Liste des abréviations

OI : osmose inverse

NF : nano filtration

UF : ultrafiltration

MF : microfiltration

Qa : débit d'alimentation

Ca : concentration d'alimentation

Q em : débit entré module

Cem : concentration entré module

Pem : pression entré module

Qsm : débit sortie module

Csm : concentration sortie module

Psm : pression sortie module

Qc : débit concentrât

Cc : concentration concentrât

Qp : débit permeat

Cp : concentration permeat

Qr : débit de recirculation

Δ pm : Δp : pression transmembranaire

Qet : débit moyen dans le module

Cet : concentration moyen dans le module

Da : dalton

Π : Pression osmotique (bar)

I : nombre d'ion dissocié dans le cas d'un électrolyte

C : concentration molaire en mol/l

R : constante des gaz parfait=0.082 bar/mol.k

T : température absolue °K

J_1 : flux d'eau a travers la membrane (kg/ m^2s)

A : perméabilité de la membrane a l'eau (kg/s Pa m^2)

ΔΠ : Différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane

J_2 : flux de sel à travers la membrane

B : perméabilité de la membrane au sel

ΔC : différence de concentration de part et d'autre de la membrane

ED : électrodialyse

Q0 : débit de la solution a traité= débit d'alimentation (m^3/h)

C0 : concentration de l'espèce à retenir dans la solution

Cp : concentration de la même espèce dans le permeat

A : perméabilité de la membrane

Jp : flux du permeat

S : surface effective de la membrane

Rm : résistance de la membrane (m^{-1})

δ : L'épaisseur de la couche active de la membrane

np : nombre de pore par unité de surface

rp : rayon des pores

P1 : pression d'entrée dans le module

P2 : pression de sortie de module

P3 : pression du permeat

μ : la viscosité dynamique de l'eau (Pa. s)

αp : coefficient de la perméabilité

Y : taux de conversion

TR : sélectivité d'une membrane

MES : matière en suspension

MON : matière organique naturelle

UMF : ultra-microfiltration

NUF : nano-ultrafiltration

COD : carbone organique dissous

BRM : bioréacteur a membrane

ADE : algérienne des eaux

MBH : Miyeh Bahr Honaine

AEC : algerien energie company

TDS : taux des sels dissous

TH : la dureté total

TAC : alcalinité total

TABLE DES MATIERES

Dédicace…….I
Remerciement……II
Résumé/ملخص/Abstract……III
Liste des figures…….. IV
Liste des tableaux…….V
Liste des abréviations……...VI
Introduction générale……1
Chapitre I : Classification et caractéristiques des membranes de filtration.
I.1. Introduction……4
I.2. Historique……4
I.3. Définition de la membrane……..4
I.4. Présentation des procédés membranaires……5
I.4.1. Les techniques membranaires à gradient de pression……...6
I.4.2. Techniques membranaire à gradient de potentiel électrique ……..12
I.5. Classification des membranes……13
I.5.1. Classification d'après le mécanisme de séparation……13
I.5.2. Classification d'après la morphologie……....15
I.5.3. Classification d'après la géométrie de préparation des membranes……..18
I.5.4. Classification d'après la nature chimique……..18
I.6. Matériaux membranaires……20
I.6.1. Matériaux organiques…….20
I.6.2. Matériaux inorganiques……...25
I.7. Caractéristiques des membranes…….27
I.7.1. Le taux de conversion……..27
I.7.2. La sélectivité d'une membrane……28
I.7.3. La perméabilité d'une membrane……29
I.7.4. La résistance d'une membrane……...30
I.7.5. Autres caractéristiques……30
I.8. Module membranaire…….33
I.8.1. Définition……33
I.8.2. Type de modules…….34

I.9. Conclusion……...43

Chapitre II : Fonctionnement, lavage et entretien des installations membranaires.

II.1. Introduction……...44

II.2. Modes de fonctionnement ……44

II.2.1. La filtration frontale……..44

II.2.2. La filtration tangentielle……45

II.3. Les différents systèmes membranaires……46

II.3.1. Système de filtration membranaire sous pression……46

II.3.2. Système à membranes immergées……47

II.4. Mise en œuvre et condition de fonctionnement……48

II.4.1. Choix du type de procédés……48

II.4.2. Choix de la pression de fonctionnement……51

II.4.3. Choix de la température……51

II.4.4. Choix du taux de conversion……52

II.5. Phénomène de transfert……52

II.5.1. Loi de Darcy……..52

II.5.2. Polarisation de concentration……53

II.5.3. Colmatage et nettoyage des membranes……...55

II.6. Critères de conception des procédés membranaires……..64

II.6.1. Bases de conception……64

II.6.2. Données générales requises pour la conception……65

II.6.3. Règles de conception……66

II.6.4. Redondance relative aux membranes……69

II.6.5. Autres éléments de conception……71

II.7. Dimensionnement des installations a membrane…….....72

II.8. Consommation d'énergie des procédés membranaires……73

II.9. Les facteurs influençant la performance des membranes……74

II.9.1. La concentration du concentré……..74

II.9.2. La pression d'opération……74

II.9.3. La température d'opération……75

II.9.4. La charge microbienne……...75

II.10. Avantages et inconvénients des procédés membranaires……75

II.10.1. Avantages des techniques à membranes……..75

II.10.2. Inconvénients des techniques à membranes……76

II.11. Conclusion……...76

Chapitre III : Applications des procédés membranaires.

III.1. Introduction……77

III.2. Applications des procédés à membranes en traitement des eaux de surface……..77

III.2.1. Caractéristiques d'une eau de surface naturelle……..77

III.2.2.Champ d'application……....77

III.2.3. Quels substances enlève-t-il les procédés membranaires?.....78

III.2.4. Les différentes chaines de traitement……..80

III.2.5.Principaux applications de la NF dans le domaine de l'eau potable……83

III.3.Applications des procédés à membranes en traitement des eaux souterraines……84

III.3.1.Déferrisation et/ou démagnétisation par membrane……84

III.3.2.Enlèvement des chlorures……84

III.4. Application en dessalement d'eau de mer……..87

III.4.1. Dessalement par osmose inverse……..87

III.5. Application en épuration des eaux usée……..90

III.5.1. Définition d'un bioréacteur à membrane……90

III.5.2. Utilisations de BRM pour l'épuration des eaux usées……91

III.5.3. Configurations des systèmes de BRM……91

III.5.4. Performances et capacités des BRM……....93

III.6. Applications Industrielles……93

III.7. Conclusion……...97

Chapitre IV : La station de dessalement de Honaïne.

IV.1. Introduction……98

IV.2. Présentation de la station de dessalement de Honaïne ……98

IV.2.1. Contexte……98

IV.2.2. Situation géographique de la station……99

IV.2.3. Plan de la station……...99

IV.3. Etapes de dessalement d'eau de mer de Honaïne ……100

IV.3.1. Phase de captation et pompage……...100

IV.3.2. La phase de filtration……104

IV.3.3. Phase d'osmose inverse…….....108

IV.3.4. Phase de reminéralisation…….....114

IV.3.5. Phase de refoulement……116

IV.4. Résultats et interprétations……118

IV.4.1. Objectif……..118
IV.4.2. Caractéristiques principales d'unité d'osmose inverse……..118
IV.4.3. Qualité d'eau produit……120
IV.5. Interprétation générale……...125
IV.6. Conclusion…….127
Conclusion générale……128
Références bibliographiques
Annexe

Introduction générale

RapportGratuit.com

Notre travail a trait à une recherche bibliographique dans le domaine de la filtration membranaire, dont l'objectif principal est l'élaboration d'un document qui englobe les différentes techniques, le fonctionnement et les mises en application des procédés membranaires.

Ce thème prend son importance du fait que depuis le début du dernier siècle, la population mondiale a triplé et la consommation d'eau a sextuplé, et ainsi les besoins en eau ont augmenté à une vitesse vertigineuse. Le constat est là, malheureusement, dans certaines régions de notre planète, les ressources en eau conventionnelle ont été épuisées depuis des décennies. Devant une telle situation, certains pouvoirs publics ont été obligés à recourir à l'exploitation des eaux non conventionnelles, pour pouvoir répondre à une demande en eau sans cesse croissante.

Qualité de l'eau distribuée et quantité suffisante sont donc les mots clés à considérer pour le traitement des eaux. Les opérations de séparation par membranes sont bien placées pour aider à résoudre ces problèmes. En effet, comme les membranes jouent le rôle de barrière physique, elles produisent avec une grande fiabilité une eau de qualité pour la consommation humaine et l'industrie [1].

La filtration membranaire est basée sur l'application d'un gradient de force motrice qui permet le transfert d'un solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés. Les procédés de séparation par membrane sont utilisés pour séparer soit molécules ou ions en solution (osmose inverse, nano filtration, électrodialyse) soit des particules ou des microorganismes en suspension dans un liquide (microfiltration et ultrafiltration). Ces techniques sont généralement employées pour concentrer un soluté contenu dans un solvant en vue de sa valorisation ou de son élimination. Une autre application de ces procédés concerne l'obtention de produit à haute valeur ajoutée par fractionnement et purification de certaines molécules intéressantes [2].

La force agissante de la membrane peut être un gradient de pression comme l'osmose inverse, nano filtration, ultrafiltration et la microfiltration ; soit un gradient de potentiel électrique comme l'électrodialyse ; ou un gradient de concentration comme la dialyse. Le transfert sélectif à travers une membrane dépendent des caractéristiques des substances à séparer et de celles de la membrane (dimension, forme, nature chimique, état physique, charge électrique…) et des conditions hydrodynamiques de travail. Suivant les caractéristiques, 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 tamis), soit sur une exclusion ionique [2].

Les procédés membranaires regroupent un grand nombre de technique permettant de réaliser des séparations en phase liquide ou en phase gazeux sous l'action de différentes forces de transfert (mécanique, électrique ou chimique). On y distingue les procédés Baro membranaires lesquels utilisent une différence de pression comme force motrice. Pour les séparations en phase liquide ceux-ci sont au nombre de quatre : la microfiltration, la nano filtration, l'ultrafiltration, qui mettent en jeu des membranes possédant une structure poreuse, et l'osmose inverse qui utilise des matériaux dense [3].

Ces techniques se différencient principalement par la taille des particules qu'elles arrêtent. Le cas extrême est l'osmose inverse qui arrête tous les solutés contenus dans l'eau mais laisse passer le solvant. Les procédés de séparation membranaires 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 [3].

L'utilisation des procédés à membranes présentes en effet deux intérêts majeurs : la possibilité de séparer, extraire, concentrer ou purifier en continu des produits sans l'ajout d'adjuvant, ni changement de phase, à basse température ; et une grande surface d'échange par unité de volume en utilisant différents types de modules. Les procédés de séparation utilisant les membranes ont pris une place de plus en plus importante dans de nombreux domaines comme la production d'eau potable à partir de l'eau de mer, eau de surface et souterrains, le traitement des effluents industriels et domestiques, la purification et le fractionnement des solutions macromoléculaires dans les domaines des industries biotechnologiques, pharmaceutiques et agroalimentaires…à titre d'exemple, dans le domaine de potabilisation de l'eau, la capacité de production des plus grosses usines est multipliée par dix tous les 5 ans. Ces procédés, souvent qualifiés de techniques propres possèdent de nombreux avantages par rapport aux techniques de séparation conventionnelles, le procédés peut être réalisé à température ambiante, le fonctionnement se fait sans changement de phase ce qui est économique au niveau énergétique, le procédé est physique l'installation est donc modulables et peut fonctionner en continu, les procédés à membranes peuvent être facilement combinés avec d'autres procédés [2].

Notre travail, qui est essentiellement basé sur une recherche bibliographique, traite des membranes de filtration et leur mise en œuvre ainsi que leurs différentes applications des

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

procédés membranaires, et on termine par une présentation d'une station de dessalement d'eau de mer de Honaïne avec quelques analyses faite durant un stage.

Ce travail est articulé et présentée en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les membranes et les modules membranaires. Tout d'abord, nous présentons les principaux types de membranes et modules présent sur le marché, la classification des membranes ainsi leur caractéristiques, et présentation des différents procédés membranaires.

Le deuxième chapitre a trait à une présentation des différents aspects de fonctionnement et la mise en œuvre des procédés membranaire ainsi leur conception, et les problèmes rencontrés au niveau des membranes de filtration comme la polarisation et le colmatage et les différents mécanismes de nettoyages.

Pour le troisième chapitre traite, brièvement, des principales applications de ces procédés, concernent le traitement d'eau de surface et souterrains, le dessalement d'eau de mer et l'épuration des eaux usée par les bioréacteurs à membranes.

Dans le quatrième et dernier chapitre, qui semble être la partie pratique de notre travail, nous donnons une présentation générale de la station de dessalement d'eau de mer de Honaïne et les différentes étapes de dessalement qui sont mis en jeu dans l'usine, de la prise d'eau jusqu'à la distribution de l'eau propres, à savoir la consommation.

Chapitre I:
classification et caractéristique des membranes de filtration

I.1. Introduction :

La majeure partie de ce chapitre porte sur les différents aspects des membranes, à savoir leurs classifications, leurs caractéristiques, et les différentes configurations des modules membranaires. La détermination des caractéristiques d'une membrane a pour objectif d'aider au choix de celle-ci pour une application donnée, mais aussi d'acquérir une meilleure compréhension de l'évolution de ses performances en cours d'utilisation.

De nos jours, il existe une grande variété de membrane adapté aux diverses procédés de séparation. Un nombre important de membranes sont actuellement utilisées et classées suivant leur mode de fonctionnement [4].

I.2.Historique :

La perm sélectivité (se dit de membranes dont la perméabilité s'exerce de façon sélective vis-à-vis des ions) des membranes a été découverte dès le XVIIIe siècle par Abbé Jean-Antoine Nollet (1735). C'est à cette époque que l'Abbé observa pour la première fois le phénomène de l'osmose, soit le transfert de l'eau ou d'un solvant au-travers d'une membrane semi-perméable. En 1845, Matteucci et Cima, puis Schmidt en 1856, mirent en évidence le comportement anisotropique des membranes. Leur comportement est en effet différent selon la face de la membrane se trouvant en contact avec la solution. En 1855, Fick développa la première membrane synthétique probablement en nitrocellulose [5].

Parallèlement aux développements de la thermodynamique, ce domaine de recherche évoluera fortement durant la période 1870-1920. La première commercialisation de membranes se fait en 1927, tandis qu'en 1956, l'Agence américaine de protection de la santé publique reconnaît l'utilisation des membranes pour les processus de séparation de composés. Simultanément, les applications industrielles voient le jour et les perspectives, notamment en vue de la désalinisation de l'eau de mer sont explorées [5].

I.3.Définition de la membrane :

Une membrane peut être décrite comme une barrière permsélective de très mince couche de matière qui va permettre ou interdire le passage ou la rétention de certains espèces ou composants à l'échelle microscopique entre deux milieux qu'elle sépare sous l'action d'une force agissante peut être une différence de pression, de potentiel électrique ou de concentration de part et d'autre de la membrane.

La phase retenue constitue alors le retentât (ou concentrât) alors que la phase ayant traversé la membrane s'appelle le perméat (ou filtrat).

Les membranes utilisées dans le traitement des eaux sont poreuses ou denses et doivent permettre d'enlever les contaminants principalement par effet stérique, sous une pression transmembranaire ou un flux de perméat constant [6].

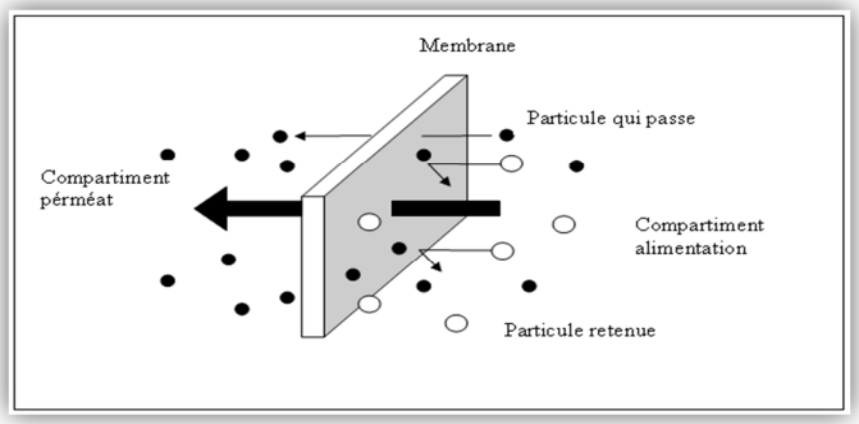


Figure I.1 : Membrane sélective.

Source : Bouchard C., 2005

I.4.Présentation des procédés membranaires :

La technologie membranaire est devenue une véritable technologie de séparation lors de la dernière décennie. La force principale de la technologie membranaire est le fait que cela fonctionne sans ajout de produits chimiques, avec une conduction de procès facile et bien arrangée.

Le procédé de séparation membranaire est basé sur la présence de membranes semi-perméables. Le principe est assez simple: la membrane agit comme un filtre très spécifique qui laisse passer l'eau, tandis qu'elle retient les solides en suspension et d'autres substances. Dans la filtration sur membrane on peut distinguer d'une part la micro et l'ultra filtration, la nano filtration et l'osmose inverse [7].

Quand on utilise la filtration sur membrane pour éliminer des particules de taille relativement importante on utilise la micro filtration ou l'ultra filtration. Dans ce cas la productivité est importante alors que les différences de pressions sont faibles. Lorsqu'on doit éliminer des sels de l'eau, on utilise la nano filtration et l'osmose inverse. Les membranes de nano filtration et d'osmose inverse ne fonctionnent pas selon le principe des pores, la séparation s'effectue par diffusion à travers la membrane. La pression requise pour réaliser la nano filtration ou l'osmose inverse est beaucoup plus élevée que la pression requise pour la micro et l'ultrafiltration, tandis que la productivité est beaucoup plus faible [7].

Les différentes techniques membranaires peuvent être classées selon la nature de la force motrice mise en jeu.

Tableau I.1 : Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux.

Force motrice	Domaine d'application
Différence de pression	Microfiltration, ultrafiltration, nano filtration, osmose inverse
Différence de concentration	dialyse
Différence de potentiel électrique	Électrodialyse

Source : WEHBE N., 2008

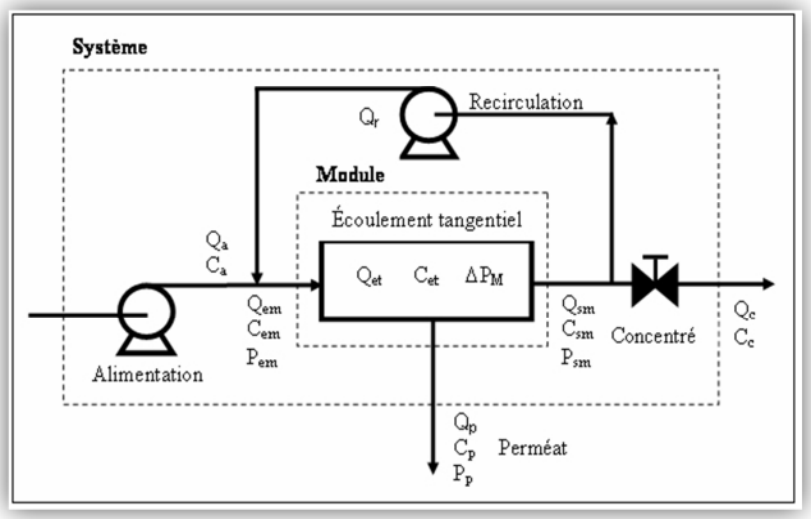


Figure I.2 : Diagramme d'un procédé membranaire sous pression à écoulement canalisé avec boucle de recirculation.

Source : BOUCHARD C., 2005

L'eau pré filtrée sert d'alimentation le procédé de séparation. Une pompe d'alimentation fournit la pression nécessaire pour alimenter le module de filtration et faire passer l'eau à travers la membrane. Une partie du concentré passe dans une boucle de recirculation grâce à une pompe de recirculation et l'autre partie est rejetée à l'égout. Le perméat est recueilli dans un bassin de perméat.

I.4.1.Les techniques membranaires à gradient de pression :

Ces techniques, appelées également techniques Baro-membranaires, reposent sur une différence de pression totale de part et d'autre de la membrane. , en ordre décroissant de taille de pores de membrane on distingue:

- la microfiltration (MF) ;
- l'ultrafiltration (UF) ;
- la nano filtration (NF) ;
- l'osmose inverse (OI).

Elles sont Utilisées dans le domaine du traitement de l'eau en général, elles peuvent être classées selon le diamètre moyen de leurs pores pour les membranes poreuses (MF, UF, NF) ou sur la taille des particules et molécules dont elles assurent la séparation [6].

La figure ci-dessous présente le champ d'application des différentes techniques de séparation par membrane :

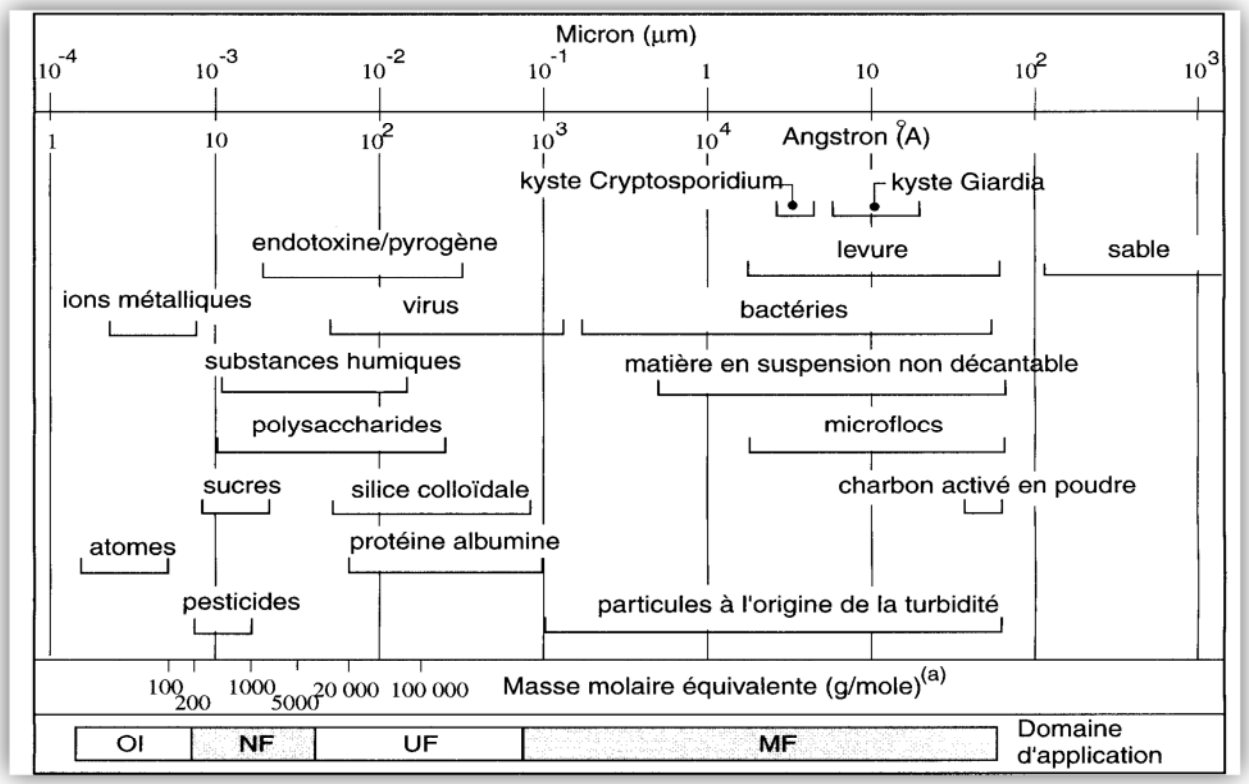


Figure I.3: Synthèse des techniques membranaires à gradient de pression.

Source : BERLAND J., 2002

La figure récapitule un ensemble des techniques de filtration qui vont de l'OI permettant de séparer des ions minéraux de l'eau, a la MF qui élimine la turbidité.

I.4.1.1. La microfiltration:

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 µ m. Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexassions, précipitation ou floculation, les membranes de microfiltration ne peuvent pas être utilisées seule [8].

Théoriquement, la différence entre ultrafiltration et microfiltration est très nette.

- L'ultrafiltration fonctionne en phase liquide homogène alors que la microfiltration a pour objectif une séparation solide-liquide ;

- la pression de travail est généralement plus faible dans le cas de la microfiltration (Pression transmembranaire < 3 bars) ;
- les flux de filtration sont souvent plus importants dans le cas de la microfiltration.

Cependant, du point de vue technologique, les deux techniques peuvent se recouper. Ainsi, pour minimiser les phénomènes de colmatage et éviter que des particules solides pénètrent dans les pores des membranes, on a souvent intérêt à utiliser des membranes d'ultrafiltration pour effectuer une opération de microfiltration. Inversement, une membrane de microfiltration peut devenir une membrane d'ultrafiltration (1 à 100 nm) ou même d'osmose inverse (< 1 nm) par suite de la formation en cours de fonctionnement d'une couche de gel à porosité très fine [9].

Les applications de la microfiltration sont diverses :

- traitement des effluents ;
- prétraitement avant nano filtration ou osmose inverse.

I.4.1.2. L'ultrafiltration :

L'UF utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes).

Peu applicable au traitement des eaux de surface, elle est essentiellement utilisée pour traiter les eaux souterraines à turbidité épisodique. Les ions sont en grand partie retenus en amont de la membrane, ce qui provoque le colmatage. Cette configuration de membrane permet d'éliminer la turbidité, les bactéries et les métaux adsorbés sur les particules en suspension. Pour cette raison, cette technique est utilisée pour l'élimination de macro solutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel ou médical [1].

I.4.1.3.La nano filtration :

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane.

Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates…) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus, leur seuil de coupure est inferieur a environ 600 Da.

Les applications possibles sont nombreuses :

- déminéralisation sélective (adoucissement des eaux) ;

- concentration de composés organiques de faible masse molaire (antibiotiques).
- utilisée pour l'eau destinée à la consommation humaine en éliminant les nitrates, les pesticides, la dureté et les micro-organismes [1].

I.4.1.4. L'osmose inverse :

Il est mentionné que dès 1969, le Dr. Sourira Jan présente l'OI comme un procédé industriel «en rupture technologique » avec les traitements de l'eau existante à l'époque, en particulier ceux destinés au dessalement de l'eau de mer.

La première usine utilisant le principe de l'osmose inverse a été installée dans l'ile de MALTE à GHARLAPSI en 1982 par la société POLYMETRICS. Sa production était de 20000 $m^3.j^{-1}$. Le procédé de filtration par osmose inverse est de loin le plus efficace en ce qui concerne la potabilisation des eaux.

La membrane utilisée n'est pas microporeuse mais dense c'est-à-dire qu'elle est sans porosité apparente et que sa sélectivité résulte d'un mécanisme de solubilisation- diffusion.
L'OI permet de filtrer des particules de diamètres très faibles (1 à 0,1 nm). Ces membranes permettent en plus un haut taux d'élimination des ions monovalents (Na^+, Cl^+,…) et peuvent séparer certaines molécules organiques de très faible masse molaire. Leur seuil de coupure est inferieure environ 300 Da.
Cette technique est utilisée pour :

- la déminéralisation des eaux :
  - Le dessalement des eaux de mer ;
  - Le dessalement des eaux saumâtres ;
  - La production d'eau ultra pure ;
- la concentration de solutions (concentration de jus de fruits par exemple).
- La production d'eau de procès…

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires.

La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique.
La sélectivité de ce type de transport, dépend de la nature et de la structure de la membrane et de la différence de pression transmembranaire [9].

Rapport-Gratuit.com

I.4.1.4.1. Pression osmotique et pression de fonctionnement :

Le procédé de l'osmose inverse est basé sur la propriété des membranes semi perméables de laissé passer l'eau tout en arrêtant les sels dissous. La figure met en évidence ce phénomène : une membrane semi-perméable divise un récipient en deux compartiments. Dans le premier compartiment (1), on verse de l'eau pure, dans le deuxième (2) une solution de chlorure de sodium. Les niveaux sont identiques dans les deux compartiments au début de l'expérience. On observera alors que l'eau circule de 1 vers 2. A l'équilibre, il en résulte une différence de niveau entre 1 et 2, qui mettent en évidence la pression osmotique de la solution de Na Cl du compartiment 2.

S'il est possible d'appliquer une pression sur le compartiment 2 supérieure à la pression osmotique, on observe la circulation de l'eau en sens inverse, les sels restent bloqués dans le compartiment 2. On peut même concentrer la solution 2 au-delà de sa concentration initiale et obtenir une quantité d'eau douce dans le compartiment 1 supérieure à celle versée au début de l'expérience. C'est l'osmose inverse

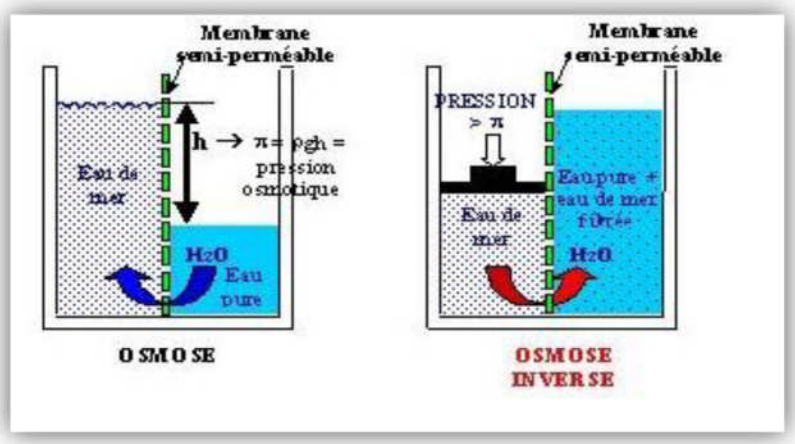


Figure I.4: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

Source : RENAUDINV., 2001

La loi de VAN'T HOFF exprime que la pression osmotique exercée par le soluté est égale a la pression que ce corps aurait exercée dans l'état gazeux parfait dans le même volume V et a la même température T. si le soluté est dissocié en i ions la pression osmotique sera i fois supérieure [33].

$$\Pi = i\ C\ RT \qquad (I.1)$$

Π : pression osmotique en bar

i : nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : concentration molaire en mol/l

R : constante des gaz parfaits (0.082 l.bar/mol. k)

T : température absolue en °K

I.4.1.4.2. Schéma général d'une installation d'osmose inverse :

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- la membrane proprement dite ;
- le module ;
- la pompe haute pression ;
- éventuellement un système de récupération d'énergie ;
- le poste de prétraitement.

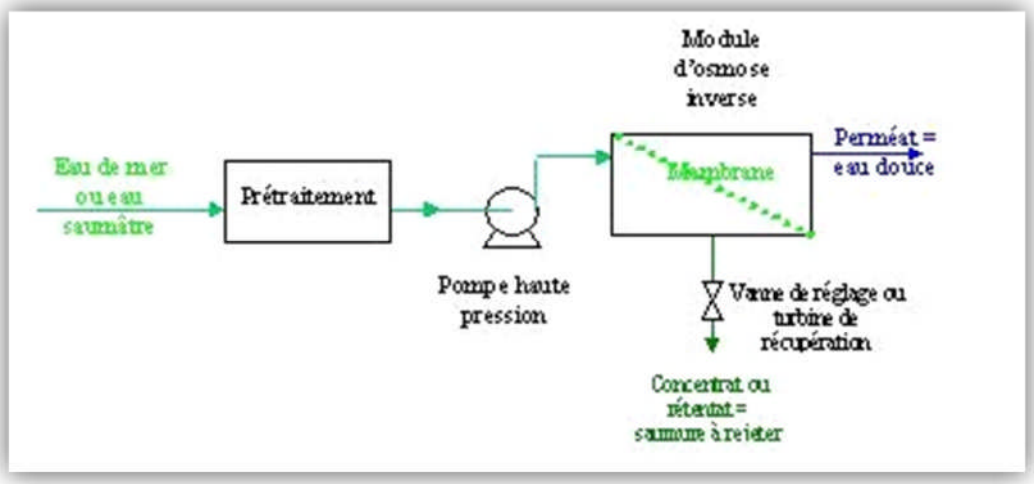


Figure I.5: Schéma d'une installation d'O.I

Source : MARIE ROVELJ., 2012

I.4.1.4.3. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :

❖ **Débit spécifique ou densité du flux volumique :**

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité de flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement. Le débit spécifique s'exprime le plus souvent en $l.\ h^{-1}.m^{-2}$.

I.4.1.4.4. Mécanisme de transfert :

Dans le cas de l'osmose inverse, les transferts de solvant et de soluté au travers d'une membrane semi perméable se font par solubilisation diffusion : toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme a travers un solide ou un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Donnons l'indice 1 au solvant (eau) et l'indice 2 au soluté (sel). Pour simplifier, nous nous placerons dans le cas d'un seul, soluté. Les flux de solvant et de soluté à travers la membrane sont donnés par les deux relations suivantes.

$$J_1 = A\ (\Delta P - \Delta\pi) \qquad (I.2)$$

J_1 (m .s^{-1}) : flux d'eau à travers la membrane

A (m. s^{-1}.Pa^{-1}) : perméabilité de la membrane a l'eau

ΔP (Pa) : différence de pression de part et d'autre de la membrane

$\Delta\pi$ (Pa) : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

$$J_2 = B\ \Delta C \qquad (I.3)$$

J_2 (Kg. m^{-2}.s^{-1}): flux de sel à travers la membrane

B (m. s-1): perméabilité de la membrane au sel

ΔC (Kg. m^{-3}): différence de concentration en sel de part et d'autre de la membrane

La perméabilité de la membrane au sel (Na Cl), B est de l'ordre de 10^{-7}m.s^{-1} soit 0.36 l. h^{-1}.m^{-2}.

Tableau I.2 : Propriété des membranes (ordres de grandeurs).

propriété	MF	UF	NF	OI
Taille des pores (couche superficielle)	0.05 à quelques mm	Quelques nm à 100nm	~1nm	<1nm (a)
Perméabilités à l'eau déminéralisée à 25 °C (m.s^{-1}.pa^{-1})	10^{-8} a 10^{-9}	10^{-9} a 10^{-10}	~10^{-11}	10^{-11} a 10^{-12}

(a) : la notion des pores dans le domaine d'osmose inverse est difficile à définir, ce qui explique pourquoi certain auteur considèrent ces membranes comme nom poreux.

Source : HARRLEKAS F., 2008

I.4.2. Techniques membranaire à gradient de potentiel électrique :

L'électrodialyse est une technique électro-membranaire qui désigne le transfert d'ions à travers une membrane, sous l'effet d'un champ électrique. Un électro dialyseur est constitué de succession de cellules à compartiments à membranes alternativement anioniques et cationiques. Lors de l'action du champ électrique, la membrane anionique autorise le passage des anions et la membrane cationique laisse passer les cations.

Les cations sortent du premier compartiment en franchissant la membrane cationique et sont bloqués dans le deuxième compartiment par la membrane anionique. Les anions sortent aussi du premier compartiment en migrant la membrane anionique et sont bloqués par la membrane cationique [10], [11].

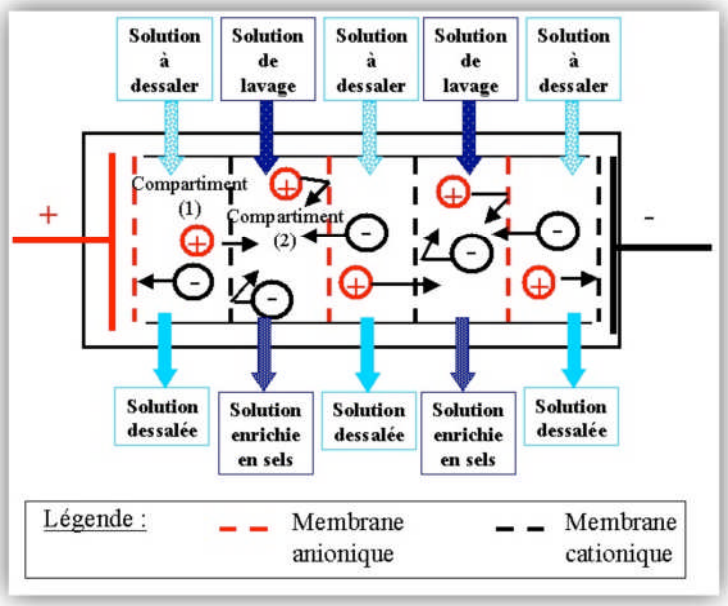


Figure I.6: Schéma représentatif de l'électrodialyse pour la potabilisation de l'eau.

Source : Najah W., 2008

Dans le premier compartiment, la concentration en sel dissous diminue. C'est donc un compartiment de dilution. Le deuxième compartiment voit augmenter la concentration en sels dissout. C'est alors un compartiment de concentration. Un compartiment sur deux est un compartiment de dilution, un sur deux est un compartiment de concentration. Une électrode à chaque extrémité de l'appareil assure le passage du courant. La principale application de l'électrodialyse est le dessalement des eaux saumâtres [12].

I.5. Classification des membranes :

Les membranes peuvent être classées d'après plusieurs critères :

- Classification d'après le mécanisme de séparation ;
- Classification d'après la morphologie ;
- Classification d'après la géométrie de préparation des membranes ;
- Classification d'après la nature chimique.

I.5.1. Classification d'après le mécanisme de séparation :

Les mécanismes de séparation dans les membranes sont complexes et encore partiellement compris. Les processus qui jouent un rôle dans la séparation membranaire sont : le tamisage, la friction sur les parois des pores des membranes, la diffusion dans le matériau membranaire ou dans les pores des membranes, les forces de surface répulsives ou attractives, notamment la répulsion électrostatique. La classification la plus répandue des membranes d'après le mécanisme de séparation est la suivante :

I.5.1.1. Membranes poreuses :

Membranes poreuses (MF, UF, NF), où les effets de tamisage et de friction jouent des rôles important**.** Ce type de membrane est similaire par sa structure au filtre conventionnel, mais elle diffère par la taille de ses pores 0.01 a 1 micron. Les particules plus grosses que les pores sont toutes retenues, celle taille comprise entre les plus gros pores et les plus petits sont partiellement retenus, et les particules de plus petites tailles passent en totalité. La séparation de soluté par des membranes poreuse est donc principalement une fonction de taille moléculaire et de distribution de tailles de pores. En général, seulement les molécules qui différent 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 centrés 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 méso pores ;
- Soit une taille supérieure à 50 nm dans le cas des macros pores ;

Le mécanisme de transfert de matière sous l'effet de la pression est exclusivement convectif pour le solvant, celui n'entraine avec lui que les espèces dont la taille est plus petite que celle des pores [2].

I.5.1.2. Membranes denses :

Membranes non poreuses (perméation de gaz, pervaporation, osmose inverse); ces membranes peuvent être considérées comme des milieux denses où la diffusion des espèces a lieu dans les volumes libres situés entre les chaînes moléculaires du matériel de la membrane.

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 a 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 chaines de polymères, leur taille est voisine de celles des molécules organiques simples ou des ions hydratés [2].

I.5.1.3. Membranes échangeuses des ions :

Ces types de membranes considérées comme un type spécial de membranes non poreuses, consistant dans des gels denses ayant une charge positive (échangeuses des anions) ou négative (échangeuses des cations).

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

De nouvelles générations de membranes, notamment anioniques et bipolaires, présentant une résistance chimique améliorée sont apparues sur le marché.

Ces techniques électro membranaires sont aujourd'hui au nombre de trois :

- L'électrodialyse (ED) dite conventionnelle ;
- L’électrodialyse à membranes bipolaires (EDMB) ;
- L’électrodialyse à membranes (EM).

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

I.5.2. Classification d’après la morphologie :

Les membranes peuvent être classées en fonction de leur structure ; Trois types de structures sont définis : symétriques, asymétriques ou composites. Les deux premières sont élaborées à partir d’un même matériau, alors que la dernière est composée d’un assemblage de matériaux.

I.5.2.1. Membranes symétriques ou isotrope :

Membranes à structure symétrique ont la même structure sur toute leur épaisseur (structure isotrope). Elles sont composées d’un même matériau ayant une porosité sensiblement uniforme dans toute l’épaisseur. Elles possèdent des pores réguliers et cylindriques. Ces membranes ne sont presque plus utilisées de nos jours à cause de leur faible perméabilité.

Elles peuvent être denses (absence de pores) ou poreuses. Dans ce cas la membrane dans toute son épaisseur, forme la couche sélective. Les membranes de microfiltration fabriquées par inversion de phase sont symétriques ou faiblement asymétriques. On peut également considérer les couches sélectives des membranes d’osmose inverse comme des membranes symétriques denses [13].

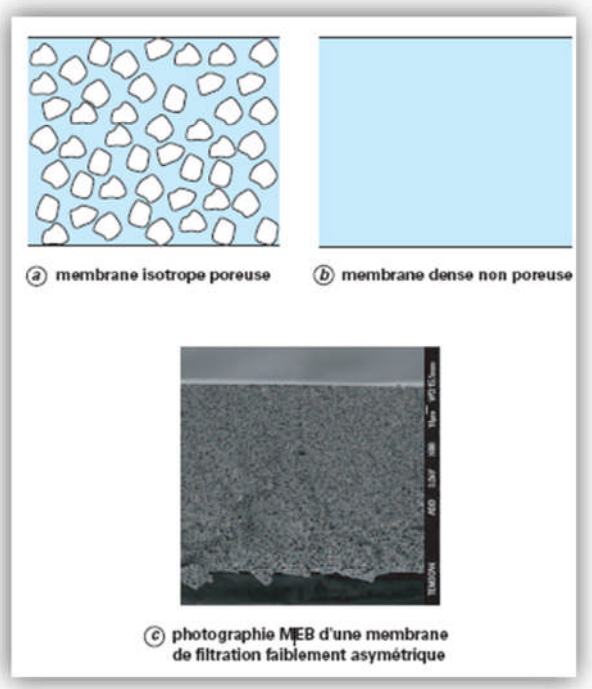


Figure I.7 : Représentation schématique de membranes symétriques.

Source : REMIGY J., 2005

I.5.2.2. Membranes asymétriques ou anisotropes :

Les membranes asymétriques ont une porosité variable dans l'épaisseur de la membrane. Cette structure leur permet de répondre a des exigences contradictoires en matière de filtration a savoir réaliser une séparation avec une sélectivité élevée, assurer un débit de permeation important et présenter une résistance mécanique suffisante. On distingue deux parties bien distinctes : la (ou les) peau(x) et la sous-couche poreuse.

La peau est la partie sélective de la membrane. Elle possède la porosité la plus faible et les pores les plus petits. Son épaisseur est très faible devant celle de la membrane : de l'ordre de 1 µ m ou moins. Cette faible épaisseur permet d'associer une haute sélectivité à une haute perméabilité. Les performances en filtration de la membrane ne dépendent donc que des performances de la peau. La peau sera donc mise directement en contact avec le fluide à filtrer [14].

La sous-couche poreuse forme la plus grande partie de la membrane. Elle possède une porosité souvent très importante (60 à 80 %), associée à des pores de grandes dimensions (à l'échelle du micromètre). Elle n'offre pas de sélectivité et n'influe pas sur la perméabilité. Son rôle est d'assurer la résistance mécanique de la membrane.

Dans le cas de membranes planes, une seule peau est observée. Dans le cas de membranes de géométrie à fibres creuses une ou deux peaux peuvent être réalisée(s) [13].

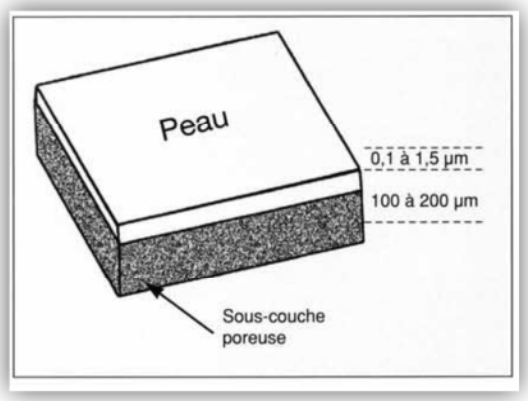


Figure I.8: Membranes asymétriques ou anisotropes.

Source : FABY J., 2002

I.5.2.3. Les membranes composites :

Les membranes composites (parfois dénommées TFC – *Thin Film Composite*) sont constituées d'un assemblage de deux ou plusieurs couches de matériaux de différentes porosités et de différentes compositions chimiques. Elles ont été développées afin d'augmenter la perméabilité des membranes en diminuant l'épaisseur de la couche active sélective. Des épaisseurs de l'ordre de 10 à 100 nm sont utilisées. Les autres couches ont une porosité croissante et permettent de garantir la tenue mécanique de la couche active. Les membranes composites sont essentiellement des membranes planes ou tubulaires de nano filtration ou d'osmose inverse [13].

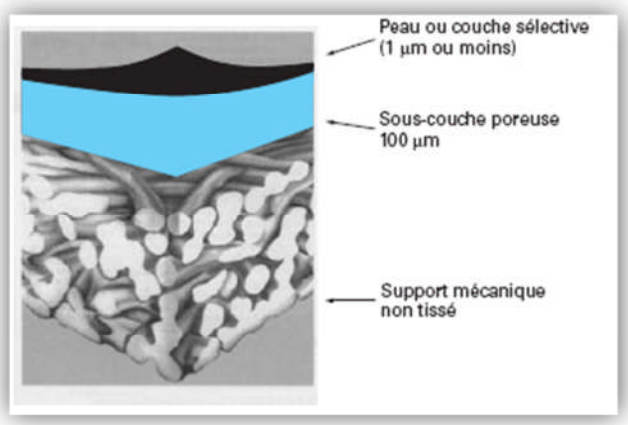


Figure I.9: Représentations schématiques d'une membrane composite.

Source : REMIGY J., 2005

La plupart des membranes commerciales de MF, UF et de NF sont des membranes à structure asymétrique car ce type de structure permet d'avoir des perméabilités plus élevées.

I.5.3. Classification d'après la géométrie de préparation des membranes :

Les membranes peuvent être classées en fonction de la forme sous laquelle elles sont fabriquées :

- Membranes planes;
- Membranes cylindriques :
    - tubulaires;
    - fibres creuses.

La forme des membranes conditionne la manière dont elles sont assemblées pour fabriquer des modules [15].

I.5.4. Classification d'après la nature chimique :

Les membranes sont fabriquées à partir de polymères organiques et de matières inorganiques (métaux, oxydes métalliques, verre, carbone, carbure de silicium, etc.). Bien qu'il existe des membranes mixtes faites de polymères et de matériaux inorganiques (membranes polymériques avec des zéolites par exemple), la plupart des membranes disponibles commercialement sont faites à partir de polymères ou de matériaux inorganiques.

Pour des raisons bien compréhensibles de protection de secret de fabrication, les fabricants hésitent à dévoiler avec précision la nature chimique des constituants de leurs membranes et préfèrent en indiquer les principales propriétés en termes :

- De résistance mécanique (déterminant la durée de vie et l'intégrité des membranes) ;
- D'hydro phi licité (déterminant la résistance au colmatage) ;
- De stabilité chimique (résistance aux agents l'avant) [15].

I.5.4.1. Les membranes organiques :

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides…).

Les dérivées cellulosiques restent encore très utilisées, ainsi que les polyamides (en osmose inverse et nano filtration). D'autres polymères, tels les poly acrylonitriles (PAN), Les poly sulfones (PS), et les poly fluorures de vinylidene (PVDF) sont de plus en plus répandus car ils résistent mieux à l'oxydation, au PH ou à la température.

Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constituées de membranes organiques [2], [16].

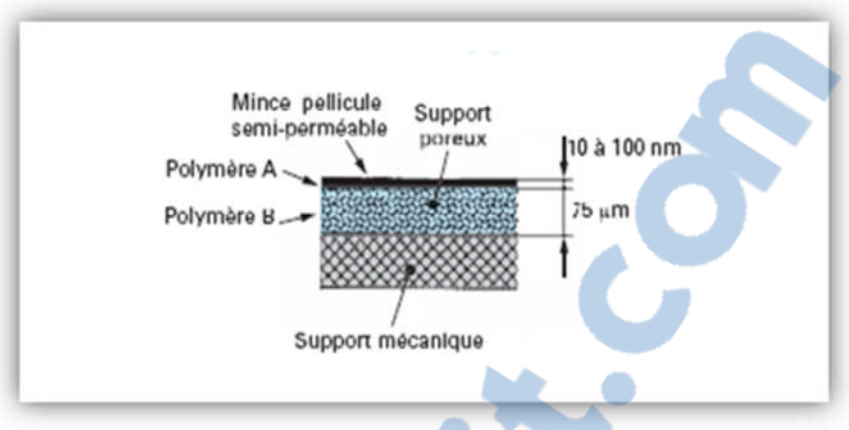


Figure I.10: Structure d'une membrane organique plane.

Source : REMIGY J., 2005

I.5.4.2. Les membranes inorganiques (minérales) :

Les membranes minérales sont fabriquées à partir de poudres déposées par un procédé sol-gel en général sur un support poreux (céramique, carbone graphite, alumine) puis traitées thermiquement. Elles présentent une résistance chimique, thermique et mécanique plus grande que les membranes organiques. Leur mode de fabrication n'offre cependant pas encore autant de possibilités que celui des membranes organiques, en termes de géométries et de contrôle de la porosité, mais une évolution rapide est en cours dans ce domaine [16].

Les membranes minérales sont largement rependues car elles sont très sélective, très perméables et peuvent être soumise plus facilement a des procédés de nettoyages assez agressifs sans trop être altérées. Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre) [2].

Le choix entre ces deux types de membranes s'effectue en fonction de la nature des milieux à traiter et des conditions de fonctionnement.

Tableau I.3: Comparaison des membranes organiques et minérales.

propriétés	Membranes minérales	Membranes organiques
applications	MF, UF	MF, UF, NF, OI
Resistance thermique	>100°C	<100°C
Résistance chimique	PH de 0 à 14	PH de 2 à 12
Résistance mécanique	bonne	Moins bonne
Tolérance aux oxydants	oui	Fonction du polymère
compactage	insensibles	sensible
Durée de vie	10 ans	5 ans

Source : ALAIN M., 2001

Rapport-Gratuit.com

I.6. Matériaux membranaires :

Les matériaux membranaires doivent avoir une résistance chimique, thermique et mécanique en accord avec le procédé et le fluide utilisé. Les matériaux doivent pouvoir être mis en forme facilement et permettre la fabrication d'une membrane fine, résistante, sélective et perméable. Deux grandes catégories existent : les membranes organiques ou polymères et les membranes minérales.

- ✓ **La résistance chimique** est reliée à la nature du fluide traité (pH, oxydant / réducteur...) ainsi qu'aux nettoyages mis en œuvre lors de la lutte contre le colmatage et/ou la désinfection des installations.
- ✓ **La résistance thermique** des matériaux impose la plage de température d'utilisation en continu ou de manière momentanée (lors de phases de stérilisation, par exemple).
- ✓ **La résistance mécanique** dépend du matériau mais aussi de la structure de la membrane et de sa géométrie. Elle n'est donc pas directement reliée aux matériaux composant la membrane.

Les membranes minérales ne sont produites que sous forme de membranes planes ou tubulaires. Au contraire, la plupart des polymères permettent de produire des membranes organiques sous toutes les géométries possibles. Certaines formes sont alors peu intéressantes (module tubulaire) et donc délaissées au profit de géométries plus performantes (modules spiralés et fibres creuses) [13].

I.6.1. Matériaux organiques :

Il s'agit de polymères d'origine synthétique ou naturelle, réticulés ou non. Les membranes de filtration en polymères représentent plus de 80 % du marché. D'une manière générale, les avantages reconnus des membranes en polymères sont :

- une mise en œuvre aisée ;
- une disponibilité dans toutes les tailles de pores (de la microfiltration à l'osmose inverse) ;

I.6.1.1. Les polymères dérivés de cellulose :

Les dérivés de cellulose sont utilisés pour la fabrication des membranes asymétriques d'ultrafiltration, de nano filtration et d'osmose inverse.

Sous l'effet de fortes pressions, ils ont tendance à se compacter entraînant une diminution irréversible de la perméabilité. Ce phénomène ne se produit pas en ultrafiltration où les pressions faibles.

Ces matériaux présentent une forte hydrophobicité garantissant une faible tendance au colmatage. Leur stabilisé chimique est réduite. Les pH opératoires doivent rester dans une

gamme allant de 4 à 6,5 et la température doit rester inférieure à 40°c pour éviter l'hydrolyse du matériau.

Les dérivés de cellulose supportent une exposition continue à de faibles concentrations de chlore. Il ne faut donc pas hésiter à pratique une chloration avant membrane qui évitera leur dégradation complète par les micro-organismes. Parmi les on a l'acétate de cellulose ; le matériau de base est la cellulose, qui est le plus ancien matériau utilisé pour les membranes [1].

Il s'agit de polymères d'origine naturelle (cellulose) dont les groupements hydroxyles sont chimiquement modifiés. L'estérification de la cellulose permet de produire les mono, di ou tri acétates de cellulose : Ces deux derniers sont très utilisés. Ils représentent une référence, notamment dans le domaine du traitement de l'eau, malgré leurs faibles résistances thermique et chimique [13].

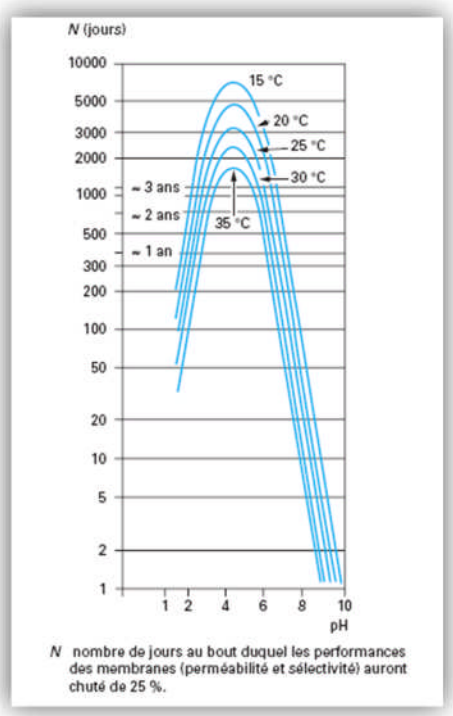


Figure I.11: Durée de vie des membranes en acétate de cellulose en fonction de la température et du PH.

Source : REMIGY J., 2005

I.6.1.2. Membrane en polyamides :

Compte tenue des inconvénients de l'acétate de cellulose, des membranes de type polyamide ont été développées. Les plus répandues sont commercialisés par DUPONT de NEMOURS sous forme de fibre creuse et fabriquées en continu selon la technique de séparation de phases [1].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Cette classe de polymères regroupe une grande variété de structures chimiques qui possèdent une liaison amide ou imide. Les polyamides sont principalement utilisés pour la fabrication des membranes composites de NF ou d'OI où ils forment la couche active. Des applications en nano filtration / osmose inverse en milieu organique sont envisagées en utilisant des membranes à base de poly imide [13].

I.6.1.3. Les poly sulfones :

Les poly sulfones sont utilisés pour la fabrication de membranes d'ultrafiltration. Ils peuvent être utilisés tel quel ou servir de support à une couche fine de séparation au sein des membranes composites de nano filtration ou d'osmose inverse.

La poly sulfone et la poly éther sulfone sont les plus couramment employées.

Les propriétés mécaniques de ce matériau ainsi que sa résistance chimique son excellentes (résistance à une large gamme de pH et à une exposition continue au chlore).

En revanche, le caractère hydrophobe des poly sulfones les rendent sensible au colmatage par adsorption des molécules organiques.

Des études récentes ont cependant montré que le vieillissement chimique au chlore des membranes en poly sulfone dépend du pH : le vieillissement est beaucoup plus prononcé à pH = 8 qu'à pH = 12pour une même concentration en chlore libre total équivalente [1].

I.6.1.4. Polyoléfines et polymères fluorés:

Ces polymères regroupent les polyéthylènes (PE) et polypropylène(PP) ainsi que leurs dérivés fluorés tels que le polytétrafluoroéthylène (PTFE) et le polydifluorure de vinyle (PVDF). Les membranes fabriquées avec ces polymères sont caractérisés par de très bonnes résistances thermiques et chimiques, en particulier celles en PTFE.

- ✓ Le polypropylène est utilisé pour la fabrication de membranes de microfiltration. Il s'agit d'un matériau élastique qui résiste bien, sur le plan mécanique, aux rétro lavages.

Le caractère hydrophobe de ce matériau le rend assez sensible au colmatage. Il présente une bonne stabilité chimique dans une large gamme de pH mais peut être détruit par le chlore dont l'usage est donc proscrit [1].

I.6.1.5. Dérivés acryliques :

Les principaux polymères acryliques sont utilisés greffés ou sous forme de copolymères. Le polyacrylonitrile est utilisé sous forme de copolymère : poly (acrylonitrile Coacrylamide), poly (acrylonitrile Co acétate de vinyle), poly (acrylonitrile Co chlorure de vinyle) ou d'alliage de polymère (polyacrylonitrile / polyvinyltétrazole) [13].

I.6.1.6. Autres polymères :

Un grand nombre d'autres polymères sont utilisés pour la fabrication de membranes de filtration. Certains constituent une membrane à part entière comme les polycarbonates, d'autres servent d'additifs lors de la fabrication de membrane (poly éthylène glycol, poly vinylpyrolidone...).

Enfin d'autres servent à modifier la surface de membrane ; le plus souvent pour rendre hydrophiles des membranes hydrophobes afin de diminuer le colmatage ; comme la polyvinylpyrolidone ou le poly vinylalcool [13].

Le tableau ci-dessous regroupe les avantages et inconvénients des membranes organiques suivants leur composition en se basant sur les critères suivants :

- Perméabilité ;
- Sélectivité ;
- Stabilité chimique ou thermique ; Sensibilité au chlore.

Tableau I.4: avantages et inconvénients des membranes organiques suivant leur composition.

	Avantages	**Inconvénients**
Acétate de cellulose	• Perméabilité élevée. • Sélectivité élevée. • Mise en œuvre assez aisée. • bon niveau de résistance au colmatage. => colmatage moindre. • cout réduit. • Jusqu'à 98 % d'élimination du Na Cl.	• Sensible à la température. • Sensible au PH ; chlore • Sensible au compactage. • Sensible aux microorganismes : doit être régulièrement désinfecté (rétro lavage avec Cl_2ou ClO_2). • Sensibilité aux MO dont MON.
Type polyamide	• Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique. • Forte élimination du sel.	• Grande sensibilité au chlore. • Faible perméabilité. • Phénomènes d'adsorption.
Type poly sulfone	• Bonne stabilité thermique et au pH. • Résistance chimique : 2<PH<12 donc lavage énergétique possible. • Peu sensible au COT. • Non biodégradable (n'a besoin d'oxydant que pour contrôler le bio foulling)	• Sensible au compactage Adsorptions. • Rétro lavabilité inferieure à l'acétate de cellulose.

Matériaux acryliques	• Bonne stabilité thermique et chimique. • Stockage à sec possible.	• Faible résistance mécanique. • Pores de diamètres assez élevés.
Matériaux fluorés	• Bonne stabilité thermique et chimique.	• Faible perméabilité • MF uniquement

Source : BERLAND J., 2002

Tableau I.5 : Principales membranes organiques commercialement disponibles.

Matériau	**Type d'application**			
	MF	UF	OI	NF
Acétate de cellulose	X	X	X	X
tri acétate de cellulose	X	X	X	
Mélange di acétate et tri acétate de cellulose		X		
Mélange d'esters de cellulose		X		
Nitrate de cellulose	X			
Cellulose régénérée	X	X		
Gélatine	X			
poly acrylonitrile (PAN)		X		
Polychlorure de vinyle (PVC)	X			
Copolymère a base de chlorure de vinyle	X	X		
polyamide	X	X	X	X
Polysulphone (PSU) et dérivés	X	X		
Polybenzimidazole (PBI)		X		
Polybenzimidazolone (PBIL)		X		
polycarbonate	X			
polyester	X			
polyimide		X	X	X
polypropylène	X			
Polytétrafluoroétylene (PTFE)	X			
Poly fluorure de vinylidene (PVDF)	X	X		
polyvinylalcool				X

Source : REMIGY J., 2005

En 1980, plus de 100 polymères étaient utilisés pour la fabrication de membranes ; de nos jours, seulement 17 sont utilisés, dont 5 principaux.

Le principal défaut des membranes organiques est leurs faibles résistances thermique et chimique comparées à celles des membranes minérales. Les membranes en polymères fluorés (PTFE, PVDF...) sont les plus résistantes chimiquement [13].

I.6.2. Matériaux inorganiques (minéraux):

Différents matériaux minéraux peuvent être utilisés pour la fabrication des membranes de filtration. Si les céramiques composent la majorité de membranes minérales, on trouve également du carbone poreux, des métaux ou du verre. Bien souvent, il s'agit de membranes composites où le matériau composant le support est différent de la couche active [13].

I.6.2.1. Céramiques :

Il s'agit de membranes composées d'oxyde métallique (oxyde d'aluminium, de titane ou de zirconium...) seul ou en mélange. Elles sont formées de couches successives de particules de taille décroissante. Le support est généralement constitué d'alumine α ayant des pores de l'ordre du micromètre et plus. Las couche active est constituée d'alumine (Al_2O_3) (α ou γ), de zircone(ZrO_2) ou d'oxyde de titane (TiO_2).

● **Avantages :**

- ✓ bonne résistance à températures élevées (jusqu'à 300 °C) ;
- ✓ résistantes à hautes pressions;
- ✓ langue durée de vie ;
- ✓ très bonne résistance chimique :
  - • pH compris entre 0 et 14,
  - • compatibilité avec les solvants organiques et les rayonnements ionisants.

● **Inconvénients :**

- ✓ leur coût est élevé ;
- ✓ elles ne se présentent que sous forme de membrane tubulaire ou plane. Dans le cas de membranes tubulaires, il s'agit généralement de membrane à canaux multiples [13].

Figure I.12: Modules en céramique.

Source : MONTIEL A., 2005

I.6.2.2. Carbone :

Si des membranes composées uniquement de carbone existent pour la séparation de gaz, les membranes en carbone utilisées en filtration sont composées d'un support carboné poreux sur lequel est déposée une couche d'oxyde métallique (zirconium / alumine) [13].

I.6.2.3. Métaux :

Une grande variété de métaux peut être utilisée pour la fabrication de membranes de filtration. Deux métaux ressortent cependant : les aciers (notamment inoxydables) et l'aluminium. Les membranes en acier inoxydable sont composées de particules frittées alors que celles en aluminium sont formées d'un film d'aluminium anodisé.

Les membranes métalliques sont exclusivement des membranes de microfiltration ou de haute UF avec une taille de pore minimale égale à 20 nm [13].

Tableau I.6: Exemple de matériaux constitutifs de membranes et résistance à la température et au PH.

	Matériaux	**Température maximale admissible en °C**	**Gamme de pH admissible**
Organiques	Acétate de cellulose	40	3 à 8
	Poly sulfone	90	2 à 12
	Polyimide	45	4 à 11
	Polyamide	60	2 à 12
	Polyacrylonitrile	60	2 à 11
	Polyvinyldifluorure	70	2 à 12
	Polypropylène	70	2 à 12
	polyéthersulfones;	80	2 à 12

Minérales	Céramiques	250	1 à 14
	Carbone / graphite	180	0 à 14
	Acier fritté	400	4 à 14
	Alumine	400	2 à 12

Source : MONTIEL A., 2005

Tableau I.7: Comparaison des avantages et inconvénients des grandes classes de matériaux.

Matériau	Organique	Minéral
Avantages	• Grande variété de taille de pore (MF, UF, NF, OI) ; • Grande variété de géométrie (plan, tube, spiralée, fibre creuse) ; • Faible coût.	• Stabilité thermique (T > 300 °C) ; • Stabilité chimique (acide / base, oxydants) ; • Résistance aux solvants.
Inconvénients	• Faible stabilité thermique (T < 100 °C) ; • Faible stabilité chimique (pH extrêmes, oxydants) ; • Faible résistance aux solvants.	• Coût (facteur 10 par rapport aux membranes organiques) ; • N'existe pas pour des faibles tailles de pore (NF, OI).

Source : REMIGY J., 2012

I.7. Caractéristiques des membranes :

Les caractéristiques des membranes découlent de leur utilisation. Elles doivent répondre à trois catégories d'exigences : l'efficacité de séparation, un flux élevé et une bonne résistance. Les membranes peuvent être caractérisées par leur porosité, l'épaisseur de la couche filtrante et le diamètre moyen de leurs pores. Le diamètre moyen des pores et leur répartition sont des paramètres essentiels au bon fonctionnement de la membrane [3].

I.7.1.Le taux de conversion :

Le taux de conversion est par définition la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane.

$$Y=Q_p/Q_0 \qquad (I.4)$$

Q_p : débit du perméat (m^3/h) ;

Q_o : débit de la solution à traiter (m^3/h).

- Le taux de conversion est un concept qui s'applique à tous les procédés membranaires. C'est la fraction de l'eau d'alimentation convertie en eau traitée.
- Ce taux varie de 20 % à 50 % pour le dessalement de l'eau de mer par OI.
- Il atteint un maximum de 80 % à 95 % lors du traitement par OI, NF ou ED de l'eau saumâtre ou douce.

I.7.2. La sélectivité d'une membrane :

La sélectivité d'une membrane pour une substance donnée dépend de sa nature et de sa structure, de l'environnement chimique à proximité de la membrane et des propriétés des substances à séparer. La sélectivité d'une membrane est, en général, définie par le taux de rejet de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir [2].

$$TR = 1 - Cp/Co \qquad (I.5)$$

Co : concentration de l'espèce à retenir dans la solution ;

Cp : concentration de la même espèce dans le perméat**.**

Une membrane retient des solutés selon :

- leur taille: c'est l'effet stérique qui résulte de la structure « tamis » du matériau.
- leur charge: une membrane peut être chargée générant ainsi des interactions électrostatiques avec des composés chargés.
- leur hydratation: dans le cas de petit soluté le cortège d'eau d'hydratation qui l'entoure peut participer à la rétention.

La sélectivité est une caractéristique difficile a quantifier et pourtant essentielle. C'est une caractéristique de surface de la membrane, qui détermine quelles composées de la solution la traversent. Cette caractéristique est liée à la nature même de la membrane, physique et chimique [1].

La sélectivité d'une membrane pour une substance donnée dépend de sa nature et de sa structure, de l'environnement chimique à proximité de la membrane et des propriétés chimiques de la substance à séparer.

Il y a deux valeurs extrêmes du TR:

- TR=0% signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane.
- TR=100%signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane**.**

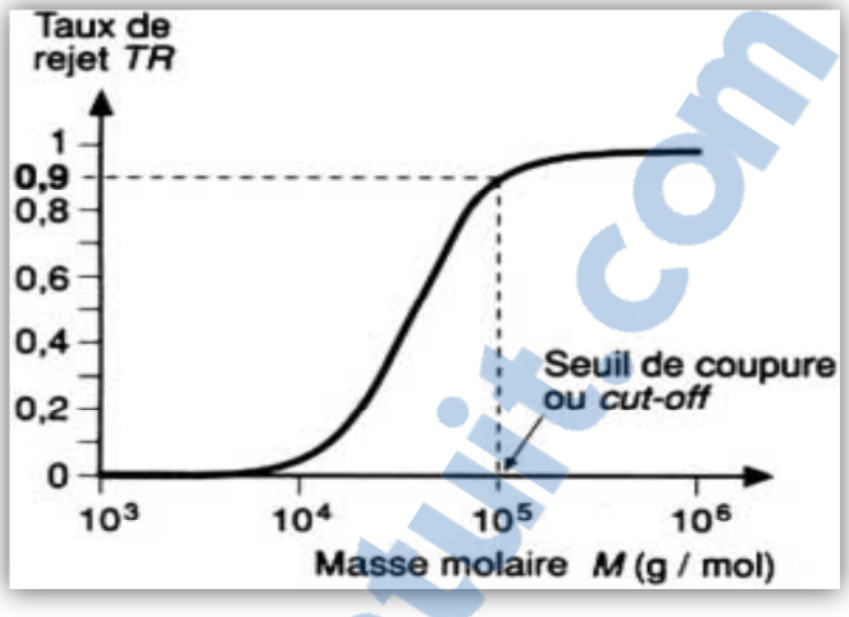


Figure I.13: Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration.

Source : NECHAD A., 2009

I.7.3.La perméabilité d'une membrane:

La perméabilité d'une membrane à une eau déminéralisée dépend de sa porosité. La perméabilité exprime la proportionnalité entre la vitesse de perméation à l'eau déminéralisée et la pression transmembranaire à une température donnée. La mesure de la perméabilité permet de vérifier l'état d'une membrane, en particulier l'effet du colmatage [2].

Comme pour les autres milieux filtrants, cette perméabilité augmente avec la température de l'eau, En fait, la viscosité de l'eau diminue lorsque sa température augmente et cela nécessite une plus faible force motrice pour obtenir le même débit de perméat. En première approximation, il est possible de considérer que la perméabilité d'une membrane est inversement proportionnelle à la viscosité de l'eau [15].

La perméabilité peut être définie comme étant le rapport entre le flux de perméat (J_p) et la différence de pression transmembranaire effective (ΔP_m) :

$$A = J_p / \Delta P_m \qquad (I.6)$$

La densité de flux de perméat (vitesse de perméation) est un débit de perméation unitaire, c'est-à-dire le rapport entre le débit volumique de perméation (Q_p) et la surface effective de la membrane (S) :

$$J_p = Q_p / S \qquad (I.7)$$

On remplaçant le flux de perméation on obtient :

$$A\ (m/(s.pa)) = Q_p / S\ \Delta P_m \qquad (I.8)$$

Il faut mentionner qu'il existe des différences significatives de perméabilités entre divers coupons d'une même feuille de membrane à cause des irrégularités de fabrication. Pour cette raison, c'est la perméabilité moyenne qui est utilisée pour caractériser une membrane [17].

Pour les membranes de MF et d'UF, la viscosité seule peut être prise en considération pour évaluer la perméabilité à une certaine température. Ces membranes obéissent donc à la loi de Darcy comme le fait un milieu granulaire. Dans le cas de la NF et de l'OI, la perméation de l'eau à travers la membrane doit aussi faire intervenir la théorie du volume libre. La température a ainsi un effet sur la structure de la matrice polymérique du matériau membranaire et on ne peut donc pas affirmer a priori que ces membranes obéissent uniquement à la loi de Darcy [18].

I.7.4. La résistance d'une membrane :

La résistance hydraulique (Rm*)* d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité :

$$R_m=1/A=S\Delta P_m/Q_p \qquad (I.9)$$

Cette relation nous permet de calculer de façon pratique la résistance d'une membrane à partir des mesures de flux de perméation et de la pression transmembranaire.

En supposant que les pores d'une membrane soient cylindriques et rectilignes, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la résistance d'une membrane comme :

$$R_m=8\,\delta\,/n_p\Pi\, r_p^4 \qquad (I.10)$$

δ : est l'épaisseur de la couche active de la membrane ;

n_P : est le nombre de pores par unité de surface ;

r_P : est le rayon des pores.

Cette équation montre que la résistance de la membrane augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la membrane et diminue avec sa porosité [19].

I.7.5. Autres caractéristiques :

Les membranes sont généralement caractérisées aussi par leur taille des pores, leur seuil de coupure relatif à une masse moléculaire critique, ainsi que leur perméabilité à l'eau pure dans des conditions standard [2].

I.7.5.1.Taille des pores :

Taille des pores varie de quelques microns en microfiltrations à un nanomètre en nano filtration, à quelques Angströms dans le cas d'une membrane d'OI, la porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme. Toutefois, la notion de pore est difficile à

définir à une échelle plus petite que le nanomètre. En deçà de nanomètre, le mécanisme de transfert de solvant est plutôt de type solution/ diffusion que convection ; l'eau n'est pas seulement poussées pour s'infiltrer au travers de la membrane, mais aussi elle diffuse au travers du matériau membranaires. La structure polymérique du matériau change en fonction des énergies d'activations, donc de la température. La sélectivité de ces membranes dépend de l'affinité chimique du matériau avec les différents composés qui traverse la membrane [2].

I.7.5.2.La porosité membranaire:

La porosité volumique d'une membrane est définie comme le rapport du volume des pores sur le volume total de la membrane. Elle a un impact considérable sur les densités de flux de matière à travers la membrane. L'estimation de la valeur de cette propriété de la membrane peut se faire soit pendant la mise au point du matériau, soit avant son usage régulier dans un procédé. Plusieurs auteurs ont montré expérimentalement que le flux d'eau est directement corrélé à la porosité. La porosité des membranes varie de 35% à 80% [7].

I.7.5.3. Seuil de coupure :

Le Seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90 % des solutés sont retenue par la membrane. Celui-ci s'exprime en g/mol ou en dalton (Da). Le seuil de coupure est une façon pratique de caractériser les membranes, mais pas tout â fait rigoureuse d'un point de vue scientifique, car il dépend aussi des autres caractéristiques de soluté ainsi que des conditions d'opération. Aussi le seuil de coupure doit-il être défini par apport à un soluté donné [2].

Plus le seuil de coupure d'une membrane est faible et plus cette membrane peut retenir de petites molécules ou colloïdes. Le seuil de coupure est relié principalement à la taille de pores de la membrane, mais aussi a sa charge, à son degré d'hydratation du PH et au pouvoir ionique de la solution à filtrer, de la pression d'opération et le flux de perméation, l'élasticité et la charge de la membrane [17].

I.7.5.4.Le caractère hydrophile et hydrophobe des membranes :

Le caractère hydrophile d'un matériau est un paramètre très important puisqu'il conditionne les interactions soluté-membrane et solvant-membrane. Dans de nombreuses applications, l'efficacité des membranes hydrophiles est supérieure à celle des membranes hydrophobes, ces dernières étant confrontées à un colmatage plus important dès lors que des molécules ou particules hydrophobes (protéines, colloïdes...) sont présentes dans le fluide filtré. Il en est de même avec les tensioactifs dont l'adsorption est plus prononcée sur les matériaux hydrophobes.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

De plus, l'énergie des interactions entre molécules hydrophobes et surface hydrophile étant plus faible que pour un système hydrophobe- hydrophobe, la régénération de la surface par lavage sera plus facile dans le premier cas [4].

Tableau I.8: Principales caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire.

	Procédé			
	Microfiltration	**ultrafiltration**	**Nano filtration**	**Osmose inverse**
Caractéristiques des membranes	Poreuse convection 100 a 10000 nm	Poreuse convection 1 a 100 nm	Poreuse solubilisation diffusion + convection 1 a 10 nm	Dense solubilisation diffusion
Perméation de	Solvants et espèces dissoutes.	Solvants, Sels et petites molécules	Solvants, Ions monovalent et petites molécules	Solvants
Rétention de	Particules, colloïdes	Macromolécules, colloïdes	petites molécules (M>300g/mole) ions	Sels
Pression d'opération usuelle et débit à travers la membrane	0.2 à 2 bars 150 à 1500 l/h/m^2	2 à 10 bars 50 à 300 l/h/m^2	7 à 40 bars 50 à 100 l/h/m^2	30 à 80 bars 10 à 60 l/h/m^2
Rôle de la pression osmotique	négligeable	faible	moyenne	importante
Applications	Epuration bactérienne du lait et traitements d'émulsions huile/ eau	Traitements des effluant (saumures)	Adoucissement des eaux potables.	Dessalement des eaux.

Source : ARZATE D., 2008

I.7.5. 5.Durée de vie des membranes :

La durée de vie des membranes a évidemment une incidence directe sur les coûts d'une installation de filtration membranaire. Cette durée de vie est cependant difficile à établir, car elle est très variable en fonction du matériau membranaire utilisé et des conditions d'utilisation.

Dans tous les secteurs industriels utilisant la microfiltration tangentielle, il est considéré que les membranes minérales ont des durées de vie supérieures aux membranes organiques. Il est cependant préférable d'exprimer cette durée de vie en nombre d'heures d'utilisation. Les garanties des constructeurs peuvent varier de 5 000 heures à plus de 30 000 heures.

Dans la pratique, cette durée de vie est fortement liée à l'utilisation qui est faite des membranes. Des colmatages importants, la filtration de produits contenant des éléments abrasifs (cristaux de tartre) et le nombre de nettoyages chimiques ont des incidences directes sur la dérive dans le temps des performances et/ou sur la fragilité des membranes [20].

I.8. Module membranaire:

I.8.1. Définition :

Un module est la plus petite unité qui peut être changée dans un système industriel. Il s'agit d'un assemblage de membranes avec une entrée d'alimentation commune et des sorties communes de perméat et de concentré. Le module comporte des cadres séparateurs ou des drains intercalaires, et généralement des joints de colle pour assembler les membranes et assurer l'étanchéité entre l'alimentation et le perméat. Un module ne comporte pas d'accessoires et d'équipement tels que des dispositifs de mesure, de mise sous pression, de contrôle [19].

Figure I.14: Détail d'un tube a pression.

Source: BESSIERE Y., 2005

I.8.2. Types de modules :

Le nombre total de modules à mettre en œuvre est défini en fonction du débit d'eau à produire et des caractéristiques de l'eau.

Les modules sont intégrés sur un châssis. Un automatisme permet la prise en compte des caractéristiques du site et assure ainsi une maîtrise totale de toutes les étapes de fonctionnement : l'alimentation en eau, le pré filtration, le rétro lavage et l'entretien périodique des modules à traiter [8].

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module :

- ✓ Régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation (écoulement laminaire ou turbulent).
- ✓ Compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil.
- ✓ Facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuse ou volume de l'appareil.
- ✓ Facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuse.
- ✓ Adaptation au produit à traiter (nécessite ou non de pré filtration).

Les modules supportent les membranes, 4 grands types de modules sont commercialisés :

- Les modules tubulaires ;
- Les modules fibres creuses ;
- Les modules plans ;
- Les modules spiraux [21].

I.8.2.1. Les modules tubulaires :

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent.

A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations [1].

Ces modules sont composés de membranes tubulaires dont le diamètre interne est de l'ordre du centimètre. Il peut s'agir de tubes uniques assemblés dans un module à l'aide de joints ou de monolithes composés de plusieurs tubes.

Ces modules sont construits autour de membranes minérales (céramiques), parfois de membranes en polymères.

L'alimentation est faite à un bout du module et le fluide circule à l'intérieur du ou des tubes ; le retentât ressort à l'autre bout. Le perméat traverse la membrane, circule au travers du corps du tube ou du monolithe pour ressortir à l'extérieur du tube [13].

Dans les techniques tubulaires, la membrane est enroulée sur elle-même et déposée ou directement formée à l'intérieur d'un tube support poreux d'un diamètre de 7 à 40 mm.
C'est la configuration la moins compacte mais qui permet une grande vitesse de circulation et un nettoyage facile. Les modules céramiques sont rétro lavables [22].

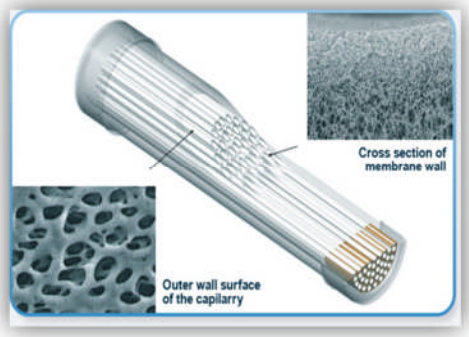


Figure I.15: Membrane tubulaire. **Figure I.16:** Membranes tubulaires organiques.

Source : FABY J., 2002

- **Avantage:**
  - ✓ Technologie simple, peu de traitement ;
  - ✓ Peu sensible au MES, accepte les fluides chargés ;
  - ✓ Module peu compact ;
  - ✓ peu de prétraitement, accepte des fluides chargés en grosses particules (ordre du dixième du diamètre du tube) ;
  - ✓ facilement nettoyable, utilisation de nettoyage mécanique.
- **Inconvénients:**
  - ✓ Compacité très faible de l'ordre de 10 à 300 m^2/m^3, la plus faible de tous les types de modules ;
  - ✓ investissement relativement élevé ;
  - ✓ coût énergétique pouvant être important, dû à un débit de circulation élevé ;
  - ✓ fragilité des membranes céramiques [13].

I.8.2.2. Modules à fibres creuses :

Les modules à fibres creuses peuvent contenir des dizaines de milliers de fibres creuses cylindriques obtenues par filage. Leur diamètre externe varie de 500 à 2000 microns tandis que leur diamètre interne varie de 350 à 1000 microns. La peau de la membrane peut

être soit à l'intérieur soit à l'extérieur des fibres. Dans le premier cas, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est recueilli à l'extérieur de celles-ci. Dans le deuxième cas, l'eau à traiter circule à l'extérieur et le perméat est recueilli à l'intérieur. Il est possible dans le second cas d'immerger les fibres creuses dans un bassin contenant l'eau à traiter et d'appliquer un vide partiel à l'intérieur de celles-ci. L'eau est alors libre de circuler à l'extérieur des fibres et celles-ci peuvent être tenues en mouvement par un système d'agitation afin de minimiser leur colmatage [18].

Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment eau traitée (perméat) et l'alimentation en eau brute. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne-externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses.

Il est à noter que les modules les plus utilisés dans le domaine du traitement de l'eau au sens large sont les modules à fibres creuses (ultra et microfiltration) ainsi que les modules spiralés (nano filtration et osmose inverse [14].

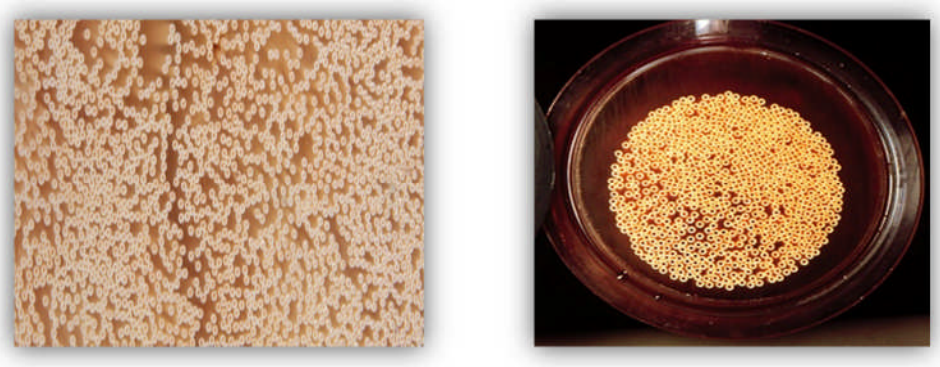


Figure I.17: Fibre creuse.

Source : FABY J., 2002

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- *Configuration Interne-Externe* (schéma a) : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres ;
- *Configuration Externe-Interne* (schéma b et c) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

Schéma a **Schéma b** **Schéma c**

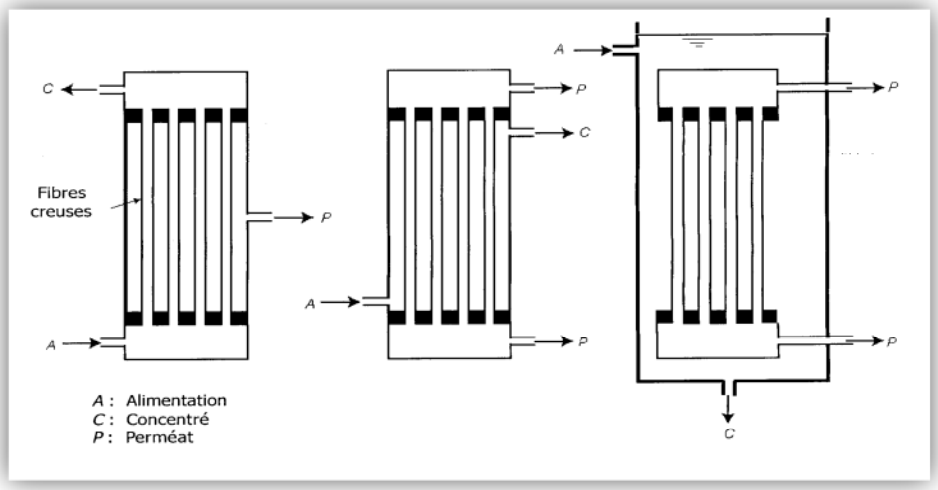


Figure I.18: Modules à fibres creuses.

Source : BERLAND J., 2002

Dans les deux cas, les membranes sont assemblées en faisceaux et leurs extrémités sont noyées dans des bouchons de colle qui isolent le perméat de l'eau à traiter. Un module industriel peut-être constitué de dizaines de milliers de fibres. Les fibres creuses supportent des rétro lavages. L'écoulement à l'intérieur des fibres creuses est, selon toutes probabilités, laminaire [1].

- **Avantage:**
  - ✓ Compacité élevée (la plus grande de tous les modules) de l'ordre de 1 000 à 15 000 m^2/m^3, dépendant du diamètre des fibres creuses ;
  - ✓ faible volume mort ;
  - ✓ coût d'investissement relativement faible ;
  - ✓ faible coût énergétique ;
  - ✓ possibilité de rétro lavage (nettoyage à contre-courant).
- **Inconvénients:**
  - ✓ Nécessité d'un prétraitement (blocage du canal interne par des particules) ;
  - ✓ sensibilité au colmatage [13].

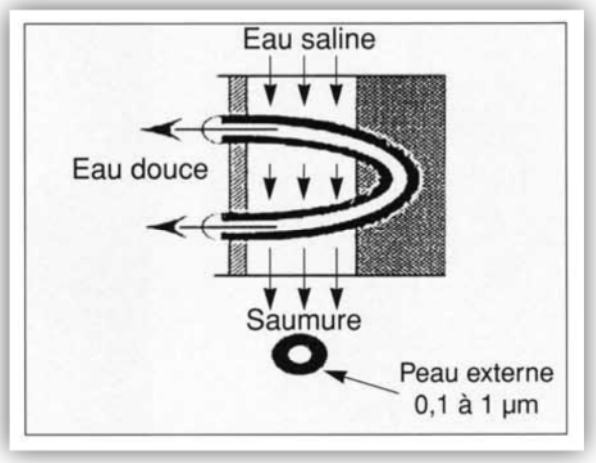


Figure I.19: Membranes fibres creuse : principe de fonctionnement et vue en coupe.

Source : FABY J., 2002

I.8.2.3. Les modules plans :

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.

Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les surfaces de filtration vont de 100 à 400 m^2 par m^3 occupé par le module [14].

L'assemblage élémentaire est constitué d'un espaceur côté alimentation, d'une première membrane, d'un espaceur côté perméat et d'une deuxième membrane.

L'alimentation en fluide à traiter se fait au niveau de l'espaceur de l'alimentation. Le perméat traverse la membrane et est récolté dans l'espaceur perméat, tandis que le retentât ressort au niveau de l'espaceur d'alimentation.

Les membranes utilisées sont généralement des membranes organiques supportées. Des joints assurent l'étanchéité entre les différents compartiments. L'assemblage de ces systèmes élémentaires permet d'ajuster facilement la surface membranaire.

L'épaisseur de l'espaceur d'alimentation constitue un paramètre important de ce type de système. La largeur de l'espace séparant les deux membranes côté alimentation est choisie en considérant différente critères :

- Présence de particules dans l'alimentation / nécessité d'un pré filtration ;
- volume mort du module / compacité ;
- coût de fonctionnement / coût énergétique du pompage.

Un espaceur d'alimentation épais, impliquant un espace important entre les membranes, est utilisé lors de la filtration de fluide chargé en particules en l'absence de pré filtration, tandis qu'un espaceur fin nécessite l'utilisation d'un pré filtration. D'une manière générale, l'espace entre les deux membranes est de l'ordre du millimètre.

Deux Caractéristiques ; Epaisseur entre plaques 0,5 - 3mm, Membranes en général organiques [13].

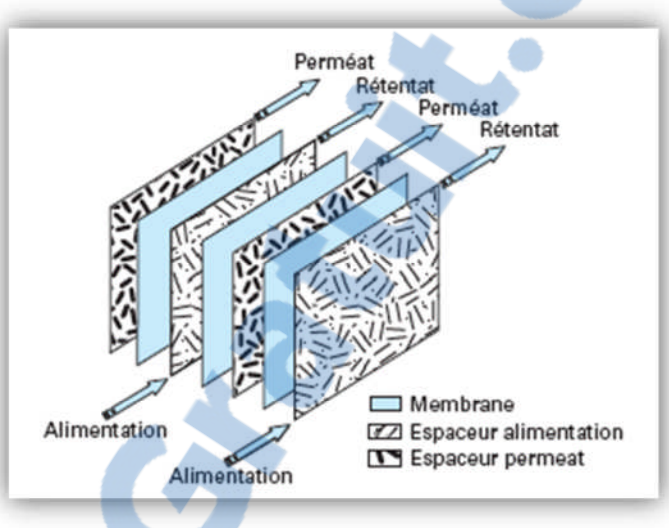


Figure I.20: Module plan : schéma de circulation des fluides.

Source : REMIGY J., 2005

- **Avantage:**
  - ✓ Facile à nettoyer ;
  - ✓ système modulaire aisément modifiable par l'utilisateur ;
  - ✓ changement facile des membranes après utilisation ou pour tester différentes membranes ;
  - ✓ prétraitement simplifié du fluide ; peut accepter des particules de l'ordre de 0,1 mm ;
  - ✓ système adapté aux faibles surfaces de filtration.
- **Inconvénients:**
  - ✓ compacité très faible de l'ordre de 100 à 400 m^2/m^3;
  - ✓ investissement relativement élevé ;
  - ✓ coût énergétique pouvant être important [13].

I.8.2.4. Les modules spiralés :

Les feuilles de membranes planes sont empilées et enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le perméat, c'est un collecteur de perméat. On obtient ainsi un cylindre multi couche ou le perméat s'écoule selon un chemin spiralée vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

Rapport-Gratuit.com

Cette configuration se rencontre principalement dans le dessalement de l'eau. Leur compacité est importante (de l'ordre de 900 $m^2.m^{-3}$) mais pour les eaux turbides, un prétraitement est nécessaire pour éviter tout encrassement [18].

Les modules spiralés sont constitués de plusieurs assemblages élémentaires enroulés en spirale. Comme pour les modules plans, les assemblages élémentaires comprennent un espaceur d'alimentation, une membrane, un espaceur de perméat et une deuxième membrane. L'étanchéité entre les différents compartiments est assurée par collage

Les membranes utilisées sont uniquement des membranes organiques qui sont suffisamment flexibles pour pouvoir être enroulées. L'alimentation se fait sur le côté du module au niveau de l'espaceur d'alimentation. Le perméat est collecté dans l'espaceur perméat et, en suivant une spirale, ressort par le tube de collecte central. Le retentât traverse le module par les espaceur d'alimentation et ressort de l'autre côté du module [13].

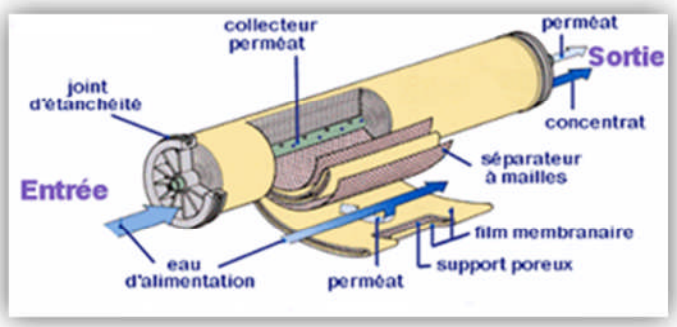


Figure I.21: Coupe d'un module spiralé.

Source : REMIGY J., 2002

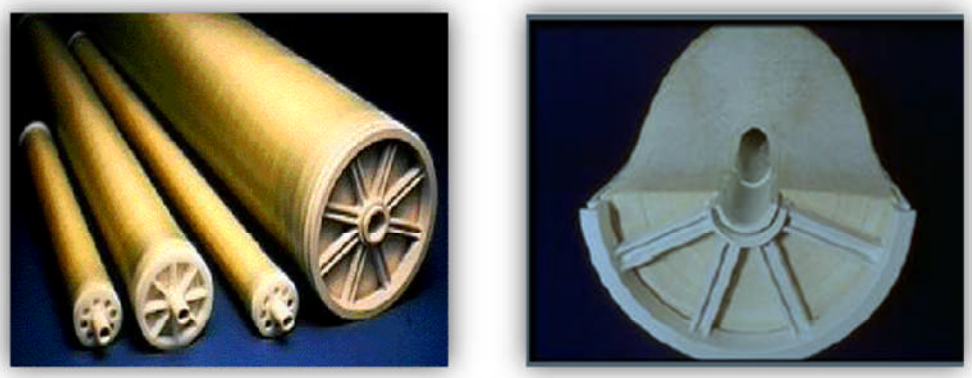


Figure I.22: Module spiralé.

Source : REMIGY J., 2002

- **Avantage:**
  - ✓ compacité élevée, de l'ordre de 300 à 1 000 m^2/m^3;
  - ✓ faible volume mort ;
  - ✓ coût d'investissement relativement faible.
- **Inconvénients**:
  - ✓ sensibilité au colmatage à cause de la présence d'espaceur ;
  - ✓ nécessité d'un prétraitement important ;
  - ✓ difficile à nettoyer ;
  - ✓ A utiliser pour des produits peu concentrés ou traitement de l'eau [13].

Que choisir ? Le choix doit se faire selon les contraintes qui sont les plus importantes par rapport à l'application envisagée. Plusieurs critères (compacité, coût,…) sont donc utilisables pour choisir le type de module optimal. Chacun des types de modules a ses avantages lui permettant de trouver des applications.

Tableau I.9 : Description des modules.

Module	Description	Caractéristiques	Matériau
Tubulaire	Membranes sous forme de tube (jusqu'à 13 mm de diamètre)	- Technologie simple - Faible compacité - Le fluide à traiter peut circuler à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes - Peut traiter tous types de produits (fluides visqueux, chargés), supporte 80 bars - Coûts d'installation relativement importants	-organique (rare) -minéral
Spirale	Membranes planes roulées en spirale	- Capacité de filtration élevée - Coût moindre - Bonne compacité - Sensibilité au colmatage (prétraitement nécessaire) - Difficultés possibles au nettoyage - Réservé aux produits peu concentrés et au traitement d'eau	-organique
Plans	Membranes planes	- Système plus souple et plus	-organique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

		modulable - Visualisation du perméat produit par chaque élément - Système peu compact - Très bien adapté à certaines applications ne nécessitant pas de pression de fonctionnement trop élevées.	- minéral (rare)
Fibres creuse	Membranes sous forme de capillaire (tube de 1 à 2 mm de diamètre)	- Compacité élevée - Canaux très fins de l'ordre d'un cheveu- Fragile - Sensibilité au colmatage - Inapplicable hors traitement de l'eau	-organique

Source : DAUFIN G., 2006

I.8.2.5. Modules dérivés :

Il existe également des modules dérivés comme les membranes immergées (fibres creuses suspendues dans un liquide) fonctionnant en succion. L'exemple d'utilisation est le bioréacteur à membranes. Les modules vibrants mettent en vibration les membranes (planes ou non) pour ainsi permettre le traitement de fluides extrêmement visqueux ou concentrés sans colmater le module.

I.8.2.5.1. Module à membranes immergées :

Il s'agit de modules en fibres creuses dont les fibres ne sont pas incluses dans un carter mais simplement suspendues dans un liquide. Ces modules fonctionnent en succion. Ils sont essentiellement utilisés à ce jour dans des bioréacteurs à membranes.

L'intérêt de ces modules et de ce type de fonctionnement réside dans un système de filtration simple ne demandant qu'une faible dépense énergétique. Ces modules sont immergés dans l'eau à traiter [13].

I.8.2.5.2. Module vibrant :

Les modules vibrants utilisent des membranes planes ou non. Les membranes sont mises en vibration selon un axe parallèle à la surface filtrante. L'oscillation de la surface de la membrane permet de générer des forts taux de cisaillement à la paroi, même en présence d'un régime hydraulique laminaire. La couche limite hydrodynamique est donc réduite ainsi que la polarisation de concentration et le colmatage.

Le principal avantage de ce système est que le cisaillement est localisé à la surface de la membrane et ne dépend pas du taux de cisaillement induit par l'écoulement d'alimentation. Ainsi, la technologie peut traiter avec succès des fluides extrêmement visqueux ou concentrés. Le principal défaut est la faible compacité de ces systèmes [13].

Tableau I.10: Performances comparées des différents modules et membranes.

Géométrie	Plane	tubulaire	Spirale	Fibre creuse
Coût énergétique (pompage)	Moyen	Faible	Important	Faible
Diamètre hydraulique (mm)	1 à 5	0,8 à 1,2	12 à 20	0,1 à 1
Compacité (m^2/m^3)	100 à 400	300 à 1000	10 à 300	1 000 à 15 000
Remplacement des membranes	Membrane par membrane	Module entier	Tube par tube	Module entier
Prétraitement	Prétraitement nécessaire	non nécessaire	indispensables	indispensables
Nettoyage	Bon	Difficile à moyen	Excellent	Moyen
Matériaux	Tous matériaux	Polymères	Tous matériaux	Polymères

Source : CHRISTOPHE J., 2005

I.9. Conclusion :

La diversité des membranes et modules et leurs configurations offrent aux collectivités et industrielles un vaste choix selon leurs besoins. Pour mieux assurer un choix identiques aux besoins ; il faut connaitre et maitriser les différents fonctionnements et mise en œuvre des installations membranaires ainsi que les différents problèmes rencontrés dans les installations membranaires avec des solutions, parmi lesquels, nous pouvons citer le colmatage des membranes, qui perturbe énormément la filtration membranaire.

Chapitre II:
fonctionnement, lavage
et entretien des installations membranaires

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons le fonctionnement ainsi que la mise en œuvre des procédés a membranes, Ensuite nous détaillons les modèles théoriques de transfert de matière et les facteurs limitant.

À cause de la séparation, il y a nécessairement une accumulation de matière à la surface des membranes (phénomène de la polarisation de concentration) et donc une augmentation du risque de colmatage des membranes et de la pression osmotique, qui sont les deux phénomènes qui limitent le bon fonctionnement des procédés membranaires. Pour mieux limiter les disfonctionnements des systèmes à membranes, il faut faire une bonne conception des installations de filtration [15].

II.2. Modes de fonctionnement :

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux :

- La filtration frontale (Dead end) ;
- La filtration tangentielle (cross flow).

II.2.1. La filtration frontale :

La plus simple à mettre en œuvre et la moins onéreuse est la filtration frontale dont le principe est de filtrer la solution perpendiculairement à la surface de la membrane. Toute la matière retenue s'accumule sur la membrane. La filtration frontale est une technique qui nécessite un faible investissement, et des coûts énergétiques de fonctionnement qui sont faibles par rapport à la filtration tangentielle. Par contre, ce type de fonctionnement permet essentiellement de filtrer des suspensions qui sont considérées comme faiblement colmatant dans un secteur d'activité donné. En effet si la solution est fortement colmatant le dépôt devient tel que les flux deviennent trop faibles pour que l'opération puisse fonctionner avec des débits raisonnables. Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toute trace de virus ou de bactérie d'une eau qui est faiblement colmatant. Dans ce dernier domaine la filtration frontale est aussi appréciée du fait que cette technologie est compacte et donc plus facilement stérilisable qu'un circuit qui fait intervenir plusieurs pompes [23].

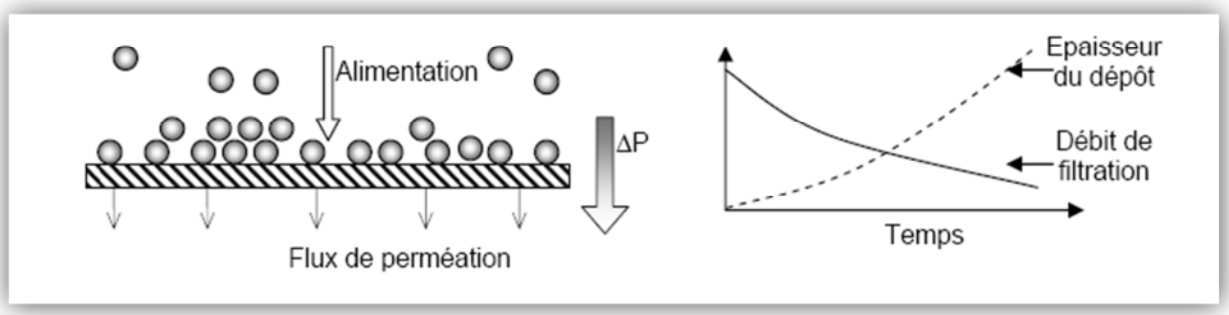


Figure II.1: Présentation de fonctionnement de la filtration frontale.

Source : BENJAMIN E., 2003

Durant la filtration membranaire, les solides s'accumulant sur la paroi membranaire causent une perte de charge qui entraine une augmentation de la pression à appliquer afin de maintenir le débit de perméat constant. La différence de pression entre l'amont (alimentation) et l'aval (perméat) de la membrane est appelée la pression transmembranaire (ΔP) qui est l'indicateur du colmatage d'une membrane lorsque cette dernière est opérée à flux de perméat constant.

La pression transmembranaire est déterminée par différence entre la pression P_1 en entrée du module s'appliquant sur la membrane et P_2 la pression en sortie du module :

$$\Delta P = P_1 - P_2 \qquad \text{(II.1)}$$

II.2.2. La filtration tangentielle :

En filtration tangentielle, le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane avec une vitesse moyenne V, imposant ainsi un gradient de cisaillement à la surface de la membrane qui limite ainsi l'accumulation de matière. En filtration tangentielle lors d'un changement de pression, les espèces arrivant près de la membrane ainsi que le dépôt (dans le cas où il y en a un) mettent un certain temps à se construire, durant cette phase, le flux décroît. Ensuite, un équilibre peut être atteint et le flux peut se stabiliser dans un état stationnaire. La filtration tangentielle est souvent utilisée en industrie car elle permet de travailler, une fois que le régime est établi (entre quelques minutes et quelques heures), avec un flux de perméation à peu près constant. La filtration tangentielle est par contre utilisée quasi systématiquement lorsque les fluides ont des taux de MES élevés [23].

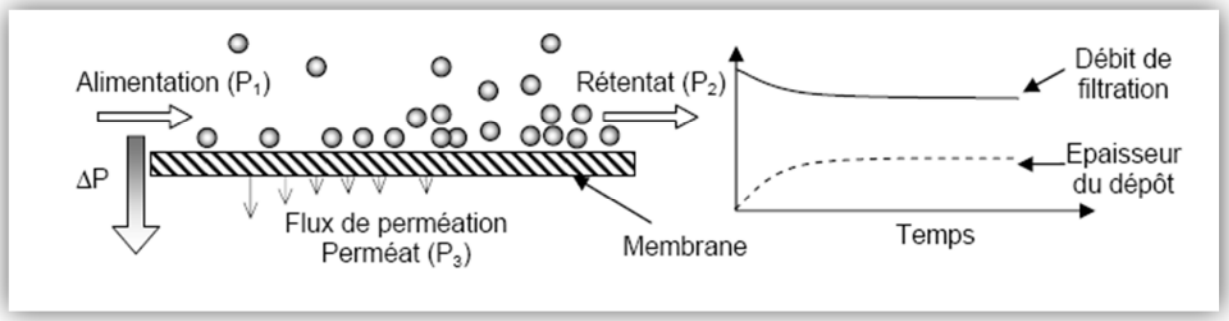


Figure II.2: Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle.

Source : BENJAMIN E., 2003

Dans le cas de la filtration tangentielle, la pression transmembranaire est calculée de la façon suivante :

$$\Delta P = [(p_1+p_2)/2]-p_3 \qquad \text{(II.2)}$$

ΔP : la pression transmembranaire

P_1 : la pression en entrée de module s'appliquant sur la membrane

P_2 : la pression en sortie de module (reliée à P_1 par la perte de charge dans le module)

P_3 : la pression dans le compartiment retentât souvent égale à la pression atmosphérique.

Il est possible avec ce type de fonctionnement, lorsque l'opération fonctionne à des faibles pressions d'éviter l'apparition d'un dépôt à la surface de la membrane cela correspond à des conditions de fonctionnement en dessous du flux critique [23].

II.3. Les différents systèmes membranaires :

Un système membranaire comprend :

- Un système de prétraitement ;
- Des pompes ;
- Un système d'agitation (pour les systèmes à membranes immergées) ;
- Un ensemble de module ;
- Un poste unitaire chimique de nettoyage ;
- Un post-traitement chimique au besoin.

Suivant la manière dont est appliquée la pression membranaire, deux types de systèmes peuvent être distingués :

II.3.1. Système de filtration membranaire sous pression :

Dans le cas d'un système de filtration sous pression, les modules sont installés dans des caissons pressurisés. Une pompe additionnelle peut servir à la recirculation du concentrât à l'entrée des modules.

L'ajustement du débit d'alimentation et l'ajustement d'une vanne, située en aval des modules, permettent de contrôler la pression transmembranaire et le taux de récupération global.

Les différents types de modules peuvent être mis en œuvre de cette façon. Plusieurs modules peuvent être placés en série dans un même caisson comme dans le cas des modules spiralés où un caisson peut contenir de un à six modules spiralés. Plusieurs caissons peuvent être utilisés en série et / ou en parallèle [1].

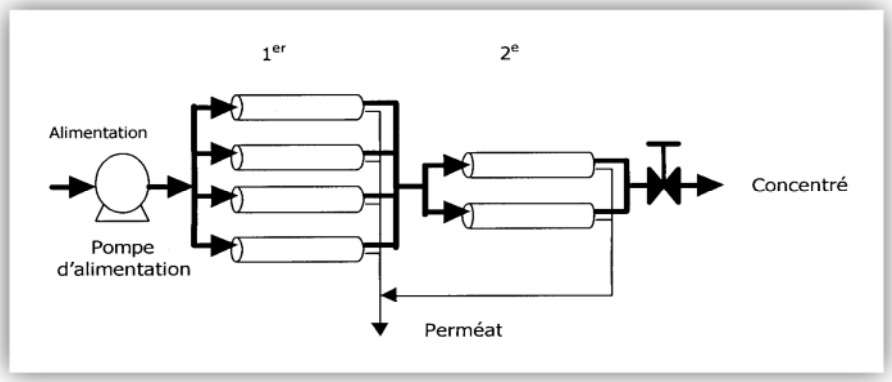


Schéma a : configuration multi-étagée.

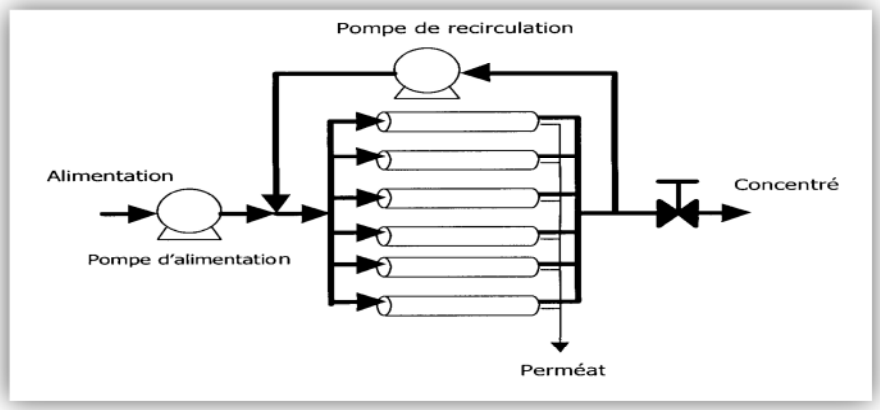


Schéma b : configuration avec recirculation.

Figures II.3: Systèmes de filtration membranaires sous pression

Source : BERLAND J., 2002

II.3.2. Système à membranes immergées :

Dans un système à membranes immergées, les membranes sont plongées dans un bassin alimenté avec l'eau à traiter. Le côté alimentation est soumis à une pression hydrostatique et un vide partiel est appliqué du côté perméat. L'agitation de l'eau autour des membranes (écoulement tangentiel libre) réduit l'accumulation de particules à la surface des fibres. La vitesse de soutirage du concentrât à même le bassin contrôle le taux de

récupération. Dans le domaine de l'eau potable, cette configuration n'existe actuellement qu'avec des membranes à fibre creuses [1].

A : alimentation

C : concentrât

P : perméat

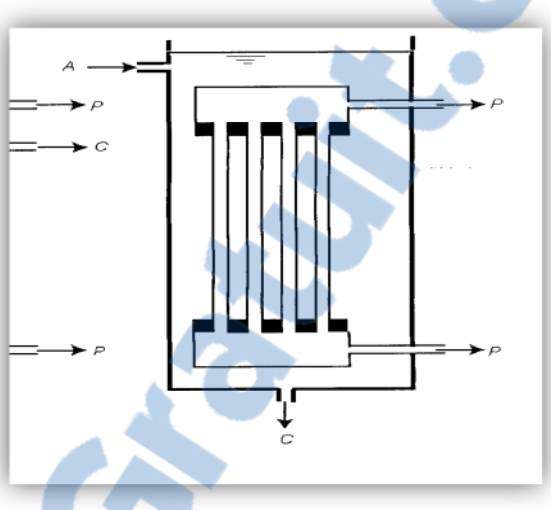


Figure II.4: Système à membranes immergées.

Source : BERLAND J., 2002

II.4. Mise en œuvre et condition de fonctionnement :

Le choix des conditions de fonctionnement (pression, vitesse, et 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 [24].

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 stockages.

Rapport-Gratuit.com

II.4.1. Choix du type de procédés :

Trois procédés existent :

- procédés discontinu ou batch ;
- procédés continu a recyclage ;
- procédés continu.

II.4.1.1. Procédé 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 recherchées [24].

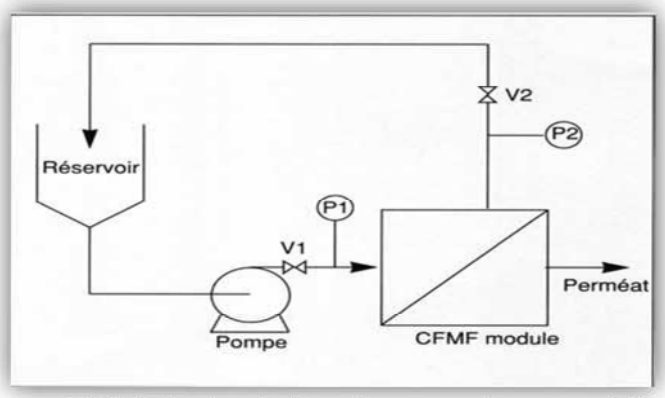


Figure II.5: Principe de fonctionnement par procédé discontinu.

Source : FABY J., 2002

II.4.1.2. Procédés continu à recyclage :

C'est le mode de fonctionnement le plus employé en production d'eau potable par microfiltration ou ultrafiltration en continu avec recirculation. La pompe d'alimentation envoie la solution à traiter dans une boucle, ou 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 concentrât. Ce système est souple, consomme moins d'énergie que le procédé discontinu, ce qui justifie l'emploi de ce système lorsque le débit est important, par contre les flux de perméat sont plus faibles [24].

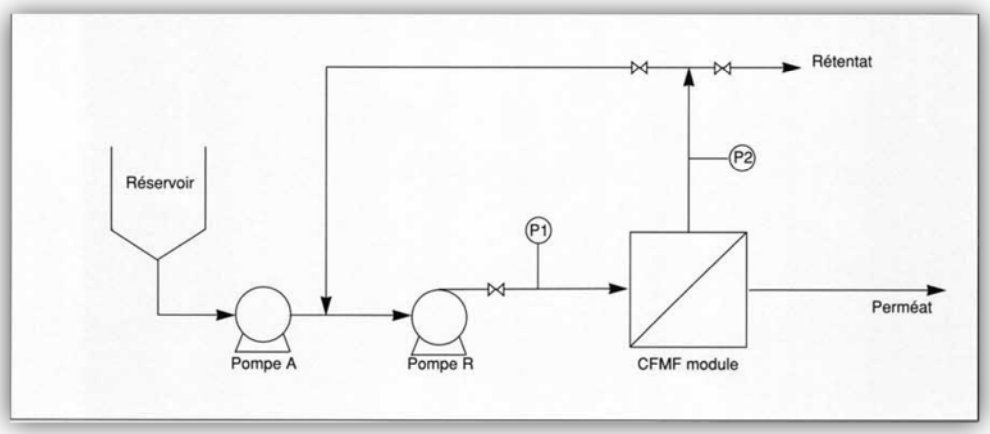


Figure II.6: Principe de fonctionnement en continu, 1 étage, a boucle de recirculation.

Source : FABY J., 2002

II.4.1.3. Procédés continu :

On peut aussi travailler en continu avec un montage type série-rejet ou série-production. 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 [24].

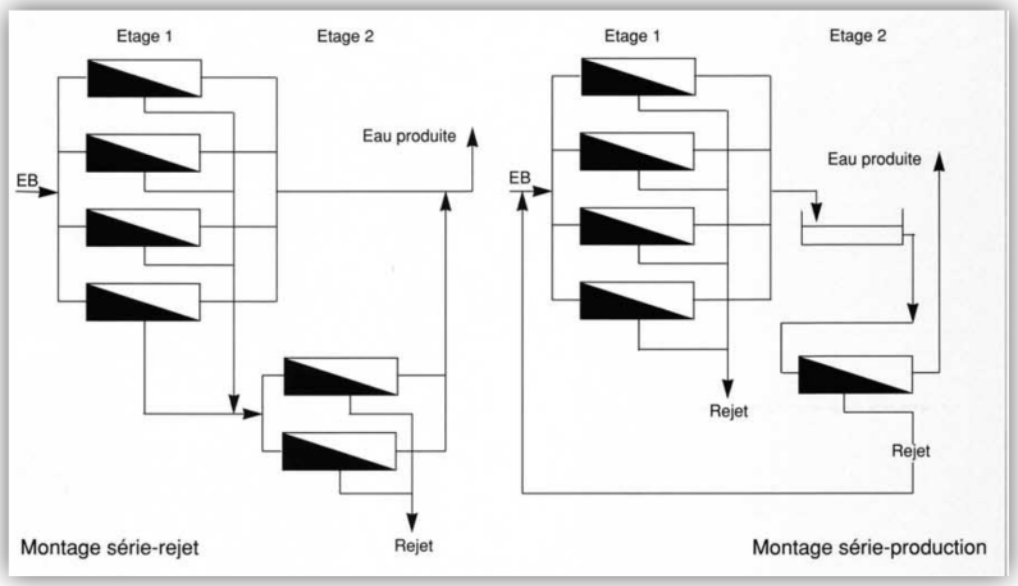


Figure II.7: Principe du montage série-rejet ou série-production.

Source : FABY J., 2002

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- **Montage en série-rejet :** ce type de montage est utilisé lorsque l'on veut obtenir un taux de conversion élevé sur une unité d'osmose inverse fonctionnant suivant un procédé continu. Dans ce cas, le rejet du premier étage alimente les modules du second étage et ainsi de suite. Dans le premier étage, on met un certain nombre de modules en parallèle, tandis que dans les autres étages le nombre de modules diminue graduellement au fur et à mesure que la concentration de la solution à traiter augmente. Ceci permet d'augmenter progressivement les vitesses de passage et de minimiser ainsi les phénomènes de polarisation [20].
- **Montage en série-production :** ce type de montage est utilisé quand la sélectivité de la membrane n'est pas suffisante pour effectuer une séparation donnée. On l'utilise par exemple très sauvant pour le dessalement d'eau de mer lorsque la salinité est élevée [20].

II.4.2. Choix de la pression de fonctionnement :

Le choix de la pression de fonctionnement est lié à des considérations d'abord techniques ensuite économiques :

II.4.2.1.Considérations techniques :

La pression de fonctionnement doit évidemment être supérieure à la pression osmotique. La sélectivité d'une membrane augmente avec la pression on pourra dans certains cas être amené à choisir la pression en fonction de la sélectivité souhaitée pour la membrane.

Pour une vitesse de circulation donnée, il existe une pression limite au-delà de laquelle le flux de perméat n'augmente plus par suite du phénomène de polarisation de concentration. Il est donc impératif de connaitre cette valeur limite, de manière à se situer nettement au-dessous.

Lorsque la pression est trop élevée se posent des problèmes de tenue mécanique des membranes, ainsi que des modules.

II.4.2.2.Considérations économiques :

Tout procédé de séparation, le choix de la pression de fonctionnement doit faire l'objet d'une optimisation entre le cout de la consommation énergétique et le cout lié à la surface de membranes. En effet, lorsque la pression augmente, la consommation d'énergie devient plus importante. Par contre, pour une production donnée, la surface de membrane nécessaire devient plus faible [20].

Tableau II.1: Pressions d'opération habituelles des procédés membranaires.

Procédé	MF	UF	NF	OI
ΔP_M minimale (k Pa)	20	50	500	500
ΔP_M maximale (k Pa)	100	500	1500	8000

Source : BOUCHARD C., 2005

II.4.3. Choix de la température :

Le choix de la température de fonctionnement est déterminé en fonction des considérations suivantes :

- ✓ Pour une pression donnée, le compactage d'une membrane est d'autant plus important que la température est élevée.
- ✓ le débit d'eau à travers la membrane augmente avec la température par suite de la diminution de la viscosité.

Il en résulte que l'on peut :

- ✓ soit augmenter la température en récupérant éventuellement des calories disponibles.
- ✓ soit diminuer la pression de fonctionnement si la température est trop élevée [20].

II.4.4. Choix du taux de conversion :

Le choix de la valeur de ce paramètre résulte d'un compromis entre des considérations économiques et des considérations techniques.

- ✓ du point de vue économique, on a en effet intérêt à adopter un taux de conversion le plus élevé possible, de manière à diminuer la quantité d'eau brute entrant dans l'installation, d'où des investissements plus faibles et une consommation d'énergie réduite.
- ✓ du point de vue technique, un taux de conversion élevé a pour conséquence une concentration du circuit saumure plus importante d'où des risques de précipitation des sels peu solubles et une augmentation de la salinité de l'eau produite [20].

II.5.Phénomène de transfert :

II.5.1.Loi de Darcy :

Lorsque de l'eau exempte de solutés ou de particules en suspension est filtrée à travers une membrane, on observe une variation linéaire du flux de perméat en fonction de la pression transmembranaire appliquée. Ce type de media filtrant peut donc être assimile à un milieu poreux idéal vérifiant, en régime laminaire, la loi de Darcy :

$$J=\Delta P / (\mu * R\ m) = (\alpha_P / \mu) * \Delta P \qquad \text{(II.3)}$$

J : le flux de perméat [$m.s^{-1}$]

μ : La viscosité dynamique de l'eau en [Pa.s]

R : la résistance hydraulique de la membrane [m^{-1}]

Par définition, le coefficient de proportionnalité α_P s'exprime en (m) et est appelé coefficient de perméabilité de la membrane. Il dépend des caractéristiques intrinsèques de celle-ci : épaisseur, nombre de pores par unité de surface, tailles de pores …

On définit alors la perméabilité hydraulique de la membrane L_P par le rapport du coefficient de perméabilité à la viscosité dynamique de l'eau.

$$L_P = \alpha_P / \mu \qquad \text{(II.4)}$$

L_P : la perméabilité hydraulique de la membrane [$m.Pa^{-1}.s^{-1}$].

La détermination de ce paramètre macroscopique par des mesures de flux à l'eau sous différentes pressions transmembranaires constitue l'une des méthodes de caractérisation Indispensable à l'évaluation des performances d'une membrane [25].

II.5.2. Polarisation de concentration :

La polarisation de concentration est un phénomène inhérent au sein de membranes sélectives. Il correspond à l'accumulation progressive de matière ou concentration en surface de matières retenues. Elle engendre généralement une augmentation de la pression osmotique et donc une diminution du flux de perméation lorsque la pression appliquée moyenne est constante et une diminution de la rétention observée [11].

L'importance du phénomène de polarisation de concentration entraîne une limitation du transfert du solvant qui est fonction de la pression appliquée. Il est ainsi possible de définir différentes zones lors de la filtration d'une suspension :

- Dans la première zone, la couche de polarisation de concentration est négligeable, le flux de perméation augmente proportionnellement à la pression transmembranaire appliquée.
- Dans la seconde, l'effet de la couche de polarisation se fait ressentir : le flux de perméation n'est plus proportionnel à la pression transmembranaire.
- Puis, dans la dernière, le flux est contrôlé par la couche de polarisation et l'apparition du dépôt des particules à la surface de la membrane. La valeur de flux maximale qui peut être atteinte lors d'une filtration s'appelle le flux limite, cette valeur correspond à un état où toute la surface de la membrane est colmatée.

La polarisation de concentration est un phénomène réversible et peut être contrôlée en ajustant la configuration et les conditions opératoires propres aux procèdes utilisées.

Si l'on trace l'évolution du flux de permeation en fonction de la pression transmembranaire, on peut alors définir 3 zones distinctes :

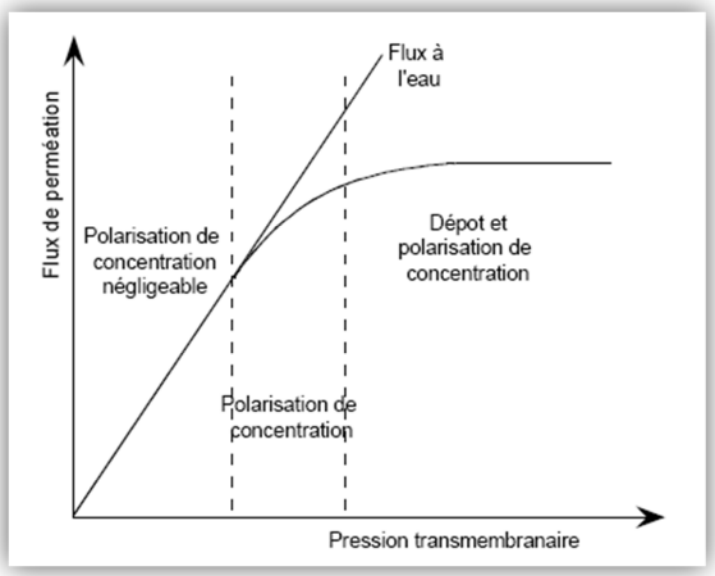


Figure II.8 : Evolution du flux à l'état stationnaire en fonction de la pression pour le flux à l'eau (droite) et la filtration d'une suspension (courbe). Présentation des différents mécanismes de colmatage.

Source : GUNTHER J., 2009

Dès lors qu'on applique une différence de pression entre l'amont et l'aval d'une membrane, la perméation du solvant provoque un gradient de concentration en amont. Une couche de polarisation de la concentration se forme, formée de solutés (ions mono et divalents) et de colloïdes accumulés dans la couche limite de concentration située entre la surface de la membrane et la masse du fluide à filtrer (cœur de l'écoulement). On dit que la membrane se polarise.

Cette couche résulte d'un équilibre entre l'augmentation de concentration le long de la membrane et la rétrodiffusion des espèces vers le cœur de l'écoulement.

Pour les espèces retenues par la membrane, la concentration à la surface de la membrane est donc plus élevée que dans le cœur du milieu. Plus le flux de perméation est élevé par rapport à la vitesse de rétrodiffusion, et plus la concentration à la surface de la membrane est élevée.

Ce phénomène est souvent à l'origine de la limitation du débit de perméat qui atteint une valeur limite [12].

On distingue 2 périodes dans le phénomène de polarisation de concentration :

II.5.2.1.Polarisation primaire-Modèle du film :

Le phénomène de polarisation primaire de concentration représente l'un des premiers mécanismes proposés pour expliquer la limitation du flux de filtration. Le profil de concentration est schématisé ci-dessous (Figure). Dans ce cas, il y a une formation d'une couche limite où la concentration des ions est supérieure à celle au sein de l'écoulement. Cette couche est appelée « couche de polarisation primaire ». Ce phénomène est réversible: cette couche disparaît avec le gradient de pression.

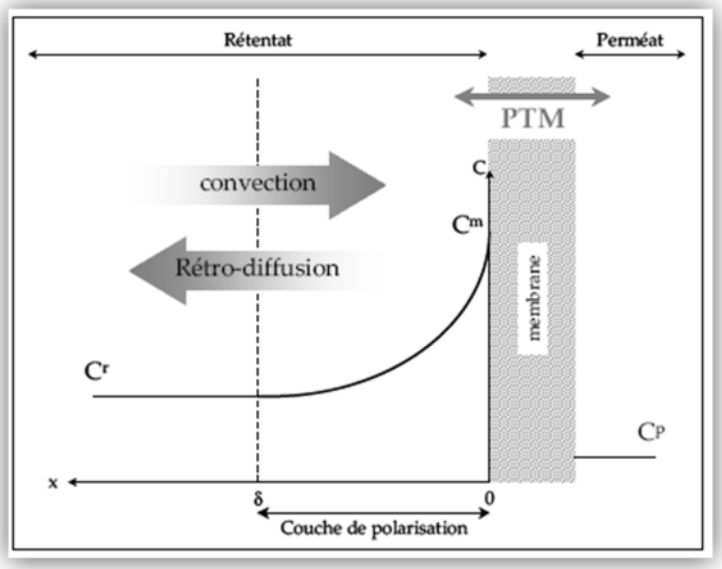


Figure II.9: Schématisation du phénomène de polarisation de concentration.

Source : LEBLEU N., 2007

Si on appelle C_m la concentration du soluté arrêté prés de la membrane et C_r la concentration moyenne du soluté dans la solution, le facteur de polarisation de concentration est défini par la relation :

$$Y=C_m/C_r \qquad (II.5)$$

II.5.2.2. Polarisation secondaire- Modèle du gel :

Si la différence de pression continue à augmenter, la concentration au voisinage de la membrane peut augmenter jusqu'à atteindre la limite de solubilité du composé macromoléculaire retenu. Ceci conduit à la formation d'un gel à la surface de la membrane, qui s'épaissit quand la pression augmente et oppose ainsi une résistance plus grande au transfert. La vitesse de perméation ne varie plus avec la pression. À l'inverse de la polarisation primaire, la formation du gel est permanente et les macromolécules ne rediffusent plus vers la solution [12].

II.5.3.Colmatage et nettoyage des membranes :

II.5.3.1.Définition du colmatage :

Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, se produisant à l'interface membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité.

Le colmatage est définie par le processus ayant pour résultat la perte de performance d'une membrane, il résulte du dépôt de MES, de substances colloïdales ou dissoutes a la surface externe de la membrane ou encore a l'intérieur des pores [8].

II.5.3.2.Type de colmatage :

Le colmatage peut être subdivise en trois mécanismes principaux, chacun d'eux se traduit par une résistance additionnelle a la filtration :

- ✓ Adsorption à l'intérieur des pores de membranes,
- ✓ Blocage des pores de la membrane,
- ✓ Dépôt a la surface membranaire et formation de gâteau de filtration.

Durant la filtration, ces mécanismes peuvent se produire simultanément, ces résistances s'ajoutent à la résistance de la membrane qui est fonction du diamètre moyen des pores de la membrane ainsi que la porosité de cette dernière [8].

II.5.3.2.1. Colmatage par adsorption :

Phénomène physico chimique du a 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.

II.5.3.2.2. Colmatage par dépôts de matières par convections :

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 croit en continu au cours du temps. Ceci a pour effet de réduire le flux à travers la membrane et augmenter progressivement la pression osmotique.

II.5.3.2.3. Colmatage par développement d'un bio film *:*

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 bio film. 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 et le développement rapide de ces micro-organismes sur leurs points d'ancrages.

Les principaux agents colmatant peuvent se répartir en trois principales catégories :

- ✓ Les composés minéraux parmi lesquels on compte les argiles et limons sous forme colloïdale, mais aussi des métaux (aluminium, fer, manganèse) et des sels dont les sulfates et carbonates de calcium,
- ✓ les composés biologiques : micro-organismes qu'ils soient morts, vivants ou sous forme de débris qui peuvent donner lieu au colmatage par effet stérique et à la formation de bio films,
- ✓ les composés organiques d'origine naturelle (acides humiques et fulviques, protéines) ou les polymères utilisés en coagulation floculation lorsqu'il y a lieu.

La description de ces phénomènes conduit bien souvent à des approches visant à dissocier et à identifier les divers mécanismes impliqués dans la diminution de flux [19].

- ***Encrassement des membranes :***

Lors des filtrations l'encrassement des membranes est inévitable, même avec un prétraitement suffisant. Le type et la quantité d'encrassement dépend de beaucoup de facteurs différents, tels que la qualité de l'eau alimentant le système, le type de membranes, le matériau de la membrane, la conception du procédé et son contrôle.
Les particules, le bio encrassement et le tartre sont les trois principaux types d'encrassement d'une membrane. Du fait de ces contaminants une charge de travail plus importante est nécessaire pour pouvoir garantir une capacité continue des membranes. Au bout d'un moment

la pression nécessaire est tellement élevée que le système n'est plus économiquement et techniquement valable: il faut nettoyer la membrane [7].

II.5.3.3.Principe de colmatage :

Le colmatage des membranes peut constituer un élément limitant important dans l'application des procédés membranaires à la production d'eau potable. D'abord, ce phénomène peut réduire de façon irréversible ou non la perméabilité des membranes. Cela implique donc une dépense d'énergie supplémentaire pour produire une quantité de perméat constante. Ensuite, plus le colmatage est important, plus il faudra accorder du temps et de l'argent aux lavages chimiques. La durée de vie des membranes s'en trouvera aussi réduite. Finalement, le colmatage peut aussi faire varier le pouvoir de séparation des membranes [18].

Il existe deux principales catégories de colmatage :

- Le colmatage microbiologique,
- Le colmatage abiotique.

Dans le cas d'un colmatage microbiologique, des microorganismes peuvent s'attacher, croître à la surface des membranes et produire suffisamment de substances polymériques extracellulaires pour faciliter le développement d'un bio film à la surface des membranes. En plus des microorganismes il y a de nombreux éléments colmatant présents dans les eaux naturelles telles que les particules, les colloïdes, les substances organiques dissoutes et les substances inorganiques peu solubles. Toutefois, les matières inorganiques sont considérées comme peu influentes sur le colmatage par rapport à la MON dans le cas des eaux douces de surface colorées et peu minéralisées. Ces agents colmatant sont associés au colmatage abiotique qui peut se manifester de deux façons : par le dépôt de matière à l'intérieur des pores de la membrane et par le dépôt de matière à sa surface. La Figure illustre différents scénarios de colmatage abiotique d'une membrane [18].

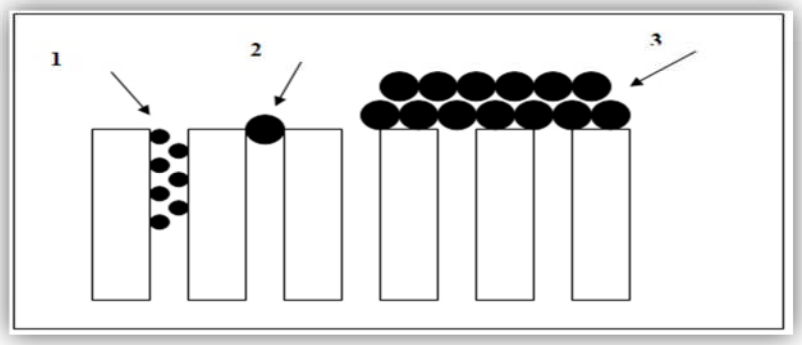


Figure II.10: Scénarios de colmatage d'une membrane.

Source : BOUCHARD C., 2005

Rapport-Gratuit.com

- Dans le scénario 1, il y a blocage partiel du pore par l'adsorption de fines particules à l'intérieur de celui-ci.
- Dans le scénario 2, il y a blocage total du pore par rétention stérique d'une plus grosse particule.
- dans le scénario 3, il y a formation d'un dépôt de particules à la surface de la membrane.

Ce dépôt est communément appelé « gâteau ». Le colmatage à l'intérieur ou à l'entrée des pores est un phénomène a priori très rapide tandis que le colmatage par formation d'un gâteau est un phénomène qui s'échelonne dans le temps [18].

II.5.3.4.Indicateurs de colmatages :

Les indicateurs de colmatage ont été développés dans l'objectif d'intégrer les facteurs susceptibles de jouer un rôle sur le colmatage (taille, nature, caractéristiques physico-chimiques des composants …) en un seul paramètre.

- **Silt Density Index (SDI) ou Fouling Index (FI):**

Le pouvoir colmatant des particules en suspension d'une eau s'exprime en termes de « Silt Density Index » (SDI).

IL s'agit d'un test adopté en 1995 par l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Le principe de ce test consiste à déterminer l'encrassement d'un filtre en acétate de cellulose de 47 mm de diamètre et présentant une taille de pores de 0,45 µm après 15 minutes de filtration frontale de la suspension à traiter, et consiste aussi à mesurer la baisse de vitesse de perméation associée au colmatage. La pression est maintenue constante à 2,1 bars.

$$SDI_{15} = [(1-(t_1/t_2))/15]*100 \qquad (II.6)$$

t_1 : est le temps nécessaire pour filtrer les premiers 500 ml de solution

t_2 : le temps nécessaire pour filtrer 500 ml de solution à compter de 15 min du début de la filtration.

Un indice de colmatage supérieur à 5 dénotera le caractère particulièrement colmatant de l'effluent à traiter, Les manufacturiers de modules spiralés recommandent de ne pas dépasser un SDI de 5%/min [26].

Tableau II.2: Valeurs repère du SDI.

SDI < 3	Peu ou pas de colmatage
3<SDI < 5	Colmatage classique
SDI >5	Colmatage excessif

Source : YOLAINE B., 2005

II.5.3.5.Paramètres influençant le colmatage:

Il est important de bien connaître les facteurs influençant le colmatage afin de développer des stratégies visant à minimiser ce phénomène et ainsi réduire les coûts d'opération et augmenter la durée de vie des membranes. Ces facteurs sont :

- Paramètres relatifs à la membrane et ces caractéristiques: Matériau membranaire, seuil de coupure et mode de filtration ;
- Paramètres relatifs à la Chimie de la solution, pH et force ionique, et les caractéristiques de l'eau à traiter ;
- influence du prétraitement ;
- Les conditions d'opération du procédé membranaire.

Ces conditions sont la vitesse de perméation, le taux de récupération global, la vitesse d'écoulement tangentielle et la pression d'opération. La vitesse d'écoulement tangentielle est simplement le débit d'écoulement tangentiel divisé par la section du canal d'écoulement tangentiel [8], [18].

II.5.3.6.Prévention du colmatage :

La stratégie générale de prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes :

- Pré-filtration ;
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;
- Ajustement de pH (acidification) pour déplacer les équilibres de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de fer, de manganèse, de calcium, de baryum…) ;
- Ajout d'un agent antitartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes ;
- Coagulation de la Matière Organique Naturelle. En effet, l'effet colmatant des flocs est, a priori, moins fort que celui des colloïdes ;
- Enlèvement du fer (Fe^{2+}) qui pourrait précipiter [18].

II.5.3.7.Types de nettoyages :

Le colmatage des membranes implique qu'il est nécessaire d'effectuer des rinçages et des lavages de façon périodique afin d'enlever la matière qui s'est déposée à la surface des membranes causant ainsi une baisse de leur perméabilité.

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes.

Les différentes techniques de nettoyage sont :

- Le rinçage hydrodynamique ;

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Le rétro lavage à l'eau ou à l'air. Les fréquences des rétro lavages varient de 15 à 60 minutes tandis que leurs durées varient que 30 s à 3 minutes ;
- Le nettoyage mécanique ;
- Un nettoyage chimique ;
- Le nettoyage enzymatique [2].

II.5.3.7.1.Le nettoyage mécanique :

Le principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques, d'origines hydrodynamiques. La procédure généralement utilisée est le rétro lavage : une partie du perméat est retourné a contre courants a travers la membrane. Une telle pratique nécessite une membrane qui soit en mesure de supporter physiquement un gradient de pression inversé. Enfin, par injection continue ou occasionnelle d'air (ou de gaz) a travers la membrane. La matière déposer en surface peut éventuellement se décoller.

Très efficace dans le cas de dépôt faiblement liées 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 a réduire leur fréquence [2].

II.5.3.7.2.Le nettoyage chimique :

Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage. La durée d'une séquence de nettoyage peut aller de 30 a 60 min. les nettoyages sont généralement effectués a la température la plus élevé que la membrane la plus supporter sans dégradation. Les principales étapes de nettoyage sont 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 a haute vitesse ainsi que l'effet solvant de l'eau.
- le premier nettoyage a base d'acide, a pour objectif de solubiliser les couches d'entartrage contenant calcium, tartre et minéraux, et ainsi d'éviter la formation d'hydroxyde insoluble donc très difficile 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 évidement du contexte d'utilisation, La connaissance de la nature du matériau membranaire et de son environnement conduit à

exclure certain réactif et impose la limite en pH, en température, en temps de contacts et en concentration [2].

Suivant la nature des éléments colmatant est celle des matériaux composant la membrane, différent produits de nettoyage peuvent être utilisés :

- ✓ **produits alcalin :** soude et potasse saponifient les grasses solubilisent les protéines ;
- ✓ **produits acide :** il participants a 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.
- ✓ **produit 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 [26].

Le Tableau suivante présente les différents produits de nettoyage que l'on peut rencontrer :

Tableau II.3 : Produits utilisés lors de nettoyages chimiques.

Origine	produits	action	Inconvénient
Alcalins	Hydroxyde (sodium et potassium) Poly phosphates.	• Saponification des graisses et solubilisation des protéines. • Dispersant, émulsifiant des graisses, agent d'hydrolyse des protéines, solubilisant des carbonates.	•pH > 11 dans le cas d'alcalins chlorés pour éviter la corrosion. •Elément nutritif des microorganismes.
Acides	Acide nitrique, phosphorique, hydroxyacétique, gluconique, citrique, lactique, sulfamique,...	• Dissolution de précipités de sels minéraux.	•Efficacité limitée sur les dépôts de nature organique.

Tensioactifs	Cationiques. Anioniques et non ioniques.	• Peu d'action. • Améliorent l'efficacité du nettoyage et réduisent le temps de rinçage.	•Inopérants à pH acides. •Adsorption sur certains matériaux Membranaires.
Complexant	Ortho phosphate, poly sulfate, Acide Ethylène diaminotétraacétique (EDTA), sels de sodium	• Réaction avec les ions multivalents (calcium, magnésium,...) qui conduit au déplacement des équilibres de précipitation	•N'ont pas de conséquence sur la dureté de l'eau

Source : (YOLAINE.B, 2005)

L'agent nettoyant se doit d'être efficace pour éliminer le colmatage tout en étant inoffensif vis-à-vis des membranes et du procédé. C'est pourquoi le choix des agents de nettoyage s'effectue en fonction de la nature des éléments colmatant – lorsqu'ils sont identifiés - et de la stabilité chimique du matériau membranaire [26].

II.5.3.7.3.Le 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 a 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 long que les traitements chimiques et sont aussi plus couteux. Pour ces raison, ils sont peut souvent adoptés [2].

La solution 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.

II.5.3.8.Eau utilisée pour le nettoyage :

La qualité de l'eau utiliser pour le nettoyage des membranes est déterminante. 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) entre 1-5 ;
- ✓ dureté totale entre 1 à 5 milliéquivalent/l ;
- ✓ teneur en silicate 1-5mg/l ;
- ✓ teneur en fer 0.1-0.5 mg/l ;
- ✓ teneur en manganèse 0.02-0.2 mg/l [2].

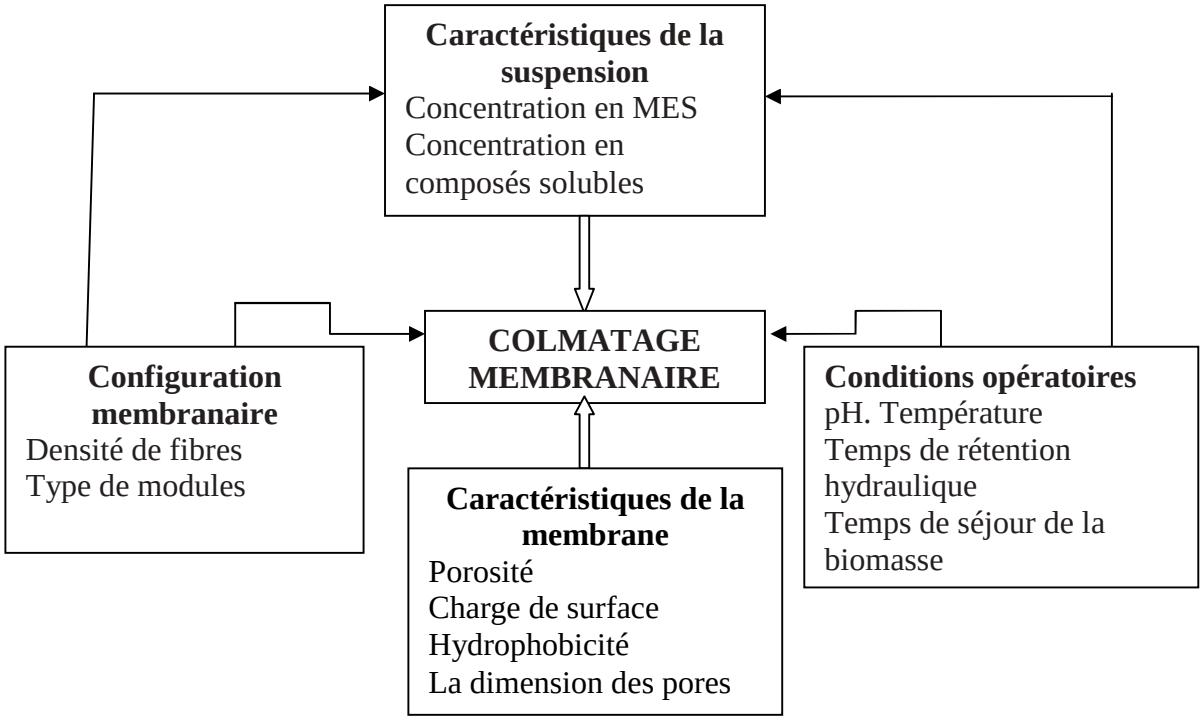


Figure II.11: Schéma représente les Facteurs influençant le colmatage membranaire.

Source : ESPINASSE B., 2003

II.6.Critères de conception des procédés membranaires:

II.6.1.Bases de conception :

La conception d'un système membranaire consiste à déterminer les paramètres suivants :

- Type de membrane;
- Type de module;
- Modes d'opération;
- Nombre de trains et d'unités de traitement dans chaque train (chaque train est composé d'une ou plusieurs unités qui traitent l'eau de façon complète et une usine de production d'eau potable peut comporter deux ou plusieurs trains en parallèle);
- Nombre de modules et agencement des modules à l'intérieur d'une unité de traitement;
- Nombre, type(s) et caractéristiques des pompes;
- Conditions d'opération des modules (pressions, débits, taux de récupération; fréquence, durée et conditions des rétro lavages quand cela s'applique);

- Type, caractéristiques et conditions d'opération du prétraitement;
- Procédures de lavage des membranes;
- Procédure de vérification de l'intégrité des membranes;
- Procédures de santé et sécurité;
- Estimation de la consommation d'énergie et de produits chimiques.

De façon classique, ces paramètres sont déterminés en fonction des caractéristiques de l'eau brute, des objectifs de traitement (quantité et qualité), des conditions environnementales, des contraintes techniques inhérentes à la technologie des membranes au moment de la conception et des ressources techniques et humaines disponibles [15].

II.6.2.Données générales requises pour la conception :

Les données qui jouent un rôle particulier dans la conception d'un système membranaire sont présentées ci-dessous :

II.6.2.1.Qualité de l'eau brute :

- Potentiel colmatant des particules en suspension : le pouvoir colmatant des particules en suspension est souvent évalué en termes de SDI (Silt Densité Index); les résultats sont exprimés en %/min; la turbidité et les comptes de particules renseignent aussi sur le potentiel colmatant de l'eau brute;
- Variation de la température de l'eau : cela affecte directement et de façon significative la perméabilité des membranes;
- Alcalinité : ce paramètre est particulièrement important quand il y a coagulation avant filtration sur membrane;
- Conductivité : ce paramètre permet d'estimer la pression osmotique et donc la pression minimale à appliquer [15].

II.6.2.2.Conditions environnementales :

- Disponibilité de la ressource en termes de quantité : une faible disponibilité impose une récupération maximum;
- Conditions de rejet : les rejets peuvent être critiques.

II.6.2.3.Relation entre les conditions d'opération et le colmatage des membranes :

Les conditions d'opération peuvent influencer grandement les risques de colmatage des membranes. Les conditions d'opération doivent être établies en fonction de la durée de vie ciblée des membranes. Elles vont également influencer le dimensionnement des ouvrages [15].

II.6.2.4.Ressources humaines et techniques :

Le nombre d'opérateurs spécialisés et leurs connaissances techniques vont influencer le niveau d'automatisation et d'autonomie des systèmes requis [15].

II.6.3. Règles de conception :

La conception est un processus itératif car il n'est pas évident, à moins de posséder suffisamment de données sur des cas très similaires, de déterminer d'emblée quelle est la meilleure conception du point de vue économique. En premier lieu, les types de procédé et de membrane qui s'appliquent sont identifiés en fonction des objectifs de traitement. Ensuite, tout dépendant des moyens et du temps dont on dispose, plusieurs choix de modules, de configurations et de conditions d'opération peuvent être comparés en vue de trouver la solution la plus économique qui permet d'atteindre les objectifs que l'on s'est fixés. Afin d'assister le concepteur, plusieurs règles qui permettent de limiter les degrés de liberté dans la conception [15].

II.6.3.1. Choix du type de membrane :

L'objectif de séparation le plus contraignant devrait permettre de faire un tri au niveau des procédés membranaires.

Si la source de d'eau brute est une eau de surface, la membrane doit être choisie en fonction de son aptitude à enlever les virus et sur le niveau d'abattement du COT.

Si la source d'eau brute est une eau souterraine, la membrane doit être choisie en fonction de l'aptitude à enlever les sels donc en eau souterraine, les membranes se distinguent essentiellement par leur taux de rétention des sels.

Le matériau membranaire conditionne certaines limites de fonctionnement (pH, concentration en désinfectant, etc.). Il ne faut pas oublier qu'une filtration membranaire peut être combinée avec un autre procédé pour augmenter le taux de séparation [15].

II.6.3.2. Choix du type de module :

Pour un procédé et une membrane donnés, il peut exister plusieurs types de modules disponibles.

Le choix du module va orienter grandement la conception. Comme cela a déjà été dit, il n'est pas facile d'identifier d'emblée quel type de module est le plus avantageux.

Les critères de choix des modules peuvent porter sur :

- Leur compacité ;
- La taille de leurs canaux d'écoulement tangentiel ;

- Le dispositif qui assure l'étanchéité entre les compartiments d'eau à traiter et de perméat (lié à l'intégrité des systèmes) ;
- Les possibilités de mode d'opération
- Leur plus ou moins grande facilité de montage et de démontage [15].

II.6.3.3. Choix des conditions d'exploitation :

Les conditions d'exploitation sont :

- La gamme de pressions transmembranaires ;
- La gamme des vitesses de perméation ;
- La gamme de taux de récupération par module (taux de récupération d'un module ;
- La gamme de vitesse / débit d'écoulement tangentiel (systèmes sous pression) ou le taux d'agitation (membranes immergées) [1].

Il s'agit bien de gammes car tous les modules dans un système ne fonctionnent pas dans les mêmes conditions d'opération, en particulier dans les systèmes où un grand nombre de modules sont opérés en série sans recirculation.

Deux cas peuvent se présenter :

- **1ème cas :** les taux de séparation des substances d'intérêt ne sont pas, ou peu, dépendants des conditions d'opération; les conditions d'opération devraient être fixées en fonction du colmatage des membranes;
- **2ème cas :** les taux de séparation des substances d'intérêt sont dépendants des conditions d'opération; les conditions d'opération devraient être fixées en fonction du colmatage des membranes et en fonction des objectifs de séparation.

Les relations entre les conditions d'opération et les taux de rétention sont déterminées expérimentalement. Il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle universel reconnu qui permette de l'établir autrement. Dans certains cas, il est possible d'établir ces relations à l'échelle de laboratoire et ensuite de les extrapoler à plus grande échelle. Dans d'autres cas, il est nécessaire de réaliser des essais pilotes. Dans certains cas, ces données sont fournies par les manufacturiers de membranes.

Les conditions d'opération sont déterminantes pour les vitesses de colmatage des membranes car elles déterminent les concentrations au voisinage de la surface des membranes. Grossièrement, on peut choisir entre :

- ✓ opérer dans des conditions plus difficiles (vitesse de perméation et/ou taux de récupération par module plus élevés) et faire des lavages plus fréquents. Cette

approche permet a priori de réduire la surface de membrane, et donc les coûts de construction, mais entraîne des pressions transmembranaires plus élevées, ce qui augmente les coûts d'opération et peut limiter la durée de vie des membranes;

- ✓ mettre l'accent sur la prévention du colmatage en opérant dans des conditions plus faciles (vitesse de perméation et/ou taux de récupération par module plus faibles et/ou rétro lavages plus fréquents). Cette approche permet de réduire la fréquence des lavages chimiques, et éventuellement augmente la durée de vie des membranes, mais peut requérir plus de surface de membrane et/ou d'énergie de circulation [1].

Les ordres de grandeur des vitesses de perméation et des pressions d'opération pour les différents types de procédés sont présentés au tableau suivant. Ces valeurs correspondent aux pratiques actuelles en matière de filtration sur membrane dans le domaine de l'eau potable.

Tableau II.4 : Ordres de grandeur des conditions d'opération.

	Vitesse de perméation ($l/h\ m^2$)	**Pression transmembranaire (K Pa)**
OI	10 à 15	500 à 6000
NF	15 à 35	400 à 1400
UF	20 à 100	100 à 700
MF	40 à 150	30 à 100

Source : Bouchard C., Kouadio P., 2000

II.6.3.4. Configuration des unités de traitement :

Un système est généralement divisé en plusieurs unités. L'agencement des modules dans une unité doit permettre d'atteindre les objectifs de taux global de récupération, de quantité et de qualité d'eau à produire tout en respectant les limites d'opération. Dans la pratique, deux approches sont utilisées pour augmenter le taux global de récupération : augmenter le nombre de modules en série et/ou faire une boucle de recirculation.

Dans une série de modules, la pression diminue, la concentration augmente et le débit d'écoulement tangentiel diminue d'amont en aval. La perte de charge due à l'écoulement tangentiel limite donc le nombre de modules en série. L'ajout d'une pompe de surpression entre 2 étages peut permettre de pallier à ce problème.

Lorsqu'il y a recirculation, le débit et la concentration (espèces retenues) sont augmentés à l'entrée des modules, ce qui d'un côté diminue l'accumulation de matière à la surface des membranes (augmentation de l'écoulement tangentiel) et de l'autre à l'effet inverse

Rapport-Gratuit.com

(augmentation de concentration à l'entrée). Lorsqu'il y a recirculation, la consommation d'énergie de circulation tangentielle est augmentée.

Un bilan global des avantages et des inconvénients (colmatage, consommation d'énergie, pompes) des deux approches, ou d'une combinaison des deux approches, permet d'établir la solution la plus avantageuse. Dans tous les cas, le nombre de caissons en parallèle est augmenté pour accroître la capacité de production de l'unité de traitement sans que cela affecte le taux global de récupération.

Dans une unité de traitement avec modules spiralés sans recirculation (membranes d'OI ou de NF), l'arrangement multi-étages est couramment utilisé. Le nombre de caissons en parallèle dans chaque étage va en diminuant d'amont en aval. Pour des taux de récupération inférieurs à 50%, de 50 à 75% et supérieur à 75%, recommande respectivement1, 2 et 3 étages de concentration (caissons de 6 membranes en série). Le nombre de caissons en parallèle dans un étage correspond généralement à la moitié du nombre de caissons de l'étage précédent [15].

II.6.3.5. Types de produits chimiques utilisés :

Les produits chimiques qui peuvent être ajoutés en continu sont :

- ✓ Agent antitartre (prétraitement);
- ✓ Coagulant (prétraitement);
- ✓ Acide (prétraitement);
- ✓ Alcalin (pré- ou post-traitement);
- ✓ Désinfectant (post-traitement).

Comme en filtration granulaire, il pourrait y avoir une pré-désinfection avant la filtration sur membranes pour limiter le colmatage biologique des membranes et maintenir l'état sanitaire du système. Cependant, cela pourrait entraîner la formation d’une quantité excessive de sous-produits de désinfection. Des désinfections périodiques du système sont une alternative qui évite ce problème [15].

Les solutions qui peuvent être utilisées pour le lavage des membranes contiennent généralement un ou plusieurs des produits suivants :

- ✓ Acide (dissolution des sels);
- ✓ Base (dépôt organique);
- ✓ Désinfectant;
- ✓ Détergent (dépôt organique);
- ✓ Enzymes.

II.6.4. Redondance relative aux membranes :

Pour les installations de grande capacité qui comprennent déjà plusieurs unités de traitement, le principe de redondance peut facilement être appliqué sans augmentation importante de coûts.

Par contre, pour les petites installations, certaines dérogations sont possibles pour réduire les coûts de construction. Il revient au concepteur de justifier ces dérogations en vérifiant si elles ont une implication majeure sur la qualité de l'eau distribuée [25].

Une installation de traitement par membrane doit être pourvue d'au moins deux unités de base de filtration pour un fonctionnement continu et sans interruption de service lors des travaux d'entretien ou de remplacement des membranes. Les unités de filtration par membrane doivent pouvoir traiter le débit journalier maximum de conception lorsqu'une unité est mise hors service et chaque unité de filtration par membrane doit pouvoir fonctionner indépendamment.

Dans le cas d'un système de membrane de fibres creuses, l'unité de base est un module comprenant plusieurs milliers de fibres creuses. Le module de fibres creuses peut être inséré dans un caisson s'il est pressurisé ou peut être mis dans un bassin s'il fonctionne par vacuum.

Dans le cas des membranes tubulaires, les modules peuvent avoir quelques mètres de longueur (2 ou 4 mètres, par exemple) et un caisson peut contenir quelques modules. Afin de simplifier le texte, l'unité de base d'un système de filtration par membrane sera donc appelée ici un caisson. Un train de filtration membranaire est un assemblage qui peut comprendre plusieurs caissons en parallèle. Chaque train de filtration membranaire peut comporter un ou plusieurs étages en série (cette configuration en étage peut être utilisée pour favoriser un meilleur taux de récupération) [25].

Dans le cas des petites installations, ayant un débit de production de moins de 1 000 m^3/d, par exemple, le nombre de caissons sera petit. En fonction de la configuration retenue, ce petit nombre de caissons pourra être installé sur un seul train. Par contre, dans le cas des installations plus importantes, le nombre de trains augmentera afin de faciliter l'exploitation et la gestion de l'usine.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau II.5: Redondance relative aux systèmes de traitement par membranes.

nombre de caissons requis pour traiter le débit de conception	nombre de caissons supplémentaires requis
De 1 à 10 caissons	1 caisson de plus
11 caissons et plus	Au moins 10 % de caissons de plus ou un train additionnel(le plus petit des deux)

Source : Guide de conception des installations de production d'eau potable, 2006

Cette redondance est requise sur chacun des trains de filtration membranaire et à chacun des étages. En ce qui concerne les très grandes installations comprenant plusieurs trains, la redondance peut être appliquée sur chaque train (et chaque étage) ou en ajoutant un train supplémentaire [15].

II.6.5. Autres éléments de conception :

II.6.5.1. Chaînes de traitement :

Il existe de nombreuses façons d'utiliser des membranes afin de produire de l'eau potable. Les membranes peuvent constituer le cœur du traitement ou encore servir d'étape d'affinage à un traitement plus conventionnel. Compte tenu du nombre élevé de possibilités, À chaque fois, il est indiqué si l'application décrite s'utilise plus couramment pour le traitement des eaux de surface ou celui des eaux souterraines.

Une chaîne de traitement faisant appel à la filtration sur membranes comprend généralement un prétraitement et un post-traitement. Il est important de comprendre que ce prétraitement et ce post-traitement dépendent du type de membrane, du type de module mais aussi des caractéristiques de l'eau à traiter qui peuvent varier d'un endroit à un autre, le prétraitement est un des principaux moyens pour prévenir le colmatage des membranes et l'obstruction des canaux d'écoulement tangentiel. Par contre, un prétraitement très poussé, même si cela permet de réduire de façon très significative le colmatage, n'est pas nécessairement la meilleure solution du point de vue économique. Il revient donc au concepteur de trouver le meilleur compromis [15].

II.6.5.2. Limites d'utilisation :

Les manufacturiers de membranes doivent normalement spécifier les limites d'opération pour l'opération normale et pour le lavage en termes de :

- pH;
- Concentration en chlore résiduel libre ou en autre désinfectant/oxydant;

- Température;
- Pression.

De manière générale, les membranes inorganiques sont plus résistantes chimiquement et thermiquement que les membranes organiques. Les membranes en acétate de cellulose sont moins résistantes en ce qui a trait au pH et à la température et plus facilement biodégradables que les autres membranes polymériques, mais elles tolèrent des concentrations plus importantes de chlore résiduel libre que les membranes en polyamide. La résistance en pression des membranes polymériques diminue à mesure que la température augmente [15].

II.6.5.3. Rejets du procédé :

Les chaînes de traitement utilisant des membranes produisent différents types de rejets : concentré, eaux de rinçage, eaux de lavage.

Comme il est expliqué dans le chapitre 14, les techniques de disposition de ces rejets varient en fonction de leur nature et de leur volume ainsi que des conditions environnementales. Le concentré est rejeté en continu pendant la production. Rappelons que le débit et la composition du concentré sont liés au taux global de récupération et au taux global de séparation. Généralement, comme le taux de récupération est supérieur ou égal à 75%, cela signifie que le débit de concentré correspond au maximum à 25% du débit d'alimentation. Les eaux de rinçage et de lavage sont générées de manière discontinue.

Lorsque les chaînes de traitement utilisant les membranes ne comportent aucun ajout de produit chimique dans l'eau brute, les rejets des membranes ne constituent en réalité qu’un concentré des substances présentes dans l’eau brute. Sous réserve de rencontrer les objectifs environnementaux de rejet, les concentrés pourraient être rejetés directement dans le milieu récepteur [15].

II.7.Dimensionnement des installations a membrane :

Un juste dimensionnement du système de filtration par membrane permet d’optimiser son exploitation, par diminution des risques de colmatage rapide et donc par augmentation des cycles entre deux nettoyages chimiques, en plus de son influence sur le compactage naturel des membranes.

Deux paramètres ont une importance particulière, pour atteindre ce but :

- le choix du flux transmembranaire. Plus cette vitesse sera faible moins le colmatage sera rapide.

- un débit d'alimentation permettant d'obtenir sur la totalité des éléments d'un corps de pression, une vitesse tangentielle permettant de limiter l'épaisseur de la couche de polarisation par effet de cisaillement.

Après avoir choisi le modèle et le nombre d'éléments à mettre en œuvre, pour obtenir la production désirée en se basant sur le flux désiré, ainsi que le facteur de conversion, les logiciels de dimensionnement permettent de contrôler si le débit d'alimentation est suffisant pour limiter la couche de polarisation.

Si ce n'est pas le cas il faut augmenter le débit d'alimentation et donc diminuer le facteur de conversion pour une production donnée, tout en respectant :

- Le débit d'alimentation maximum fixé par le fabricant ;
- le facteur de conversion maximum par élément ;
- le débit maximum de perméat de l'élément de tête.

Plus on s'éloignera des valeurs recommandées, plus la qualité de l'eau d'alimentation devra être poussée.

Les prétraitements classiques ne peuvent pas toujours permettre d'atteindre les valeurs requises, c'est pour cette raison qu'il faut alors envisager des prétraitements plus performants, comme l'ultrafiltration ou la microfiltration.

Il y a donc des compromis technico-économiques à faire lors de la conception, entre les paramètres de choix et de dimensionnement des unités [31].

II.8.Consommation d'énergie des procédés membranaires:

Les procédés membranaires sont des techniques de séparation peu consommatrices d'énergie : de1 à quelques dizaines de kWh/m³ de produit traité, suivant la taille des composés qui doivent être séparés. Leur consommation énergétique est faible (quelques kWh/m³ de perméat) par rapport à des procédés thermiques (de 100 à 900 kWh/m³ de produit traité pour un évaporateur, avec ou sans effets multiples) [27].

La consommation d'énergie est toujours supérieure au minimum théorique et cela pour plusieurs raisons :

- Si l'on veut que le flux d'eau à travers la membrane ait une valeur acceptable, il est nécessaire que la pression de fonctionnement soit nettement supérieure aux conditions de réversibilité.
- De manière à minimiser les phénomènes de polarisation, les vitesses de passage dans les modules doivent être suffisamment élevées.

- Dans le cas ou aucun système de récupération d'énergie n'est prévu, le circuit de concentration est détendu a travers une vanne, d'où perte de charge.

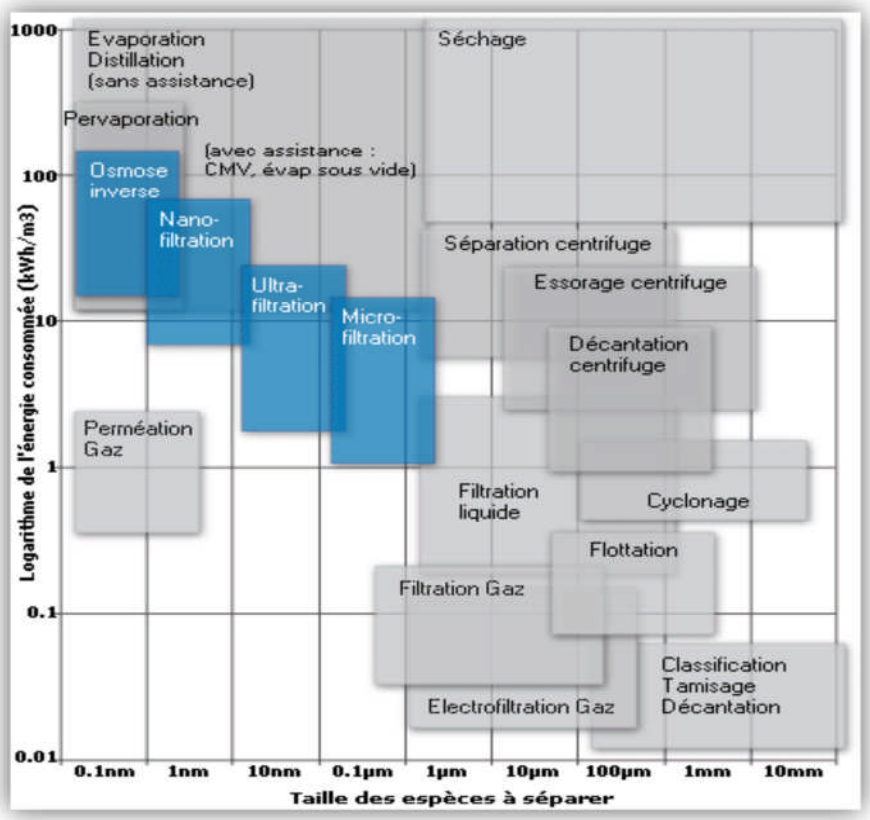


Figure II.12: Consommation d'énergie relative des procédés de séparation.

Source : DAUFIN G., 2006

II.9.Les facteurs influençant la performance des membranes :

La performance des membranes peut évoluer au cours du temps, notamment à cause de son colmatage. De plus, plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité de filtrat qu'une membrane peut extraire de la sève d'érable par unité de temps (débit de filtration) :

II.9.1.La concentration du concentré :

Plus le concentré contient d'éléments en solution, plus la pression qui s'oppose au passage de l'eau au travers la membrane sera forte et, pour une même pression d'opération, moins le taux de filtration sera élevé ;

II.9.2.La pression d'opération :

Cette pression s'oppose à la pression créée par les éléments dissous dans le concentré de sève. Pour une concentration donnée, plus la pression d'opération est élevée, plus le taux de filtration sera élevé. La pression d'opération est limitée par la résistance mécanique du module. Cependant, fonctionner de façon permanente près de la limite supérieure prévue par

le fabricant, et à plus forte raison, la dépasser, provoque un colmatage ou une compaction de la membrane [28].

II.9.3.La température d'opération :

Plusieurs propriétés physico-chimiques de la solution et de la membrane elle-même sont influencées par la température de la sève d'érable. Plus la température de la sève est élevée, plus le taux de filtration sera important. Cependant, étant donné que les composantes de la membrane sont faites en plastique, une température plus élevée que celle recommandée par le fabricant risque de diminuer ses caractéristiques fonctionnelles et sa résistance mécanique [28], [29].

II.9.4.La charge microbienne :

Les divers microorganismes se développant dans la sève d'érable sont entraînés avec le concentré, ce qui augmente leur concentration dans celui-ci. Ils se fixent sur la surface de la membrane et se multiplient formant ainsi un biofilm qui obstrue tout d'abord le passage du filtrat à travers la membrane et par la suite, la circulation du concentré [28], [29].

II.10.Avantages et inconvénients des procédés membranaires :

Dans la plupart des cas, les techniques à membranes se trouvent en concurrence, pour une application donnée, avec des procédés plus conventionnels. Il nous a donc semblé intéressant de résumer, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients.

II.10.1. Avantages des techniques à membranes :

Les avantages de ces procédés, comparés aux techniques conventionnelles, sont nombreux :

- ✓ Elles opèrent à température ambiante en général, d'où l'absence de dénaturation des molécules fragiles telles que les protéines et le respect des qualités organoleptiques grâce à l'absence de choc thermique. On peut citer comme exemple la concentration de jus de tomate par osmose inverse ou la débactérisation du lait par microfiltration tangentielle ;
- ✓ La séparation est fondée sur des critères physiques (diamètres de pores) et ne fait pas intervenir de réactifs chimiques comme ex tractant (solvants, acides, bases...), réactifs qui sont, en général, une source importante de pollution. Ainsi, dans le cas de la déminéralisation de l'eau, l'osmose inverse présente un avantage par rapport à l'échange d'ions qui produit des quantités importantes d'effluents ;
- ✓ Les procédés peuvent fonctionner en continu et sont simples et faciles à automatiser, du moins en principe. Ainsi, contrairement à la filtration frontale ou à l'échange d'ions, qui sont des procédés séquentiels (avec des phases de fixation et d'élution pour l'échange d'ions), la circulation tangentielle du liquide à traiter permet d'éviter l'accumulation

progressive de dépôts. Cet avantage doit toutefois être pondéré par la nécessité de procéder à des nettoyages périodiques des membranes ;

- ✓ une absence de changement de phase, donc une moindre dépense énergétique comparée a 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 régénération comme en échange d'ion. Des arrêts sont cependant nécessaires pour le nettoyage périodique des membranes ;
- ✓ Excellente qualité d'eau traitée, « 0 » MES, en toutes circonstances ;
- ✓ Compacité : les surfaces d'implantation des membranes sont largement inférieures aux ouvrages classiques (décanteur), d'où la possibilité de construire des unités de traitement sur des terrains exigus ;
- ✓ Intégration architecturale : grâce à la compacité des ouvrages, cela permet une meilleure insertion dans le site [29].

II.10.2. Inconvénients des techniques à membranes :

- ✓ Colmatage des membranes, qui se traduit, en général, par une baisse de la perméabilité et une modification de la sélectivité qui n'est pas toujours souhaitable ;
- ✓ Sélectivité imparfaite des membranes : elle n'est jamais égale à100 % sauf peut-être en microfiltration.
- ✓ Durée de vie des membranes limitée, soit par perte de résistance mécanique, soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage ;
- ✓ Nécessité de faire circuler le liquide à filtrer tangentiellement à la membrane à des vitesses relativement élevées, ce qui implique des pompes de grande taille et de consommations d'énergie élevées [29].

II.11. Conclusion :

Les fournisseurs d'équipements ont élaboré différentes façons de mettre en œuvre les membranes afin de limiter l'accumulation de matières à la surface des membranes, à savoir : diminuer la vitesse de perméation à travers les membranes, faire de fréquents rétro lavages et permettre un écoulement tangentiel à la surface de la membrane. Les différents systèmes membranaires et leurs conceptions aident aux choix de traitements associer.

De très nombreuses applications font appel à cette technologie, parmi laquelle celle dans le domaine de production d'eau [30].

Chapitre III:
applications des procédés membranaires

III.1. Introduction :

Les techniques membranaires s'imposeront de plus en plus dans les unités de production pour améliorer la qualité et le débit d'eau traitée. Ces traitements physiques sont notamment efficaces pour abattre la turbidité, les microorganismes, pour limiter les sous-produits de désinfection et pour améliorer la qualité gustative de l'eau potable.

Les opérations de filtration par membranes sont très largement utilisées pour la potabilisation des eaux de surface ou des eaux souterraines, dessalement d'eau de mer et épuration des eaux usée avec les bioréacteurs, et des autres applications [23].

III.2. Applications des procédés à membranes en traitement des eaux de surface :

III.2.1. Caractéristiques d'une eau de surface naturelle :

Une eau de surface naturelle est un milieu particulièrement complexe : pluies, ruissellement ou encore infiltrations induisent une charge en éléments solubles et particulaires. Les diverses substances contenues dans les eaux de surfaces proviennent donc de l'altération des roches, du lessivage des sols ou encore de la décomposition des espèces végétales ou animales. Par rapport à l'eau souterraine, l'eau de surface présente habituellement une plus grande variabilité en ce qui concerne la qualité [26].

Tableau III.1: Principaux constituants d'une eau de surface.

	Substances organiques	**Substances minérales**
Composés dissous	Substances humiques, micropolluants, polysaccharides, protéines	Sels, métaux
Composés particulaires	Planctons, colloïdes, végétaux, virus bactéries	Sables, argiles, limon, silice, colloïdes

Source : BESSIERE Y., 2005

III.2.2.Champ d'application :

Dans le domaine de l'eau potable, pour des raisons pratiques et économiques, les matériaux employés sont essentiellement des polymères organiques et la force motrice utilisée pour pousser l'eau à travers la membrane est principalement un gradient de pression.

Il est important de mentionner qu'un contaminant peut être enlevé de deux façons par les membranes : soit directement ou après transformation par coagulation, adsorption sur charbon actif en poudre (CAP) ou oxydation. De plus, une filtration membranaire peut être combinée avec d'autres procédés de traitement et plusieurs types de filtration sur membranes peuvent être combinés, il est clair que plus le concepteur choisit des membranes avec des

Rapport-Gratuit.com

tailles de pore élevées, plus il faut compléter la filtration sur membrane avec d'autres procédés pour permettre l'enlèvement de certains contaminants [15].

Il est recommandé de choisir, parmi les membranes/chaînes qui permettent d'atteindre les objectifs fixés, celles qui permettent de minimiser l'investissement et les coûts d'opération. Par exemple il est inutile d'utiliser une membrane d'OI pour désinfecter, pour réduire la turbidité et pour enlever la MON d'une eau de surface alors que ces objectifs peuvent être atteints avec une membrane de NF, voire avec une membrane de type NUF. En effet, les membranes de NUF et de NF ont des perméabilités supérieures aux membranes d'OI et donc la surface de membrane et/ou les pressions d'opération requises devraient être plus faibles pour les membranes de NUF ou de NF que pour les membranes d'OI.

Lorsque les membranes UMF sont retenues, elles doivent obligatoirement être associées avec une étape de traitement d'inactivation (désinfection). Par contre, une étape de désinfection peut suivre n'importe quel système de traitement par membrane afin de compléter le rôle des membranes pour une eau brute dégradée, par exemple, ou pour assurer une désinfection sécuritaire [15].

III.2.3. Quels substances enlève-t-il les procédés membranaires? :

Ultrafiltration enlève bactéries, protozoaires et quelques virus de l'eau. Nano filtration enlève ces microbes, aussi que la majorité de la matière organique naturelle et certains minéraux naturels, particulièrement les ions bivalents qui causent l'eau dure. Mais nano filtration n'enlèvent pas les composés dissous. L'osmose inverse enlève la turbidité, incluant les microbes et pratiquement tous les composés dissous. Mais, tandis que l'osmose inverse enlève plusieurs minéraux dangereux, comme sel et plomb, il enlève aussi quelques minéraux bénéfiques, comme calcium et magnésium. Ceci est pourquoi eau qui est traitée par l'osmose inverse bénéfice en passant par un lit minéral de calcium et magnésium. Ceci ajoute de calcium et magnésium à l'eau, au même temps qu'il augmente le pH et diminue le potentiel corrosive de l'eau. Eau corrosive peut aussi lixivier plomb et cuivre des systèmes de distribution et des conduites d'eau des ménages [3].

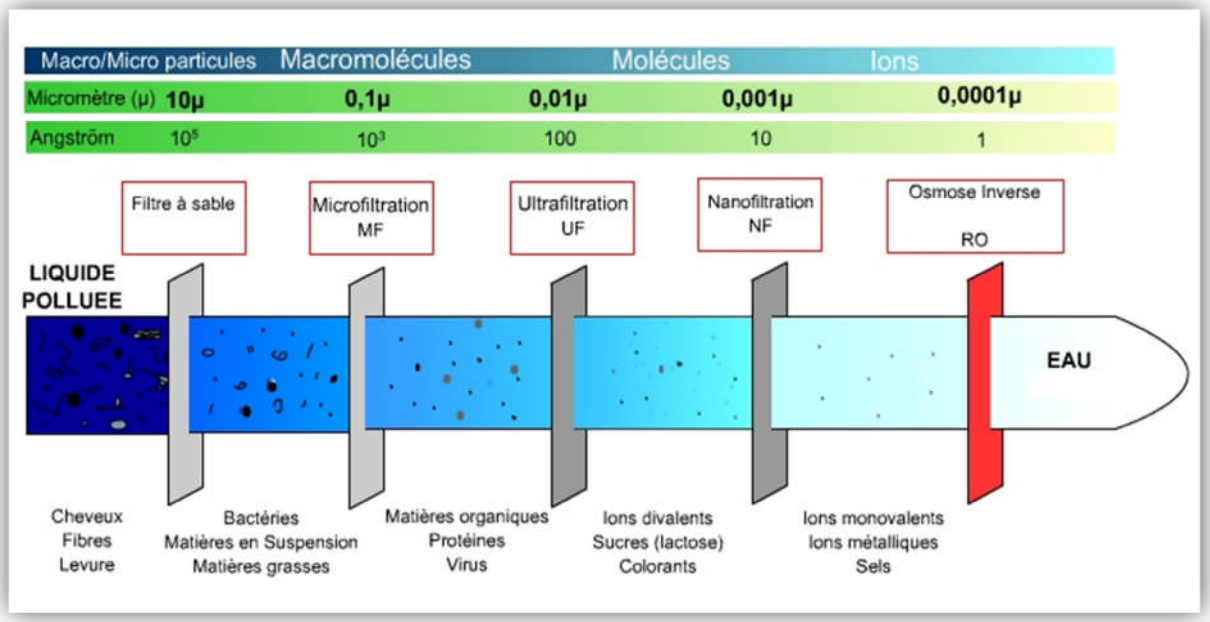


Figure III.1: Principaux polluants éliminées par filtration membranaire.

Source : MADY C., 2010

Tableau III.2: Enlèvement des contaminants par les procédés à membranes.

	Enlèvement			
	MF	UF	NF	OI
Matières en suspension	T	T	T	T
Kystes de protozoaires (Giardia et Cryptosporidium)	T	T	T	T
Virus	P	T	T	T
Fe^{2+} et Mn^{2+}	P à T (avec préc.)	P à T (avec préc.)	T	T
COD	P (avec coag.)	P (avec coag.)	P à T	T
Pesticides et autres composés organiques synthétiques	P à T (avec CAP)	P à T (avec CAP)	P à T	P à T
Dureté (Ca^{2+}, Mg^{2+})	-	-	P à T	T
Alcalinité	-	-	P	P à T
Chlorure de sodium	-	-	P	P à T
Sulfates	-	-	P à T	T
Arsenic	P (avec coag.)	P (avec coag.)	P à T	T

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

T : enlèvement total (> 99%).

P : enlèvement partiel.

Préc : Précipitation.

Coag : coagulation.

CAP : charbon actif en poudre.

Source : Yolaine B., 2005

III.2.4. les différentes chaines de traitement :

Il existe de nombreuses façons d'utiliser des membranes dans la production d'eau potable. Les membranes peuvent constituer le cœur du traitement ou encore servir d'étape d'affinage à un traitement plus conventionnel. Nous présentons les chaînes de traitement les plus fréquemment utilisées.

III.2.4.1.Chaînes de traitement avec filtration sur membranes d'UMF :

III.2.4.1.1.Filtration sur membrane d'UMF + désinfection chimique :

Utilisé lorsque le but du traitement est uniquement de réduire la turbidité et de désinfecter l'eau. Les configurations qui sont utilisées sont des modules de fibres creuses et les modules tubulaires en mode de filtration tangentielle ou frontale. Des systèmes avec caissons pressurisés et des systèmes à membranes immergées sont également utilisés.

III.2.4.1.2.Coagulation/floculation + filtration sur membrane d'UMF + désinfection chimique :

Utilisé lorsqu'il faut, en plus de la désinfection et de la réduction de la turbidité, réduire la couleur et enlever une partie de la matière organique naturelle. Actuellement, seuls des systèmes à membranes fibres creuses immergées sont utilisés dans ce type de traitement.

III.2.4.1.3.Coagulation/floculation + décantation + filtration sur membrane d'UMF + désinfection chimique :

Cette chaîne vise les mêmes objectifs que la chaîne présentée précédemment. Ce sont essentiellement des systèmes à fibres creuses qui sont utilisés dans ce type de traitement.

III.2.4.1.4.Oxydation + filtration sur membrane d'UMF + désinfection chimique :

Utilisé essentiellement lorsqu'il est nécessaire de réaliser une oxydation du fer et/ou du manganèse, mais le même principe peut-être utilisé pour d'autres contaminants qui peuvent être oxydés/précipités. Le but est de réaliser une oxydation chimique du fer et du manganèse engendrant un précipité qui pourra être intercepté par les membranes d'UMF. Plusieurs types d'oxydants peuvent être utilisés : chlore, ozone, dioxyde de chlore, permanganate, peroxyde d'hydrogène…

III.2.4.1.5. Adsorption sur charbon actif en poudre + filtration sur membrane d'UMF + désinfection chimique :

S'applique plutôt aux cas où il est nécessaire d'enlever des contaminants réfractaires à la coagulation/floculation mais qui peuvent être enlevés par adsorption (cas des pesticides par exemple).

L'ajout de charbon actif en poudre peut être combiné avec la coagulation/floculation. Il peut être occasionnel ou continu. Les membranes creuses et tubulaires peuvent être employées dans ce type de traitement [30].

III.2.4.2.Chaînes de traitement avec filtration sur membranes de Nano Filtration:

III.2.4.2.1.Simple filtration sur membrane de NF :

Une simple filtration sur membrane de NF peut constituer un traitement complet dans au moins deux cas :

- ❖ désinfection, réduction de la turbidité des eaux de surface colorées ou des eaux de souterraine sous influence d'eau de surface ;
- ❖ traitement des eaux souterraines lorsqu'il est nécessaire de poursuivre un ou plusieurs des buts suivants :
  - Réduction de la dureté;
  - Enlèvement direct du fer et du manganèse;
  - Réduction partielle de la salinité et/ou enlèvement partiel d'ions monovalents (Na^+, Cl^-, NO^{3-}…)
  - Enlèvement des sulfates et autres ions bivalents.

Dans le premier cas les membranes visent un enlèvement poussé des précurseurs de formation de sous-produit de désinfection et une réduction très forte de la demande en désinfectant.

Dans le deuxième cas, les membranes visent un enlèvement direct des ions bivalents et/ou d'une partie des ions monovalents.

Si on utilise des modules tubulaires, ou d'autres configurations qui ne possèdent de fins canaux d'écoulement tangentiel, le pré filtration n'est pas obligatoire [30].

III.2.4.2.2.Filtration sur membrane d'UMF + Filtration sur membrane de NF :

La filtration sur membrane d'UMF est utilisée comme prétraitement à la filtration sur membrane de NF pour réduire la vitesse de colmatage des membranes. Cette combinaison permet :

- ✓ D'enlever la quasi-totalité des particules en suspension avant la filtration sur membrane NF ;

- ✓ D'augmenter, par conséquent la vitesse de filtration ou d'espacer les lavages de membrane de NF ;
- ✓ D'ajouter une barrière supplémentaire pour les micro-organismes pathogènes.

En revanche, les coûts de construction et de production sont bien plus élevés par rapport à une simple filtration sur membrane de NF [30].

III.2.4.2.3.Combinaison d'un traitement conventionnel avec une filtration sur membrane de NF :

On parle ici d'affinage par membrane. Cette chaîne de traitement permet de traiter des eaux de surface très chargées en matière en suspension en Matière Organique Naturelle et en micro-organique pathogène. Ce traitement, d'un coût très élevé, permet de produire une eau de très bonne qualité à partir d'une eau brute fortement contaminée [30].

III.2.4.3. Chaînes de traitement avec filtration sur membranes de NUF :

Les membranes de NUF ont en commun de pouvoir retenir les virus et les autres micro-organismes pathogènes.

Elles permettent aussi de retenir la quasi-totalité des particules à l'origine de la turbidité. Par contre, cette catégorie de membrane couvre une large gamme de taux de séparation de la Matière Organique Naturelle, allant de près de 0 à plus de 70 %. Nous distinguons deux types de traitement en fonction de leur capacité à enlever la Matière Organique Naturelle soit :

- ➢ Celles qui ne permettent pas d'enlever une fraction significative de la Matière Organique Naturelle ;
- ➢ Celles qui permettent d'enlever une fraction significative de la Matière Organique Naturelle.

III.2.4.3.1. Chaîne de traitement avec membranes de NUF ne permettant pas d'enlever une fraction significative de la Matière Organique Naturelle :

Ces chaînes de traitement, qui font appel aux membranes NUF à plus larges pores, sont similaires aux chaînes avec membranes d'UMF. Par contre, si le système membranaire est intègre, une membrane de NUF permet a priori une désinfection complète de l'eau et il ne devrait donc pas être nécessaire de procéder à une désinfection chimique en aval des membranes. Cela ne dispense cependant pas de l'étape de post- désinfection qui a pour but demain tenir une concentration minimale de désinfectant résiduel à l'entrée durés eau de distribution. Il s'agit là de la principale différence avec les membranes d'UMF [30].

Les différentes chaînes de traitement avec les membranes de NUF à large pores sont :

- ✓ Simple filtration sur membrane de NUF
- ✓ Coagulation/floculation + filtration sur membrane de NUF

- ✓ Coagulation/floculation + décantation + filtration sur membrane de NUF
- ✓ Oxydation + filtration sur membrane de NUF
- ✓ Adsorption sur charbon actif en poudre + filtration sur membrane de NUF

III.2.4.3.2. Chaîne de traitement avec membranes de NUF permettant d'enlever une fraction significative de la Matière Organique Naturelle :

Ces chaînes de traitement font appel aux membranes de NUF à pores plus fins. Elles sont similaires aux chaînes avec les membranes de NF. En revanche, l'abattement de la Matière Organique Naturelle et des ions bivalents est moins poussé que pour les membranes de NF. Les chaînes de traitement avec les membranes de NUF à pores fins sont :

- ✓ Simple filtration sur membrane de NUF
- ✓ Combinaison d'un traitement conventionnel avec une filtration sur membrane de NUF [30].

III.2.5.Principaux applications de la NF dans le domaine de l'eau potable :

Le procédé membranaire de la NF comporte trois principales applications dans le domaine de l'eau potable. La première est la NF directe d'eau de surface colorée. Ensuite, la NF peut être utilisée pour un adoucissement ou un dessalement partiel dans le cas d'une eau souterraine fortement minéralisée. Finalement, la NF peut être ajoutée à la suite d'un traitement conventionnel existant afin d'améliorer la qualité de l'eau traitée [18].

III.2.5.1. Adoucissement par membrane :

La filtration membranaire est une excellente façon d'adoucir l'eau. Les membranes de NF permettent une séparation élevée des ions divalents (calcium et magnésium) tandis que les membranes de NUF ne réalisent qu'une séparation plus faible de ces ions. Il est courant de voir un système de NF ne traiter qu'une partie de l'eau et réduire ainsi considérablement la dureté. L'eau filtrée mélangée avec l'eau brute permet alors d'obtenir une dureté plus acceptable. La proportion filtrée dépend de la dureté de l'eau brute [25].

III.2.5.2. Enlèvement des nitrates par membranes :

L'enlèvement des nitrates par filtration membranaire n'est possible que par OI. Le taux d'enlèvement des nitrates par OI est supérieur à 90%, ce qui est similaire à l'enlèvement d'autres anions tels que les sulfates et les chlorures [25].

III.3. Applications des procédés à membranes en traitement des eaux souterraines :

III.3.1.Déferrisation et/ou démagnétisation par membrane :

L'enlèvement du baryum peut représenter un problème lorsque des membranes sont utilisées. Tout comme le fer et le manganèse, le baryum peut précipiter à la surface des

membranes, provoquant un colmatage important. Il faut donc utiliser un séquestrant retardant la précipitation du baryum avant la filtration membranaire [15].

III.3.2. Enlèvement des chlorures :

L'effet des chlorures est strictement esthétique et pratique. En quantité élevée, il donne un goût désagréable à l'eau et peut provoquer un accroissement de la corrosion des conduites. Le seul traitement efficace pour l'enlèvement des chlorures est l'osmose inverse et l'enlèvement optimal est obtenu en ajoutant du charbon actif granulaire avant les membranes [15].

Tableau III.3: Application des procédés de traitement pour les eaux souterraines.

Catégorie de contaminants	**Procédé par membrane**	
	Nano filtration	Osmose inverse
Coliformes	**X**	**X**
Inorganiques		
Arsenic (+3)		**X**
Arsenic (+5)		**X**
Barium		**X**
Cadmium		**X**
Chrome (+3)		**X**
Chrome (+6)		**X**
Fluorure		**X**
Mercure (inorganique)		**X**
Nitrate		**X**
Nitrite		**X**
Sulfate	**X**	**X**
Turbidité	**X**	**X**
Zinc		**X**
Organiques		
Pesticides/Herbicides	**X**	**X**
Carbone dissous	**X**	**X**
composants qui causent des problèmes esthétiques		
Dureté	**X**	**X**

Solides totaux dissous		**X**
Chlorure		**X**
Couleur	**X**	**X**

X = Approprié;

Source : Bouchard C., Kouadio P., 2000

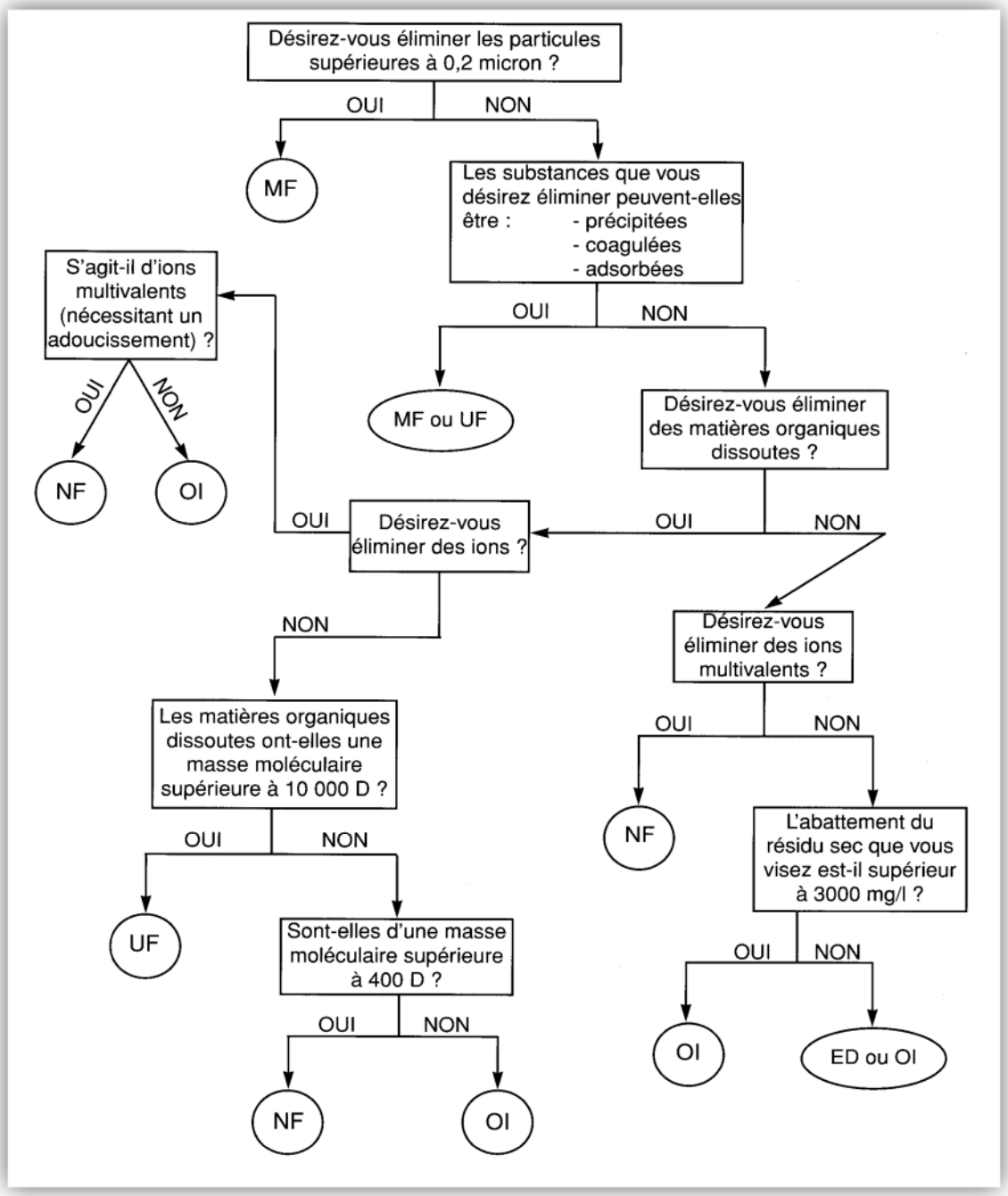


Figure III.2: Diagramme presente comment selectionner le propcédé membranaire qu'il vous faut.

Source : BERLAND J., 2002

III.4. Application en dessalement d'eau de mer:

III.4.1. dessalement par osmose inverse :

Les membranes OI constituent le cœur du traitement utilisé pour le dessalement. L'optimisation des performances du procédé membranaire, notamment la limitation du colmatage en surface de membranes OI denses, nécessite la diminution de la concentration voire l'élimination de certains solutés en amont.

Un prétraitement est alors adapté à la composition de l'effluent à traiter. Son efficacité est évaluée par le suivi de paramètres physico-chimiques globaux, tels que la turbidité, la concentration organique et le potentiel de colmatage.

En dessalement, le prétraitement comporte généralement une étape de clarification. Cette dernière vise à oxyder une partie de la matière organique et à réaliser une désinfection de l'eau de mer. La clarification correspond à la neutralisation puis agglomération de colloïdes ou particules dissoutes chargées par adsorption sur des coagulants.

L'osmose inverse par membranes denses réalise ensuite une élimination de composés dissous, tels que des sels, métaux, et micropolluants organiques. Plusieurs étages de filtration, ou association en série de blocs de modules membranaires, peuvent être utilisés pour augmenter le rendement de production.

L'eau ainsi purifiée, impropre à la consommation, est ensuite reminéralisée et équilibrée afin de corriger son agressivité, par neutralisation du CO_2 dissous. L'injection d'un désinfectant (acide hypochloreux ou bioxyde de chlore) est réalisée afin de maintenir un effet rémanent dans le réseau de distribution, couramment utilisé pour la production d'eau potable.

La préoxydation, réalisée en amont de l'étape de clarification, est effectuée par injection de chlore, dérivant de l'hypochlorite de sodium. L'exposition dépend de la composition de l'eau de mer mais également des modes de contact.

Une injection continue est réalisée à des concentrations généralement inférieures à 1 $mg.L^{-1}$.

L'action oxydante et désinfectante dépend notamment du pH, ajusté pour améliorer son efficacité, et de la concentration d'ion bromures et d'ammoniaque. Leur présence dans l'eau de mer peut conduire à la formation, dans différentes proportions, de nombreux dérivés halogénés actifs, incluant l'acide hypochloreux, hypobromeux et des chlora mines [45].

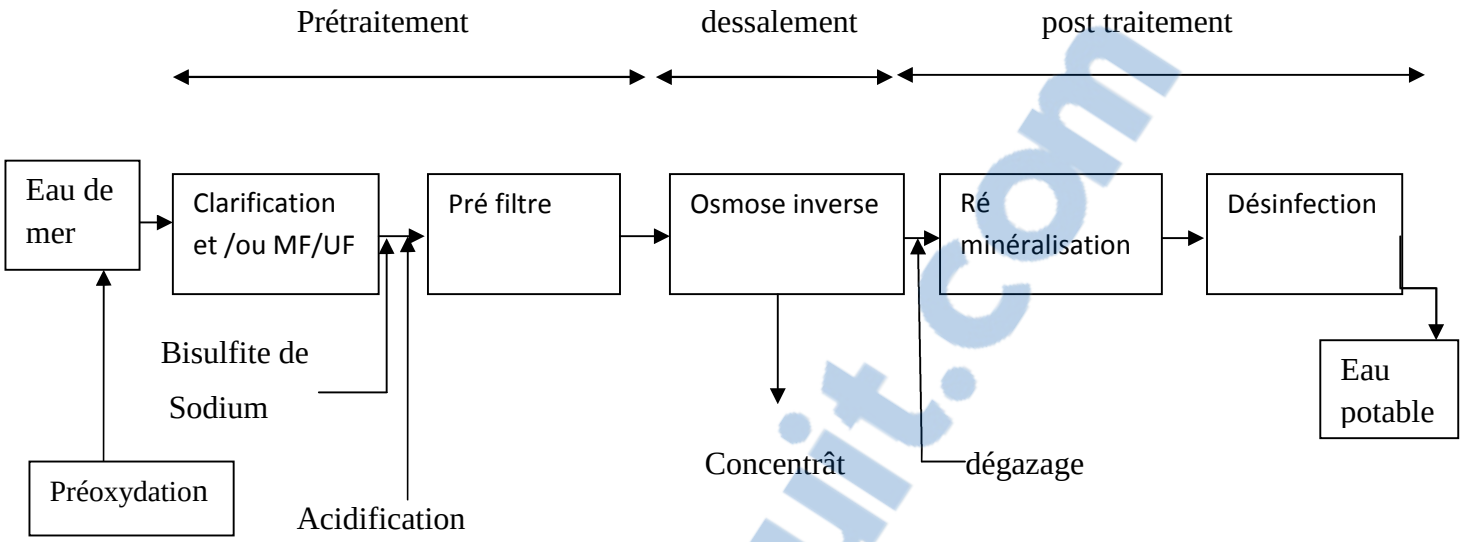


Figure III.3: Schéma fonctionnel simplifié d'une filière de dessalement par osmose inverse.

Source : ETTORTE., 2011

III.4.1.1. La prise d'eau :

La prise d'eau de mer est la première étape de la filière de dessalement. Elle doit permettre d'obtenir une eau en entrée de filière de la meilleure qualité possible et surtout minimiser les matières en suspension présentes [32].

III.4.1.2. Prétraitement de l'eau d'alimentation :

Deux moyens sont en général à conjuguer :

- éviter, par un prétraitement adapté, la présence des MES et colloïdes ou des sels pouvant s'insolubiliser lors du processus de concentration;
- nettoyer de temps à autre les membranes en les balayant par des solutions appropriées (détergeantes, peptisantes, solubilisantes...), pour remettre en suspension ou dissoudre les dépôts accumulés malgré tout.

Chaque fournisseur de membrane définit une durée de vie de se produite sous réserve que l'eau d'alimentation reste conforme à ses préconisations. Celles-ci concernent principalement la teneur en chlore, le pouvoir encrassant et les risques de précipitations de sels en sursaturation [32].

III.4.1.3. Chloration :

Il faut éviter tout développement biologique dans l'eau d'alimentation. L'injection de chlore ou de son équivalent, l'eau de Javel, en continu ou plutôt en injection choc sera donc faite dès la prise d'eau.

Cependant, les membranes (à l'exception de celles en tri acétate de cellulose) ne supportent pas la mise en contact avec le chlore, son élimination (réduction par le bisulfite de sodium) sera donc réalisée immédiatement en amont de l'osmose proprement dite.

Rapport-Gratuit.com

Il faut noter que l'on doit éliminer tout le chlore libre et même pour certaines membranes, le chlore combiné (chloramine, chlore organique...) [32].

III.4.1.4. Contrôle du pouvoir encrassant de l'eau (SDI) :

On peut considérer l'osmose inverse comme un procédé de filtration à l'échelle moléculaire. Toute particule, quelle que soit sa dimension, sera retenue. Leur accumulation à la surface de la membrane provoque une baisse continue des performances (débit et/ou salinité). Si ce phénomène est mésestimé, il aboutit rapidement à la nécessité de lavage fréquent (c'est-à-dire arrêt de production, perte d'eau, coût de réactifs...) et, dans le pire des cas, à un colmatage irréversible des membranes. Le deuxième objectif du prétraitement est donc de réduire autant que possible le pouvoir encrassant de l'eau.

Pour l'évaluer, la mesure de la masse des matières en suspension n'est pas un indicateur suffisant. Une méthode empirique a donc été mise au point : la mesure de l'indice de colmatage.

La valeur requise pour l'osmose d'eau de mer est généralement : SDI≤5 en pointe et ≤3en moyenne [32].

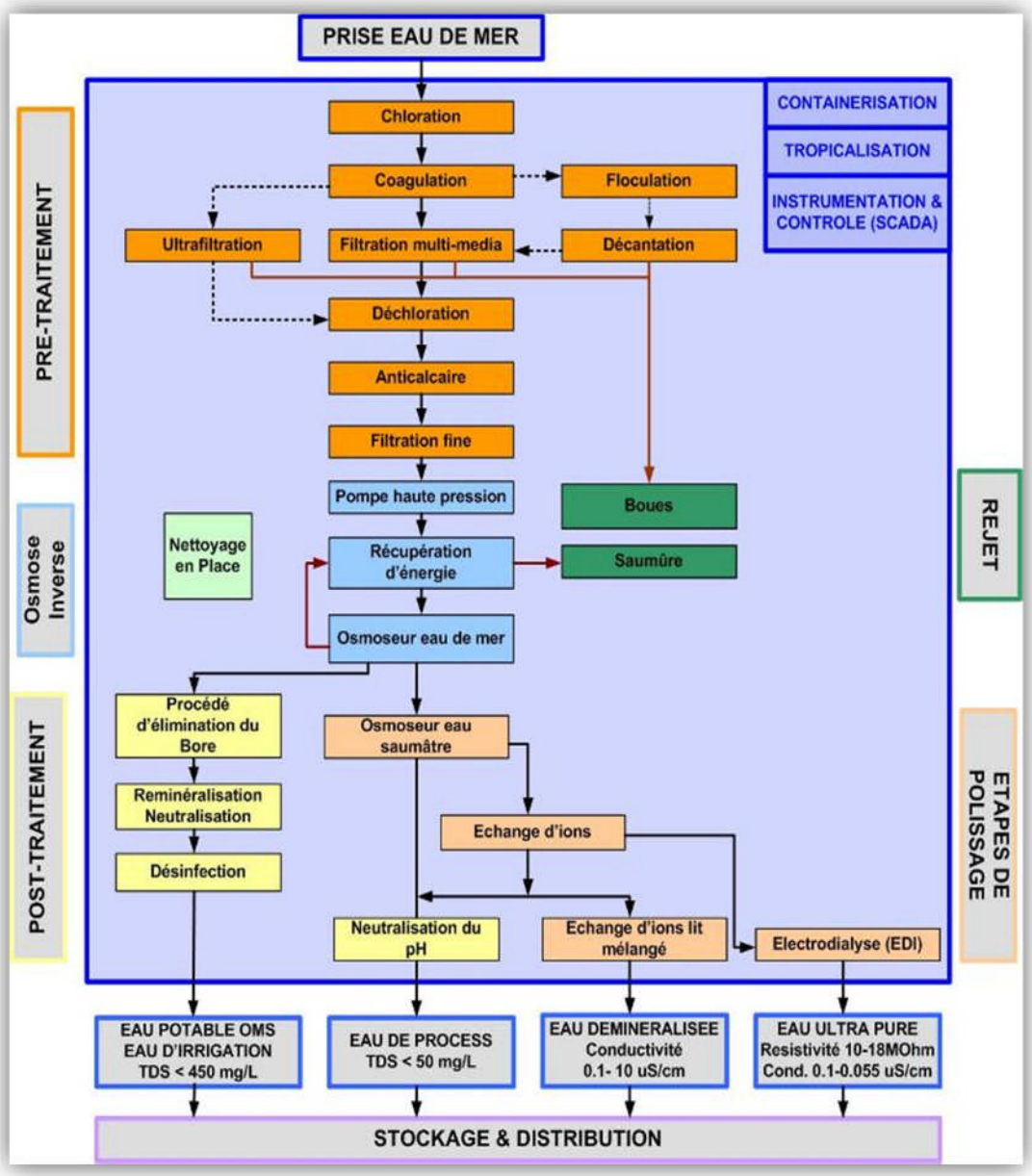


Figure III.4: schéma général d'une station de dessalement par O.I.

Source : ETTORTE., 2011

III.5. Application en épuration des eaux usée :

III.5.1. définition d'un bioréacteur à membrane :

On peut définir généralement le concept de bioréacteur à membrane (BRM) comme étant la combinaison d'un bioréacteur à biomasse suspendue avec une séparation par membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration. Dans un tel système, le procédé conventionnel de boues activées est modifié de façon à remplacer les décanteurs par une filtration membranaire.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

III.5.2. Utilisations de BRM pour l'épuration des eaux usées :

On utilise depuis le début des années 1970 des procédés membranaires de microfiltration (MF) et ultrafiltration (UF) pour remplacer des décanteurs secondaires servant au traitement de boues activées. Dans un bioréacteur à membranes, le couplage d'un procédé membranaire avec un procédé à boues activées offre plusieurs avantages :

- un temps de rétention des boues (TRB) plus élevé, résultant en une moins grande production de boues;
- Un âge de boues plus élevé permet le développement de microorganismes à croissance lente ainsi qu'un meilleur enlèvement des composés azotés et de la matière organique réfractaire;
- une excellente qualité d'effluent en terme de turbidité, de bactéries, de matières en suspension (MES) et de demande biochimique en oxygène (DBO);
- un espace requis moindre que les procédés conventionnels de traitement des eaux usées.

Certains inconvénients sont reliés à l'utilisation d'un BRM :

- des coûts d'achat élevés,
- des données limitées sur la durée de vie des membranes,
- des coûts potentiellement élevés de remplacement périodique des membranes et le besoin de contrôler le colmatage des membranes
- De plus, les boues de BRM sont constituées de flocs de plus petites tailles. Le traitement des boues extraites peut donc s'avérer problématique en raison de leur faible potentiel de filtration et de décantation.

III.5.3. Configurations des systèmes de BRM :

Les bioréacteurs à membranes sont composés principalement d'un réacteur responsable de la dégradation biologique et d'un module membranaire séparant la liqueur mixte de l'eau traitée. Les BRM utilisent deux configurations: les bioréacteurs à membranes en boucle externe et les bioréacteurs à membranes immergées.

III.5.3.1.Bioréacteur membranaire à boucle externe:

Les membranes se situent alors à l'extérieur du réacteur, Constituent la première génération de bioréacteurs à membrane. Dans un tel système, la liqueur mixte circule à travers un module membranaire situé à l'extérieur du bioréacteur. Le fait d'avoir une boucle externe de filtration augmente les coûts énergétiques. De plus, les pompes de recirculation imposent

des contraintes de cisaillement importantes, ce qui contribue à détruire les flocs de biomasse et diminue l'activité biologique.

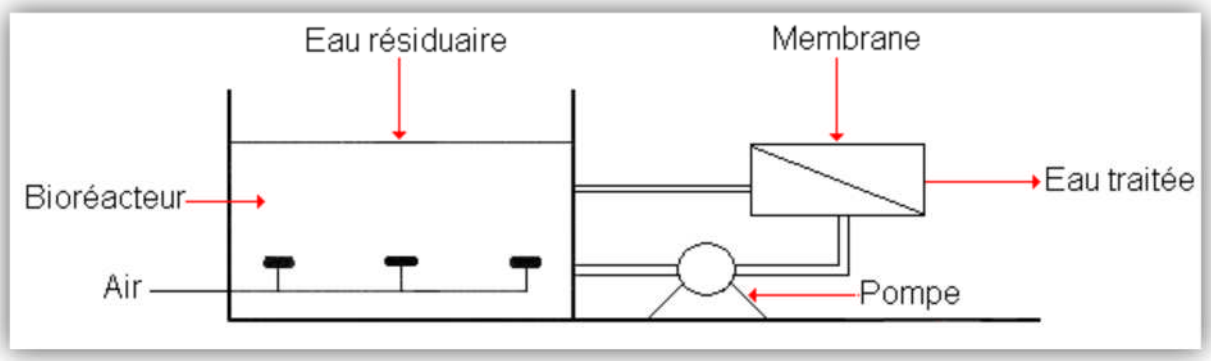


Figure III.5 : Schéma d'un bioréacteur membranaire à boucle externe.

Source : RONUALD V., 2005

III.5.3.2. Bioréacteur membranaire à membrane immergée :

Dans un BRM immergées, le module de membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration est directement dans le réacteur à boues activée. La filtration est accomplie en appliquant une pression négative du côté du perméat. Ainsi, le perméat passe à travers la membrane alors que les solides demeurent dans le bioréacteur. Ce type de configuration réduit beaucoup la consommation énergétique attribuable à la filtration. De l'air est injectée directement sous le module membranaire pour maintenir les solides en suspension dans le bioréacteur et pour nettoyer la surface extérieure des membranes. L'aération augmente l'efficacité de l'enlèvement du gâteau et diminue la pression de succion requise pour la filtration. Cet air sert également à fournir de l'oxygène pour maintenir des conditions aérobies.

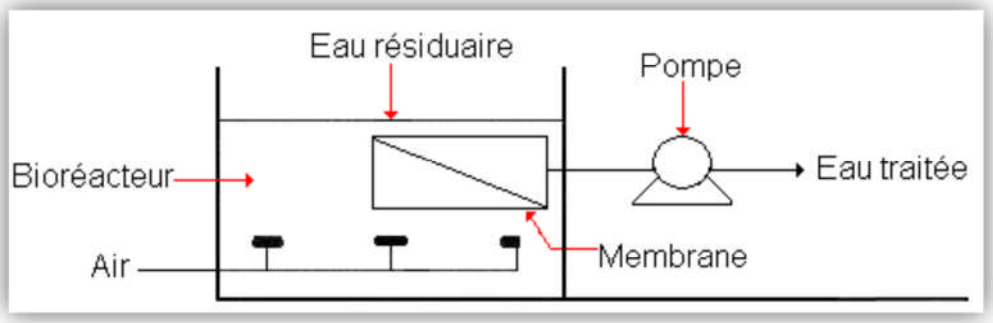


Figure III.6 : Schéma d'un bioréacteur membranaire à membrane immergée.

Source : RONUALD V., 2005

III.5.4. Performances et capacités des BRM :

Un enlèvement de la DBO de 90% à 97% a été obtenu avec des BRM. Les concentrations correspondantes de DBO dans le perméat sont généralement inférieures à 10 mg/L. L'enlèvement de la DCO se situe entre 90% et 98%, correspondant à une concentration de DCO dans le perméat d'environ 40 mg/L. L'efficacité d'enlèvement de la DCO des BRM est supérieure aux procédés de boues activées conventionnels qui est généralement de 75% à 85%. Ceci peut s'expliquer par la rétention complète des solides accomplis par les BRM ainsi que par la minimisation des pertes de boues à l'effluent.

Dans un BRM, les microorganismes spécialisés à croissance lente, tels que *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*, se trouvent dans des conditions propices à leur développement, car les membranes retiennent complètement les solides. Les BRM permettent d'accomplir une nitrification complète. L'enlèvement complet de l'azote est possible avec les BRM.

III.6. Applications Industrielles :

Historiquement, les procédés membranaires à gradient de pression ont commencé à apparaître dans l'industrie laitière.

Les grands marchés sont actuellement l'industrie agro-alimentaire (stabilisation, clarification, extraction ou concentration de produits), la pharmacie, les biotechnologies et le traitement de l'eau (potable, de procédé ou ultra pure). La chimie et les industries de traitement de surface sont également utilisateurs de ces techniques.

Les procédés membranaires peuvent permettre de développer des procédés industriels sobres et propres en les utilisant à quatre grandes places clés :

- Au cœur même du procédé, en remplacement d'une ou de plusieurs opérations unitaires de séparation, ou en couplage avec une ou plusieurs opérations unitaires ;
- tri à la source, au plus proche du procédé, pour recycler/réutiliser des matières premières (eau, produits chimiques, biomasse…);
- fourniture de fluides de procédés (eau ultra pure…);
- traitement en bout de chaîne d'effluents, par exemple pour limiter leur volume dans le cas d'effluents toxiques.

Tableau III.4: Tableau représente les applications industrielles des procédés membranaires.

			Procédé			
Secteur	**Produit**	**But de la séparation**	**MF**	**UF**	**NF**	**OI**
<u>Agriculture</u>						

Irrigation	**Eau**	**Production**			**X**	
Agro-alimentaire						
Lait et dérivés	**Lactosérum**	**Extraction**		**X**	**X**	
		Extraction		**X**		
		concentration				**X**
	Lait	**Extraction**		**X**		
		stabilisation	**X**			
		concentration				**X**
	Saumure	**Recyclage**	**X**			
Boissons	**Sans alcool**	**Production**				**X**
	Eau	**Recyclage**		**X**		
	Jus de fruits	**clarification**	**X**			
		concentration				**X**
Boisson alcoolisée	**Moût de raisin**	**Production**				**X**
	Eaux de vie	**Production**				**X**
	Bière	**clarification**	**X**			
	Vin	**clarification**	**X**			
		stabilisation	**X**			
Sucrerie	**Impuretés**	**Extraction**			**X**	
Vinaigre		**clarification**	**X**			
Alimentation animale	**Plasma**	**Extraction**	**X**	**X**		
Produits spéciaux	**Amidon**	**clarification**		**X**		
	Gélifiant	**Extraction**		**X**		
Divers	**NEP**	**Recyclage**			**X**	
	Condensat	**Extraction**				**X**
Automobile						
	Peinture	**Recyclage**		**X**		**X**
Biotechnologies						
	Extrait végétal	**concentration**			**X**	
Bois						

Menuiseries	**Fongicide**	**Recyclage**		**X**		
Agglomérés	**résine**	**Recyclage**				**X**
Caoutchouc						
	Latex	**concentration**		**X**		**X**
Chimie						
	Catalyseur	**Extraction**	**X**	**X**		
	Colorant	**Extraction**		**X**		
	Effluents	**Dépollution**			**X**	
		Dépollution			**X**	
	Solvants	**Recyclage**			**X**	**X**
Cosmétique						
	Extrait végétal	**concentration**				**X**
Eau potable						
Mer	**Sel**	**Extraction**				**X**
Surface	**Nitrate**	**Extraction**			**X**	
	Trihalométhane	**Extraction**			**X**	
Eaux usées						
	Bioréacteur à membrane	**Dépollution**	**X**	**X**		
Electronique						
	Eau ultra pure	**Production**	**X**			**X**
	Cuivre	**Recyclage**			**X**	
Energie						
Chaufferie	**Silice**	**Extraction**		**X**		
	Fer	**Extraction**			**X**	
Hôpital						
Hémodialyse	**Eau**	**Production**			**X**	**X**
Imprimerie						
	Encre	**Recyclage**		**X**		
Laverie						
	Effluent	**Recyclage**		**X**		**X**
Mécanique						

	Bains de dégraissage	**Recyclage**		**X**		
	Eau de trempe	**Recyclage**		**X**		
	Effluents	**Dépollution**		**X**	**X**	
		Dépollution			**X**	
	Ressuage	**Recyclage**			**X**	
Mines						
	Effluents	**Dépollution**			**X**	
		Recyclage			**X**	
Papeterie						
	Eaux de désencrage	**concentration**	**X**			**X**
	Produits de couchage	**Recyclage**		**X**		
Pharmacie						
	Antibiotique	**Extraction**		**X**		
	Enzyme	**Extraction**		**X**		
	Eau de procédé	**Production**		**X**		**X**
	Eau ultra pure	**Production**	**X**			**X**
	Extrait végétal	**concentration**			**X**	
Raffinerie						
Effluent	**Eau-huile**	**Dépollution**		**X**		
Tertiaire						
Eaux	**Hôtel**	**Production**			**X**	
	Piscine	**Recyclage**		**X**		
Textile						
Effluents	**Laine**	**Recyclage**		**X**		
	Colorants	**Dépollution**			**X**	
Produits d'encollage		**Recyclage**		**X**		
Traitement de Surface						

Effluent	**Métaux lourds**	**Dépollution**			**X**	

- **Clarification** : Il s'agit de rendre limpide le produit.
- **Concentration** : Il s'agit de concentrer un ou plusieurs produits dans une des phases.
- **Extraction** : Il s'agit d'une opération d'enlèvement d'une ou plusieurs molécules du liquide d'alimentation ; cela peut être une purification, une extraction, un fractionnement.
- **Production** : Le procédé membranaire est utilisé comme outil de fabrication, et rentre dans la ligne de production d'un produit.
- **Recyclage** : Le procédé membranaire traite un rejet pour recycler soit le filtrat, soit le retentât soit les deux.
- **Stabilisation** : Il s'agit d'une opération similaire à la stérilisation à chaud ou la prévention d'apparition de précipités.
- **Dépollution** : Il s'agit de concentrer la pollution dans le retentât tout en produisant un filtrat de qualité suffisante, en vue d'un rejet.

Source : DAUFING., 2006

III.7. Conclusion :

La NF est, a priori, un bon compromis économique pour le traitement des eaux douces de surface, car ce procédé assure la désinfection, l'enlèvement de micropolluants, de la MON et de la couleur, avec des coûts énergétiques beaucoup moins élevés que pour l'OI [19].

La filtration sur membrane offre plusieurs avantages aux consommateurs et aux producteurs. D'une part, la technique de filtration constitue un moyen efficace pour obtenir une qualité et une sécurité de premier ordre sans détruire les qualités sensorielles fondamentales du produit. Elle permet d'éliminer les ingrédients indésirables comme les micro-organismes, les dépôts ou les sédiments qui ont un impact négatif sur la qualité du produit et de donner au produit fini une texture plus attrayante, tout en augmentant sa durée de conservation. D'autre part, cette technique peut écourter certaines étapes de la fabrication et accroître le rendement ; elle présente un fort degré de sélectivité et autorise un meilleur contrôle du processus de fabrication [27].

Chapitre IV:

la station de dessalement de Honaïne

Rapport-Gratuit.com

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons la station de dessalement d'eau de mer de Honaïne et expliquerons le fonctionnement de chacune des parties de dessalement qui constituent le prétraitement, la séparation par membrane d'osmose inverse et ensuite le poste traitement ainsi analyser quelque paramètres concernant la qualité d'eau produite.

Il faut savoir que cette station a été réalisée dans un programme élaboré par le pouvoir public afin d'y remédier au manque d'eau, surtout en eau potable, que connait la région depuis quelques décennies. La technique utilisée pour la production de l'eau potable au niveau de cette station est la séparation membranaire, d'où notre intérêt de l'étude de ce cas.

IV.2. Présentation de la station de dessalement de Honaïne :

IV.2.1. Contexte :

La capacité de l'usine de dessalement est de 200.000 m³/jour d'eau potable qui est produite par la filtration sur sable et ensuite une filtration membranaire par Osmose Inverse, ces eaux sont vendues à l'Algérienne des Eaux (ADE).

La station de dessalement dont le montant d'investissement est évaluée à 250 millions de dollars, assurera l'eau potable de 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du grand Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants. La wilaya de Tlemcen qui compte 53 communes, ne devrait plus désormais, souffrir de pénurie d'eau potable grâce à cette immense station qui sera gérée par une joint-venture créée le 19 septembre 2006 et dont les actionnaires sont « l'Algerian Energy Company » AEC, filiale de Sonatrach et Sonelgaz à hauteur de 49% et la société espagnole GEIDA à hauteur de 51%, avec comme dénomination «Miyeh Bahr Honaïne» MBH, la station a entrée en exploitation finale en juillet 2012.

S'agissant des composantes fondamentales du projet, cette unité comportera deux principaux systèmes dont l'un sera réservé à la mobilisation et au pompage de l'eau de mer et l'autre pour le rejet de la saumure. Ainsi le premier système de mobilisation de l'eau de mer, renforcé par une conduite sous-marine pouvant aller jusqu'à 1800 m dans la mer et une station de pompage à proximité de la ligne de rivage, permettra de pomper l'eau de mer vers le site de la station de dessalement, qui se trouve à environ 500 m de la côte. Quant au système de rejet de la saumure vers la mer, il est consolidé par un émissaire marin pénétrant jusqu'à 1000 m dans la mer, dans le but d'assurer une meilleure dilution et atténuer en conséquence les impacts environnementaux. Le principe de l'opération de dessalement consiste à favoriser le

passage d'une salinité de 40 g/l, celle de l'eau de mer, à moins de 0,5 g/l, soit de l'eau complètement dessalée.

IV.2.2. Situation géographique de la station :

Honaïne est une commune de la wilaya de Tlemcen, située à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, à 60 km au nord-ouest de Tlemcen et à 120 km à l'ouest de Sidi Bel Abbes et à mi-distance géographiquement entre Ghazaouet et Béni-Saf.

Figure IV.1: Situation géographique de la station.

IV.2.3.Plan de la station :

La figure ci-dessous, indique les blocs principaux de la station, qui sont comme suit :

- ✓ La Captation de l'eau de mer et pompage ;
- ✓ Le Prétraitement ;
- ✓ L'unité d'osmose inverse ;
- ✓ Le Post traitement.

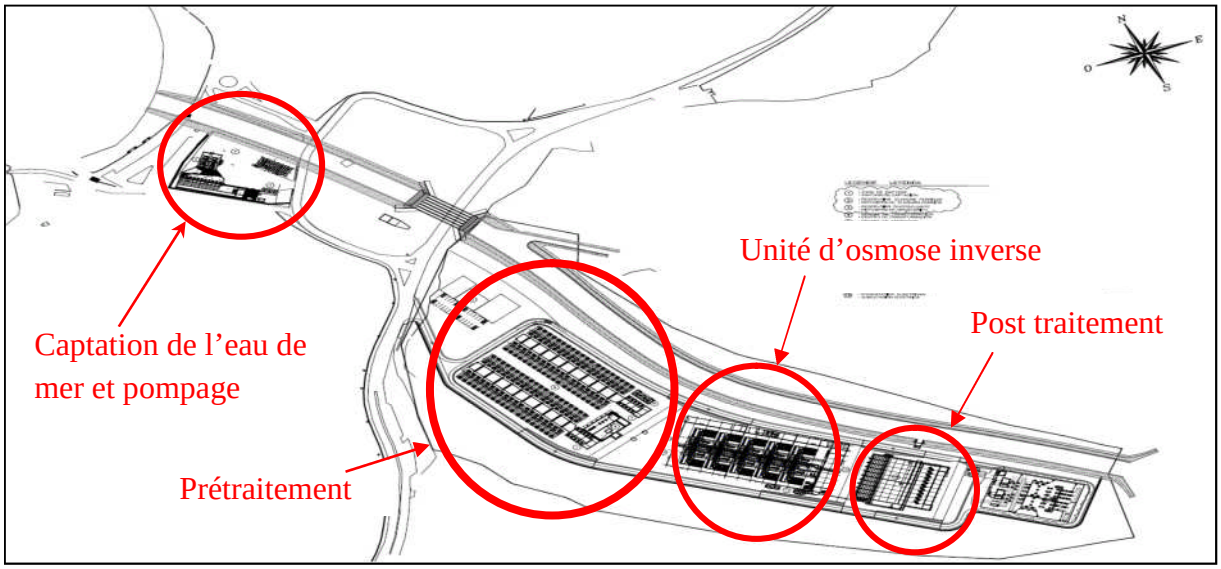


Figure IV.2: Vue en plan de la station.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.3.Etapes de dessalement d'eau de mer de Honaïne :

Les différentes phases de dessalement, appliquées dans cette station sont :

- Phase de Captation et pompage ;
- Phase de filtration ;
- Phase d'osmose inverse ;
- Phase de reminéralisation ;
- Phase de refoulement.

Figure IV.3: Vue générale de la station.

IV.3.1. Phase de captation et pompage:

Cette phase a comme objectif de capter l'eau et d'éliminer les particules grossières et de préparer l'eau pour les deux phases de filtration ultérieures.

La prise de mer se fait à une profondeur de 7 m et de 1800 m du bord de la plage.

La captation est réalisée par prise d'eau ouverte et le captage est effectué au moyen d'une tour de captage et pompé par 11 pompes dont 10 en service et 01 de secours.

Le captage doit pouvoir garantir 5 objectifs fondamentaux, à savoir :

- Garantir la quantité de l'eau de mer nécessaire ;
- Avec la meilleure qualité possible ;
- Avec la moindre variation de la qualité physique chimique et biologique ;
- Avec le moindre coût possible ;
- Avec le moindre impact physique et environnemental.

Tous ces objectifs pourraient conditionner à long terme le fonctionnement de l'usine.

Figure IV.4: Vue de la captation et pompage.

Dans la figure ci-dessus, nous pouvons voir une vue d'ensemble de la phase de captation et pompage, qui composée essentiellement de :

- ✓ La tour de captage (située 1800 m du bord de la plage) ;
- ✓ filtres rotatifs ;
- ✓ les pompes d'eau de mer ;
- ✓ Le Prétraitement Chimique.

IV.3.1.1.La tour de captage :

La tour de captage est de forme hexagonale en béton armé de 9 mètres de hauteur par rapport à l'appui sur le fond marin. Cette tour est disposée de 06 fenêtres de 02 x1.5 m de surface pour l'entrée d'eau brute, avec une vitesse <0.3m/s, ces fenêtres sont situées à 07 m au-dessus du fond.

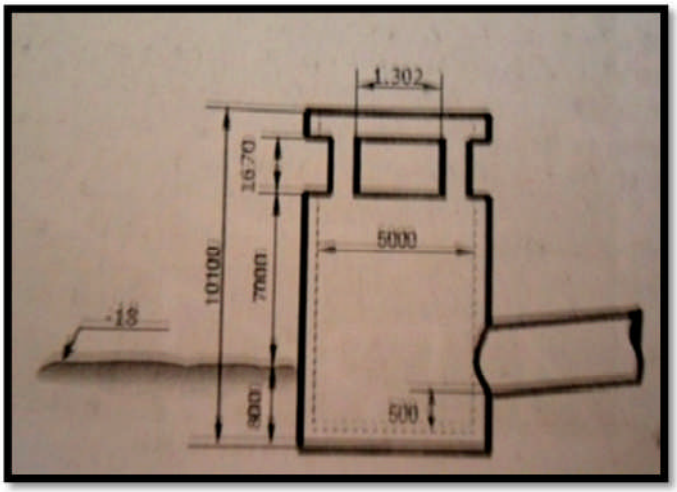


Figure IV.5: Tour de captage d'eau de mer.

IV.3.1.2. Filtre rotatif :

Il ya deux filtres rotatifs, que l'on peut appeler aussi tamis rotatif, avec un maillage de 01mm qui ont comme objectif d'éliminer les éléments solides et les algues et la matière organique présent dans l'eau de mer.

Les matériaux extraits des tamis rotatifs sont dirigés vers un bac ou se trouvent des pompes d'extraction de matériaux en suspension.

Figure IV.6: Tamis rotatifs.

IV.3.1.3. Pompe d'eau de mer :

Le débit total du groupe de pompage de la tour de captage est légèrement supérieur au débit nécessaire (18934 m^3/ h) car il doit assurer également l'eau nécessaire au lavage des tamis. Les pompes d'eau de mer sont de type à aspiration à vide, elles sont installées en parallèles. Chaque pompe d'eau de mer pompe 1893 m^3/h.

Figure IV.7 : Les pompes d'eau de mer.

IV.3.1.4. Le prétraitement chimique:

Il consiste en l'injection d'hypochlorite de sodium et de chlorure ferrique.

IV.3.1.4.1. Dosage d'hypochlorite de sodium :

L'injection d'hypochlorite de sodium au niveau de l'aspiration des pompes d'eau de mer. Cette injection s'effectue à l'aide de cinq pompes (4 en service et 1 en secours) de dosages de débit nominal d'environ 200 l / h chacune.

L'ajout du produit chimique s'effectuera dans la tour de captage ou dans l'aspiration des pompes à eau de mer ou dans l'impulsion des pompes à eau de mer.

Deux citernes d'hypochlorite de 140 m^3 de capacité chacune. Pour le remplissage des réservoirs, une pompe de 33 m^3/h de débit est installée.

Figure IV.8: Les deux réservoirs d'Hypochlorite de sodium.

IV.3.1.4.2. Dosage de chlorure ferrique :

L'injection de chlorure ferrique a pour but d'éliminer les matières en suspension et les matières colloïdales présentes dans l'eau de mer. Le chlorure ferrique, substance coagulante, favorise la formation de flocs qui sont ensuite éliminés dans les filtres sous pression. Cette injection est également effectuée à l'aide de cinq pompes (4 en service et 1 en secours) ayant un débit nominal de 100 l/ h.

L'ajout de produit sera effectué en ligne et après le refoulement des pompes d'eau de mer. On dispose de deux réservoirs de dissolution de 70 m^3 de capacité chacun.

Figure IV.9: Réservoirs de chlorure ferrique.

IV.3.2. La phase de filtration :

Cette Filtration s'effectue sur différents types de filtres qui sont :

- Un système de filtre à sable et anthracite ;
- Un Système de filtre à cartouches.

IV.3.2.1.Système de filtration à sable et anthracite:

Ce système est constitué de 80 filtres répartis en 48 pour la première étape et 32 dans la seconde étape de filtration pour assurer l'élimination d'autres particules présentes dans l'eau brute, ils sont placés horizontalement.

Les filtres sont de 3,7 m de diamètre et 11 m de longueur cylindrique, équivaut à une surface effective de 40,31m^2.

Figure IV.10: Les filtres à sables.

Ils contiennent dans la première étape :

- ✓ Une Couche supérieure de 600 mm de hauteur d'anthracite de 0.4 à 1.6 mm de diamètre, pour l'élimination des odeurs d'eau de mer.
- ✓ Une couche intermédiaire de 400 mm de hauteur de lit de sable de 0.4 à 0.8 mm de diamètre.
- ✓ Une couche inférieure comprenant 100 mm de lit de gravier de 1.4 à 2.5 mm et 100 mm d'une taille effectifs de 4 à 8 mm.

Dans la seconde étape :

- ✓ Une Couche supérieure de 700 mm de hauteur d'anthracite de 0.4 à 0.8 mm de diamètre.
- ✓ Une couche intermédiaire de 200 mm de hauteur de lit de sable de 0.55 mm de diamètre et de 1.4 de coefficient d'uniformité.
- ✓ Une couche inférieure comprenant 100 mm de sable de 2 mm.

Chaque filtre héberge à l'intérieur une plaque support équipée des buses qui sont les crépines sur lesquelles est situé le lit filtrant. Il est installé un total de 50 buses par m^2 de surface du filtre.

Figure IV.11: Les crépines.

Ces filtres sont dotés d'un système de lavage comprenant 3 pompes et 3 soufflantes, Le fluide de lavage est de la saumure. Qui sont utilisés par démarrage automatique avec un lavage de 4 filtres en même temps on parallèle.

- L'objet de ce système est de laver les filtres de la saleté qu'ils ont retirée de l'eau de mer et qui provoque une perte de charge qui a tendance à augmenter dans le filtre, en fonctionnement normal.
- Les critères de lavage sont les suivants :
  - Si la pression différentielle entre l'entrée et la sortie est supérieure ou égale à 0,7 bars,
  - le débit dans un filtre est de 80% par rapport au débit du fonctionnement optimal du filtre.

Figure IV.12: Les pompes de lavage.

Figure IV.13: Les soufflantes.

IV.3.2.2.Système de filtration à cartouches :

Ces filtres effectuent une microfiltration et sont équipés de cartouche de type bobiné en polypropylène de filtrage en profondeur avec un seuil de séparation de 15 microns absolus et une efficacité dans le brassage de particules de 99,6%. Ces filtres sont remplacés périodiquement.

Les filtres à cartouche protègent la pompe à haute pression contre n'importe quelle particule abrasive qui pourrait occasionner des dommages aux refoulant. Il protège aussi les membranes contre le bouchage ou les obstructions des canaux hydrauliques.

Avant et après les filtres à cartouche, des prises d'échantillon d'eau pour le mesure du SDI sont installées, afin de déterminer l'efficacité de la filtration et la qualité de l'eau avant d'entrer dans les membranes.

La station est équipée de 20 filtres à cartouches, et dans chaque filtre il y a 170 cartouches.

Figure IV.14: Les filtres à cartouches.

Figure IV.15: Présentation des cartouches.

❖ **L'injection de méta bisulfite de Sodium :**

Les membranes, spécialement celles en polyamide, sont très sensibles aux oxydants et surtout au Cl_2, présent dans l'eau en raison des processus de chlorations. Déchloration est le processus d'élimination ou de réduction du chlore. Les réactifs les plus employés dans la déchloration sont les solutions aqueuses de composés de sulfite.

L'injection de méta bisulfite de Sodium a pour but de réduire le chlore avant l'introduction dans les membranes d'osmose inverse.

Figure IV.16: Citerne de méta bisulfite de Sodium.

L'ajout du produit s'effectuera avant les filtres à sables ou avant les filtres à cartouche pour donner le maximum de temps de contact possible. Ce produit est stocké dans deux citernes d'accumulation de 13 m^3 de capacité chacune. L'injection s'effectue à l'aide de 5 pompes de dosage (4 en service et 1 en secours).

❖ **L'injection d'un anti incrustant :**

L'injection d'un anti incrustant a pour objectif de ne pas avoir la forme cristal de l'eau dans la membrane, afin de préserver cette dernière.

❖ **Mesure du SDI :**

Le protocole de la mesure du SDI est comme suit :

- Avant d'installer le dispositif d'analyse, rincez la ligne d'échantillon pendant 3 ou 5 minutes.
- Ouvrez la vanne qui se trouve localisée dans le dispositif d'analyse et rincez le dispositif pendant 2 minutes avec de l'eau qui sera analysée.
- A l'aide du régulateur de pression, établissez la pression à 2-3 bars. Le boulon ajusté du régulateur devra être réglé tant qu'il existera un petit flux.
- Fermez la vanne et libérez la pression.

Rapport-Gratuit.com

- Placez soigneusement le filtre de 0,45 µm et de 47 mm de diamètre dans un container de filtre. Placez la partie brillante du filtre vers le haut. Avec le doigt appuyez doucement sur les vis.
- Ouvrez partiellement la vanne et tandis que l'eau coule à travers le dispositif, desserrez soigneusement les deux manivelles et inclinez le container pour vous assurer que tout l'air a été éliminé du container de filtre.
- Placez le cylindre gradué pour mesurer le flux
- Ouvrez la vanne complètement et mesurez le flux. A l'aide du chronomètre, déterminez en combien de temps le bécher de 500 ml se remplit. Enregistrez le temps.
- Après 15 minutes, mesurez le flux. A l'aide du chronomètre, déterminez en combien de temps le bécher de 500 ml se remplit, enregistrez le temps.

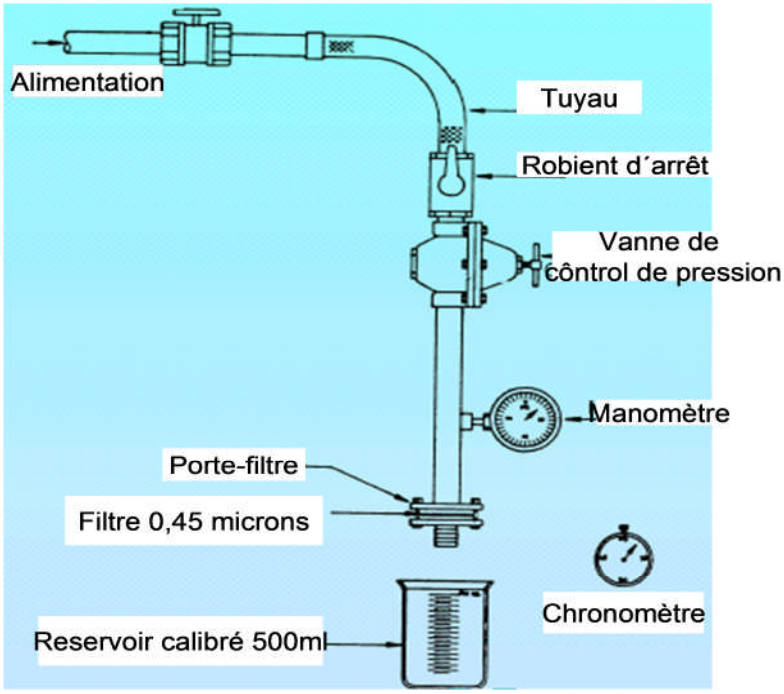


Figure IV.17: Appareil de mesure de SDI.

IV.3.3. Phase d'osmose inverse:

La phase d'osmose inverse est la partie principale de la station, elle est constituée par 10Unités aussi dénommées Rack (châssis) et chaque unité est composé de :

- Châssis à membranes ;
- pompe à haute pression ;
- Pompe de recirculation ;
- Système d'Echange de Pression.

Figure IV.18: Bloc d'osmose inverse.

Afin de démarrer l'unité, il faut vérifier les paramètres suivants :

- ✓ Turbidité après les filtres a cartouches <0.05 NTU ;
- ✓ SDI après les filtres à cartouches <4 ;
- ✓ Redox après les filtres à cartouches <200mv.

Figure IV.19: Appareillage de mesure avant l'entrée d'eau dans les châssis.

IV.3.3.1.Châssis à membranes :

La conception réalisée au niveau de l'usine de dessalement correspond au traitement par étape, en installant pour chaque châssis 222 modules, chaque tube contient 07 membranes de type SWC5 max de Hydranautics. La capacité de production nominale de chaque châssis étant de 20300 m^3/jour. Le facteur de conversion de l'usine est de 47 %.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure IV.20: Châssis a membranes.

IV.3.3.2.Pompe à haute pression :

Les pompes à haute pression impulsent la solution à traiter vers les membranes, elles ont une grande importance car ce sont elles qui consomment la plus grande partie d'énergie du processus.

Dans le processus d'osmose inverse on utilise généralement deux types de pompes :

- Alternatives ou déplacement positif.
- Centrifuge qui est le type utilisée dans la station de Honaïne.

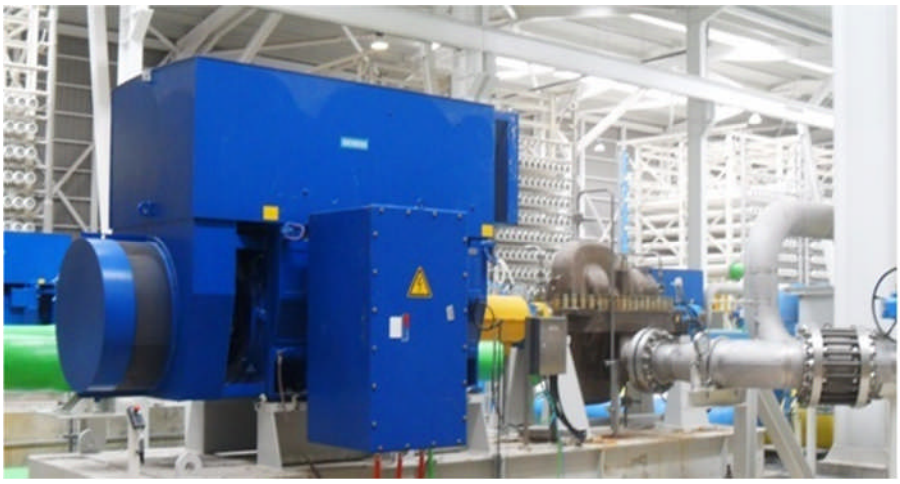


Figure IV.21: Pompe à haute pression.

IV.3.3.3.Pompe de recirculation:

Dans le système d'osmose inverse utilisé, une pompe de recirculation est installée, dans un but d'augmenter la pression de l'eau de mer provenant du système de récupération d'énergie avant le flux d'eau de mer provenant de la pompe centrifuge à haute pression. Cette augmentation est nécessaire pour compenser les pertes de charge produites dans les membranes, le récupérateur d'énergie et la tuyauterie.

Les pompes à haute pression donnent un débit de 866 m^3/h, quant aux pompes de recirculation, elles donnent un débit de 937 m^3/h.

Figure IV.22: Pompe de recirculation.

IV.3.3.4. Récupération d'énergie avec échangeur de pression :

Pour la récupération de l'énergie de la saumure, il est prévu des systèmes d'échange de pression. Dans ce sens, 22 échangeurs de pression de type ERI sont installés avec une pompe de récupération au sein de chaque rack de l'usine de dessalement. Une pression de 64 bars environ est nécessaire pour le dessalage de l'eau de mer par osmose inverse. L'eau quitte les membranes à une pression résiduelle de 62 bars. Le système ERI récupère 93 à 97% de cette énergie et rend ainsi abordable le traitement par osmose inverse de l'eau de mer.

Le dispositif de récupération d'énergie facilite le transfert de pression du courant de rejet saumâtre à haute pression au courant d'alimentation en eau de mer à basse Pression. Il fait ceci en mettant les deux courants en contact momentané direct ce qui se produit dans les conduits d'un rotor. Le rotor est introduit dans un manchon en céramique entre deux capuchons en céramique avec des jeux précis qui, lors du remplissage avec de l'eau à haute pression, créent un palier hydrodynamique presque sans friction. À tout instant donné, la moitié des conduits du rotor sont exposés au courant à haute pression et l'autre moitié au courant à basse pression. Alors que le rotor tourne, les conduits passent une zone scellée qui sépare la haute pression et la basse pression. Ainsi, les conduits qui contiennent la haute pression sont séparés des conduits adjacents contenant la basse pression par le joint d'étanchéité qui est formé avec les ailettes du rotor et le capuchon céramique.

Une représentation schématique des composants en céramique du dispositif de récupération d'énergie est donnée dans la figure suivante.

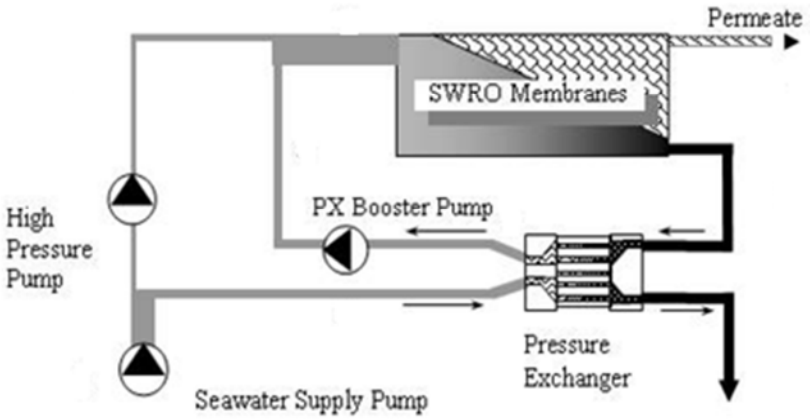


Figure IV.23: Représentation schématique du dispositif de récupérateur d'énergie.

L'eau de mer fournie par la pompe d'alimentation en eau de mer circule dans un conduit de rotor sur le côté gauche à basse pression. Ce flux expulse la saumure du conduit sur le côté droit. Une fois que le rotor tourne après une zone scellée, la saumure à haute pression circule dans le côté droit du conduit, comprimant et expulsant l'eau de mer. L'eau de mer pressurisée ressort alors vers la pompe de surpression.

Figure IV.24: Installation des échangeurs de pression.

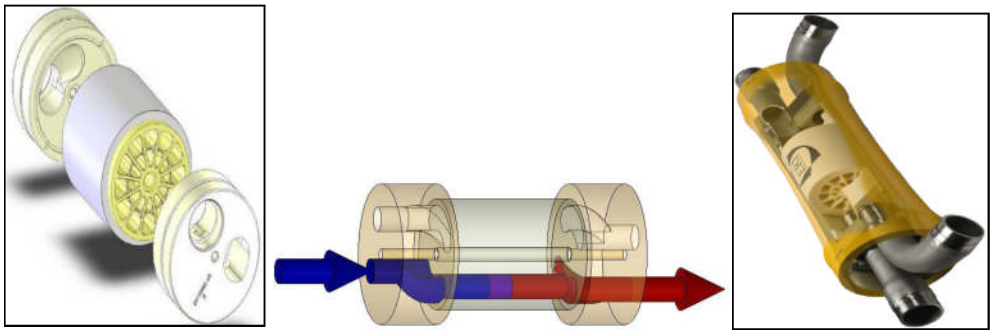


Figure IV.25: Echangeur de pression de type ERI.

Les Caractéristiques principales de fonctionnement de l'installation peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Caractéristiques principales de fonctionnement.

Désignation	Unité	Valeur
Production Continue Prévue	m^3/j	200 .000
Nombre total d'unité installée	U	10
Température de travail minimum prévue	^0C	18
Température de travail maximum prévue	^0C	24
Type de membrane		A enroulement en spirale.
Matériau de la couche active		Polyamide aromatique.
Rejet en sel	%	99.45
Nombre de membrane par cuve sous pression	U	07
Nombre d'étages	U	01
Pression d'entrée dans les membranes	Bars	64.5
Pression de sortie des membranes	Bars	62
Nombre de membrane dans le premier étage /unité	U	1820
Nombre de Cuve sous pression dans le premier étage /unité	U	260
Modèle de membrane		SWC5 Max Hydranautics
Châssis		
Nombre de ligne	U	9 (+ 6 tube de pression)
Nombre de colonne	U	24
Nombre de tubes de pression/ rack	U	222 [(9*24) +6]

- **Nettoyage chimique des lignes à haute pression :**

Il est nécessaire d'effectuer le lavage des membranes pour éviter les dépôts au niveau de la membrane.

Le lavage est fait par la soude caustique ou l'acide sulfurique qui sont dosés par des pompes doseuses. Ces produits sont stockés dans un réservoir de mélange.

Figure IV.26: Réservoir pour le nettoyage chimique.

Pour le nettoyage chimique, on dispose de deux citernes de stockage de produits chimiques de nettoyage, ainsi que d'un réservoir intermédiaire d'eau traitée.

Le signe pour qu'une membrane est colmaté sont :

- La différence de pression, d'entrée et de sortie de la membrane est > 1.2 bar et l'augmentation de la perte de charge à travers les modules.
- La variation des débits de rejet.
- La pression d'alimentation augmente de plus de 10 %.
- Débit de perméat commence à diminuer.

La station jusqu'à maintenant ne fait pas le nettoyage chimique a cause de la nouveauté des membranes de filtration seulement les flaching avec d'eau perméat.

IV.3.4.Phase de reminéralisation :

IV.3.4.1.Post-traitement :

L'eau traitée provenant des châssis à membranes sera traitée avec un système d'ajout de CO_2 et des tours de calcite.

- L'injection du CO_2 a pour but de réduire le PH du perméat jusqu'à 5 pour rendre plus efficace le processus de reminéralisation par les tours de calcite.

Figure IV.27: Les deux Réservoir de CO_2 (liquide).

Figure IV.28: Système d'injection de CO_2 gaz.

Les tours de calcite sont au nombre de dix(10) tours, et elles sont annexées au réservoir d'eau produite, et ayant chacune une surface de 56.345m^2. Il existe à l'intérieur d'elles un double fond avec des tuyaux de distribution sur lequel est situé le lit de calcite d'une hauteur de 2.86m. La tour de calcite est composée du carbonate de calcium Ca CO_3.

Figure IV.29: Réservoir d'eau produit.

IV.3.4.2.Dosage d'hypochlorite de sodium :

L'ajout d'hypochlorite de sodium s'effectue dans le réservoir d'eau produite. Deux citernes d'hypochlorite de 30 m^3 de capacité chacune, sont prévues pour cette opération. L'injection d'hypochlorite s'effectue à l'aide de pompes de dosage (2 en service et 1en secours).

Figure IV.30: Réservoir d'Hypochlorite de sodium.

IV.3.5.Phase de refoulement :

Après la reminéralisation, l'eau traitée est stockée dans un réservoir de stockage d'eau traitée et pompée vers le collecteur d'eau principale avec une pression de l'ordre de 30 bars.

Le pompage des eaux produites est effectué par 11 pompes (10 en service et 1 en secours) pour refouler l'eau depuis le réservoir de stockage produit de 5000 m^3, il est à chambre double, vers une station de pompage (1) à sidi Ahmed dans la commune de Remchi.

Figure IV.31: Les pompes de refoulement.

❖ **Rejet de saumure :**

Le rejet de la saumure est assuré parles installations de rejet. Les points d'admission est suffisamment loin dans le large pour ne pas perturber le bon fonctionnement de ladite station, et ceci dans toutes les conditions météorologiques. Le point de rejet est positionné de telle sorte que la saumure, qui a une forte salinité ne sera pas recirculer dans l'eau captée qui doit subir le dessalement.

Figure IV.32: Rejet de saumure.

Rapport-Gratuit.com

IV.4. Résultats et interprétations :

IV.4.1. Objectif :

L'objectif de cette étude est d'analyser certains paramètres permettant d'évaluer le degré et les performances de l'osmose inverse au niveau de la station de dessalement de Honaïne en effectuant un suivi et un contrôle de ces paramètres sur une période de service continue de l'installation. Cette étude a été faite lors de notre passage à la station de dessalement, durant un stage du 02/06/2013 au 11/06/2013.

IV.4.2. Caractéristiques principales d'unité d'osmose inverse :

IV.4.2.1. Calcul du taux de conversion :

Le taux de conversion Y de la membrane est calculé avec l'équation suivante :

$Y = Q_p/Q_0$, on a $Q_0 = Q_{AB} + Q_{HP}$ (IV.1)

Q_p : débit perméat (m^3/h).

Q_{AB}: debit aspersion Booster (m^3/h).

Q_{HP}: débit de pompe H_P (m^3/h).

Q_0 : débit d'alimentation (m^3/h).

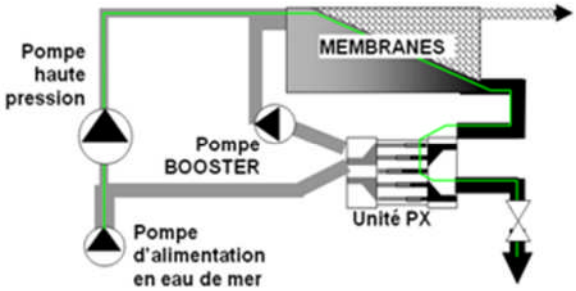


Figure IV.33 : Schéma présentatif des débits entrants.

Tableau IV.2: Taux de conversion durant une période.

Date	Q_{HP}	Q_{AB}	Q_0	Q_p	y	Y(%)
02/06/2013	975	856	1831	851	0,46	46,47
03/06/2013	972	865	1837	858	0,46	46,70
04/06/2013	977	843	1820	850	0,46	46,70
05/06/2013	966	873	1839	869	0,47	47,25
06/06/2013	975	855	1830	886	0,48	48,41
09/06/2013	988	869	1857	875	0,47	47,11
10/06/2013	969	866	1831	867	0,47	47,35
11/06/2013	965	858	1823	890	0,48	48,82
					0,47	47,35

La moyenne est donc : 47 %.

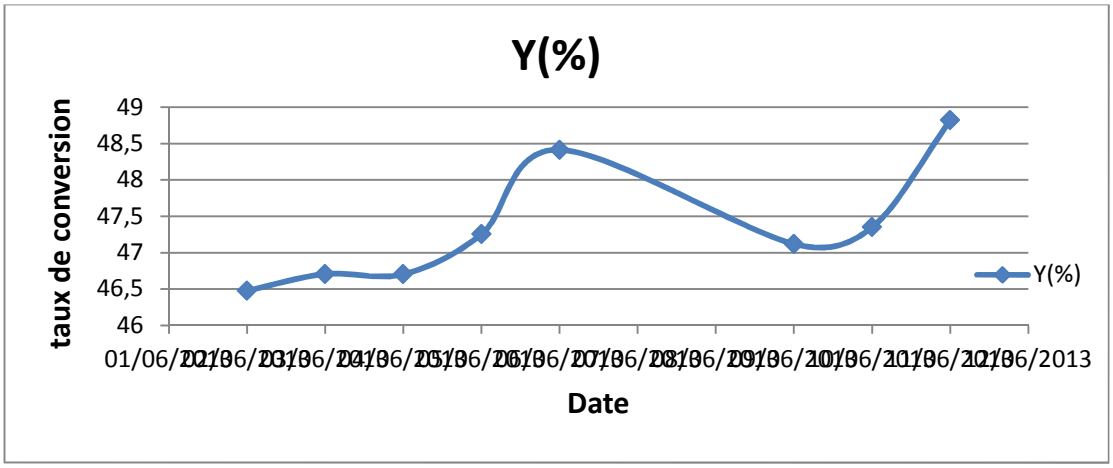


Figure IV.34 : Présentation du taux de conversion durant une période donnée.

✓ **Interprétation:**

En observant les résultats obtenus, nous constatons que la variation du taux de conversion n'est pas importante avec une valeur minimale de 46,47 % et une valeur maximale de 48,82 %.

IV.4.2.2. calcul du taux de rétention :

Le taux de rétention est :

$$TR = 1 - \frac{Cp}{Ca} \qquad \text{(IV.2)}$$

C_p : Concentration du perméat (mg/l)

C_a: Concentration de l'eau d'alimentation (mg/l)

On calcule tout d'abord la concentration en sels de l'eau d'alimentation et du permeat à l'aide des relations suivante :

Ca (mg/l) = 0,7 x conductivités à 25°C (µs/cm)

Cp (mg/l) = 0,55 x conductivités à 25°C (µs/cm)

TR= [1-(conductivité * 0.55)/ (conductivité d'eau de mer*0.70)]*100

La conductivité d'eau de mer =55000µs/cm

Le coefficient k dépend du type d'eau (eau de mer, permeat, concentrât).

En première approximation :

k = 0,55 pour du perméat ;

k = 0,70 pour l'eau de mer ;

k = 0,75 pour le concentrât.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau IV.3: Variation du taux de rejet de la membrane.

date	conductivité de perméat (µs/cm)	taux de rétention (%)
02/06/2013	495	99,29
03/06/2013	525	99,25
04/06/2013	475	99,32
05/06/2013	489	99,30
06/06/2013	452	99,35
09/06/2013	491	99,30
10/06/2013	448	99,36
11/06/2013	430	99,39

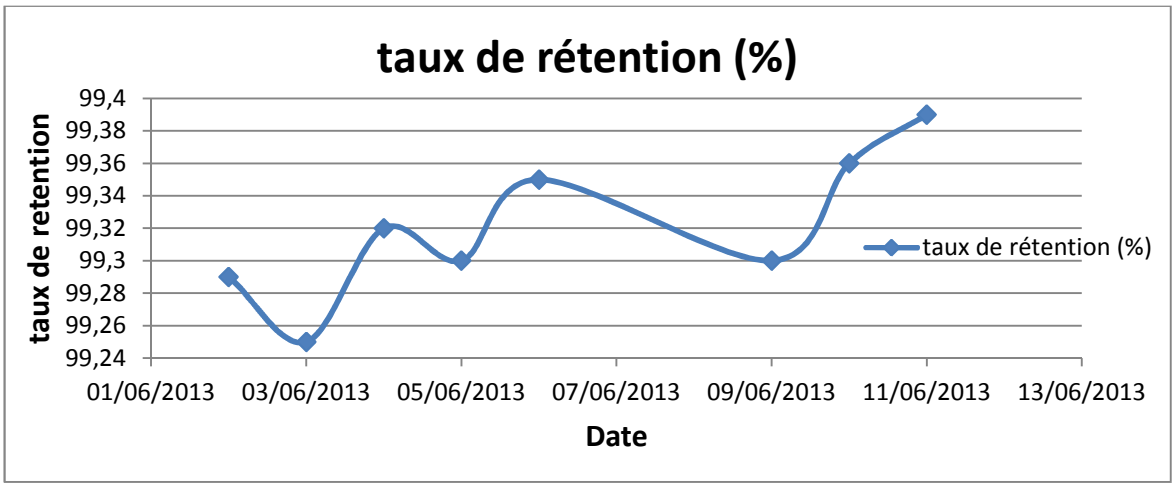


Figure IV.35: Variation du taux de rétention de la membrane.

✓ **Interprétation :**

Nous remarquons le taux de rejet est élevé, ceci est dû à la saturation des membranes, où il a atteint la valeur maximale de 99,39$^0/_0$.

IV.4.3. Qualité d'eau produit :

Tableau IV.4 : Normes des eaux potables.

Paramètres	Unités	Valeur de REF	Valeurs limites
pH	-	7-8.5	7-8.5
température	°C	25	25
conductivité	µS/cm	2800	2800
TDS (total des sels dissous)	mg/l	1400	1400
Cl_2	mg/l	1	5
turbidité	NTU	-	-
dureté totale	mg/l	65+-10% mg/l en Ca CO3	500
calcium	mg/l	-	200
magnésium	mg/l	-	150
alcalinité totale	mg/l	50 a 65 mg/l en Ca CO3	-
carbonates	mg/l	-	-
bicarbonates	mg/l	-	-

Valeurs de référence : contrat d'acheteur et recommandation NA (norme algérienne)

Valeurs limites : concentration maximale admissibles selon NA.

IV.4.3.1.Mesure du pH :

Tableau IV.5 : Variation du pH d'eau produit.

Date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
pH	8,42	8,42	8,43	8,42	8,43	8,43	8,41	8,41

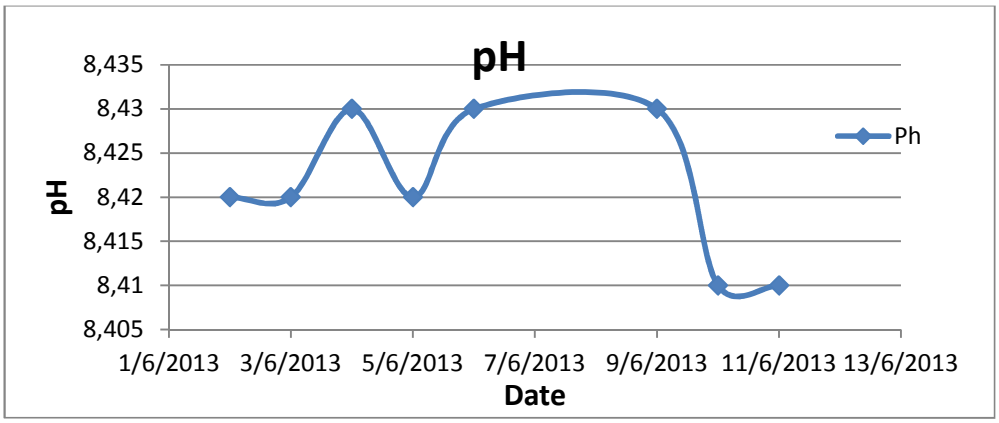


Figure IV.36: Variation du pH durant une période.

- ✓ **Interprétation :**

Nous constatons que la variation du pH durant la période indiquée sur le tableau est presque constante, et dans les normes (7<pH<8.5).

IV.4.3.2.Mesure de la température :

Tableau IV.6: Variation de la température d'eau produit.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
T (°C)	21,4	22	22	22,3	21,3	21,9	20,9	21,4

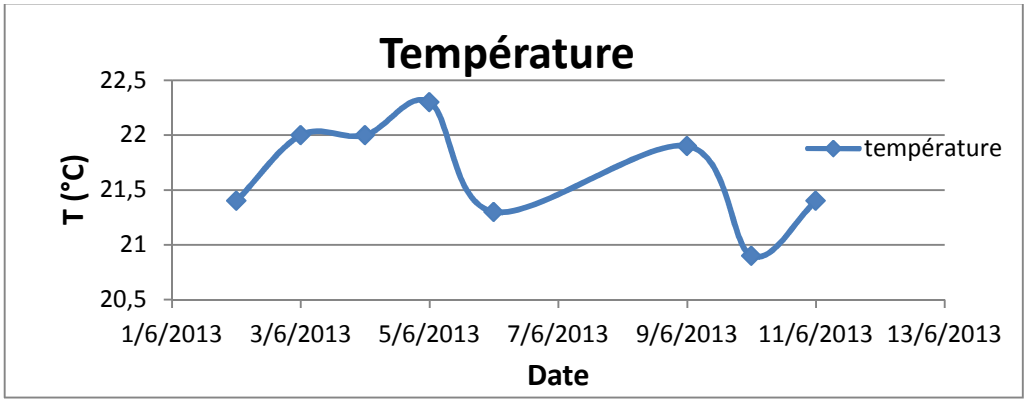


Figure IV.37: Variation de la température.

✓ **Interprétation :**

La température connaît une variation, qui est due au climat, car la maximale est de 22,3°C et la minimale est de 20,9 °C. Cependant, les valeurs restent dans les normes qui obligent qu'elle soit inférieure à 25°C.

IV.4.3.3.Mesure de la conductivité :

Tableau IV.7: Variation de la conductivité d'eau de sortie.

Date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
Conductivité (µS/cm)	560	557	580	578	568	572	553	567

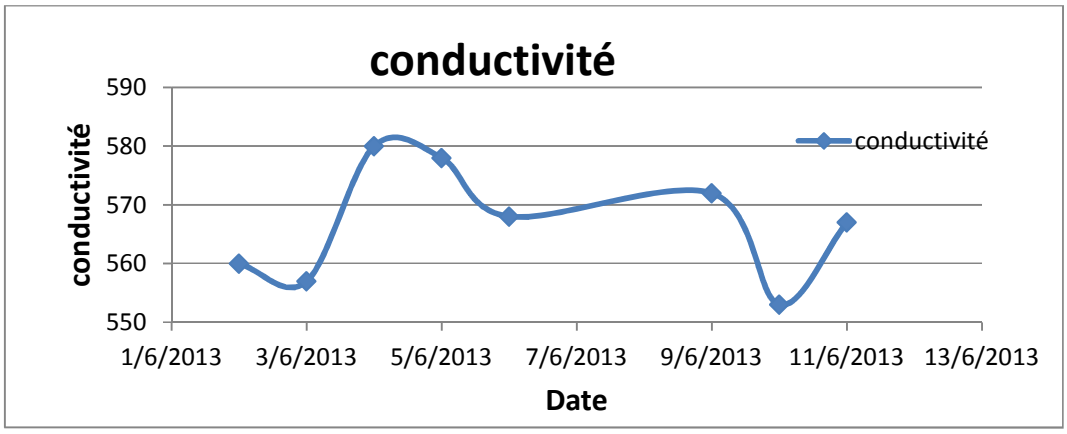


Figure IV.38: Représentation de la variation de la conductivité.

✓ **Interprétation :**

Nous constatons que les valeurs sont différentes avec une valeur maximale de 580µS/cm, et sont dans les normes Algériennes (< 2800).

IV.4.3.4.Mesure du taux des sels dissous (TDS):

TDS (mg/l) = 0.5* conductivitie (µs/cm)

Tableau IV.8: Variation du taux des sels dissous.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
TDS (mg/l)	280	278,5	290	289	284	286	276,5	283,5

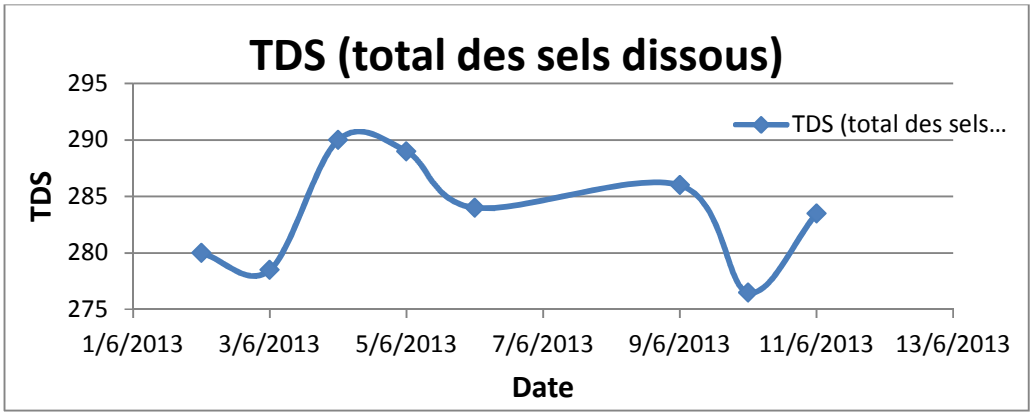


Figure IV.39: Variation du total des sels dissous.

✓ **Interprétation :**

Les résultats sont dans les normes, la norme qu'il ne faut pas dépassé est de 1400 mg/l.

IV.4.3.5.Mesure du chlore libre:

Tableau IV.9: Variation du chlore libre dans l'eau traité.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
Cl_2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4

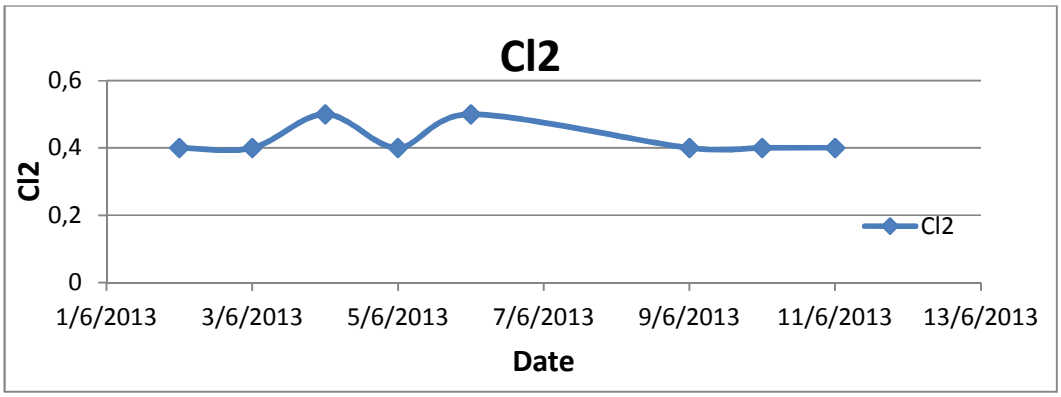


Figure IV.40: Variation du chlore libre présent dans l'eau.

✓ **Interprétation :**

Il est à noter que le chlore libre est presque constant durant cette période, c'est-à-dire l'injection du chlore se fait correctement.

IV.4.3.6.Dosage de l'alcalinité:

Tableau IV.10: Résultat d'alcalinité total d'eau traité.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
Alcalinité total (mg/l)	60	60	60	60	60	60	60	60

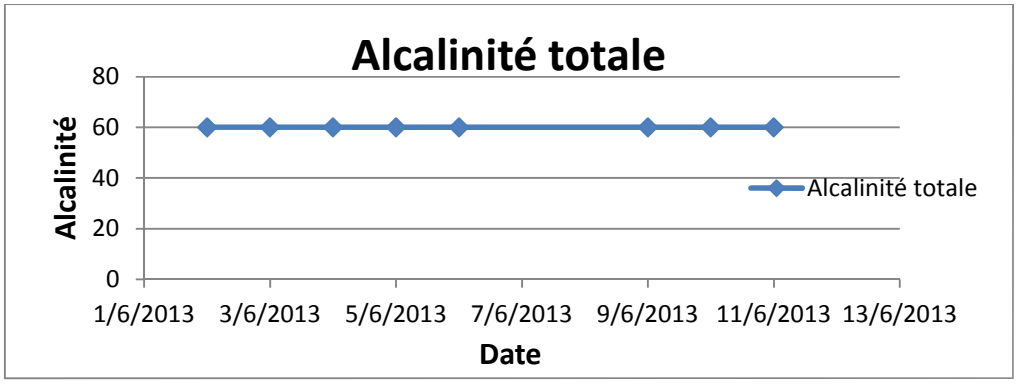


Figure IV.41: Variation du l'alcalinité en fonction d'une période.

✓ **Interprétation :**

On voit qu'elle est constante, elle est bien conforme avec les normes, entre 50 et 65 mg/l de Ca Co_3.

IV.4.3.7.Dosage de la dureté totale par complexometrie EDTA :

Tableau IV.11: Résultat obtenue de la dureté total.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
Dureté total (mg/l)	60	60	60	60	70	60	60	60

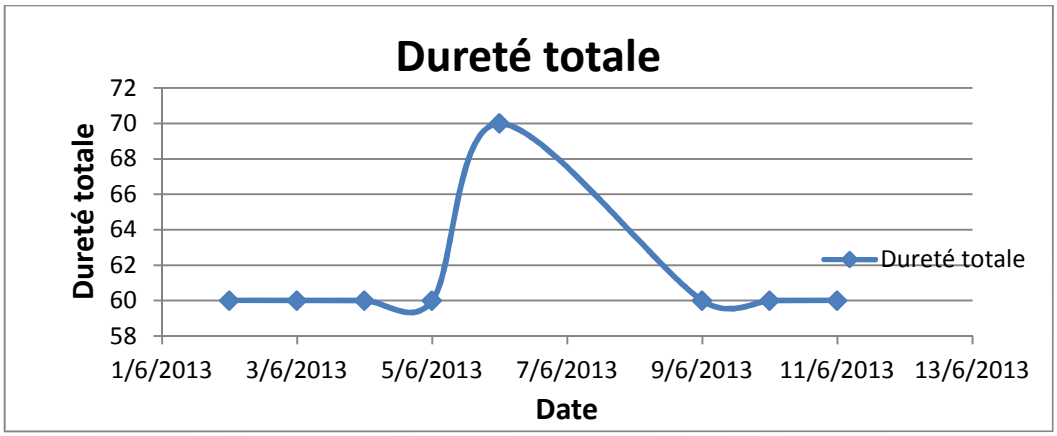


Figure IV.42: Variation de la dureté totale.

✓ **Interprétation :**

La dureté est stable pendant presque toute la periode de notre stage que nous avons effectué au niveau de la station de dessalement de Honaïne, avec une valeur maximale de 70 mg/l , la norme est de 65+-10% mg/l en Ca CO_3 selon les normes algériennes.

IV.4.3.8.Détermination de la concentration du calcium et magnésium :

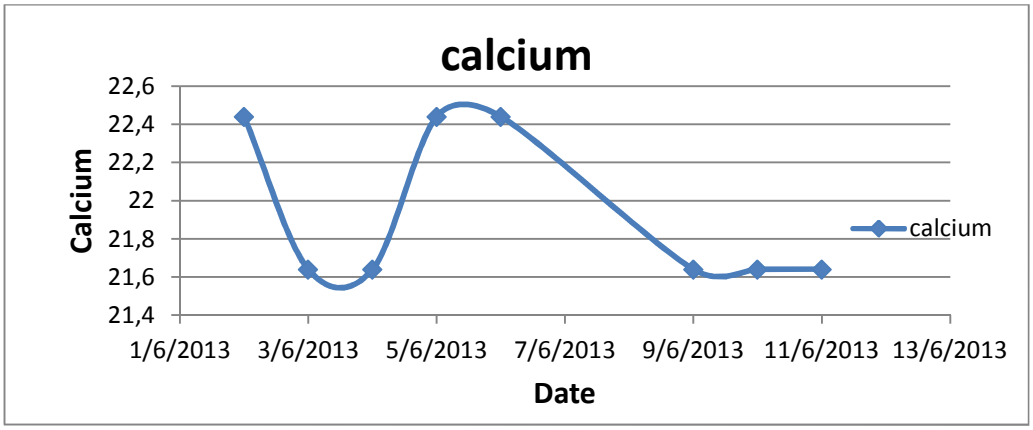
Il faut savoir que :

$$TH\ (F°) = Ca^{2+} + Mg^{2+} \qquad (VI.5)$$

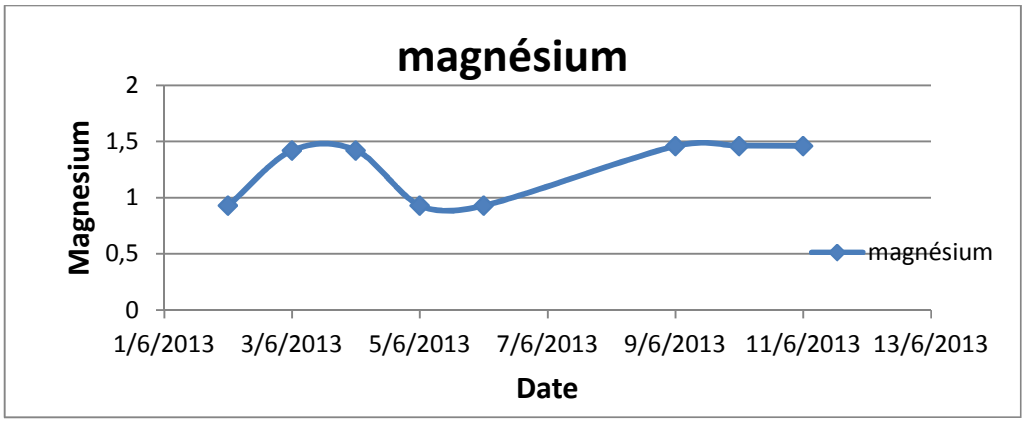
$$T\ en\ Ca^{2+} = [N_{EDTA} * V_{EDTA} * 1000] / [V_0 * 20] \quad (mg/l)$$

Tableau IV.12: Résultats de la variation du la concentration de Ca^{2+} et Mg^{2+}.

date	2/6/2013	3/6/2013	4/6/2013	5/6/2013	6/6/2013	9/6/2013	10/6/2013	11/6/2013
Calcium (mg/l)	22,44	21,64	21,64	22,44	22,44	21,64	21,64	21,64
Magnésium (mg/l)	0,93	1,42	1,42	0,93	0,93	1,46	1,46	1,46



Figures IV.43: Variation de la concentration du Ca^{2+}.



Figures IV.44: Variation de la concentration du Mg^{2+}pendant la période donné.

✓ **Interprétation :**

Selon les deux graphes qui précèdent, les concentrations de calcium et du magnésium sont inférieurs aux valeurs limites donc elles sont dans les normes, sachant que pour le calcium, la valeur limite est de 200 mg/l et celle de magnésium est de 150 mg/l.

IV.5. Interprétation générale :

L'usine est équipée de tous les systèmes nécessaires et autres installations de soutien, comme un système de lavage et nettoyage les filtres à sables, système de nettoyage des membranes d'osmose inverse, dosage des produits chimiques, comprimer l'air, système d'approvisionnement en eau de service, afin d'assurer le bon fonctionnement de cette usine en tout moment.

- Equipements de procès :

Les appareils et accessoires suivants doivent équiper les différents circuits afin d'assurer un contrôle de la marche de l'usine de dessalement :

- indicateurs de pression différentielle, doublés de manomètres pour la mesure de l'état d'encrassement des différents filtres et des éléments d'osmose inverse ;
- capteur de température sur eau prétraitée ;
- débitmètres électromagnétiques sur perméat et concentrât ;
- robinets de prise d'échantillon….

- Analyses de l'eau de mer (une fois par semaine) :

Pour l'analyse d'eau de mer se font à un laboratoire extérieur ainsi pour les analyses bactériologiques.

- Caractéristiques du perméat :

L'analyse de l'eau traitée avant distribution se fait tous les jours:

pH ; Température ; Conductivité ; TH ; Ca ; TAC ; Chlore libre ;…

- Relevés journaliers des grandeurs physiques : débits – pression pour tous les jours
  - Encrassement des filtres ;
  - Pression d'alimentation ;
  - Pression concentrât ;
  - Pertes de charge entre circuits alimentation et concentrât (par calcul) ;
  - Débit perméat ;
  - Débit concentrât ;
  - Débit d'alimentation (par calcul) ;
  - Pression perméat ;
  - Production journalière de perméat ;…
- Autres indications à enregistrer :
  - Le réglage des pompes doseuses.
  - Les consommations de produits chimiques, rapportées :
    - au m^3 d'eau d'alimentation, pour les prétraitements ;
    - au m^3 de perméat produit, pour les réactifs de post-traitements.

    Ces calculs doivent s'effectuer sur une base mensuelle.
  - Les dates de renouvellement des cartouches consommables de microfiltration.
- Paramètres influençant le débit du perméat et le rejet des sels :

Les performances d'un osmoseur sont influencées par :

- la pression d'alimentation ;
- la température de l'eau d'alimentation ;
- le facteur de conversion ;
- la concentration en sels de l'eau d'alimentation.

Le perméat est finalement soumis à une série de post-traitement chimique pour les rendre propres à la consommation humaine. Après l'après-traitement chimique, l'eau traitée est stockée dans un réservoir de stockage d'eau traitée et pompée vers le collecteur d'eau principale à 30 bars.

L'eau produit vendue à l'Algérienne des eaux (ADE) par Sonatrach, le prix contractuel est de 0,7560 dollar pour le mètre cube d'eau devant à terme diminuer. En rappelant que Sonatrach achète cette eau à la SMBH et la vend à l'ADE, les revenus générés par le projet permettant de compenser l'endettement contracté et Sonatrach étant remboursée en fin de compte par l'Etat.

Rapport-Gratuit.com

Donc Comme pour tous les autres projets de dessalement d'eau de mer, c'est le groupe Sonatrach qui achètera l'eau dessalée de Honaïne avant de la céder à l'ADE qui la vendra à son tour au consommateur.

IV.6. Conclusion :

L'augmentation rapide de la demande en eau due à l'accroissement démographique de la population, la sécheresse et le niveau critique des réserves d'eau conventionnelles, ont conduit le pouvoir public vers l'adoption de la politique de dessalement de l'eau de mer en Algérie.

Pour assurer bien le fonctionnement à long terme de la station de dessalement ainsi que ses performances, il est primordial d'effectuer toutes les analyses et les relevés permettant de suivre :

- l'exploitation ;
- la maintenance.

Ce suivi permettra, également, de diagnostiquer très tôt les problèmes, et d'apporter les mesures correctives nécessaires.

Conclusion générale

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les procédés membranaires font partie des nouvelles technologies utilisées pour la production d'eaux destinées soit à la consommation humaine, soit utilisées dans des industries soucieuses de la qualité requise (agroalimentaire, pharmacie, etc.).

La filtration membranaire est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point et dimensionner. La cause de ces difficultés est le colmatage qui reste difficile à éviter ou limiter et complexe à décrire. La stratégie générale à adopter pour développer ce procédé dans les meilleures conditions est donc basée sur un aller-retour entre des essais (de l'échelle du laboratoire vers l'industrielle) et leurs expertises qui nécessite des connaissances fondamentales et théoriques des phénomènes de transfert membranaire

Notre travail est basé sur une étude bibliographique concernant les membranes de filtration, leur classification et les caractéristiques principales…

Les problèmes rencontrés dans ce domaine sont très nombreux, parmi lesquels, le colmatage a la surface des membranes qui provoque la limitation de la durée de vie des membranes. Pour limiter le colmatage, il est nécessaire de choisir des conditions opératoires adaptées à un couple donné fluide/membrane.

Dans la partie stage, nous avons exposé la station de dessalement de Honaïne comme un exemple qui utilise les procédés membranaires pour la filtration d'eau de mer en utilisant l'osmose inverse ; les différentes étapes de dessalement sont expliquées. Ce qui ressort de cette partie est que les chaines de dessalement de la station fonctionnent correctement et ne posent pas beaucoup de problèmes à cause des nouveaux équipements de la station et la meilleure qualité de l'eau brutes qui entre dans la station.

L'étude et l'analyse de quelque paramètres de la qualité d'eau produit comme le pH, la température, la conductivité… nous ont ramené à conclure que la qualité d'eau dessalée est bonne en comparant avec les normes de potabilités appliquées en Algérie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] BERLND J et CATHERINE J. :« les procédés membranaires pour le traitement de l'eau ». Document technique, France, décembre 2002. http://www.fndae.fr. Consulté le : 15/02/2013.

[2] ARZATE A. : « procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire ». Document technique, Québec, 2008. http://www.centreacer.qc.ca. Consulté le : 26/02/2013.

[3] MADY C. : « couplage de procédés membranaires pour la production d'extraits anthocyaniques ». Thèse de doctorat, Montpellier, 2010. http://www.supagro.fr. Consulté le : 19/07/2013.

[4] CHRISTEL C. :« filtration membranaire (OI, NF, UF) caractéristiques des membranes ». Référence W4100, http://www.techniques-ingenieur.fr. Paris, Consulté le : 16/12/2012.

[5] CHRISTOPHE H. :« introduction a l'ultrafiltration et présentation du projet des GENELLES ». Fiche techniques, suisse, 2008. Consulté le : 01/06/2013.

[6] REMISE P. :« étude des rétro lavages assistés par l'air et contrôle du colmatage résiduel : application a la production d'eau potable en filtration frontale ». Mémoire de doctorat, université de Toulouse, 2006. http://eprint.insa-toulouse.fr. Consulté le: 23/03/2013.

[7] GEISMAR N. :« réduction du colmatage membranaire par ozonation et filtration sur charbon actif ». Thèse de magister, Montréal, 2011. http://publications.polymtl.ca. Consulté le : 19/03/2013.

[8] MENDRET J. :« mise au point de méthodes de caractérisation du colmatage de membranes : application a la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé et de l'environnement ». Université de Toulouse, 2007. http://eprint.insa-toulouse.fr. Consulté le : 14/02/2013.

[9] AIMAR P. :« filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) aspect théoriques : mécanismes de transfert ». Référence W2789 | Date de publication : 10/02/2010 |: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 26/02/2013.

[10] NAJAH W. :« dénitrification de l'eau potable en réacteur catalytique membranaire et photo catalytique ». Mémoire de doctorat, université Claude Bernard Lyon 1,2008. http://hal.archives-ouvertes.fr. Consulté le : 28/03/2013.

[11] GUNTHER J. :« caractéristique et optimisation des phénomènes de transfert dans un double bioréacteur à membranes ». Thèse de doctorat, Toulouse, 2009. http://ethesis.inp-toulouse.fr. Consulté le : 22/05/2013.

[12] MAUREL A. : « technique séparatives a membranes : considérations théoriques ». Référence J2790 : http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 26/01/13.

[13] REMIGY J. :« filtration membranaire (OI, NF, UF) présentation des membranes et modules ». Référence W4090: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 16/12/2012.

[14] dégréement : « mémento technique de l'eau (Tome 1) ». Dixième édition, 2005.

[15] AIMAR P. : « Séparations par membrane dans l'industrie alimentaire ». Référence f3250: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 26/02/2013.

[16] ANTOINE MONTIEL M. : « lignes directrices pour l'évaluation de l'innocuité des modules de filtration et de l'efficacité des procédés membranaires ». Fiche technique, Paris, 2005. http://www.anses.fr. Consulté le : 29/03/2013.

[17] NECHED A. :« Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène base densité et de gypse de bouzggaira ». Mémoire de Magister, université de Chlef, 2009.

[18] BOUCHARD C. :« étude pilote d'affinage par nano filtration pour la production d'eau potable », PFE chapitre 2 : revue de littérature sur la filtration membranaire ; 2005. http://theses.ulaval.ca. Consulté le : 17/12/2012.

[19] AIMAR P. :« Filtration membranaire (OI, NF, UF) : Mise en œuvre et performances ». Référence W4110: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 16/12/2012.

[18] MAUREL A. : « dessalement de l'eau de mer et l'eau saumâtres- et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce ». Édition technique & documentation, Paris, 2001.

[21] BESSIERE V. : « filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtre critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage ». Mémoire de doctorat de l'université Paul Sabatier en Génie des procédés et de l'environnement, 2005. http://hal.archives-ouvertes.fr. Consulté le : 31/05/2013.

[22] CARDOT C. : « génie de l'environnement : les traitements de l'eau procédés physicochimiques et biologiques cours et problèmes résolus ». Édition 2005.

[23] BENJAMIN E. :« Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage ». Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2003. http://wiesner.cee.duke.edu. Consulté le : 25/06/2013.

[24] FABY J. :« les procédés à membrane pour le traitement d'eau potable et l'épuration ». Document technique, Paris. http://www.bdsp.ehesp.fr .Consulté le : 01/06/2013.

[25] LEBLEU N. : « désinfection des eaux par procédés membranaires : études des mécanismes de transfert des bactéries ». Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2007. Consulté le : 17/02/2013.

[26] BESSIERE Y. :« filtration frontale sur membrane ». Mémoire de doctorat, université de Toulouse III, 2005. Consulté le : 31/05/2013.

[27] DAUFIN G. : « les techniques membranaires à gradient de pression ». Document techniques, Paris, 2006. www.ademe.fr. Consulté le : 17/03/2013.

[28] ALFA ARZATE D. :« la séparation membranaire : comment maintenir la performance des membranes ? ». Fiche technique, Québec. http://www.centreacer.qc.ca .Consulté le : 22/05/2013.

[29] BOUYER D. : « procédés d'élaboration de membranes par séparation de phase ». Référence J2799 | Date de publication : 10/12/2011 |: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 26/02/13.

[30] Bouchard C. : Kouadio P. : « Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable ». Fiche technique, Québec, 2000.www.fndae.fr.Consulté le : 22/03/2013.

[31] Gwenaëlle P. :« rétention de virus d'ultrafiltration ».thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005. http://thesesups.ups-tlse.fr .Consulté le : 07/04/2013.

[32] ETTORT E. : « vieillissement chimiques des membranes d'osmose inverse ». Mémoire de doctorat, université de Toulouse, Paris, 2011. http://thesesups.ups-tlse.fr. Consulté le : 18/02/2013.

[33] ROVEL J. : « dessalement de l'eau de mer ». Référence W5700: http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 16/12/12.

[34] LACHHEB A. :« comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration pour le dessalement de l'eau de faibles concentrations en sel ». Mémoire d'ingénieur d'état, université de Tlemcen, 2004.

[35] GRASMICK A. : « bioréacteur a membrane et traitement des eaux usées ». Référence W4140 : http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 06/01/2013.

[36] KHIRANI S. : « procédé hybrides associant la filtration membranaire et l'adsorption / échange ionique pour le traitement des eaux usées en vue de leur réutilisation ». Mémoire de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2007. http://eprint.insa-toulouse.fr. Consulté le : 19/02/2013.

[37] Gagnaire J. : « Bioréacteurs à membranes : un intérêt grandissant». Fiche technique, Seine et Marne. www.lapinsonniere.fr. Consulté le : 13/02/2013.

[38] RONUALD V. : « Bioréacteur a membranes immergées pour le traitement d'eau usées domestiques ». Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005. http://ethesis.inp-toulouse.fr. Consulté le : 09/01/2013.

[39] APTEL P. : « filtration membranaire (OI, NF, UF)-Application en traitement des eaux » Référence J2794 : http://www.techniques-ingenieur.fr. Consulté le : 12/12/2012.

[40] DEGREMENT : « mémento technique de l'eau (Tome 2) ». Dixième édition, 2005.

[41] BACCHIN P. : « principes de bases de la filtration membranaire ». Document technique, Toulouse, 2001. http://patricebacchin.fr.Consulté le : 14/02/2013.

[42] HARRLEKAS F. :« couplage des procédés membranaires aux techniques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie de textile ». Thèse de doctorat, université Cadi Ayad de Marrakech et de l'institut national polytechnique de lorraine, 2008. http://www.theses.fr. Consulté le : 18/02/2013.

[43] RENAUDIN V. :« Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ». Fiche technique, 2001. http://culturesciences.chimie.ens.fr.Consulté le : 27/02/2013.

ANNEXE

ANNEXE I : Méthode de calcul

1. **Dosage de l'alcalinité:**

❖ **détermination du TA :**

Afin de pouvoir estimer ce paramètre, nous étions obligés de faire des mesures au niveau du laboratoire de la station. Le protocole de l'analyse est comme suit :

But : mesure la teneur en hydroxyde libre et en carbonate caustique CO_3^{-2}.

Principe *:* cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence de la phénophtaléine.

Réactifs utilisé :

- *acide chlorhydrique HCL 0 .02N*
- *solution phénolphtaléine*

Mode opératoire : dans un erlenmayer de 250 ml : on prélève 100ml d'eau à analyser, on ajoute deux (02) gouttes de solution p.p.

Une couleur rose doit se développer, dans le cas contraire le TA n'est nul (TA=0)

❖ **Titre Alcalimétrique Complet:**

Pour la détermination du Titre Alcalimétrique Complet, le protocole de l'analyse est comme suit :

But : (TAC) mesure la teneur en hydrogénocarbonate dans l'eau.

Principe : cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence du méthyle orange.

Réactifs utilise :

-acide chlorhydrique HCL 0,02N

-solution de méthylorange

Mode opératoire : dans un erlenmayer de 250ml : on prélève 100ml d'eau à analyser, on ajoute deux(02) gouttes de solution méthylorange ; on titre ensuite avec l'acide H CL 0, 02N jusqu'au virage du jaune au jaune orangé.

On lire la valeur indiqué et on fait les calculs.

Expression des résultats :

$$TAC= (N_{HCL} . V_{HCL}).1000/V_0$$

V_0 : prise d'essai

TAC : le titre alcalimétrique complet en méq.g

Les résultats en mg/l de $CaCO_3$ (on multiplie par 50)

Rapport-Gratuit.com

2. Dosage de la dureté totale par complexometrie EDTA :

Pour la détermination du dosage de la dureté totale par complexometrie, le protocole de l'analyse est comme suit.

Principe : les alcalino-terreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe de type chélate par le sel di sodique de l'acide éthylène .la disparition des dernières traces d'élément à doser est décelée par le virage d'indicateur spécifique en milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation de mg, cette méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium.

Réactifs utilise :

-solution d'EDTA 0 ,02N

-solution tampon

Mode opératoire : dans un erlenmayer de 250ml : on prélève 100ml d'eau on ajoute 0 ,5ml de solution tampon (PH=9,5-10) et (3) gouttes d'indicateur coloré N.E.T, verser la solution d'EDTA jusqu'à virage du rouge en bleu vert.

Expression des resultants:

$TH= (N_{EDTA} . V_{EDTA}).1000/V_0$ (m eq)

$TH= (N_{EDTA} . V_{EDTA}).1000/V_0 5$ (F°)

TH: c'est le titre hydrométrique en m éqg (1méq g=5°F)

Les résultats obtenus en mg/l de $CaCO_3$.

ANNEXE II : Glossaire

Affluent: liquide entrant dans le module membranaire.

Agent colmatant : toute substance ou tout micro-organisme participant au colmatage.

Adsorption: de molécules ou macromolécules présentant une affinité chimique avec le matériau membranaire.

Bloc: assemblage de modules montés sur un même châssis et et pouvant être isolés d'un point de vue hydraulique soit lorsque l'installation fonctionne, soit pour réaliser des essais. Est également appelé "Skid" ou "Rack" ou "Train".

Cartouche de filtration: assemblage "carter-filtre" employé comme étape de pré-filtration grossière avant la filtration membranaire en vue de limiter le colmatage des membranes.

Carter: enveloppe extérieure d'un module, que celui-ci soit formé de membranes tubulaires, spiralées ou fibres creuses. Il est constitué de polymères organiques ou de métaux. Il comporte un ou plusieurs piquages qui permettent la collecte du perméat (cas des filtrations intérieur/extérieur) ou l'alimentation et la circulation de l'alimentation (cas des membranes extérieur/intérieur). Dans ce dernier cas, il doit avoir la capacité de soutenir sans dommage la pression de service.

Colles: dans un module une partie des connexions est en général fixée en usine au moyen de collages. Comme les joints, les colles peuvent être en contact avec le fluide à traiter ou traité. Une étanchéité imparfaite des colles entre les compartiments "alimentation" et "perméat" est un facteur limitant, notamment lorsque l'on recherche une rétention des contaminants microbiologiques.

Concentrat (Rétentat): fraction de l'eau qui n'a pas traversé la membrane et qui s'est enrichie de toute la matière retenue par celle-ci.

Colmatage: Résultat d'un phénomène physique, chimique ou biologique qui obstrue les pores d'une membrane à la surface et/ou dans son épaisseur et qui se traduit par une diminution des flux transmembranaires, limite le passage de l'eau, diminue la productivité, modifie la sélectivité et contribue à l'encrassement.

Connections: pièces qui permettant de raccorder les modules ou les membranes au reste des éléments nécessaires à leur fonctionnement (conduites d'alimentation, de recirculation, élimination de perméat, purges, capteurs de pression, températures, etc.).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Coefficient de perméabilité hydraulique: flux d'eau qui traverse une membrane par unité de pression (exprimé en $m^3.s^{-1}.m^{-2}.Pa^{-1}$ ou $L.\ h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$).

Décolmatage: Action physique, chimique ou biologique exercée sur une membrane colmatée afin de lui restituer tout ou partie de sa perméabilité initiale réduite par le colmatage.

Dalton (Da): symbole de dalton : unité de masse des molécules. Elle est employée comme unité de mesure pour exprimer le seuil de coupure d'une membrane poreuse.

Dépôt: Terme général désignant l'ensemble des matières qui s'accumulent dans une installation de séparation par membranes.

Diffusion: Phénomène de transfert de la matière des zones concentrées vers les zones diluées.

Défaut d'intégrité: présence d'une fuite dans le module de filtration membranaire ou d'une brèche dans la membrane elle-même, pouvant induire une contamination du filtrat.

Encrassement: dépôt sur la membrane d'un « gâteau » formé à partir de l'accumulation sur celle-ci des MES de l'eau à dessaler.

Entartrage: dépôt de sel(s) insolubilisé(s) suite à la concentration à la surface membranaire de tous les sels rejetés.

Filtrat (Perméat): eau produite par le système de filtration membranaire après passage à travers la membrane.

Fibre creuse: Membrane en forme de tube de petit diamètre (plus petit que 3 millimètres) rectiligne ou en épingle, de quelques cm à 1 m de longueur et dont l'épaisseur est de l'ordre de 100 à 200 micromètres, utilisée en osmose inverse, ultrafiltration, microfiltration, dialyse.

Filtration frontale: Terme employé lorsque tout le fluide doit traverser la membrane.

Filtration tangentielle: mode de filtration où le rétentat circule tangentiellement à la surface de la membrane afin de maintenir les contaminants en suspension et de limiter l'encrassement de la membrane. Une partie du liquide retenu ne traverse pas la membrane : c'est le concentrat.

Fouling: Phénomène d'encrassement d'une membrane par accumulation de molécules et de particules à sa surface et/ou à l'intérieur des pores, et modifiant ses performances. (Ce mot anglais de plus en plus employé en France se traduit par colmatage).

Faisceau: ensemble de fibres creuses réuni par un empotage. Un module peut comprendre un ou plusieurs faisceaux.

Flux: Taux de transfert massique ou volumique à travers la surface de la membrane, débit de filtrat rapporté au mètre carré de membrane filtrante ($m^3.s^{-1}.m^{-2}$ ou $L.\ h^{-1}.m^{-2}$).

Inhibiteur de précipitation (Anti-dépôt): produit chimique ajouté dans l'eau ou procédé mis en œuvre pour inhiber la précipitation ou la cristallisation de sels en vue de limiter le colmatage.

Indice de colmatage: Grandeur caractéristique de l'aptitude d'un fluide à colmater une membrane dans des conditions opératoires définies. Plusieurs relations sont utilisées pour calculer l'indice de colmatage suivant l'usage que l'on veut en faire. Elles expriment, toutes, la réduction du flux de filtrat après passage d'un volume donné du fluide au travers de la membrane.

Joints: de nombreuses connexions qui doivent être facilement démontables pour des besoins de service, notamment celles concernant des fluides sous pression, nécessitent l'usage de joints, généralement en caoutchouc, silicones ou dérivés. Leur surface de contact réelle avec les fluides est très réduite, mais leur importance dans le rendement et dans la garantie d'étanchéité des circuits est déterminante. Une étanchéité imparfaite entre les compartiments "alimentation" et "perméat" est un facteur limitant lorsque l'on recherche une rétention des contaminants biologiques.

Microfiltration: Opération de séparation liquide-particules sur membrane, mise en œuvre à basse pression dans laquelle les particules retenues ont des dimensions comprises entre 0,1 et 10 micromètres.

MON: La matière organique naturelle (MON) présente dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines est généralement constituée d'un mélange de composés organiques provenant de la décomposition de matériaux d'origine végétale, animale et microbienne présents dans le sol et dans l'eau. La décomposition de ces substances produit différentes molécules organiques complexes qui vont des macromolécules aux composés à faible poids moléculaire présents à différentes concentrations et compositions.

Membrane: élément constitutif de base du module de filtration membranaire. Les membranes sont des barrières séparatrices fabriquées à partir de substances organiques ou inorganiques.

Membrane asymétrique: membrane composée schématiquement d'au moins 2 couches différentes ou identiques dont une couche sert de support mécanique et l'autre de couche filtrante qui assure la sélectivité.

Membrane composite: membrane renforcée par des matériaux de natures différentes correspondant, entre autres, aux membranes multicouches ou renforcées par des fibres.

Membrane symétrique: membrane dont la structure poreuse est identique à travers toute sa section.

Module: Montage comportant une ou plusieurs membranes d'un type déterminé ou de plusieurs types, des cadres séparateurs ou des plaques ou des drains intercalaires, ainsi que des tuyauteries nécessaires pour assurer l'écoulement des fluides. Il ne comporte pas les accessoires et périphériques tels que les organes de mesure, de pressurisation, de contrôle, Selon que les membranes mises en œuvre sont des fibres creuses, des tubes, des feuilles planes ou enroulées en spirales, les modules seront qualifiés de modules fibres creuses, tubulaires, plans ou spirales.

Nanofiltration: opération de séparation par membrane mise en ouevre a moyenne pression dans laquelle la taille des molécules retenues est de l'ordre du nanometre.

Nettoyage: opération qui a pour but de restituer a la membrane la densité du flux initial.

Nettoyage chimique : nettoyage effectué par des composés chimiques. Il est prudent de suivre les prescriptions du fabricant.

Nettoyage chimique: opération consistant en l'application d'un ou de plusieurs produits chimiques suivant un protocole défini pour éliminer les éléments colmatant afin de restaurer la perméabilité de la membrane.

Osmose: diffusion de liquide à travers une membrane semi-perméable. Le flux est orienté de la solution la plus diluée vers la solution la plus concentrée.

Osmose inverse: opération mettant en œuvre des membranes non poreuses, sous l'effet d'une différence de pression. L'eau et les éléments les plus petits traversent la membrane par diffusion, dans le sens opposé à celui de l'osmose.

Perméation: ecoulement d'un fluide au travers d'une membrane par extention, le debit de permeation constitue le parametre technique d'une installation de séparation par membrane désignant le volume ou la masse de liquide traversant la membrane par unité de temps.

Perméabilité: aptitude d'une membrane à laisser passer ou diffuser une substance (voir Coefficient de perméabilité hydraulique).

Pression différentielle: en filtration tangentielle, différence entre la pression de l'eau d'alimentation du système de filtration membranaire et celle du concentrât. Elle est également appelée perte de charge (Unité : Pascal ou bar).

Pression transmembranaire: différence de pression de part et d'autres de la membrane (Unité : Pascal ou bar).

Pression osmotique: lorsqu'une membrane semi-perméable sépare de l'eau pure d'une solution donnée, la pression osmotique de cette solution est la surpression qu'il faudrait appliquer à la solution pour stopper le flux d'osmose (Unité : Pascal ou bar).

Prétraitement: tout traitement appliqué sur l'eau alimentant le système de filtration membranaire nécessaire à son bon fonctionnement.

Polarisation de concentration: accumulation de matière réversible à la surface entraînant une contre pression osmotique.

Porosité: rapport entre le volume total des pores et le volume total apparent du meme echantillon de membrane.

Résistance hydraulique: inverse du coefficient de perméabilité hydraulique (exprimée en $Pa.s.m^{-1}$).

Rétro lavage: opération de lavage d'une membrane à contre-courant de la filtration, employée pour évacuer les particules accumulées à la surface de la membrane.

Taux de conversion: rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation.

Taux de Rétention (la sélectivité): fraction de matière retenue, par rapport à celle qui pourrait passer dans le perméat, si la membrane n'offrait aucune sélectivité.

Taille de pore: caractéristique d'une membrane de microfiltration. Il peut s'agir d'une taille moyenne de pores déterminée, par exemple, par analyse d'images de la surface de la membrane obtenues par microscopie électronique, ou bien d'une taille maximum de pores déterminée après avoir éprouvé la rétention par la membrane de particules de dimensions connues, par exemple des bactéries. Exemple : une membrane donnée pour 0,22 micron, ne laisse pas passer de bactéries dont la taille est égale ou supérieure à 0,22 micron.

Tube collecteur: le tube collecteur est, dans un module spiralé, ou dans certains modules à fibres creuses, disposé en général sur l'axe du module cylindrique. Il est généralement constitué de polymères anioniques et destiné à collecter le perméat et à l'évacuer vers l'extérieur.

Ultrafiltration: Opération de séparation par membrane, mise en œuvre à basse pression, consistant à faire circuler un liquide tangentiellement à une membrane retenant des molécules de masse moléculaire supérieure à 500 Dalton.