الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme
De Master

-Filière-

Génie de Procédés

-Spécialité-

Traitement des Eaux

- Thème -

Analyses théoriques de l'encrassement des membranes d'osmose inverse utilisé

Réalisé par
KESSAI Makhlouf

Les membres de Jury :

Mme ZEMMOURI Hassiba	Présidente	Prof	ENSTA
Mme CHEIKH Assira	Examinateur	MCA	ENSTA
Mme BENHABILES Ouassila	Promotrice	MRA	UDES
Mme SMAIL Fatima	Co-promotrice	MAA	ENSTA

Alger, le 23/06/2024

Année universitaire 2024/2023

Dédicace

C’est avec un grand plaisir que je dédie ce travail aux

Personnes les plus chères à mon cœur, mes parents qui m’ont soutenu tout le long de mes années d’étude.

Mon binôme et Mes amis

À tous ceux qui m’ont encouragé et aidé de près et de loin dans ce travail.

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu tout-puissant qui nous a accordé la santé et le courage pour mener ce travail jusqu'au bout.

Nous tenons à remercier le directeur de L'UDES ainsi que le directeur de la division FTEER d'avoir accepté notre demande de stage et on remercie également Mme Benhabiles, pour nous avoir donné l'occasion de réaliser notre travail au sein du laboratoire EVER et toute l'aide qu'elle nous a apportées.

Nous n'oublierons pas les membres de toute l'équipe du laboratoire EVER de l'UDES.

Nous remercions aussi les membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent à nos familles pour leurs encouragements et soutiens et à tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

الملخص:

الهدف من هذا العمل هو فهم العوامل المختلفة التي تساهم في انسداد الأغشية المستخدمة في عملية تحلية مياه البحر. والهدف من ذلك هو اكتساب فهم أعمق لمشكلة الانسداد التي تمثل عائقًا كبيرًا أمام الاستخدام الفعال لتقنيات الأغشية. وستقوم الدراسة بتحليل وتحديد الملوثات والمخلفات الرئيسية المسؤولة عن الانسداد، من أجل اقتراح طرق المعالجة المثلى لتقليل هذا التأثير إلى أدنى حد ممكن.

الكلمات المفتاحية :تقنيات الأغشية، تحلية مياه البحر، انسداد الأغشية .

Résumé :

L'objectif de ce travail est de comprendre les divers facteurs contribuant au colmatage des membranes utilisées dans le processus de dessalement de l'eau de mer. Cette exploration vise à approfondir la compréhension de la problématique du colmatage, qui représente un frein significatif à l'utilisation efficace des technologies membranaires. L'étude analysera et identifiera les principaux polluants et résidus responsables du colmatage, afin de proposer des méthodes de traitement optimales pour minimiser cet effet**.**

Mots clés : colmatage, dessalement de l'eau de mer, technologies membranaires.

Abstract:

The aim of this work is to understand the various factors contributing to the clogging of membranes used in the seawater desalination process. The aim is to gain a deeper understanding of the problem of clogging, which represents a significant barrier to the effective use of membrane technologies. The study will analyse and identify the main pollutants and residues responsible for clogging, in order to propose optimal treatment methods to minimise this effect.

Keywords: clogging, seawater desalination processes, membrane technologies.

Sommaire

Liste des figures .....
Liste des tableaux .....
Liste des abréviations .....
Introduction 1
Chapitre 1 : Revue bibliographique 4
1 Généralités sur les membranes : 7
1.1 Définition de la membrane : 7
1.2 Classification des membranes : 7
1.2.1 Selon la nature : 7
- Membranes inorganique (ou minérale) : 8
- Membranes composites : 9

1.2.2 Selon le mécanisme de séparation : 9
- Membrane poreuse : 10
- Membrane micro poreuse : 11
- Membranes méso poreuses : 11
- Membranes denses : 11
- Membrane échangeuse d'ions : 11

1.2.3 Selon la morphologie : 11
- Membranes isotropes non poreuses (dense) : 12
- Membranes isotropes microporeuses : 12
- Membranes asymétriques : 12

1.1 Types de modules : 13
1.1.1 Module plan : 13
1.1.2 Module tubulaire : 14
1.1.3 Module fibre creuse : 15
1.1.4 Module spirale : 16
1.2 Mode de filtration : 16
1.2.2 La filtration frontale : 17
1.2.3 Filtration flux constant : 17
1.2.4 Filtration pression constante : 18
1.3 Procédés membranaires : 18
1.3.1 La nanofiltration NF : 19
1.3.2 La microfiltration MF 19
1.3.3 Ultrafiltration UF : 20
1.3.4 Osmose inverse OI : 20
- Structure et description : 21
- Applications : 22
- Facteurs influençant l'efficacité de l'osmose inverse : 22

1.5.4.1.1 Polarisation de concentration : 22
1.5.4.1.2 Colmatage : 23
2 Le colmatage : 23
2.1 Définition du colmatage : 23
2.2 Types de colmatage : 23
2.2.1 Le colmatage externe : 24
2.2.2 Le colmatage interne : 24
2.2.3 Biologique : 24
2.2.4 Colloïdal : 25
2.2.5 Entartrage : 25
2.2.6 Organique : 25
2.3 Indice de colmatage : 26
2.3.1 Silt Density Index (SDI) : 26
2.3.2 Indice de colmatage modifié (MFI) : 27
2.4 Mécanisme du colmatage : 27
2.4.1 Le blocage des pores : 27
2.4.2 Formation du gâteau : 28
2.5 Autopsie membranaire : 28
2.6 Nettoyage des membranes : 29
Conclusion générale : 30
Références bibliographiques 31

Liste des figures

Figure 1 : Pores de membranes d'ultrafiltration **8**
Figure 2 : Membrane composite **9**
Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une membrane dense **10**
Figure 4 : Membrane poreuse **10**
Figure 5 : Membrane asymétrique. **13**
Figure 6 : Montage filtre à presse **13**
Figure 7 : Module plan. **14**
Figure 8 : Schéma de circulation des fluides **14**
Figure 9 : Module tubulaire **15**
Figure 10 : Type de module tubulaire **15**
Figure 11 : Configuration du module fibre creuse **15**
Figure 12 : Module spiralé **16**
Figure 13 : Filtration frontale et tangentielle **17**
Figure 14 : Les procédés membranaires et leurs caractéristiques de séparation. **18**
Figure 15 : Configuration de la microfiltration **19**
Figure 16 : Osmose inverse industriel. **21**
Figure 17 : Principe de l'osmose inverse **22**

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des membranes organique et inorganique **8**

Liste des abréviations

CA Acétate de cellulose.

COT Carbone organique total.

EDX Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie.

FTIR Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier**.**

MEB Microscopie électronique à balayage.

MEB-EDX le microscope électronique à balayage-couplée à l'analyse par rayons X.

MF Microfiltration.

MFI Indice modifié du colmatage.

NF Nanofiltration.

OI (RO) Osmose inverse.

PES Polyéthersulfone.

SDI Indice de densité du colmatage.

SWRO Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse.

TFC Thin film composite.

UF Ultrafiltration.

Introduction

L'eau est un élément crucial pour notre planète, mais son utilisation peut être entravée par des restrictions quantitatives ou qualitatives. La qualité de l'eau est particulièrement critique car 97% de l'eau terrestre est salée avec une concentration de sel d'environ 35 000 mg/l, rendant difficile son utilisation comme source d'eau potable. Seulement 2% de l'eau mondiale est présente sous forme de glace et de glaciers, et 0,3% dans l'atmosphère. Les rivières et les lacs ne constituent qu'une minuscule 0,1% de l'eau totale disponible. Les réserves d'eau souterraine, bien que moins abondantes (0,6%), sont essentielles, mais il faut noter que près de la moitié de ces réserves se situent au-delà de 800 mètres de profondeur [1].

La distribution inégale de l'eau douce et de la pluie sur Terre conduit à une situation où la soif devient un problème mondial. La combinaison de la pollution des eaux de surface et des effets du changement climatique entraîne que 1,2 milliard de personnes n'ont pas accès à une eau potable sûre et abordable, et près de deux sur six manquent d'accès aux installations sanitaires. Pour faire face à la pénurie croissante des ressources en eau, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres est proposé comme une solution possible. Cependant, la production d'eau potable à partir d'eau salée est coûteuse et nécessite de grandes quantités d'énergie, générant des émissions de gaz à effet de serre potentiellement nocives [2].

L'Algérie a été sévèrement touchée par les déficits d'eau, conduisant naturellement à l'exploration du dessalement de l'eau de mer comme solution. Au cours de la dernière décennie, plusieurs usines de dessalement ont été mises en place le long de la côte méditerranéenne algérienne, marquant ainsi une étape importante dans la lutte contre la pénurie d'eau [3].

Parmi les méthodes de dessalement, la filtration sur membrane se distingue par ses avantages significatifs dans la production d'eau potable, notamment grâce à des coûts énergétiques réduits [4-6].

Cependant, comme nous examinerons plus loin, le principal défi de la filtration membranaire est le colmatage des membranes. Ce phénomène diminue la capacité productive des membranes, entraînant une augmentation des coûts énergétiques, une augmentation de la

fréquence des nettoyages et potentiellement une réduction de la durée de vie des membranes. Cette question est cruciale.

Le but principal de cette étude est d'identifier et de décrire les divers éléments qui contribuent à l'encombrement de la membrane. C’est une réflexion de fond sur la problématique du colmatage des membranes de dessalement de l’eau de mer qui frêne considérablement l’utilisation des technologies à membranes. Il s’agira donc d’analyser et définir les espèces et les résidus les plus colmatantes, pour recommander ultérieurement les méthodes de traitement les plus compatible.

Le premier chapitre de ce document se concentre sur une analyse théorique couvrant les aspects généraux des procédés de séparation membranaire, y compris leur définition, classification, et caractéristiques. Il explore également les différents types de membranes, leurs applications spécifiques, ainsi que les principes de leur mise en œuvre. Ensuite, une section importante traite du sujet du colmatage des membranes, identifiant les indicateurs clés et discutant des stratégies de nettoyage appropriées. Ce chapitre sera suivi par une conclusion globale.

Chapitre I : Revue Bibliographique

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Malgré l'abondance des recherches effectuées sur le sujet du colmatage, ce phénomène reste complexe et incompris dans sa totalité. Sans disposer de méthodes éprouvées pour anticiper le comportement des membranes face à différentes qualités d'eau, il est indispensable de mener des essais pilotes prolongés et coûteux afin de déterminer le potentiel de colmatage des divers types de sources d'eau.

En 1996 Dudley et al. Ont effectué une autopsie membranaire sur un module opératoire pendant 3 ans pour identifier les principales causes du colmatage, L'autopsie a révélé la présence de niveaux élevés de bactéries et d'un biofilm/biomasse associé contenant des quantités importantes de fer [5].

Un peu plus tard en 1997 Butt et al. Ont entrepris une étude pour identifier les différents types de colmatant responsables de la réduction de la durée de vie utile des membrane OI dans une usine commerciale de dessalement par osmose inverse (RO), L'autopsie de la membrane a montré que le colmatage par le fer a été la principale cause de la réduction de la durée de vie des membranes et, dans une moindre mesure, des calcium-alumine-silicates [6].

En 2005, Pontié et al, ont présentés une revue qui rapporte tous les outils analytiques utilisés pour les autopsies membranaires de dessalement afin d'identifier les colmatant et les différents prétraitements avant l'osmose inverse, et sur l'élimination de la saumure et les possibilités de réutilisation des modules d'osmose inverse pour le traitement des eaux usées [7].

En 2008 Karime et al. Ont étudier la raison du colmatage de la membrane de l'usine de dessalement Zarzis,et on utilisant différentes méthodes tels que COT, MEB, FTIR ; les résultats ont montrés que la couche de colmatage est composée principalement de SiO_2, d'argile, $CaSiO_3$, Fe_3O_4, $AlPO_4$, $CaSO_4$ et , de matière organique (polysaccharide, protéine) qui constituent une source de croissance microbiologique ultérieure ; c'est le problème du biofouling. Les éléments métalliques résultent de la corrosion de l'acier inoxydable et du revêtement interne des cartouches de filtre qui sont endommagés par les particules de silice

rejetées par les filtres à sable. L'importance du dépôt de $CaSO_4$ et $CaSiO_3$ est due à la mauvaise efficacité de l'antitartre [8].

En 2010, Álvarez et al. Se sont intéressés à l'évaluation de l'efficacité des opérations de prétraitement et des opérations de nettoyage ou une autopsie membranaire a été effectuer, les résultats ont montrés que la couche de colmatage était hétérogène et était plus importante sous ou à proximité de l'alimentation et ses principaux composants étaient le quartz et l'argile, principalement la muscovite, le chlorite et l'albite. Les substances colmatantes arrivent directement depuis l'alimentation car le traitement préalable standard ne les arrête pas avant qu'ils n'atteignent la membrane. Il était également notable de ne pas trouver de biofilms, de dépôts organiques importants ou de précipitations de sels [9].

En 2013, Chesters et al. Ont discutaient des résultats historiques depuis 2002 des autopsies de membranes. Dans 40% des cas d'autopsie, la présence de fer a été détectée, tandis que 33% ont montré des niveaux d'argile et 21% ont présenté des quantités de calcium et de magnésium. Le principal facteur contribuant à l'échec de la membrane était attribué à un colmatage microbiologique représentant 27%, tandis que 19% étaient dus à une usure par abrasion, 18% à une oxydation, et 12% à la présence d'oxydes métalliques sous forme de fer, manganèse et aluminium dans les échantillons. Seulement 10% des membranes ont été décrites comme propres [10].

En 2017, Jiang et al. Ont présentés un article de synthèse sur les types de colmatage des membranes et les stratégies de contrôle de colmatage, en mettant l'accent sur les derniers développements et les technologies d'atténuation de colmatage sont également examinées en détail cet revue montre que le prétraitement est largement utilisé dans la pratique pour réduire la charge de l'opération d'OI suivante, aussi la surveillance en temps réel a l'avantage et le potentiel de fournir un soutien pour un nettoyage efficace et efficient. La modification de la surface pourrait ralentir le colmatage de la membrane en changeant les propriétés de surface telles que la régularité et l'hydrophile, tandis que Les avancées dans la conception de membranes et les techniques de synthèse innovantes suggèrent un avenir encourageant pour la prochaine série de membranes d'osmose inverse, notamment grâce à des améliorations significatives en termes de résistance au colmatage. Ce document de synthèse comprend également une analyse statistique visant à mettre en lumière les avantages potentiels de la recherche actuelle concernant la gestion du colmatage des membranes d'osmose inverse [11].

En 2018, Ruiz-García et al. ont présentés une étude là ou des éléments de membrane d'OI opérationnel depuis 11ans colmaté provenant d'une usine de dessalement à grande échelle pour identifier les caractéristiques et le comportement d'encrassement liés à la composition inorganique de l'eau d'alimentation ainsi qu'à divers paramètres environnementaux, ils ont analysé les performances de la membrane et effectué une autopsie approfondie, La caractérisation chimique et structurelle a été réalisée par inspection visuelle, d'analyse qualitative et par (MEB-EDX) ; Les résultats ont montré que la couche de colmatage consistait en un biofilm comprenant des diatomées Les salissures inorganiques étaient principalement constituées de carbonate de calcium et d'aluminosilicates ;Les résultats ont souligné qu'il est possible de préserver les éléments membranaires d'OI ,ce type de colmatage peut être géré efficacement lorsqu'un prétraitement adéquat est appliqué, permettant à la membrane de fonctionner sans problème pendant près de 11 ans.. Cependant, la résistance de la membrane a augmenté de plus de plus de deux fois au cours de la période de fonctionnement [12].

En 2020, Fortunato et al. Une autopsie membranaire a été effectuée sur une usine de dessalement par osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) à grande échelle, située sur la mer Rouge, afin de comprendre la nature et le comportement des contaminants lors du processus. Les résultats ont mis en évidence la présence d'une couche colmatante variée. La composition spécifique de la partie organique de cette couche variait selon la localisation du module dans le conteneur. Les dépôts inorganiques présents dans la couche étaient principalement composés de silicate d'aluminium, de fer et de magnésium [13].

A la même période, Talantikite et al (2020). Ont étudié le phénomène d'usure de la membrane en utilisant l'analyse chimique et l'autopsie membranaire pour analyser les éléments du colmatage de l'osmose inverse d'une membrane d'OI de la station de dessalement de Cap Djenat en Algérie. Les résultats indiquent que la membrane de 1ère position présente une forte présence de colmatage composé d'un mélange de dérivés protéiques liés au biofilm, du chlorure de sodium, du fer, des aluminosilicates et d'autres éléments communément détectés sur le colmatage des membranes d'eau de mer ont été identifiés [14].

1 Généralités sur les membranes :

1.1 Définition de la membrane :

Structure, ayant des dimensions latérales beaucoup plus grandes que son épaisseur, à travers laquelle un transfert de masse peut se produire sous l'effet de diverses forces motrices [15].

Une membrane est une phase perméable ou semi-perméable, souvent sous la forme d'un film mince, constituée d'une variété de matériaux allant de solides inorganiques à différents types de polymères [16], ayant une structure poreuse avec des pores de l'ordre de 0,1 à 10 µm pour la microfiltration, 10 nm à 1 µm pour l'ultrafiltration, quelques nm pour la nanofiltration et une structure dense pour l'osmose inverse [17].

1.2 Classification des membranes :

Chaque méthode de traitement spécifique implique l'utilisation d'un type de membrane particulier. On a cependant la possibilité de classer les membranes en différentes familles selon des critères liés à leur nature chimique à leur morphologie, au mécanisme de transfert de matière ou encore à leur mode de fabrication. On a cependant la possibilité de classer les membranes en différentes familles selon des critères liés à leur nature chimiqueà leur morphologie, au mécanisme de transfert de matière ou encore à leur mode de fabrication.

1.2.1 Selon la nature :

- **Membrane organique :**

Ces membranes sont disponibles sous forme de films de fibres creuses de diamètre intérieur de 0.5 à 2 mm, utilisées pour la microfiltration et l'ultrafiltration utilisées, sous forme tubulaire de 2 à 25 cm de diamètre [18]. Les matériaux utilisés sont généralement : acétate de cellulose, polysulfone, polyacrylonitrile, polyamide, polypropylène, acétate de cellulose, téflon, polyéthersulfone (PES) [19].

Ces membranes sont minces, de 10 µm (symétriques) à 200 µm (asymétriques ou composites),disponibles sur toute la gamme de taille de pores de l'osmose inverse à la microfiltration. Les membranes asymétriques comportent une sous-couche macroporeuse qui supporte la membrane mince [20].

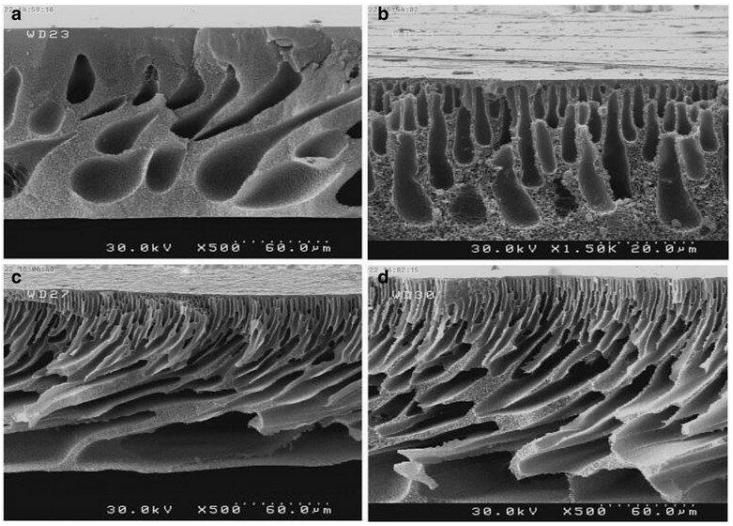


Figure 1 : Pores de membranes d'ultrafiltration

- **Membranes inorganique (ou minérale) :**

Ces membranes peuvent être fabriquées à partir de céramique, d'oxyde de zirconium, de carbone ou de verre poreux. Elles sont épaisses, de 2 à 3 mm, et disponibles principalement sous forme tubulaire et multicanaux.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des membranes organique et inorganique

Membrane	Avantages	Inconvénients
Organique	Leur coût est faible ou modéré, Elles sont disponibles dans toutes les configurations, tubulaires, fibres creuses, planes. Ces membranes offrent une variété de seuils de coupure et de tailles de pores, permettant une large gamme d'applications.	Elles ne permettent pas la stérilisation à la vapeur. Leur pression de rupture est basse, 7–8 bars et leur durée de vie moyenne, de 1à 2 ans.
Inorganique (Minérale)	Elles sont très résistantes à la chaleur, aux pH extrêmes, aux produits chimiques et aux fortes pressions et ont une durée de vie élevée, supérieure à 3 ans. Elles ont des perméabilités élevées. On peut les décolmater in situ par rétro-filtration. Elles sont stérilisables à lavapeur.	Leur coût est élevé et elles présentent un volume mort significatif. Quelques membranes sont disponibles en nanofiltration

- **Membranes composites :**

Les membranes composites, également connues sous le nom de TFC (Thin Film Composite), sont formées par l'association de deux ou plusieurs couches de matériaux ayant des porosités et des compositions chimiques variées Figure 2 : Membrane composite [21]. Elles ont été développées afin d'augmenter la perméabilité des membranes en diminuant l'épaisseur de la couche active sélective. Des épaisseurs variant de 10 à 100 nanomètres sont employées. Les autres couches ont une porosité croissante et permettent de garantir la tenue mécanique de la couche active. Les membranes composites se composent principalement de membranes planaires ou tubulaires destinées à la nanofiltration ou à l'osmose inverse, avec l'exception notable d'une fibre creuse pour la nanofiltration.

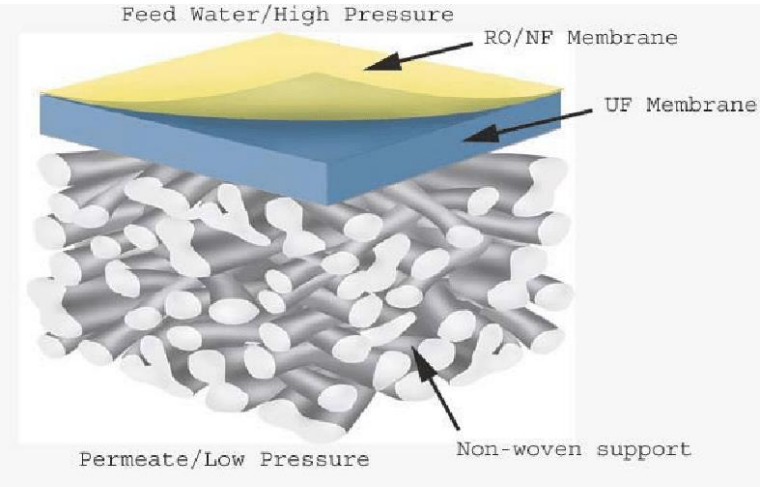


Figure 2 : Membrane composite

1.2.2 Selon le mécanisme de séparation :

- **Membrane dense**

Les membranes denses sont celles qui ne conservent aucune porosité libre, permettant au solvant de traverser la membrane sans transporter de soluté, grâce à une liaison chimique forte entre le solvant et le matériau membranaire. Les membranes denses, qui ne possèdent pas de porosité libre, sont gonflées par le solvant. Cependant, ce dernier, fortement lié chimiquement au matériau membranaire, perd ses capacités de solvatation, permettant ainsi au solvant de traverser la membrane sans entraîner de soluté. Celle-ci se comporte comme un mélange hydro-organique ayant des propriétés de solvatation particulières ; le coefficient de partage entre la membrane et la solution dépend donc de la nature et de la composition chimique de la membrane. Cependant, pour assurer le transfert d'eau, cette dernière doit constituer un élément

intégré de la membrane. Une membrane dense exposée à l'air sec perd progressivement son hydratation. Ses propriétés osmotiques, souvent d'une façon irréversible.

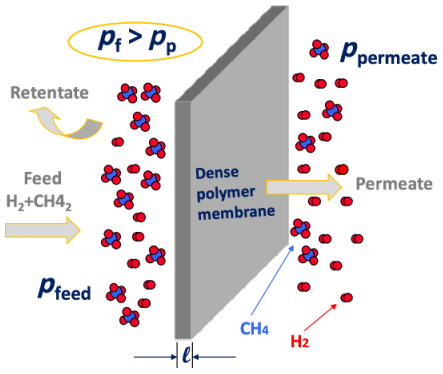


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une membrane dense

- **Membrane poreuse :**

On appelle membranes méso- et microporeuses celles dont les diamètres des pores sont compris, respectivement, entre 1 et 100 nanomètres (1 nm = 10—9 m) et entre 0,1 et 10 micromètres (1µm = 10—6 m). Le pouvoir sélectif des membranes est directement influencé par la taille de leurs pores. Le coefficient de partage des solutés ayant un diamètre supérieur à celui des plus gros pores de la membrane sera nul, tandis que les solutés beaucoup plus petits que la taille des pores sera proportionnelle à la porosité de la membrane. Pour les solutés dont le diamètre est peu inférieur à celui des pores, le coefficient de partage sera compris entre ces deux valeurs [22].

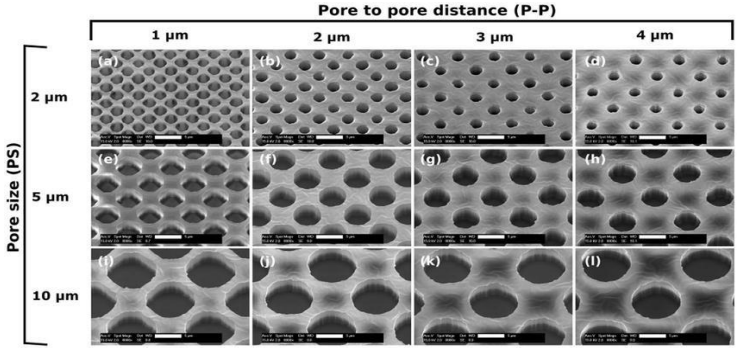


Figure 4 : Membrane poreuse

- **Membrane micro poreuse :**

Par ce terme on désigne des membranes possédant des pores dont le diamètre est de l'ordre du micromètre (0.1 à 10µm). Pendant que les effets électrocinétiques restent insignifiants, le mécanisme de transfert de matière sous l'effet de la pression est exclusivement convectif pour le solvant et celui-ci n'entraine avec lui Lorsque les dimensions des espèces sont inférieures à celles des pores, cela entraîne un effet de tamponnage.

- **Membranes méso poreuses :**

Ce sont des membranes dont les pores ont des dimensions de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines d'angströms (10 à 1000 Â). Pour le transport du solvant, au terme convectif, il convient d'ajouter un terme osmotique d'autant plus important que la taille des pores diminue. Pour le soluté, il est nécessaire de considérer non seulement la solubilité et la diffusion au sein du matériau mais aussi d'autres facteurs qui influencent son transfert, car l'effet tamis ne suffit pas à expliquer entièrement ce processus.

- **Membranes denses :**

Lorsque les espaces libres ne correspondent plus qu'à ceux que laissent entre elles les chaines de polymère (environ 10 pour les macromolécules contenant des cycles aromatiques ou glucosides) ceux-ci ont alors une taille voisine de celles des molécules organiques simples ou des ions hydratés. L'effet tamis devient négligeable et c'est principalement la solubilité et la diffusion qui permet de rendre compte de l'importance du transfert de matière [23].

- **Membrane échangeuse d'ions :**

Les membranes échangeuses d'ions sont constituées de gels chargés portant des charges fixes positives ou négatives. Les propriétés et les procédures de préparation des membranes échangeuses d'ions sont étroitement liées à celles des résines échangeuses d'ions.

Ils existent plusieurs matrices polymères et différents groupes fonctionnels pour conférer au produit des propriétés d'échange d'ions dont la plupart sont basés sur les zéolithes et les bentonites [24].

1.2.3 Selon la morphologie :

- **Membrane symétrique isotropes :**

Les membranes symétriques ou (homogène) sont caractérisées par une microstructure homogène dans toute l'épaisseur. Elles peuvent être poreuses ou denses [25].

- **Membranes isotropes non poreuses (dense) :**

Les membranes isotropes non poreuses denses sont rarement utilisées dans les procédés de séparation par membrane, car le flux transmembranaire à travers ces membranes relativement épaisses est trop faible pour des procédés de séparation pratiques.

Cependant, elles sont largement utilisées en laboratoire pour caractériser les propriétés des membranes. En laboratoire, les membranes isotropes (denses) sont préparées par coulée en solution ou par pressage thermique à chaud. Les mêmes techniques peuvent être utilisées à plus grande échelle pour produire, par exemple, des matériaux d'emballage [23].

- **Membranes isotropes microporeuses :**

La structure et la fonction d'une membrane microporeuse sont très similaires à celles d'unfiltre classique. Elle possède une structure rigide, très vide, avec des pores interconnectés et répartis de façon aléatoire. Cependant, ces pores diffèrent de ceux d'un filtre conventionnel enétant extrêmement petits, de l'ordre de 0,01 à 10 µm de diamètre. Toutes les particules plus grandes que les plus grands pores sont complètement rejetées par la membrane. Les particulesplus petites que les plus grands pores, mais plus grandes que les plus petits pores sont partiellement rejetés, selon la distribution de la taille des pores de la membrane. Les particulesbeaucoup plus petites que les plus petits pores passent à travers la membrane [23].

Ainsi, la séparation des solutés par les membranes microporeuses est principalement en fonction de la taille des molécules et de la distribution de la taille des pores. Comme règle générale, seule la différence significative de taille entre les molécules permet leur séparation efficace par les membranes microporeuses [26].

- **Membranes asymétriques :**

Les membranes asymétriques sont préparées à partir d'un même matériau, elles sont constituées de deux couches superposées : une « peau » de très fine épaisseur (0,1 à 1 micron), ces membranes présentent une sous-couche poreuse particulièrement épaisse, mesurant entre 100 et 300 microns, qui peut être encore renforcée par un tissu. Leur capacité à séparer est principalement déterminée par la qualité de cette « peau » externe. Bien que la sous-couche assure une robustesse mécanique, elle ne contraint pas le mouvement de matériaux à travers la membrane.

Lorsque les membranes adoptent la forme de fibres creuses, on distingue deux types de peau : la peau interne, qui recouvre le lumen de la fibre, et la peau externe, qui est située sur la face externe de ladite fibre [25].

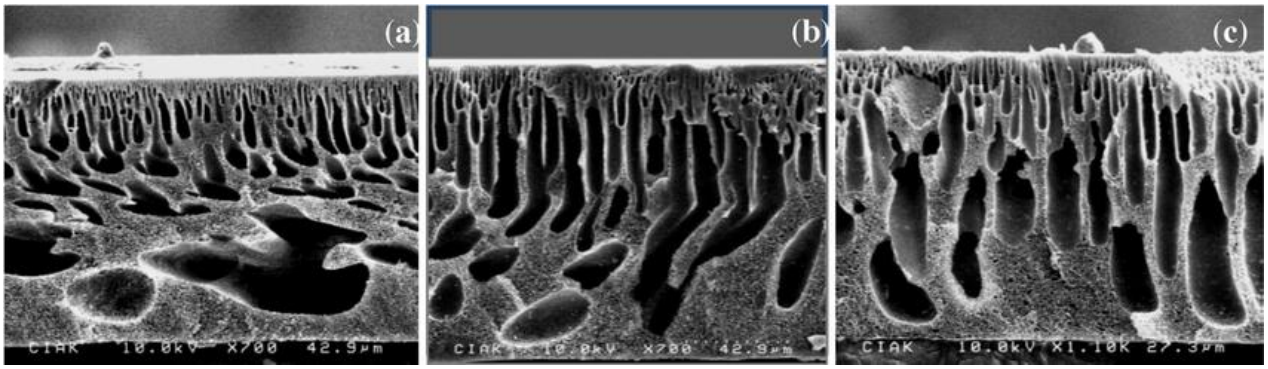


Figure 5 : Membrane asymétrique

1.1 Types de modules :

Les installations industrielles à membrane nécessitent souvent des centaines, voire des milliers de mètres carrés de membrane pour effectuer la séparation requise à une échelle utile il faut donc trouver des méthodes permettant d'incorporer de grandes surfaces de membranes dans des emballages ; ces emballages sont appelés modules de membrane [23] le choix du typedu module dépend du choix du procédés de séparation, dans la pratique en trouve les module plan, tubulaire, fibre creuse ou spiralé.

1.1.1 Module plan :

L'un des plus anciens types de module qui se présente sous forme d'empilements de compartiments constitués de plaques rainurées comportant une membrane de chaque côté ; séparées par des joints ; le tout entre 2 plaques support constituant un agencement de type filtre presse.

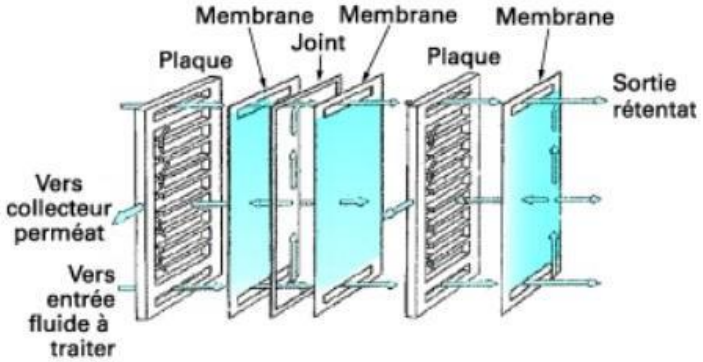


Figure 6 : Montage filtre à presse

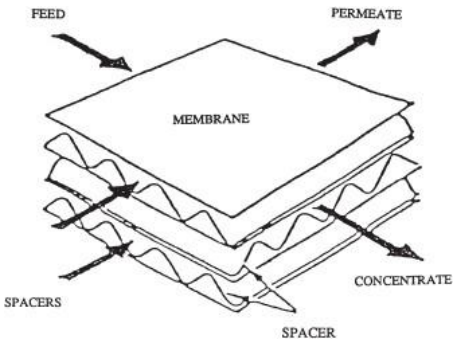


Figure 7 : Module plan

Le fluide circule à partir de l'éspaceur d'alimentation et le perméat passé à travers la membrane pour être récolté dans l'éapaceur perméat [27].

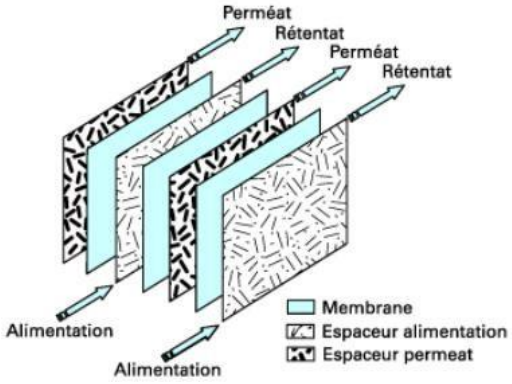


Figure 8 : Schéma de circulation des fluides

1.1.2 Module tubulaire :

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 [4], ils sont disponibles à la fois en membrane organique et minérales, le fluide circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes.

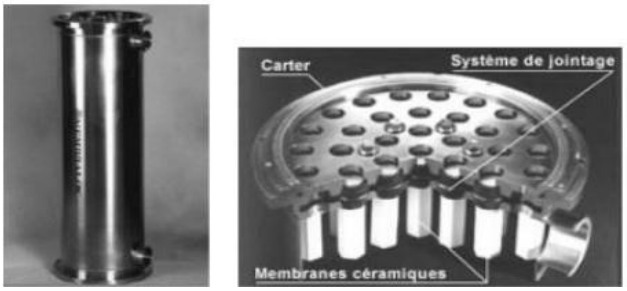


Figure 9 : Module tubulaire



Figure 10 : Type de module tubulaire

1.1.3 Module fibre creuse :

Les fibres creuses peuvent être disposées en parallèle selon deux modalités différentes :

- Configuration Int-Ext : l'eau circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéréà l'extérieur des fibres. L'intérieur des fibres présente un écoulement tangentiel structuré.
- Configuration Ext-Int : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéréà l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

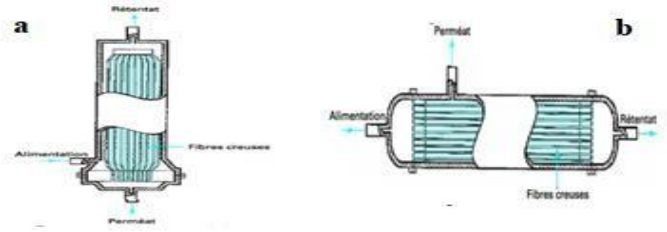


Figure 11 : Configuration du module fibre creuse, a) filtration in\out b) filtration out\in

Dans les deux situations, les membranes sont regroupées en bouquets, avec leurs extrémités immergées dans des gouttes de colle qui protègent le perméat contre l'eau à traiter. Un module industriel peut comprendre des millions de ces fibres [4].

1.1.4 Module spirale :

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. Seules les membranes organiques, dotées de suffisamment de souplesse pour être pliées, sont employées.

Le module reçoit son alimentation via ses espaces d'alimentation latérales. Le perméat est capté dans les espaces perméat et, en se dirigeant autour d'une spirale, est évacué par le tube de collecte principal. Le rétentat traverse le module par les éspaceurs d'alimentation et ressort de l'autre côté du module.

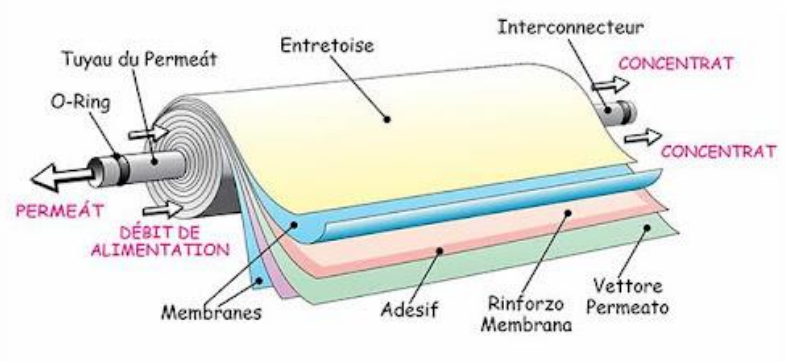


Figure 12 : Module spiralé

1.2 Mode de filtration :

1.2.1 La filtration tangentielle

Le liquide se déplace en ligne droite à côté de la membrane, provenant d'un réservoir grâce à l'impulsion d'une machine à pomper. Une fraction du perméat filtre à travers les trous de la membrane due à une variation de pression (pression transmembranaire), tandis que le reste (retentât) est soit expulsé, soit récupéré sur le réservoir. Les pores de la membrane vont arrêter les macromolécules et les particules de taille supérieure, tandis que les micros solutés (molécules et particules pluspetites que les pores) passeront dans le perméat [20].

1.2.2 La filtration frontale :

Dans ce scénario, le liquide est contraint de passer à travers la membrane orientée perpendiculairement au flux, ce qui entraîne une augmentation rapide de la concentration du rétentat. Cette méthode est particulièrement adaptée aux fluides dilués et connaît un clogging de la membrane plus rapide que la filtration tangentielle [20].

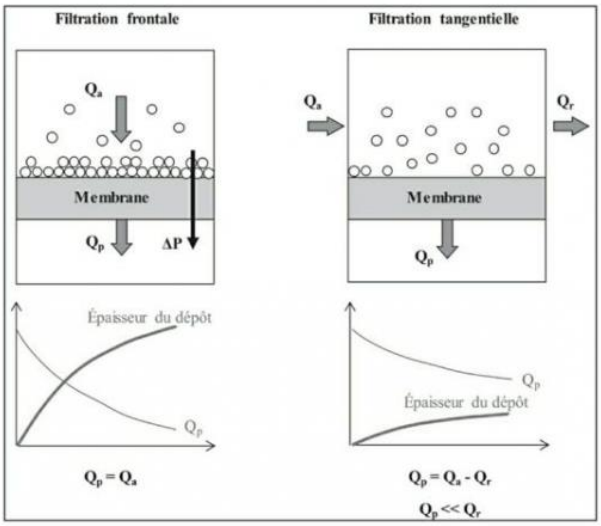


Figure 13 : Filtration frontale et tangentielle

1.2.3 Filtration flux constant :

Ces dispositifs sont ajustés en fonction du débit de perméat, qui est quantifié étape par étape. L'électrovanne de laminage applique une consigne au débit de perméat et augmente donc la pression moyenne de chaque étage au fur et à mesure que le colmatage augmente. Ce système est a priori divergeant car le colmatage allant en général en augmentant, la régulation du système commande une augmentation de la pression transmembranaire (ou plus rarement du débit de recirculation). Ainsi, il est également nécessaire de le surveiller avec un pressiostat (ou un dispositif similaire), capable de désactiver l'équipement lorsque la pression atteint une valeur maximale spécifiée, correspondant soit à la pression maximale tolérée par les modules ou membranes, soit à la pression identifiée comme maximale (mais inférieure à la précédente) par des essais pilotes [30].

1.2.4 Filtration pression constante :

Les procédures effectuées à une pression moyenne constante sont celles les plus fréquemment appliquées, car elles sont initialement plus faciles à mettre en place. Ce contrôle peut être réalisé à l'aide d'une vanne de régulation en sortie de module ou d'installation. Dans le cadre où l'installation est équipée d'une pompe non volumétrique, une modification de la contre-pression peut provoquer des fluctuations dans le débit de circulation : dans ce contexte, même si la pression moyenne ou la pression de sortie restent constantes Même si la pression moyenne ou la pression de sortie restent stables, la distribution des pressions au sein des modules peut changer avec le temps, affectant ainsi le bon fonctionnement du système. De plus, dans les installations dotées de plusieurs modules en chaîne, il est recommandé de réguler la pression par module individuellement, afin de ne pas dissimuler des changements significatifs de pression entre différents niveaux. Il convient de souligner que, à moins d'une défaillance de la régulation, un système opéré à pression maintenue est initialement stable et peut être sécurisé grâce à un simple pressiostat [30].

1.3 Procédés membranaires :

Les méthodes basées sur des membranes sont employées pour séparer et concentrer des molécules ou des composés ioniques en solution, ainsi que pour séparer des particules ou des microorganismes suspendus dans un liquide [31].

Il en existe plusieurs procèdes membranaires tels que ; la nanofiltration (NF), la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF) et l'osmose inverse (OI).

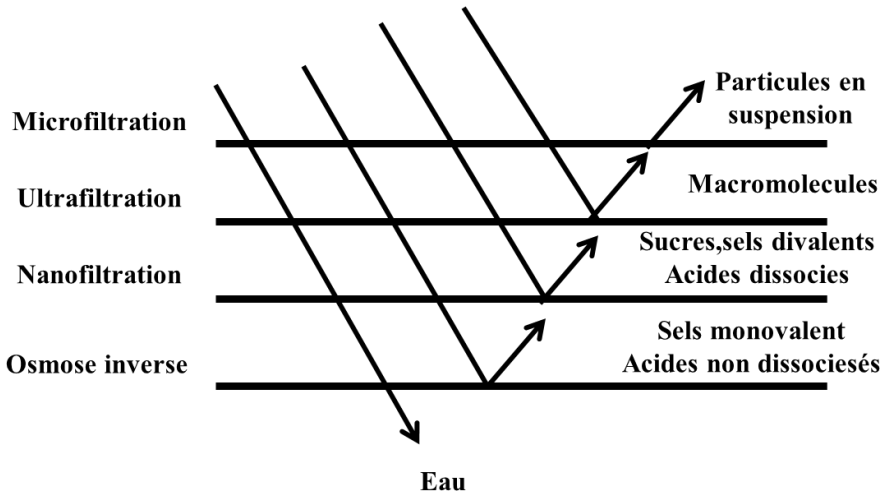


Figure 14 : Les procédés membranaires et leurs caractéristiques de séparation

1.3.1 La nanofiltration NF :

La nanofiltration est un processus cinétique et non un processus d'équilibre [32] avec des mécanismes de transport par tamisage et diffusion [24].

Une membrane de nanofiltration est une membrane artificielle poreuses, avec des pores plus grands que ceux des membranes d'osmose inverse, mais trop petits pour permettre la perméation de nombreux composés organiques [33]. Les pores présentent un diamètre approximativement dans la fourchette nanométrique, se situant au seuil entre les micropores et les mésopores. Ces dernières peuvent être chargées avec une quantité fixe d'électricité. La capacité des substances à traverser ces pores est contrainte par deux facteurs principaux : la taille des pores eux-mêmes et la nature de la charge électrique associée aux groupes ioniques ou ionisable présents. Cette limitation résulte de la force motrice de transfert induite par un gradient de pression, principalement hydrostatique. [34].

1.3.2 La microfiltration MF

Il est généralement défini comme l'écoulement sous pression (inferieur de 2 bars) d'une suspension contenant des particules colloïdales ou fines dont les dimensions sont comprises entre 0,02 et 10 mm à travers une membrane [24].

Le procédé de microfiltration est réalisé dans deux types de configurations : en Dead end et enCross Flow.

Cross Flow est un procédé de séparation solide-liquide en aval dans lequel une suspension s'écoule tangentiellement sous une pression modérée à travers une membranemicroporeuse [24].

Dead end :(perméat) est forcée perpendiculairement à travers le filtre, tandis que toutes ou la plupart des particules sont retenues. La force motrice pour l'écoulement du perméat est la chute de pression à travers la membrane [19].

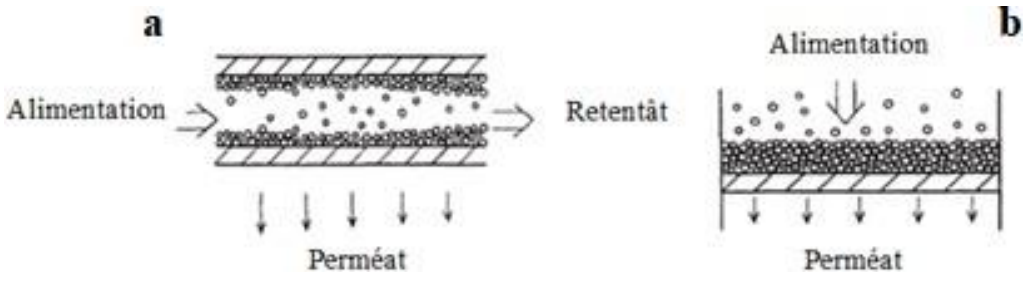


Figure 15 : Configuration de la microfiltration, a) Dead end filtration b) cross flow Filtration

1.3.3 Ultrafiltration UF :

Est un procédé qui utilise des membranes microporeuses avec une taille de pores allant de 1 à 100 nm [32] sous pression (entre 1 et 10 bars) qui permet de concentrer et de fractionner les solutés macromoléculaires et de séparer les espèces en suspension tels que, les biomolécules, les polymères et les particules colloïdales [24].

1.3.4 Osmose inverse OI :

La technologie de l'osmose inverse (OI) s'est beaucoup développée ces dernières années, de nouveaux types de membranes sont désormais disponibles, ce qui entraîne une augmentation de la diversité des applications. Des améliorations ont été apportées aux matériaux des membranes, les rendant plus résistantes au pH, à la température et au chlore que les membranes traditionnelles en acétate de cellulose et aussi la capacité à séparer simultanément,ou sélectivement, les solutés organiques et inorganiques des systèmes aqueux sans changement de phase permettent de réaliser des économies d'énergie substantielles et la possibilité de varier la conception des processus de séparation [19].

Une installation industrielle d'osmose inverse se compose généralement de trois sections distinctes qui sont illustrées à la figure 4.2. La première section est la section de prétraitement dans laquelle l'eau d'alimentation est traitée pour répondre aux exigences des fabricants d'éléments d'osmose inverse et aux exigences des bonnes pratiques d'ingénierie. En tenant compte des normes de bonne ingénierie.

Une fois le prétraitement effectué, l'eau d'alimentation est dirigée vers la zone d'osmose inverse. Oùelle est mise sous pression et acheminée vers les éléments d'osmose inverse qui se trouvent dans des récipients sous pression. L'eau d'alimentation s’écoule la surface de la membrane, oùl'eau produite traverse la membrane et où une quantité prédéterminée reste en arrière comme rejet. Le rejet est évacué vers les déchets tandis que l'eau de production est acheminée vers la section de post-traitement. La troisième section de post-traitement traite l'eau produite pour éliminer le dioxyde de carbone et ajoute des produits chimiques en fonction de l'utilisation industrielle de l'eau produite [28].

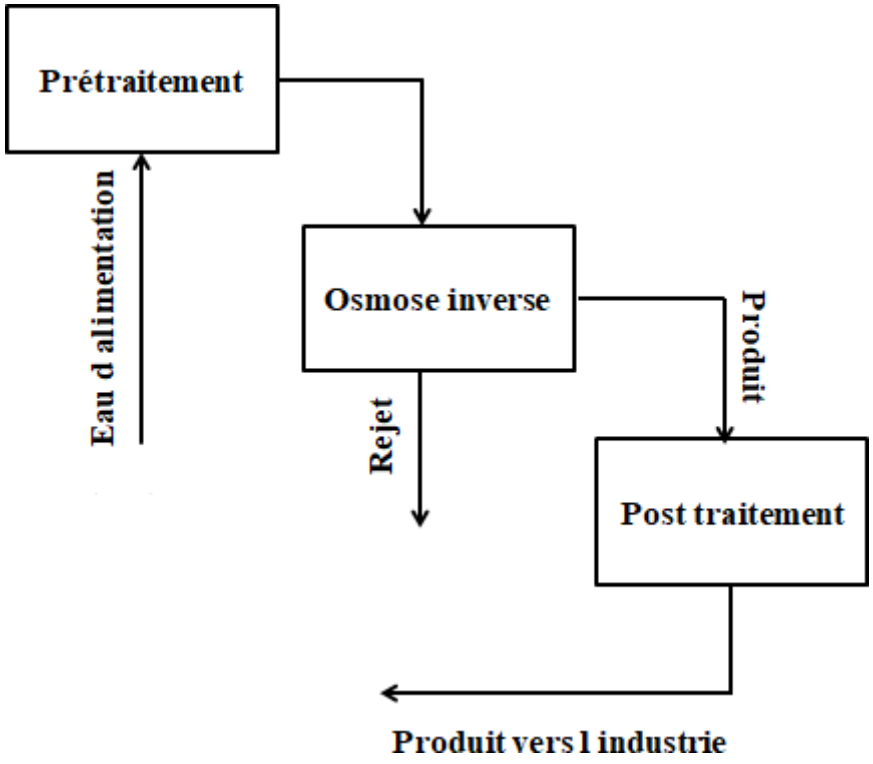


Figure 16 : Osmose inverse industriel

- **Structure et description :**

L'osmose inverse est un procédé permettant d'éliminer les solutés tels que les ions dissous d'une solution, Quand une membrane semi-perméable sépare l'eau d'une solution concentrée d'ions, l'eau se déplace à travers la membrane dans la solution concentrée grâce à l'osmose pour égaliser la concentration de l'eau ou s'équilibrer. L'eau continue à s'écouler jusqu'à ce qu'une pression osmotique suffisante s'établisse côté de la solution concentrée pour empêcher l'écoulement de l'eau vers le haut du gradient de concentration. Lorsqu'une pression supérieure à la pression osmotique le flux s'inverse. Ce processus est appelé "osmose inverse" et donne une solution saline concentrée du côté de l'alimentation de la membrane et une solution presque pure de l'autre côté de la membrane ; en fait, l'eau est pressée et s'écoule à travers la membrane sous pression [32].

La membrane OI a une structure anisotrope (également appelée asymétrique) : elle est constituée d'une couche de peau extrêmement fine (100-500 nm d'épaisseur) avec une texture microporeuse très fine et de plus, il existe une couche de support résineux très épaisse, caractérisée par des pores de grande taille, ainsi qu'une autre couche de support résineux,

beaucoup plus épaisse, dont les pores sont beaucoup plus grands. Dans le cas des membranes RO en acétate de cellulose (CA) du type Loeb-Sourirajan, par exemple, les pores de la couchede peau ont été estimés, sur la base des résultats d'expériences de diffusion d'eau titrée, à moins de d'eau titrée, comme étant inférieurs à 0,8 nm (8 A °) de diamètre, et d'épaisseur des pores de la structure inférieure se situe entre 100 et 400 nanomètres [24].

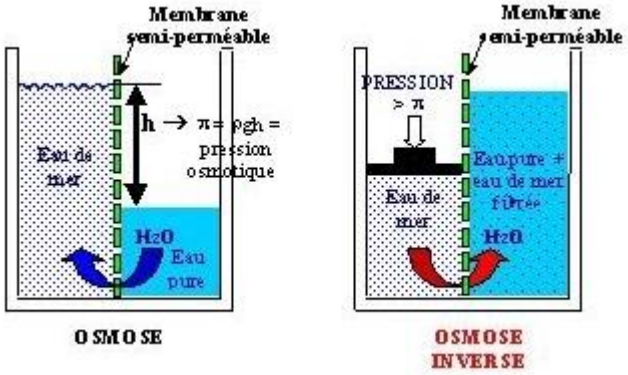


Figure 17 : Principe de l'osmose inverse

- **Applications :**

Cette méthode sert à la désalination des eaux (traitement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production d'eau ultrapure) ainsi qu'à la concentration de liquides (comme la concentration de jus de fruits). [35].

- **Facteurs influençant l'efficacité de l'osmose inverse :**

Malgré tout le prétraitement et l'attention portée à l'hydraulique du système, la plupart des systèmes d'OI finissent par présenter une dégradation des performances, qui se manifeste par une perte de débit du perméat, une perte de rejet des sels ou une augmentation de la perte de charge [36].

Ces performances sont généralement compromises par la polarisation de la concentration et le colmatage [29].

1.5.4.1.1 Polarisation de concentration :

Ce phénomène décrit l'augmentation des espèces solides retenus ou de la concentration de solutés à la surface de la membrane [24].

Ces composés ont une propension à s'accumuler sur la surface de la membrane. En fonction du matériau solide concerné, cette accumulation peut prendre la forme d'une couche collante et gélatineuse. Cela entraîne une résistance accrue au passage du fluide à travers la membrane, en plus de celle inhérente à la membrane elle-même et à la couche limite [29].

1.5.4.1.2 Colmatage :

Les difficultés liées à la formation de dépôts ont été le principal obstacle à l'adoption rapide de la technologie des membranes lors de son introduction. Heureusement, des progrès substantiels ont été réalisés au cours des dernières années [33].

Le colmatage résulte de nombreux facteurs tels que les conditions opératoires, la membraneen elle-même, et de la solution a traité et les principaux mécanismes de colmatage des membranes sont l'adsorption des composants de l'alimentation, le bouchage des pores, l'interaction chimique entre les solutés et le matériau de la membrane, la formation de gel et lacroissance biologique [29].

2 Le colmatage :

2.1 Définition du colmatage :

Le colmatage des membranes est dû à des interactions physiques et chimiques complexes entre les différents constituants du colmatant dans l'alimentation et entre ces constituants et lasurface de la membrane [37].

Le transport de masse peut conduire à la fixation, à l'accumulation ou à l'adsorption indésirables à la surface de la membrane ou à l'intérieur de ses pores, ce qui entraîne une diminution du flux de perméation et le rejet de sel [38].

2.2 Types de colmatage :

Le colmatage peut être divisé en colmatage externe et encrassement interne, en fonction des lieux d'encrassement, les processus de formation de dépôts sur les membranes opérant à faible pression (MF et UF) diffèrent légèrement de ceux observés sur les membranes fonctionnant à haute pression (NF et RO). Pour la MF et l'UF, l'adsorption et le colmatage des pores sont plus fréquents,alors que pour les membranes NF et RO, le colmatage de surface est comparativement plus fréquent en raison de la nature relativement compacte et non poreuse de la membrane RO [11].

2.2.1 Le colmatage externe :

Est un "colmatage de surface", qui implique trois mécanismes distincts : (1) la formation de tartre, c'est-à-dire la cristallisation hétérogène de sels minéraux sur la membrane ; (2) la formation de gâteau, c'est-à-dire l'accumulation de solides rejetés sur la membrane ; et (3) la formation de biofilm, c'est-à-dire la colonisation du module de la membrane par des micro-organismes viables. Plusieurs mécanismes d'encrassement de surface peuvent fonctionner simultanément, produisant des effets synergiques ou antagonistes. Les trois formes d'encrassement externe sont influencées par les conditions d'exploitation, la chimie de la solution, la température, les propriétés de la membrane et la géométrie du module tandis quela formation de biofilms est en outre régie par le potentiel de croissance biologique de l'eau d'alimentation. Le dépôt externe est réduit grâce au prétraitement et est d'avantage atténué par le nettoyage [39].

2.2.2 Le colmatage interne :

Il s'agit d'une transformation de la structure de la membrane résultant soit d'une compaction physique, soit d'une dégradation chimique - chaque élément contribuant à modifier le mouvement des solutés et des solvants. La dégradation chimique se produit lorsqu'un produit chimique spécifique attaque la structure du polymère. Par exemple, une exposition continue au chlore favorise le passage du sel au fil du temps. La compaction physique se produit lorsque les membranes polymériques sont soumises à des pressions hydrauliques élevées pour générer et maintenir un flux d'eau produit souhaité. Les vides macroscopiques et microscopiques dans la membrane peuvent s'effondrer lorsque subies à des pressions supérieures à leur capacité élastique. Le colmatage interne dû à la dégradation par le chlore et à la compaction physique est en grande partie irréversible.

En termes de types de colmatant, le colmatage peut également être classé en colmatage : biologique (bactéries, champignons), colloïdal (argiles, flocs), entartrant (précipités minéraux)et organique (huiles, polyélectrolytes, humiques) [40].

2.2.3 Biologique :

C'est le processus d'adhésion et de prolifération des micro-organismes à la surface des membranes [11] qui peut se produire par le dépôt, la croissance et le métabolisme de cellules bactériennes ou de flocs sur les membranes [37]. En d'autres termes c'est la fixation des micro-organismes à la surface de la membrane., grâce à l'interaction entre les cellules et les membranes ; les microbes attachés sont capables d'utiliser les matières organiques

provenantde l'eau d'alimentation ou les matières organiques rejetées par les membranes pour se reproduire et former un film biologique extracellulaire ou biofilm qui augmente la résistance de la membrane est affectée; il est également relevé que le biofilm augmente la pression osmotique, diminuant ainsi la force motrice totale à travers la membrane [41].

2.2.4 Colloïdal :

Les colloïdes sont omniprésents dans les eaux naturelles et de traitement, la taille de ces particules varie de quelques nanomètres à quelques micromètres, Le modèle de la couche de gel décrit l'accumulation de colloïdes à la surface de la membrane, qui forment un gâteau qui augmente la résistance à l'écoulement de l'eau à travers la membrane [41].

Les impuretés colloïdales courantes peuvent être classées en deux catégories principales : les agents de pollution inorganiques et les macromolécules organiques, incluant les minéraux tels que le silicate d'aluminium, la silice, ainsi que les oxydes/hydroxydes de fer tandis que les macromolécules organiques présentes dans l'eau sont principalement constituées de matières comme les polysaccharides, les protéines et certaines matières organiques naturelles [11].

2.2.5 Entartrage :

Les sels peu solubles tels que $CaCO_3$, $CaSO_4$ et SiO_2 peuvent précipiter à la surface de la membrane lorsque leur concentration dépasse les limites de solubilité et réduire ainsi le débit de produit à travers la membrane [42].

Le tartre est causé par la précipitation des sels métalliques dissous dans l'eau d'alimentation sur la surface de la membrane. Au fur et à mesure que l'eau exempte de sel est éliminée dansle perméat, la concentration d'ions dans l'eau d'alimentation augmente jusqu'à ce que la limite de solubilité soit dépassée. Le sel précipite alors à la surface de la membrane sous forme de tartre [23].

De plus, l'entartrage formé par la précipitation de sels sur la surface de la membrane est souvent causé par le carbonate de calcium ($CaCO_3$), le sulfate de calcium ($CaSO_4$), la silice (SiO_2) et l'hydroxyde de fer ($Fe(OH)_3$) dans le processus SWRO [43].

2.2.6 Organique :

Un colmatant organique commun est la matière organique naturelle, qui est un mélange hétérogène complexe de différentes macromolécules organiques provenant de la

dégradation et de la décomposition d'organismes vivants ; Un autre polluant organique est la matière organique résiduelle dans les effluents des stations d'épuration des eaux usées. La capacité desencrassant organiques à encrasser les membranes comprend leur affinité pour la membrane de l'OI, leur poids moléculaire et leur fonctionnalité. Les groupes fonctionnels négatifs présents sur les polyélectrolytes organiques peuvent être repoussés par les surfaces de membranes d'OI qui portent une charge négative. Une plus grande densité de charge sur la surface de la membrane est souventassociée à une hydrophilie plus élevée. Comme la plupart des membranes d'osmose inverse sont constituées de polymères hydrophobes, les matières organiques présentes dans l'eau d'alimentation ont tendance à être adsorbées préférentiellement sur les surfaces de la membrane [24].

Ces matières organiques se composent généralement de substances humiques, de polysaccharides, de protéines, de lipides, d'acides nucléiques et d'acides aminés, d'acides organiques, et de composants cellulaires [11].

2.3 Indice de colmatage :

Pour caractériser le colmatage des membranes d'osmose inverse, différentes méthodes ont été développées pour évaluer le potentiel de colmatage d'une eau. Les indices les plus couramment utilisés pour évaluer le colmatage sont le SDI (Silt Density Index) et le MFI (Modified Fouling Index) [44].

2.3.1 Silt Density Index (SDI) :

Le SDI est un test empirique initialement mis au point par Dupont Permasep pour caractériser le potentiel d'encrassement de leurs éléments en fibres fines creuses [45].

Ce test est typiquement appliqué aux eaux à faible potentiel de colmatage, telles que les eaux prétraitées qui alimente l'OI ou la NF. Pour calculer le SDI (Silt Density Index), on se réfère à la norme ASTM D4189-95. Le processus implique de faire passer de l'eau à travers une membrane filtreuse de 0,45 μm, en utilisant un système de filtration à flux mort (Dead-end) avec une pression maintenue à 207 kPa. Les intervalles de temps |ti| nécessaires pour filtrer un volume spécifique, V, est enregistré [46]. Lavaleur SDI est alors calculée comme suit :

$$SDI = \frac{100\%}{t_f}\left(1 - \frac{t_1}{tf}\right) = \frac{p\%}{t_f} \quad (1)$$

Où **SDI** est l'indice de densité du limon (%/min), $\mathbf{t_f}$ est la durée de de filtration écoulé (min) après le début de la collecte des 500 premiers ml, $\mathbf{t_1}$ est le temps nécessaire pour collecter les

premiers 500 ml et $\mathbf{t_2}$ est le temps nécessaire pour recueillir les seconds 500 ml après 15 minutes (ou moins). Si le taux de colmatage **%P** est supérieur à 75%, une période plus courte $\mathbf{t_f}$ doit être prise en compte, par exemple 10, 5 ou 2 min.

En réorganisant les formules, on peut facilement montrer que le SDI mesure la baisse du taux de filtration exprimée en "pourcentage" par min [45].

2.3.2 Indice de colmatage modifié (MFI) :

C'est un test qui estime le potentiel de colmatage d'une eau, basé sur la théorie de la filtration sur gâteau et peut être utilisé pour modéliser la diminution du flux ou l'augmentation de la pression pour maintenir une capacité constante dans le système d'une membrane [44].

L'essai MFI est réalisé de manière similaire à l'essai SDI en appliquant une pression constantede 207 kPa dans une filtration en Dead-end utilisant une membrane de 47 mm de diamètreavec une taille de pores de 0,45 µm [46]

La valeur MFI est alors calculée comme suit :

$$MFI = \left(\frac{\mu_{20}}{\mu_T}\right) x \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right) tan\, \alpha \qquad (2)$$

Ou **µ20** c'est la viscosité de l'eau à la température 20°C (Pa.s), **µT** la viscosité de l'eau à la température de la solution (Pa.s), **ΔP** c'est la pression Transmembranaire appliquée (kPa), **ΔP0** :Pression Transmembranaire à 210 kPa **Tanα** : Pente de la partie linéaire de la courbe de f(V)=t/V} ; La valeur recommandée du MFI pour un fonctionnement acceptable de l'osmose inverse est comprise entre 0 et 2 s/L^2 [46].

2.4 Mécanisme du colmatage :

La diminution du flux dans la filtration sur membrane est le résultat de l'augmentation de la résistance de la membrane par le blocage des pores de la membrane et la formation d'une couche de gâteau à la surface de la membrane [47].

L'obstruction des pores et la création de couches de dépôt peuvent être vues comme les principaux mécanismes responsables de l'encrassement des membranes.

2.4.1 Le blocage des pores :

La chute initiale rapide du flux de perméat peut être attribuée à un blocage rapide des pores dela membrane. Le flux maximal de perméat se produit toujours au début de la filtration

parce que les pores de la membrane sont propres et ouverts à ce moment-là. Le flux diminue lorsqueles pores de la membrane sont bloqués par des particules retenues. Les pores sont plus susceptibles d'être partiellement bloqués et le degré de blocage des pores dépend de la formeet de la taille relative des particules et des pores. Le blocage est généralement plus complet lorsque les particules et les pores sont similaires en forme et en taille ; Le blocage des pores est un processus rapide comparé à la formation d'un gâteau puisque moins d'une couche de particules est suffisante pour obtenir un blocage complet. Augmente la résistance de la membrane [23].

2.4.2 Formation du gâteau :

C'est une baisse supplémentaire du flux après le blocage des pores, due à la formation et à la croissance d'une couche de gâteau à la surface de la membrane, lorsque la quantité de particules retenues augmente ; cette couche crée une résistance supplémentaire à l'écoulement du perméat et cette dernière augmente avec l'accroissement de l'épaisseur de la couche de gâteau entraîne une diminution progressive du flux de perméat au fil du temps [47].

2.5 Autopsie membranaire :

L'autopsie des membranes est l'une des méthodes les plus courantes pour identifier la nature et l'origine de colmatage des membranes d'OI ; Cette technique représente une approche destructrice bien établie pour évaluer l'état des membranes et identifier leurs problèmes de performance [48].

L'autopsie membranaire comprend l'exécution séquentielle d'une série de tests standard dans des conditions de laboratoire sur des éléments membranaires prélevés sur des trains d'OI dont les performances sont compromises [49].

Elle comprend généralement l'inspection physique de l'extérieur de l'élément, la dissection de l'élément et l'examen de son intérieur, suivis d'une série de tests physiques, chimiques et microbiologiques effectués sur la membrane et les dépôts de surface afin d'élucider les différents types de défauts de la membrane et l'identité des dépôts [48].

Cependant, les autopsies de membrane n'ont pas été suffisamment pratiquées, malgré tous les avantages palpables qui peuvent en être tirés. Les raisons invoquées sont la nature destructive de l'autopsie de la membrane qui rend l'élément inutilisable par la suite, les coûts associés à la réalisation de l'autopsie et au remplacement de la membrane, le temps de

l'autopsie pour arrêter les perturbations opérationnelles immédiates.

2.6 Nettoyage des membranes :

Un bon système de prétraitement est essentiel pour obtenir une longue durée de vie de la membrane d'osmose inverse, mais le prétraitement doit être accompagné d'un programme de nettoyage approprié ; En général, cela se fait une ou deux fois par an, mais plus souvent si l'alimentation est une eau à problème. Comme pour le prétraitement, la procédure spécifique de nettoyage est en fonction de la chimie de l'eau d'alimentation, du type de membrane et du type d'encrassement [23].

Les membranes d'OI sont généralement nettoyées séparément à pH faible et élevé, en fonctiondu type de colmatant de la membrane ; Des nettoyants à faible pH sont plus efficaces pour supprimer les minéraux de tartre et les matières colloïdales inorganiques, tandis que ceux à pH élevé sont préférés pour traiter les matières organiques et le colmatage biologique. Les biocides sont utilisés pour minimiser et contrôler la croissance des bactéries et des biofilms qui en résultent. Les membranes spiralées composites typiques en polyamide sont assez résistantes aux nettoyants acides, mais sont plus susceptibles d'être endommagées par un pH élevé [50].

Un régime de nettoyage typique consiste à rincer les modules de la membrane en faisant recirculer la solution de nettoyage à grande vitesse à travers le module, suivi d'une période de trempage, suivie d'un second rinçage, et ainsi de suite [23].

Conclusion générale :

L'augmentation de la demande en eau, y compris en eau potable, à l'échelle mondiale, pose un défi significatif aux autorités publiques en raison de la sécheresse et de la croissance démographique. La recherche de solutions innovantes pour l'alimentation en eau devient donc essentielle, notamment grâce au dessalement de l'eau de mer via l'osmose inverse, qui offre une perspective prometteuse pour la production d'eau potable, surtout dans les régions côtières. Néanmoins, ces technologies récentes, telles que l'osmose inverse, comportent des coûts élevés et nécessitent un entretien spécifique pour assurer une alimentation en eau de haute qualité et prolonger la durée de vie des membranes, tout en tenant compte des délais requis par les fournisseurs.

Références bibliographiques

[1] "Igor Shiklomanov's chapter 'World fresh water resources' in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).," 1993.

[2] B. Philippe, "Le Dessalement De L'Eau De Mer Et Des Eaux Saumatres.," *Encycl. l'énergie*, 2016.

[3] M. Mozas and A. Ghosn, "État des lieux du secteur de l'eau en Algérie," *Etudes Anal.*, 2013, [Online]. Available: http://www.ipemed.coop/fr/publications-r17/etudes-analyses-c108/Etat-des-lieux-du-secteur-de-leau-en-algerie-a2150.html.

[4] J.-M. Berland and C. Juery, "Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau," *Doc. Tech. FNDAE*, 2002, [Online]. Available: https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/37/185566/185566_doc.pdf.

[5] L. Y. Dudley and E. G. Darton, "Membrane autopsy — a case study," *Desalination*, vol. 105, no. 1–2, pp. 135–141, 1996, doi: 10.1016/0011-9164(96)00067-7.

[6] F. H. Butt, F. Rahman, and U. Baduruthamal, "Characterization of foulants by autopsy of RO desalination membranes," *Desalination*, vol. 114, no. 1, pp. 51–64, 1997, doi: 10.1016/S0011-9164(97)00154-9.

[7] K. Kecili, H. Habarou, H. Suty, J. P. Croué, and M. Pontié, "Editorial," *Comptes Rendus Chim.*, vol. 9, no. 9, pp. 1178–1191, 2006, doi: 10.1016/j.crci.2005.12.007.

[8] M. Karime, S. Bouguecha, and B. Hamrouni, "RO membrane autopsy of Zarzis brackish water desalination plant," *Desalination*, vol. 220, no. 1–3, pp. 258–266, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.02.040.

[9] G. Fernandez-Álvarez, G. Garralón, F. Plaza, A. Garralón, J. Pérez, and M. A. Gómez, "Autopsy of SWRO membranes from desalination plant in Ceuta after 8 years in operation," *Desalination*, vol. 263, no. 1–3, pp. 264–270, 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.06.068.

[10] S. Chesters, M. Armstrong, R. Wilson, and M. Fazel, "a Study of the Physical and

Chemical Damage on Reverse Osmosis Membranes Detected By Autopsies," *Int. Desalin. Assoc. World Congr. Desalin. Water Reuse*, pp. 13–184, 2013.

[11] S. Jiang, Y. Li, and B. P. Ladewig, "A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies," *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 567–583, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235.

[12] V. Lazarova, S. Gallego, V. G. Molina, and P. Rougé, "Problems of operation and main reasons for failure of membranes in tertiary treatment systems," *Water Sci.Technol.*, vol. 57, no. 11, pp. 1777–1784, 2008, doi: 10.2166/wst.2008.241.

[13] L. Fortunato, A. H. Alshahri, A. S. F. Farinha, I. Zakzouk, S. Jeong, and T. O. Leiknes, "Fouling investigation of a full-scale seawater reverse osmosis desalination (SWRO) plant on the Red Sea: Membrane autopsy and pretreatment efficiency," *Desalination*, vol. 496, no. March, p. 114536, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114536.

[14] S. Talantikite, K. Benrachedi, and A. History, "Autopsy of an old reverse osmosis membrane from Cap Djenet seawater desalination plant: case study of Algeria," *Alger. J. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 1491–1501, 2020, [Online]. Available: www.aljest.org.

[15] W. J. Koros, Y. H. Ma, and T. Shimidzu, "Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996)," *Pure Appl. Chem.*, vol. 68, no. 7, pp. 1479–1489, 1996, doi: 10.1351/pac199668071479.

[16] Dr. José G. Sanchez Marcano and Professor Theodore T. Tsotsis, "Catalytic Membranes and Membrane Reactors | Wiley," Apr. 11, 2002. https://www.wiley.com/en-us/Catalytic+Membranes+and+Membrane+Reactors-p-9783527601981 (accessed Apr. 17, 2021).

[17] P. Bacchin, P. Bacchin, and P. De, "Principes de base des Technologies à Membranes," *2ème Ec. d'Eté Fr. Maghrébine" Sci. Technol. à Membr.*, p. 7, 2005, [Online]. Available: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00201760.

[18] W. S. W. Ho, and T. Matsuura, *advanced membrane technology and application*. 2008.

[19] W.S.Winston Ho, *Membrane Handbook.* Springer Science+Business Media New York 1992.

[20] M Jaffrin, *Procédés de filtration membranaire*,1 ere edition,bookboon 2014.

[21] W. Q. Association, "Technical application bulletin - Selenium," *Signs (Chic).*, no. October, pp. 1–3, 2005.

[22] "MEMBRANES,transferts-Encyclopædia,Universalis." https://www.universalis.fr/encyclopedie/membranes-transferts/ (accessed Apr. 17, 2021).

[23] R. W. Baker, "MEMBRANE TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SECOND EDITION ohn Wiley & Sons, Ltd "

[24] J. C. K.Wang, *Membrane and Desalination Technologies*. 2011.

[25] TAKABAIT Fatah, "Traitement de l'Eau de Forage par Osmose Inverse au Niveau du Complexe Agroalimentaire Cevital," p. 13, 2012, [Online]. Available:http://www.univ-bejaia.dz/dspace/bitstream/handle/123456789/9199/Traitement de l'eau de forage par osmose Inverse au niveau du complexe agroalimentaire Cevital.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[26] R. Noble and S. Alexander Stern, "MEMBRANE SEPARATIONS TECHNOLOGY Principles and Applications," *Elsevier*, vol. 4, no. 4, p. 731, 1989, [Online]. Available: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426918908956311.

[27] S. D. Jean-Christophe REMIGY, "Filtration membranaire (OI, NF, UF) - Présentation des membranes et modules : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur," Apr. 10, 2007.://www-techniques-ingenieur-fr.sndl1.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/procedes-de-traitement-des-eaux-potables-industrielles-et-urbaines-42318210/filtration-membranaire-oi-nf-uf-w4090/ (accessed Apr. 17, 2021).

[28] Mark C. Porter, *Handbook of Industrial Membrane Technology*, Noyes Publications. 1990.

[29] Anil Kumar Pabby, Syed S.H.Rizvi, and Anna Maria Sastre, "Membrane Separations Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications," 2009.

[30] Pierre AIMAR, "Filtration membranaire (OI, NF, UF) - Mise en œuvre etperformances : Performances | Techniques de l'Ingénieur." https://www-techniques- ingenieur-fr.sndl1.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/procedes-de-

traitement-des-eaux-potables-industrielles-et-urbaines-42318210/filtration- membranaire-oi-nf-uf-w4110/performances-w4110niv10002.html (accessed Apr. 17,2021).

[31] C. Lo, "Synthese Technique Etude Comparative Des Membranes Utilisees En Production D ' Eau Potable :," no. 33, pp. 1–9, 2005.

[32] R. Singh, *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operation*, no. January. 2006.

[33] M. Cheryan, *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. CRC Press, 1998.

[34] Rémy AUDINOS, "Membranes semi-perméables - Membranes de nanofiltration :Mode d'action des membranes de nanofiltration | Techniques de l'Ingénieur," Nov. 10,2000. https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/caracterisation-des-membranes-42644210/membranes-semi-permeables-k363/mode-d-action-des-membranes-de-nanofiltration-k363niv10001.html (accessed Apr. 17, 2021).

[35] Alain MAUREL, "Techniques séparatives à membranes - Considérations théoriques : Présentation générale | Techniques de l'Ingénieur," Jun. 10, 1993. https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-operations-unitaires-genie-de-la-reaction-chimique-tiajb/archive-2/techniques-separatives-a-membranes-j2790/presentation-generale-j2790niv10001.html (accessed Apr. 17, 2021).

[36] P. A. Friedman, C. D. Swerdlow, and D. L. Hayes, "Troubleshooting," *Card. Pacing, Defibrillation Resynchronization A Clin. Approach Second Ed. Second Ed.*, pp. 401–516, 2009, doi: 10.1002/9781444300659.ch10.

[37] W. Guo, H. H. Ngo, and J. Li, "A mini-review on membrane fouling," *Bioresour. Technol.*, vol. 122, pp. 27–34, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.04.089.

[38] H. Sari Erkan, N. Bakaraki Turan, and G. Önkal Engin, "Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment," *Compr. Anal. Chem.*, vol. 81, pp. 151–200, 2018, doi: 10.1016/bs.coac.2018.02.002.

[39] E. M. V. Hoek, J. Allred, T. Knoell, and B. H. Jeong, "Modeling the effects of fouling

on full-scale reverse osmosis processes," *J. Memb. Sci.*, vol. 314, no. 1–2, pp. 33–49, 2008, doi: 10.1016/j.memsci.2008.01.025.

[40] L. Liu, X. B. Luo, L. Ding, and S. L. Luo, "Application of Nanotechnology in the Removal of Heavy Metal From Water," in *Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization*, Elsevier, 2018, pp. 83–147.

[41] M. O. Huajuan, "A STUDY ON ORGANIC FOULING OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANE," 2009.

[42] S. Lee, J. Kim, and C. H. Lee, "Analysis of CaSO4 scale formation mechanism in various nanofiltration modules," *J. Memb. Sci.*, vol. 163, no. 1, pp. 63–74, 1999, doi: 10.1016/S0376-7388(99)00156-8.

[43] Y. M. Kim, S. J. Kim, Y. S. Kim, S. Lee, I. S. Kim, and J. H. Kim, "Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network," *Desalination*, vol. 238, no. 1–3, pp. 312–332, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.10.004.

[44] J. S. Choi, T. M. Hwang, S. Lee, and S. Hong, "A systematic approach to determine the fouling index for a RO/NF membrane process," *Desalination*, vol. 238, no. 1–3, pp. 117–127, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.01.042.

[45] A. Alhadidi, A. J. B. Kemperman, B. Blankert, J. C. Schippers, M. Wessling, and W. G. J. van der Meer, "Silt Density Index and Modified Fouling Index relation, and effectof pressure, temperature and membrane resistance," *Desalination*, vol. 273, no. 1, pp. 48–56, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.11.031.

[46] L. N. Sim *et al.*, "A review of fouling indices and monitoring techniques for reverse osmosis," *Desalination*, vol. 434, no. December, pp. 169–188, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.12.009.

[47] H. D. and A. L. A. Abdelrasoul, "Fouling in Membrane Filtration and Remediation Methods," *Intech*, 2013, [Online]. Available: https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics.

[48] G. Liu, S. Pattanayak, P. Navaneethakrishnan, and R. Woodling, "Role of membrane

autopsy in enhancing reverse osmosis plant operation," *Water Pract. Technol.*, vol. 13,no. 1, pp. 106–114, 2018, doi: 10.2166/wpt.2018.020.

[49] NIKOLAY VOUTCHKOV, *PRETREATMENT FOR REVERSE OSMOSIS DESALINATION*. Elsevier, 2017.

[50] K. Andes, C. R. Bartels, E. Liu, and N. Sheehy, "Methods for Enhanced Cleaning of Fouled RO Elements," *Proc. IDA World Congr. Desalin. Water Reuse*, pp. 20–25, 2013.