



N° Ref :

Centre Universitaire de Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de sciences et Technique

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
LICENCE ACADEMIQUE
en Hydraulique
Spécialité : Sciences Hydrauliques

Thème

Les différents procédés de dessalement des eaux de mer

Préparé par :

SEDDIK Nabila

KAMOUS Hana

BOUCENECHÉ Ghada

BENHOUMAR Wahida

Dirigé par :

Mr KABOUR Abdeslam

Année universitaire : 2013/2014

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de l'Institut des Sciences et de Technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. KABOUR Abdesselem, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Liste des tableaux	IV
Liste des figures.....	IV
Liste des abréviations.....	V
 Introduction générale.....	 1
 Chapitre I : Introduction à la technique de dessalement des eaux de mer	 3
 Introduction.....	 4
I.1 Le dessalement de l'eau dans le monde	4
I.1.1 Le dessalement dans certains pays de monde	5
I.1.2 La capacité de dessalement	6
I.2 Le dessalement de l'eau dans le monde arabe	8
I.2.1 Le dessalement dans certains pays	8
I.3 Le dessalement de l'eau en Algérie.....	13
I.3.1 Gestion des stations de dessalement	14
I.3.2 Les stations de dessalement en Algérie.....	15
➤ Station de Fouka	17
➤ Station d'El Hamma.....	19
➤ Station de Skikda	20
➤ Station de Ténès.....	21
➤ Station de Souk Tleta.....	21
 Conclusion.....	 23
 Chapitre II : Les différents procédés de dessalement des eaux de mer.....	 26
 Introduction.....	 25
II.1 Procédés de dessalement	26
II.1.1 Par changement de phase.....	26
II.1.1.1 La distillation.....	26
a) Distillation flash à étages multiples	26
b) Distillation à effets multiples	28
c) Distillation par compression de vapeur	30
d) Distillation solaire.....	32
II.1.1.2 La congélation	34
a) La congélation primaire (sous vide).....	35
b) La congélation secondaire	37
c) La congélation indirecte	37
II.1.2 A membranes	38

II.1.2.1 Osmose inverse.....	39
II.1.2.2 Electrodialyse.....	42
II.1.3 Autres procédés	44
II.1.3.1 Echange d'ions	44
II.1.3.2 Extraction par solvants sélectifs.....	44
II.1.3.3 Puce électronique	44
II.2 Quantité d'énergie requise pour le dessalement	47
II.3 Les avantages et les inconvénients	48
II.3.1 Les avantages	48
II.3.2 Les inconvénients	49
Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	51

Liste des figures :

Figure I.1: Usines de dessalement dans le monde.....	5
Figure I.2 : Capacité de dessalement installée dans le monde.....	7
Figure I.3 : Technique de l'osmose inverse à l'usine d'Ashkelon en Israël.....	8
Figure I.4 : Etang solaire en Libye de 600 m ² produisant 5 m ³ d'eau douce par jour.....	12
Figure I.5 : Etang solaire à Qatar.....	12
Figure I.6 : Station de Fouka.....	18
Figure I.7 : Unité de dessalement de Fouka.....	18
Figure I.8 : Station d'El Hamma.....	20
Figure I.9 : Station Skikda.....	20
Figure I.10 : Station de Tenès	21
Figure I.11 : Station de Souk Tlata.....	22
Figure II.1 : Schéma général d'une installation de dessalement.....	25
Figure II.2 : Distillation à détente étagées.....	27
Figure II.3 : Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) à 3 étages.....	27
Figure II.4 : Distillation à multiple effet.....	29
Figure II.5 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).....	29
Figure II.6 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.....	30
Figure II.7 : Évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.....	31
Figure II.8 : Principe de fonctionnement par CV.....	31
Figure II.9 : Serre double pente pour dessalement de l'eau.....	33
Figure II.10 : Distillateur à étages.....	33
Figure II.11 : Schéma d'un distillateur solaire simple.....	34
Figure II.12 : Procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur (AFVC) utilisant une pompe à chaleur à compression.....	37
Figure II.13 : Technique de dessalement à membrane.....	39
Figure II.14 : Mise en évidence de l'osmose inverse.....	40
Figure II.15 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	41
Figure II.16 : Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse.....	41
Figure II.17 : Fonction de la membrane OI.....	42
Figure II.18 : Principe de dessalement par électrodialyse.....	43
Figure II.19 : Schéma de L'électrodialyse.....	43
Figure II.20 : Marais salants sur la côte de la baie de San Francisco.....	45
Figure II.21 : Prototype de la puce à eau potable (Université du Texas).....	45
Figure II.22 : Principe de fonctionnement du système (Wiley - VCH).....	46

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Capacité des installations de dessalement dans le monde selon le Procédé utilisé en m ³ par jour en 1994	7
Tableau I.2: Stations monoblocs de dessalement (petites stations).....	15
Tableau I.3 : Stations de dessalement d'eau de mer (grandes stations).....	16
Tableau II.1: Quelques unités pilotes de dessalement par congélation.....	38
Tableau II.2: Energie nécessaire au dessalement d'un m ³ d'eau selon le procédé utilisé et la salinité d'eau brute.....	48

Liste des abréviations :

AEC : Algerian EnergyCompagny

ADE : Algérienne des Eaux

ED: Electrodialyse

GE: Ecomagination

GWI: Global Water Intelligence

HWD: Hamma Water Desalination

IDA : International Désalination Association

JV: Joint-venture

M: Million

MED: Multi-Effect

MSF: Multi-stages Flash

OI: Osmose inverse

SRF: SecondaryRefrigerantFreeze

VC:Vapor Compression

VFVC: Vacuum FreezingVapour Compression

WWF : World WildlifeFund, le Fonds Mondial pour la vie sauvage

Introduction générale :

Comme tout le monde le sait, l'eau est indispensable à notre vie : un humain ne peut pas vivre plus d'une semaine sans boire. La Terre, d'où son nom «planète bleue» est recouverte à peu près de 70% d'eau. Malheureusement cette partie est essentiellement présente sous eau de mer et glace. L'eau douce, ressource vitale pour nous, est accessible qu'à peu près sur 0,5%. En effet à cause de la fonte des glaciers, de la pollution des nappes phréatiques mais surtout à cause du fort accroissement de la population mondiale, les besoins en eau vont se faire importants : en 2050, on estime à 4 milliards d'individus souffrant d'un manque d'eau, soit presque la moitié de la population envisagée.

Des solutions doivent donc être prises, une des plus logiques : les océans contiennent une quantité quasiment illimitée d'eau, alors pourquoi ne pas en profiter ? Technologie en cours de développement, le dessalement de l'eau de mer représente une solution envisageable, nous allons donc essayer de répondre au mieux à cette question : «Est-ce que le dessalement de l'eau peut éviter les pénuries d'eau dans le monde entier ?».

Le dessalement de l'eau de mer, aussi appelé "dessalage", est un procédé permettant de traiter de l'eau salée ou saumâtre afin de la rendre potable ou utilisable pour l'irrigation. Cette technique est généralement moins rentable que le traitement des sources d'eau douce, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des nappes souterraines.

Cependant, elle est utilisée dans certaines régions du monde où les sources d'eau douces sont inexistantes ou insuffisantes pour répondre aux besoins de la population ou de la production agricole.

Il faut savoir que ce sont les marins grecs dessalaient l'eau de mer au Vème siècle av J.C. En effet, cela leur permettait de subvenir à leur besoins en eau lorsqu'ils effectuaient de longs séjours en mer.

Mais le premier procédé important date du milieu du 19ème siècle : à Aden, sur la mer Rouge (en 1869) une unité de dessalement était opérationnelle pour alimenter la flotte coloniale britannique, puis en 1928, l'île de Curaçao, aux Antilles, y avait recours.

Le dessalement de l'eau de mer s'est développé au cours des années cinquante et soixante. Dans un premier stade, quatorze procédés considérés comme prometteurs ont été analysés, mais finalement seuls deux d'entre eux ont survécu à l'épreuve du développement industriel: la distillation et l'osmose inverse.

Face aux besoins grandissants de leur population et de leur économie, de nombreux pays choisissent l'option du dessalement pour fournir de l'eau. Selon les dernières statistiques de l'International Desalination Association (IDA), les projets se multiplient et la taille des usines s'accroît.

Connue depuis longtemps mais coûteuse, la technologie du dessalement d'eau de mer connaît depuis quelques années un développement majeur. Cette dernière n'est plus une option exceptionnelle

et l'eau dessalée s'introduit dans les foyers en Europe, en Afrique du nord, au Moyen-Orient, en Amérique du nord ou encore en Australie ou en Chine. À titre d'exemple, 60% des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement d'eau de mer.

En Australie, un tiers de l'eau douce consommée par la ville de Perth provient de cette technique. Les gouvernements Algériens et Tunisiens ont quant à eux prévu d'installer chacun plus d'une dizaine d'usines sur leurs côtes.

Les dernières statistiques publiées par l'International Désalination Association (IDA) confirment la tendance. Dans sa publication annuelle 2008-2009, éditée par Global Water Intelligence (GWI), l'IDA indique que la capacité totale des projets signés en 2007 a augmenté de 43 % par rapport à 2006 passants ainsi de 4,7 millions de m³ par jour à 6,8 millions. L'année 2008 pourrait battre un nouveau record de hausse puisque durant les seuls six premiers mois de l'année, la capacité totale des contrats signés a augmenté de plus de 39 %.

Au total, au 30 juin 2008, la production cumulée de l'ensemble des projets d'usine de dessalement dans le monde s'élevait à 62,8 millions m³/j pour plus de 13800 usines construites ou en projet.

En Algérie, Les ressources hydriques restent limitées. Tout d'abord, pour des raisons climatiques: la pluviométrie, irrégulière, oscille entre 100 et 600 mm/an seulement. L'accroissement rapide des besoins en eau potable ainsi qu'en eau pour l'irrigation et l'industrie a été fort et reste continu. Une période de sécheresse assez longue a, par ailleurs, amené à une surexploitation des réserves hydriques jusqu'à épuisement d'une grande partie de celles-ci. C'est pourquoi une nouvelle politique de l'eau est vite apparue indispensable. Elle a été mise en place à partir d'une loi nouvelle, et s'articule autour de principes nouveaux de gestion. L'option fondamentale est celle d'une gestion intégrée, participative, économique et écologique. L'édifice institutionnel sur lequel a reposé l'action de tous les intervenants dans le secteur de l'eau s'est trouvé ainsi renforcé.

Le recours au dessalement de l'eau de mer a pu, dans le cadre de la rénovation des choix et des modes de gestion, être promue comme une alternative stratégique permettant de sécuriser l'alimentation en eau potable de certaines villes du littoral et d'agglomérations proches. Un programme d'installation d'unités de dessalement de l'eau de mer a ainsi été arrêté puis rapidement mis en œuvre. L'Algérienne des Eaux, entreprise publique, en assure le suivi pour le compte du Ministère des Ressources en Eau en association avec l'Algerian Energy Company, société créée par les groupes Sonatrach et Sonelgaz.

Lancé en 2005, le programme de dessalement d'eau de mer porte sur 30 stations monobloc et 13 mégastations dans le nord du pays en vue de produire 2,26 millions de m³/j d'eau dessalée. L'ensemble de ces réalisations qui assureront environ 10% de l'alimentation en eau potable en Algérie, correspond à un montant de près de 300 millions de dollars chacune.

Chapitre I: _____

Introduction à la technique de dessalement des eaux de mer

Introduction :

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. La capacité installée augmente chaque année en moyenne de plus de 10%. Cela s'explique en partie par l'abaissement significatif des coûts de dessalement et par la proximité des villes de la côte. Ces deux facteurs font du dessalement une vraie ressource alternative.

Aujourd'hui, plus de 15 000 unités de dessalement dans 120 pays produisent environ 40 millions de m³/j, dont les trois quarts issus de l'eau de mer et un quart des eaux saumâtres. Sur ces 40 millions, 75 % sont destinés à la consommation humaine, 25 % à un usage industriel ou agricole. Au rythme actuel d'un doublement de la production tous les 10 ans, les spécialistes estiment que la production grimpera à 50 ou 60 millions de m³/j avant 2015, et pourrait à nouveau doubler d'ici à 2025. 60% des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement d'eau de mer. En effet, Plus de la moitié de la capacité de dessalement mondiale se trouve dans les pays du Moyen Orient.

I.1 Le dessalement de l'eau dans le monde

De nos jours, les usines de dessalement se multiplient de par le monde. On estime aujourd'hui qu'il en existe 13 080 au total dont la moitié se trouvant au Moyen Orient. D'ailleurs, la plus importante des usines de dessalement est Ashkelon en Israël produisant la quantité énorme de 320 000 m³ par jour (soit 108 millions de mètres cubes par an), ce qui équivaut à dire que pour une population d'un million d'habitants, chaque habitant pourrait consommer par jour 250 litres d'eau potable! C'est la plus grande référence de dessalement par technique membranaire au monde! Dans la même région on trouve aussi principalement :

L'usine de Fujairah aux Émirats Arabes Unis, l'usine d'Amman en Syrie, beaucoup d'usines sur les littoraux saoudiens et sur ses pays frontaliers, l'usine de Djerba en Tunisie... Les états Unis se situent juste derrière le Moyen Orient en ce qui concerne l'industrie du dessalement mais plus particulièrement centrée sur la désalinisation des eaux saumâtres. Actuellement, en Californie, 200 usines de dessalement de mer sont en cours de construction. De même pour l'Australie, de nombreuses usines sont en cours d'installation, la plus grande située près de Melbourne. On assiste au même phénomène non seulement en Amérique latine et en Espagne, des régions développées mais aussi dans des pays d'Afrique du nord (pays en cours de développement). L'industrie du dessalement produit actuellement au total 55,6 millions de m³ d'eau potable par jour mais ne couvre que 0,5 % de la consommation mondiale.

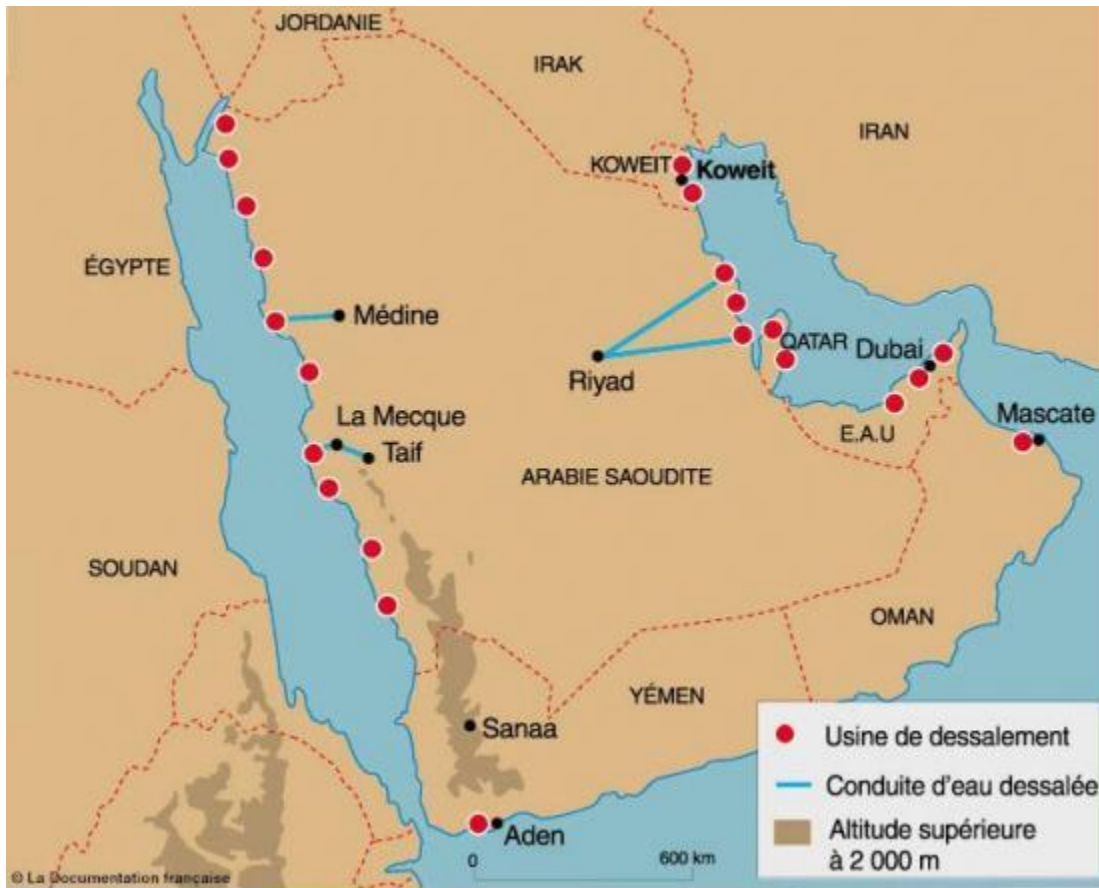


Fig. I.1: Usines de dessalement dans le monde

I.1.1 Le dessalement dans certains pays de monde

➤ En Espagne :

La principale technique (procédé) de dessalement appliquée en Espagne est l'OI.

Environ 82% de l'eau dessalée totale sont produits dans des usines OI, et le reste est également réparti entre les procédés MSF, VC, ED and MED.

Les principaux utilisateurs de l'eau dessalée produite sont les municipalités et les complexes touristiques, lesquels consomment $580\,060\text{ m}^3/\text{jour}$, soit 89,38 % du total. Environ 7,5% servent à d'autres fins comme l'irrigation et les installations militaires, et seuls environ 3% servent aux centrales électriques et à l'industrie.

➤ **En Italie :**

L'Italie est le pays où la majeure partie de l'eau produite par dessalement (environ 60 %) est utilisée par l'industrie. Bien que les techniques de dessalement aient commencé à être largement appliquées dans ce pays au cours des années 1970, c'est seulement au début des années 1990 qu'elles ont commencé (principalement le procédé VC) à être utilisées par les municipalités, principalement dans le sud du pays notamment en Sicile. À l'origine, le procédé adopté le MSF pour l'industrie et les centrales.

➤ **A Malte :**

La production totale d'eau par dessalement à Malte est de 123 868 m³/jour qui représentent 6,3% du total pour la région méditerranéenne. La technique de base adoptée est l'OI qui représente 94,1% du total de sa production d'eau dessalée. Cette eau sert uniquement à la consommation humaine. La capacité des usines MSF est seulement de 4200 m³/jour et elle est utilisée par les centrales.

➤ **À Chypre :**

Les seules unités de dessalement en service à Chypre étaient celles utilisées pour les centrales électriques et elles appliquaient le procédé MSF. C'est en 1997 que la première grande usine de dessalement de type OI a été mise en service avec une capacité de 20 000 m³/jour. La capacité de cette usine a été doublée en 1998. La capacité totale des usines de dessalement d'eau de mer à Chypre est de 46 561, soit 2,38 % du total de la capacité totale de la région méditerranéenne.

➤ **En Grèce :**

En Grèce, le dessalement de l'eau de mer se limite à quelques usines et centrales, alors que de très petites unités, principalement à procédé VC, sont en service dans les îles de l'Égée.

I.1.2 La capacité de dessalement

La capacité de dessalement dans le monde en 2006, était d'environ 45 M m³/j d'eau de mer Dessalée, répartis entre le Moyen-Orient (50 %), l'Amérique du Nord (8 %), l'Europe (13 %) l'Asie (13 %) et l'Afrique (6 %). En particulier, les pays du pourtour méditerranéen se sont dotés de plusieurs installations de dessalement et projettent leur expansion. Par exemple:

- En Israël, l'usine d'Ashkelon en expansion (produisant 320 000 m³, en 2006) et les installations à Sorek, Askdod, permettront d'atteindre une capacité totale de 1,3 M m³/j en 2013 ;
- En Espagne, 1 500 unités produisent environ 2,5 M m³/j ;
- A Malte, 60% de la consommation en eau sont produits par le dessalement de l'eau de mer (150 000 m³/j installés).

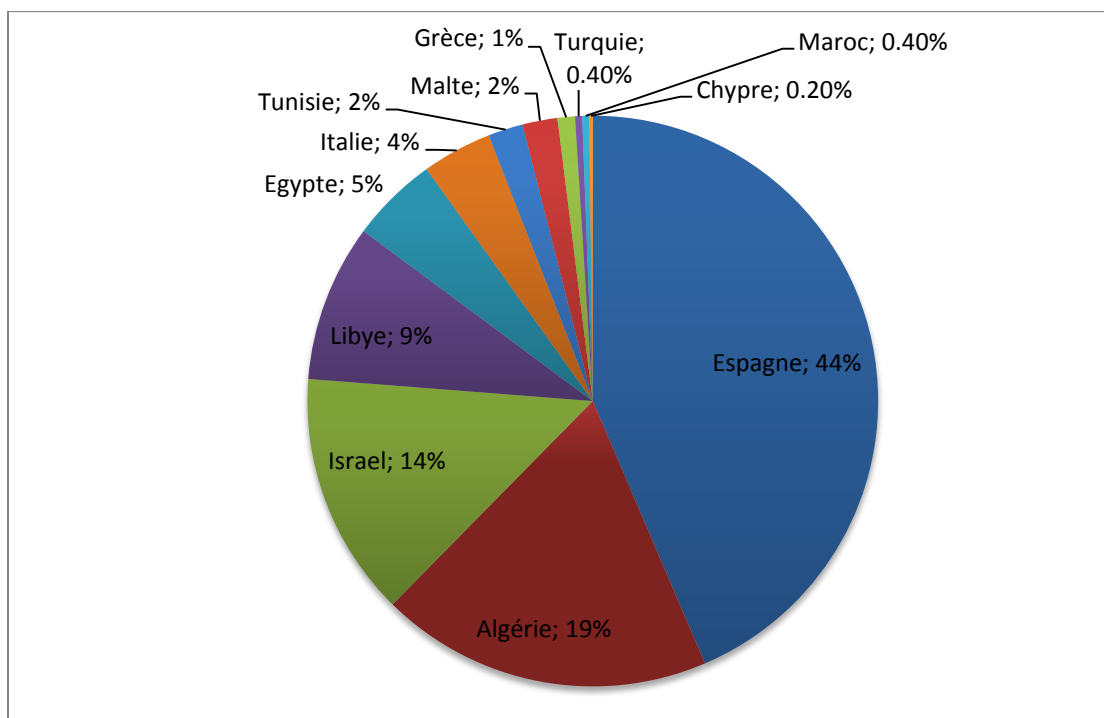


Fig. I.2 : Capacité de dessalement installée dans le monde

TAB. I.1 : Capacité des installations de dessalement dans le monde selon le Procédé utilisé en m³ par jour en 1994

Régions	MSF	OI	Autres
Amérique du nord	400 000	2 000 000	1 400 000
Amérique du sud	100 000	100 000	200 000
Europe	600 000	800 000	200 000
Afrique	600 000	400 000	400 000
Moyen Orient	8 800 000	2 400 000	600 000
Asie	300 000	1 000 000	200 000
Australie	50 000	100 000	50 000
Total	10 850 000	6 800 000	2 950 000



Fig. I.3 : Technique de l'osmose inverse à l'usine d'Ashkelon en Israël

I.2 Le dessalement de l'eau dans le monde arabe

Les techniques de dessalement ont été utilisées depuis trois décennies dans le monde arabe et particulièrement dans les pays du Golfe en parallèle avec le développement des activités pétrolières. Les stations de dessalement se sont développées surtout au milieu des années 70, pour répondre aux besoins en eau de plus en plus croissants surtout en milieu urbain et dans le secteur industriel, les ressources naturelles ne pouvant plus satisfaire ces besoins.

I.2.1 Le dessalement dans certains pays arabes

➤ **L'Arabie Saoudite :**

Etant donné que l'Arabie Saoudite se trouve à la première place dans le monde au point de vue capacité de production de l'eau dessalée.

Le nombre de stations total fonctionnant à la date de 1995, est de 30, 4 sont en cours de construction et 17 à l'étude. Parmi les installations en fonctionnement, on compte 19 fonctionnant suivant le procédé MSF, 6 selon le procédé OI et les cinq autres selon des procédés de réchauffage.

➤ **Les Emirats Arabes Unis :**

Les Emirats Arabes Unis viennent en deuxième place avec une capacité de production journalière de 2.1 million de m³.

➤ **Le Koweït :**

Le dessalement de l'eau au Koweït, constitue la principale ressource en eau puisqu'il représente 95 % de l'ensemble des ressources en eau disponibles. Le procédé le plus utilisé est la distillation flash (MSF) dont le nombre d'effets varie entre 24 et 26. Les stations de dessalement sont généralement couplées à des centrales de production d'électricité. La production totale d'eau dessalée de ce type de stations est de 1.290 M de m³/j. A côté de ces cinq grandes stations, on trouve d'autres fonctionnant suivant le procédé d'osmose inverse et produisant 37500 m³/j. Ces stations dessalent des eaux saumâtres de faible salinité. La production totale atteint 484 M de m³ par an.

En ce qui concerne l'utilisation des énergies renouvelables, le Koweït expérimente des procédés MED et osmose inverse avec de l'énergie solaire et développe un programme de recherche dans ce domaine.

➤ **Sultanat d'Oman :**

En vue de satisfaire les besoins en eau de plus en plus importants, le Sultanat d'Oman a eu recours au dessalement de l'eau, 65 stations sont actuellement en fonctionnement et produisent 225000 m³/j. Ces stations sont :

Station Elghabra: Construite en 1976 pour produire à la fois de l'électricité et de l'eau dessalée, cette station, MSF, a été agrandie par étape et produit actuellement 191000 m³/j et 507 Mégawatts en 2001.

Station de Sour : Construite en février 1993, cette station fonctionne selon le procédé d'osmose inverse et produit, à partir d'eau de puits, 4500 m³/j.

Station de l'île Massur : Les eaux dessalées constituent l'unique ressource en eau dans l'île, la station construite en 1983 a été agrandie à plusieurs reprises pour atteindre en 2001 une production de 3500 m³/j, on y trouve le procédé de distillation flash, la compression de la vapeur et l'osmose inverse.

Station Barkaa : Cette station est actuellement en cours de construction, elle fonctionnera selon le procédé d'osmose inverse, rentrera en production en 2003 et donnera 90000 m³/j. En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau, Oman mène des expérimentations sur le procédé humidification et déshumidification de l'air par énergie solaire.

➤ **L'Egypte :**

La croissance de la demande en eau et la limitation des ressources traditionnelles ont poussé le pays à avoir recours au dessalement pour diminuer le déficit dans certaines régions et fournir de l'eau potable à des régions éloignées. Le rapport national a fourni d'amples renseignements sur les stations existantes, technologie utilisée, capacité de production, source d'énergie etc.

Au Sinaï, il existe 11 stations de dessalement dont la capacité de production totale est de 810000 m³/j. Dans ces stations, on utilise les procédés d'osmose inverse, d'électrodialyse et de compression de vapeur mécanique et thermique. Les eaux dessalées sont des eaux saumâtres de salinité variant de 4000 à 4700 mg/l. Les forces armées ont installé des stations de dessalement pour satisfaire leurs propres besoins en eau, ces stations fonctionnent selon le procédé d'osmose inverse traitant l'eau de mer, avec une capacité totale de 7150 m³/j et une seule station fonctionnant selon le procédé MED et donnant à partir de l'eau de mer une production de 1500m³/j.

La côte nord : (Matrouh). La totalité de la production est de 8500 m³/j, les eaux à dessaler sont eaux saumâtres provenant des puits avoisinants, sauf les deux stations de Marsa Matrouh dessalent l'eau de mer par osmose inverse et produisent 4000 m³/j. La station de Sidi Barrani utilise le procédé MED pour dessaler 50 m³/j à partir de l'eau de mer.

En ce qui concerne l'utilisation des énergies renouvelables dans les procédés de dessalement, L'agence des énergies renouvelables a installé deux stations de dessalement, l'une de 30 m³/j, l'autre de 100 m³/j et toutes deux fonctionnant par l'électricité produite par la ferme éolienne d'El Ghardaka, l'eau produite sert à alimenter certains villages touristiques en eau potable.

➤ La Libye :

D'après le rapport national, il existe plus de 400 stations de dessalement à la fin de l'an 2000. Les procédés utilisés sont l'électrodialyse, l'osmose inverse et les procédés thermiques. La capacité totale de production s'élève à 700000 m³/j dont 70 % sont produits par les stations thermiques et les 20 % par trois stations à osmose inverse et les 10 % restant par les stations à électrodialyse.

Quant aux énergies renouvelables, il existe une station fonctionnant selon le procédé MSF et produisant 500 m³/J à partir d'un étang solaire.

➤ La Jordanie :

En Jordanie, il existe 24 stations de dessalement travaillant selon les procédés d'osmose inverse et d'électrodialyse et produisant de l'ordre de 1000 m³/j. Plusieurs études sont en cours pour voir l'opportunité de construire des stations de dessalement pour les régions éloignées. Une station fonctionnant suivant le procédé d'osmose inverse et utilisant l'énergie solaire photovoltaïque, produirait de l'ordre de 100 m³/j, l'étude de cette station est pratiquement terminée. En attendant la réalisation de cette station, deux autres stations de 50 m³/j chacune, suivant le même procédé, sont montées dans le cadre de la coopération avec les Etats-Unis. D'autres projets utilisant l'énergie éolienne et l'énergie solaire thermique à partir de concentrateurs ont été évoqués.

➤ **La Tunisie :**

Dans le rapport de la Tunisie, on trouve 4 stations toutes fonctionnant suivant le procédé d'osmose inverse et produisant $50000 \text{ m}^3/\text{j}$, ces stations sont celle des îles de Kerkennah produisant $3500 \text{ m}^3/\text{j}$, celle de Gabes produisant $22500 \text{ m}^3/\text{j}$, celle de l'île de Djerba produisant $12000 \text{ m}^3/\text{j}$, et celle de Jarjis produisant également $12000 \text{ m}^3/\text{j}$. En dehors de ces 4 stations destinées à l'eau distribuée dans le réseau, il existe d'autres stations implantées dans les industries chimiques notamment de l'acide phosphorique, de textile et d'autres, la production de ces stations fonctionnant selon le procédé MSF et d'osmose inverse dépassent $50000 \text{ m}^3/\text{j}$.

En ce qui concerne l'application des énergies renouvelables pour le dessalement de l'eau, il n'existe pas de station industrielle, mais plusieurs recherches sur les distillateurs serres modifiés notamment à étage multiples, sur l'osmose inverse couplé à des panneaux photovoltaïques pour une unité de dessalement familiale, le dessalement par étang solaire et enfin, une unité expérimentale solaire de dessalement par humidification et déshumidification de l'air à effets multiples, financée dans le cadre de l'Union Européenne.

➤ **Le Maroc :**

Il existe six stations de dessalement au Maroc dont la plus grande se trouve dans la ville El-Ayoun qui a commencé sa production en 1995. La production journalière atteint $7000 \text{ m}^3/\text{j}$. Ces stations fonctionnent selon le procédé d'osmose inverse et utilisent l'énergie électrique du réseau. La deuxième station, d'osmose inverse se trouve à Bou Jaddour, sa production est de $800 \text{ m}^3/\text{j}$. D'après le rapport, la production totale est de $84.2 \text{ M de m}^3/\text{an}$.

➤ **Le Yémen :**

En 1986, une station utilisant le procédé MED a été construite à Aden (El Hassoud) de capacité égale à $45000 \text{ m}^3/\text{j}$, une seule batterie des trois est actuellement en fonctionnement.

Une deuxième unité a été installée à l'île de Kamran, d'autres petites unités d'osmose inverse, produisant $290 \text{ m}^3/\text{j}$ chacune. L'ensemble de la capacité de production s'élève à $16.6 \text{ M de m}^3/\text{an}$.



Fig. I.4 : Etang solaire en Libye de 600 m² produisant 5 m³ d'eau douce par jour



Fig. I.5 : Etang solaire à Qatar

I.3 Le dessalement de l'eau en Algérie

L'Algérie a déployé des efforts importants pour améliorer ses ressources hydriques et la disponibilité de l'eau, depuis son indépendance. Autant pour son l'industrie, l'agriculture que pour l'alimentation en eau potable des zones urbaines et rurales du pays. Les efforts de la jeune Algérie souveraine ont rapidement focalisé sur la rénovation du réseau de distribution existant, le drainage des eaux de pluie vers les barrages et l'exploitation des nappes phréatiques à un moment où l'option du dessalement n'est encore qu'à ses premiers balbutiements. Dès les premières années de l'indépendance, l'expérience de l'Algérie en matière de dessalement se limite à la réalisation d'unités de déminéralisation des eaux souterraines à très fort taux de salinité, pour des besoins liés à l'industrie pétrolière et la sidérurgie seulement. Selon une du centre de développement des énergies renouvelables, en 1964, trois petites unités de $8 \text{ m}^3/\text{j}$ chacune ont été installées dans le complexe de gaz liquéfié d'Arzew, suivies en 1969 d'une unité monobloc de $4560 \text{ m}^3/\text{j}$.

En 1980, a été inaugurée l'unité de dessalement par osmose inverse d'une capacité de $57600 \text{ m}^3/\text{j}$, classée alors comme la plus importante au monde.

Avec une pluviométrie irrégulière comprise en moyenne entre 100 et 600 mm/an seulement, la crise de l'eau dans les villes du nord se faisant de plus en plus pesante et les ressources conventionnelles nettement insuffisantes.

C'est pour cela que dès 2001, les pouvoirs publics décident de placer l'alimentation en eau par le recours à l'eau de mer, en tête des priorités du plan de relance économique, doté alors de 7 milliards de dollars, en faveur notamment de la région de l'Oranie qui accuse un déficit alarmant.

A l'horizon 2019, le programme national prévoit la réalisation de 43 stations de dessalement.

L'Algérie peut également s'enorgueillir d'abriter à la fois la plus importante station de dessalement d'eau de mer d'Afrique qui est l'unité d'El Hamma et la plus grande unité de dessalement par osmose inverse au monde, à Magtaa (Oran).

Les experts estiment que son avantage est de permettre à la fois la mise à disposition d'une eau d'une pureté recherchée et d'assurer la sécurité d'approvisionnement.

Les prévisions du centre de recherche de dessalement au Moyen Orient révèlent que l'Algérie devrait se classer derrière l'Arabie saoudite, les Emirats Arabes unis et les USA en termes de production d'eau potable à partir de l'eau de mer.

L'objectif de l'Algérie d'assurer une autosuffisance hydrique reste d'actualité et inscrit dans le plan quinquennal 2010-2014 qui prévoit, rappelle-t-on, une enveloppe de 870 milliards de dinars (11,6 milliards de dollars) avec comme objectif la réalisation de 18 nouveaux barrages et la poursuite du programme de dessalement d'eau de mer.

I.3.1 Gestion des stations de dessalement

Disposant d'un long littoral, l'Algérie se voit bien placée pour augmenter ses capacités d'emmagasiner d'eau potable à partir de la mer.

À cet effet, pas moins de 12 stations de dessalement des eaux de mer viennent d'être préconisées à la réalisation après études techniques en concertation avec les experts nationaux de l'hydraulique. Cependant, pour cela il est question aussi de recourir à l'expertise arabe et étrangère dans ce domaine.

Ainsi, un accord a été récemment conclu entre les responsables des ressources en eau et le Koweït dans l'objectif essentiel est d'échanger leurs expériences respectives en matière de gestion des stations de dessalement de l'eau de mer dans les deux pays.

Conjointement les deux secteurs de l'électricité et de l'eau peuvent en bénéficier c'est ce que pensent, les signataires de l'accord entre les deux parties qui ont souligné « l'importance d'échanger les informations sur les techniques de dessalement des eaux de mer dans les deux pays. D'autant plus cet accord bilatéral permettra d'approfondir la concertation et d'examiner les domaines, qui peuvent faire objet de coopération et d'échange d'expériences entre les deux pays », indique le secrétaire général du ministère des Ressources en eau, rappelant dans ce contexte que « l'expérience de l'Algérie dans le domaine de la réalisation des stations de dessalement de l'eau de mer pour assurer aux populations l'approvisionnement en eau potable »

Le partenaire koweïtien, dont la réalisation de sa première station de dessalement remonte aux années 1950, estime que l'Algérie pourrait bénéficier de son expérience.

En outre, des pourparlers ont été auparavant menés avec des partenaires africains et européens portant sur l'assistance technique nécessaire à la mise en place d'ouvrages hydriques, étant des supports pour la réalisation de stations de traitement des eaux de la mer.

En revanche, la compétence algérienne en matière d'exploitation des ressources hydriques a été félicitée pour le niveau des relations économiques entre l'Algérie et nombreux pays du monde arabe ainsi que des experts de renom, notamment ceux de l'Asie.

I.3.2 Les stations de dessalement en Algérie

TAB. I.2 : Stations monoblocs de dessalement (petites stations)

Gérées par l'ADE		Gérées par SEAAL		Gérées par SEOR	
Stations	Capacité installée (m³/j)	Stations	Capacité installée (m³/j)	Stations	Capacité installée (m³/j)
Ghazaouet 1	2 500	Zeralda 1	2 500	Bousfer	5 500
Ghazaouet 2	2 500				
Bou Ismail	5 000	Zeralda 2	2 500		
Tigzirt	2 500				
Skikda 1	2 000	Ain Benian 1	2 500	Les Dunes	5 000
Skikda 2	5 000				
Bouzedjar	5 000	Ain Benian 1	2 500		
Chatt El Ward	5 000				
Ténès	5 000	Palm Beach	2 500		
Total	34 500	Total	12 500	Total	10 500

TAB. I.3 : Stations de dessalement d'eau de mer (grandes stations)

Région	Localisation	Capacité (m ³ /j)	Linéaire (km) ...≤ ϕ mm <...	Etat d'avancement	Investisseurs (SDEM)
Ouest	Arzew/Oran	90 000	37 km Φ = 1250	En exploitation (août 2005)	BLACK-VEACH (Afrique du sud)
	Souk tleta / Tlemcen	200 000	157 km 250 ≤ ϕ <1400	En exploitation (mai 2011)	HYFLUX- MALAKOFF (Singapour)
	Honaine / Tlemcen	200 000	160 km 500 ≤ ϕ < 1200	En exploitation (juillet 2012)	GEIDA (Espagne)
	Mostaganem	200 000	117 km 200 ≤ ϕ < 1400	En exploitation (septembre 2011)	INIMA- AQUALIA (Espagne)
	Sidi djelloul / Ain témouchent	200 000	160 km 250 ≤ ϕ < 1400	En exploitation (décembre 2009)	GEIDA (Espagne)
	Mactaa/Oran	500 000	21 km 700 ≤ ϕ < 1800	Travaux en cours	HYFLUX- MALAKOFF (Singapour)
Centre	Hamma/Alger	200 000	12 km 700 ≤ ϕ <900	En exploitation (février 2008)	GE.IONIX (USA)
	Cap djinet / Boumerdes	100 000	30 km 900 ≤ ϕ < 1000	En exploitation (août 2012)	INIMA- AQUALIA (Espagne)
	Fouka / Tipaza	120 000	15 km 350 ≤ ϕ <900	En exploitation (juillet 2011)	SNC LAVALIN- PREDISAS (Canada- Espagne)
	Oued sebt / Tipaza	100 000	127 km 200 ≤ ϕ < 1000	SDEM non lancée	BIWATER (Angleterre)
	Tenes/Chlef	200 000	254 km 200 ≤ ϕ < 1400	Travaux en cours	BEFESA AGUA (Espagne)
Est	Echatt / Tarf	100 000	20 km Φ = 800	SDEM non lancée	-
	Skikda	100 000	54 km 400 ≤ ϕ < 1000	En exploitation (mars 2009)	GEIDA (Espagne)
Total		2 311 000	1 164 km		

➤ **Station de Fouka :**

La station de dessalement d'eau de mer de Fouka est située dans le quartier dit "Hai Mouaz" dans la commune de Fouka (daïra de Douaouda) sur une superficie de 10 ha. Elle va couvrir les besoins de 17 communes avec un volume affecté de 60 000 m³ pour une population totale estimée à 476 372 habitants.

Cette station est la troisième du genre inscrite dans la wilaya de Tipasa après celle de Bou Ismail (5000 m³) et d'Oued Sebt en cours de lancement (100 000 m³/j), elle utilisera la technique dite de l'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer.

Sa capacité journalière de dessalement est de 120 000 m³, dont 60 000 m³ destinés à Alger et 60 000 m³ seront réservés à la wilaya de Tipasa qui a déjà achevé le raccordement en aval de la station pour alimenter en eau potable les communes de Douaouda, Fouka, Bou Ismail, Ain Tagourait, Attatba et Chaiba.

La partie réservée à Alger touchera les communes limitrophes de la wilaya de Tipasa, à savoir Zeralda, Mahelma, Staouéli et Aïn Benian, selon les responsables chargés du projet. Pas moins de 113 km de conduite en fonte ductile et en acier de différents diamètres ont déjà été réalisés pour relier les 17 communes à la station de Fouka, équipée de deux stations de pompage ainsi que de sept réservoirs d'une capacité de 14 000 m³ avec un volume total affecté de 60 000 m³ pour chaque wilaya.

Réalisée par l'entreprise "Myah Tipasa" qui représente un groupement d'entreprises constitué d'AEC (Algerian Electrical Energy) et de la canadienne "SNC Lavallin", cette station de dessalement d'eau de mer de Fouka a coûté la bagatelle de 900 millions de DA dont 24 millions en euros.

La station sera dotée d'un système de télégestion pour son fonctionnement et sera gérée selon le modèle BOO (Build, Own and Operate) à savoir sur la base d'un partenariat à l'image de ce qui a été fait pour la dizaine d'autres stations en cours de réalisation au niveau national.

La livraison de ce projet viendra en complément aux autres déjà mis en service dans la wilaya, en l'occurrence les trois réservoirs du chef-lieu (9000 m³), de la station d'Oued Sebt à Gouraya (100 000 m³/j) dont les travaux seront lancés incessamment, et enfin du barrage de Kef Eddir en voie d'achèvement à Damous (120 millions de m³).



Fig. I.6 : Station de Fouka



Fig. I.7 : Unité de dessalement de Fouka

➤ **Station d'El Hamma :**

La station de dessalement d'eau de mer d'El Hamma, c'est une principale source en eau potable de la ville d'Alger. La plus grande station de dessalement d'eau de mer d'Afrique, El Hamma fut inaugurée en 2008 et fournit aujourd'hui de l'eau potable quotidiennement à presque un million et demi d'Algérois.

Grâce à l'utilisation d'une membrane à osmose inverse certifiée « GE *ecomagination* », l'usine d'El Hamma purifie près de 200.000 m³ d'eau de mer par jour, fournissant ainsi au quotidien une eau propre et potable à plus de 25% de la population de la ville. La station a jusqu'ici traité près de 300 millions de m³ d'eau potable, soulignant par là son importance stratégique pour répondre aux besoins quotidiens de la ville d'Alger.

« La station de dessalement d'eau de mer d'El Hamma est une réalisation dont nous sommes très fiers : c'est l'un des projets les plus importants de GE, non seulement en termes d'investissement, mais aussi en termes de dimension et dans la façon dont elle a changé la vie des gens, » a déclaré le Directeur Général de GE Power & Water et responsable de l'opération de l'usine d'El Hamma. « Nous nous engageons à renforcer nos partenariats dans le pays et, alors que l'Algérie se concentre aujourd'hui sur l'amélioration de son système de gestion des eaux usées, nous voyons de nouvelles opportunités de croissance capables d'améliorer la vie des gens. Nous avons construit des partenariats solides dans le pays et la station d'El Hamma est un témoignage réel de la façon dont nos technologies apportent des améliorations concrètes à la communauté. »

La station de Hamma appartient à Hamma Water Desalination Spa (HWD), une joint-venture (JV) entre GE – qui possède 70% de la JV – et l'Algerian EnergyCompany (AEC) qui possède les 30% restants. GE est responsable des opérations de la station sur 25 ans d'après un accord de maintenance et d'opération. HWD a signé un agrément « take or pay » de vente et d'achat d'eau avec l'Algérienne des Eaux (ADE), l'autorité algérienne de l'eau et Sonatrach Spa.



Fig. I.8: Station d'ElHamma

➤ **Station de Skikda :**

Dont la capacité de production est de $100\,000\text{ m}^3/\text{j}$, viendra, quant à elle, approvisionner une population d'environ 700 000 habitants.



Fig.I.9 : Station Skikda

➤ **Station de Ténès :**

La station de dessalement d'eau de Manis, localité située à 10 km à l'ouest de Ténès. Cette station produit 200 000 mètre cubes par jour, indique la direction régionale de l'Algérienne des Eaux (ADE). Pour cela, et pour des raisons techniques et de prévention, trois réservoirs de stockage d'eau potable pouvant contenir 80 000 mètres cubes sont actuellement en réalisation dans la, dont deux se trouvent dans la commune d'El Kherba.



Fig. I.10 : Station de Ténès

➤ **Station de Souk Tleta :**

L'objectif de ce projet était la construction d'un réseau de transport d'eau entre la station de dessalement de Souk Tleta et le réseau de distribution de la région de Tlemcen, en Algérie.

Grâce à lui, il a été possible d'approvisionner en eau, 24 heures sur 24, une population aujourd'hui estimée à 1 million de personnes. Il devrait en outre permettre de couvrir les besoins en eau potable des habitants de la région jusqu'en 2050.

L'approvisionnement est garanti par les apports de la station de dessalement d'eau de mer de Souk Tleta ayant une capacité d'environ 200 000 m³ et d'une deuxième station d'un volume similaire, prévue à Honaïne. Ce projet a entraîné la création de 600 postes de travail temporaires et 180 permanents.

Les bénéficiaires cette infrastructure sont la ville de Tlemcen, capitale de la wilaya, et les communes suivantes : Marsa Ben M'Hidi, MsirdaFouaga, Bab El Assa, Souk Tleta, Souahlia, Ghazaouet, Tianet, Dar Yaghmourassen, Nedroma, Djebala, Souani, Hammam Boughrara, Maghnia, Sabra, Bouhlou, Sidi M'djahed, Beni Boussaïd, Beni Mester et OuledRiah.

La station de dessalement de Souk Tleta a été mise en service en décembre 2009.

Caractéristiques :

- Une canalisation linéaire de 157 km, avec un diamètre nominal de 1 400 - 150 mm.
- Six dépôts ayant une capacité de 500 à 20 000 m³.
- Cinq stations de pompage.
- Un système de télégestion.
- Un régulateur de pression d'eau.



Fig. I.11 : Station de Souk Tleta

Conclusion :

Le dessalement de l'eau de mer est une activité en très forte croissance, la capacité mondiale installée dépasse le 25 millions de m³/jour.

Le dessalement est un enjeu particulièrement important pour l'avenir des régions arides. C'est est une méthode d'avenir pour pallier aux problèmes d'eau douce dans certains cas il devient impératif à cause de la diminution cruciale du niveau des ressources souterraine.

Chapitre II: _____

Les différents procédés de dessalement des eaux de mer

Introduction :

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques, certaines sont plus adaptées à un environnement donné que d'autres. Actuellement il existe plusieurs techniques de dessalement, toutes ces techniques fonctionnent selon le même principe général.

On peut diviser une installation de dessalement en 4 postes principaux (Fig. II.1):

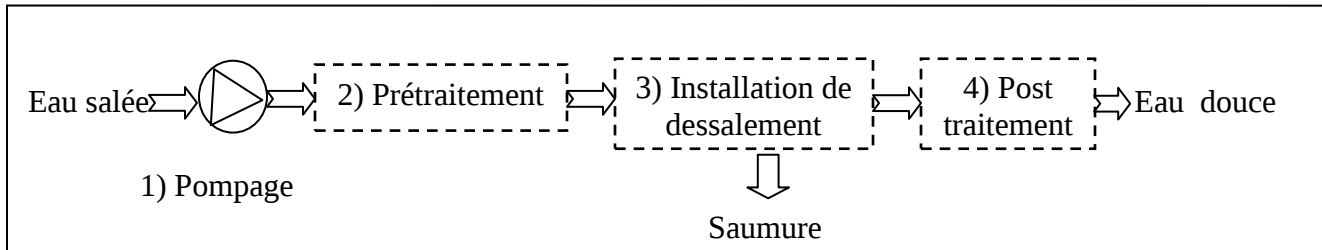


Fig. II.1: Schéma général d'une installation de dessalement

- **L'alimentation en eau de mer** peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements.

- **Le prétraitement:**

- 1) Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites.
- 2) Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
- 3) Antitartre : La distillation favorise précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur.

- **Installation de dessalement :** Les procédés de dessalement

- 1) Par changement de phase : L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau pure.
- 2) A membranaires : L'eau et les sels dissous sont séparés au moyen de membranes sélectives.
- 3) Autres procédés.

- **Le post-traitement** permet de potabiliser l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).

- 1) Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du Ca(OH)_2 ou du CaCO_3 .
- 2) Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.

II.1 Procédés de dessalement

Les différents procédés de dessalement des eaux de mer peuvent être classés selon le principe sur lequel ils se basent comme suivant :

II.1.1 Par changement de phase :

II.1.1.1 La Distillation :

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

Quatre procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF), le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED), le procédé à compression de vapeur et le procédé de distillation solaire.

a) Distillation flash à étages multiples («Multi-stages Flash » ou MSF) :

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. (Fig. II.2 et II.3)

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m^3 d'eau dessalée par jour.

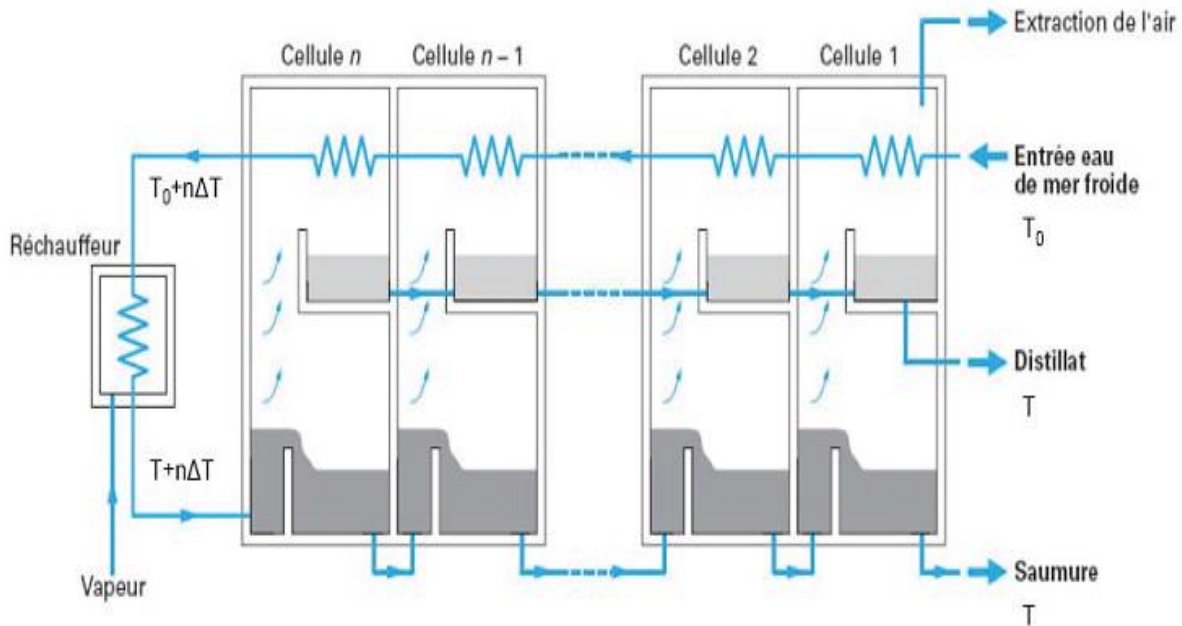


Fig. II.2 : Distillation à détente étagées

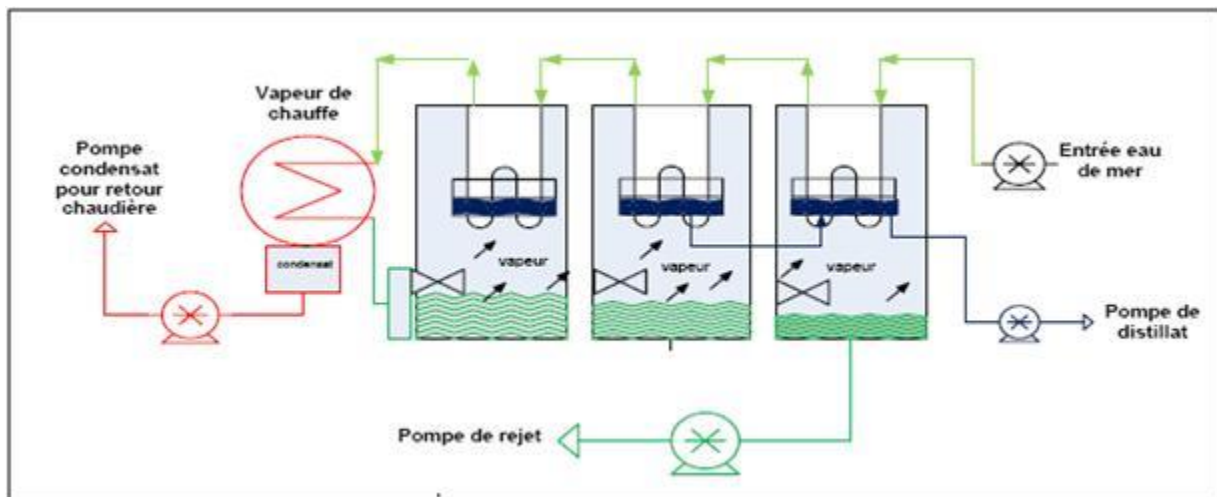


Fig. II.3: Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) à 3 étages

b) Distillation à effets multiples («Multi-Effect» ou MED) :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1^{er} effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2^{ème} effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2^{ème} effet et ainsi de suite. Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie / m³ d'eau douce produite). (Fig. II.4 et II.5)

Plusieurs technologies des évaporateurs multiples effets existent :

- Les évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux arrosés sont les appareils les plus utilisés actuellement. Dans ces appareils le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes.
- La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant où elle cédera son énergie de condensation. Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer.
- Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite.
- Un système compact à bases de plaques EasyMED constitué de cellules élémentaires comprenant une zone d'évaporation et une zone de condensation brevetée en 1998 est également en cours de développement. L'agencement judicieux de cellules élémentaires pour que chaque zone d'évaporation soit située entre deux zones de condensation de l'effet précédent permet d'obtenir un appareil plus compact puisqu'il ne nécessite pas une volumineuse calandre pour chaque effet.

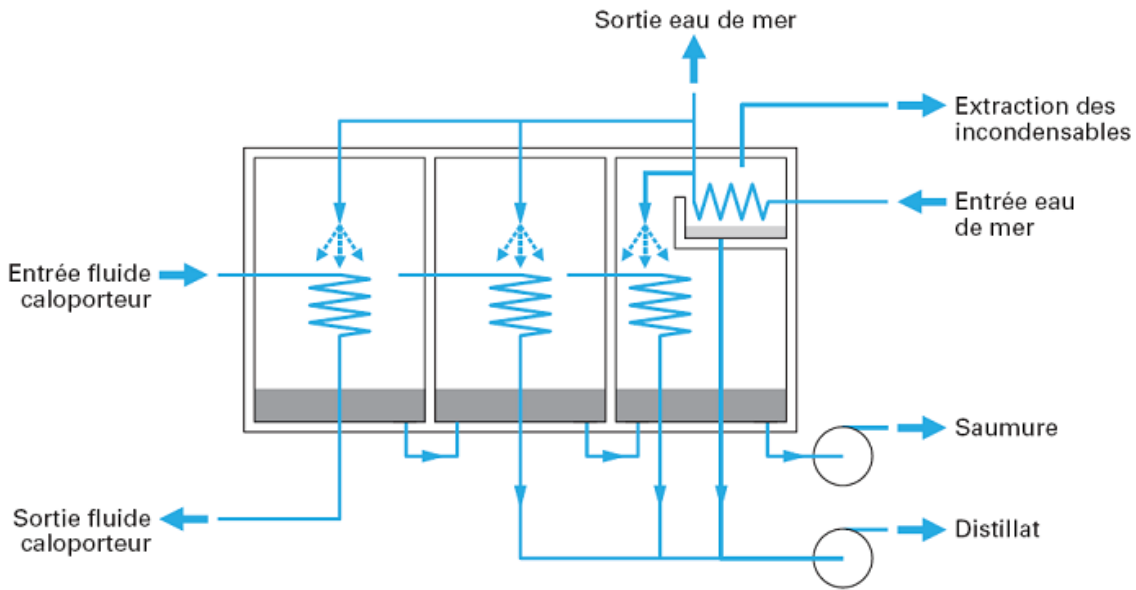


Fig. II.4 : Distillation à multiple effet

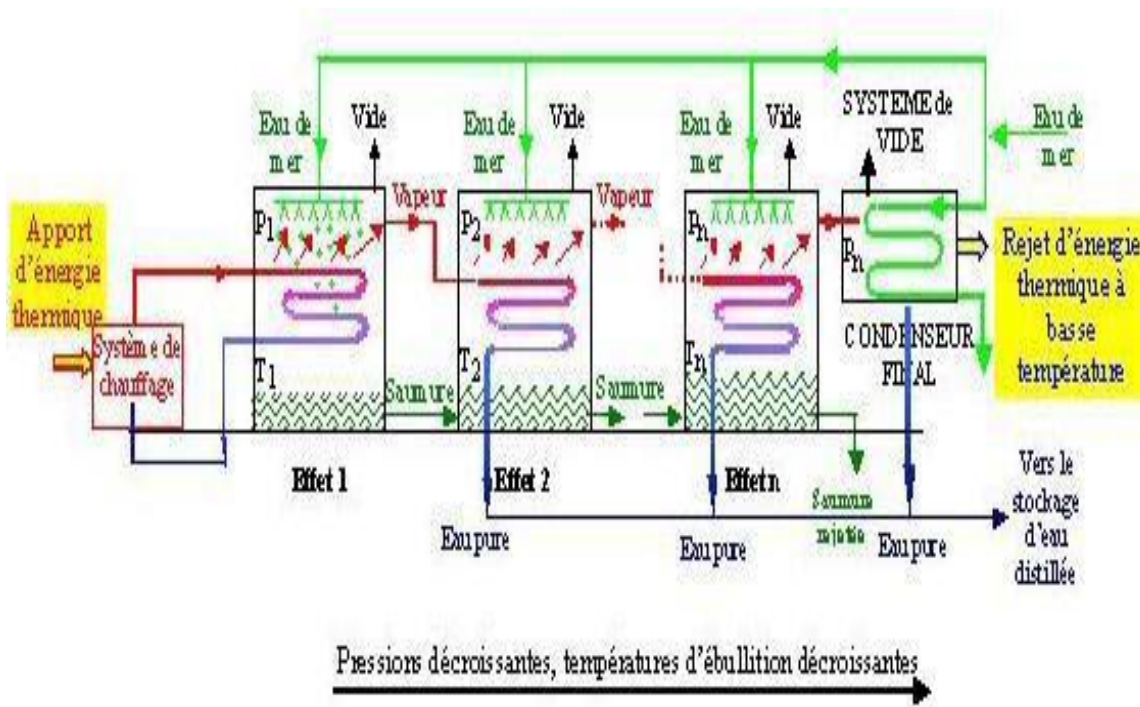


Fig. II.5 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)

c) **Distillation par compression de vapeur («Vapor Compression» ou VC) :**

Le principe de ce procédé réside dans le fait que lorsque la vapeur est comprimée, sa température et sa pression augmentent alors que son volume diminue. (Fig. II.6)

La compression de vapeur peut s'appliquer dans le cas de la distillation à simple effet (MVC) ou à multiples effets (ME-TVC). Cette technique permet de limiter la consommation en énergie thermique.

L'eau de mer est chauffée jusqu'à évaporation dans une enceinte thermique isolée. La vapeur d'eau récupérée se condense en se refroidissant. La vapeur produite dans le dernier effet – dans le cas de la distillation à multiples effets par compression de vapeur (ME-TVC) – ou dans l'effet unique – dans le cas de la distillation à simple effet par compression de vapeur (MVC) – est aspirée par un compresseur. Ce dernier augmente la température et la pression de la vapeur.

Cette vapeur haute pression est ensuite envoyée vers la partie basse de l'enceinte où elle se refroidit. En se condensant, la vapeur haute pression se transforme en eau douce.

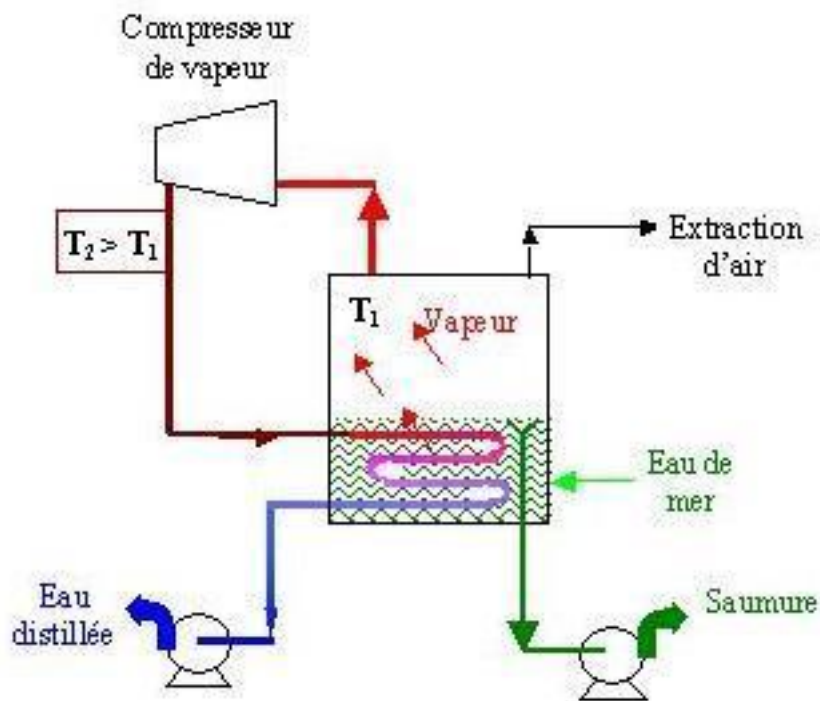


Fig. II.6 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

Ce système, qui produit de l'eau pure, a un coût énergétique moyen de 7 à 14 kWh/m³ selon qu'il s'agit d'un ou de deux effets. Il ne fonctionne qu'à l'énergie électrique. Cependant, on peut associer au compresseur un échangeur thermique pour réchauffer l'eau salée en récupérant la chaleur perdue par les gaz d'échappement ou les vapeurs de combustion.

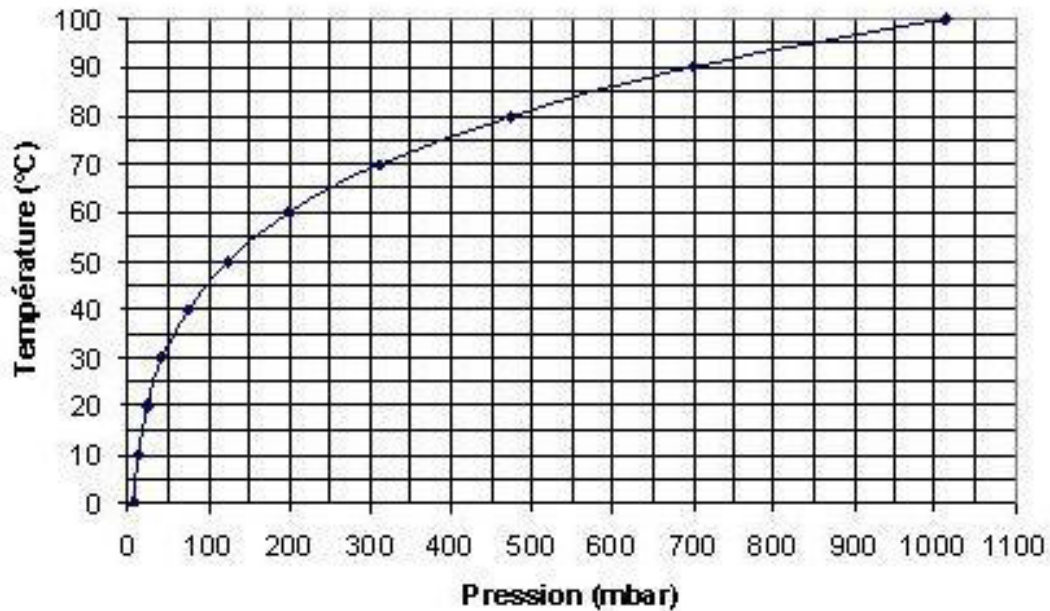


Fig. II.7 : Évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression

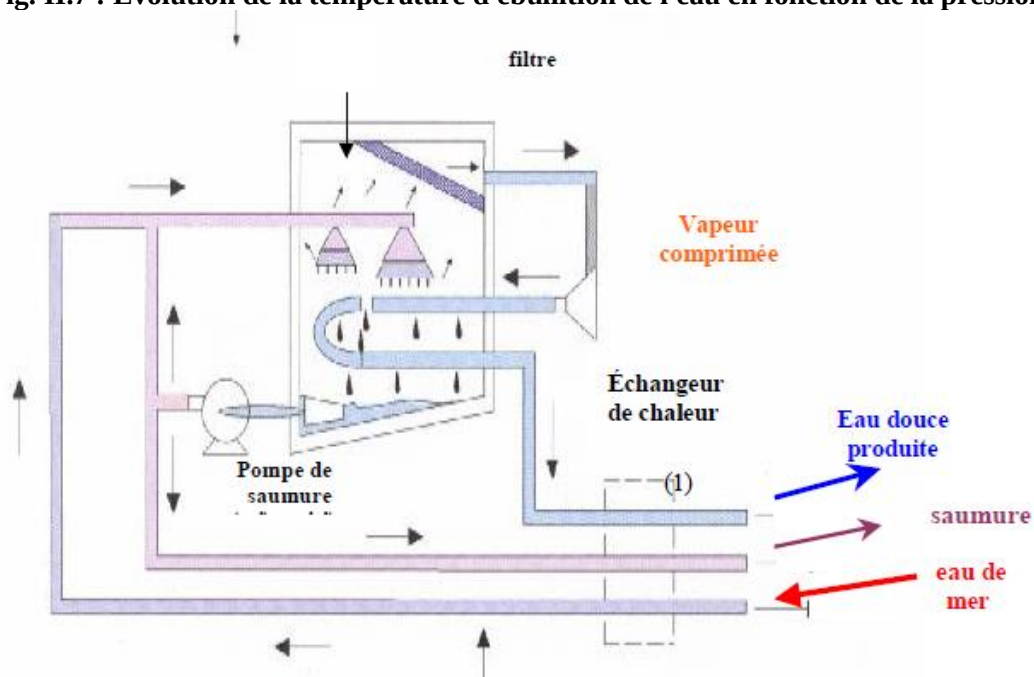


Fig. II.8 : principe de fonctionnement par CV

d) Distillation solaire :

La distillation solaire est le procédé de dessalement le plus simple, son principe est basé sur l'effet de serre. Il consiste en un bassin dont le fond est peint en noir et est couvert d'une plaque plastique (en verre) inclinée. L'eau salée est introduite dans ce bassin sur une faible profondeur. Les rayons solaires traversent la vitre et viennent chauffer l'eau située au fond du bassin, car, le rayonnement thermique ne traverse pas le vitrage et la chaleur se trouve alors emprisonnée à l'intérieur du bassin. Une partie de l'eau s'évapore et la vapeur vient contre la paroi plastique encore froide et se condense, les gouttes d'eau glissent contre cette paroi inclinée et sont recueillies dans une gouttière. Le rendement est généralement faible et il est de l'ordre de 2 à 4 litres par m². Plusieurs prototypes ont été essayés depuis les années 1960. (Fig. II.9)

Etant donné le faible rendement de ce distillateur serre, plusieurs études ont cherché à améliorer le procédé en imaginant différentes formes de bassins, double pente, en gradins, deux chambres etc. Parmi les recherches, on peut citer celles qui proposent un distillateur à plaques verticales successives. La première plaque reçoit le rayonnement solaire sur sa première face exposée au soleil, s'échauffe, sa deuxième face est couverte d'un tissu imbibé d'eau. L'eau se trouvant dans le tissu s'évapore et la vapeur se condense sur la première face de la deuxième plaque encore froide. Cette deuxième plaque s'échauffe par la condensation et reprend le cycle de la première plaque etc.

D'autres recherches encore plus récentes, à l'Université de Julich, ont proposé un distillateur serre à étages multiples (Fig. II.10), on remplace le bassin parallélépipédique unique du distillateur solaire simple, par une série de bassins à section triangulaire, et placés l'un au-dessus de l'autre. On chauffe l'eau salée contenue dans le bassin le plus bas par un capteur solaire, l'eau s'évapore et la vapeur se condense sur les parois externes inférieures du deuxième bassin, en s'y condensant, provoque l'échauffement de l'eau située dans ce deuxième bassin et petit à petit, une partie de cette eau s'évapore, et ainsi de suite.

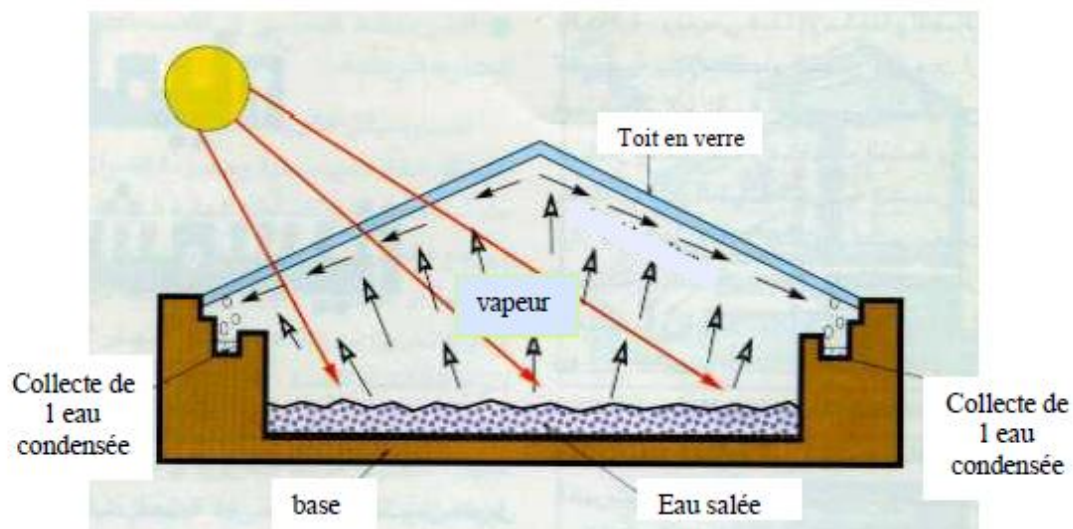


Fig. II.9: Serre double pente pour dessalement de l'eau

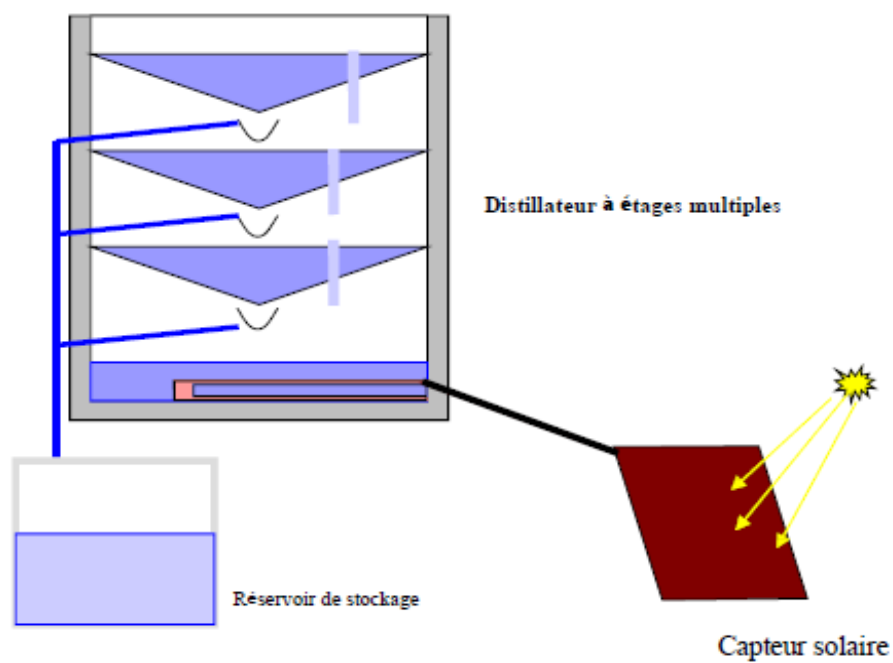


Fig. II.10 : Distillateur à étages

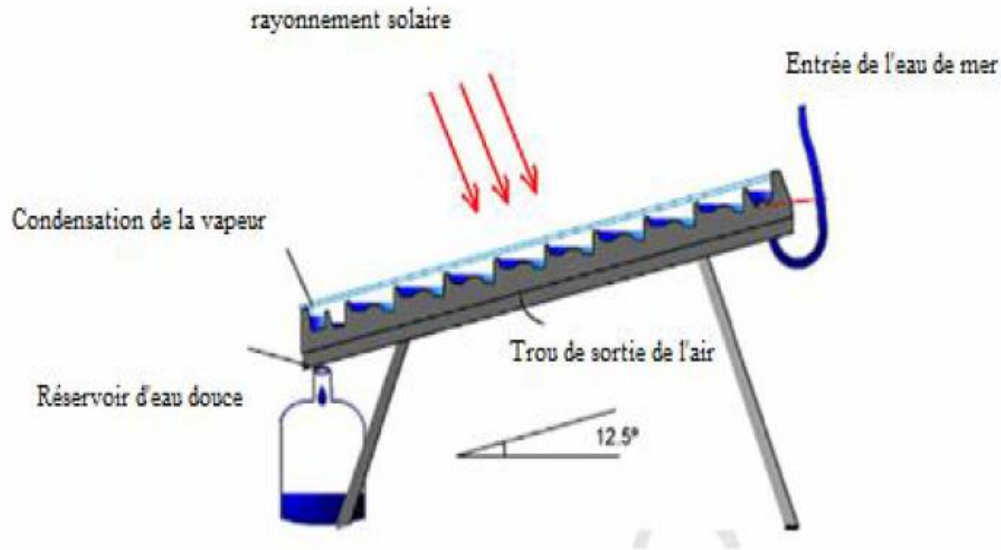


Fig. II.11 : Schéma d'un distillateur solaire simple

II.1.1.2 La congélation :

Il est possible de dessaler l'eau par congélation. La température de congélation est quasiment indépendante de la pression. Plus la concentration en sels n'est élevée et plus la température de solidification de l'eau est faible. Alors qu'elle est de 0°C pour de l'eau pure, elle descend à -2°C pour l'eau de mer et -4°C pour une eau qui a une concentration en sels deux fois supérieure à celle de l'eau de mer.

Le principe repose sur le fait qu'une fraction de l'eau salée s'enrichit en sels lors de la congélation d'eau pure. Il existe trois étapes:

- ❖ la congélation partielle de l'eau à dessaler
- ❖ la séparation des cristaux de glace et de la saumure
- ❖ la fusion des cristaux de glace pour obtenir l'eau douce à l'état liquide

Le dessalement peut se faire par congélation naturelle dans les régions où la température de l'air demeure suffisamment longtemps inférieure à la température de congélation de l'eau à traiter. Dans le cas échéant, une congélation artificielle est envisageable.

❖ **Principe de congélation :**

Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer. Ce réfrigérant peut être l'eau de mer elle-même : la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite. Ce procédé est appelé VFVC (Vacuum Freezing Vapour Compression) dans la littérature anglo-saxonne. La congélation directe peut également être assurée par un réfrigérant secondaire: le refroidissement est obtenu par la vaporisation de butane liquide et froid injecté sous pression directement dans la saumure. Le procédé est alors appelé SRF (Secondary Refrigerant Freeze).

En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination.

Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

1. le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide),
2. la formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage),
3. le lavage et/ou ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite),
4. la fusion des cristaux de glace.

Les procédés de congélation peuvent être divisés en trois catégories : la congélation primaire sous vide, la congélation secondaire, et la congélation indirecte.

a) La congélation primaire (sous vide) :

Les procédés de ce type sont tous des procédés continus. Ils utilisent directement l'eau contenue dans l'eau de mer comme réfrigérant. A pression réduite, l'eau s'évapore et extrait la chaleur de la saumure, ce qui conduit à une congélation partielle de la solution. Les cristaux formés sont lavés dans une colonne et fondus. Tous ces procédés nécessitent un prétraitement particulier de l'eau de mer qui doit être dégazée pour éliminer l'air dissout. Ce dégazage est notamment crucial pour les procédés par absorption, ces derniers ne tolérant pas d'incondensables. Trois technologies principales ont été développées à travers des usines ou unités pilotes. Le procédé de congélation sous vide par compression de vapeur (VFVC) utilise un compresseur de vapeur qui travaille entre la chambre d'évaporation et la chambre de fusion. La vapeur est utilisée pour fondre les cristaux de glace. Les deux chambres sont sous pression réduite. Le rapport de pression entre les deux chambres est faible, de

sorte que la compression absorbe peu de puissance. Toutefois, les débits volumiques de vapeur à traiter sont énormes car la vapeur est à faible pression. Pour une installation industrielle, les compresseurs requis devraient être développés spécifiquement. De plus deux étages de compression seraient sans doute nécessaires.

Dans le procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur (VFVA) la vapeur d'eau à basse pression est absorbée par une solution concentrée de bromure de lithium (Cheng et coll., 1989). La solution diluée est re-concentrée par évaporation et la vapeur d'eau formée condensée devient une eau potable. La chaleur d'absorption est utilisée pour fondre les cristaux de glace par transfert de chaleur à travers une surface.

Ce procédé requiert donc une source de chaleur pour reconcentrer la solution de LiBr dans le générateur. La consommation d'énergie peut être réduite en adoptant un générateur à multiple effet, mais, cela rend alors le procédé plus complexe. Enfin, le procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur appelé (AFVC) utilise une pompe à chaleur à compression entre le cristalliseur/absorbeur et le générateur/fondoir où la vapeur produite assure la fusion de la glace par contact direct. Dans le pilote développé par Fraser le couple de sorption choisi est le système eau/NaCl et le fluide utilisé en boucle fermée dans la pompe à chaleur est NH_3 .

L'auteur donne le détail des niveaux de température et des concentrations utilisées pour le couple de sorption. Il présente également un bilan énergétique complet sur le pilote et extrapole les résultats à une unité industrielle. Comparé aux diverses techniques de dessalement par distillation, le procédé s'avère être de loin le plus économe en énergie. Toutefois, aucun élément n'est donné sur les conditions du lavage et la pureté de l'eau douce produite.

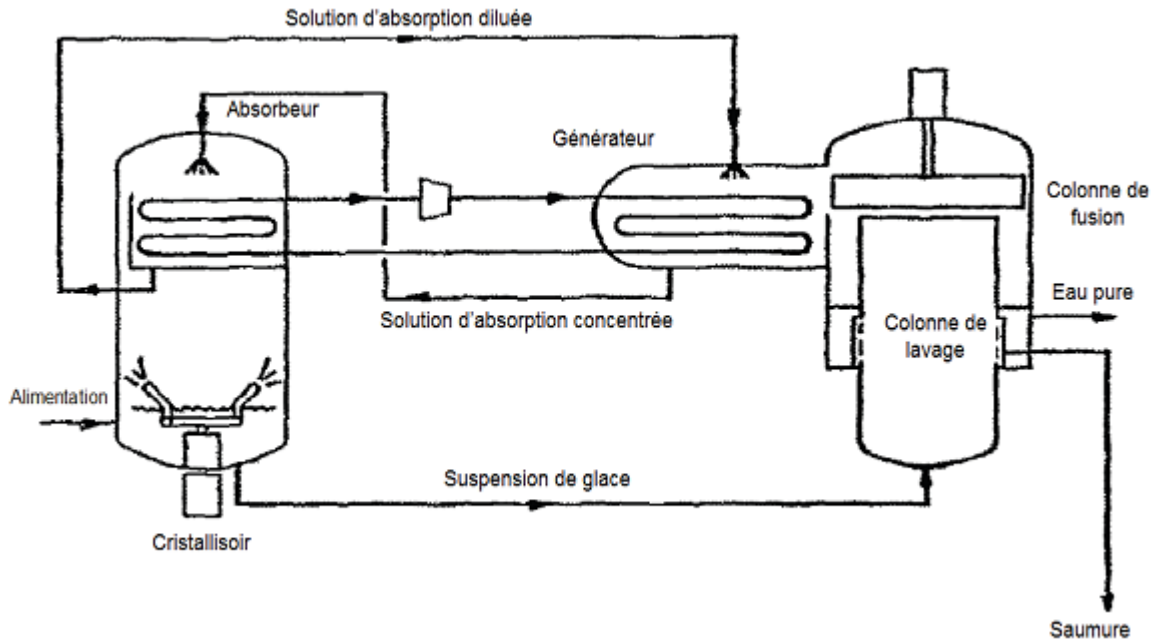


Fig. II.12: Procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur (AFVC) utilisant une pompe à chaleur à compression

b) La congélation secondaire :

La technique fonctionne en mode continu et utilise un réfrigérant inerte et non miscible avec l'eau de mer. Le réfrigérant froid, sous pression et à l'état liquide est injecté directement dans l'eau de mer. Sa vaporisation provoque alors le refroidissement de la solution et la formation des cristaux de glace.

Les cristaux de glace sont ensuite séparés de la saumure, passent dans la colonne de lavage puis sont envoyés dans le fondoir. Les vapeurs de réfrigérant sont comprimées puis condensées par échange de chaleur avec les cristaux de glace dans le fondoir. Le réfrigérant de choix est le n-butane qui n'est pas cher, abondant et relativement respectueux de l'environnement. Des traces du réfrigérant, provenant du contact avec la saumure ou avec les cristaux durant la phase de fusion, peuvent être retrouvés dans le produit final et un système de barbotage à l'air est essentiel dans ce type de procédé.

c) La congélation indirecte :

L'enthalpie nécessaire pour la congélation partielle de l'eau de mer est évacuée par transfert de chaleur indirect à travers une paroi. Les procédés de congélation indirecte peuvent être opérés en mode continu ou en mode discontinu. Les procédés continus conduisent à la formation de cristaux de glace en suspension. Ces suspensions sont obtenues grâce à unensemencement qui permet d'éviter le dépôt sur la surface froide ou en raclant le dépôt formé sur la surface froide. Dans les deux cas, les cristaux de

glace, en suspension dans la saumure, sont ensuite lavés et fondus respectivement dans des colonnes de lavage et de fusion. Dans le procédé indirect en discontinu, une couche de glace est déposée sur la surface solide froide. Les étapes de congélation, de drainage ou ressuage, et de fusion sont réalisées dans le même dispositif. La glace formée subit un drainage par une fusion partielle jusqu'à ce que la glace résiduelle soit potable.

❖ **Historique du dessalement par congélation :**

Les données de la littérature sur le dessalement par congélation indiquent que ce procédé a suscité l'intérêt dès les années 50. Cette période a connu la construction des usines pilotes qui représentaient 7 % de la production totale de l'eau douce aux Etats Unis. Le tableau donne à titre indicatif, quelques unités pilotes construites depuis cette période.

TAB. II.1 : Quelques unités pilotent de dessalement par congélation

Organisation	Année	Procédé	Capacité
Carrier Corporation, Wright ville Beach, Caroline du nord, états unis	1959	Congélation sous vide par absorption de vapeur (VFVA)	435 m ³ /Jour
Blawknox, Florida, USA	1964	Congélation par contact direct du réfrigérant (butane)	208 m ³ /Jour
IDE Technologies, Eilat, Israël	1964	Congélation sous vide par compression de vapeur (VFVC)	1000 m ³ /Jour
SOLARS, Yanbu, Arabie Saudia	1985	Congélation par contact indirecte (continu)	200 m ³ /Jour

II.1.2 A membranes :

Dans la nature, les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels. Des processus de dialyse et d'osmose se produisent dans les organismes vivants. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants: l'électrodialyse (ED) et l'osmose inverse (OI).

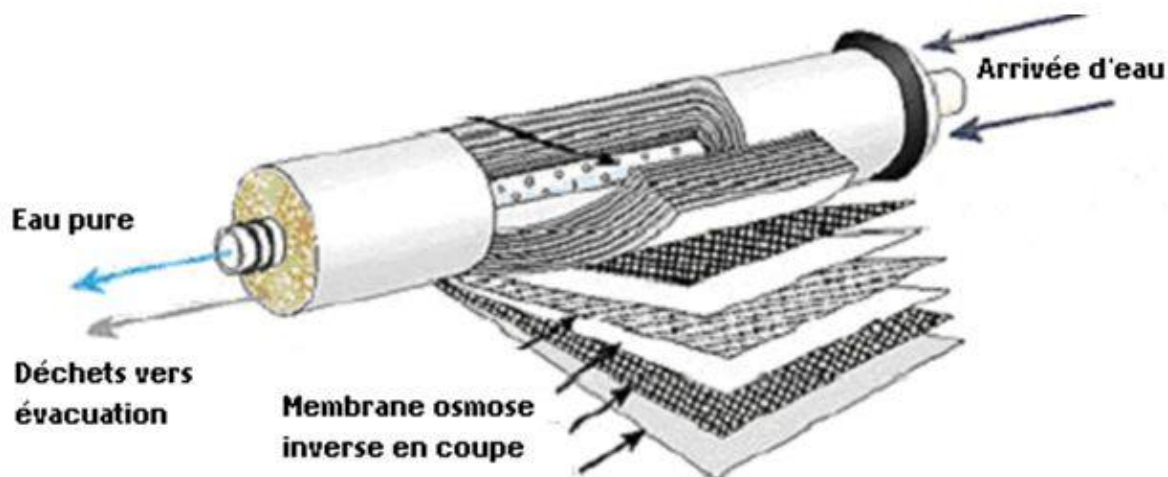


Fig. II.13 : Technique de dessalement à membrane

II.1.2.1 L'osmose inverse (OI) :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10-7 mm de taille.

La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de $0,5 \text{ g.L}^{-1}$.

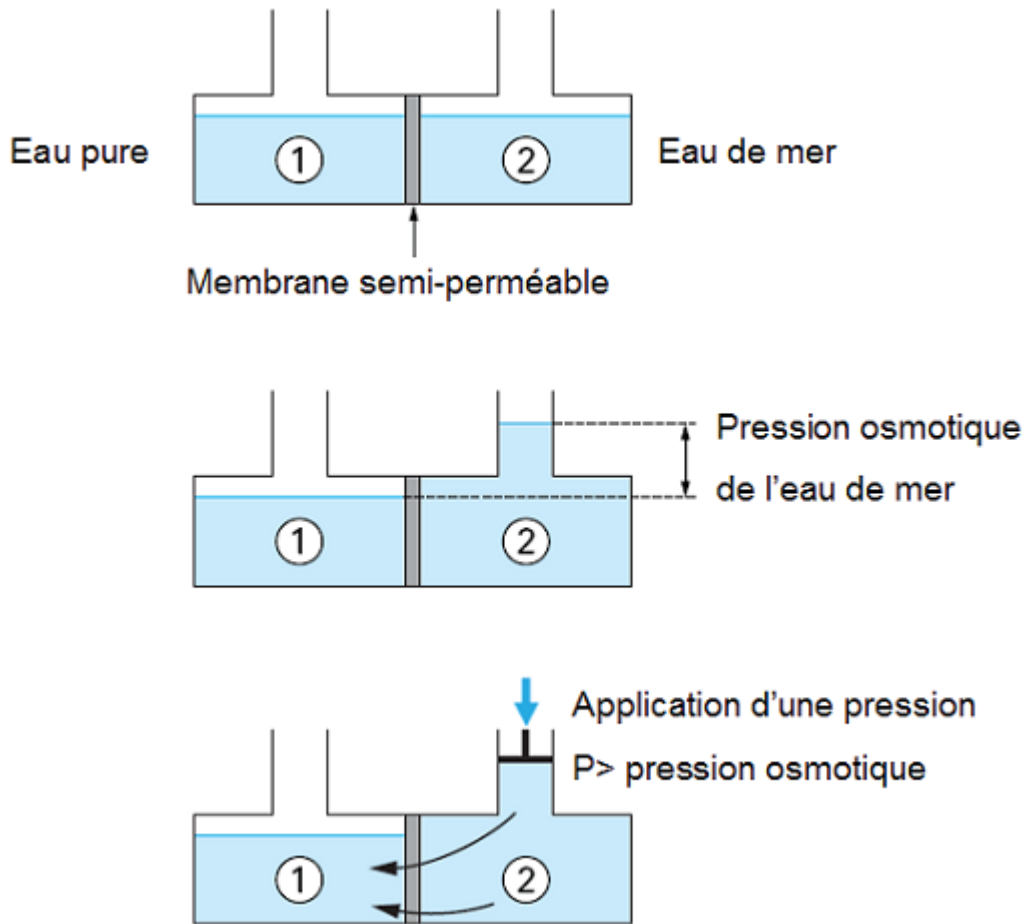


Fig. II.14 : Mise en évidence de l'osmose inverse

❖ **Principe de l'osmose inverse :**

La figure (Fig. II.15) présente le principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse. Lorsque deux solutions de concentrations en soluté dissous différentes sont mises en contact, celles-ci se mélangent jusqu'à uniformisation des concentrations. Lorsque ces deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable laissant uniquement passer le solvant, le solvant de la solution diluée va traverser la membrane pour aller dans le compartiment contenant la solution concentrée. Ce transfert s'opérera jusqu'à ce que la différence de hauteur de liquide entre les deux compartiments corresponde à la pression osmotique existant entre les deux solutions de concentrations différentes. En appliquant une pression supérieure à la pression osmotique, l'effet inverse se produit. Le solvant traverse la membrane depuis la solution concentrée vers la solution diluée. C'est le procédé d'osmose inverse (OI).

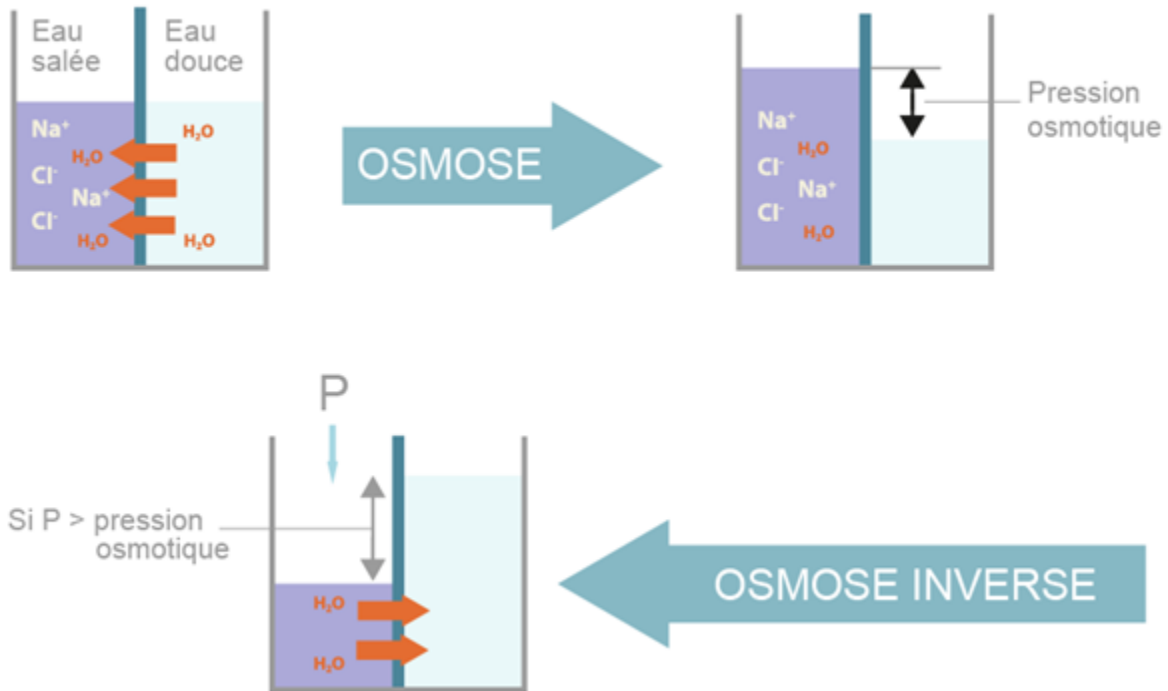


Fig. II.15 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

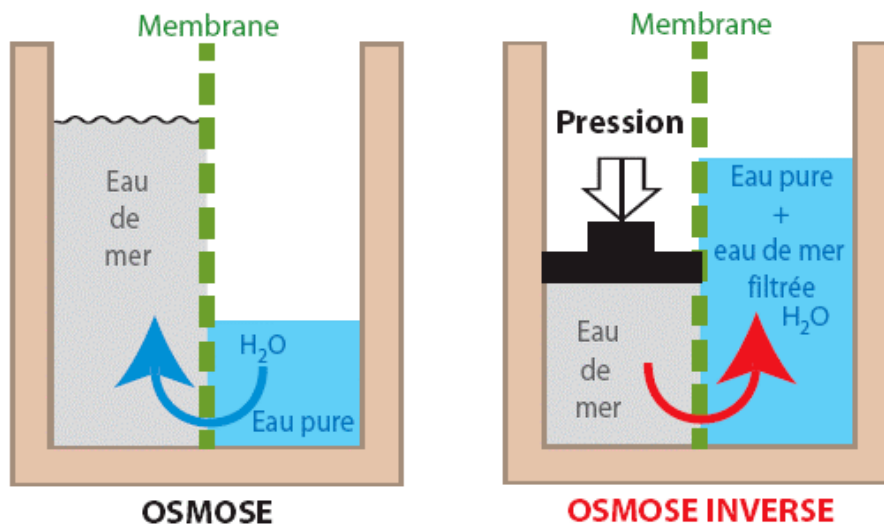


Fig. II.16 : Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse.

En pratique, l'eau d'alimentation est pompée sous pression contre la membrane. A mesure qu'une fraction de l'eau diffuse à travers la membrane, la teneur en sels de la fraction restante augmente. Dans le même temps, une partie de cette eau d'alimentation est rejetée, sans diffuser à travers la membrane.

Sans ce rejet de saumure, l'eau d'alimentation continuerait à accroître sa concentration en sels, ce qui engendrerait des problèmes tels que la précipitation des sels sursaturés et une pression osmotique accrue à travers la membrane. La fonction de la membrane OI est illustrée par Fig. II.16. Un système OI se compose des éléments de base suivants : prétraitement, pompes à haute pression, bloc membrane et post-traitement.

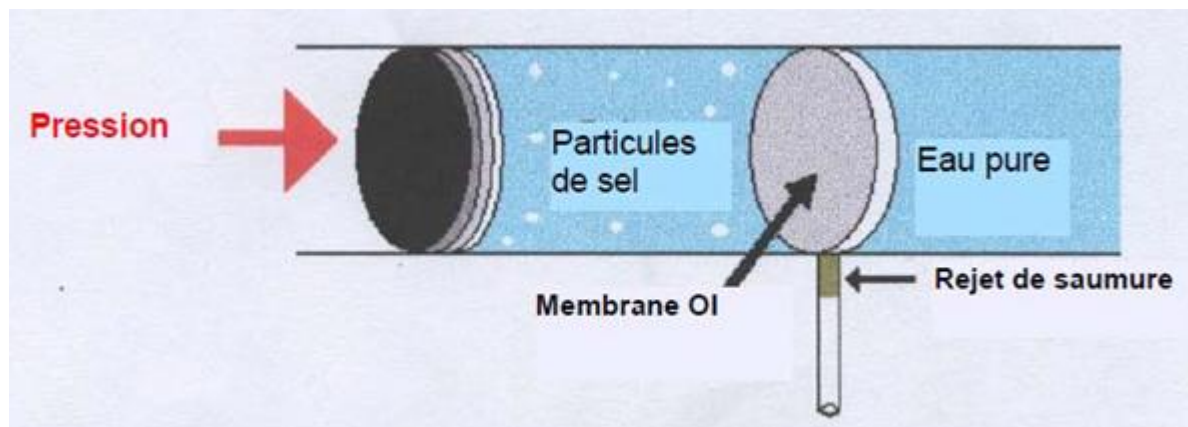


Fig. II.17 : Fonction de la membrane OI

❖ Passé et présent :

Le procédé d'osmose a été développé au début des années 1960 par les chimistes américains Sidney Loeb et Srinivasa Sourirajan qui mettent au point une membrane portant leurs noms. Celle-ci permet alors de déminéraliser l'eau de mer. L'idée d'exploiter l'énergie osmotique à des fins de production électrique est née dans les années 1970-80. Le premier prototype de centrale à énergie osmotique n'a toutefois été mis en place qu'en 2009.

II.1.2.2 L'électrodialyse (ED) :

Il s'agit là d'une méthode de séparation électrochimique, basée sur la propriété qu'ont les ions à aller toujours vers la polarité inverse de leur charge électrique. Pratiquent, on dispose alternativement dans l'eau à dessaler, des membranes sélectives anionique et cationiques, et on fait passer un courant continu, les ions vont aller dans les sens conformes à cette propriété, traversent les membranes de leur nature et sont arrêtés par les autres, on obtient ainsi des zones où l'eau est pratiquement désionisée séparées par des zones de saumures (Fig. II.18). Ce procédé a été surtout amélioré et développé dans les années 70, il est d'un emploi facile, même la dépolarisation est aisée, il suffit d'inverser le sens des électrodes, on l'utilise parfois en amont des échangeurs d'ions dans les installations industrielles. Il est même utilisé pour l'eau de mer.

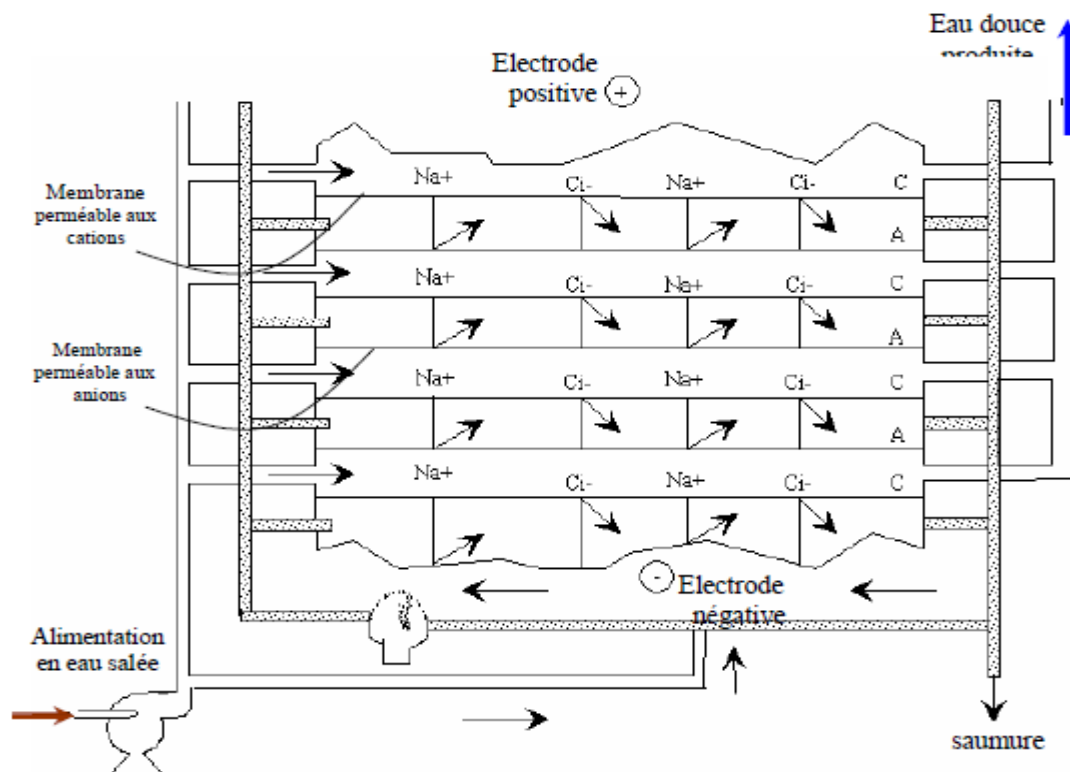


Fig. II.18 : Principe de dessalement par électrodialyse

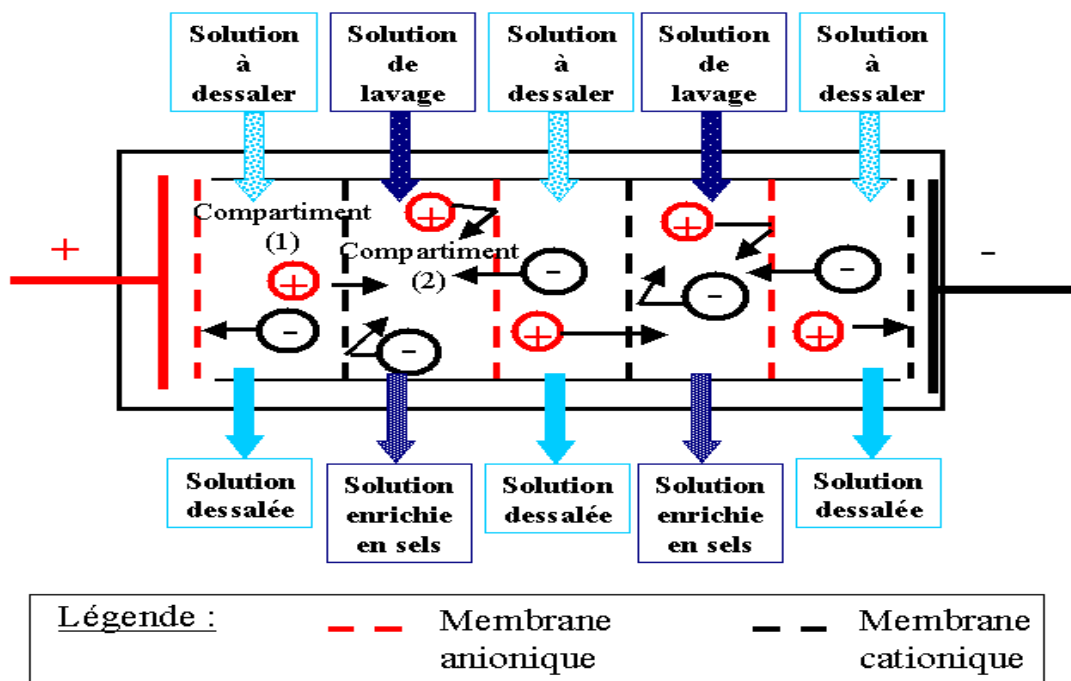


Fig. II.19 :Schéma de L'électrodialyse

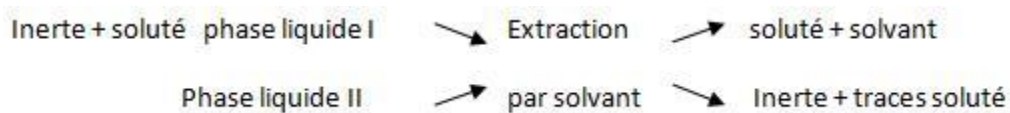
II.1.3 Autres procédés :

II.1.3.1 Échange d'ion :

Ce procédé consiste en une élimination totale des sels par l'utilisation des produits chimiques appelés « échangeurs d'ions » qui sont des substances granulaires insolubles. Ils comportent dans leur structure moléculaire des radicaux acides ou basiques susceptibles de permuter les ions positifs ou négatifs fixés sur ces radicaux, contre des ions de même signe (Na^+ et Cl^-) se trouvant dans l'eau de mer. On utilise des résines synthétiques, les unes capables d'absorber les anions, les autres les cations.

II.1.3.2 Extraction par solvants :

L'extraction par solvant est l'opération fondamentale qui permet d'extraire un composé (soluté) d'un liquide, par un autre liquide (solvant). Cette méthode repose sur la miscibilité de certains solvants avec l'eau, sans être solvant pour les sels. On obtiendra de l'eau douce par extraction, on peut schématiser cette opération comme suit :



La phase liquide I est un mélange homogène. Le solvant ne doit pas être miscible avec l'un des deux composés initiaux, l'inerte et le solvant ne sont pas miscibles. Le mode de dispersion des deux phases peut être gravitaire par agitation ou par pulsation.

II.1.3.3 Puce électronique :

L'accès à l'eau potable reste un problème majeur: un tiers de la population mondiale vit dans des régions victimes de stress hydrique selon l'Onu, qui prévoit un doublement de ce chiffre d'ici 2025. D'où des millions de morts attribuées chaque année à des problèmes d'accès à de l'eau douce consommable.

Pourtant, les méthodes de dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre existent. Mais, qu'il s'agisse de la distillation, de la compression de vapeur, de l'électrodialyse ou de l'osmose inverse (filtration à travers des membranes ultrafines), ces techniques reviennent très cher en raison de la quantité d'énergie nécessaire (3 à 15 kWh/m³).



Fig. II.20:Marais salants sur la côte de la baie de San Francisco

Les populations les plus pauvres, lorsqu'elles disposent d'eau de mer en abondance, n'ont pas les moyens financiers nécessaires pour la dessaler. D'où l'intérêt d'une nouvelle technologie développée par l'université du Texas, à Austin, et l'université de Marburg, en Allemagne, en collaboration avec une Start up, Okeanos Technologies, en charge du développement commercial.

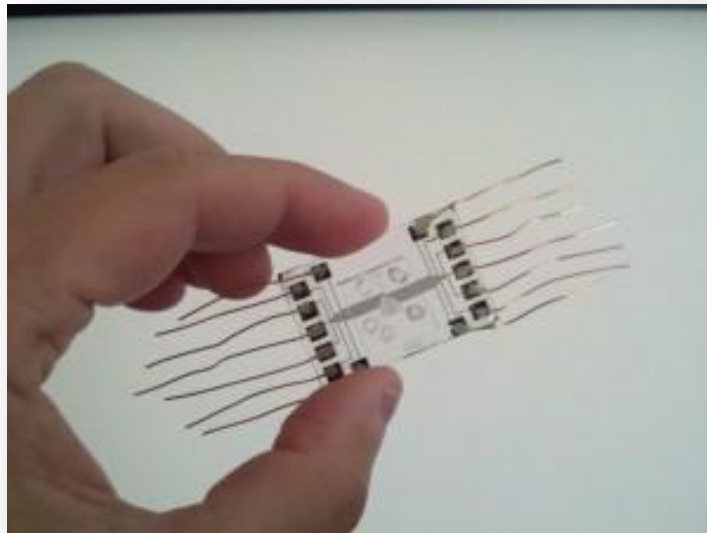


Fig. II.21 : prototype de la puce à eau potable (Université du Texas)

L'originalité de la solution réside dans son caractère chimique et son action au niveau des atomes via une puce électronique. La technique, baptisée désalinisation d'eau de mer par électrochimie, est décrite dans un article paru dans le journal *Angewandte Chemie*.

Elle présente des avantages très importants: grande simplicité et très faible consommation d'énergie. Le système peut prendre différentes dimensions, depuis l'installation portable individuelle jusqu'à, potentiellement, l'unité de production de grandes quantités d'eau potable.

Le procédé fait passer l'eau salée dans des micro-canaux de 22 microns de large. Chaque canal se sépare en deux. Au point de séparation, une électrode bipolaire applique une différence de potentiel de 3 Volts au canal principal. Cette tension oxyde certains des ions chlorure chargés négativement. La baisse du nombre de ces derniers engendre un gradient de champ magnétique qui oriente les ions chargés positivement vers la dérivation.

Pour conserver l'électro-neutralité de l'ensemble, imposée par les lois de la physique, les ions négatifs (anions) suivent les ions positifs dans la dérivation. Dans le canal principal coule alors une eau partiellement dessalée.

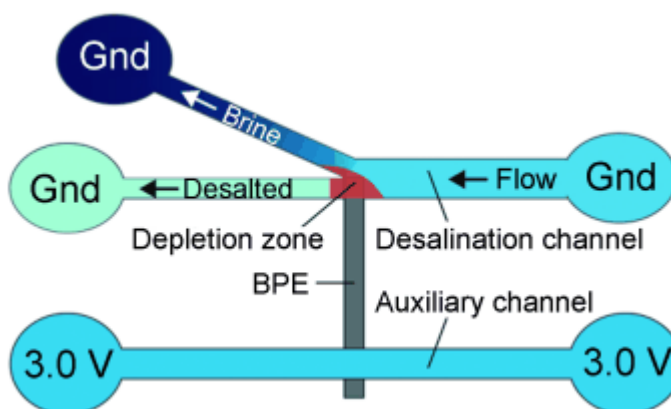


Fig. II.22 : Principe de fonctionnement du système (Wiley - VCH).

La quantité d'énergie nécessaire est si faible que le système peut fonctionner avec des piles du commerce. On imagine qu'il pourrait être alimenté par des panneaux photovoltaïques.

Avant de se réjouir, il faudra que les chercheurs améliorent sensiblement leur procédé. Pour l'instant, le taux de désalinisation obtenu ne dépasse pas les 25 %. Or, il faut atteindre 99% pour que l'eau devienne potable. Richard Crooks, de l'université du Texas, et Ulrich Tallarek, de l'université de Marburg, se déclarent néanmoins confiants. Même si, en plus de l'efficacité du procédé, il leur faut démontrer son aptitude à traiter de grande quantité d'eau.

Malgré ces étapes critiques, il est remarquable qu'un nouveau procédé de désalinisation apparaisse. On peut en effet s'étonner que les innovations soient si rares dans un domaine aussi vital pour le tiers de la population mondiale, même s'il s'agit de la plus pauvre.

II.2 Quantité d'énergie requise pour le dessalement

En théorie, la quantité d'énergie minimale requise pour produire 1 m³ d'eau douce est de 0.65kWh, et ce quel que soit le procédé de dessalement utilisé. L'estimation de cette quantité, basée sur les lois de la thermodynamique, repose en outre sur les hypothèses suivantes :

- a) Les températures initiale et finale sont identiques.
- b) La salinité de l'eau de mer, de laquelle on extrait l'eau douce, demeure constante.

Lorsqu'on extrait de l'eau douce d'un volume fini d'eau de mer, la salinité de cette dernière varie. On constate alors que la quantité d'énergie requise varie avec le taux de production (volume d'eau douce produite/volume d'eau de mer utilisée). On peut ainsi montrer que, pour des taux de production de 10.50 et 80 %, la quantité théorique d'énergie requise est de 0.8, 1.1 et 1.8kWh/m³.

En pratique, toutefois, les quantités d'énergie utilisées sont beaucoup plus élevées que les quantités calculées théoriquement. Il faut en effet de l'énergie pour faire fonctionner les équipements mécaniques (moteurs, pompes de circulation, etc.), pour compenser les pertes de chaleur et pour réaliser le traitement lui-même. En général, on considère que la quantité pratique minimale d'énergie nécessaire pour obtenir le dessalement de l'eau de mer est d'environ 3.5kWh/m³, quantité à laquelle il faut ajouter l'énergie requise pour acheminer l'eau de mer jusqu'à la station de dessalement.

On a cependant relevé des consommations d'énergie de 75 kWh /m³ (distillation thermique), et même de 100 kWh /m³ (distillation domestique à l'aide d'un thermo-compresseur). Par contre, on a signalé des consommations de 4 kWh /m³ dans des stations utilisant l'osmose inverse ; des stations expérimentales d'osmose inverse, qui abaissent la salinité de l'eau de mer à 500 mg/L, n'auraient même consommé que 3.5 kWh /m³.

TAB. II.2: Energie nécessaire au dessalement d'un m³ d'eau selon le procédé utilisé et la salinité d'eau brute

Procédé	GOR	T en °C	Nbr d'effets	Energie thermique en KWH	Energie électrique en KWH	Energie totale en KWH
MED	12	74	37	56.8	2.3	18.14
	17	103	68	38.5	2.22	13.77
	21	123	87	30.3	2.15	11.24
MSF	12	129	42	54.2	5	21.6
	17			39.3	5.5	16.99
	21			31	6	15.30
Congélation	-	-	-	-	11	11
Compression de vapeur	-	-	-	-	14.3	14.3
Osmose inverse	Eau saumâtre à 5000 g/l					2.5
	Eau de mer sans turbine de récupération d'énergie					8
	Eau de mer avec turbine de récupération*					4
				Energie électrique pour dessalement et pompage		
ED	Eau à 5 000 mg/l			3.5	0.7	4.2
	Eau à 10 000 mg/l			7	0.7	7.7
	Eau à 35 000 mg/l			24.5	0.7	25.2

GOR : taux d'eau dessalée produite par rapport à la quantité de vapeur utilisée

*d'après les derniers documents, cette énergie pourrait être réduite à 2 KWH

II.3 Les avantages et les inconvénients

II.3.1 Les Avantages :

Le dessalement a en effet des inconvénients mais aussi des avantages, on peut voir que le dessalement permet les choses suivantes :

- L'utilisation de l'eau de mer qui peut être actuellement considérée comme une ressource inépuisable car l'eau est une énergie renouvelable.
- Une pollution minime par rapport aux autres types d'usines (nucléaire, hydraulique,...).
- Le dessalement offre des rejets très limités.
- Moindre consommation de produits chimiques
- Faible production de boues

II.3.2 Les inconvénients :

Le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau douce. Toutefois, quel que soit le procédé utilisé, il n'est pas sans inconvénients :

- Coût énergétique élevé.
- Rejet des saumures concentrées au double de la salinité naturelle en mer ou injectées dans le sol.
- Rejet d'eaux chaudes en mer dans le cas de la distillation.
- Emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes (chlore).
- Traces de cuivre échappées des installations.
- Aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements.

Conclusion :

Parmi les procédés de dessalement, l'osmose inverse est une technologie prometteuse et dont les performances ont été prouvées. En effet, elle constitue en plus de la distillation les procédés les plus commercialisés sur le marché mondial du dessalement.

Même si ce nouveau marché ouvre des perspectives d'avenir il présente actuellement encore de nombreuses contraintes. Le dessalement de l'eau de mer reste d'abord une technique très coûteuse.

Conclusion générale :

Toutes les techniques de dessalement sont très intéressantes au vu de leurs performances et de leur rentabilité, notamment grâce aux innovations techniques des 10 dernières années qui ont déclenché une baisse de coûts de dessalement significative et une augmentation globale de la puissance des usines à dessalement. Rendre potable ces millions de km³ d'eau de mer a toujours été une perspective plaisante pour l'Homme et grâce à toutes ces nouvelles techniques procédés cela nous est désormais rendu possible tout en étant rentable.

Malgré cela, on redoute maintenant que ces usines à dessalement nuisent trop gravement à l'Environnement. En effet le rapport du WWF (World Wildlife Fund, le Fonds Mondial pour la vie sauvage) parle de conséquences irréversibles pour l'Environnement et la vie marine. A nous maintenant d'utiliser le dessalement avec prudence et discernement, mais seulement là où le dessalement est établi comme pouvant répondre à un besoin réel en eau tout en restant rentable et en atténuant les risques pour l'Environnement.

Pour déterminer cela, le dessalement devra être envisagé au cas par cas, et seulement après qu'il se soit avéré comme la solution la plus efficace et la moins nuisible à l'Environnement pour palier à un manque d'eau.

Le dessalement est une technologie d'avenir c'est vrai, mais plutôt en cas de dernier recours et quand aucune autre solution n'est possible. Les gouvernements devraient donc éviter de se détourner de solutions de rechange moins coûteux et moins agressif comme l'économie d'eau et recyclage des eaux usées.

Bibliographie

Ouvrage :

- [1] Louis Schriver-Mazzuoli, 2012. La Gestion Durable de l'eau, Paris, DUNOD, 233p
- [2] Maurel.A, 2006. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Paris, Tec et Doc. 286p.
- [3] P. Danis. Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, J 2700. Juin 2003.

Sites Internet :

- * WIKIPEDIA L'encyclopédie libre, Dessalement
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Dessalement>
- * SLATE.FR, UN NOUVEAU PROCÉDÉ POUR DESSALER L'EAU DE MER AVEC UNE PUCE ÉLECTRONIQUE
<http://www.slate.fr/life/74603/dessaler-eau-de-mer-puce-electronique>
- * BEI ERE "Bureau d'Etudes Industrielles Énergies Renouvelables et Environnement", Le dessalement
<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe2/node/75>
- * ADE "Algérienne des eaux", Dessalement
<http://www.ade.dz/Dessalement/dessal.php>
- * SKYSCRAPERCITY.COM, Algerian Water Desalination Plants
<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?s=01d3421a9552ce3482a460b137b92400&t=1295765>
- * Le manque d'eau douce sur terre
<http://artimain-tpe-desalinisation.e-monsite.com/pages/introduction/>
- * Portail Algérien des ENERGIES RENOUVELABLES, Le dessalement en Algérie
<http://portail.cder.dz/spip.php?article2439>

* GRALON, Le dessalement de l'eau de mer : techniques et enjeux

<http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiel-agricole/article-le-dessalement-de-l-eau-de-mer---techniques-et-enjeux-1261.htm>

* Informations sur l'eau dans le monde

<http://infos-eau.blogspot.com/2008/09/quelques-prcisions-sur-le-dessalement.html>

* CNRS, le dessalement de l'eau de mer

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/potable/dessalEau.html>

* SAeeeD Blog, De l'osmose inverse à l'eau pure

<http://www.blog.saeed.com/2011/02/de-l%E2%80%99osmose-inverse-a-l%E2%80%99eau-pure/>

* Mémoire online, Influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse

http://www.memoireonline.com/11/13/7958/m_Influence-des-parametres-operatoires-sur-les-performances-d-un-systeme-de-dessalement-par-osmose2.html

* Le dessalement de l'eau de mer en Espagne

<http://tpebdmw.e-monsite.com/pages/plan-du-site/>

* L'ELECTRODIALYSE

http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich9_2.htm