPARATION MEMBRANAIRE	10
1. FILTRATION MEMBRANAIRE	10
2. OSMOSE INVERSE	13
3. CARACTÉRISTIQUES DES PROCÉDÉS DE SÉPARATION MEMBRANAIRE	15
LES MEMBRANES	18
1. TYPES DE MEMBRANE	18
2. CARACTÉRISTIQUES DES MEMBRANES	21
3. GÉOMÉTRIE DES MODULES	22
4. NETTOYAGE	27
NOTIONS DE BASE	33
1. DÉFINITIONS	33
2. LOIS DE COMPORTEMENT	34
3. LIMITATION DU FLUX DE PERMÉAT	37
CONFIGURATION DES INSTALLATIONS	41
1. MODE DE RÉGULATION	41
3. MODE DE FONCTIONNEMENT	46
4. INSTRUMENTATION	49
CRITÈRES TECHNICO – ÉCONOMIQUES	50
APPLICATIONS DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE	51
BIBLIOGRAPHIE	54
RÉFÉRENCES ÉLECTRONIQUES	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire	14
Tableau 2 : Comparaison entre différents types de modules à membranes (UF, MF, NF, OI) industriels (Daufin, René et Aïmar, 1998)	24
Tableau 3 : Compatibilité des produits de désinfection avec les membranes (Daufin, René et Aïmar, 1998)	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Schéma du principe du fonctionnement d'une membrane sélective [1] .	7
Figure 2 :	Schéma du principe de l'osmose inverse (Daufin, René et Aïmar, 1998)	13
Figure 3 :	Représentation schématique des procédés de séparation membranaire par rapport à une échelle de taille des espèces susceptibles d'être présentes dans des fluides à traiter [2]	15
Figure 4 :	Description des différents types de membrane (Baker, 2004)	19
Figure 5 :	Module à plaques [3]	21
Figure 6 :	Module à membrane tubulaire [4]	22
Figure 7 :	Module à membrane spiralée [5]	22
Figure 8 :	Module à fibres creuses [6]	23
Figure 9 :	Phénomène de polarisation de concentration à l'interface membrane – solution (Daufin, René et Aïmar, 1998)	36
Figure 10 :	Système à simple passage et système à recirculation	41
Figure 11 :	Système à simple passage et plusieurs étages de modules	42
Figure 12 :	Système à recirculation et plusieurs étages de modules	43
Figure 13 :	Systèmes de modules en cascade (à trois étages)	44
Figure 14 :	Séparation membranaire en mode discontinu (batch)	45
Figure 15 :	Séparation membranaire en mode discontinu avec recirculation	45
Figure 16 :	Séparation membranaire en mode continu avec recirculation	47

AVERTISSEMENT

Cette revue de littérature s'inscrit dans le cadre du projet 642 « Étude de l'impact des procédés de séparation membranaire utilisés pour la concentration partielle de la sève d'érable sur la composition et les caractéristiques sensorielles du sirop d'érable ».

Ce document est adressé à toute personne souhaitant obtenir des renseignements généraux au sujet des procédés de séparation membranaire, ainsi que de leur utilisation dans l'industrie alimentaire. Son objet est de fournir au lecteur un point de vue général sur le sujet, ainsi que des références technico-scientifiques permettant de comprendre les procédés existants.

L'information compilée dans cette revue de littérature a été principalement tirée des ouvrages de Porter (1990); Daufin, René et Aimar; Aptel (1998); Guizard (2000); Moulin et Quemeneur (2002).

Certaines images présentées à titre d'exemple dans cette revue de littérature ont été tirées de sites Web d'organismes commerciaux ou éducatifs. Une référence électronique (hyperlien) est fournie afin d'accéder à l'image et aux politiques de confidentialité et droit d'auteur de ces organismes.

INTRODUCTION

Bien que connue depuis fort longtemps, la technique de séparation membranaire a suivi un développement industriel récent et très rapide. Depuis les années 1970, on retrouve ces techniques principalement dans l'industrie laitière, des boissons, des ovo-produits, des jus et concentrés de fruits et légumes, du traitement de l'eau, de l'acériculture, ainsi que dans les secteurs pharmaceutique, chimique, biotechnologique et de l'environnement. Elles sont en particulier aussi utilisées pour la potabilisation des eaux, l'affinage des eaux de procédés, les traitements des eaux usées et la valorisation de sous-produits.

Ces procédés sont en général appréciés pour leur faible consommation énergétique et leur bonne sélectivité. Les conditions particulièrement douces de fonctionnement, en ce qui a trait aux contraintes de cisaillement, de température et d'absence de changement d'état font partie des avantages de ces procédés.

Les procédés de séparation membranaire doivent aujourd'hui être considérés comme des technologies avancées, performantes et avantageuses à l'usage. Leur installation et leur mise en œuvre a besoin d'une attention et une expertise particulière afin d'obtenir des procédés industriels extrêmement performants, fiables et économiques.

La principale difficulté pour l'utilisateur d'une technologie nouvelle est d'acquérir rapidement l'information nécessaire au choix et à la mise en œuvre du procédé adapté à ses besoins. C'est dans ce contexte que cette revue de littérature a été compilée. Ce document a donc pour but de fournir de l'information de base aux utilisateurs de ces procédés qui souhaitent disposer d'un ensemble de connaissances générales leur permettant de comprendre les procédés existants, de dialoguer avec les fournisseurs ou encore de préparer des dossiers techniques avant d'approfondir l'une ou l'autre de ces technologies.

Dans la première partie de ce document les généralités des procédés de séparation membranaire sont présentées, ensuite les différents procédés de séparation membranaire sont décrits. Les différents types de membranes sont présentés en troisième partie, ainsi que leurs caractéristiques et leur nettoyage. Quelques notions de base (définitions) sont développées dans la quatrième section. La configuration des installations et les applications dans l'industrie alimentaire sont présentées dans les deux dernières sections.

GÉNÉRALITÉS DES PROCÉDES DE SÉPARATION MEMBRANAIRE

Les procédés de séparation membranaire sont utilisés pour séparer et surtout concentrer des molécules ou des espèces ioniques en **solution**, ou pour séparer des particules ou des microorganismes en **suspension** dans un liquide.

Le but recherché peut être de concentrer une solution, d'isoler ou de séparer un ou plusieurs constituants. Pour ce faire, des membranes sélectives sont utilisées, c'est-à-dire des barrières minces, qui sous l'effet d'une force arrêtent ou laissent passer des substances entre les deux milieux qu'elles séparent (Figure 1). Cette force peut être un gradient de pression, un gradient de potentiel électrique ou un gradient de potentiel chimique, souvent assimilé à un gradient de concentration.

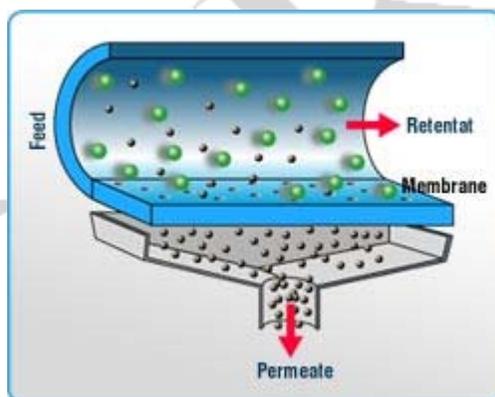


Figure 1 : Schéma du principe du fonctionnement d'une membrane sélective [1].

Les procédés de séparation membranaire sont utilisés dans bien des domaines industriels tel que l'industrie laitière, celle des jus, de la bière, du vin et des produits dérivés, du traitement des eaux ou encore de l'industrie pharmaceutique.

Les critères de sélection d'un procédé dépendent des caractéristiques des substances à séparer, de celles des membranes (dimension, forme, nature chimique, état physique, charge électrique ...) et des conditions hydrodynamiques d'opération.

Le transfert sélectif des espèces repose soit sur leur capacité à diffuser à travers le matériau membranaire, soit sur leur taille par rapport à celle des pores de la membrane (effet de tamis, ou effet stérique), soit sur une exclusion ionique, soit encore sur une combinaison de ces différents mécanismes.

Les avantages des procédés de séparation membranaire sur d'autres procédés de séparation sont :

- une séparation à température modérée, ce qui est particulièrement intéressant vis-à-vis des composés thermosensibles traités surtout en agro-alimentaire et biotechnologies;
- une absence de changement de phase, donc une moindre dépense énergétique comparée à des opérations comme la distillation ou l'évaporation;
- accumulation nulle de constituants dans la membrane, d'où un fonctionnement quasiment en continu, n'ayant pas besoin de cycle de régénération comme en échange d'ions. Des arrêts sont cependant nécessaires pour le nettoyage périodique des membranes.

PRÉSENTATION DES PROCÉDÉS DE SÉPARATION MEMBRANAIRE

Parmi les divers procédés de séparation membranaire, on distingue bien sûr la filtration et la technique d'osmose inverse. Il existe cependant d'autres techniques telles que la pervaporation (basée sur un gradient de potentiel chimique) ou l'électrodialyse (basée sur un gradient de potentiel électrique). Cette revue de littérature est dédiée exclusivement aux procédés pour lesquels le transfert de matière à travers la membrane est dû à un gradient de pression, soit la filtration membranaire et l'osmose inverse.

1. FILTRATION MEMBRANAIRE

Les techniques de filtration membranaire ont recours à des membranes de type poreuses. Les composés retenus sont sélectionnés sur une base stérique, c'est-à-dire en fonction de la taille des molécules qui les composent. Aux effets stériques peuvent s'ajouter des effets d'interaction électrostatique lorsque des membranes à petites tailles de pores sont utilisées.

On distingue trois niveaux de filtration membranaire, principalement par la taille des pores :

- a. la microfiltration (MF) pour laquelle la taille des pores est de l'ordre du micromètre se situant généralement entre 0,1 à 10 μm ;
- b. l'ultrafiltration (UF) se situe entre la microfiltration et la nanofiltration, avec une taille de pores variant de 1 à 100 nm (0,001 à 0,1 μm);
- c. la nanofiltration (NF) où la taille de pores est de l'ordre du nanomètre (0,001 μm).

1.1 Microfiltration (MF)

La séparation par microfiltration concerne en générale les particules en suspension. Dans la pratique, on rencontre ce type d'opération lorsqu'on procède à la clarification d'un milieu, en recherchant à éliminer la matière colloïdale et particulaire, avant utilisation ou post-traitement du milieu. Une autre grande application de cette technique est la rétention de micro-organismes tels que les bactéries. Des réductions de l'ordre de log de 6 à 8, en fonction des micro-organismes présents, du type de membrane et des conditions d'utilisation ont été constatées.

Cette opération se caractérise par des débits volumiques de perméat plutôt élevés et par la présence, parfois, de particules en suspension dans le rétentat. Les configurations planes et spiralées sont alors peu adaptées. Des modules à fibres creuses et des membranes tubulaires sont plutôt employées.

La mise en œuvre de la microfiltration doit tenir compte des caractéristiques des membranes et de leur facilité au colmatage. La membrane étant choisie, sa mise en marche a une importance très grande sur le colmatage, donc sur le rendement de l'opération. De façon générale, deux règles aux contraintes parfois antagonistes doivent être observées :

- la pression transmembranaire (PTM) doit être maintenue très faible, en particulier, au démarrage de l'installation, lors de la mise en route de pompes et lors de la fermeture des vannes de régulation de la pression. Il est indispensable de veiller à ce que la pression transmembranaire augmente très progressivement. En effet, pour les membranes de microfiltration ayant une très grande perméabilité, si la pression initiale augmente trop rapidement, le flux risque d'être immédiatement très élevé, mais pour une durée de temps très courte. Un tel fonctionnement génère un colmatage de la membrane très important compromettant ainsi le rendement pour le restant de l'opération. Une régulation de l'installation sur la base d'un flux de filtration constant plutôt que sur une pression de consigne est en général bien plus avantageuse du point de vue de la maîtrise du colmatage.
- La vitesse de circulation doit être élevée, car l'origine du colmatage est ici particulière. Plus les particules que l'on souhaite éliminer de la surface de la membrane sont petites, plus la vitesse doit être élevée. Cette règle va cependant à l'encontre de la précédente, car un débit de recirculation élevé entraîne une perte de charge le long de chaque module, donc nécessite une augmentation de la pression d'entrée, ce qui augmente la différence de pression transmembranaire.

Un compromis est donc à chercher entre longueur de modules, vitesse de circulation et pression transmembranaire maximale qui est, très souvent, le critère le plus important. Des modules à fibres creuses et des membranes tubulaires sont généralement employées.

Les membranes de microfiltration sont caractérisées essentiellement par un diamètre nominal de pores.

1.2 Ultrafiltration (UF)

Cette opération concerne la rétention de macromolécules (protéines, polysaccharides, etc.) et d'autres espèces de taille analogues comme des virus et des particules colloïdales. Toutes les espèces de plus grande dimension sont retenues également. Outre la dimension des espèces concernées, la différence majeure avec les autres procédés de filtration tangentielle connexes réside dans les mécanismes de transport mis en jeu et les propriétés des fluides.

La plus importante application dans le domaine agroalimentaire est dans l'industrie laitière. Le traitement du lactosérum permettant la récupération de protéines aux propriétés fonctionnelles très intéressantes et la réduction de la charge polluante dans les rejets est un exemple de l'application. Dans la pratique, ce type de membrane est souvent utilisé pour réaliser des opérations de séparation de petites particules ou de gros colloïdes. La raison à cela est que les pores de ces membranes étant plus petits en moyenne que ceux d'une membrane de microfiltration, on peut éviter dans certains cas un colmatage interne difficile à nettoyer. La décision de procéder de la sorte repose sur le flux moyen de filtration obtenu. Des essais pilotes peuvent permettre de trancher entre l'utilisation de membranes de microfiltration de perméabilité à l'eau élevée, mais qui se colmatent beaucoup, et l'utilisation de membranes d'ultrafiltration de perméabilité moyenne, mais dont le colmatage peut être moins sévère.

Dans la pratique, il est utile de connaître le flux limite, qui doit être déterminé expérimentalement tout en assurant que les conditions industrielles soient bien représentées d'un point de vue hydrodynamique. Une règle empirique recommande souvent de choisir le flux de travail à 80 % du flux limite. Travailler à un flux proche du flux limite favorise le colmatage irréversible et induit des coûts de nettoyage excessifs.

Les membranes d'ultrafiltration sont probablement celles pour lesquelles on trouve la plus grande variété de matériaux et de géométries. Des modules tubulaires, à fibres creuses, plans et spiralés sont employés en ultrafiltration. Ces membranes sont caractérisées par leur perméabilité et par leur seuil de coupure qui remplace la taille de pores lorsque les membranes sont classées par la sélectivité.

1.3 Nanofiltration (NF)

Les espèces concernées par la nanofiltration ont des tailles proches à celle de la molécule d'eau. Des molécules et des ions sont souvent partiellement retenus par ces membranes. Plus que toutes les autres membranes, ces membranes présentent des mécanismes de sélectivité mixtes basés à la fois sur la charge et sur la taille des molécules. Elles permettent donc des

séparations entre ions et petites molécules sur la base de leur taille. Les tailles des pores étant petites, les pressions nécessaires sont plus élevées qu'en ultrafiltration et les flux sont en général modérés. Les applications de la nanofiltration sont développées dans le domaine du traitement de l'eau et du traitement de certains fluides biologiques.

Les membranes de nanofiltration sont presque exclusivement polymériques et se présentent essentiellement sous forme de modules en fibres creuses et de modules spiralés. Ce sont des membranes anisotropes, parfois composites, mais toujours avec une peau aux pores de petite taille. Quelques membranes inorganiques sont également proposées sur le marché dans une gamme de sélectivité se situant entre la ultrafiltration et nanofiltration.

Ces membranes se caractérisent par leur rétention pour un ou plusieurs sels inorganiques simples (NaCl, CaCl₂, etc.) et par leur rétention pour des molécules neutres (en général des sucres tels que fructose, glucose, etc.). La concentration des solutions à laquelle ces mesures sont faites est une donnée qui peut être utile à l'utilisateur, lorsqu'elle est disponible, car ces caractéristiques dépendent fortement de l'environnement physico-chimique.

2. OSMOSE INVERSE

La technique d'osmose inverse (OI) ne s'apparente en rien aux techniques de filtration décrites ci-dessus. L'espace libre entre les enchevêtrements des matériaux qui composent ces membranes est voisin de l'Angström (1/10 du nanomètre ou 1/10000 du micromètre), soit de l'ordre de la taille d'une molécule d'eau. À cette échelle, on ne parle plus de membrane poreuse, mais plutôt de membrane dense. Les phénomènes de transfert de matière à travers la membrane sont bien différents de ceux qui ont lieu dans les cas de la filtration. Seul le solvant, l'eau le plus souvent, est diffusé à travers la membrane et la quasi-totalité des sels et autres constituants du système sont retenus.

Rappelons que le principe de l'osmose est basé sur l'équilibre de concentration d'espèces entre deux milieux séparés par une membrane semi-perméable. Sans la présence de membrane, les solutés se transportent par diffusion (et éventuellement convection naturelle), de façon à obtenir un seul milieu homogène avec une concentration uniforme. Avec une membrane, les solutés ne peuvent changer de milieu et c'est donc le solvant qui traverse la solution diluée vers la solution concentrée. La différence de concentration est ainsi réduite, mais une différence de pression de part et d'autre de la membrane est aussi créée, ceci jusqu'à l'atteinte d'un équilibre. La Figure 2 illustre ce phénomène. Lorsqu'il n'y a plus de mouvement de flux à travers la membrane et qu'il y a une différence de concentration entre les deux côtés de la membrane, la pression

correspondante est la pression osmotique. Il apparaît donc que cette pression osmotique dépend bien sûr du milieu solvant/soluté (donc aussi de la membrane car c'est elle qui définit quelle substance est soluté) et de la différence de concentration.

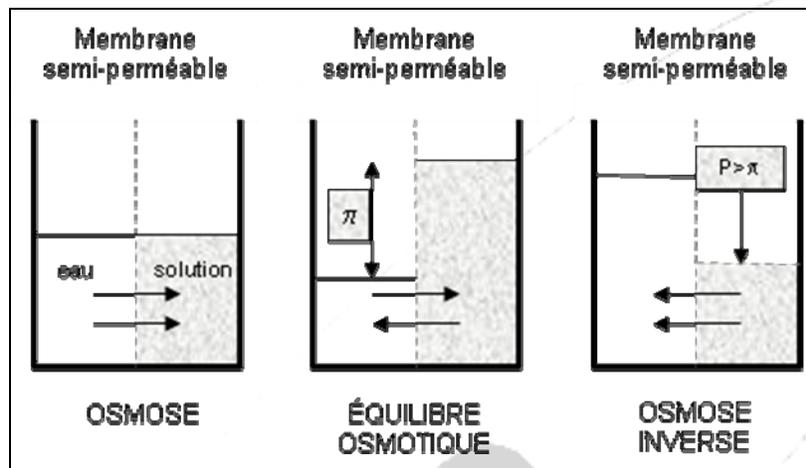


Figure 2 : Schéma du principe de l'osmose inverse (Daufin, René et Aimar, 1998).

Cette expérience démontre qu'un gradient de concentration peut être compensé par un gradient de pression. L'osmose inverse consiste ainsi à appliquer une différence de pression plus élevée que la pression osmotique de façon à provoquer un flux de solvant du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré, tout en maintenant un gradient de concentration déterminé. Celui-ci sera d'autant plus important que la différence de pression est élevée.

Les membranes sont des membranes denses et, pour obtenir des flux de transfert élevés et vaincre la pression osmotique des solutions traitées, des pressions relativement élevées doivent être utilisées. Les applications principales de l'osmose inverse sont l'élimination de sels organiques ou inorganiques ou des molécules dans l'eau ou bien la concentration de jus sucrés, par exemple.

Les membranes d'osmose inverse se présentent aujourd'hui presque exclusivement sous forme de modules spiralés. Il existe également des modules en fibres creuses. Les membranes sont en général en polyamide, acétate de cellulose ou polysulfone.

Les caractéristiques de ces membranes sont données sous forme de taux de rejets pour des sels inorganiques, comme NaCl, KCl ou encore CaCl₂.

3. CARACTÉRISTIQUES DES PROCÉDÉS DE SÉPARATION MEMBRANAIRE

Les principales caractéristiques des procédés de séparation membranaire décrits aux sections 1 et 2 sont regroupées au Tableau 1.

D'une manière très générale, des différences arbitraires entre ces opérations de séparation membranaire sont faites sur la base des tailles des espèces qu'elles sont censées séparer. À la Figure 3, les plages de filtration des différents procédés de séparation membranaire, ainsi qu'une échelle des particules filtrées.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire.

	Procédé			
	Microfiltration	Ultrafiltration	Nanofiltration	Osmose inverse
Caractéristiques de la membrane	Poreuse Convection 100 à 10000 nm	Poreuse Convection 1 à 100 nm	Poreuse Solubilisation/diffusion + Convection 1 à 10 nm	Dense Solubilisation/diffusion
Perméation de	Solvants et espèces dissoutes	Solvants, sels et petites molécules	Solvants, ions monovalents et petites molécules	Solvants
Rétention de	Particules, colloïdes	Macromolécules, colloïdes	Petites molécules (M > 300 g/mol) Ions	Sels
Pression d'opération usuelle et débit à travers la membrane	0,2 à 2 bar (3 à 30 psi) 150 à 1500 l/h/m ²	2 à 10 bar (30 à 150 psi) 50 à 300 l/h/m ²	7 à 40 bar (100 à 600 psi) 50 à 100 l/h/m ²	30 à 80 bar (450 à 1200 psi) 10 à 60 l/h/m ²
Applications	Épuration bactérienne du lait Fractionnement des globules gras du lait Fractionnement de protéines Traitement d'émulsions huile/eau	Concentration de protéines Clarification et stabilisation de moûts, jus, vins Fabrication de préfromage liquide Traitement des effluents (saumure)	Séparation et concentration d'antibiotiques Fractionnement d'acides aminés Adoucissement d'eau potable Concentration et déminéralisation du lactosérum	Concentration de lactosérum, de sang, de blanc d'œuf, de sève d'érable Dé-alcoolisation des vins et de la bière Dessalement des eaux

Colloïdes – agrégats de molécules ayant une taille de 0,2 à 0,002 µm.

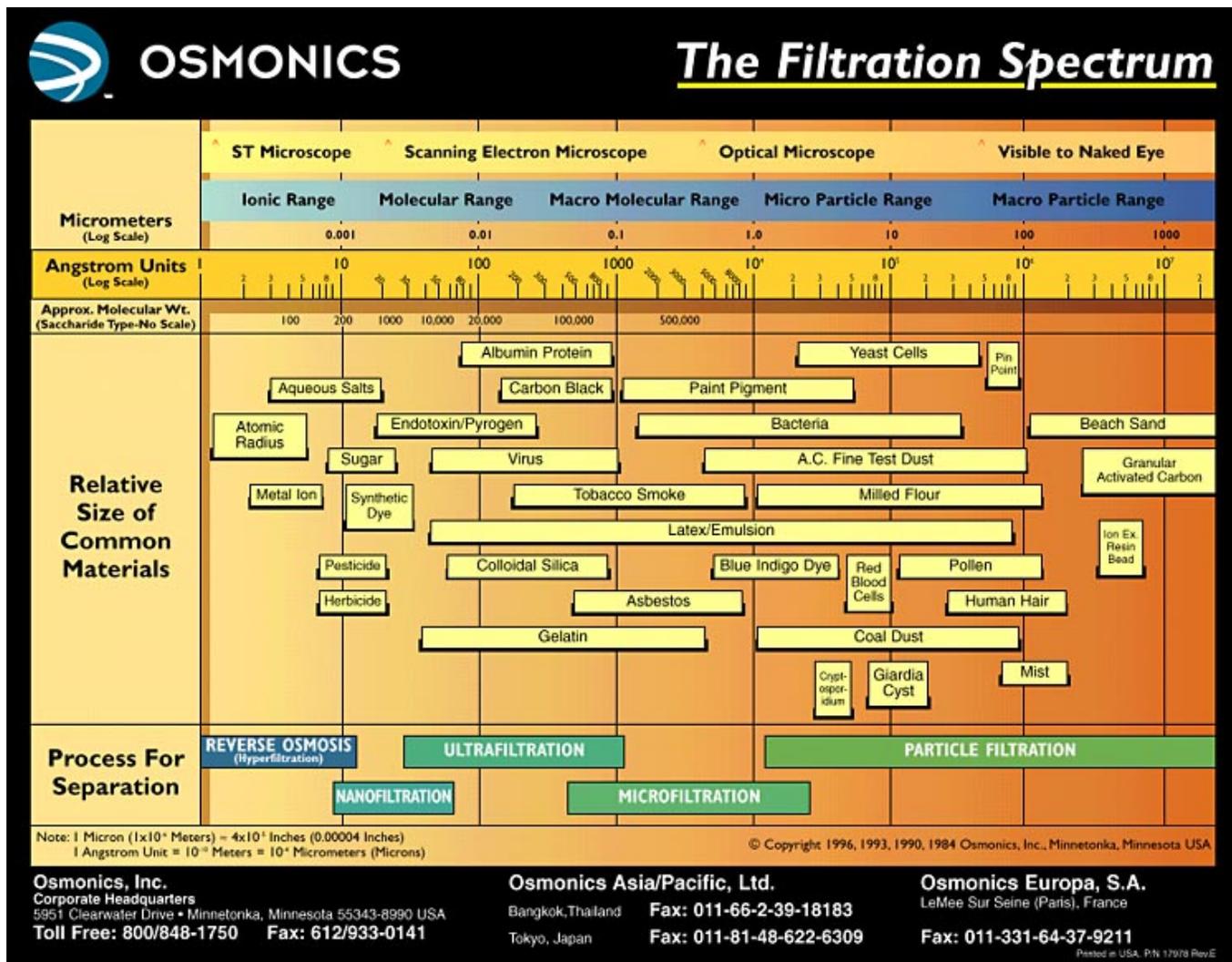


Figure 3 : Représentation schématique des procédés de séparation membranaire par rapport à une échelle de taille des espèces susceptibles d'être présentes dans des fluides à traiter [2].

LES MEMBRANES

Il existe une grande diversité de membranes. Elles sont classées par familles, selon leur nature chimique, leur structure et leur forme physique liée à leur mode de fabrication.

Une membrane est une interface physique, de faible épaisseur, qui contrôle le transfert d'espèces chimiques entre les deux milieux qu'elle sépare. Cette interface peut être homogène au niveau moléculaire, uniforme en composition et structure, ou elle peut être chimiquement et physiquement hétérogène, contenant des pores de dimension finie ou contenant des couches superposées.

1. TYPES DE MEMBRANE

1.1 De part leur nature

Les membranes sont fabriquées à partir de différents matériaux, de type organique ou minéral. Les **membranes minérales** ou céramiques sont de type composite (zircon ZrO_2 sur support carbone macroporeux ou sur alumine Al_2O_3 , ou oxyde de titane TiO_2 sur alumine ou encore totalement en carbone ou en alumine). Elles sont largement répandues car elles sont très sélectives, très perméables et peuvent être soumises plus facilement à des procédés de nettoyage assez agressifs sans trop être altérées. Elles ont une excellente résistance chimique, mécanique et surtout thermique.

Les **membranes organiques** sont fabriquées à partir de polymères. Les dérivés cellulosiques restent encore très utilisés, ainsi que les polyamides (en OI et NF). D'autres polymères, tels les polyacrylonitriles (PAN), les polysulfones (PS) et les polyfluorures de vinylidène (PVDF) sont de plus en plus répandus car ils résistent mieux à l'oxydation, au pH ou à la température.

1.2 De part leur porosité

1.2.1 Membranes poreuses

Ce type de membrane est similaire par sa structure au filtre conventionnel (de diamètre de pore supérieur au micron), mais elle diffère par la taille de ses pores 0,01 à 1 micron. Les particules plus grosses que les pores sont toutes retenues, celle de taille comprise entre les plus gros

pores et les plus petits sont partiellement retenues, et les particules de plus petites tailles passent en totalité. La séparation de soluté par des membranes poreuses est donc principalement une fonction de taille moléculaire et de distribution de taille de pores. En général, seulement les molécules qui diffèrent largement de taille peuvent être séparées par des membranes poreuses, par exemple en microfiltration ou ultrafiltration.

Généralement, en vue d'une meilleure sélectivité, une membrane poreuse est confectionnée de façon à comporter une distribution des diamètres des pores centrée autour d'une seule valeur :

- soit un diamètre inférieur à 2 nm environ dans le cas de micropores;
- soit un diamètre compris entre 2 et 50 nm dans le cas des mésopores;
- soit une taille supérieure à 50 nm dans le cas des macropores.

Le mécanisme de transfert de matière sous l'effet de la pression est exclusivement convectif pour le solvant, celui n'entraîne avec lui que les espèces dont la taille est plus petite que celle des pores (effet tamis).

1.2.2 Membranes denses

Cette membrane consiste en un film dense à travers lequel le perméat est transporté par diffusion sous l'effet d'une force de pression, de concentration ou de gradient de potentiel électrique. La séparation des composés d'un mélange est directement reliée à leur diffusivité et leur solubilité à travers la membrane. Ainsi, une membrane dense peut séparer des composés de taille voisine si leur solubilité (concentration dans la membrane) diffère.

Dans une membrane dense, lorsque les pores se réduisent aux espaces libres situés entre les chaînes de polymères, leur taille est voisine de celles des molécules organiques simples ou des ions hydratés. L'effet tamis devient donc négligeable.

1.3 De part leur fabrication

Pour obtenir une perméabilité sélective élevée, compatible avec un usage industriel, il est nécessaire que la barrière soit la plus mince possible. Il en résulte une certaine fragilité qui a été palliée par la consolidation de la barrière mince par différents moyens que ce soit, un support à pores de même nature ou de nature différente, un support tissé.

1.3.1 Membranes anisotropes (ou asymétriques)

Ces membranes sont formées d'une couche de surface très fine déposée sur un support poreux plus épais. Les propriétés de séparation et de perméabilité sont assurées par la fine couche extérieure, alors que la structure interne assure le support mécanique. Les bénéfices résultant en gain de flux sont tels que la plupart des procédés de séparation commerciaux utilisent des membranes anisotropes. Le flux à travers une membrane est inversement proportionnel à son épaisseur. Des flux élevés sont recherchés pour des raisons économiques, donc les membranes devraient être aussi fines que possible. Les technologies de fabrication conventionnelles de membranes permettent de fabriquer des membranes suffisamment résistantes et sans défaut, d'épaisseur minimale de 20 μm .

Les membranes organiques de microfiltration à nanofiltration ont une matrice organique de 100 à 200 μm qui sert de support à la membrane filtrante ou peau dont l'épaisseur se situe entre 0,1 et 1 μm .

Les membranes minérales, aussi asymétriques, sont composées d'une matrice à base d'alumine ou de carbone sur laquelle sont appliquées une ou plusieurs couches d'oxydes minéraux. La dernière couche est appliquée par frittage. Ainsi, la taille des pores est déterminée par granulométrie de la poudre initiale.

La peau peut être dense ou poreuse selon l'application envisagée et la tenue mécanique peut encore être améliorée par l'incorporation d'un support textile.

1.3.2 Membranes composites

Ces membranes sont de type organique et anisotrope. Cependant les deux couches la composant sont formées de polymères différents. Les membranes composites de nanofiltration et d'osmose inverse sont formées d'une matrice de 200 μm au centre, sur laquelle est appliquée une couche anisotrope de 40 μm de polymère poreux qui supporte une fine couche de 0,3 à 3 μm de polymère ajouté conférant à la membrane ses propriétés de rétention et de flux.

1.3.3 Membranes à charge électrique

Ces membranes peuvent être denses ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs. Les membranes chargées positivement favorisent le passage de cations,

celles chargées négativement favorisent le passage d'anions. Donc la séparation avec des membranes chargées est basée principalement sur la répulsion d'ions de même charge, mais aussi par la taille des pores. La séparation est contrôlée par la charge et la concentration des ions. Par exemple, les ions monovalents sont plus difficilement retenus que les ions bivalents et, dans les solutions à force ionique élevée, la sélectivité diminue. On rencontre ce type de membranes principalement en électrodialyse, mais aussi en osmose inverse.

Les différents types de membranes décrits ci-dessus sont présentés à la Figure 4.

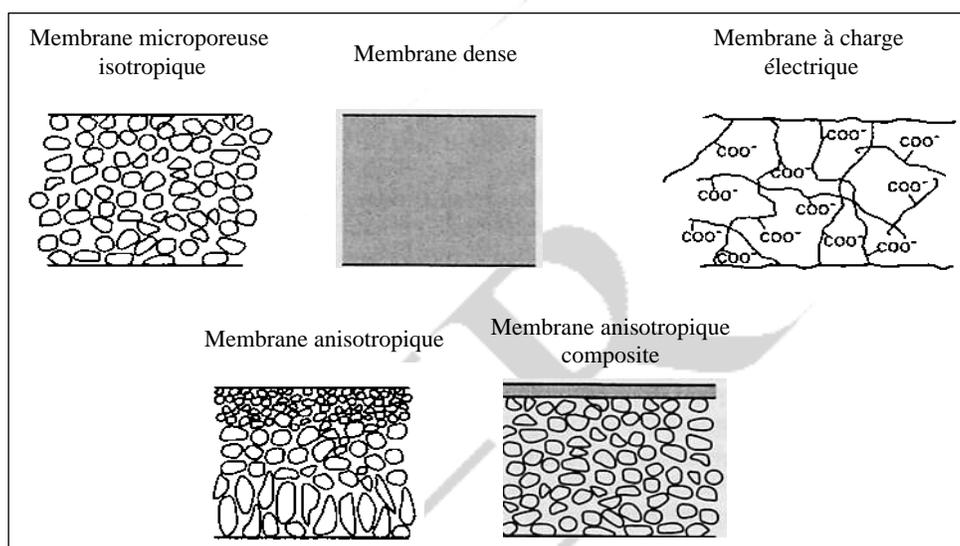


Figure 4 : Description des différents types de membrane (Baker, 2004).

2. CARACTÉRISTIQUES DES MEMBRANES

Les membranes sont généralement caractérisées par leur taille des pores, leur seuil de coupure relatif à une masse moléculaire critique, leur sélectivité ainsi que leur perméabilité à l'eau pure dans des conditions standard.

2.1 Taille des pores

La taille des pores varie de quelques microns en microfiltration à un nanomètre en nanofiltration. La porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme. En deçà du nanomètre, le mécanisme de transfert de solvant est plutôt de type solution/diffusion que convection ; l'eau n'est pas seulement poussée pour s'infiltrer au travers de la membrane, mais aussi elle diffuse au travers du matériau membranaire. La structure polymérique du matériau

change en fonction des énergies d'activation, donc de la température. La sélectivité de ces membranes dépend de l'affinité chimique du matériau avec les différents composés qui traversent la membrane.

2.2 Seuil de coupure

Le seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90 % des solutés sont retenus par la membrane. Celui-ci se mesure en g/mol ou en Dalton. Le seuil de coupure est une façon pratique de caractériser les membranes, mais pas tout à fait rigoureuse d'un point de vue scientifique, car il dépend aussi des autres caractéristiques du soluté ainsi que des conditions d'opération. Aussi le seuil de coupure doit-il être défini par rapport à un soluté donné.

2.3 Sélectivité

La sélectivité est une caractéristique difficile à quantifier et pourtant essentielle. C'est une caractéristique de surface de la membrane, qui détermine quels composés de la solution la traversent. Cette caractéristique est liée à la nature même de la membrane, physique et chimique.

2.4 Perméabilité

La perméabilité est un paramètre qui caractérise l'aisance avec laquelle l'eau traverse la membrane. La perméabilité dépend principalement de la taille des pores ainsi que de l'épaisseur de la membrane pour les membranes poreuses. Elle dépend aussi des propriétés chimiques pour les membranes denses.

3. GÉOMÉTRIE DES MODULES

Les membranes se présentent sous forme de films plans (feuilles), de tubes ou de fibres creuses. Elles sont mises en œuvre dans des modules regroupant un ou plusieurs éléments de base.

Les différents types de modules développés au cours du temps se distinguent en termes de performance par leur coût, la surface filtrante par module, la consommation énergétique par unité de volume de perméat produit, la susceptibilité au colmatage, la facilité de nettoyage et

l'aptitude à travailler dans les conditions de procédé (température, viscosité, pression, débit, pH, abrasion, résistance aux traitements de nettoyage). Les quatre types de module disponibles de nos jours pour des applications industrielles sont les suivants :

- module à membrane plane;
- module à membrane tubulaire;
- module à membrane spiralée;
- module à fibres creuses.

3.1 Module à membrane plane

Les membranes en feuilles sont montées de part et d'autre de cadres rigides, empilés selon le principe du filtre-pressé (Figure 5). Cet arrangement présente beaucoup de flexibilité, et un bon accès aux membranes pour le nettoyage ou le remplacement. Ces systèmes sont cependant peu adaptés aux débits élevés, se colmatent facilement et nécessitent généralement une pré-filtration.

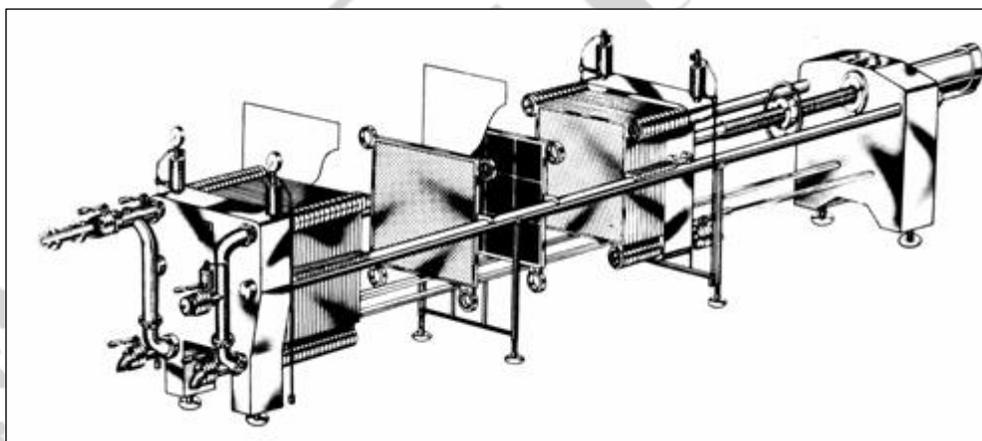


Figure 5 : Module à plaques [3].

3.2 Module à membrane tubulaire

Les membranes se présentent sous forme de tubes regroupés en parallèle dans un module (faisceaux de tubes de 4 à 25 mm de diamètre intérieur). Le perméat est récupéré dans l'enveloppe du module, à l'extérieur des tubes. Ces systèmes sont aussi très flexibles pour le nettoyage, peu portés au colmatage et fonctionnent généralement en régime d'écoulement

turbulent. Leurs principaux défauts sont le coût et l'encombrement. Ce type de module est surtout utilisé pour des membranes minérales.

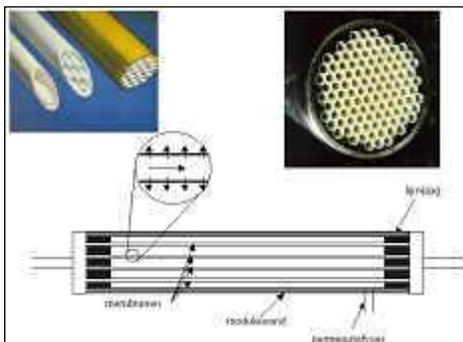


Figure 6 : Module à membrane tubulaire [4].

3.3 Module à membrane spiralée

Ces modules sont les plus utilisés pour la nanofiltration et l'osmose inverse. Ils sont composés d'un tube perforé, sur lequel sont enroulées successivement une membrane, une grille fine en plastique, une membrane et une grille en plastique plus grossière. Le rétentat circule dans la grille grossière alors que le perméat est acheminé par la grille fine jusqu'au tube central. Cet arrangement est très compact et convient pour les traitements à haute pression. Le nettoyage et la désinfection sont cependant peu aisés et le débit d'opération est limité.

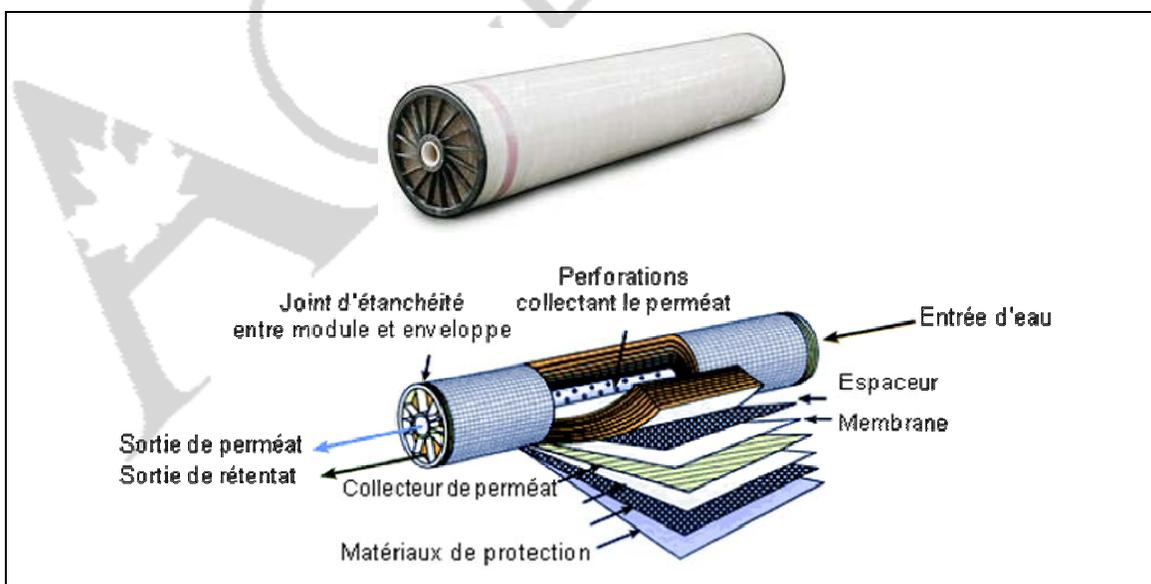


Figure 7 : Module à membrane spiralée [5].

3.4 Module à fibres creuses

Ce type de module se présente comme un ensemble de fibres creuses regroupées dans une enveloppe. La peau est localisée à l'intérieur ou à l'extérieur de chaque fibre selon que le perméat est collecté à l'extérieur ou à l'intérieur des fibres. Ces systèmes sont très compacts, peu coûteux, particulièrement adaptés pour des fluides peu visqueux présentant de faibles risques de colmatage. Une pré-filtration est donc fortement recommandée.

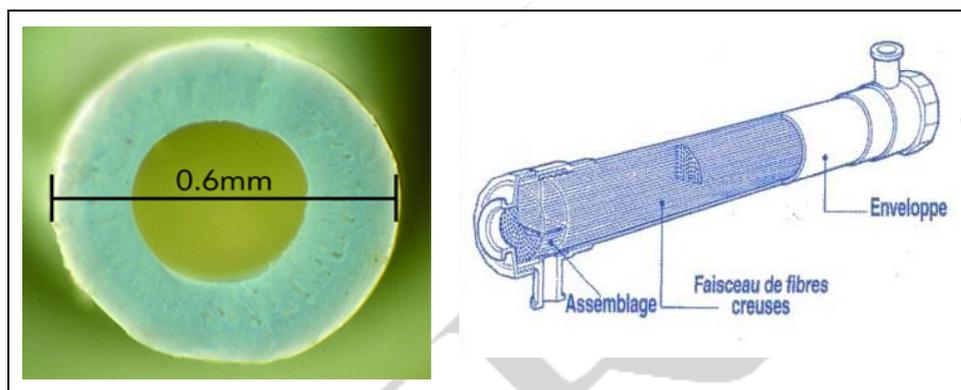


Figure 8: Module à fibres creuses [6].

Le choix du type de module dépend d'un certain nombre de critères, liés au contexte industriel. Ainsi, dans une application sanitaire, les zones mortes sujettes au colmatage et au développement bactérien sont à proscrire. Aussi le module doit être facilement nettoyable et parfois même stérilisable à la vapeur. Les matériaux utilisés dans le module doivent être conformes à la législation concernant le contact avec les produits alimentaires.

Les caractéristiques et différences entre les divers modules industriels sont résumées au Tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison entre différents types de modules à membranes (UF, MF, NF, OI) industriels (Daufin, René et Aimar, 1998).

	Géométrie			
	Plan	Spiralée	Tubulaire	Fibres creuses
Membranes	Organique en format rectangulaires ou en disque	Organiques	Organiques : monotubulaires Minérales : monotubulaires ou multicanaux	Organiques avec la couche séparatrice ou peau à l'intérieur ou à l'extérieur
Assemblage	Selon le principe du filtre-pressé. Le côté rétentat se trouve entre les plaques porte-membranes, qui sont séparées entre elles par des joints cadres. Le côté perméat se trouve dans la partie creuse de la plaque	Les membranes d'origine plane sont enroulées et collées sur un tube perforé avec des grilles flexibles pour séparer le côté rétentat du côté perméat	Le module consiste en un assemblage de plusieurs membranes tubulaires parallèles séparées par des joints d'étanchement. Le côté rétentat se trouve à l'intérieur et le côté perméat à l'extérieur des tubes. L'ensemble est incorporé dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable	Le module consiste en un ou plusieurs faisceaux de fibres creuses empotés dans une résistance et assemblés dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable
Surface filtrante par module industriel	jusqu'à 100 m ²	jusqu'à 30 m ²	jusqu'à 25 m ²	jusqu'à 74 m ²
Avantages	Flexibilité du système modulaire Échange standard par plaque Faible consommation d'énergie Accès aux membranes Performance (flux) Plaques réutilisables	Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Prix	En général : Faible colmatage Facilité de nettoyage Échange standard par tube Traitement de produits visqueux facile Membranes minérales : Durée de vie Tenue mécanique Thermostabilité Résistance aux lavages chimiques Stérilisation à la vapeur	Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Tenue mécanique Prix
Inconvénients	Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage Prix	Performance (flux) Échange standard par module Traitement de produits visqueux difficile Faible résistance thermique des matières plastiques Perte de charge élevée Zones mortes Colmatage Nettoyage difficile Accès aux membranes Membranes collées Télescopage de la membrane	En général : Volume mort important Consommation d'énergie Prix Membranes organiques : Faible résistance thermique des matières plastiques	Traitement de produits visqueux difficile Échange standard par module Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage

4. NETTOYAGE

4.1 Colmatage des membranes

Le colmatage des membranes a pour conséquence de réduire le flux d'écoulement ou d'augmenter la pression d'opération, ainsi que de modifier la sélectivité des membranes. Le but du nettoyage est de retrouver, par une procédure chimique, mécanique ou enzymatique, les caractéristiques initiales des membranes. Cependant, les membranes propres ne retrouvent jamais les caractéristiques qu'elles avaient lorsqu'elles étaient neuves et au fur et à mesure des nettoyages, elles ont toujours plus ou moins tendance à se dégrader.

La détermination de la nature et de la structure des éléments qui colmatent la membrane est nécessaire pour établir le choix des agents de nettoyage et des conditions d'opération les plus efficaces. Les caractéristiques de ces éléments sont fonction de la composition physicochimique du fluide filtré (solvant et soluté), de la nature chimique de la membrane, de sa perméabilité ainsi que des conditions d'opération (température, pression, hydrodynamique, pH, force ionique, etc.) du procédé de séparation. Il est possible de classer les éléments colmatant en deux groupes :

- les résidus solubles dans l'eau, qui peuvent être éliminés par une étape de rinçage (par exemple, les sucres)
- les résidus non solubles dans l'eau, qui forment une couche poreuse et résistante, composée principalement de protéines et des sels, ainsi que de microorganismes, colloïdes, polysaccharides insolubilisés, etc.

Les **protéines** constituent le principal agent de colmatage dans le domaine agroalimentaire et biologique. L'expérience montre que leur élimination doit être réalisée avec des détergents à pH alcalin, et que plus la valeur du pH est élevée, plus son hydrolyse et sa solubilité augmentent. Les membranes colmatées par des protéines ne doivent pas être conservées sous formaldéhyde, car il en résulte la formation de composés du type bakélite très difficiles à éliminer.

Les **matières grasses** avec leur caractère hydrophobe sont favorablement adsorbées sur les matériaux membranaires hydrophobes et insolubles en milieu aqueux alcalin ou acide. L'élimination des lipides s'appuie sur l'action de tensioactifs qui émulsifient la matière grasse. La principale contrainte est qu'ils soient compatibles avec les matériaux membranaires, les espaceurs et les supports du système. La plupart des tensioactifs et des antimousses commerciaux utilisés interagissent avec les matériaux de la membrane. Il s'en suit des modifications irréversibles des performances de la membrane.

Certains **sels minéraux** sont à l'origine d'un colmatage sévère, par exemple la formation de phosphate de calcium insoluble. Ces sels forment aussi des composés complexes avec les protéines, contribuant ainsi à une autre forme de colmatage des protéines.

L'information sur l'effet d'**autres composés** tel que polysaccharides, huiles, boues microbiologiques sur le colmatage est limitée. Les pectines et autres composés de l'acide polygalacturonique colmatent les membranes utilisées dans les procédés de clarification des jus de fruits.

Différentes techniques permettent d'évaluer le niveau de colmatage d'une membrane. La détermination de la résistance hydraulique intrinsèque de la membrane qui résulte de la mesure de la valeur du débit à l'eau pure propre de la membrane dans des conditions bien déterminées de pression et température est une technique de routine des plus efficaces. Une autre technique consiste à analyser la solution de détergent après nettoyage et de déterminer la concentration des principaux colmatants.

4.2 Types de nettoyage

Trois types de nettoyage sont de façon générale pratiqués :

- le nettoyage mécanique, un nettoyage partiel, mais rapide
- le nettoyage chimique, qui implique un arrêt de production périodique, génère des coûts en solutions de lavage et en traitement des effluents;
- le nettoyage enzymatique.

4.2.1 Nettoyage mécanique

Le principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques, d'origine hydrodynamique. La procédure généralement utilisée est le rétrolavage : une partie du perméat est retourné à contre-courant à travers la membrane. Une telle pratique nécessite une membrane qui soit en mesure de supporter physiquement un gradient de pression inversé. Une autre pratique consiste à utiliser des écoulements pulsés, ce qui permet d'augmenter périodiquement la vitesse tangentielle à la surface de la membrane. Enfin, par injection continue ou occasionnelle d'air (ou de gaz) à travers la membrane, la matière déposée en surface peut éventuellement se décoller.

Très efficace dans le cas de dépôts faiblement liés au support, ce type de nettoyage ne concerne que les configurations tubulaires ou spiralées. Toutefois il ne permet pas de se libérer totalement du nettoyage ou de la désinfection par voie chimique, mais vise à réduire leur fréquence.

4.2.2 Nettoyage chimique

Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phases de rinçage. La durée d'une séquence de nettoyage peut aller de 30 à 60 min. Les nettoyages sont généralement effectués à la température la plus élevée que la membrane peut supporter sans dégradation, pour une meilleure efficacité, soit de 60 à 80 °C. Les principales étapes de nettoyage se déroulent ainsi :

- le premier rinçage a pour but d'éliminer les composants solubles accrochés à la membrane. On utilise donc l'effet mécanique d'un écoulement tangentiel à haute vitesse ainsi que l'effet solvant de l'eau;
- le premier nettoyage à base d'acide, a pour objectif de solubiliser les couches d'entartrage contenant calcium, tartre et minéraux, et ainsi d'éviter la formation d'hydroxydes insolubles donc très difficiles à éliminer;
- un deuxième rinçage permet d'éviter la neutralisation de la deuxième solution de nettoyage;
- le deuxième nettoyage, alcalin, a principalement pour effet d'hydrolyser la matière organique et biologique.

La séquence de nettoyage dépend bien évidemment du contexte d'utilisation. Par exemple, pour une application de traitement du lait, où les protéines constituent le principal composant du colmatage, le traitement alcalin précèdera le nettoyage acide. Par contre, lorsque le colmatage inorganique domine, le traitement acide sera généralement effectué en premier lieu.

L'agent de nettoyage doit à la fois être efficace pour éliminer l'agent colmatant et inoffensif vis-à-vis des membranes et du procédé. Par exemple, des solutions d'HCl ne sont pas utilisables en présence d'acier inoxydable. La connaissance de la nature du matériau membranaire et de son environnement conduit à exclure certains réactifs et impose la limite en pH, en température, en temps de contact et en concentration.

4.2.3 Nettoyage enzymatique

Ce type de nettoyage constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans les cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes requièrent des temps de traitement plus longs que les traitements chimiques et sont aussi plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont peu souvent adoptés.

4.3 Eau utilisée pour le nettoyage

La qualité de l'eau utilisée dans les opérations de nettoyage des membranes est déterminante. On considère qu'au niveau industriel dans plus d'un cas sur dix, l'eau utilisée est elle-même encrassante vis-à-vis des membranes. Idéalement l'eau de nettoyage des membranes (eau de rinçage ou eau de préparation des solutions) doit satisfaire de façon générale aux conditions suivantes :

- indice de colmatage (Fouling index) inférieur à 1 – 5;
- dureté totale entre 1 à 5 milliéquivalent/L;
- teneur en silicates inférieure à 1 – 5 mg/L;
- teneur en fer inférieure à 0,1 – 0,5 mg/L;
- teneur en manganèse inférieure à 0,02 – 0,2 mg/L.

Si l'eau disponible dans l'installation est entartrante ou agressive, on devra la traiter. Pour des applications dans le secteur agroalimentaire, la qualité microbiologique de l'eau doit être surveillée.

4.4 Solutions de nettoyage

Suivant la nature des éléments colmatants et celle des matériaux composant la membrane, différents produits de nettoyage peuvent être utilisés :

- produits alcalins : soude et potasse saponifient les grasses et solubilisent les protéines;
- produits acides : ils participent à la dissolution de précipités de sels minéraux. Leur efficacité est limitée sur les dépôts de nature organique. Les plus utilisés sont l'acide nitrique et phosphorique;

- produits tensioactifs : leur rôle est d'augmenter la mouillabilité de la surface filtrante et de favoriser le contact entre l'agent de nettoyage et le dépôt. Les tensioactifs anioniques et non ioniques sont en général les plus efficaces;
- solutions d'enzymes : ces solutions sont surtout utilisées pour les membranes en acétate de cellulose. Elles s'avèrent efficaces, mais elles sont chères et leur action est assez lente. La formulation de ce type de produit exige l'utilisation de différentes enzymes (protéases, lipases, amylases et cellulases).

En ce qui concerne la nature de la membrane :

- membranes organiques en acétate de cellulose : elles peuvent être soumises à des pH de 3 à 8, à une température maximale de 30 à 40 °C. Elles supportent des solutions de nettoyage chlorées à une concentration maximale de 50 mg/l.
- membranes organiques en polyamide aromatique : elles peuvent être soumises à des pH de 3 à 11, à une température maximale de 35 à 80 °C. Elles sont très sensibles à la présence de chlore, elles se dégradent aussi au contact d'autres agents oxydants.
- membranes organiques en polysulfone : elles peuvent être soumises à des pH de 1 à 13, à une température inférieure à 80 °C. Les propriétés ionisantes de certains produits de nettoyage peuvent modifier leurs caractéristiques.
- membranes minérales : les membranes en alumine α ne sont pas affectées par le pH et peuvent être stérilisées à la vapeur. Elles supportent des concentrations de NaOH et de HNO₃ jusqu'à des concentrations de 2%, à des températures élevées. Les membranes en alumine γ ont une résistance limitée à la corrosion et ne supportent pas l'acide phosphorique. Les membranes en oxyde de zirconium et oxyde de titane réagissent très bien à la température et aux agents chimiques oxydants.

4.5 Désinfection des modules

La désinfection a pour objectif de détruire les micro-organismes accumulés dans le système qui forment en particulier un biofilm à la surface des membranes. La désinfection a pour objectif la conformation des spécifications particulières pour les applications alimentaires et pharmaceutiques; ainsi que le nettoyage des membranes de toute accumulation de biofilm. La désinfection peut être complétée par une seconde séquence de produits chimiques, par

traitement thermique ou par radiation. Les produits chimiques utilisés sont à base de chlore, d'acide ou d'aldéhyde, selon leur compatibilité avec les membranes.

Ici, de la même façon que pour le nettoyage chimique, des séquences de lavage répétées ont des répercussions relatives au vieillissement des membranes, qui se traduisent par un changement des propriétés de sélectivité ou de perméabilité, ainsi qu'un affaiblissement mécanique pouvant résulter ultimement en une rupture de membrane.

Il s'agit d'utiliser des agents chimiques dont le spectre d'action est adapté aux micro-organismes à détruire. La stérilisation à la vapeur ou mieux l'eau surchauffée est également utilisée, mais ne concerne quasiment que les membranes minérales. Les désinfectants les plus utilisés sont les oxydants halogénés et oxygénés (eau de javel, acide péracétique, eau oxygénée ...). Cependant, la plupart des membranes organiques sont sensibles au chlore (concentration seuil à respecter), et des matériaux tels que le polyamide ne peuvent être désinfectés que par des aldéhydes, des chloramides ou du métabisulfite de sodium. Par ailleurs, la compatibilité du désinfectant avec les matériaux constituant l'installation doit également être considérée (Tableau 3).

Tableau 3 : Compatibilité des produits de désinfection avec les membranes (Daufin, René et Aimar, 1998).

	CHLORE (mg/L)	EAU OXYGÉNÉE (%)	ACIDE PERACÉTIQUE (%)	ALDÉHYDES (%)	METABISULFITE (%)
Acétate de cellulose	< 50	0,3 (*)	0,3 (**)		0,5
Polyamide	0	non compatible		5	0,5
Polysulfone	< 200	0,3	0,3	1	0,5
Difluorure de polyvinyle	< 350				
Oxyde de zirconium	< 400	0,5	0,3	5	
Oxyde d'aluminium	< 300	0,5	0,3	5	

(*) – Eau oxygénée; P3 Oxonia (Henkel) (**) – P3 Oxonia actif

NOTIONS DE BASE

1. DÉFINITIONS

Flux transmembranaire	Débit de perméat passant à travers la membrane, par unité de surface de la membrane.
Membrane	Une membrane à perméabilité sélective est une barrière matérielle qui permet le passage ou l'arrêt sélectif, sous l'action d'une force agissante, de substances entre les deux volumes qu'elle sépare.
Membrane anisotrope	Membrane composée d'une fine couche externe (peau) qui assure la sélectivité et d'un support interne plus épais qui assure la résistance mécanique.
Membrane composite	Membrane composée de plusieurs couches de matériaux différents.
Membrane dense	Membrane dont l'espace libre entre les enchevêtrements des matériaux qui composent la membrane est voisin de 1 Å (10^{-10} m) soit de l'ordre de la taille des molécules d'eau.
Membrane poreuse	Membrane dont la taille des pores est supérieure au nanomètre.
Sélectivité	Définie par le taux de rétention (TR) de l'espèce que la membrane est censée retenir.
Soluté	Composés dissous dans un solvant.
Perméabilité	Pour de l'eau pure, dans des conditions standard de température (25°C) et de pression (1 atm), la perméabilité est définie par le rapport entre le débit d'eau traversant la membrane par unité de sa surface, divisée par la pression transmembranaire.
Perméat (filtrat)	Fluide qui s'écoule à travers de la membrane.
Pression osmotique	Seuil de pression transmembranaire, en deçà duquel il n'y a pas de transfert à travers la membrane du milieu le plus concentré au milieu le moins concentré.
Pression	Différence de pression appliquée entre les deux volumes séparés

transmembranaire	par la membrane.
Résistance hydraulique	Inverse de la perméabilité.
Rétentat (concentrât)	Fluide qui est retenu par la membrane.
Solvant	Fluide capable de dissoudre des composés et permettre leur transport. L'eau est un solvant.
Taux de conversion	Fraction de débit du liquide qui traverse la membrane par rapport au débit du fluide à traiter Q_o .

$$Y = \frac{Q_p}{Q_o}$$

Taux de rétention (ou de rejet)	Différence de concentration de l'espèce d'intérêt (sel, macromolécule, particule) dans le fluide à traiter C_o et le perméat C_p , divisée par la concentration de cette même espèce dans le fluide à traiter.
---------------------------------	--

$$TR = 1 - \frac{C_p}{C_o}$$

2. LOIS DE COMPORTEMENT

Dans cette section sont présentés les mécanismes de base qui prévalent dans les processus de séparation membranaire. Les modèles proposés permettent d'évaluer le flux de solvant passant au travers des membranes, ainsi que le taux de rétention des différents composés.

La **loi de Darcy** permet d'évaluer le flux volumétrique de solvant passant à travers un milieu poreux, donc pour les membranes de microfiltration, ultrafiltration et nanofiltration. Ce modèle décrit le flux J ($m^3/m^2 \cdot s$) comme étant proportionnel à la différence de pression appliquée de part et d'autre de la membrane ΔP (Pa), et inversement proportionnel à la viscosité du solvant qui passe à travers la membrane μ_p (Pa·s). Il s'agit là d'un flux de type convectif :

$$J = L_p \frac{\Delta P}{\mu_p}$$

où L_p est le coefficient de perméabilité de la membrane (m).

Le coefficient de perméabilité est un paramètre lié aux propriétés de la membrane et peut être déterminé expérimentalement, en utilisant seulement du solvant, de l'eau par exemple. Pour ce faire, il convient de tracer la courbe de variation des flux de solvant à plusieurs pressions appliquées et de s'assurer que les points sont alignés et passent par l'origine. Un décalage par rapport à l'origine peut provenir d'un problème d'étalonnage de capteurs. Une non-linéarité peut venir d'une compression de la membrane sous l'effet de la pression. Un préconditionnement de la membrane sous une pression proche de la pression maximale préconisée est souvent une bonne précaution à prendre pour obtenir des performances reproductibles en termes de perméabilité.

La dépendance à la viscosité du solvant permet en particulier d'illustrer l'influence de la température dans le procédé de séparation membranaire. Un accroissement de température a généralement pour effet de réduire la viscosité du solvant et donc d'augmenter le flux de perméat.

Ce modèle de base présente cependant un certain nombre de limitations, soit, en particulier, sous l'effet d'une pression élevée, la compression de la membrane peut avoir pour effet de réduire sa perméabilité. De plus, le colmatage de la membrane a aussi pour effet de réduire la perméabilité.

Dans le contexte de membranes poreuses, soit en osmose inverse, il n'y a plus d'effet de convection, et le solvant traverse la membrane par diffusion.

Ce mode de transport est modélisé par la **loi de transfert de solvant**, qui n'est autre que la loi de Darcy modifiée. Dans ce modèle, la pression appliquée (ΔP) contribue dans un premier lieu à combattre la pression osmotique (Π) qui est multipliée par un coefficient de rétention σ déterminé à flux élevé, puis à générer un flux à travers la membrane (J) :

$$J = L_p \frac{\Delta P - \sigma \Delta \Pi}{\mu_p}$$

Ce modèle permet en particulier d'introduire, à travers la pression osmotique, l'influence de la concentration du rétentat en amont de la membrane.

En résumé, il y a donc deux mécanismes de transport du solvant au travers de la membrane : la convection et la diffusion. Ces deux mécanismes sont illustrés ci-dessus par deux modèles mathématiques distincts. La limite entre les domaines d'application de chacun de ces deux modèles est déterminée par la taille des pores de la membrane en rapport à celle du solvant, soit de la molécule d'eau.

Il en est de même pour les molécules du soluté, de plus grande taille que celles de l'eau. Les molécules de taille bien plus petites que celle des pores circulent aisément, par convection, au travers de la membrane. Les molécules de taille voisine de celle des pores peuvent traverser mais se trouvent en contact intime avec les parois des pores de la membrane; il y a alors diffusion. Les molécules de plus grosse taille sont retenues et ne font donc pas partie du soluté. La sélection des molécules qui traversent la membrane et leur quantité sont une propriété de la membrane, pour un fluide donné : c'est la sélectivité. La sélectivité des membranes poreuses de rayon de pore moyen « r » est décrite par la **loi de Ferry**, selon laquelle les particules ou molécules sont d'autant plus retenues que leur rayon apparent « a » est élevé. Le taux de rétention (TR) est donc définie par :

$$TR = \left[1 - \left[1 - \frac{a}{r} \right]^2 \right]^2 \quad \text{si } a \leq r$$

$$TR = 1 \quad \text{si } a = r$$

Cette relation suppose que l'écoulement est laminaire (écoulement ordonné constituant des filets de fluide parallèles), que les solutés sont neutres (sans charge électrique), que la sélectivité est basée exclusivement sur les effets stériques (taille) car les pores de la membrane sont tous identiques. Ce modèle est bien adapté pour la microfiltration.

En ultrafiltration, des effets de charge électrostatique s'ajoutent aux effets stériques. En effet, si la membrane est porteuse de charge, les solutés d'interaction répulsive, donc de même charge, paraissent plus gros et leur diamètre apparent est alors plus élevé que leur diamètre réel. Ceci a pour effet d'augmenter leur rétention (a tend à r dans la loi de Ferry).

Pour les membranes de nanofiltration, les phénomènes de transport qui prédominent sont différents. En effet, d'une part, la différence de taille entre les pores et les molécules de solvant est petite, d'autre part les effets de convection sont très lents, soit du même ordre que ceux de diffusion des solutés. L'effet de charge devient par contre très important du fait de la proximité entre soluté et parois des pores de la membrane. Le **modèle de Donnan** permet de décrire de manière qualitative l'effet des interactions électrostatiques sur la répulsion des ions en nanofiltration.

En osmose inverse, la sélectivité dépend principalement de la nature chimique de la membrane. Seules les substances solubles dans la membrane sont susceptibles de la traverser. En premier lieu, la membrane doit avoir une grande affinité pour le solvant et être très hydrophile si l'on

veut extraire de l'eau de la solution. Le taux de rétention pour ces membranes dépend de la pression appliquée et tend vers une valeur maximale, inférieure à l'unité lorsque la pression augmente.

3. LIMITATION DU FLUX DE PERMÉAT

Les modèles décrits dans la section précédente ne prennent pas en compte tous les mécanismes qui ont lieu dans un procédé membranaire. Pourtant, certains d'entre eux ont une importance déterminante dans le fonctionnement des membranes. En effet, les divers mécanismes de polarisation de concentration et de colmatage, présentés ci-dessous, compliquent quelque peu la situation. Pour plus de détails sur des modèles de comportement plus avancés, le lecteur pourra se référer aux ouvrages en référence.

3.1 Polarisation de concentration

À titre d'exemple, ce phénomène est illustré à la Figure 9. Le fait qu'il y ait un flux de solvant à travers la membrane et que la membrane retienne certaines particules, entraîne leur accumulation progressive à la surface de la membrane (C_m). Ce phénomène génère une concentration en particules au voisinage de la membrane plus élevée que la concentration dans la solution (C_o). Cette différence de concentration en amont de la membrane a donc pour effet de générer une rediffusion des molécules vers la solution. Ces deux courants - accumulation de matière retenue et rediffusion vers la solution - atteignent un certain équilibre de telle sorte qu'il se forme à la surface de la membrane un gradient de concentration dans une couche dont l'épaisseur de quelques microns (δ) dépend des conditions hydrodynamiques environnantes. C'est ce que l'on appelle la polarisation de concentration. Ce phénomène de polarisation est réversible, en ce sens si l'opération est arrêtée, ce gradient de concentration en amont de la membrane disparaît.

Le phénomène de polarisation de concentration a pour effet d'augmenter la concentration en amont de la membrane. Globalement ceci se traduit par une réduction de la perméabilité, et augmente le risque de colmatage de la membrane. Une bonne façon pratique de minimiser ce phénomène consiste à augmenter le champ d'écoulement tangentiel en amont de la membrane, de façon à réduire l'épaisseur de couche de concentration. En effet, un accroissement du débit à l'entrée de la membrane a pour effet de balayer les particules qui ont tendance à s'agglutiner sur la membrane.

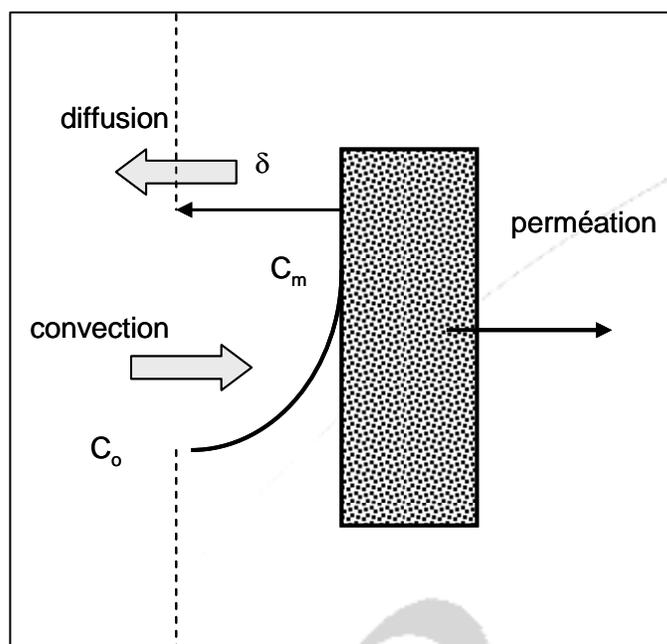


Figure 9 : Phénomène de polarisation de concentration à l'interface membrane – solution (Daufin, René et Aimar, 1998).

De façon générale, la polarisation de concentration dépend de la vitesse de perméation, la mobilité des particules dans le solvant qui est fonction de leurs caractéristiques (taille, forme) et de la viscosité du solvant, de l'hydrodynamique à proximité de la surface de la membrane (régime d'écoulement, présence de turbulence, etc.).

3.2 Le colmatage

Le colmatage est défini comme l'accumulation de matière à la surface de la membrane (en particulier à l'entrée des pores) où à l'intérieur des pores de la membrane. Le colmatage est considéré comme irréversible lorsque les lavages chimiques ne permettent pas de rétablir la perméabilité de la membrane à son niveau initial. Il nécessite donc périodiquement un arrêt des opérations pour fin de nettoyage. Celui-ci est coûteux et a un impact sur la durée de vie des membranes.

Les différents mécanismes de colmatage sont décrits ci dessous:

3.2.1 Colmatage par adsorption

Phénomène physico-chimique dû à des interactions entre certains constituants du fluide et la surface ou l'intérieur des pores de la membrane. Les facteurs d'influence sont le type de molécules en présence, le pH, la présence de cations spécifiques (par exemple le calcium) et aussi la cinétique du processus de filtration, soit la polarisation de concentration et le flux à travers la membrane. En effet, un flux lent favorise les échanges et interactions possibles entre les composés du fluide et la surface de la membrane, entre le soluté et l'intérieur des pores de la membrane.

Les molécules les plus susceptibles de colmater les membranes par adsorption sont les macromolécules, les matières organiques telles que les protéines, qui sont peu solubles et ont une diffusivité élevée.

3.2.2 Colmatage par dépôt de matière par convection

La présence de particules dans les fluides peut conduire au simple dépôt de ces particules à la surface de la membrane, pour peu que leur taille soit supérieure ou égale à la taille des pores de la membrane. Un tel dépôt croît en continu au cours du temps. Ceci a pour effet de réduire le flux à travers la membrane et augmenter progressivement la pression osmotique.

3.2.3 Colmatage par dépôt de matière par gélification, dénaturation, agrégation ou réaction

Le dépôt de matière par convection sur la membrane a pour effet d'en modifier les conditions physicochimiques, et de modifier le comportement rhéologique du fluide à l'interface membranaire. Ceci peut avoir les conséquences suivantes :

- gélification, due à des insolubilisations locales;
- apparition de seuils d'écoulement, du fait de l'accroissement de la concentration, ayant pour conséquence un blocage de flux;
- apparition de nouvelles espèces à la surface de la membrane, du fait de réactions, de floculation, de dénaturation moléculaire ou de précipitation.

3.2.4 Colmatage par développement d'un biofilm

L'accumulation de matière crée une condition favorable à l'encrage de micro-organismes sur les membranes ou dans les modules, ce qui peut donner lieu au développement d'un biofilm. Celui-ci a pour effet d'augmenter la résistance hydraulique, de dégrader les membranes (celle en acétate de cellulose en particulier) et aussi de contaminer le perméat. Une des caractéristiques de ce type de colmatage est le développement rapide de ces micro-organismes sur leurs points d'ancrage.

En **microfiltration**, le colmatage est généralement élevé et la perméabilité initialement élevée réduit progressivement, mais de façon très importante. Il se produit du colmatage interne de la structure de la membrane inhérent à la taille et à la distribution de tailles des pores et des dépôts en surface inhérent à la taille des particules retenues. Les effets de charge sont cependant négligeables.

En **ultrafiltration**, l'accumulation des macromolécules et des particules colloïdales forme des agrégats ou des gels, la polarisation de concentration devient très importante et une pression osmotique se développe du fait de cette augmentation de concentration. L'ultrafiltration est particulièrement sujette au colmatage par adsorption.

En **nanofiltration** et en osmose inverse, une pré-filtration est généralement pratiquée. Celle-ci a pour effet de réduire la possibilité de colmatage particulaire ou colloïdal. La densité des membranes fait en sorte qu'il y a peu de colmatage à l'intérieur des pores. Les dépôts de surface peuvent avoir comme effet de modifier la sélectivité des membranes. Le principal risque de colmatage est cependant dû à la possibilité de développer des biofilms, ce qui engendre des risques plus élevés de contamination.

CONFIGURATION DES INSTALLATIONS

1. MODE DE RÉGULATION

Les procédés de séparation membranaire en phase liquide, pour lesquelles la force agissante est une différence de pression, peuvent se conduire essentiellement de deux manières :

- en imposant une consigne sur le flux de filtration ;
- en imposant une différence de pression moyenne dans l'installation.

De façon générale, on considère que fonctionner à flux contrôlé permet d'éviter qu'au début des essais, lorsque la membrane est encore propre et donc de perméabilité élevée, l'application d'une pression de consigne moyenne, choisie pour la durée du reste d'un cycle de production, ne provoque pas un flux très élevé et donc des phénomènes d'accumulation et de compression de matière sur la membrane. Dans ce cas, un colmatage irréversible lourd, qui conditionne le rendement de l'installation pendant toute le reste de la durée du cycle est induit. Le fonctionnement à flux constant peut être utile, pour des raisons d'intégration de l'étage de séparation dans un procédé continu.

En pratique, pour chaque système de séparation membranaire, il existe une pression transmembranaire maximale à ne pas dépasser au risque de détériorer la membrane. De même, il est un flux maximum d'opération au-delà duquel le colmatage de la membrane devient excessif. L'établissement de cette pression et de ce flux maximum dépendent à la fois de la membrane et du fluide utilisé, ainsi que de la configuration de l'installation.

1.1 Pression constante

Les opérations menées à pression moyenne constante sont les plus courantes, car elles sont plus faciles à mettre en œuvre a priori. Ce contrôle peut s'opérer par le biais d'une vanne de mise en pression en sortie de module ou d'installation. Dans le cas où l'installation est alimentée par une pompe non volumétrique, une variation de contre-pression peut entraîner des variations de débits de circulation. Dans ce cas, même si la pression moyenne ou la pression de sortie demeurent constantes, la répartition des pressions dans les modules peut varier au cours du temps et altérer le fonctionnement du système. Par ailleurs, dans le cas des

installations équipées de plusieurs modules en série, une régulation de pression par module devrait être préférée, car une pression moyenne constante sur l'ensemble de l'installation peut masquer des variations importantes de pression d'un étage à l'autre. Il faut noter que, sauf panne de régulation, un système mené à pression contrôlée est a priori stable, et peut être sécurisé au moyen d'un simple pressostat.

1.2 Flux constant

Ces systèmes sont régulés sur la base du débit de perméat, mesuré ici également étage par étage. L'électrovanne de mise en pression applique une consigne au débit de perméat et augmente donc la pression moyenne de chaque étage au fur et à mesure que le colmatage augmente. Ce système est a priori divergeant car le colmatage allant en général en augmentant, la régulation du système commande une augmentation de la pression transmembranaire (ou plus rarement du débit de recirculation). Par conséquent, il doit également être contrôlé par un pressostat, permettant d'arrêter l'installation sur une consigne de pression maximale, correspondant soit à la pression maximale admissible par les modules ou membranes, soit la pression identifiée comme maximale par des essais pilotes.

1.3 Mode intermédiaire

L'avantage majeur d'un contrôle de l'installation par le flux est de maîtriser le colmatage initial. Cette maîtrise peut être atteinte en choisissant des rampes ou des échelons de pression sur une durée correspondant à cette phase. Ce mode de régulation permet d'éviter un asservissement de la vanne de mise en pression et une boucle de mesure précise de débit de perméat en continu.

2. INSERTION DES MODULES

Une installation industrielle se limite rarement à l'utilisation d'un seul module. Des combinaisons de modules sont nécessaires pour répondre aux exigences du procédé en termes de volume de liquide à traiter et de qualité du produit final. Il existe deux méthodes principales pour assembler les modules dans une installation à un ou plusieurs étages. Il s'agit de systèmes à simple passage ou à recirculation tels que présentés à la Figure 10.

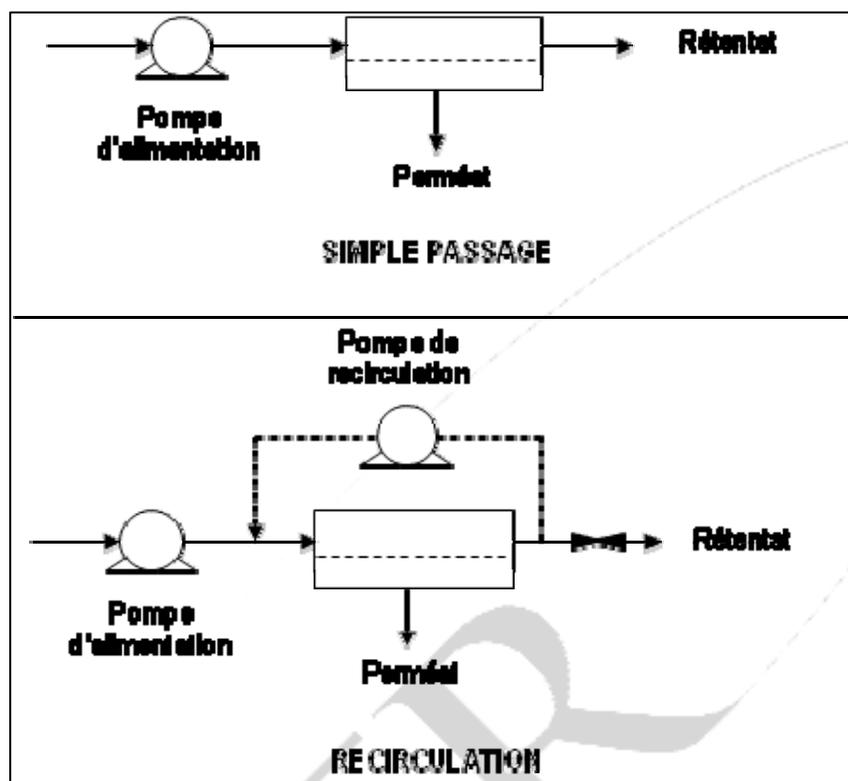


Figure 10 : Système à simple passage et système à recirculation.

2.1 Système à simple passage

Dans les systèmes à simple passage, la solution d'alimentation passe une seule fois dans chaque module sans recirculation. Ainsi le volume de solution à traiter diminue d'une fraction correspondant au perméat éliminé dans chaque module. De ce fait, les étages successifs présentent des surfaces de membrane de plus en plus faibles comme illustré à la Figure 11. Dans cette configuration, la vitesse de circulation du fluide à travers chaque étage reste constante. Par contre, il se produit une importante chute de pression entre chaque étage. Le facteur de concentration obtenu, c'est-à-dire le rapport entre le volume initial traité et le volume final de rétentat, est déterminé par la configuration de l'installation et non par la pression appliquée. En particulier, le nombre d'étages et le nombre de modules par étage doivent être calculés en fonction des performances de chaque module vis-à-vis du fluide à traiter.

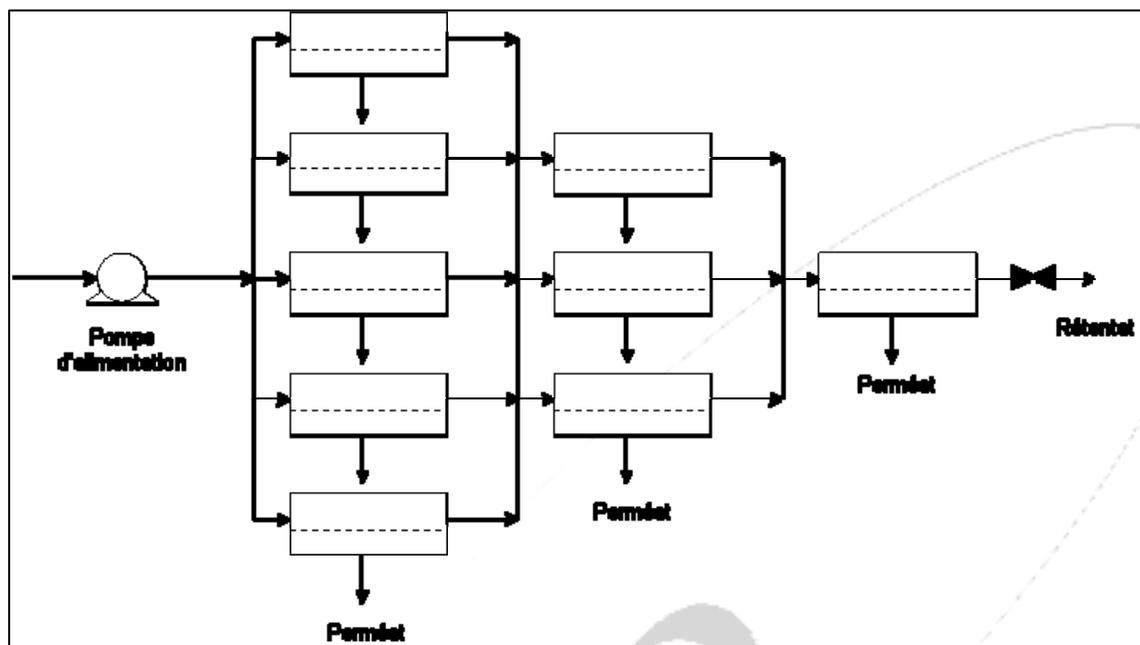


Figure 11 : Système à simple passage et plusieurs étages de modules.

2.2 Système à recirculation

Dans les installations avec système de recirculation, le fluide est pressurisé et circule au niveau de chaque étage tel que présenté à la Figure 12. Dans ces conditions, les paramètres hydrodynamiques que sont la pression transmembranaire et la vitesse de circulation peuvent être optimisés sur chaque étage. Ce type d'installation offre donc plus de souplesse que le système à simple passage et lui sera préféré dans le cas où les risques de polarisation de concentration et de colmatage sont importants. Cette configuration implique cependant des coûts d'investissement (pompes supplémentaires) et de fonctionnement (consommation énergétique des pompes) plus importants.

La disposition successive de plusieurs étages de modules permet d'atteindre la surface de membrane requise pour une installation.

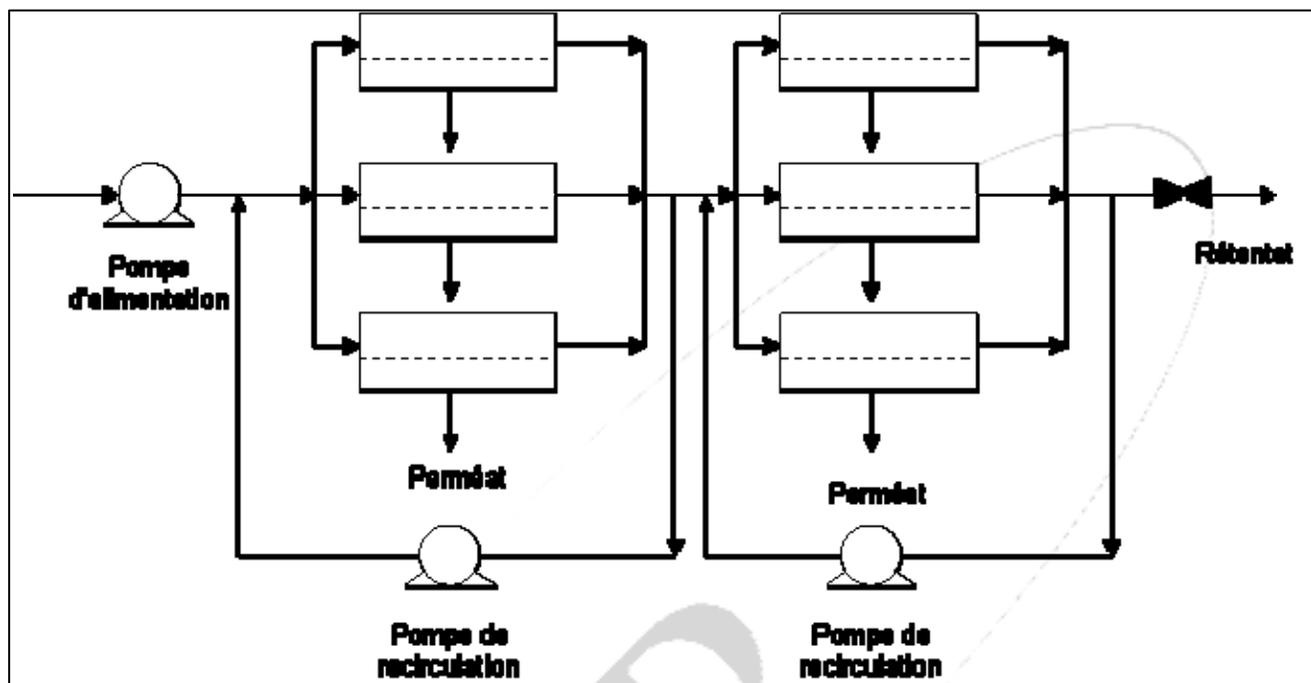


Figure 12 : Systèmes à recirculation et plusieurs étages de modules.

2.3 Systèmes en cascade

Ce type de systèmes est utilisé lorsque les deux configurations précédentes ne permettent pas d'obtenir une qualité suffisante de filtration et de séparation des produits à traiter. On procède alors à un arrangement des modules en cascade dans lequel le perméat sortant d'un module ou d'un étage de modules peut être recyclé en tête de l'installation ou bien être utilisé pour alimenter d'autres modules. Des exemples d'arrangement de modules en cascade sont présentés à la Figure 13.

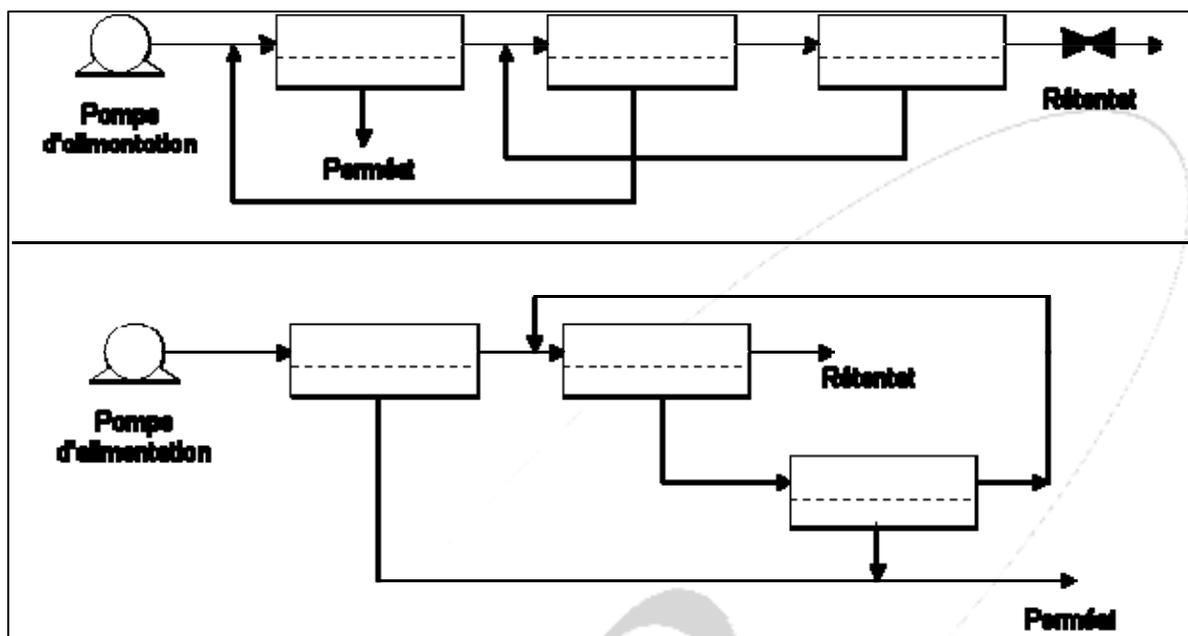


Figure 13 : Systèmes de modules en cascade (à trois étages).

Il est possible d'augmenter l'efficacité du procédé pour atteindre un haut degré de pureté du produit filtré en combinant entre eux des modules de NF, UF ou OI. Toutefois, l'optimisation de tels procédés est en général difficile à réaliser du fait de l'interdépendance du fonctionnement des modules les un par rapport aux autres. Pour pouvoir travailler en continu, ces installations requièrent un degré élevé de contrôle et d'automatisation.

3. MODE DE FONCTIONNEMENT

3.1 Mode en discontinu (*batch*)

En mode discontinu, le rétentat est renvoyé en totalité dans une cuve. Sa concentration augmente au cours du temps au fur et à mesure que le perméat s'écoule au travers de la membrane (Figure 14), et ceci de façon continue jusqu'à l'atteinte de la concentration désirée. Dans un montage simplifié, une seule pompe assure la circulation du rétentat. Éventuellement, une pompe de recirculation peut être utilisée afin d'accroître la vitesse à la surface de la membrane et donc de réduire les risques de colmatage (Figure 15).

Du point de vue de la combinaison flux/concentration, le mode discontinu est la solution optimale pour aller d'une concentration à une autre, c'est-à-dire pour une aire membranaire donnée, le moyen le plus rapide pour réaliser cette concentration.

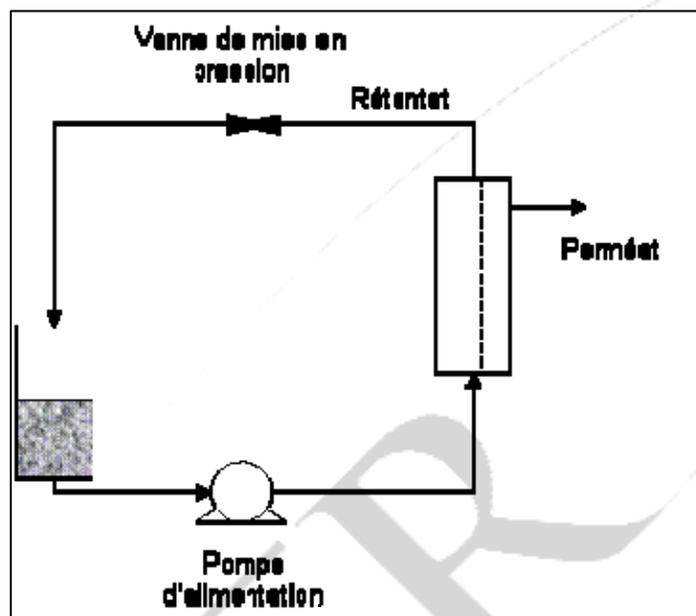


Figure 14 : Séparation membranaire en mode discontinu (*batch*).

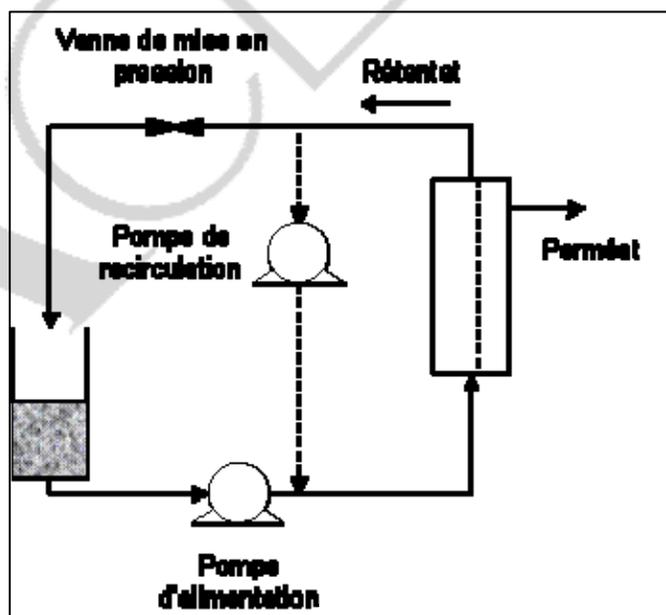


Figure 15 : Séparation membranaire en mode discontinu avec recirculation.

La relation ci-dessous permet, par exemple, d'établir un taux de rétention moyen « TR » sur la durée de l'opération de concentration ou d'évaluer le volume final (V_f) à atteindre pour obtenir la concentration désirée (C_f) en fonction des conditions initiales de volume (V_0) et de concentration (C_0) :

$$\left[\frac{C_f}{C_0} \right] = \left[\frac{V_0}{V_f} \right]^{\text{«TR»}}$$

3.1 Mode en continu

En mode continu, une partie du rétentat est extrait en permanence de la boucle de recirculation (Figure 16). Compte tenu du rapport en général faible (débit de filtrat/débit de circulation), il est indispensable d'installer une pompe de recirculation en plus de la pompe d'alimentation. Un circuit de recirculation est généralement requis pour atteindre la concentration désirée. La concentration à la sortie (C_s) est alors déterminée en fonction du flux (J) au travers de la membrane, de la surface de la membrane (A) et des conditions à de concentration (C_0) et de débit (Q_0) à l'alimentation de la membrane, en tenant compte de la définition du taux de rejet observé (TR), par la relation suivante :

$$C_f = \left[\frac{C_0 Q_0}{Q_0 - (J * A * TR)} \right]$$

La concentration circulante est considérée égale à la concentration au soutirage, car on considère que la boucle de recirculation est idéalement mélangée grâce à la vitesse de circulation élevée de la pompe.

3.1 Mode en continu multiétagé

Un autre type d'arrangement en continu, à plusieurs étages, peut être une alternative intéressante pour atteindre un taux de concentration élevé, en utilisant une surface de membrane réduite comparé à un système à un seul étage. Le nombre de membranes installées en série est rarement supérieur à trois par des raisons de complexité d'installation. La séparation est réalisée progressivement sur plusieurs étages de séparation. Le soutirage d'un étage devient l'alimentation de l'étage suivant. Le facteur de concentration de l'ensemble de l'installation est égal au produit des facteurs de concentration de chaque membrane en série.

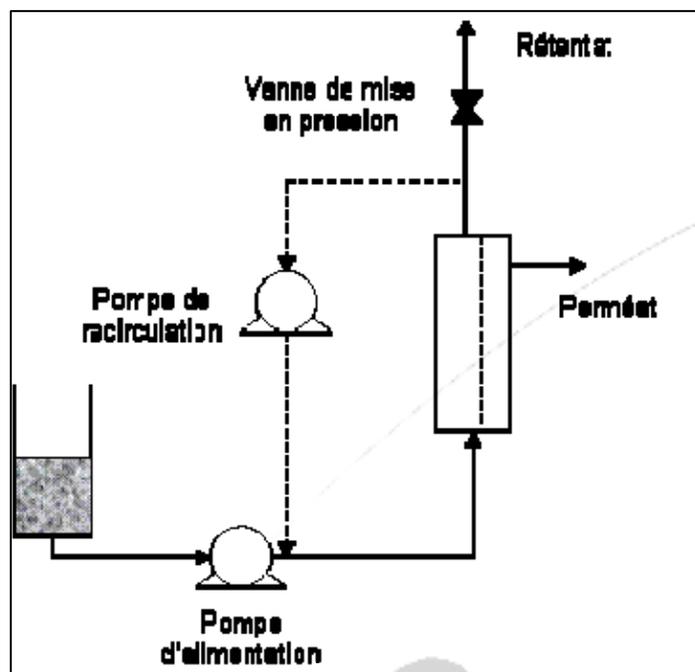


Figure 16 : Séparation membranaire en mode continu avec recirculation.

4. INSTRUMENTATION

L'installation doit être suffisamment instrumentée pour permettre d'acquérir des données de fonctionnement. Il est indispensable de connaître le débit du perméat, celui d'alimentation du module et éventuellement le débit de recirculation du rétentat, le débit de circulation du perméat et le débit de rétentat. En ce qui concerne les pressions, celles d'alimentation du module, du rétentat et du perméat sont nécessaires. De plus, la connaissance des températures d'alimentation, de rétentat ou de perméat est un atout.

Tous les capteurs doivent être choisis pour résister aux conditions de fonctionnement (pression, présence de matières en suspension, caractère abrasif, viscosité ...).

CRITÈRES TECHNICO – ÉCONOMIQUES

Afin d'évaluer les capacités des procédés de séparation membranaire face à une application donnée, il est nécessaire de connaître a priori un certain nombre de données relatives au fluide à traiter et de définir clairement les objectifs visés. Ces renseignements permettront d'orienter le choix des membranes et des modules.

En premier lieu, il est important de connaître la qualité que l'on souhaite atteindre pour le rétentat et pour le perméat (concentrations minimales et/ou maximales, niveau de pureté). Il est ensuite nécessaire de définir la répartition entre les volumes (ou les débits) du rétentat et du perméat en fonction du facteur de concentration volumique souhaité.

Dans un deuxième temps, le choix de la membrane et des modules est conditionné par une connaissance approfondie du fluide à traiter et en particulier des espèces présentes et de leur concentration. Ces connaissances nécessitent parfois des études analytiques approfondies. Dans tous les cas, l'analyse du fluide à traiter est une étape préalable nécessaire avant la conception du procédé.

Enfin, l'analyse technico-économique d'un procédé est fondée sur trois critères qui sont à la fois indissociables et indépendants :

- critères de sélectivité et de choix de membranes : avec la membrane choisie, on doit pouvoir effectuer le type de séparation désiré pour obtenir des perméats et/ou des rétentats dont les compositions se rapprochent au mieux de celles définies dans le cahier des charges du procédé. La sélectivité garantit la qualité du produit recherché mais s'obtient souvent au détriment du flux;
- le choix des modules et le rendement de l'installation : avec le procédé de séparation membranaire mis en place, on doit pouvoir réaliser la séparation désirée avec des coûts d'investissement et de fonctionnement plus faibles qu'avec des techniques concurrentes;
- la tenue dans le temps et la régénération des membranes : avec un même module et une même membrane, il faut pouvoir répéter les cycles de production le plus grand nombre de fois possible. Les membranes doivent être régénérées à leur état initial par des cycles de lavage qui permettent d'éviter les pertes de performance et d'augmenter leur durée de vie.

APPLICATIONS DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Les procédés industriels de séparation membranaire ont pris beaucoup d'ampleur à partir des années 80, en grande partie pour des applications dans l'industrie laitière puis pour les boissons et les bioproduits. Ces technologies ont bénéficié d'un grand succès en peu de temps pour de multiples raisons :

- produits de meilleure qualité : une membrane bien sélectionnée est une barrière absolue pour beaucoup de composés, évite le recours à des produits chimiques et permet de concentrer des produits à basse température, donc de conserver des propriétés nutritionnelles et organoleptiques originales;
- fiabilité et intégration aisée : les équipements sont modulaires et opèrent de façon continue en ligne dans les procédés. Ils peuvent donc aisément être intégrés et automatisés dans une chaîne de production;
- raisons environnementales, pour le traitement et le recyclage des effluents;
- coût de production avantageux pour les opérations de concentration en comparaison avec les procédés thermiques comme l'évaporation;
- innovation en matière de produits et de procédés car ces techniques permettent de répondre à une demande variété et de spécificité par le consommateur.

Une vue d'ensemble des principales applications en industrie alimentaire est présentée ci-dessous :

a. Microfiltration

- Épuration bactérienne du lait écrémé;
- Standardisation en caséines;
- Fractionnement de la matière grasse globulaire du lait entier ou enrichi;
- Rétention des cellules somatiques;
- Clarification du vin et des moûts de fermentation;

- Récupération de bière de fond de tank;
- Clarification de la bière brute;
- Stérilisation à froid;
- Production de jus de pomme clarifié;
- Déminéralisation de jus de fruits et légumes (stabilisation du concentré de betterave rouge);
- Clarification de la gélatine;
- Épuration biologique de l'eau.

b. Ultrafiltration

- Standardisation du lait en protéines
- Concentration de lait entier pour la fabrication de fromages frais;
- Production de jus de pomme clarifié;
- Séparation pulpe-sérum de jus d'agrumes;
- Clarification et concentration de jus de fruits et légumes (concombre, carotte, céleri ..);
- Concentration du blanc d'œuf;
- Fractionnement des ovo-produits;
- Conditionnement du jus de canne;
- Concentration du jus de soja;
- Récupération de glucosinolates du colza;
- Conditionnement du sirop de glucose provenant d'hydrolysats de blé;
- Concentration de polysaccharides servant comme agents texturants (pectines, alginates, xanthane, etc.);
- Concentration de protéines marines pour la fabrication de surimi;
- Concentration du sang entier d'abattoir;
- Épuration biologique de l'eau.

c. Nanofiltration

- Concentration du lait simultanément à la déminéralisation sélective pour la fabrication de yaourts et de produits frais;
- Séparation d'acides aminés et de péptides du lait;
- Adoucissement d'eaux souterraines ou de surface;
- Traitement d'effluents.

d. Osmose inverse

- Préconcentration du lait entier ou écrémé;
- Concentration de fruits pulpeux;
- Clarification et concentration de jus de fruits et légumes (concombre, carotte, céleri ..);
- Concentration du blanc d'œuf;
- Préconcentration du jus de tomate;
- Dessalement de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- AIMAR P. (2006). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Mise en œuvre et performances. Technologies de l'eau. Techniques de l'ingénieur. W 4 110.
- AIMAR P. et DAUFIN G. (2004). Séparations par membrane dans l'industrie alimentaire – Pour en savoir plus. Traité Agroalimentaire. Techniques de l'ingénieur. F 3 250.
- AIMAR P. et DAUFIN G. (2004). Séparations par membrane dans l'industrie alimentaire. Traité Agroalimentaire – Techniques de l'ingénieur. F 3 250.
- APTEL P. (2006). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Applications en traitement des eaux. Technologies de l'eau. Techniques de l'ingénieur. W 4 120.
- APTEL P., MOULIN P, et QUEMENEUR F. (2002). Micro et ultrafiltration : Conduite des essais pilotes – traitements des eaux et effluents. Les Cahiers du CFM No. 2. France. 102 p.
- AUDINOS R. (1999). Membranes sémi-perméables – Généralités. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 360.
- AUDINOS R. (2000). Membranes sémi-perméables – Membranes d'osmose inverse. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 362.
- AUDINOS R. (2000). Membranes sémi-perméables – Membranes d'ultrafiltration. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 364.
- AUDINOS R. (2001). Membranes de microfiltration tangentielle. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 365.
- BAKER R.W. (2004). Membrane Technology and Applications. John Wiley & Sons. USA. 538 p.
- BERLAND J-M. et JUERY C. (2002). Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Document technique FNDAE No. 14. Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau. France. 71 p.
- BOUCHARD C., KOUADIO P., ELLIS D. RAHNI M. et LEBRUN R. (2000). Les procédés à membrane et leurs applications en production d'eau potable. Vecteur Environnement,

33(4), 28-38.

BRUN J-P. (1989). Procédés de séparation par membranes : Transport, techniques membranaires et applications. Elsevier-Masson. France.

CAUSSERAND C. (2006). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Caractéristiques des membranes. Techniques de l'ingénieur. W 4 100.

DAUFIN G., RENÉ F. et AIMAR P. (1998). Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. TEC&DOC. France. 592 p.

ÉSAN-GUIZIOU G. (2007). Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) – Applications en agroalimentaire. Génie des procédés. Techniques de l'ingénieur. J 2795.

GUIZARD C. (2000). Guide de la nanofiltration – Les Cahiers du CFM No. 1. FRANCE. 64 p.

REMIGY J-C. C. et DESCLAUX S. (2007). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Présentation des membranes et modules. Génie des procédés. Techniques de l'ingénieur. W 4 090.

RÉFÉRENCES ÉLECTRONIQUES

[1] Alting

<http://www.alting.fr/fr/crossflow.aspx> (page consultée le 28 mai 2008)

[2] GE OSMONICS LABSTORE

http://www.osmolabstore.com/library_main.htm (page consultée le 28 mai 2008)

[3] Laboratoire de génie des procédés microbiologique et alimentaires de l'Université de Bourgogne

<http://www.u-bourgogne.fr/GPMA/Enseign/tphall2007/TPFiltration2007.htm> (page consultée le 28 mai 2008)

[34] Lentech Water & Luchtbehandeling Holding B.V.

<http://www.lentech.com/fran%E7ais/membranes-tubulaires.htm> (page consultée le 28 mai 2008)

[5] SOFRANCE – Groupe SAFRAN

<http://www.sofrance.com/welcome.asp?rep=expertise&id=modules.htm> (page consultée le 28 mai 2008)

[6] SpinTek Filtration

http://www.spintek.com/whats_new.htm (page consultée le 28 mai 2008)