الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et 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 du second cycle

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

MASTER

-Filière-

Génie des Procédés

-Spécialité -

Traitement des eaux

- Thème -

Les techniques de dessalement

Réalisé par

Nom et Prénom : BOUTEBBAKH Soumya

Les membres de Jury :

Mme TIGRINE Zahia	President	MRA	UDES
Mme ZEMMOURI Hassiba	Examinateur	Pr	ENSTA
Mme FERRAG Fatiha	Promotrice	MCA	UMMTO
Mme CHEIKH Assira	Co-Promotrice	MCB	ENSTA

Alger, le27 / 06 /2024

Année universitaire2023 –2024

Remerciement

Ce travail est une recherche bibliographique pour l'obtention du mémoire de master au département de Génie des Procédés de Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées. Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance et mes chaleureux remerciements les plus sincères à Dr CHEIKH Assira pour les conseils avisésqu'il m'a prodigué toute au long de cette étude, pour l'aide que j'ai trouvé auprèsde lui, le sérieux et la patience dont il a fait preuve à mon égard.

J'adresse également mes sincères remerciements Pr ZEMMOURI Hassiba professeur à l'ENSTA pour avoir accepté d'examiner et de juger le travail.

خلاصة

إزالة الملوحة من مياه البحر أمر أساسي في ظل التوزيع غير المتكافئ للموارد المائية العذبة على مستوى العالم، حيث أن 3% فقط من المياه هي عذبة. تعتبر مياه البحر، بتركيزها المتوسط للملوحة البالغ 35,000 جزء في المليون وتركيبتها المستقرة من أيونات الكلور والصوديوم، مصدرًا قابلاً للمعالجة. شهدت عمليات إزالة الملوحة، المعتمدة بشكل رئيسي على الطاقة الحرارية والغشائية، توسعًا كبيرًا. الطرق الحرارية، مثل التقطير متعدد المراحل، والطرق الغشائية، مثل التناضح العكسي، هي الأكثر استخدامًا. على سبيل المثال، يستخدم التناضح العكسي أغشية شبه نفاذة تحت ضغط عالي لفصل الماء عن الأملاح المذابة.

الكلمات المفتاحية : إزالة الملوحة من مياه البحر، التقطير متعدد المراحل، التناضح العكسي، الأغشية شبه النفاذة.

Résumé

Le dessalement de l’eau de mer est essentiel face à la répartition inégale des ressources en eau douce à travers le monde, où seulement 3% de l'eau est douce .L'eau de mer, avec sa salinité moyenne de 35 000 ppm et sa composition stable en ions chlorure et sodium, représente une source viable à traiter .Les procédés de dessalement, principalement thermiques et membranaires, ont vu une expansion significative. Les méthodes thermiques, comme la distillation multi-étage, et les méthodes membranaires, telles que l'osmose inverse, sont les plus utilisées. L'osmose inverse, par exemple, utilise des membranes semi-perméables sous pression élevée pour séparer l'eau des sels dissous.

Mots clés : dessalement de l'eau de mer , distillation multi-étage , osmose inverse, membranes semi-perméables .

Abstract

Desalination of seawater is essential in light of the uneven distribution of freshwater resources worldwide, where only 3% of water is fresh. Seawater, with its average salinity of 35,000 ppm and stable composition of chloride and sodium ions, represents a viable source to treat. Desalination processes, mainly thermal and membrane-based, have seen significant expansion. Thermal methods, like multi-stage distillation, and membrane methods, such as reverse osmosis, are the most widely used. For example, reverse osmosis uses semi-permeable membranes under high pressure to separate water from dissolved salts.

English Keywords: desalination of seawater, multi-stage distillation, reverse osmosis , semi-permeable membranes.

Table des matières

Table des figures....1
Table des tableaux....2
I.1. Répartition de l'eau dans le monde et nécessité du dessalement de l'eau de mer....6
I.2. Capacité d'eau douce produit par dessalement....9
I.3. L'implantation des usines de dessalement dans le monde....10
Introduction....13
II.1.Présentation des principaux procédés permettant le Dessalement de l'eau de Mer:....13
II.1.1. Les Procédés membranaires :....13
II.1.1.1. L'Electrodialyse:....13
II.1.1.2. L'osmose inverse:....16
II.1.2. Technologie des Membranes:....17
II.1.3. Type des Membranes Selon Structure des Matériaux....17
II.1.3.1. Membranes organiques....17
II.1.3.2. Membranes minérales ou inorganiques....17
II.1.3.3. Membranes composites....18
II.1.3.4. Membranes échangeuses d'ions....18
II.1.4. Types des membranes selon la composition chimique....18
II.1.4.1. Membranes en acétate de cellulose....18
II.1.4.2. Membranes en polyamide....19
II.1.4.3. Membranes en poly-sulfone....19
II.1.4.4. Membranes Composites....19
II.1.4.5. Membranes Dynamiques....19
II.1.5. Durée de Vie des Membranes :....19
II.1.5.1. Module d'Osmose Inverse :....20
II.1.5.2. La distillation:....22

Table des figures

Chapitre I:

Figure I. 1 : Disponibilité mondiale en eau douce : Moyenne des eaux de surface et des recjarges d'eaux souterraines 6

Figure I. 2 : Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde (2013) 10

Chapitre II:

Figure II. 1 :Champ d'Application des Différentes Techninques de Filtration 14

Figure II. 2:Principe de l'Osmose Directe et de l'Osmose Inverse 17

Figure II. 3:: Modules à Fibres Creuses 21

Figure II. 4 : Modules spirales 22

Figure II. 5:Les Procédés de Dessalement de Type Thermique 23

Figure II. 6 : Schéma Du Procédé MSF 23

Figure II. 7:Les Procédés de Dessalement de Type Thermique 24

Figure II. 8:Schéma du Procédé MED 25

Table des tableaux

Tableau I. 1: Composition standard de l'eau de mer…… 7
Tableau I. 2 :Comparaison entre l'eau de mer et l'eau de rivière 8

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource essentielle à la vie et à l'ensemble des activités humaines. Cependant, malgré l'abondance apparente de l'eau sur Terre, seulement une petite fraction est disponible sous forme d'eau douce, utilisable directement pour la consommation humaine, l'agriculture, et les usages industriels. En effet, environ 97% de l'eau présente sur notre planète est de l'eau salée contenue dans les océans, rendant cette eau impraticable pour la majorité des besoins humains sans traitement préalable.

La répartition de l'eau douce est extrêmement inégale. Les régions riches en eau douce telles que l'Amérique du Nord, l'Europe et certaines parties de l'Asie possèdent des ressources suffisantes pour répondre à leurs besoins. En revanche, d'autres régions comme le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord, et certaines parties de l'Inde et de l'Asie du Sud-Est, souffrent de graves pénuries d'eau, exacerbées par des conditions climatiques arides et une infrastructure insuffisante.

Avec l'augmentation de la population mondiale, l'urbanisation rapide et le développement économique, la demande en eau douce ne cesse de croître. Les ressources traditionnelles en eau douce, telles que les rivières, les lacs et les nappes phréatiques, sont de plus en plus sollicitées, menant à des situations de stress hydrique dans de nombreuses régions du monde. Les changements climatiques aggravent encore ces défis, en affectant les régimes de précipitations et en augmentant l'incidence des sécheresses et des phénomènes météorologiques extrêmes.

Face à ces défis, le dessalement de l'eau de mer émerge comme une solution viable pour augmenter l'approvisionnement en eau douce. Le dessalement, ou l'élimination des sels et autres minéraux de l'eau de mer pour produire de l'eau douce, permet d'exploiter une ressource abondante et renouvelable : les océans. Ce procédé est particulièrement crucial pour les pays côtiers et insulaires qui disposent de ressources en eau douce limitées et doivent souvent faire face à des pénuries d'eau.

CHAPITRE I : Traitement de l’eau de mer

I.1. Répartition de l'eau dans le monde et nécessité du dessalement de l'eau de mer

72% de la surface de la terre est couverte d'eau, 3% d'eau douce. La répartition de cette eau sur la planète est inégale : 10 pays possèdent 60% des réserves d'eau douce tandis que 29 pays connaissent de nombreuses périodes de sécheresse.

Le manque d'eau affecte particulièrement l'Afrique, l'Inde et l'Asie mineure sur le planisphère (figure1.1). Cela s'explique par le climat aride de l'Afrique, ainsi que par le manque de réserves de terres souterraines, en comparaison avec la demande pour l'agriculture et la consommation. On peut également expliquer cette absence en Afrique par des installations souvent trop rares, en lien avec la pauvreté de ce continent [1].

Malgré sa semblable inépuisabilité, l'eau est très inégalement répartie dans le monde.

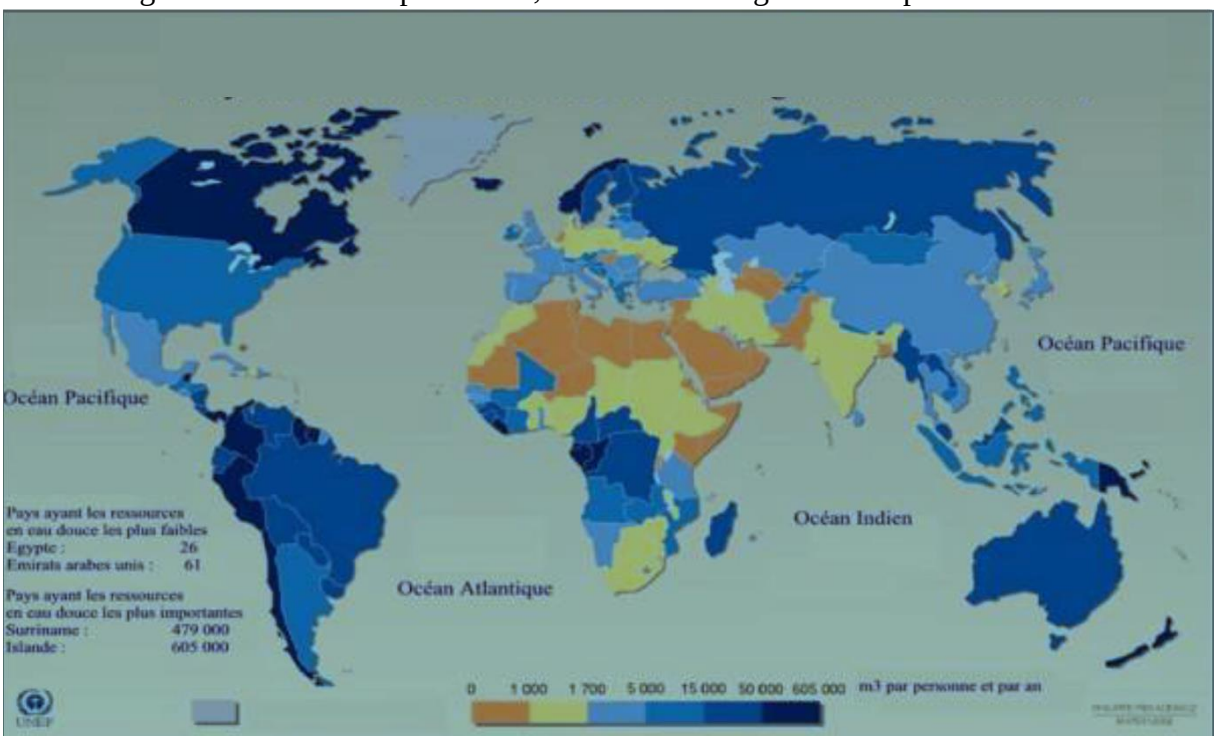


Figure I. 1 : Disponibilité mondiale en eau douce Moyenne des eaux de surface et des recharges d'eaux souterraines[2]

En raison de l'essor de l'industrie et de la demande croissante, tous les pays devront, à une échéance plus ou moins courte, adresser le problème de son manque. De tout temps, l'homme a été préoccupé par la mobilisation des eaux superficielles. Aucune vie humaine,

biologique ou animale ne serait possible sans l'eau, ce qui la rendrait un astre mort. Face aux demandes croissantes en eau douce et à l'impossibilité de se contenter des ressources naturelles, l'humanité est amenée à étudier et à développer différentes méthodes permettant d'en extraire à partir des eaux de mer, des eaux saumâtres et des eaux usées dans des conditions techniques et économiquement acceptables [3].

En somme, il est impossible de répondre aux besoins en eau actuels et futurs sans l'utilisation de ressources non conventionnelles (recyclage et dessalement de l'eau). La salinité moyenne de l'eau de mer est estimée à 35 000 ppm. Le tableau 1.1 présente la composition typique de l'eau de mer.

Tableau I. 1: Composition standard de l'eau de mer[4]

Ions chimiques	**Concentration [ppm]**	**Pourcentage de la teneur totale en sel [%]**
Chloride Cl^-	**19,345**	**55.0**
Sodium Na^+	**10,752**	**30.6**
Sulfate SO_4^{2-}	**02,701**	**7.6**
Magnesium Mg^{2+}	**01,295**	**3.7**
Calcium Ca^{2+}	**416**	**1.2**
Potassium K^+	**390**	**1.1**
Bicarbonate HCO^{3-}	**145**	**0.4**
Bromide Br^-	**66**	**0.2**
Borate BO_3^{3-}	**27**	**0.08**
Strontium Sr^{2+}	**13**	**0.04**
Fluoride F^-	**01**	**0.003**

Le sodium (30 %) et le chlorure (55 %) constituent les principaux composants chimiques de l'eau de mer, c'est-à-dire les composants du sel de table commun, qui représentent 85 % de la quantité totale de solides dissous dans l'eau de mer. Le sulfate et le magnésium sont

également présents, représentant respectivement près de 8 et 4%. Il est important de souligner que malgré les variations de la salinité de l'eau de mer en fonction de chaque région du monde, la composition en pourcentage de l'eau de mer est principalement constante à travers le monde (c'est-à-dire que les proportions des principaux composants sont constantes) [4].

L'eau de mer, mentionnée précédemment, présente une composition très différente de celle d'une eau de rivière classique, illustrée dans le tableau 1.2.

Tableau I. 2 : Comparaison entre l'eau de mer et l'eau de rivière[4].

Ions chimiques	**Pourcentage de teneur totale en sel dans l'eau de rivière [%]**	**Pourcentage de teneur totale en sel dans l'eau de mer [%]**
Chloride Cl^-	**8.6**	**55.0**
Sodium Na^+	**6.9**	**30.6**
Sulfate SO_4^{2-}	**12.4**	**7.6**
Magnesium Mg^{2+}	**4.6**	**3.7**
Calcium Ca^{2+}	**16.6**	**1.2**
Potassium K^+	**2.6**	**1.1**
Bicarbonate HCO^{3-}	**31.9**	**0.4**
Bromide Br^-	-	**0.2**
Borate BO_3^{3-}	-	**0.08**
Strontium Sr^{2+}	-	**0.04**
Fluoride F^-	-	**0.003**
Silica SiO_2	**14.6**	-
Iron Fe^{2+}	**0.7**	-
Nitrate NO^{3-}	**1.1**	-

La comparaison avec l'eau de mer met en évidence une diminution significative de la concentration de chlorure de sodium dans l'eau des rivières, atteignant moins de 16 %. Le calcium et le bicarbonate sont, à l'inverse, bien plus riches (environ 17 et 32 %, respectivement)

et constituent près de 50 % des solides dissous totaux. La silice joue également un rôle essentiel dans l'eau de la rivière, mais elle est peu présente dans l'eau de mer [4].

I.2. Capacité d’eau douce produit par dessalement

D'après les données récentes de l'International Desalination Association (IDA), 2016 est la troisième année de croissance continue du marché international du dessalement après un ralentissement au milieu des années 2000. Le 29e inventaire mondial de dessalement, publié par GWI DesalData en collaboration avec l'IDA, montre une augmentation de 14% des totaux de dessalement au milieu de 2015 par rapport à la même période en 2014. Cela témoigne d'une augmentation de l'activité après un seuil de 13 ans dans le marché du dessalement.

La capacité de dessalement ajoutée à l'échelle mondiale a augmenté de 3,7 millions de m3 / j entre juin 2015 et juin 2016, contre 3,2 millions de m3 / j l'année précédente. À l'échelle mondiale, la capacité cumulée installée des 18 983 usines de dessalement considérées comme en ligne est de 88,6 millions de m3 / j, dont les usines en construction qui devraient être achevées d'ici la fin de 2016. La capacité contractuelle globale cumulée au 30 juin 2016 est de 95,6 millions de m3/j [5].

Cette capacité ajoutée est en grande partie due à une série de tarifs pour des projets d'eau de mer à grande échelle, notamment dans la région du Golfe, alors que 2016 a été la troisième année d'augmentation annuelle de la capacité d'eau de mer, passant d'un million de m3 / jour de capacité supplémentaire en 2014 à 1,6 million de m3 / jour jusqu'en 2016, dépassant le total de 2015 de 200 000 m3 / jour. Les projets de grande envergure qui ont connu une augmentation ces trois dernières années ont également été renversés dans la plupart des cas, avec près de 60% de la capacité attribuée aux utilisateurs d'équipements jusqu'en 2015.

D'après l'annuaire de dessalement de l'IDA entre 2016 et 2017, ces deux derniers marchés sont en pleine industrialisation et soumis à un contrôle environnemental strict. On s'attend à d'autres évolutions mondiales de solutions de réutilisation car l'industrie et les municipalités sont pleinement conscients des bénéfices des stratégies de réutilisation de l’eau [5].

SITUATION DU DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LE MONDE

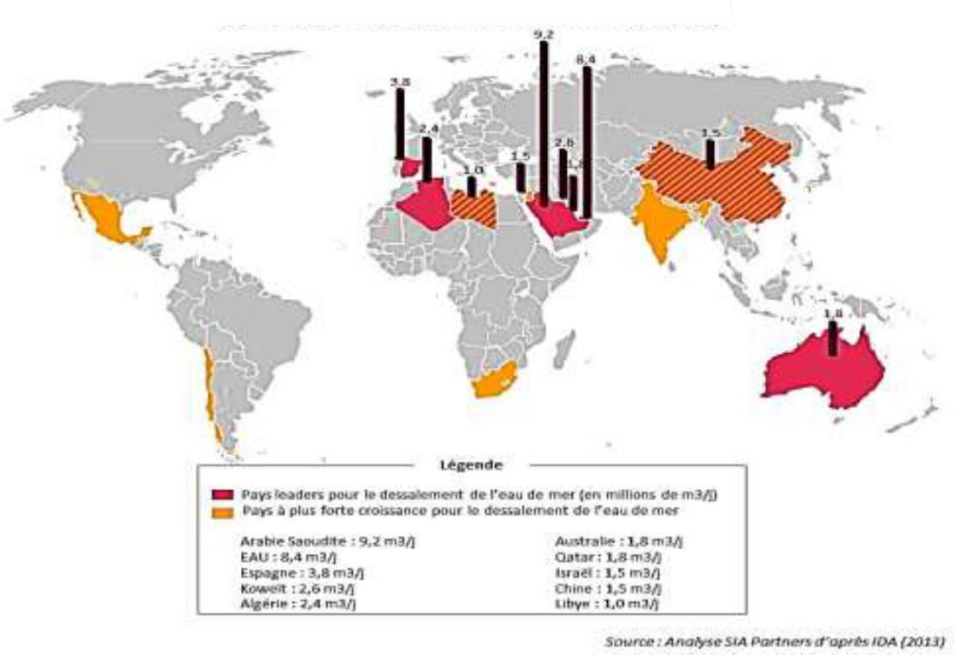


Figure I. 2 : Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde (2013) [6]

I.3. L'implantation des usines de dessalement dans le monde

En 2014, il y a de plus en plus d'usines de dessalement dans le monde. Actuellement (en 2017), 150 pays dans le monde possèdent des installations pour convertir l'eau de mer en eau douce. Mais le marché du dessalement reste très concentré dans certaines régions et quelques pays possèdent la grande majorité des capacités mondiales. En 2013, la capacité mondiale de dessalement de l'eau de mer était représentée par les dix pays les plus équipés en usines de dessalement. À travers le monde, il existe plus de 18 400 usines de dessalement en service [6], dont la moitié se situent au Moyen-Orient. En fait, la plus importante des usines de dessalement en Israël est Ashkelon, qui génère une importante quantité d'eau, environ 320 000 m3 par jour (soit 108 millions de mètres cubes par an), ce qui signifie que pour une population d'un million d'habitants, chaque individu dispose d'un mètre cubique.

Il peut boire quotidiennement 250 litres d'eau potable. Il s'agit de la référence mondiale de

dessalement par osmose inverse en 2013. On trouve également principalement dans la même région : l'usine de Fujaïrah aux Émirats Arabes Unis. L'usine de distillation de Djebel Ali aux Émirats Arabes Unis demeure la plus importante au monde, avec une capacité de 900.000 m3 par jour, tandis que celle de Dubaï en Arabie Saoudite produit 800.000 m3 par jour. Dans ces régions d'exploitation pétrolière, la distillation est privilégiée car elle utilise du gaz qui, autrement, serait brûlé [7] ; l'usine d'Amman en Syrie, ainsi que de nombreuses usines situées sur les côtes saoudiennes et dans ses pays frontaliers , l'usine de Djerba en Tunisie...

Les États-Unis sont en deuxième position derrière le Moyen-Orient en matière de dessalement. Aujourd'hui, 200 usines de dessalement d'eau de mer sont en cours de construction en Californie.

De construction. L'Australie est également en train de construire de nombreuses usines, la plus importante étant près de Melbourne.

Le même phénomène se manifeste non seulement en Amérique latine et en Espagne, des régions développées, mais également dans des pays d'Afrique du Nord comme l'Algérie (Maroc).

Avec une capacité de 500 000 m3 par jour et par habitant, l'Algérie a érigé la plus grande usine de dessalement par osmose inverse au monde, répondant aux besoins de 5 millions de personnes en eau potable. Actuellement, le secteur du dessalement génère un total de 55,6 millions de m3 d'eau potable par jour, mais il ne représente que 0,5% de la consommation mondiale [8].

CHAPITRE II : Principaux Procédée de Dessalement

Introduction

Les méthodes les plus populaires à travers le monde sont les méthodes thermiques et les méthode membranaires.
Le chauffage au-dessous du point d'ébullition est le premier moyen de chauffer l'eau de mer, en contrôlant la pression atmosphérique, afin d'éviter les dépôts de tartre. Cela crée de la vapeur qui se condense et donne de l'eau dessalée. La distillation Multi-Stage Flash (MSF) et la distillation à effets multiples MED sont différentes.

Il existe une légère distinction entre les deux méthodes, mais le principe demeure identique.
Les autres méthodes s'appuient sur le principe de la capacité des membranes, des couches microporeuses ou des films polymères à séparer l'eau de son sel sous l'application de pression.

II.1.Présentation des principaux procédés permettant le Dessalement de l'eau de Mer:

II.1.1. Les Procédés membranaires :

Les deux méthodes membranaires principales employées dans le processus de dessalement sont l'osmose inverse et l'électrodialyse. Avant de mettre en place ces filières utilisant des membranes, il est nécessaire de procéder à un prétraitement. En fonction de la qualité de l'eau brute et de la taille de l'unité, il pourra être composé de terrain naturel (puits côtiers), de micro ou ultrafiltration, voire d'une étape de floculation-décantation.

II.1.1.1. L'Electrodialyse:

En 1960, l'électrodialyse est une méthode électrochimique qui permet d'extraire les ions présents dans une solution.
La séparation membranaire est également définie comme une méthode de séparation qui utilise un champ électrique pour déplacer des ions, les cations vers la cathode et les anions vers l'anode. Une cellule d'électrodialyse est constituée de compartiments séparés par des membranes ; certaines membranes (C) sont perméables aux cations, tandis que les autres (A) sont perméables aux anions. La solution à électrodialyse est soumise à un champ électrique, ce qui entraîne la

migration du sel dans certains compartiments et la diminution de sa concentration des autres. Le tableau ci-dessous expose les domaines d'application des diverses méthodes de filtration traditionnelles ainsi que des différentes méthodes de séparation par membrane.

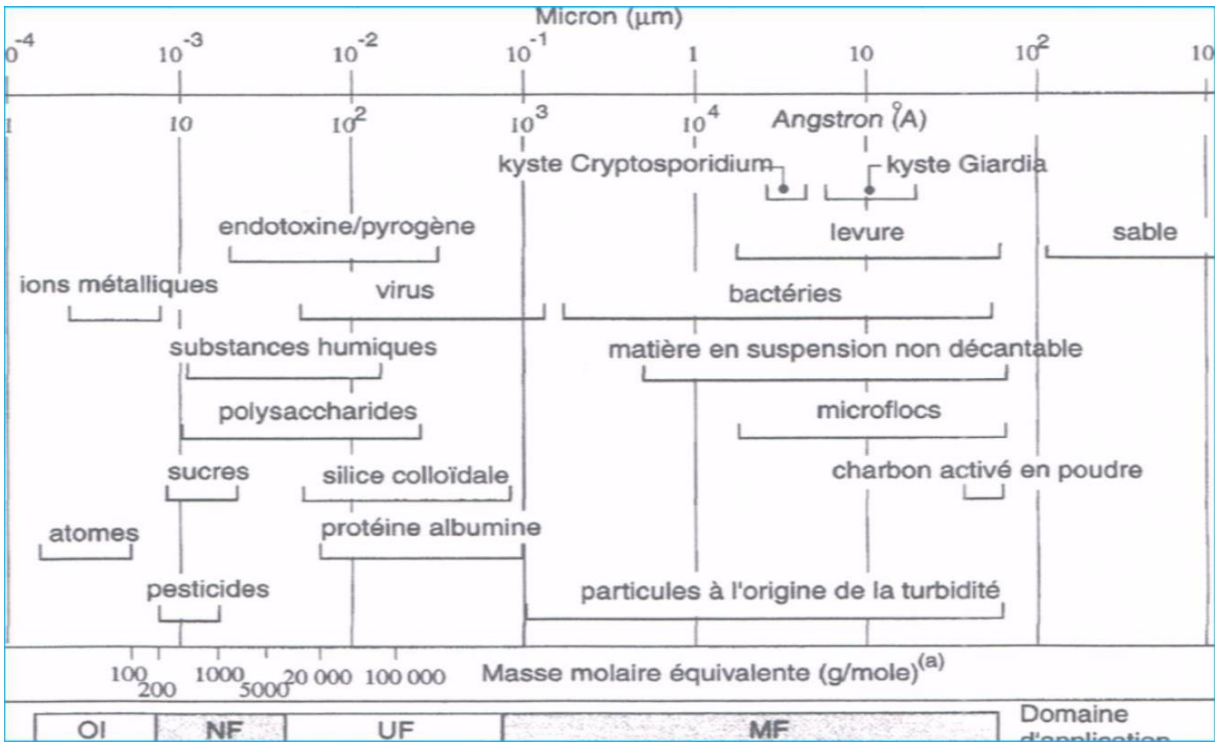


Figure II. 1 : Champ d'Application des Différentes Techniques de Filtration[9]

Les membranes se composent de résines qui échangent des ions. Il y en a trois catégories :

a) Les membranes anioniques :

Les résines présentes dans ces produits renferment des groupes cationiques fixes, qui sont neutralisés par des anions présents dans les interstices de la résine. Lorsqu'une solution d'électrolyte est ajoutée à cette membrane, les anions en solution peuvent entrer dans la membrane et remplacer les anions présents à l'origine, tandis que les cations sont repoussés par les cations fixés sur la résine.

b) Les membranes cationiques :

Le fonctionnement reste le même ; elles renferment des groupes anioniques fixes qui favorisent l'entrée des cations et repoussent les anions.

c) Les membranes industrielles:

Les membranes cationiques ont généralement des groupements fonctionnels avec un regroupement sulfonique et les membranes anioniques ont un regroupement ammonium quaternaire.

Dans certains compartiments, on observera une concentration et une recombinaison des ions, ce qui entraînera une augmentation de la salinité dans la solution (compartiments de concentration), tandis que dans d'autres, la salinité diminuera (compartiments de déminéralisation).

Dans certaines situations, une eau saline nécessite un prétraitement pour éliminer les éléments gênants, qui sont classés en quatre groupes :

- Les substances suspendues.
- Les articles biologiques.
- Les mauvaises herbes des membranes.
- Les éléments qui renforcent.

Cependant, en comparaison avec l'osmose inverse, l'électrodialyse a l'avantage de faire l'objet d'un prétraitement moins important.

Les matières en suspension qui peuvent causer le bouchage des membranes sont éliminées à l'aide d'un filtre à sable ou d'une microfiltration.
Les matières organiques, généralement légèrement ionisées et qui se fixent sur la membrane anionique, sont éliminées par décantation, floculation ou adsorption sur charbon actif.

La précipitation de certains hydroxydes provoque l'empoisonnement des membranes, ce qui entraîne une augmentation de la résistance électrique. Ce problème peut être résolu par une oxydation puis une filtration.

L'électrodialyse n'est pas employée dans la pratique pour dessaler de l'eau de mer et très peu pour la production d'eau potable, même à partir d'eau saumâtre.

II.1.1.2. L'osmose inverse:

Cette méthode consiste en une membrane semi-perméable pour séparer. La perméabilité de ces membranes se limite aux liquides et non aux corps dissous (sels minéraux, colloïdes) ou aux matières en suspension.

Afin de diminuer la teneur en sels dissous d'une eau, il est simplement nécessaire de lui appliquer une pression supérieure à la pression osmotique pour faire passer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable. C'est donc une osmose inverse.

Lorsque l'eau douce est en contact avec l'eau de mer grâce à une membrane qui permet la circulation de l'eau mais retient les éléments dissous, l'eau douce a tendance à traverser la membrane. Cela entraîne une différence de niveau entre le compartiment contenant l'eau de mer et celui contenant l'eau douce, ce différentiel est connu sous le nom de pression osmotique.

Une pression supérieure à la pression osmotique entraînera un flux d'eau dirigé dans le sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée. Ainsi, la pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique. Pour le dessalement de l'eau de mer, il est nécessaire d'avoir une pression d'environ 50 à 70 bars.

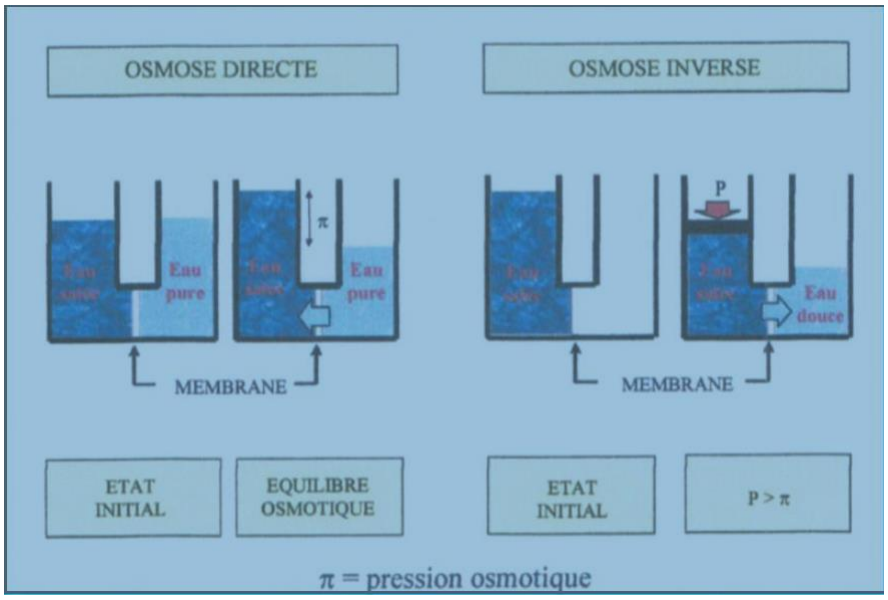


Figure II. 2: Principe de l'Osmose Directe et de l'Osmose Inverse[9].

II.1.2.Technologie des Membranes:

La surface de la membrane est plane et sa perméabilité est sélective, son but principal est de supprimer le sel. De plus, elle garantit la rétention des substances indésirables dans l'eau (micro algues, bactéries, certains virus, microorganismes, micropolluants), élimine la turbidité (eaux troubles), réduit les résidus de désinfection et favorise la production d'une eau purifiée.

Lors de l'osmose inverse, les éléments physico-chimiques et biologiques indésirables sont presque totalement éliminés. Différents types de membranes sont disponibles, comme les membranes en polyamide, en polysulfone acétate de cellulose, les membranes composites et les membranes fluides. Il est essentiel que ces membranes soient résistantes au pH, à la température et aux substances chimiques.

On regroupe les membranes en modules pour accroître les débits de traitement. Les modules tubulaires, les fibres creuses, les modules plans et les modules spiraux sont différents dans leur structure. Les parois semi-perméables ont été rendues beaucoup plus pratiques grâce à l'essor des matériaux de synthèse, et elles peuvent être classées en fonction du critère utilisé en plusieurs catégories.

II.1.3. Type des Membranes Selon Structure des Matériaux

II.1.3.1. Membranes organiques

De nos jours, elles sont produites à partir de polymères organiques tels que l'acétate de cellulose, les polysulfones et les polyamides, qui ont des caractéristiques qui leur permettent d'être très adaptables aux diverses applications. Les membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont principalement composées à 90% de membranes organiques.

II.1.3.2. Membranes minérales ou inorganiques

Ces membranes, qui ont été commercialisées plus tard que les membranes organiques, sont constituées de corps entièrement minéraux, principalement des matières céramiques, du métal fritté et du verre. Grâce à leur introduction, il a été possible de travailler dans des conditions de

température extrêmes et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles possibilités dans le domaine de la séparation par membrane.

II.1.3.3. Membranes composites

Apparues il y a une dizaine d'années, elles se distinguent par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différentes, soit par leur composition chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être composées de polymères organiques différents, organo-minérales ou minérales (à base de carbone ou d'alumine et de métaux tels que la zircone, l'alumine et le titane).

II.1.3.4. Membranes échangeuses d'ions

Elles ont été introduites en 1950 et sont basées sur le principe du rejet d'ions par leur charge. Cette technologie est utilisée dans les méthodes d'électrodialyse, de dialyse et d'électro d'ionisation. Ils sont actuellement principalement utilisés pour le dessalement de l'eau de mer et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

Quatre types de modules d'osmose inverse sont disponibles, principalement des méthodes de désalinisation. Les modules comprennent des tubes, des plans, des spirales et des fibres creuses.

Différents critères doivent être pris en considération lors de la sélection d'un type de module :

- Le régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation.
- La compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil.
- La facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses, volume mort de l'appareil.
- l'Adaptation au produit à traiter (nécessité ou non de pré filtration).

II.1.4. Types des membranes selon la composition chimique

II.1.4.1. Membranes en acétate de cellulose

Cellulose est le matériau principal, où un ou plusieurs groupements hydroxyle sont remplacés par des groupements acétate. Ce type de polymère est le plus ancien (1957). En France, le groupement OSMOTEC a été formé en 1967 par les entreprises DEGREMONT, SFEC et SRTI.

II.1.4.2. Membranes en polyamide

Puisque l'acétate de cellulose présente des désavantages, des membranes de type polyamide ont été créées. Différents polymères se distinguent par une liaison amide (-CONH-). En grande partie, elles sont vendues par DUPONT de NEMOURS sous forme de fibres creuses (B9 et BIO), ainsi que par NITTO et OSMONICS.

II.1.4.3. Membranes en poly-sulfone

Au milieu des années 1970, les premières membranes à base de poly-sulfone ont été commercialisées. Elles se distinguent par un groupe S02 assez stable qui est lié à deux noyaux benzéniques.

II.1.4.4. Membranes Composites

Entre 1970 et 1980, les membranes composites ont fait leur apparition et représentent un véritable progrès par rapport aux membranes asymétriques traditionnelles. Il s'agit effectivement de membranes asymétriques dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes traditionnelles de LOEB-SOURIRAJAN.

II.1.4.5. Membranes Dynamiques

L'utilisateur les fabrique sur place à partir de tubes poreux en acier inoxydable dont le diamètre des pores varie de 0,5 à 5 μm.

Cette dispersion colloïdale d'un hydroxyde comme celui de Zirconium associé à un polymère comme un polyacrylate est fait circuler à l'intérieur des tubes. En se déplaçant sur le corps poreux, la dispersion colloïdale forme une membrane dynamique dont les rayons de pores peuvent atteindre jusqu'à un nanomètre.

II.1.5. Durée de Vie des Membranes :

Les membranes d'osmose inverse ont une durée de vie variable en fonction de la nature de la membrane et des conditions d'utilisation :

- Pression de fonctionnement.
- Température de l'eau.
- PH.
- Qualité du prétraitement.

II.1.5.1. Module d'Osmose Inverse :

Afin d'être utilisées, les membranes doivent être fixées sur des supports connus sous le nom de modules.
Différents critères doivent être pris en considération lors de la sélection d'un type de module :

- Le régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation (écoulement laminaire ou turbulent).
- La compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil.
- La facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses.
- Le volume mort de l'appareil (exprimé en l/m_2).

a- Modules Tubulaires :

Ce genre de module est composé de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixée la membrane semi-perméable. La pression de l'eau de mer circule à l'intérieur du tube, tandis que l'eau douce produite est récupérée à l'extérieur. Le tube peut être poreux ou perforé afin de faciliter l'évacuation du perméat.

b- Modules Fibres Creuses :

Les tubes de petit diamètre sont utilisés comme des modules tubulaires, mais à la différence des modules tubulaires, les fibres creuses jouent à la fois le rôle de membrane et de support, tandis que le liquide à traiter circule à l'extérieur de la fibre.

c- Modules Plans :

Ce genre de module, le plus basique et le plus ancien, peut être présenté soit sous forme de plaques unitaires, soit sous forme de cartouches.

d- Modules Spirales :

Dans ce genre de module, on enroule les membranes planes autour d'un tube perforé et creux qui a pour fonction de recueillir le perméat. Entre les membranes, on place un grillage plastique d'une épaisseur de 0,8 à 1,2 mm, qui a pour objectif de générer une turbulence dans la circulation du fluide.

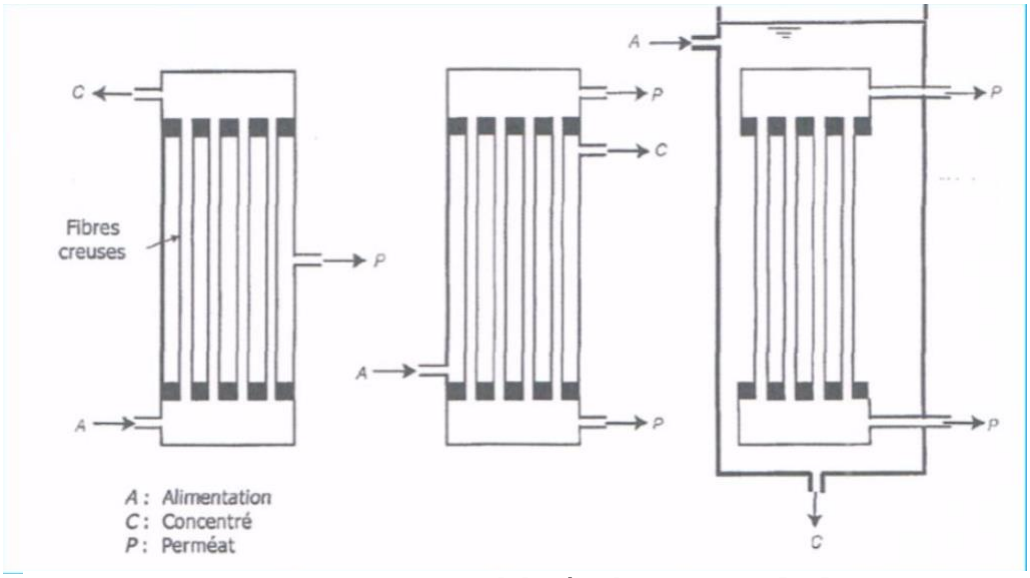
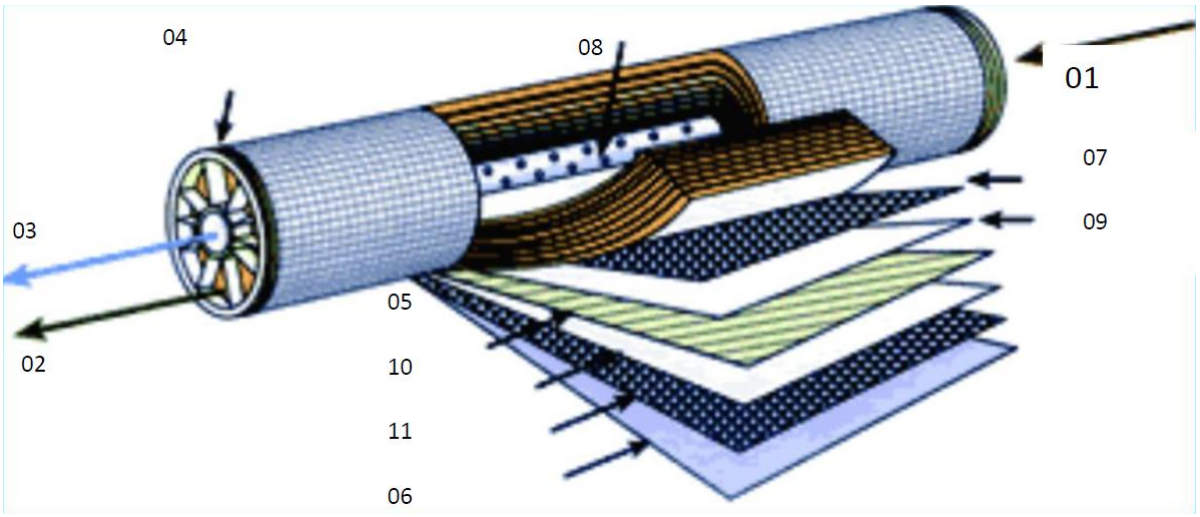


Figure II. 3: Modules à Fibres Creuses[10].

L'eau purifiée contenant les sels dissous entre à l'un des bouts du rouleau et traverse la membrane de manière axiale.
Pour pouvoir appliquer la pression nécessaire sur le liquide à traiter, les rouleaux de membranes (souvent désignés sous le nom de cartouche) sont introduits dans des corps de pression tubulaires avec des joints aux extrémités.



1 - Entrée d'eau
2 - Sortie de concentrât
3 - Sortie de perméat
4 - Sens d'écoulement de l'eau brute
5 - Sens d'écoulement du per méat
6 - Matériau de protection
7 - Joint d'étanchéité entre module et enveloppe
8 - Perforations collectant le per méat
9 - Espaceur
10 - Membrane
11 - Collecteur de per méat

Figure II. 4 : Modules spirales[11].

II.1.5.2. La distillation:

La distillation implique l'évaporation d'eau salée, la récupération de la vapeur d'eau et la condensation de l'eau douce.

La production d'eau potable est réalisée à l'aide de deux techniques principales : la technique de Multi Stage Flash (MSF) et la technique Multi Effet Distillation (MED).

a- Multi Stage Flash (Distillation Thermique par Détentes Successives) :

La méthode du multi stage flash repose sur le fait de chauffer l'eau de mer et de la faire circuler à travers des cellules successives où les températures et les pressions diminuent. Dans chaque cellule, une partie de l'eau salée se vaporisera et se condensera.

De la première à la dernière cellule, les températures fluctuent entre 40 et 110 °C.

En ce moment, le MSF est en concurrence principalement pour des capacités importantes, allant jusqu'à plus de 25.000 m3/j.

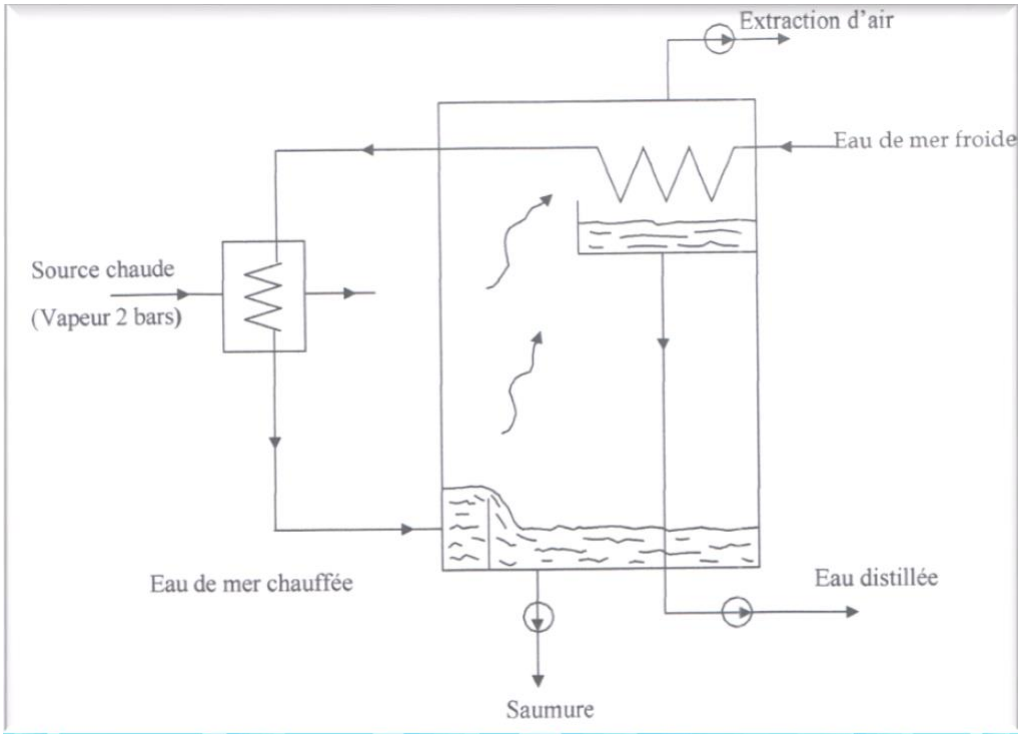


Figure II. 5 : Les Procédés de Dessalement de Type Thermique[9].

b- Description de la Technique (MSF) :

Tout d'abord, l'eau de mer est chauffée dans les tubes d'acheminement afin d'éviter l'ébullition, afin de diminuer les dépôts minéraux à la surface des échangeurs climatiques.

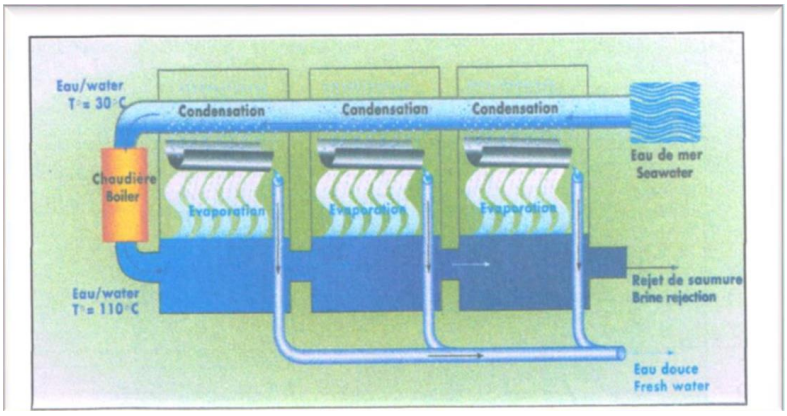


Figure II. 6 : Schéma Du Procédé MSF[9].

Par la suite, elle est convertie en vapeur en passant successivement dans des compartiments à basse pression, puis en condensant sur des tubes dans la partie supérieure d'un cabinet. La vapeur « éclair » (flash) des différents compartiments à travers lesquels passent ces tubes préchauffe l'eau salée. Après plusieurs étapes de préchauffe, elle passe à une étape de chauffage qui est effectuée à l'aide de la vapeur extérieure

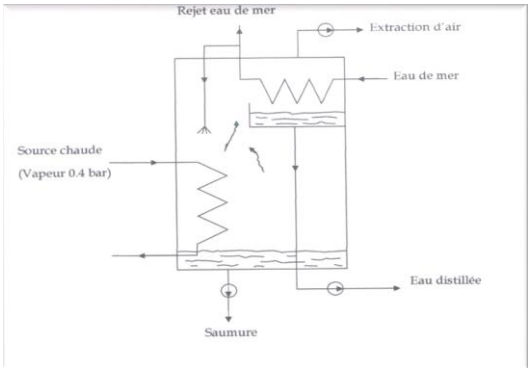


Figure II. 7: Les Procédés de Dessalement de Type Thermique[12].

c- (Distillation par Effet Multiples) :

La progression des unités MED a été longuement entravée par les problèmes d'entartrage mal maîtrisés. Ce procédé est néanmoins avantageux sur le plan financier, surtout lorsqu'il est associé à un système de compression de vapeur.

Dans Distillation une cellule MED, on pulvérise de l'eau de mer sur un faisceau tubulaire où la vapeur de chauffage circule. Par évaporation, la vapeur produite dans la première cellule est utilisée pour chauffer la deuxième cellule, et ainsi de suite.
À l'instar du procédé MSF, les températures et les pressions diminuent dans chaque cellule. La température peut fluctuer entre 65°C et 40°C.

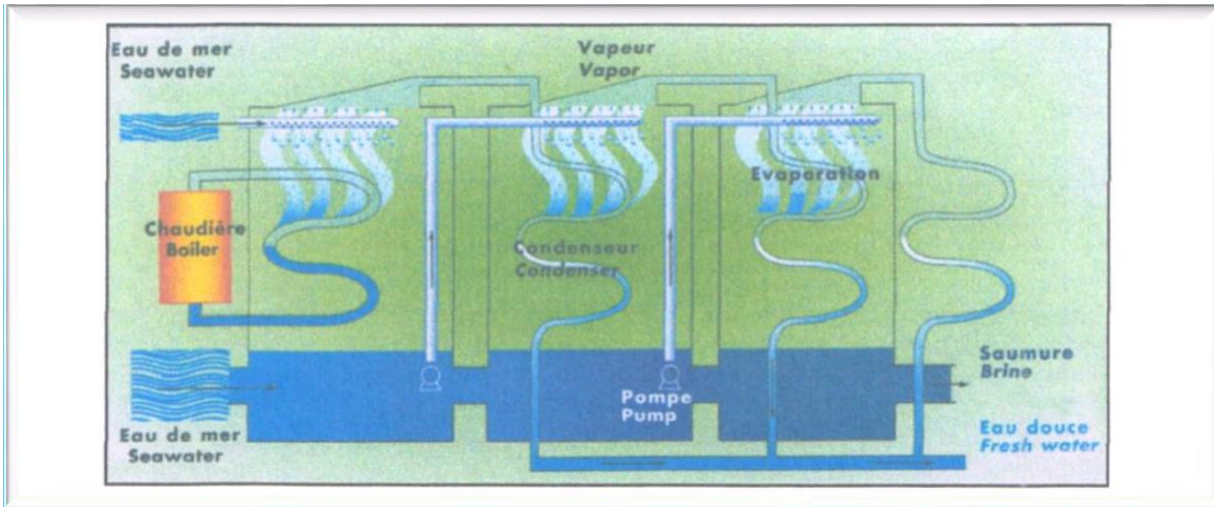


Figure II. 8: Schéma du Procédé MED[12].

Conclusion générale

Conclusion générale

Le dessalement d'eau de mer apporte une solution rapide à la pénurie d'eau douce, mais apporte avec lui beaucoup d'inconvénients tel que : le besoin énergétique important, l'utilisation de produits chimiques, rejets des saumures concentrées et chaudes dans le cas de la distillation, traces de métaux lourds dans les rejets, aucune législation spécifique au rejet de saumure. Cette étude nous montre que la production d'eau douce par des procédés non conventionnels comme le dessalement de l'eau de mer, est caractérisé par la production en parallèle d'une eau saumure fortement chargée en sel.

Le dessalement est une
technique prometteuse, en plein développement, susceptibles d'apporter des solutions économiques locales intéressantes sans grand risque. Aux aménageurs de l'utiliser au mieux des intérêts des utilisateurs dans le meilleur respect de l'environnement.
La plupart des pays en situation de stress ou de déficit hydrique étant situées dans des zones géographiques très fortement ensoleillées, et la forte consommation d'énergie des procédés de dessalement traditionnels ont orienté les recherches vers l'utilisation des énergies renouvelables : solaire en premier lieu, mais aussi éolienne et nucléaire. Même si les résultats ne sont pas encore probants, ces technologies finiront par s'imposer dans les zones arides et isolées. Bien que les technologies de dessalement aient évolué et que de nombreuses usines soient en opération dans le monde, le dessalement reste concentré géographiquement et représente une fraction modeste de la consommation mondiale d'eau. L'avenir du dessalement dépendra de l'innovation continue pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts et minimiser l'impact environnemental, tout en augmentant l'accès à l'eau potable dans les régions confrontées à une pénurie.

[1] G. Clément, "Le dessalement de l'eau de mer," *Docs. school Publications,* 2014.

[2] "Disponibilité mondiale en eau douce : Moyenne des eaux de surface et des recharges d'eaux souterraines " *http://eduterre.enslyon.fr/ressources/scenarioeau/pagesscenarioeau/repartition*, 2000.

[3] A. Kettab, "Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision," *Desalination,* vol. 136, pp. 25-33, 2001.

[4] A. Cipollina, G. Micale, and L. Rizzuti, "Seawater desalination," *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,* 2009.

[5] GWI DesalData "State-of-Desalination-Press-Release-IDA-and-GWI : The 29th Worldwide Desalting Inventory 2016," *http://idadesal.org/wp-content/*, 2016.

[6] S. P.-F. Strategy, "Dessalement de l'eau de mer : des évolutions nécessaires pour accompagner l'essor du secteur," *http://www.energie.sia-partners.com*, 2017.

[7] J. Dunglas, "Le dessalement de l'eau de mer: une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau," *ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE : http://www.agrisalon.com/*, 2014.

[8] Q. G. A. Santens, "L'implantation des usines de dessalement dans le monde," *https://alexandre27310.wordpress.com/,* 2014.

[9] L.MERDI, Etude d'Optimisation des systèmes «RO » de dessalement des eaux de Mer sur Modèle De simulation Numérique Thèse de Magister, Université de Blida 1998.

[10] Mr HADJALI Yassine Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la Station de la Plage EL Hilel (AIN Témouchent)
Mémoire de Master Université de Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2012.

[11] Mr MEHDI METAICHE Optimisation des systèmes de dessalement par osmose inverse : conception, paramètres de fonctionnement et simulation numérique Thèse de Doctorat Ecole nationale polytechnique Alger 2006.

[12] Mr Djamel BECHKI Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes Thèse de Doctorat Université de BATNA 2011.