

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire de BIOGEP

Mémoire de master en génie de l'environnement

Thème

Dessalement de l'eau de mer

Présenté par AMMOUR Ismail

Soutenu le 27/09/2017

Composition du Jury

N.MAMERI	Professeur (ENP)	Président
H.GRIB	Professeur (ENP)	Promoteur
M.DROUCHE	Professeur (ENP)	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire de BIOGEP

Mémoire de master en génie de l'environnement

Thème

Dessalement de l'eau de mer

Présenté par AMMOUR Ismail

Soutenu le 27/09/2017

Composition du Jury

N.MAMERI	Professeur (ENP)	Président
H.GRIB	Professeur (ENP)	Promoteur
M.DROUCHE	Professeur (ENP)	Examineur

DEDICACES

*A mes chers parents
A mes sœurs bien aimées Houaria, Sara et
Shahra*

*A mon oncle Bennis
A ma famille
A mes cousins*

Remerciements

Ce travail est une recherche bibliographique pour l'obtention du mémoire de master au département de Génie de l'environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) sous la direction du monsieur H.GRIB professeur à l'ENP.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance et mes chaleureux remerciements les plus sincères à monsieur Hocine GRIB pour les conseils avisés qu'il m'a prodigué toute au long de cette étude, pour l'aide que j'ai trouvé auprès de lui, le sérieux et la patience dont il a fait preuve à mon égard.

J'exprime mes plus vifs remerciements et ma reconnaissance à monsieur Nabil MAMERI professeur à l'ENP de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à monsieur Madani DROUCHE professeur à l'ENP pour avoir accepté d'examiner et de juger le travail.

Je remercie également tous les enseignants de la spécialité Génie d'Environnement pour avoir contribué à ma formation.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis en particulier Othmane LAREDJ qui fut un soutien infaillible dans les moments difficiles, ma grande sœur. Mes remerciements vont enfin à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

ملخص

منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، ازدادت أنشطة تحلية المياه على الصعيد العالمي زيادة كبيرة بسبب زيادة الطلب على المياه العذبة وتحسين التكنولوجيا والصلاحية الاقتصادية. وقد تطورت التقنيات أيضا، كما هو الحال مع معرفة الآثار المحتملة على البيئة، ولا سيما على البيئة البحرية.

الكلمات المفتاحية: التحلية، المياه، الطرق، البيئة

Abstract

Since the early 2000s, desalination activities at the global level have grown exponentially due to increased demand for fresh water and improved technology and economic viability. Techniques have also evolved, as has knowledge of the possible impacts on the environment, particularly on the marine environment.

Keywords: desalination, water, process, environment

Résumé

Depuis le début des années 2000 les activités de dessalement au niveau mondial ont cru de manière exponentielle en raison d'une hausse de la demande d'eau douce et de l'amélioration des techniques et de la viabilité économique. Les techniques ont évolué également, de même que la connaissance des impacts éventuels sur l'environnement, en particulier sur le milieu marin.

Mots clés : dessalement, eau, procédé, environnement

Table des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE	8
CHAPITRE 1 : DESSALEMENT	9
1.1 Répartition de l'eau dans le monde et nécessité du dessalement de l'eau de mer	10
1.2 Techniques de base et exposé succinct des méthodes de dessalement actuelles.....	12
1.2.1 Procédés thermiques	12
1.2.2 Procédés à membranes.....	15
1.2.3 Autres procédés	17
1.3 Options visant à économiser de l'énergie.....	18
CHAPITRE 2 : SITUATION ET TENDANCES DU DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LE MONDE	20
2.1 Introduction	21
2.2 Capacité d'eau douce produit par dessalement	21
2.3 L'implantation des usines de dessalement dans le monde	22
2.4 Situation actuelle en matière de dessalement en méditerranée	23
2.5 État des lieux du dessalement de l'eau de mer en Algérie	24
2.6 Conclusion	26
CHAPITRE 3 : INCONVENIENTS LIES AU DESSALEMENT DE L'EAU	27
3.1 Le coût énergétique	28
3.2 L'impact sur l'environnement	29
3.2.1 Émissions atmosphériques.....	29
3.2.2 Rejets chimiques	29
3.2.3 La saumure concentrée.....	29
3.2.4 Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI	30
3.3 L'investissement élevé	30
CONCLUSION GENERALE	31
REFERENCES	32

Liste des Figures

Figure 1.1 : Disponibilité mondiale en eau douce : Moyenne des eaux de surface et des recharges d'eaux souterraines.....	10
Figure 1.2 : Schéma d'une usine multi-flash.....	13
Figure 1.3 : Schéma d'une usine multi-effets à tuyaux horizontaux.....	14
Figure 1.4 : Schéma d'une unité de compression de vapeur mécanique.....	15
Figure 1.5 : Mouvement des ions dans le processus d'électrodialyse.....	16
Figure 1.6 : Schéma de fonctionnement type – Usine de dessalement OI	17
Figure 1.7 : L'échangeur de pression.....	19
Figure 2.1 : Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde (2013).....	22
Figure 2.2 : Usines de dessalement sur le pourtour méditerranéen	23
Figure 2.3 : Progression de la capacité de dessalement installée dans les pays du pourtour méditerranéen.....	24
Figure 2.4 : Progression de la capacité de dessalement installée dans quatre pays méditerranéens qui représentent ensemble plus de 65 % de la capacité totale.....	24
Figure 3.1 : Répartition des couts pour une usine de dessalement par osmose inverse.....	28

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Composition standard de l'eau de mer.....	11
Tableau 1.2 : Comparison between seawater and river water.....	11
Tableau 2.1 : Les grandes stations en Algérie	26
Tableau 3.1 : coût d'investissement d'une installation de dessalement d'eau	30

INTRODUCTION GENERALE

La nécessité de dessaler l'eau de mer se fait de plus en plus pressante dans de nombreuses parties du monde. Au cours des années 1950 – 1990, la consommation mondiale d'eau a triplé, tandis que la population de la planète augmentait de 2,3 milliards d'habitants.

Sur les 35 millions de km³ d'eau douce disponibles sur Terre : 24,1 millions soit 69% le sont sous forme de glaciers et de couvertures neigeuses permanentes, 10,8 millions de km³ soit 30,9% sous forme de nappes souterraines et seulement 0,1 millions de km³ (moins de 1% !) sous formes de lacs, cours d'eaux et réservoirs de stockage facilement accessibles à l'homme pour son utilisation directe.

De plus, cette eau douce est très inégalement répartie dans le monde. C'est ainsi que certaines régions comme le Canada, le Chili disposent de ressources en eau douce dépassant les 50.000 m³ par personne et par an, alors que d'autres, comme les pays du Maghreb, du Golfe ou d'Asie Centrale souffrent de pénuries s'aggravant d'année en année avec des disponibilités en eau inférieures à 1000 m³ par personne et par an.

On dit qu'une région est en situation de stress hydrique lorsque ses ressources naturelles en eau sont inférieures à 1700 m³ par personne et par an. Lorsque ces ressources sont inférieures à 1000 m³ par personne et par an, on parle de pénurie d'eau. L'OMS considère en effet qu'en deçà de 1000m³/pers/an, la pénurie chronique d'eau entrave le développement et est préjudiciable à la santé humaine.

Les besoins en eau douce, notamment en eau potable, vont en augmentant. Les pays arides se trouvent déjà dans une situation de rareté, avec risque d'aggravation vers la pénurie. L'augmentation des besoins est liée à la croissance démographique, mais aussi au développement économique (industrie), et très largement dominée par le domaine agricole (irrigation). La consommation domestique est d'ailleurs relativement minime par rapport à la consommation globale d'eau. Un développement de nouvelles ressources alternatives dites « non conventionnelles » comme la réutilisation des eaux usées et le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres répondent aux besoins en eau douce. En effet, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue l'une des réponses possibles pour faire face aux crises et pénuries d'eau.

Le dessalement est depuis longtemps une source d'eau importante dans certaines parties de la méditerranée. Les usines de dessalement se trouvent dans les régions ayant un climat chaud, une pluviométrie relativement faible et imprévisible et où les ressources en eau ne peuvent répondre aux demandes de pointe de la période touristique.

Le dessalement de l'eau de mer est une industrie en essor constant. Cette forme de ressource en eau pratiquement illimitée consomme de l'énergie et elle a des impacts sur l'environnement. Ces impacts proviennent principalement du concentré (saumure) produit au cours du dessalement, mais aussi des rejets de produits chimiques utilisés dans les procédés de dessalement.

CHAPITRE 1 :

TRAITEMENT DE L'EAU DE MER

1.1 Répartition de l'eau dans le monde et nécessité du dessalement de l'eau de mer

La terre est recouverte de 72% d'eau, on trouve seulement 3% d'eau douce. Cette eau est inégalement répartie sur la planète : 10 pays se partagent 60% des réserves d'eau douce alors que 29 pays subissent de nombreuses sécheresses.

On constate sur le planisphère (figure 1.1) que l'Afrique, l'Inde et l'Asie mineure sont très touchées par le manque d'eau. Cela est dû au climat aride de l'Afrique, mais également à l'insuffisance des nappes souterraines, par rapport à la demande pour l'agriculture et pour la consommation. Ce manque en Afrique peut aussi être expliqué par des installations souvent trop peu nombreuses, liées à la pauvreté de ce continent [1].

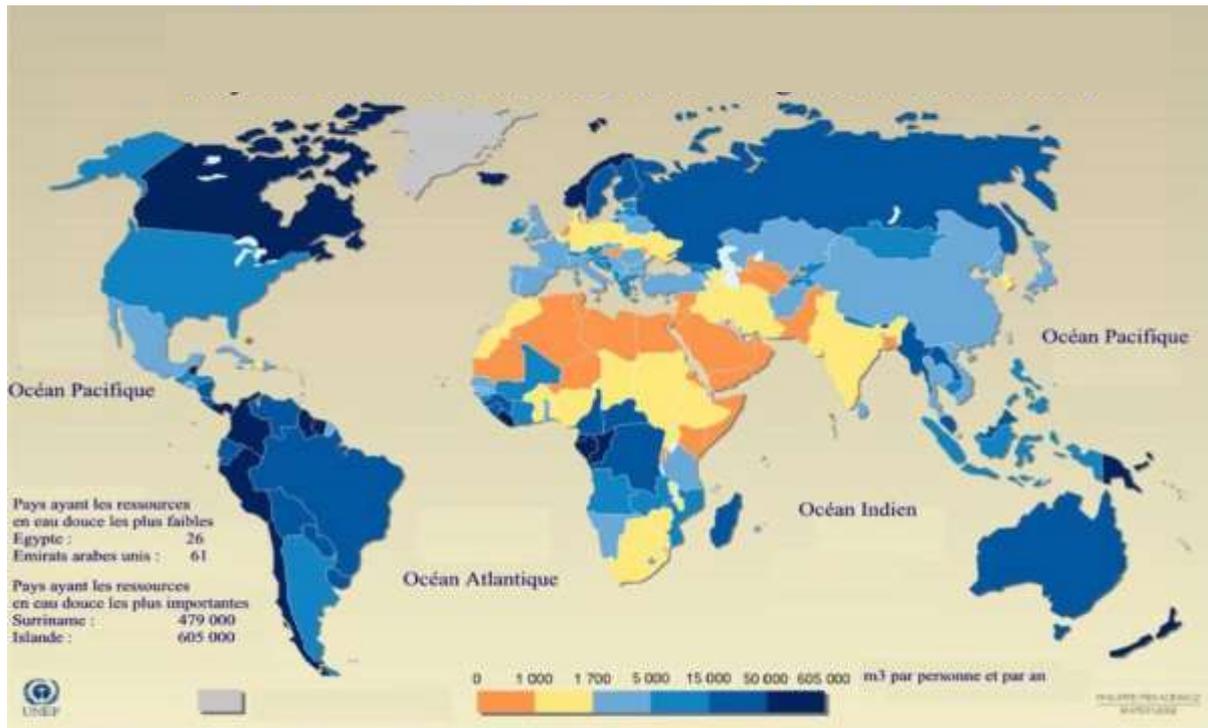


Figure 1.1 : Disponibilité mondiale en eau douce : Moyenne des eaux de surface et des recharges d'eaux souterraines [2]

Bien qu'apparemment inépuisable, l'eau est très inégalement répartie dans le monde. Au vu du développement industriel et de la demande de plus en plus croissante, tous les pays auront, plus ou moins brève échéance, à faire face au problème de son manque. La mobilisation des eaux superficielles a été de tous temps une préoccupation pour l'homme. Sans l'eau, la terre ne serait qu'un astre mort, et aucune vie humaine, biologique, ou animale, n'existerait.

Devant les besoins croissants en eau douce, et l'impossibilité de se contenter des ressources naturelles, l'humanité est conduite à étudier et à développer divers procédés permettant de l'obtenir à partir des eaux de mers, des eaux saumâtres, et des eaux usées dans des conditions admissibles techniquement et économiquement [3].

En résumé, les besoins en eau présents et futurs ne peuvent être couverts et satisfaits que si des ressources non conventionnelles (recyclage et dessalement de l'eau) sont utilisées.

La référence de la salinité moyenne de l'eau de mer est 35 000 ppm. La composition typique de l'eau de mer est donnée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : 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 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

Les principaux composants chimiques présents dans l'eau de mer sont essentiellement le sodium (30%) et le chlorure (55%), c'est-à-dire les composants du sel de table commun, qui représentent 85% de la teneur totale en solides dissous d'eau de mer. Sulfate et magnésium sont également abondantes, avec un pourcentage de près de 8 et 4%, respectivement. Il convient de noter que bien que la salinité de l'eau de mer puisse varier selon la région spécifique du monde, la composition en pourcentage de l'eau de mer est essentiellement constante dans le monde (c'est-à-dire que les proportions des principaux constituants sont constantes)[4].

La composition de l'eau de mer, décrite ci-dessus, est très différente de celle d'une eau de rivière typique, montrée dans le tableau 1.2

Tableau 1.2: 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 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 ³⁻	1.1	-

La comparaison avec l'eau de mer souligne que la teneur en chlorure de sodium dans l'eau des rivières est bien inférieure, représentant moins de 16%; Inversement, le contenu en calcium et

en bicarbonate est beaucoup plus élevé (soit environ 17 et 32%, respectivement) représentant près de 50% des solides dissous totaux. La silice est un autre constituant majeur de l'eau de la rivière, mais elle est négligeable dans l'eau de mer[4].

1.2 Techniques de base et exposé succinct des méthodes de dessalement actuelles

Pour améliorer la disponibilité de l'eau, de nouvelles méthodes d'épuration et des ressources en eau accrues sont nécessaires de toute urgence. Le dessalement de l'eau est une façon de fournir de l'eau potable. Les procédés thermiques et le dessalement par membrane sont les méthodes les plus courantes de dessalement moderne. Les processus thermiques, tels que le flash multi-étages, la distillation à effet multiple, la compression de la vapeur et l'humidification/déshumidification, suivent généralement le concept d'évaporation et de condensation de l'eau. Les technologies de dessalement des membranes, telles que l'osmose inverse (OI), l'osmose vers l'avant, l'électrodialyse (ED) et les procédés à base de nanotechnologie, utilisent des membranes comme barrières de rejet de sel pour dessaler de l'eau. La technologie des membranes est avantageuse par rapport aux processus thermiques en raison d'une consommation d'énergie relativement faible[5].

1.2.1 Procédés thermiques

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée, avec production de vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour former de l'eau douce. Dans l'usine, l'eau est chauffée jusqu'à ébullition pour produire la quantité maximale de vapeur. Pour que le procédé soit économiquement rentable, la pression appliquée sur l'eau à bouillir est ajustée pour maîtriser le point d'ébullition.

A) Distillation par détente à étages multiples (Distillation «Multi stages Flash» ou MSF)

Dans le procédé MSF, l'eau de mer est chauffée (80°C à 120°C) sous une pression ($P_0 \approx 2\text{bars}$) dans une chaudière. Cela est généralement fait en condensant la vapeur sur un faisceau de tuyaux véhiculant de l'eau de mer qui passe à travers la chaudière. Cette eau de mer chauffée coule alors dans une autre cuve correspondant à un autre étage où la pression ambiante est plus basse, si bien que l'eau commence aussitôt à bouillir. L'introduction soudaine de l'eau chauffée à chaque étage déclenche une détente et son évaporation instantanée («flash»). La saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à une pression basse. Vu la température élevée dans les premières cellules, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement important pour limiter l'entartrage due aux métaux lourdes. Afin de diminuer le volume d'eau salée à prétraiter, on recycle la saumure au maximum au lieu de l'évacuer. La consommation d'énergie thermique est de 50 à 70 000 kcal/m³, à laquelle se rajoute l'électricité pour la recirculation de l'ordre de 5 kWh/m³ [6]. En général, seule une petite fraction de cette eau est convertie en vapeur, en fonction de la pression maintenue à l'étage, étant donné que l'ébullition continuera jusqu'à ce que l'eau retombe au point d'ébullition.

Le concept de distillation de l'eau dans des étages successifs dont chacun est maintenu à la pression inférieure à la pression saturante correspondant à la température de l'eau dans l'étage n'est pas nouveau et est appliqué depuis plus d'un siècle. Dans les années 1950, une unité MSF

qui comportait des étages en série maintenus à des pressions de plus en plus basses a été mise en place.

Dans cette unité, l'eau d'alimentation circule d'un étage à l'autre et est portée à ébullition à plusieurs reprises sans que l'on augmente la chaleur. Habituellement, une usine MSF comporte 15 à 25 étages. La figure 1.2 illustre le schéma d'une usine de type MSF[7].

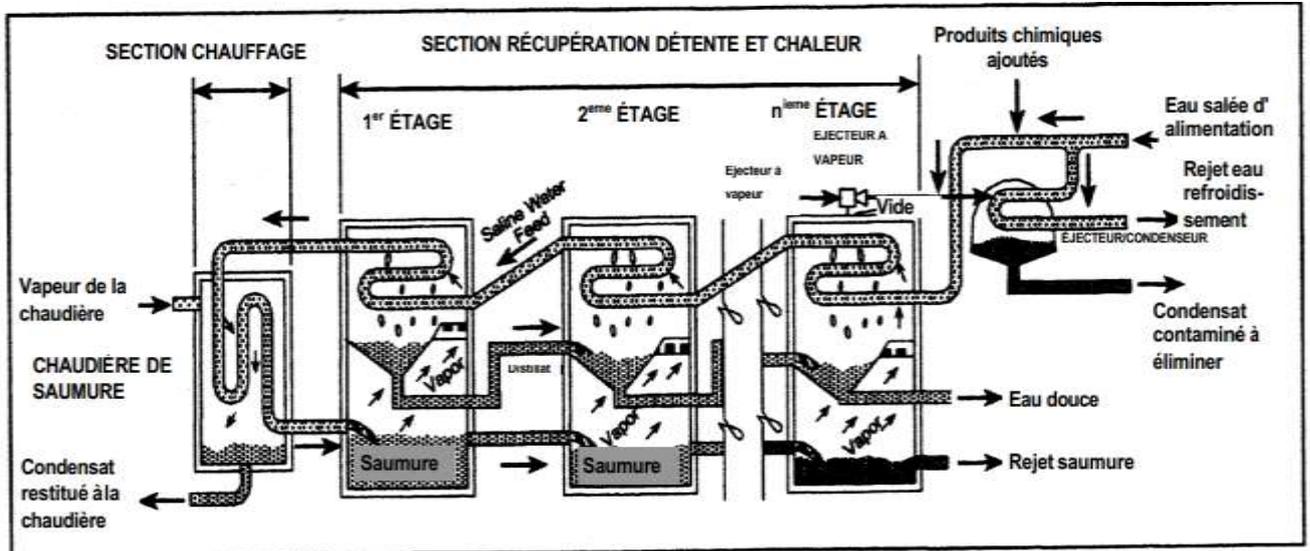


Figure 1.2 : Schéma d'une usine multi-flash[7]

B) Distillation à effets multiples (Distillation «Multi-Effect» ou ME)

Dans des évaporateurs à effets multiples (ME), la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second, et la chaleur de sa condensation sert à faire bouillir l'eau salée dans celui-ci. Par conséquent, le second évaporateur agit comme un condenseur de la vapeur provenant du premier, et l'action de cette vapeur dans le second évaporateur est identique à celle de la vapeur de chauffage dans le premier. De même, le troisième évaporateur agit comme condenseur pour le second, et ainsi de suite[8]. Ce principe est illustré sur la figure 1.3. Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un «effet». Comme le procédé MSF, le ME n'utilise quasiment que de l'énergie thermique, s'y ajoute seulement 1 à 3 kWh/m³ d'énergie électrique[6].

Certaines des premières usines de distillation d'eau utilisaient le procédé ME, mais les unités MSF, en raison de leur meilleure résistance à l'entartrage, ont remplacé ce procédé. Cependant, à partir des années 1980, le procédé ME a connu un regain de faveur où il a été mis en place des installations de conception nouvelle introduisant une exploitation à des températures plus basses, ce qui a permis de réduire au minimum la corrosion et l'entartrage[8].

Le procédé ME, économique en énergie, a en outre l'avantage d'une relative souplesse de fonctionnement avec un débit de saumure plus faible, un rendement correct, et une sécurité

accrue du point de vue salinité de l'eau. En revanche les capacités unitaires en fonctionnement varient de 20 m³/j à 20000 m³/j, ce qui est plus faible qu'en MSF[6].

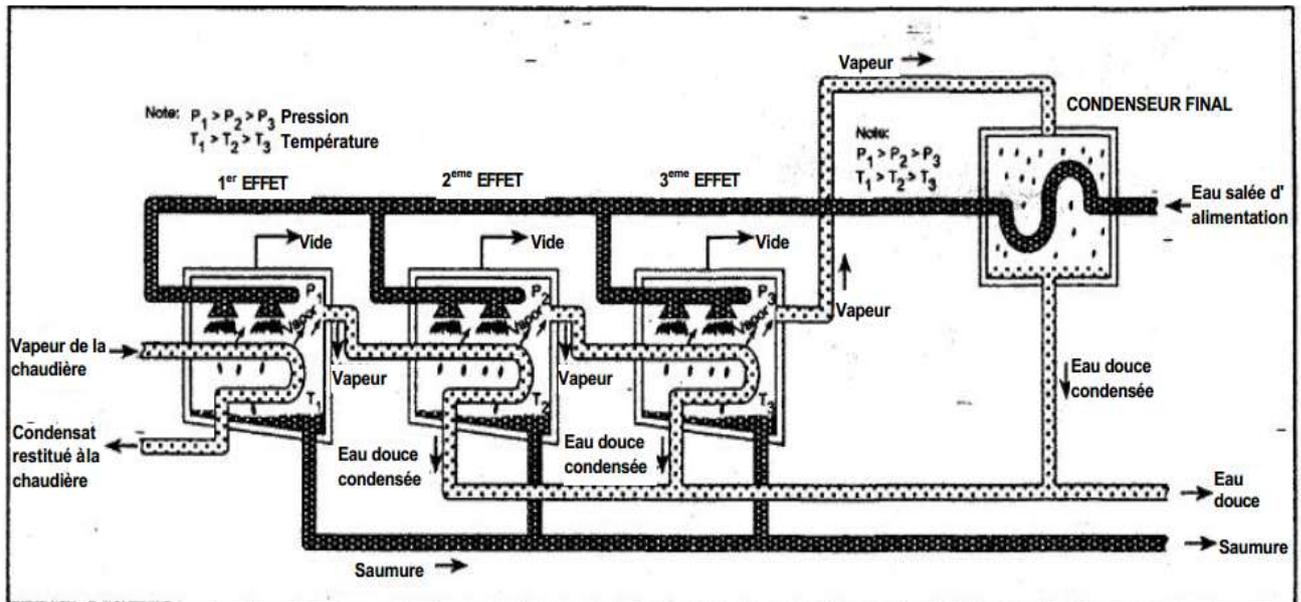


Figure 1.3 : Schéma d'une usine multi-effets à tuyaux horizontaux[8]

C) Distillation par compression de vapeur («Vapor Compression» ou VC)

Le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) est utilisé pour des installations de dessalement de petite ou moyenne capacité. Le procédé par compression de vapeur diffère des autres procédés de distillation en ce qu'il n'utilise pas de source de chaleur extérieure mais la compression de la vapeur d'eau (au moyen, par exemple, d'un compresseur pour accroître la pression de la vapeur et la température de condensation)[8].

Dans la figure 1.4 Bouros illustre une méthode simplifiée dans laquelle un compresseur mécanique sert à produire de la chaleur pour l'évaporation. Toute la vapeur est entraînée par un compresseur mécanique et introduite comme vapeur de chauffage dans le premier effet après compression où elle condense sur le côté froid de la surface caloporteuse et est distribuée sur l'autre côté où elle bout et s'évapore en partie, produisant davantage de vapeur. Les unités VC sont souvent utilisées pour les stations de villégiature, les zones industrielles et de forage ne pouvant avoir un accès facile à de l'eau douce. Leur simplicité et facilité d'exploitation se prêtent bien à de petites installations[7]. C'est un procédé de distillation peu consommateur d'énergie dans l'absolu, puisqu'il fonctionne avec seulement 4.5 kwh/m³ mais qui utilise exclusivement de l'électricité[6].

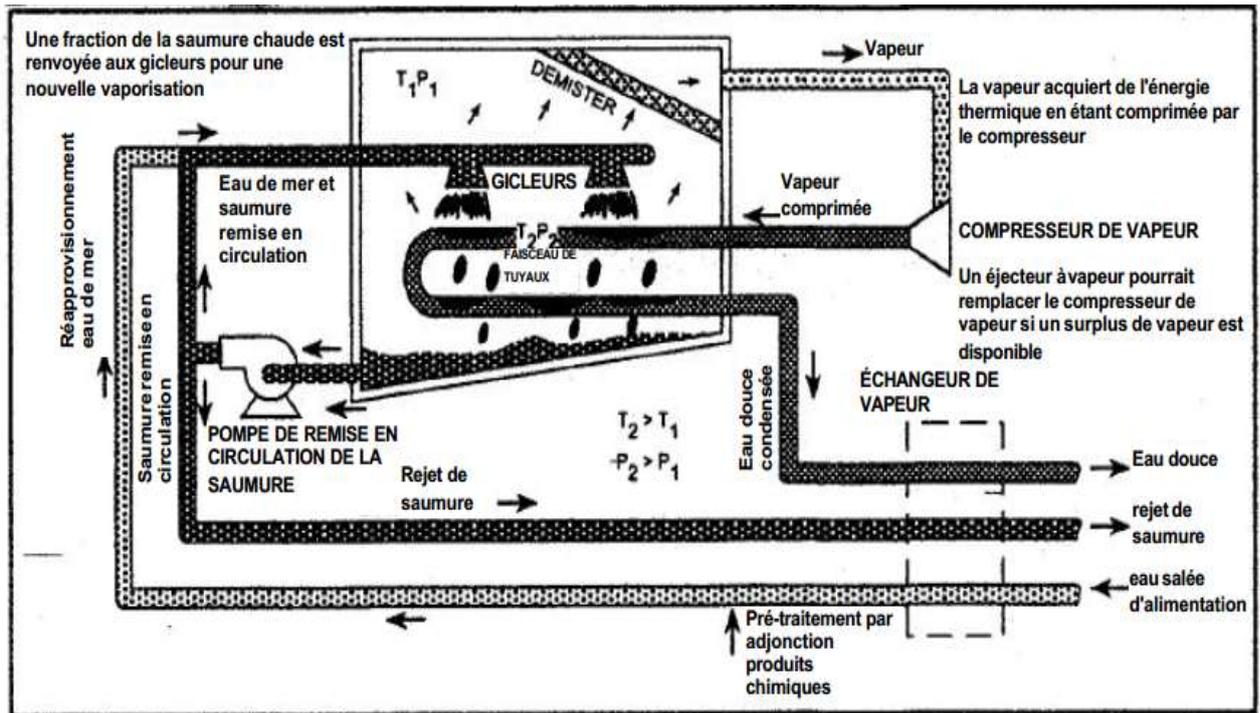


Figure 1.4 : Schéma d'une unité de compression de vapeur[8]

1.2.2 Procédés à membranes

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

A) Électrodialyse (ED)

L'ED est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce.

L'ED a été introduit sur le marché au début des années 1960. L'unité ED de base se compose de plusieurs centaines de cellules reliées entre elles par des électrodes à un bloc 'extérieur qui constitue la pile. L'eau d'alimentation passe simultanément à travers toutes les cellules en fournissant un courant continu d'eau dessalée et de saumure concentrée qui dépend de la conception du système. Des produits chimiques peuvent être ajoutés au circuit pour réduire le pouvoir d'entartrage[8]. Les composants d'une unité d'électrodialyse sont présentés sur le schéma de la figure 1.5.

L'électrodialyse n'est pas pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales[8].

L'ED n'est pas utilisable pour les eaux de forte concentration supérieur à 18g/l, par conséquence il est valable pour le dessalement des eaux saumâtres mais pas pour des eaux de mer.

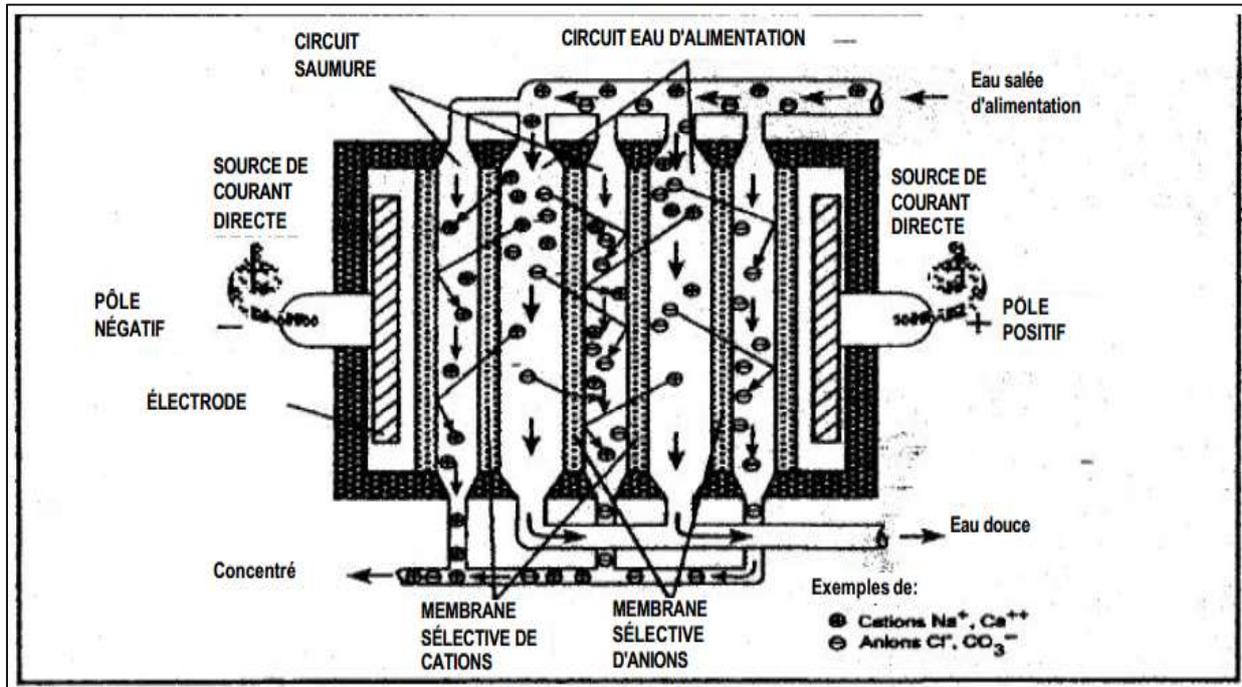


Figure 1.5 : Mouvement des ions dans le processus d'électrodialyse[8]

B) Osmose inverse (OI)

L'Osmose Inverse est un procédé haute pression, utilisé pour l'élimination de l'eau par concentration de composés à faible poids moléculaire. L'Osmose Inverse peut utiliser pour dessaler les eaux de mer ou les eaux saumâtres, il peut aussi être utilisé pour le traitement des eaux usées. Ce procédé est couramment utilisé pour la pré-concentration des produits laitiers ou alimentaires avant l'évaporation, le traitement des condensats des évaporateurs et la purification des eaux de process[9].

L'OI consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparée par une membrane semi-perméable. Normalement l'eau pure (la moins concentrée) migre vers la solution concentrée appelée saumure. Mais si on exerce une pression sur l'eau salée, le processus est inversé, elle est alors appelée osmose inverse. Ainsi, la solution la plus concentrée passe vers le milieu de la solution diluée par l'action d'une pression supérieure à la pression osmotique. Cette membrane filtre tous les éléments indésirables que peut contenir l'eau. Après l'osmose inverse, on obtient une eau très pure possédant des mesures bioélectroniques parfaites pour la santé comme les eaux provenant des sources les plus naturelles. Néanmoins, il nécessite un pré-traitement poussé et coûteux afin d'éliminer le sable et les colloïdes en suspension dans l'eau susceptibles de "boucher" la membrane[6]. La fonction de la membrane OI est illustrée à la figure 1.6 [8].

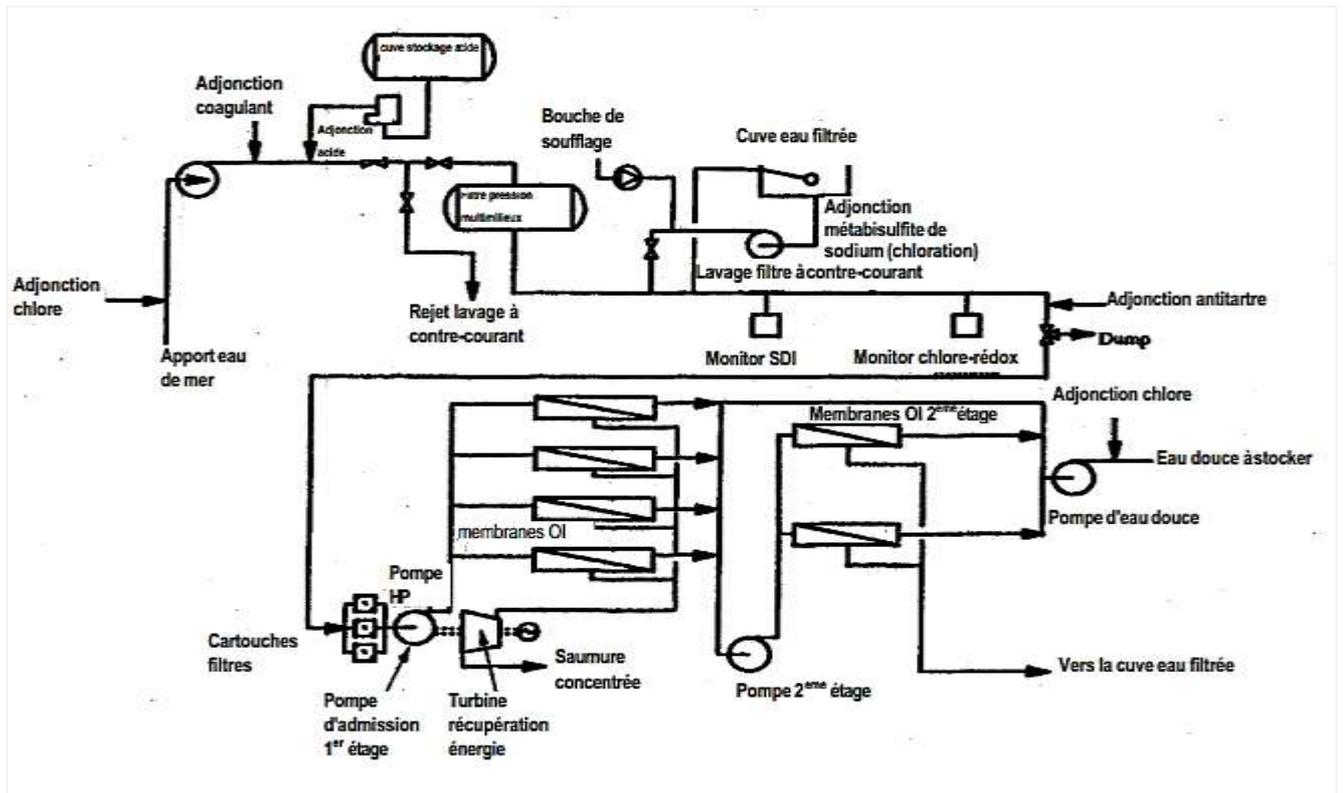


Figure 1.6 : Schéma de fonctionnement type – Usine de dessalement OI [8]

1.2.3 Autres procédés

Un certain nombre d'autres procédés ont été utilisés pour dessaler les eaux saumâtres ou marines. Ces procédés n'ont pas permis d'obtenir le rendement de la distillation ou de l'osmose inverse, mais ils se sont avérés valables dans certaines circonstances ou appellent encore des perfectionnements.

A) Congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce. 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[10].

Il existe plusieurs procédés de congélation pour dessaler l'eau de mer, et un petit nombre d'usines ont été installées[8].

B) Distillation sur membrane

Comme son nom l'indique, le procédé consiste en l'association de distillation et de membranes. Au cours du processus, l'eau salée est chauffée pour augmenter la production de vapeur et cette vapeur est exposée à une membrane qui laisse passer la vapeur d'eau mais non l'eau sous forme liquide. Une fois que la vapeur a traversé la membrane, elle est condensée sur une paroi froide pour produire de l'eau douce[8].

C) Humidification solaire

Les diverses variantes de distillation par l'énergie solaire cherchent à reproduire le cycle hydrologique naturel. Les rayons du soleil chauffent la saumure et une partie de l'eau évaporée est condensée sur une surface froide et le condensât collecté comme eau potable produite. Ainsi, dans le bassin de type serre l'eau saline est au fond et la vapeur est condensée sur le toit en verre, légèrement incliné. Plusieurs variantes de ce schéma très simple sont actuellement à l'étude pour augmenter son efficacité. Elles souffrent toutes des problèmes suivants empêchant leur industrialisation : nécessité d'une très grande surface de collectage à raison d' 1 m^2 pour 4 litres d'eau produite par jour, coût d'investissement très élevé, vulnérabilité aux changements météorologiques et coût de maintenance élevé [11].

D) Séparation par formation d'hydrates

Ce procédé utilise le fait que les hydrocarbures de faible poids moléculaire, tels le propane, peuvent se combiner avec de l'eau pour former des hydrates qui cristallisent à basse température et se décomposent facilement. Dans la cellule de formation des hydrates, les cristaux sont séparés de l'eau de mer, lavés puis décomposés en eau douce et propane. Le propane peut alors être compressé et détendu dans la cellule pour refroidir l'hydrate etc [11].

E) Echange d'ions

Certaines résines, insolubles, ont la propriété d'échanger certains de leurs ions avec ceux des sels dissous dans la solution (l'eau de mer) avec laquelle on met ces résines en contact. On utilise les résines anioniques pour échanger les anions de la solution par des ions OH^- et les résines cationiques qui permettent de remplacer les cations (Na^+) par des ions H^+ . Ce procédé est plutôt utile pour déminéraliser l'eau de faible teneur en sel [11].

1.3 options visant à économiser de l'énergie

Deux champs de recherche apparaissent prometteurs pour l'avenir : les centrales hybrides d'une part et la récupération de l'énergie de la saumure rejetée par les usines de dessalement d'autre part. Les centrales hybrides, associant production d'électricité et dessalement, et les nouvelles récupérations d'énergie, sont un grand champ de progrès pour l'avenir. En effet, l'association performante d'une centrale thermoélectrique et d'une unité de dessalement par osmose inverse installées sur un même site en bord de mer, permet d'économiser beaucoup d'énergie. Pour cela, on utilise le flux de l'eau de mer de réfrigération du condenseur comme matière première d'eau réchauffée à dessaler, ce qui constitue une source de pression et de chaleur pour le dessalement, avec partage des infrastructures de prise d'eau et de rejet en mer et réduction des coûts globaux et des dépenses en énergie. Préchauffer l'eau salée jusqu'à $44 \text{ }^\circ\text{C}$ permet de gagner en viscosité et d'augmenter la pression osmotique, ce qui représente deux facteurs de réduction des consommations d'énergie. Par ailleurs, le couplage « hybride » des deux techniques de dessalement, filière thermique et osmose inverse, optimisé selon la période et la charge, permet une économie globale (c'est le cas de l'usine de dessalement à Fujairah, aux Emirats Arabes Unis).

Trois solutions sont aujourd'hui disponibles pour récupérer l'énergie de la saumure :

- Les turbopompes intégrées, récupérant l'énergie de la saumure dans une turbine hydraulique,
- Les turbines Pelton,
- Les systèmes dits « échangeurs de pression », de troisième génération avec rendement plus élevé supérieur à 95% (dont le système ERI energy recovery).

La décision d'utiliser un système de récupération d'énergie élaboré, améliorant les performances et la consommation spécifique d'énergie par m³ d'eau douce produit, dépend des conditions économiques et particulièrement du coût de l'énergie. Ces systèmes performants mais coûteux en investissements, sont à recommander particulièrement quand l'énergie se renchérit et si l'on veut encourager la réduction des émissions de gaz à effet de serre[12].

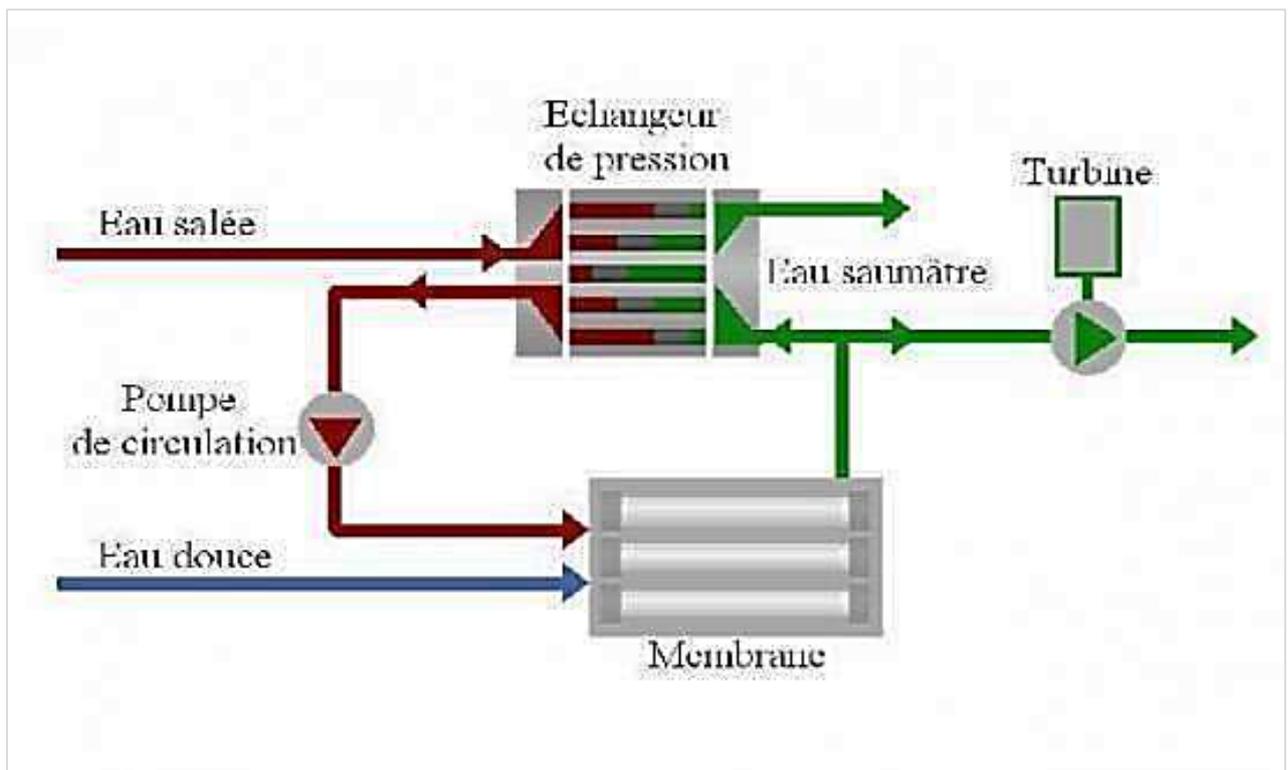


Figure 1.7 : L'échangeur de pression[13]

CHAPITRE 2 :
**SITUATION DU
DESSALEMENT DE L'EAU DE MER
DANS LE MONDE**

2.1 Introduction

La distillation de l'eau de mer est pratiquée depuis plus d'un siècle à bord des navires long-courriers et les usines de dessalement se multiplient en de nombreuses parties du monde, en particulier dans les pays riverains du golfe Arabo-Persique où la demande en eau douce est élevée et les ressources en combustibles aisément disponibles. S'il est vrai que la plupart des très grandes usines de dessalement sont situées dans la péninsule Arabique, il existe un nombre impressionnant d'usines à travers le monde, et certaines en des pays ou des sites que l'on pourrait juger peu enclins à se tourner vers une ressource en eau d'un coût relativement élevé[8].

2.2 Capacité d'eau douce produit par dessalement

Selon les nouvelles statistiques publiées par l'International Desalination Association (IDA), 2016 marque la troisième année de croissance continue pour le marché international du dessalement suite à un ralentissement au milieu des années 2000.

Le 29e inventaire mondial de dessalement, publié par GWI DesalData en association avec l'IDA, indique que les totaux de dessalement ont augmenté de 14% au milieu de 2015 au cours de la même période en 2014, ce qui montre une augmentation de l'activité après un seuil de 13 ans dans le marché du dessalement.

La période de juin 2015 à juin 2016 a enregistré une augmentation de 3,7 millions de mètres cubes par jour (m^3 / j) de la capacité de dessalement ajoutée à l'échelle mondiale, contre 3,2 millions de m^3 / j l'année précédente.

À l'échelle mondiale, la capacité cumulée installée des 18 983 usines de dessalement considérées comme étant en ligne est de 88,6 millions de m^3 / j . Ce nombre comprend les usines en construction qui devraient être achevées d'ici la fin de 2016. La capacité contractuelle globale cumulée au 30 juin 2016 a atteint 95,6 millions de m^3/j [14].

Une grande partie de cette capacité ajoutée provient d'une série de prix pour des projets d'eau de mer à grande échelle, en particulier dans la région du Golfe, alors que 2016 a marqué la troisième augmentation annuelle de la capacité d'eau de mer, de 1 million de m^3 / j de capacité supplémentaire en 2014 à 1,6 million de m^3 / j jusqu'en 2016, dépassant le total de 2015 de 200 000 m^3 / j . L'augmentation des projets de grande envergure au cours des trois dernières années a également renversé les utilitaires dans la majorité, avec près de 60% de la capacité attribuée aux utilisateurs d'équipements en 2015

Selon l'annuaire de dessalement de l'IDA de 2016 à 2017, alors que ces deux derniers marchés connaissent une industrialisation continue et un contrôle environnemental. D'autres développements mondiaux de solutions de réutilisation sont attendus car l'industrie et les municipalités saisissent pleinement les avantages des stratégies de réutilisation de l'eau[14].

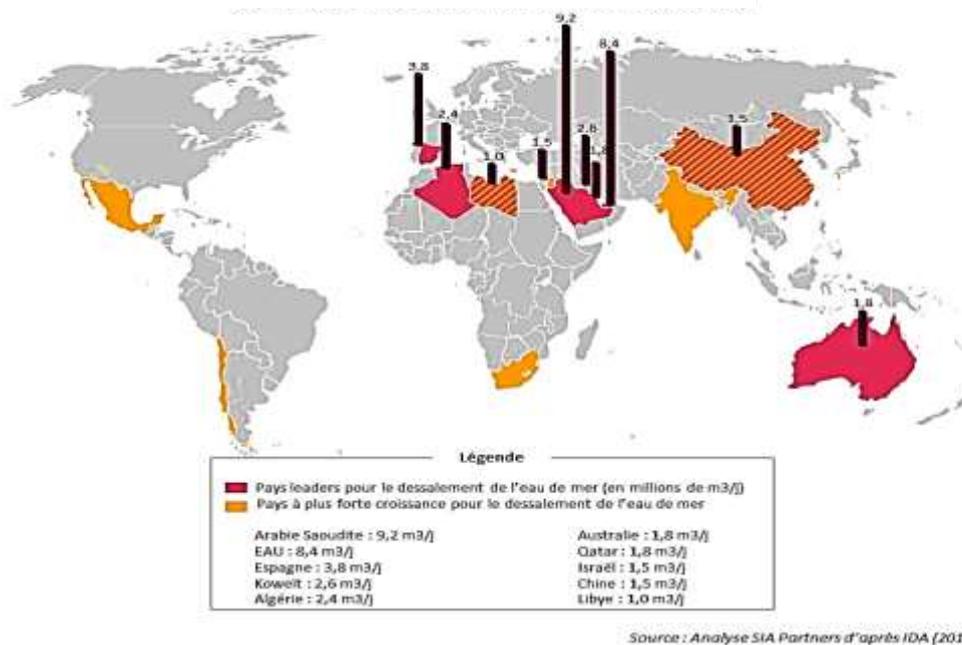


Figure 2.1 : Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde (2013)[15].

2.3 L'implantation des usines de dessalement dans le monde

En 2014, les usines de dessalement se multiplient à travers le monde. Aujourd'hui (en 2017), 150 pays à travers le monde disposent d'infrastructures permettant de transformer l'eau de mer en eau douce. Cependant, le marché du dessalement demeure extrêmement concentré dans certaines zones géographiques et quelques pays disposent de la grande majorité des capacités mondiales. En 2013, les dix pays les plus équipés en usines de dessalement de l'eau de mer cumulaient environ 40% des capacités mondiales de dessalement. Plus de 18 400 usines de dessalement qui sont opérationnelles à travers le monde[15], dont la moitié se trouve au Moyen Orient. D'ailleurs, la plus importante des usines de dessalement est Ashkelon en Israël qui produit une grosse quantité d'eau environ 320 000 m³ par jour (soit 108 millions de mètres cubes par an), c'est-à-dire que pour une population d'un million d'habitants, chaque habitant peut consommer par jour 250 litres d'eau potable. C'est la plus grande référence de dessalement par osmose inverse au monde en 2013. Dans la même région on trouve aussi principalement : l'usine de Fujairah aux Émirats Arabes Unis, L'usine de Djebel Ali (distillation), aux Emirats Arabes Unis reste la plus grande du monde avec une capacité de 900.000 m³ /jour, celle de Dubai (également distillation), en Arabie Saoudite produit 800.000 m³ /jour ; La distillation est préférée dans ces zones d'exploitation pétrolière car elle utilise du gaz qui, autrement, serait brûlé [16]; 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. Actuellement, en Californie, 200 usines de dessalement d'eau de mer sont en cours de construction. De même pour l'Australie, de nombreuses usines sont en cours d'installation, la plus grande est 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 tels que l'Algérie et le Maroc.

L'Algérie a construit la plus grande usine de dessalement par osmose inverse au monde avec une capacité de 500 000 m³ par jour et par habitant couvrant les besoins de 5 millions de personnes en eau potable. 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[17].

2.4 Situation actuelle en matière de dessalement en méditerranée

En 1970, La capacité totale de dessalement dans les pays du pourtour méditerranéen était de 0,025 Mm³ /jour. À la fin de l'année 1999, elle avait augmenté de près de 2 ordres de grandeur pour atteindre une capacité totale proche de 2 Mm³ /jour, dont 41 % produits par osmose inverse (OI) (figure 2.3). L'Espagne était le plus grand producteur d'eau dessalée, puisqu'elle produisait, principalement par OI, 33 % de la capacité totale. La Libye était le deuxième plus grand producteur, avec 30 % de la capacité totale, principalement produite par le procédé de MSF. L'Italie, Malte, l'Algérie et Chypre représentaient respectivement 18, 6, 5 et 2 % de la capacité totale (figure 2.4)[18].

En 2007, la capacité totale de dessalement en Méditerranée était de 4 Mm³ /jour (14 % de la capacité mondiale totale). L'Espagne était le principal producteur, avec 35 % de la capacité totale en Méditerranée, suivie de la Libye, avec 20 %. L'Algérie, Israël, l'Italie, Malte et Chypre représentaient respectivement 19, 10, 7, 5 et 4 % de la capacité totale[19]. Le principal procédé utilisé était l'OI.

En 2011, la capacité est passée à 11,6 Mm³ /jour dans les pays méditerranéens. Toutefois, il est possible que le dessalement dans l'Atlantique et la mer Rouge soit compris dans cette estimation. L'Espagne était le principal producteur, avec 41 % de la capacité totale en Méditerranée, suivi de l'Algérie et Israël, avec 15 % et 10 % respectivement. La Libye représentait 7 % de la production totale et l'Italie et l'Égypte 6 % chacun[18].

En 2013, la capacité de dessalement installée totale cumulée était d'environ 12 Mm³ /jour. L'Espagne était le principal producteur (31 % de la capacité totale), suivie de l'Algérie, Israël et la Libye, avec 20, 18 et 11 % respectivement. L'OI était la technique de dessalement la plus communément utilisée dans la région (environ 82 %), suivie de la technique de MSF (11 %) et de la Distillation à effets multiples, ou MED (6,5 %). De 2000 à 2013, la capacité installée a augmenté de 560 %, la plus forte hausse ayant été enregistrée entre 2005 et 2010 (figure 2.3)[18]. La figure 2.2 illustre les usines de dessalement sur le pourtour méditerranéen.

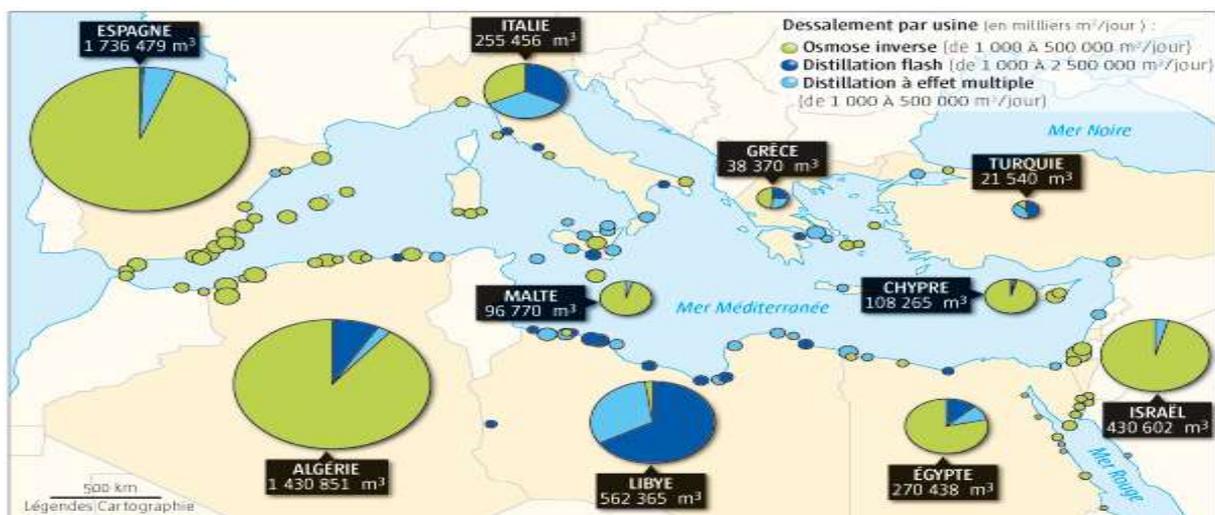


Figure 2.2 : Usines de dessalement sur le pourtour méditerranéen[16].

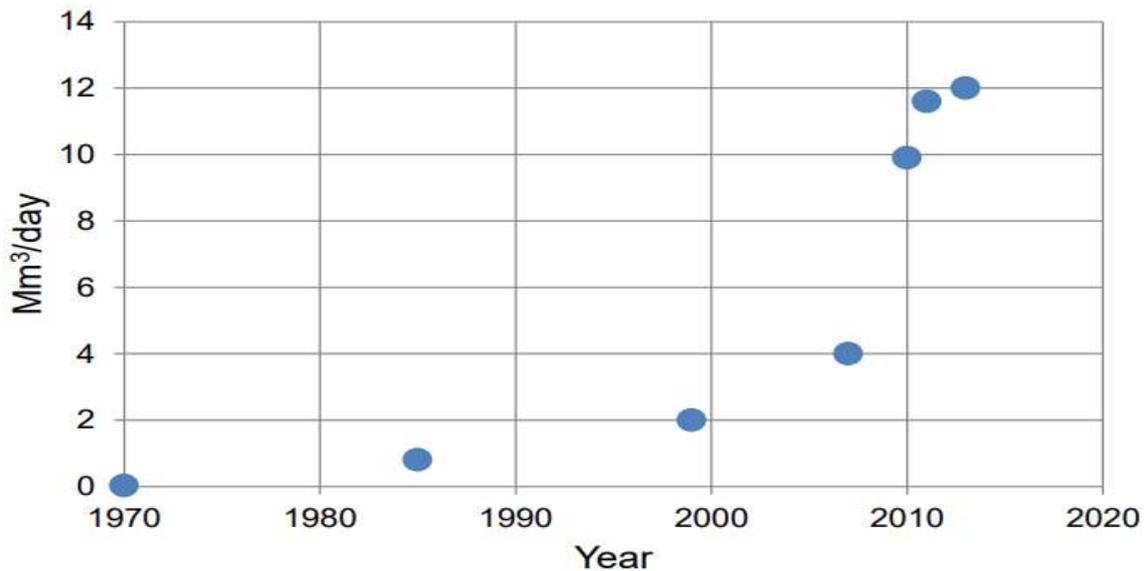


Figure 2.3 : Progression de la capacité de dessalement installée dans les pays du pourtour méditerranéen

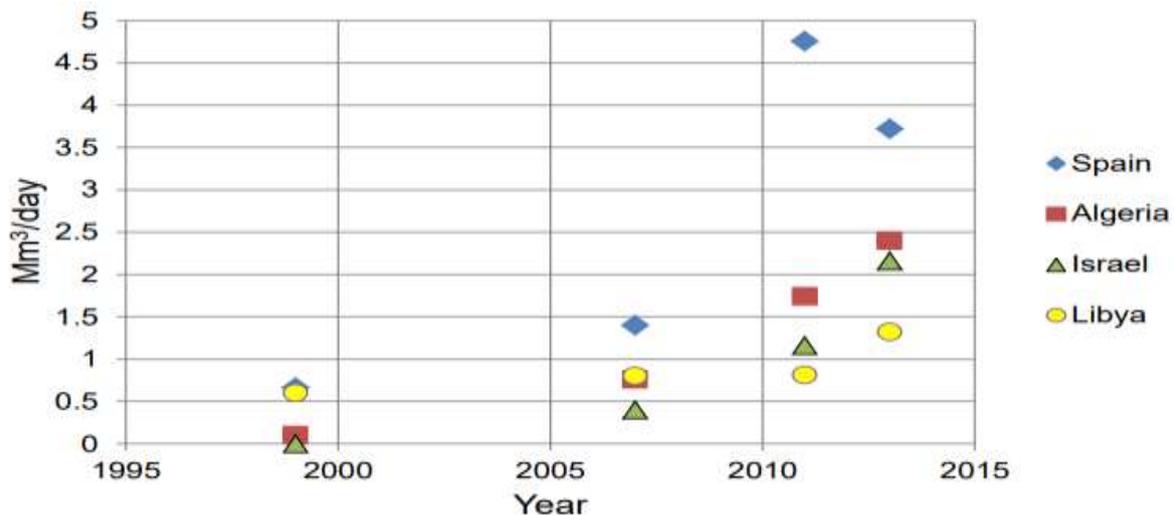


Figure 2.4 : Progression de la capacité de dessalement installée dans quatre pays méditerranéens qui représentent ensemble plus de 65 % de la capacité totale.

2.5 État des lieux du dessalement de l'eau de mer en Algérie

L'Algérie, qui dispose de 1200 km de côtes, a mis en œuvre l'alternative du dessalement d'eau de mer (trois quarts) ou d'eau saumâtre (un quart) pour alimenter en eau potable des villes et localités du littoral, et jusqu'à 60 km aux alentours. Le coût de cette technique est passé de 10 \$/m³ à 0,6-0,8 \$/ m³ d'eau entre les années 1980 et aujourd'hui. Cette réduction des coûts a rendu cette technique compétitive et les spécialistes estiment à plus de 10% par an l'augmentation de capacité installée grâce à ces usines à travers le monde. Nombre de pays méditerranéens, dont l'Espagne et l'Algérie en tête, développent cette technique[20].

Le recours aux unités de dessalement permet également de réserver une partie plus importante des eaux de barrages à l'agriculture. L'Algérie compte en 2013 neuf grandes stations de dessalement en exploitation à même de produire jusqu'à 1,4 millions de m³ d'eau dessalée par jour. La mise en exploitation de deux autres stations portera la capacité de production totale à

2,1 millions de m³/jour. En moyenne, ces stations ont une capacité de production qui se situe entre 100 000 et 200 000 m³ par jour. La station d'El-Mactaa, proche d'Oran, dont l'entrée en exploitation est prévue fin 2013 disposera d'une capacité de 500 000 m³/j., soit l'une des plus grandes unités de dessalement par osmose inverse, permettant la couverture à long terme des besoins de cinq millions de personnes en eau potable. Ces stations sont gérées par des sociétés de production pilotées par l'Algerian Energy Company (AEC), société créée par les groupes Sonatrach et Sonelgaz. En complément de ces grandes stations, on relève la présence d'une vingtaine de *stations monoblocs* de petite capacité (entre 2500 et 7000 m³/j) dont certaines ont été délocalisées pour renforcer l'alimentation en eau potable (AEP) des localités plus déficitaires[20].

Ce recours au dessalement n'est pas récent. En effet, les premières expériences de dessalement dans le pays ont été réalisées après l'indépendance pour des besoins spécifiques liés à l'industrie pétrolière et à la sidérurgie ainsi que pour la déminéralisation d'eaux souterraines présentant un taux élevé de salinité. Il faut pourtant attendre 2001 pour qu'elles prennent la décision de retenir le dessalement d'eau de mer pour l'alimentation en eau potable comme une priorité de leur stratégie économique. L'Oranie est alors identifiée comme région prioritaire de ce programme qui sera poursuivi au cours des prochaines années pour mieux sécuriser l'AEP de certaines zones côtières[20].

Ces projets sont réalisés après appel d'offre international ce qui s'est traduit par une diversification des partenaires tels que les firmes espagnoles (Bedes, Inima Aqualia, Geida), sud-africaine (Black and watch), malaisienne (Malakof), singapourienne (Hoyaux) et américaine (Ge Ionics). L'américain GE Ionics a réalisé par exemple une station de 200 000 m³/j pour l'agglomération d'Alger. Les grandes stations mises en place sont conçues en général sur le modèle BOO (*Build, Own and Operate*) où la construction, la réalisation et l'exploitation de la station sont confiées à l'investisseur privé étranger pendant le temps de la concession accordée par l'Etat (25 ans en moyenne). Elles sont détenues à 49% par la filiale de la Sonatrach et de la Sonelgaz (AEC, Algerian Energy Company) et à 51% par l'investisseur privé.

La réalisation de ces unités de traitement d'eau de mer nécessite toutefois des investissements importants. Chacune des grandes stations représente un coût moyen de près de 300 millions de dollars[21]. La mise en service de la station d'El-Hamma (à proximité d'Alger), inaugurée en février 2008 et produisant une capacité de 200 000 m³/j aura coûté 250 millions de dollars. En plus du coût, les contraintes les plus importantes du dessalement d'eau de mer sont d'une part la consommation énergétique au mètre cube d'eau et d'autre part les effets sur l'environnement du fait des rejets de saumure (le concentré produit au cours du dessalement) et des produits chimiques dans le milieu naturel ainsi que des émissions conséquentes de gaz à effet de serre. Concernant l'impact de ces rejets, en particulier dans la mer, il est souvent avancé que la dilution de ces rejets, du fait des courants marins et de l'éloignement des stations entre elles, écarte toute conséquence sur l'environnement. Une étude nationale à ce sujet pourrait fournir des éléments de réponse.

Les coûts liés au transport de l'eau, de l'énergie utilisée ainsi que des infrastructures industrielles représentent également un des défis majeurs pour cette technologie. Le coût de l'eau dessalée peut être évalué en additionnant les charges financières, le coût de l'énergie, les coûts de conduite, d'exploitation et d'entretien. Concernant le coût de production de l'eau saumâtre dessalée, celui-ci est nettement inférieur à celui de l'eau de mer dessalée: pour de

grandes unités, il s'estime à hauteur de 0,2 à 0,3 euro/m³ en eau saumâtre contre 0,4 à 0,6 euro/m³ en eau de mer. Pourvue en ressources énergétiques (gaz et pétrole), l'Algérie ressent beaucoup moins que d'autres pays le coût de l'énergie électrique produite pour dessaler l'eau de mer. De plus, l'effet de taille permet de diminuer le coût de l'eau douce obtenue, justifiant par là même la volonté des autorités de s'orienter vers des infrastructures dotées de forte capacité. Par ailleurs, un nombre croissant d'universités et de centres de recherche en Algérie pilotent actuellement des programmes visant à favoriser les installations d'unités de dessalement basées sur des énergies renouvelables telles que le solaire ou les éoliennes[20, 22]. Les grandes stations (13 stations) en Algérie sont illustrées dans le tableau 2.1, Elles fournies 2 260 000 m³ d'eau dessalée par jour et concourt à l'alimentation en eau potable de plus de 11 873 220habitants[23].

Tableau 2.1 : Les grandes stations en Algérie[23]

N°	Localisation	Capacité m3/j	Population à servir	Echéancier prévisionnel
01	Kahrama (Arzew)	90 000	540 000	En Exploitation
02	Hamma (Alger)	200 000	L'Algérois	En Exploitation
03	Skikda	100 000	666 660	En Exploitation
04	BeniSaf (Temouchent)	200 000	1 333 320	En Exploitation
05	Mostaganem	200 000	1 333 320	En Exploitation
06	Douaouda (Alger Ouest)	120 000	666 660	En Exploitation
07	Cap Djenet (Alger Est)	100 000	666 660	En Exploitation
08	Souk Tleta (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
09	Honaine (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
10	Mactaa (Oran)	500 000	1 333 320	-
11	El Tarf	50 000	-	-
12	Ténès	200 000	999 990	-
13	Oued Sebt (Tipaza)	100 000	-	-

2.6 Conclusion

De plus en plus d'usines respectent l'environnement grâce à de nouvelles installations établies sur des normes environnementales strictes et utilisant même dans certains cas des énergies renouvelables (comme par exemple l'usine de Perth en Australie). L'eau de mer dessalée coûte encore cher. En effet, seule une élite peut se permettre les coûts de transport, de l'énergie utilisée ainsi que des installations industrielles. Ainsi les pays d'Afrique (Afrique subsaharienne) qui en général les populations n'ayant pas accès à l'eau ne peuvent pas encore profiter de cette solution révolutionnaire à la pénurie d'eau potable[17].

CHAPITRE 3 :
**INCONVENIENTS
LIES AU
DESSALEMENT DE L'EAU**

3.1 Le coût énergétique

C'est le plus grand handicap de ces procédés. Quel que soit le procédé utilisé, les besoins énergétiques restent importants, même pour les unités de grandes tailles : entre 0.5 et 0.8 € le m³ pour les technologies membranaires, l'un des inconvénients majeurs de ces technologies est son coût. Deux facteurs contribuent à rendre cette technologie coûteuse[24].

- ▶ Le premier est la quantité d'énergie consommée par les systèmes de pompes, en particulier pour l'osmose inverse à haute pression ;
- ▶ Le second est la détérioration des membranes, un phénomène qui a fait l'objet de nombreuses recherches. Les membranes utilisées pour l'osmose inverse sont nettoyées chimiquement après plusieurs mois de service. Sur le long terme, les membranes sont remplacées lorsqu'elles deviennent trop souillées et que leur performance se détériore significativement. Cela arrive généralement tous les 3 à 5 ans.

Le coût du m³ dessalé passe entre 0.6 et 1.8 € pour la distillation. La distillation est majoritairement utilisée dans les pays du golfe où elle représente 90% de la production d'eau dessalée dans la région[24]. En Arabie Saoudite, le vrai coût du dessalement et du transport de l'eau, certainement considérable, est un secret d'État. Or l'eau potable de ce pays provient à 70 % du dessalement, un ordre de grandeur que l'on retrouve dans les autres pays du Golfe, Bahreïn, Koweït et Émirats Arabes Unis. Dans ces pays producteurs de pétrole, le faible coût de l'énergie autorise un dessalement à grande échelle qui ne serait pas soutenable pour la plupart des pays souffrant de stress hydrique, sans parler de ceux qui n'ont pas d'accès à la mer. Afin de réduire le coût énergétique de ce procédé, ces installations sont généralement couplées à des centrales thermiques afin de récupérer la vapeur basse pression à la sortie de la turbine de la centrale. A l'inverse, sur le pourtour méditerranéen, 76% de la production totale d'eau dessalée (4,2 millions de m³) est assurée par l'osmose inverse, notamment en Espagne, Algérie et Israël[25].

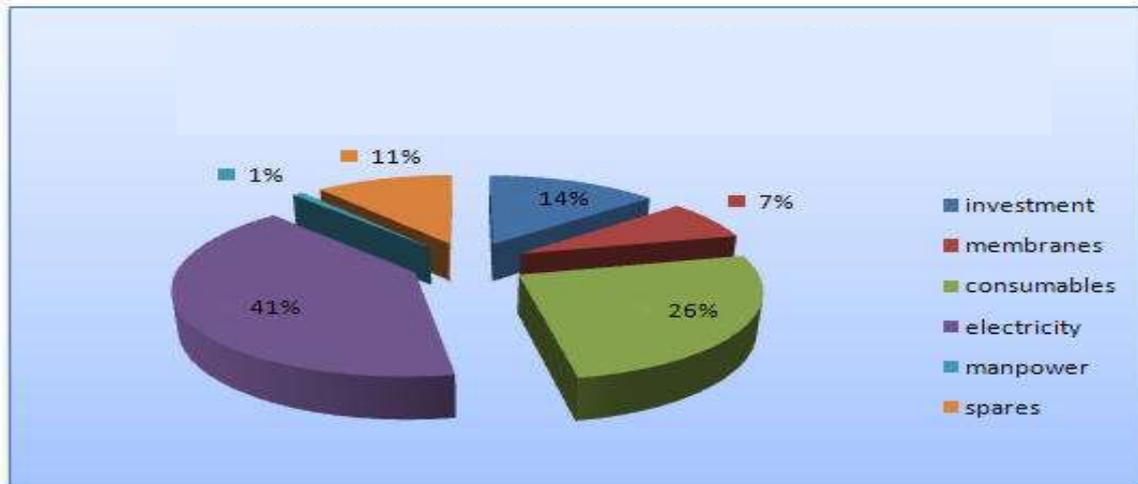


Figure 3.1 : Répartition des coûts pour une usine de dessalement par osmose inverse[26]

Selon le *Texas Water Development Board*, le coût d'un mètre cube d'eau traité par distillation se situe entre US\$ 0,95 et 1,04, tandis qu'il est de 0,84 pour une eau traitée par osmose inverse. Le prix de dessalement variant selon l'échelle, les besoins en électricité ; La consommation d'électricité représente environ 41% des coûts totaux d'une usine de dessalement par osmose inverse (Figure 3.1)[15]; (ou autre source d'énergie) et la distribution. Il est clair que cela ne répond pas aux besoins des régions pauvres de la planète, qui constituent pourtant les

principales victimes de la crise de l'eau. En outre, il apparaît clairement que le dessalement n'est pas approprié pour assurer la fourniture de l'eau d'irrigation[24].

Ce coût élevé explique pourquoi l'eau dessalée reste essentiellement à usage domestique ou industriel.

3.2 L'impact sur l'environnement

Au fur et à mesure que l'utilisation du dessalement augmente dans de nombreuses régions du monde, le problème passe de la pénurie d'eau à la consommation d'énergie et se déplace des corps d'eau douce pollués et surutilisés dans le milieu marin. Parmi les impacts dus à une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux qui sont liés à la phase d'exploitation. Les impacts commencent avec la transformation de l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour s'étendre à des émissions dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur. Les activités de construction et d'exploitation peuvent se traduire par une série d'impacts sur les zones littorales, affectant notamment la qualité de l'air, la qualité de l'eau, la flore et la faune marines, la perturbation d'écosystèmes importants (dunes de sable, herbiers marins et autres habitats vulnérables par suite de l'emplacement choisi pour le trajet des canalisations), le dragage et l'élimination des déblais qui en résultent, le bruit, les entraves à l'accès du public et aux loisirs. Les plus importants de ces impacts concernent la qualité de l'air et la qualité de l'eau qui retentissent ensuite sur la flore, la faune et les écosystèmes marins.

3.2.1 Émissions atmosphériques

Les usines de dessalement étant essentiellement alimentées par des énergies fossiles, elles génèrent donc directement ou indirectement des polluants atmosphériques ; gaz carbonique, oxydes de soufre et d'azote, particules solides[25].

3.2.2 Rejets chimiques

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartre, antisalissure et antimousse, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée. La présence de certains métaux, qui sont des produits de la corrosion du circuit, influent aussi sur la composition de la saumure concentrée[8].

3.2.3 La saumure concentrée

Il est indubitable que c'est la saumure qui exerce le plus fort impact sur le milieu récepteur. Le volume total de saumure libéré dans ce milieu est déterminant pour les dommages qu'il peut induire. Un rejet de saumure concentrée en grandes quantités appelle un examen plus soigneux des impacts potentiels sur l'environnement que s'il s'agit d'un rejet en petites quantités. À part le volume proprement dit, les modalités et l'emplacement du rejet sont essentiels pour les impacts qui peuvent en résulter. En plus, des effets combinés qui affectent la physiologie des plantes et qui se résument par une salinité (pression osmotique), une concentration en ion Na^+ et une concentration en ion Cl^- [27].

3.2.4 Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI

Dans les usines OI, le nettoyage et le stockage des membranes peuvent engendrer des eaux potentiellement dangereuses. Les membranes doivent être nettoyées à des intervalles de trois à six mois en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation et du fonctionnement de l'usine. Les formulations utilisées pour le nettoyage des membranes sont habituellement des solutions alcalines ou acides aqueuses. De plus, une solution chimique de préservation (généralement à base de bisulfite de sodium) doit être utilisée si les membranes sont stockées pendant la fermeture de l'usine. Ces produits chimiques sont normalement épurés avant leur rejet dans la mer[8].

3.3 L'investissement élevé

Le coût d'investissement d'une installation de dessalement d'eau est naturellement lié à la capacité de l'installation (Tableau 3.1), mais reste élevé dans l'absolu, ce qui limite l'accès à ce type de réalisations pour les investisseurs privés[25].

Tableau 3.1 : coût d'investissement d'une installation de dessalement d'eau

Capacité de l'installation	OI eau saumâtre	OI eau de mer	Distillation multi effets	Distillation multi flash
10.000 m ³ /j	575 €/m ³	1427 €/m ³	2023 €/m ³	3408 €/m ³
50.000 m ³ /j	376 €/m ³	1050 €/m ³	-	2122 €/m ³
275.000 m ³ /j	241 €/m ³	756 €/m ³	-	1286 €/m ³
500.000 m ³ /j	206 €/m ³	676 €/m ³	-	1078 €/m ³

CONCLUSION GENERALE

Le marché du dessalement de l'eau est appelé à connaître une forte croissance attendue dans passage à 30 à 40 millions de m³/j à l'horizon 2030.

Certains pays comme le Qatar dépendent à 95% de cette ressource ! La région méditerranéenne, particulièrement touchée par le phénomène de stress hydrique, s'est très fortement engagée dans la filière du dessalement.

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.

La position rationnelle paraît devoir se situer entre les extrêmes. 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.

REFERENCES

- [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.ens-lyon.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] U. K. Kesieme, N. Milne, H. Aral, C. Y. Cheng, and M. Duke, "Economic analysis of desalination technologies in the context of carbon pricing, and opportunities for membrane distillation," *Desalination*, vol. 323, pp. 66-74, 2013.
- [6] R. Rahmani, "Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement," 2007.
- [7] O. Bouros, "Desalting Technologies," *The ABCs of Desalting*, 1992.
- [8] P. d. N. U. p. l. e. (pnue), "Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens: évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure," vol. 92, 2001.
- [9] M. METAICHE, "Technologie Membranaire génie civil ssa metaiche mehdi," ed, 2014.
- [10] Y. Mandri, "Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide," Université Claude Bernard-Lyon I, 2011.
- [11] S. Nisan and L. Volpi, "Le dessalement de l'eau de mer par les réacteurs nucléaires: Les réacteurs de petite et moyenne puissance pour la production d'énergie," *Revue générale nucléaire*, pp. 43-52, 2001.
- [12] P. Bleu, "Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée," 2008.
- [13] "Schéma d'échangeur de pression," <http://centrale-e-osmose.e-monsite.com/>.
- [14] GWI DesalData "State-of-Desalination-Press-Release-IDA-and-GWI : The 29th Worldwide Desalting Inventory 2016," <http://idadesal.org/wp-content/>, 2016.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Q. G. A. Santens, "L'implantation des usines de dessalement dans le monde," <https://alexandre27310.wordpress.com/>, 2014.
- [18] U. D. M. WG, "Activités de dessalement en Méditerranée : Principales conclusions et recommandations," wedocs.unep.org/bitstream/handle, 2013.
- [19] S. Lattemann, M. D. Kennedy, J. C. Schippers, and G. Amy, "Global desalination situation," *Sustainability Science and Engineering*, vol. 2, pp. 7-39, 2010.
- [20] M. Mozas and A. Ghosn, "État des lieux du secteur de l'eau en Algérie," *Rapport de l'institut de prospective économique du monde méditerranéen (IPEMED)*. 27p, 2013.
- [21] CDER, "Le dessalement de l'eau de mer pour contrer la pénurie d'eau en Algérie," <http://portail.cder.dz>, 2012.
- [22] UNESCO, "Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2012," <http://unesdoc.unesco.org>, 2012.
- [23] ADE, "DESSALEMENT DE L'EAU DE MER," <https://www.ade.dz/index.php/projets/dessalement>, 2014.

- [24] L. Bouguerra, "Enjeux environnementaux et économiques du dessalement de l'eau," *Partage des eaux : Ressources et informations pour une gestion juste et durable de l'eau*. www.partagedeseaux.info, 2008.
- [25] S. I. H. DRISS " le dessalement de l'eau," <http://dessalementunisie.e-monsite.com>, 2012.
- [26] L. BV, "Dessalement par osmose inverse Analyse financière," info@lenntech.com
- [27] N. H. N. NOUREDDINE, "Impact environnemental de la station de dessalement de Brédéah (Algérie) : entre le légal et le réel. ," *Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université d'Es-Sénia, BP 1524 Oran Algérie*. <http://iwra.org>