

SYNTHESE TECHNIQUE

Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes

Farid TATA-DUCRU
comptecb@orange.fr
Janvier 2009

ENGREF
Centre de Montpellier
648 rue Jean-François Breton – BP 7355
34086 MONTPELLIER CEDEX 4
Tél. : (33) 4 67 04 71 00
Fax : (33) 4 67 04 71 01
www.agroparistech.fr

Office International de l'Eau
CNIDE
15, rue Edouard Chamberland
87065 LIMOGES CEDEX
Tél. (33) 5 55 11 47 47
Fax : (33) 5 55 11 47 48
www.oieau.fr

RESUME :

Bien qu'elles soient considérables, les ressources en eau ne sont pas infinies et même la France, qui fut longtemps un pays riche en eau, a dû prendre conscience du problème de l'eau.

Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement. Celles-ci permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'eaux saumâtres grâce à des techniques particulières.

Le marché du dessalement connaît une forte hausse, dans les pays en situation de manque d'eau, et particulièrement ces dernières années avec l'amélioration des techniques utilisées. Ces techniques se distinguent en deux familles : la distillation thermique, et les techniques à membranes.

Ces techniques très intéressantes au premier abord posent toutefois des problèmes. En effet, cette solution vient répondre parfois précipitamment à un manque d'eau là où une meilleure gestion pourrait amener des économies d'eau. De plus les rejets de saumure des usines de dessalement posent des problèmes pour la protection de l'environnement.

Par ailleurs, chaque technique a sa spécificité et son utilisation doit être raisonnée et soumise à critique selon le contexte de cette région.

On présentera en premier lieu l'état actuel du marché mondial du dessalement pour ensuite détailler les techniques actuelles, puis enfin établir une comparaison entre elles et faire une critique selon les critères économique et géographique.

Mots clé : *Dessalement, distillation, osmose inverse, environnement*

RESUMEN:

Aunque sean grandes, los recursos en agua no son infinitos y reciamente ciertos países que fueron ricos en agua, debían darse cuenta del problema del agua.

Una solución para aumentar el agua potable disponible son las estaciones de desalación. Éstas permiten producir agua potable a partir del agua de mar o de aguas salobres.

El mercado de la desalación sube fuertemente, en los países secos, y particularmente estos últimos años con mejoramiento de las técnicas utilizadas. Estas técnicas se distinguen en dos familias: la destilación térmica, y las técnicas a membranas.

Estas técnicas muy interesantes plantean no obstante algunos problemas. En efecto, esta solución viene para responder una falta de agua allí dónde una mejor gestión podría traer economías. Más los retoños de salmuera de las fábricas traen problemas para la protección medioambiental.

Por otro lado, cada técnica tiene su especificidad y su utilización debe ser sometida a crítica según el contexto de esta región.

Presentaremos en primer lugar el estado actual del mercado mundial de la desaladura para detallar luego a las técnicas actuales, luego por fin establecer una comparación entre ellas y hacer una crítica según los criterios económicos y geográficos.

Palabras claves: *desalación, destilación, ósmosis inversa, medio ambiente*

TABLE DES MATIERES

<i>Introduction</i>	4
Généralités sur le dessalement	4
Les eaux saumâtres	4
L'eau de mer	4
<i>Marché du dessalement</i>	4
Les acteurs	4
Capacité installée	5
Répartition géographique au 1er janvier 2008 (eau de mer):	5
<i>Les procédés</i>	5
Schéma général d'une installation de dessalement	5
Procédés de distillation	6
Procédés membranaires	7
Procédés hybrides	8
<i>Sources d'énergie</i>	9
Turbine à gaz et usine de dessalement	9
Turbine à vapeur et usine de dessalement	9
Centrale nucléaire et usine de dessalement	9
Dessalement grâce à des énergies renouvelables	9
<i>Comparaison</i>	11
Comparaison des techniques entre elles	11
Comparaison économique	12
Problèmes soulevés par les usines de dessalement	12
<i>CONCLUSION</i>	13

INTRODUCTION

L'évolution que connaît l'environnement urbain et industriel pose, dans de nombreux pays, le problème de l'eau. Le prélèvement global de l'eau, en additionnant les usages domestiques, industriels et agricoles, est de 250m³ par an et par habitant, en moyenne mondiale. Par ailleurs il est certain que nos besoins en eau ne cesseront de croître alors que les réserves en eau de bonne qualité diminuent.

Ceci implique de ménager la ressource, en limitant les rejets de pollution dans le milieu naturel mais aussi produisant une eau propre à la consommation.

C'est dans cette logique que les stations de dessalement des eaux s'inscrivent puisqu'elles permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'eaux saumâtres grâce à des techniques particulières.

L'étude de ces techniques et leur comparaison font l'objet de cette synthèse.

GENERALITES SUR LE DESSALEMENT

Compte tenu de la situation actuelle de pression démographique et de réchauffement climatique, le dessalement est une technique intéressante au vu de l'abondance de la matière première : l'eau de mer et les eaux saumâtres.

On assiste d'ailleurs à une très forte augmentation (+10% par an) du volume d'eau produit par dessalement, il est actuellement autour de 45 millions m³/jour. Les usines de dessalement se multiplient dans de nombreux pays (Libye, l'Australie, la Grande Bretagne); surtout dans les pays en prise à des pénuries d'eau (Algérie, Libye, pays du golfe) mais aussi dans les pays d'Europe du sud (Espagne, Italie, Grèce) et aux États-Unis.

LES EAUX SAUMATRES

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. Les eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en traversant les sols. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃ et le NaCl.

L'EAU DE MER

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité (voir tableau 1), c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates).

La salinité moyenne de l'eau de mer est de l'ordre de 35 g/l, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison : Mer Baltique : 7 g/l, Mer méditerranée : 36 à 39 g/l, Golfe Persique : 40 à 70 g/l, Mer morte : 270 g/l.

Sel	Concentration	
NaCl	27,2 g/l	78%
MgCl ₂	3,8 g/l	11%
MgSO ₄	1,7 g/l	5%
CaSO ₄	1,26 g/l	3,5%
K ₂ SO ₄	0,86 g/l	2,4%
Source : Degrémont Suez, 2005.		

MARCHE DU DESSALEMENT

LES ACTEURS

Constructeurs d'usines de distillation « clé en main » : SIDEM-Entropie (Filiale de Veolia), Fisia Italmimpianti (Société Italienne), Doosan (Corée du sud), GE Water (USA), Suez Energy International (France), IDE (Israel).

Constructeurs d'usines d'osmose inverse « clé en main » : OTV (Filiale de Veolia), Hyflux (Singapour), GE Ionics (USA), Degrémont (France), Sadyt (Espagne), Cadagua (Espagne), Acciona Agua (Espagne), Aqualia (Espagne), Befesa Agua (Espagne).

Fournisseurs de membranes : Dow Filmtec (USA), Hydranautics (Japon), Toray Industries (Japon), Woongjin Chemical (Corée du sud). (Desaldata.com)

CAPACITE INSTALLEE

La capacité de dessalement des eaux salées et saumâtres connaît actuellement une hausse de près de 10% par an ; alors que le nombre de nouveaux contrats signés a explosé en 10 ans. Au total, la production est de 52 Mm³/jour, soit 42Mm³ d'eau de mer dessalée et 10Mm³ d'eau saumâtre.

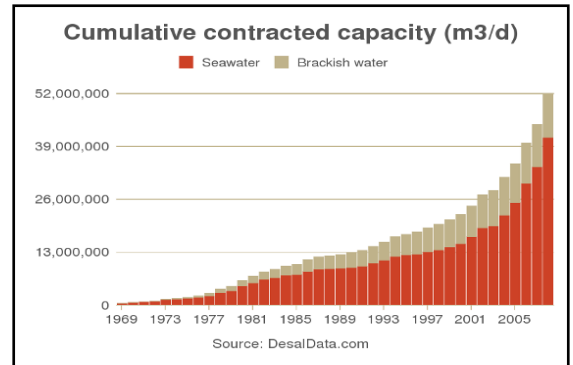


Figure 1 : Capacité de dessalement installée dans le monde (Source : desaldata.com)

Région	Mm ³ /jour	%
Moyen-Orient	21	50
Amérique du nord	7,56	18
Asie	5,46	13
Europe	5,46	13
Afrique	2.52	6
Total	42	100

Source : DesalData.com

REPARTITION GEOGRAPHIQUE AU 1ER JANVIER 2008 (EAU DE MER):

Historiquement, les pays du golfe ont été les premiers à utiliser le dessalement et sont actuellement les plus gros producteurs d'eau dessalée dans le monde. Certains pays comme le Qatar dépendent même à 95% de cette ressource. En Europe, c'est l'Espagne qui est de loin le premier pays producteur d'eau dessalée.

LES PROCEDES

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques, certaines sont plus adaptées à un environnement donné que d'autres. Actuellement on utilise cinq techniques regroupées en deux familles : les procédés de distillation et les procédés membranaires. Les deux fonctionnent selon le même principe général.

SCHEMA GENERAL D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT

On peut diviser une installation de dessalement en 4 postes principaux:

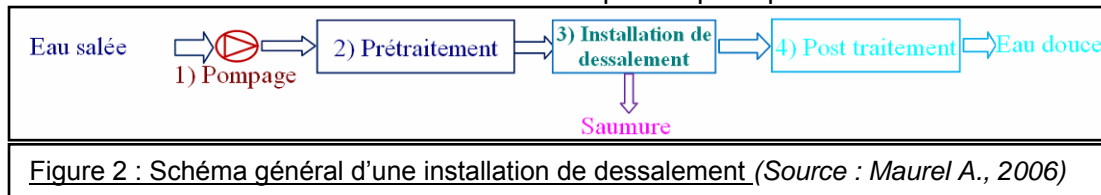


Figure 2 : Schéma général d'une installation de dessalement (Source : Maurel A., 2006)

- **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**
 - 1) Procédés de distillation : L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pur obtenir de l'eau pure.
 - 2) Procédés membranaires : L'eau et les sels dissous sont séparés au moyen de membranes sélectives.
- **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 CaCO₃.
 - 2) Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les micro-organismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.

PROCEDES DE DISTILLATION

Ils sont mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable.

Distillation à simple effet

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau.

- 1) Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
- 2) La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.
- 3) Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure.

Cette première solution est simple à mettre en œuvre met n'offre qu'un rendement réduit, aussi elle n'est utilisée que dans les navires disposant d'une source d'énergie thermique.

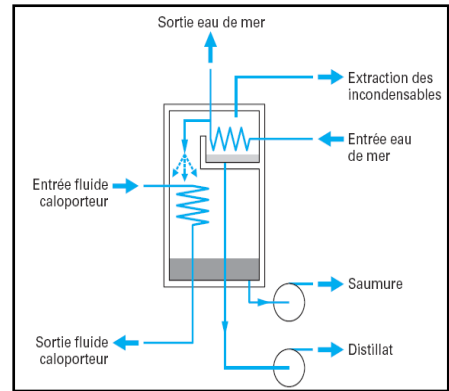


Figure 3 : Distillateur simple effet
(Source : Danis P., 2003)

Distillation à multiples effets (MED)

L'évaporateur MED est constitué de plusieurs cellules simples consécutives, dans lesquelles on diminue la pression (et la température) du premier (chaud) au dernier (le froid). Chaque cellule (aussi appelé effet) contient un faisceau de tubes. Le sommet du faisceau est arrosé avec l'eau de mer qui coule autour des tubes par gravité.

La chaleur cédée lors de la condensation réchauffe l'eau de mer à l'extérieur des tubes qui s'évapore en partie. Après l'évaporation, l'eau de mer se concentre en donnant de la saumure au fond de la cellule.

La vapeur créée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète.

Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense dans un échangeur thermique. Cet échangeur, est rafraîchi par l'eau de mer.

À la sortie du condenseur final, la partie de l'eau de mer réchauffée est utilisée pour alimenter l'unité, l'autre partie est rejetée à la mer. La saumure et le distillat sont collectés dans chaque cellule d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges.

Cette solution apporte une amélioration du rendement par rapport à la première.

Une amélioration significative de l'efficacité du système est apportée par la 'compression de vapeur' (MED-TVC) (Danis P., 2003):

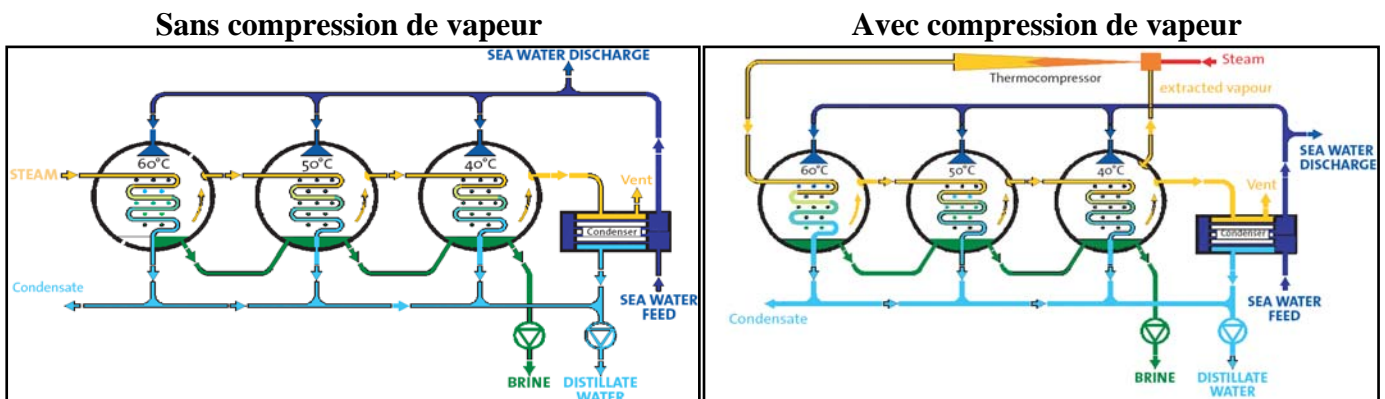


Figure 4 : Distillateurs à effets multiples (Source : sidem-desalination.com)

Capacité typique/ coût correspondant	10 000 m ³ /jour / 0.64€/ m ³
Capacité maximale en service	272 520 m ³ /j (Al Hidd 2, Arabie saoudite)

Procédé par détentes successives ou procédé Flash (MSF)

Cette technologie est apparue en 1960 pour faire face aux problèmes d'entartrage que connaissent les procédés de distillation à multiples effets.

L'eau salée est introduite à T0 et serpente à travers les différentes chambres en condensant de la vapeur au passage. Elle passe ensuite dans un réchauffeur où elle atteint Tmax puis elle est introduite dans le bas des chambres où elle se vaporise puis se condense sur le serpentin. L'eau condensée est récupérée alors que la saumure est évacuée. (cf réchauffage avec centrale thermique ou nucléaire)

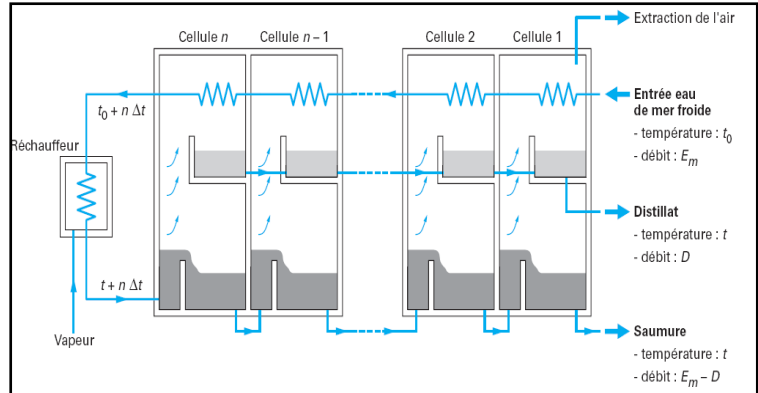


Figure 5 : Distillateur par détentes successives (Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	25 000 m ³ /jour / 0.88€/ m ³
Capacité maximale en service	880 000 m ³ /j (Shoaiba 3, Arabie saoudite)

Distillation par compression de vapeur (MVC)

Dans ce procédé, l'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte isolée thermiquement.

La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation.

Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée.

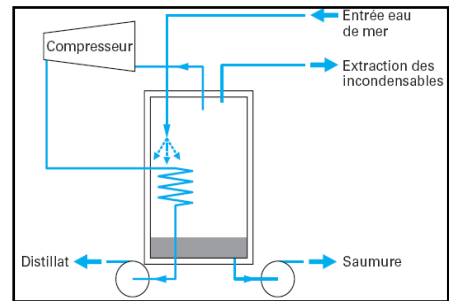


Figure 6 : Compression mécanique de vapeur (Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	3 000 m ³ /jour / 0.56€/ m ³
Capacité maximale en service	80 000 m ³ /j (Azzawiya, Libye)

PROCEDES MEMBRANAIRES

Electrodialyse (ED)

Le principe de fonctionnement est représenté schématiquement sur la figure x. Les deux compartiments sont alimentés avec une solution saline MX (M+, X-) de concentration C0. Sous l'effet du courant, les cations M+, qui migrent vers la cathode, traversent les MEC et sont stoppés par les MEA. De la même manière, les anions X-, qui migrent vers l'anode, traversent les MEA et sont stoppés par les MEC. On obtient ainsi, en sortie d'empilement, deux solutions : une solution MX « déminéralisée », appelée diluât, dont la concentration est inférieure à la concentration d'entrée, et une solution MX « concentrée », appelée concentrât, dont la concentration est supérieure à la concentration d'entrée.

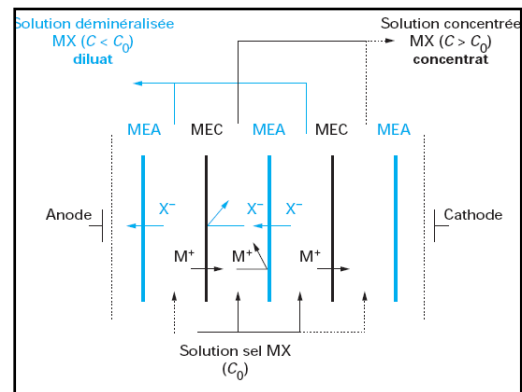


Figure 7 : Electrodialyse (Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	3 000 m ³ /jour / 0.56€/ m ³
Capacité maximale en service	80 000 m ³ /j (Azzawiya, Libye)

Osmose inverse (RO)

Il existe différentes techniques de filtration de l'eau (filtration conventionnelle, microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) selon le domaine d'utilisation. Ces techniques se différencient principalement par la taille des particules qu'elles arrêtent. Le cas extrême est l'osmose inverse qui arrête

tous les solutés contenus dans l'eau mais laisse passer le solvant.

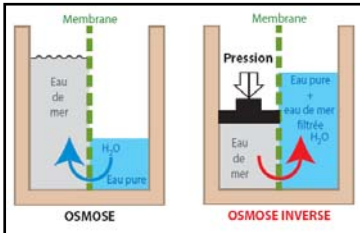


Figure 9 : Principe de l'osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel. Si l'on considère 2 solutions de concentrations salines différentes séparées par une membrane. L'eau migre spontanément de la solution diluée à la solution la plus concentrée. Si l'on applique une pression supérieure à la pression osmotique (pression d'équilibre) le solvant va migrer de la solution concentrée à la solution diluée c'est l'osmose inverse.

La pression osmotique π est donnée par : $\pi.V = n.R.T$ $\pi = i.C.R.T$

Exemple : avec l'eau de mer à 35 g/L à 20°C : $i=2$ (Cl⁻ et Na⁺),
 $M_{NaCl}=58.5$ g/mol $\pi = 2 \times 35 / 58.5 \times 0.082 \times 293 = 28.7$ bar => pression mini pour filtrer l'eau de mer.

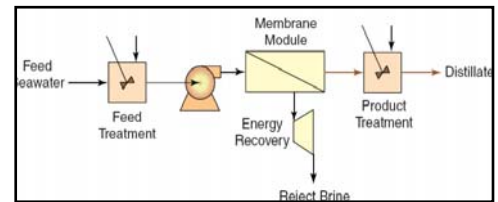


Figure 8 : Filière de traitement par osmose inverse
 (Source : Wilf M., 2005)

Capacité typique/ coût correspondant	6 000 m ³ /jour / 0.56€/m ³
Capacité maximale en service	375 000 m ³ /j (Sulaibiya, Koweït)

Distillation membranaire (MD)

La distillation membranaire est une technologie émergente pour le dessalement. Elle diffère des autres technologies membranaires : la force agissante pour le dessalement est la différence de la pression de vapeur d'eau à travers la membrane, plutôt que la pression totale. Les membranes de MD sont hydrophobes, ce qui permet à la vapeur d'eau (mais pas à l'eau liquide) de passer.

Le gradient de pression de vapeur est créé par chauffage de l'eau, élevant ainsi sa pression de vapeur. Le besoin majeur en énergie est pour l'énergie thermique. On s'attend à ce que le coût total de l'eau produite soit inférieur à \$0,50/m³, et même \$0,26/m³. Cette technique est encore à l'état expérimental.

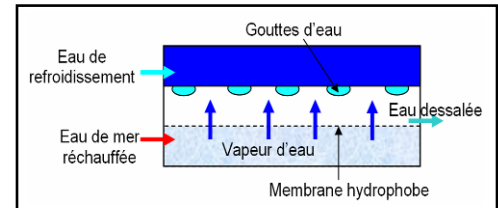


Figure 10 : Principe de la distillation Membranaire
 (Macedonio F., Drioli E., 2008)

PROCEDES HYBRIDES

Le concept de dessalement par voie hybride combine deux ou trois procédés pour fournir une meilleure solution technico-économique. (Helal A.M.; 2004)

Les trois éléments qui sont intégrés sont :

- une unité de distillation en général « multistage » (MSF) ;
- une unité d'osmose inverse OI ;
- une centrale thermique.

Il est donc possible de satisfaire, à moindre coût, les demandes en eau et en électricité. En effet, contrairement à l'électricité, l'eau peut être stockée pendant les périodes de faible demande électrique, tout ou partie de l'excès de production d'électricité est utilisé pour le dessalement par osmose inverse. La production peut varier rapidement, cela permet d'ajuster la production aux besoins. Un autre avantage important est la régulation de la température de l'alimentation des osmoseurs par

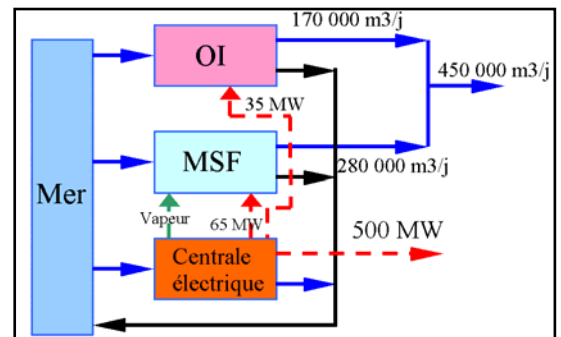


Figure 11 : Installation hybride
 (Maurel A., 2006)

utilisation de l'eau de réfrigération de la distillation. Opérant à haute température (jusqu'à 40 °C), cela permet de réduire le nombre d'osmoseurs. (Maurel A., 2006)

Capacité typique/ coût correspondant	Une seule usine de ce type, coût estimé à 0.41€/m ³
Capacité maximale en service	454 000 m ³ /j (Fujairah 1, Emirats Arabes Unis)

SOURCES D'ENERGIE

La plupart du temps et en particulier pour de grandes usines, le coût le plus bas est obtenu par l'accouplement d'une centrale électrique et d'une unité de production d'eau, les vapeurs d'échappement des turbines étant utilisées pour alimenter les unités de dessalement.

TURBINE A GAZ ET USINE DE DESSALEMENT

La puissance électrique est produite par une turbine à gaz (alimentée en énergie fossile). La chaleur générée par l'usine est utilisée pour produire de la vapeur à pression moyenne grâce à un échangeur de chaleur. Cette vapeur est ensuite utilisée dans l'usine de dessalement pour la production d'eau douce. On produit alors 1,000 MW d'électricité pour 450,000 m³/jour d'eau douce.

TURBINE A VAPEUR ET USINE DE DESSALEMENT

Cet arrangement associe une chaudière à haute pression avec une turbine à vapeur pour produire l'électricité et fournir la vapeur à basse pression pour l'unité de dessalement.

Typiquement les proportions Puissance/eau produite sont de 500MW d'électricité pour 450,000 m³/jour d'eau douce produite.

CENTRALE NUCLEAIRE ET USINE DE DESSALEMENT

Dernièrement, on a vu apparaître des projets associant centrales nucléaires et usines de dessalement. Cette association est particulièrement efficace puisqu'elle permet de produire de l'eau douce très bon marché. (Misra B.M., 2004 ; Misra B.M., 2005)

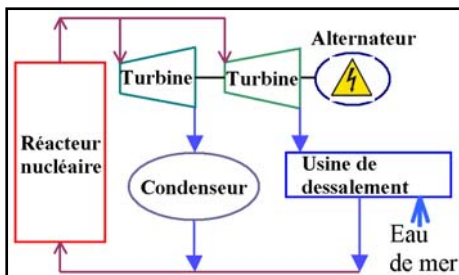


Figure 12 : Couplage centrale nucléaire – usine de dessalement (International Atomic Energy Agency, 2000)

• Etude CEA/FRAMATOME publiée dans International Journal of Nuclear Desalination, vol 1, n 1, 2003.
Réacteur 600 MW_{th} → 284 MW_e électricité + 42.000 m³/jour eau douce

Estimation du coût du m ³ d'eau douce en \$/m ³		
Charges financières 950 \$/m ³ /jour 20 ans à 5 % 95 % de disponibilité	$\frac{950 * 0,08}{365 * 0,95} = 0,22$ \$/m ³	51 %
Energie Thermique 0	0	
Energie Electrique 2 kWh/m ³ @ 3,5 cents US/kWh	$2 * 0,035 = 0,07$ \$/m ³	16 %
Exploitation – Maintenance 5% de l'investissement	$\frac{950 * 0,05}{365 * 0,95} = 0,14$ \$/m ³	33 %
Coût total	0,43 \$/m ³	100 %

Soit 0.31 €/m³

→ Prix du dessalement avec le nucléaire bon marché (utilisation peut-être possible en agriculture avec une plus grande capacité). (Tian L. et al, 2004)

DESSALEMENT GRACE A DES ENERGIES RENOUVELABLES

Distillateur solaire direct

Compte tenu de sa faible productivité (environ 4 l/jour/m²) et son coût de production élevé (entre 6,5 et 13 €/m³), cette technique est réservée aux installations de petite taille et loin de toute autre source d'énergie. (Maurel A., 2006)

Capacité typique/ coût correspondant	1 m ³ /jour -10€/ m ³
Capacité maximale en service	36 m ³ /jour (Gwadar 2, Pakistan)

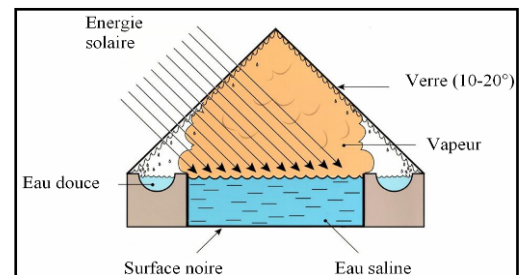
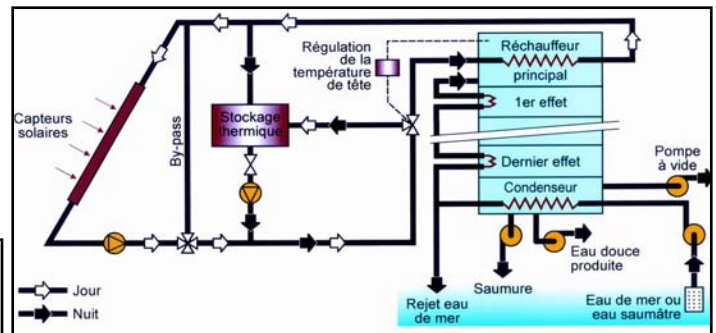


Figure 13 : Distillateur solaire direct (Source : Maurel A., 2006)

Distillation et énergie solaire

Capacité typique/ coût correspondant	10 m ³ /jour - 8€/ m ³
Capacité maximale en service	72 m ³ /jour (Almeria, Espagne)

Figure 13 : Distillateur à effets multiples associé à des capteurs solaires. (Source : Maurel A., 2006)



Osмосe inverse et énergie solaire (photovoltaïque)

Le procédé utilise uniquement de l'énergie électrique ou mécanique; il est relativement simple (une pompe haute pression); il est le plus performant du point de vue énergétique soit 2kWh/m³ dans le cas de l'eau de mer.

Exemple : unité de dessalement solaire « osmose inverse et photovoltaïque », village de Ksar Ghilène en Tunisie (village de 300 habitants situé dans le sud Tunisien, région de Kébili).

Unité de dessalement	Conditions de fonctionnement
Eau saumâtre salinité = 4,5 g/litre	Eté= 35 kWh/j soit = 7,5 h/j x 2 m ³ /h = 15 m ³ /j
Capacité osmose inverse = 2 m ³ /h	Hiver= 16 kWh/j soit = 3,75 h x 2 m ³ /h = 7,5 m ³ /j
Taux de conversion = 70 %	
Puissance nécessaire = 3,57 kWatt	Coût de l'eau produite
Énergie consommée = 1,70 kWh/m ³	# 5,6 €/m ³ contre 8,5 €/m ³ pour le transport par camion

Osмосe inverse et énergie éolienne

1) CAS D'UNITÉS DE PETITE CAPACITÉ (0,5 à 200 m³/jour)

Ces petites unités fonctionnent avec un stockage d'énergie par batteries, ce qui entraîne des coûts élevés (durée de vie limitée, pertes d'énergie,....).

De telles unités doivent prendre en compte un environnement difficile:

- environnement climatique : températures élevées, humidité, vent, sable...
- environnement humain : faible niveau technologique, problèmes de maintenance dans la durée.

(Forstmeier M., 2007)

2) CAS D'UNITÉS DE GRANDE CAPACITÉ (> 1.000 m³/jour)

Un stockage d'énergie par batteries étant guère envisageable, un raccordement à un réseau électrique s'avère nécessaire pour palier aux aléas des énergies renouvelables et assurer un fonctionnement de l'unité de dessalement 24 heures sur 24.

Capacité typique/ coût correspondant	10 m ³ /jour - 6€/ m ³
Capacité maximale en service	6000 m ³ /jour (Maroc)

Il faut tenir compte de deux caractéristiques essentielles des énergies renouvelables :

- leur coût élevé
- leur discontinuité : alternance régulière jour/nuit pour le solaire -aléas climatiques plus arbitraires (solaire, éolien) d'où nécessité d'un stockage d'énergie. (Maurel A., 2006)

COMPARAISON

COMPARAISON DES TECHNIQUES ENTRE ELLES

A) En eau saumâtre

Tableau 3 : Comparaison des procédés	RO	ED
Température de fonctionnement (°C)	< 45	<45
Energie utilisée	Mécanique (via électricité)	Electrique
Consommation électrique (kWh/m ³)	4-7	1
Salinité de l'eau brute (g/l)	1 – 45	0,1 – 3
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 500	< 500
Capacité d'un train (m ³ /j)	1 – 10.000	1 – 12.000
Avantages	Modularité	

→ L'électrodialyse

n'est compétitive avec l'OI qu'en dessous de 3mg/L de sels.

B) En eau de mer

Le dessalement est un processus très consommateur d'énergie. Pour le MED et les usines MSF, l'énergie principale est sous forme de chaleur, mais un peu d'énergie électrique est exigée pour les pompes et les auxiliaires. L'osmose inverse utilise seulement de l'énergie électrique, plus « noble ».

Tableau 4 : Comparaison des procédés	MSF	MED	MED-TVC	MVC	OI
Température de fonctionnement (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45
Principale source d'énergie	Thermique	Thermique	Thermique	Mécanique (via électricité)	Mécanique (via électricité)
Consommation thermique (kWh/m ³)	12	6	21	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique (kWh/m ³)	3.5	1.5	1.5	8-14	4-7
Salinité de l'eau brute (g/l)	30 – 100	30 – 100	30 – 100	30 – 50	1 – 45
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 10	< 10	< 10	<10	< 500
Capacité d'un train (m ³ /j)	5.000 – 60.000	500 – 12.000	100 – 20.000	10 – 2.500	1 – 10.000
Avantages	Technique éprouvée	20 % moins cher que le MSF	Capacité, robustesse	Simplicité	Modularité
Inconvénients	Investissement, consommation	Capacité plus faible que MSF	Consommation	Capacité limitée	Fragilité

Chaque technique a une particularité technique qui la fera préférer dans un cas plutôt que dans l'autre. Ainsi, les techniques thermiques sont adaptées aux fortes salinités et aux hautes températures alors que les techniques à membranes sont meilleur marché dans des conditions de salinité moyenne et de température peu élevée (autour de 25°C).

D'autre part, le coût de l'énergie est très différent d'un pays à l'autre. Ainsi, dans les pays pétroliers, le baril de pétrole est très bon marché et les autorités préfèrent les techniques thermiques. L'absence de ressources fossiles favorisera l'osmose inverse.

COMPARAISON ECONOMIQUE

Les tableaux suivants permettent de comparer le coût de l'eau produite selon la technique, à une capacité donnée (Indépendamment de la source d'énergie). On voit nettement l'effet de la capacité sur le coût final. L'effet d'échelle est important. (Wittholz M.K. et al., 2008 ; Frioui S., Oumeddour R., 2008)

		Capacité (m3/jour)		10000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		575	1427	3408	2023
Coût de l'eau (€/m3)		0.27	0.67	1.40	0.83

		Capacité (m3/jour)		50000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		376	1050	2122	1539
Coût de l'eau (€/m3)		0.18	0.50	0.87	0.63

		Capacité (m3/jour)		275000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		241	756	1286	1153
Coût de l'eau (€/m3)		0.11	0.36	0.53	0.48

		Capacité (m3/jour)		500000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		206	676	1078	1042
Coût de l'eau (€/m3)		0.10	0.32	0.44	0.43

Coûts du dessalement selon le type d'énergie (Karagiannis I.C., Soldatos P.G., 2008):

Coûts selon le type d'énergie (€/m3)	Eau de mer	Eau saumâtre
Conventionnelle	0,35€ - 2,70€	0,21€ - 1,06€
Eolien	1,00€ - 5,00€	
Photovoltaïque	3,14€ - 9,00€	4,50€ - 10,32€
Capteurs solaires	3,50€ - 8,00€	

PROBLEMES SOULEVES PAR LES USINES DE DESSALEMENT

Quel que soit le procédé utilisé, il n'est pas sans inconvénients :

A la prise d'eau:

Le prises d'eau peuvent perturber le fond marin et interférer avec des routes maritimes

Au rejet de la saumure:

Les saumures sont rejetées dans à la mer le plus loin possible des côtes.

Salinité et température: L'exposition continue à une plus forte salinité (1,5 à 2 fois celle du milieu) et à une température plus élevée (jusqu'à + 5°C) nuit à certaines espèces en favorise d'autres.

En Espagne, la forte teneur en sel des concentrés rejetés avec l'osmose inverse peut porter préjudice aux bancs de plantes aquatiques *Posidonia*, classés habitat prioritaire par la directive européenne pour la conservation des habitats de la faune et de la flore. (Sánchez-Lizaso J.L., 2008 ; WWF, August 2006)

Biocides : Dans la plupart des usines de dessalement, du chlore est ajouté à l'eau pour réduire le biofouling, ce qui mène à la formation d'hypochlorite et d'hypobromite dans l'eau de mer.

Le dioxyde de chlore se développe actuellement dans une alternative au dosage de chlore. Le dioxyde de chlore est un oxydant fort, mais forme moins de trihalométhanes que le chlore. (Lattemann S., Höpner T., 2008)

Métaux lourds : Des alliages Cuivre-Nickel sont généralement utilisés comme matériaux pour les échangeurs thermiques. La contamination de la saumure avec du cuivre due à la corrosion peut être une source de pollution, le cuivre étant toxique à fortes doses. (Lattemann S., Höpner T., 2008)

Anti-tartre : Problèmes d'eutrophisation à cause des polyphosphates. (Lattemann S., Höpner T., 2008)

Coagulants (OI) : Le chlorure ferrique utilisé dans les stations d'osmose inverse augmente la turbidité de la saumure en sortie pouvant causer une gêne pour la faune et la flore. (Lattemann S., Höpner T., 2008)

Agents anti-mousse (thermique) : Le polyglycol contenu dans l'anti-mousse est faiblement biodégradable. (Lattemann S., Höpner T., 2008)

Le principal inconvénient est donc l'impact des saumures sur l'environnement, surtout dans le cas de l'osmose inverse où les rejets sont plus concentrés. Si la station est située en bord de mer, on utilisera des diffuseurs pour diluer le concentrât le plus loin possibles des côtes. Si l'usine est à l'intérieur des terres (parfois le cas pour les eaux saumâtres), on utilise des marais salants pour évaporer le reste d'eau de la saumure. (Maurel A., 2006)

Par ailleurs, la production d'eau salée demandant beaucoup d'énergie, la production de gaz à effet de serre par l'intermédiaire des centrales thermiques est élevée. (tableau 5).

Tableau 5 : Emissions toxiques produites par diverses centrales couplées aux procédés MSF, MED et RO (Nisan S., 2008.)

Centrales	MSF (Mt/year)				MED (Mt/year)				RO (Mt/year)			
	CO ₂	SO _x	NO _x	Particules	CO ₂	SO _x	NO _x	Particules	CO ₂	SO _x	NO _x	Particules
Charbon	197.28	0.25	0.41	0.03	105.86	0.1327	0.2166	0.0166	24.06	0.0302	0.0492	0.00377
Diesel	161.3	0.98	0.22	0.02	86.41	0.5249	0.1197	0.0130	19.20	0.1166	0.0266	0.00288
Turbine à gaz, cycle combiné	105.61	0.01	0.17	0.01	55.69	0.00583	0.0913	0.0051	9.60	0.001	0.01574	0.00089

CONCLUSION

Les installations de distillation, sont robustes. Elles sont particulièrement adaptées aux eaux chaudes, très salées et de caractéristiques fluctuantes.

La distillation à effet multiple était à l'origine réservée à des unités de petite taille. Après améliorations successives, elle concurrence et même devance maintenant la technique MSF, si on allie ses avantages à ceux de la compression de vapeur.

L'osmose inverse est une technique plus récente, apportant de réelles économies d'énergie.

Elle s'est peu à peu imposée vis-à-vis d'utilisateurs réticents devant cette technique si différente de la distillation. Entre temps, les fabricants de membranes ont perfectionné leurs produits, si bien qu'aujourd'hui l'osmose inverse est le procédé concurrent de la distillation.

Une solution récente consiste à adjoindre une unité d'osmose inverse au couple centrale thermique + distillation. L'osmose inverse consomme l'énergie électrique lorsque la demande est faible, la distillation peut fonctionner à tout moment de la journée avec de la vapeur basse pression. On dispose ainsi d'un ensemble hybride assez souple pour s'adapter aux variations de la demande d'eau et d'électricité tout en minimisant la consommation d'énergie. Osmose inverse et distillation peuvent aussi s'avérer deux procédés complémentaires.

Quant aux énergies renouvelables couplées aux installations de dessalement, leur investissement élevé et leur faible compétitivité ne permettent pas de les utiliser à l'échelle industrielle. Cependant, dans certains cas, le dessalement solaire ou éolien de petite capacité, pour des lieux isolés peut se révéler meilleur marché que les techniques conventionnelles.

Récemment, deux alternatives prometteuses ont fait leur apparition. La première est une innovation technique qui permettrait d'obtenir une eau de très bonne qualité à des coûts très inférieurs aux techniques classiques : c'est la distillation membranaire.

L'autre est une substitution des centrales thermiques classiques par des centrales nucléaires pour fournir la chaleur aux usines de dessalement.

On gagne alors sur deux plans : pas de rejet de gaz à effet de serre et diminution du prix global de production de l'eau. Cette solution permettrait d'envisager le dessalement pour l'irrigation et non plus seulement pour la consommation domestique.

BIBLIOGRAPHIE :

Danis P., juin 2003. *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J 2700, 15 p.

DesalData, [mis à jour : 01/10/2008]. *Home-DesalData*, Global Water Intelligence. Disponible sur Internet : <http://desaldata.com/> [consulté le 05/11/2008]

Forstmeier M., 2007. Feasibility study on wind-powered desalination, *Desalination* 203, 463-470

Frioui S., Oumeddour R., 2008. Investment and production costs of desalination plants by semi-empirical method, *Desalination* 223, 457-463

Helal A.M.; 2004. Optimal design of hybrid RO, MSF desalination plants, *Desalination* 160, 13-27

International Atomic Energy Agency, 2000. *Examining the Economics of Seawater desalination Using the DEEP Code*, IAEA, Vienna, Austria. Technical Document 1186.

Karagiannis I.C., Soldatos P.G., 2008. Water desalination cost literature: review and assessment, *Desalination* 223, 448-456.

Lattemann S., Höpner T., 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220 (1-3), 15 p.

Maurel A., 2006. *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. Paris, Lavoisier Tec&Doc.

Macedonio F., Drioli E., 2008. *Pressure-driven membrane operations and membrane distillation technology integration for water purification*, *Desalination* 223, (396-409).

Degrémont Suez, 2005. *Mémento technique de l'eau*. Rueil Malmaison, Degrémont, 2 tomes, 1718 p.

Misra B.M., 2004. Role of nuclear desalination in meeting the potable water needs in the water scarce areas in the coming decades, *Desalination*, 166, 1-10

Misra B.M., 2005. *Desalination of seawater using nuclear energy*, *Division of Nuclear Power*, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.

Nisan S., 2008. A Comprehensive economic evaluation of desalination systems, using renewable, fossil fuelled based and nuclear energies, including external environmental costs, *Desalination*, 229, 125-146.

Sánchez-Lizaso J.L., 2008. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants *Desalination* 221, 602-607.

Tian L. et al, 2004. Economic evaluation of seawater desalination for nuclear heating reactor with multi-effects distillation, *Desalination* ,180, 53-61

Wilf M., 2005. Optimization of seawater RO system design, *Desalination* 173, 1-12.

Wittholz M.K., O'Neill B.K., Colby C.B., D. Lewis, 2008. Estimating the cost of desalination plants using a cost database, *Desalination* 229, 10-20.

WWF, August 2006. *Rich Countries, Poor Water*. Zeist (NI) WWF.



Office
International
de l'Eau

SINTESIS TECNICA

**Desalación del agua de mar: balance de los últimos
progresos tecnológicos; balance económico; análisis crítico
según los contextos**

Farid TATA-DUCRU
comptecb@orange.fr
Janvier 2009

ENGREF
Centre de Montpellier
648 rue Jean-François Breton – BP 7355
34086 MONTPELLIER CEDEX 4
Tél. : (33) 4 67 04 71 00
Fax : (33) 4 67 04 71 01
www.agroparistech.fr

Office International de l'Eau
CNIDE
15, rue Edouard Chamberland
87065 LIMOGES CEDEX
Tél. (33) 5 55 11 47 47
Fax : (33) 5 55 11 47 48
www.oieau.fr

Resumen:

Aunque sean grandes, los recursos en agua no son infinitos y recientemente ciertos países que fueron ricos en agua, han debido darse cuenta del problema.

Una solución para aumentar el agua potable disponible son las estaciones de desalación. Éstas permiten producir agua potable a partir del agua de mar o de aguas salobres.

El mercado de la desalación aumenta considerablemente, en los países secos, y particularmente en estos últimos años a la mejora de las técnicas utilizadas. Estas técnicas se distinguen en dos familias: la destilación térmica, y las técnicas con membranas.

Estas, plantean no obstante algunos problemas. En efecto, esta solución llega para responder una falta de agua allí donde una mejor gestión podría aportar economías. Además, la salmuera de las fábricas aporta problemas para la protección medioambiental.

Por otro lado, cada técnica tiene su especificidad y su utilización debe ser sometida a crítica según el contexto de dicha región.

Presentaremos en primer lugar el estado actual del mercado mundial de la desaladura para detallar luego a las técnicas actuales, finalmente establecemos una comparación entre ellas y hacer una crítica según los criterios económicos y geográficos.

Palabras claves: desalación, destilación, ósmosis inversa, medio ambiente

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	4
Agua salobre	4
Agua de mar	4
El mercado de la desalacion	4
Actores	4
Capacidad instalada	5
Distribucion al primero de enero de 2008 (agua de mar):	5
PROCESOS	5
Esquema general de una desalación	5
PROCESOS DE DESTILACIÓN	6
PROCESOS a base DE MEMBRANAs	7
SISTEMA HÍBRIDO	8
FUENTES DE ENERGÍA	9
Turbina de gas y planta de desalación	9
TURBINA DE VAPOR Y planta de Desalación	9
Desalación mediante ENERGÍAS RENOVABLES	9
COMPARACIÓN	10
Comparación de técnicas entre sí	10
COMPARACIÓN ECONÓMICA	11
Dificultades encontradas en las plantas de desalación	12
CONCLUSIÓN	13

INTRODUCCIÓN

En muchos países, la evolución del ambiente urbano e industrial conduce a una problemática del agua. El abastecimiento global en agua, teniendo en cuenta los usos domésticos, industriales y agrícolas, llega a un promedio mundial de extracción anual de 250m³ por habitante. Por otra parte, es cierto que nuestras necesidades de agua seguirán creciendo, mientras que las reservas de agua de buena calidad seguirán disminuyendo.

Esto implica realizar una buena gestión del recurso, limitando los vertidos contaminantes en el medio natural, e igualmente produciendo agua potable para el consumo. En este sentido las plantas de desalación producen agua potable a partir de agua de mar o agua salobre a través de técnicas especiales.

El estudio de dichas técnicas y la comparación entre ellas, son el objeto de esta síntesis.

GENERALIDADES SOBRE LA DESALACIÓN

Dada la situación actual de la presión demográfica y del calentamiento global, la desalación es una técnica valiosa en vista de la abundancia de materias primas: el agua de mar y el agua salobre. Existe también un fuerte incremento (10% por año) del volumen de agua producida por desalación, el cual está actualmente alrededor de 45 millones de m³/día. Las plantas de desalación están aumentando en muchos países (Libia, Australia, Gran Bretaña), sobre todo en los países con escasez de agua (Argelia, Libia, países del Golfo), e igualmente en los países de Europa meridional (España, Italia, Grecia) y en Estados Unidos.

Agua salobre

Se le llama agua salobre al agua no potable de salinidad inferior a la del mar. Las aguas salobres contienen entre 1 y 10 gramos de sales por litro. Son a veces aguas de superficie, pero más a menudo son aguas subterráneas que se han cargado de sales en su travesía por el suelo. Su composición depende entonces de la naturaleza del suelo por el cual se infiltró. Las principales sales disueltas son CaCO₃, CaSO₄, MgCO₃ y NaCl.

Agua de mar

La característica más importante del agua del mar es su salinidad (ver Cuadro 1), es decir, su contenido total de sales (cloruros de sodio y magnesio, sulfatos y carbonatos).

La salinidad media del agua del mar es de unos 35 g / L. Sin embargo este valor es muy variable según la región y la temporada.

Por ejemplo: la del Mar Báltico de 7 g /L, la del Mar Mediterráneo 36 a 39 g /L, la del Golfo Pérsico 40 a 70 g / L y la del Mar Muerto 270 g / l.

Sal	Concentración	
NaCl	27,2 g/l	78%
MgCl ₂	3,8 g/l	11%
MgSO ₄	1,7 g/l	5%
CaSO ₄	1,26 g/l	3,5%
K ₂ SO ₄	0,86 g/l	2,4%

Fuente: Degrémont Suez, 2005.

EL MERCADO DE LA DESALACION

Actores

Fabricantes de plantas de destilación: SIDEM-Entropie (filial de Veolia), Fisia Italmimpianti (Sociedad Italiana), Doosan (Corea del Sur), GE Water (EE.UU.), Suez Energy International (Francia), IDE (Israel).

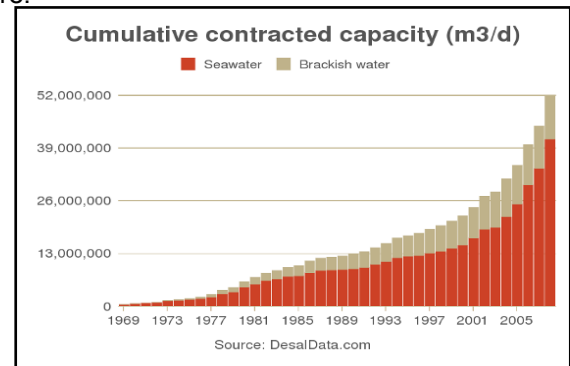
Fabricantes de plantas de ósmosis inversa: OTV (filial de Veolia), Hyflux (Singapur), GE Ionics (EE.UU.), Degrémont (Francia), Sadyt (España), Cadagua (España), Acciona Agua (España), Aqualia (España), Befesa Agua (España).

Proveedores de membranas: Dow Filmtec (EE.UU.), Hydranautics (Japón), Toray Industries (Japón), Woongjin Chemical (Corea del Sur). (Desaldata.com)

Capacidad instalada

La capacidad de desalación de aguas saladas y salobres aumenta cada año un casi 10%, mientras que el número de nuevos contratos ha aumentado mucho en 10 años. En total, la producción es de 52 Mm³/día ó 42Mm³ de agua de mar desalinizada y de 10Mm³ de agua salobre.

Cuadro 2: Distribución de la producción de agua desalada (agua de mar)	Mm ³ /día	%
Oriente Medio	21	50
América del Norte	7,56	18
Asia	5,46	13
Europa	5,46	13
África	2.52	6
Total	42	100
<i>Fuente : DesalData.com</i>		



Distribución al primero de enero de 2008 (agua de mar):

Históricamente, los países del Golfo fueron los primeros en utilizar la desalación y en la actualidad son los mayores productores de agua desalada en el mundo. Algunos países como Qatar dependen al 95% de este recurso. En Europa, España es el mayor productor de agua desalada.

Figura 1 : Capacidad de desalación en el mundo (Fuente : desaldata.com)

PROCESOS

Para desalar el agua existen diferentes técnicas, siendo algunas más adecuadas para un contexto que otro. Actualmente utilizamos cinco técnicas agrupadas en dos categorías: los procesos de destilación y los procesos de membrana. Ambos operan bajo el mismo principio general.

Esquema general de una desalación

Se puede dividir una estación de desalación en 4 puestos principales:



El suministro de agua de mar se puede hacer ya sea por toma directa o a través de pozos costeros. Por medio de este último sistema se obtiene agua libre de turbidez, lo cual evita los tratamientos preliminares.

Tratamiento preliminar:

- 1) Cloración: Previene la proliferación de organismos vivos. Evita la obstrucción de tuberías.
- 2) Filtración: Protege las bombas y asegura el buen funcionamiento de los aspersores.
- 3) Anticostra: la destilación favorece la precipitación del carbonato de calcio depositado en la pared de los intercambiadores y reduce la transferencia de calor.

La instalación de desalación

- 1) los procesos de destilación: el agua de mar calentada produce vapor que una vez condensado permite obtener agua pura.
- 2) los procesos de membrana: el agua es separada de las sales disueltas por membranas selectivas.

El post-tratamiento permite potabilizar el agua en 2 etapas (al salir de la unidad de desalación, el agua no es potable debido a que se ha desmineralizado).

- 1) Corrección de la corrosividad: el tratamiento consiste en añadir Ca (OH) 2 ó CaCO₃.
- 2) Desinfección final: a pesar de que algunos procesos (ósmosis inversa) retengan todos los microorganismos, es necesario garantizar la desinfección a la salida de la fábrica.

PROCESOS DE DESTILACIÓN

Estos procesos se han aplicado desde hace bastante tiempo en los buques, donde los motores diesel emiten una cantidad importante de calor de recuperable.

Destilación simple efecto

Su principio es simple: reproduce el ciclo natural del agua.

- 1) En un espacio cerrado, un serpentín de calefacción lleva a ebullición el agua de mar
- 2) El vapor producido se condensa al entrar en contacto con un segundo serpentín alimentado por agua fría de mar.
- 3) Una bomba extrae el agua condensada, una segunda el agua de mar concentrada o salmuera.

Esta primera solución es fácil de aplicar pero no ofrece más que un bajo rendimiento. Además es solo utilizada en buques que cuentan con una sola fuente de energía térmica.

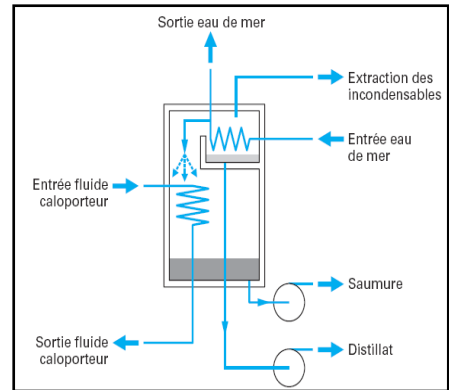


Figura 3 : Destilador simple efecto (Fuente : P. Danis, 2003)

Destilación multiefecto (MED)

El evaporador MED se compone de varias células individuales consecutivas, en las que se disminuye la presión (y temperatura) del primero (caliente) al último (frío). Cada célula (también llamada efecto) contiene un conjunto de tubos. La parte superior de este conjunto, es regada con agua de mar que fluye alrededor de los tubos por gravedad.

El calor liberado durante la condensación calienta el agua de mar al exterior de los tubos, evaporándola parcialmente. Después de la evaporación, el agua de mar se concentra formando así la salmuera en la parte inferior de la celda.

El vapor creado por la evaporación del agua de mar se utiliza como medio de calefacción para el paso siguiente donde se repite el proceso.

En la última celda, el vapor se condensa en un intercambiador de calor. Este intercambiador es enfriado por el agua de mar.

En la salida del condensador final, el agua de mar calentada es utilizada para alimentar la unidad, la otra parte se descarga en el mar. La salmuera y el destilado son recuperados en cada celda donde son extraídos por bombas centrífugas.

Esta solución ofrece un mejor rendimiento en comparación con la primera.

Se puede obtener una mejora significativa en la eficacia del sistema mediante la "compresión de vapor (MED TVC) (P. Danis, 2003):

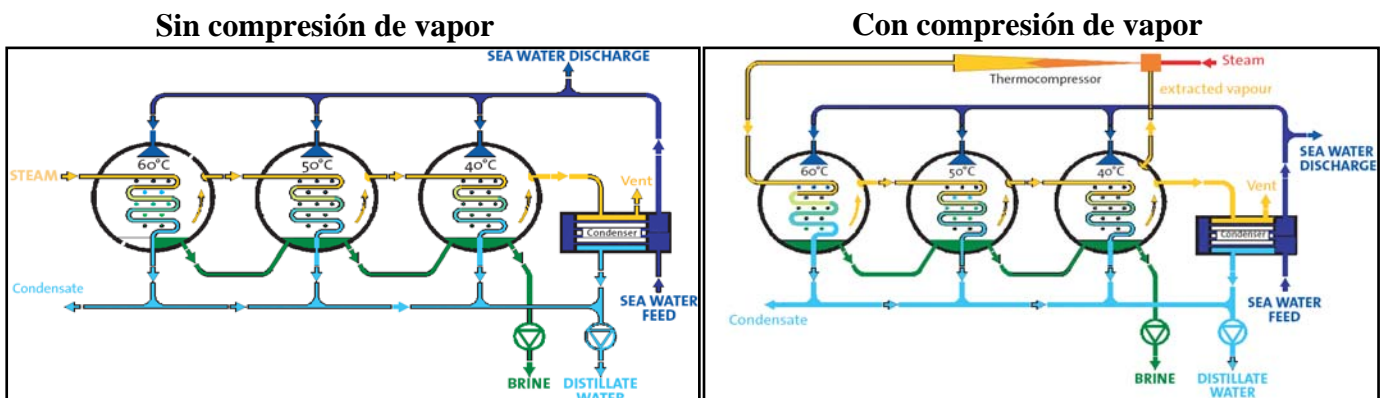


Figura 4 : Destilador multiefectos (Fuente : sidem-desalination.com)

capacidad típica / costo correspondiente	10 000 m ³ / día / 0,64 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	272 520 m ³ / d (Al Hidd 2, Arabia Saudita)

Proceso de evaporación súbita o MultiFlash (MSF)

Esta tecnología se introdujo en 1960 con el fin de evitar los problemas de incrustación que afectan a los procesos de destilación de múltiples efectos.

El agua salada se introduce en T0 y serpentea a través de las distintas cámaras condensando vapor entre tanto. A continuación pasa a través de un calentador donde alcanza Tmax y luego es introducida en la parte baja de las cámaras donde se evapora para luego condensarse en el serpentín. Se recupera el agua condensada, mientras que la salmuera es evacuada. (Ver calefacción por medio de central térmica o nuclear)

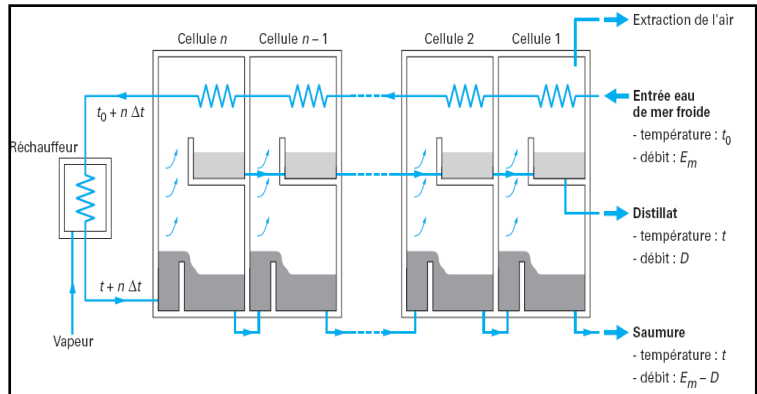


Figura 5 : Destilador por efecto flash
(Fuente : Danis P., 2003)

capacidad típica/ costo	25 000 m ³ / día / 0,88 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	880 000 m ³ / d (Shoiba 3, Arabia Saudita)

Destilación por compresión de vapor (MVC)

En este proceso, el agua es llevada a ebullición en un recinto aislado térmicamente.

El vapor producido es aspirado por un compresor, el cual eleva la temperatura de saturación.

Este vapor pasa luego a través de un haz tubular y se condensa causando la ebullición del agua salada.

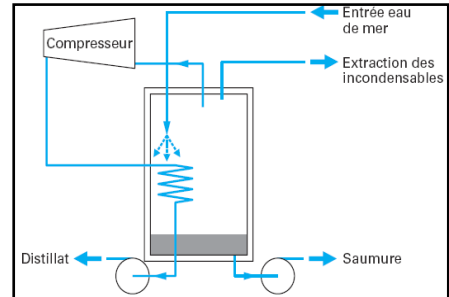


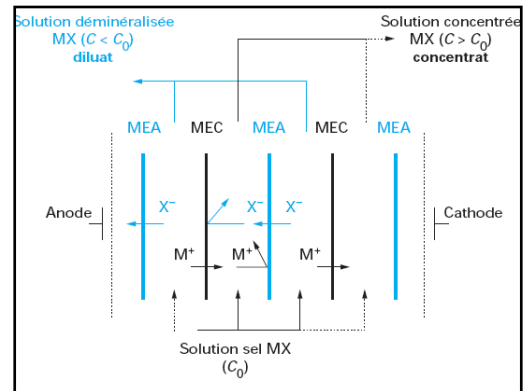
Figura 6 : Compresión mecánica de vapor
(Fuente : Danis P., 2003)

capacidad típica/ costo correspondiente	3 000 m ³ / día / 0.56 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	80 000 m ³ / d (Azzawiya, Libia)

PROCESOS a base DE MEMBRANAS

Electrodialisis (ED)

El principio de funcionamiento se muestra esquemáticamente en la figura x. Los dos compartimientos son alimentados con una solución salina MX (M +, X-) de concentración C0. Bajo el efecto de la corriente, los cationes M + que emigran hacia el cátodo, atraviesan los MEC y son detenidos por los MEA. De la misma manera los aniones X- que emigran hacia el ánodo, atraviesan la MEA y son detenidos por el MEC. De este manera se obtienen dos soluciones: una solución MX "desmineralizada", cuya concentración es inferior a la concentración de entrada, y una solución MX "concentrada", cuya concentración es superior a la de entrada.



capacidad típica/ costo	3 000 m ³ /día / 0.56€/ m ³
Capacidad máxima en servicio	80 000 m ³ /día (Azzawiya, Libia)

ósmosis inversa (OI)

Existen varias técnicas de filtración de agua (filtración convencional, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa) según el área de aplicación. Estas técnicas se distinguen principalmente por el tamaño de las partículas que detienen. El caso extremo es el de ósmosis inversa, que detiene todos los solutos en el agua, pero permite el paso del disolvente.

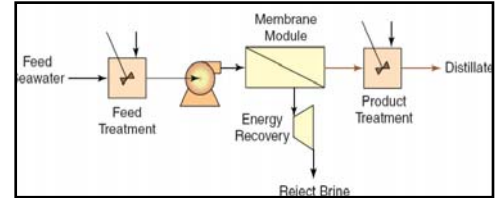
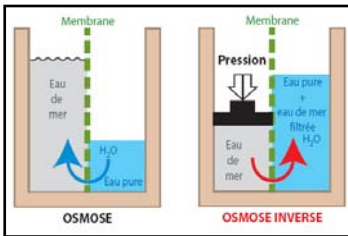


Figura 8 : Tratamiento por ósmosis inversa

(Fuente : Wilf M., 2005)

La ósmosis es un fenómeno natural. Tenemos en cuenta dos soluciones de diferente concentración salina separadas por una membrana, el agua se desplaza espontáneamente de la solución diluida a la más concentrada. Si aplicamos una presión superior a la presión osmótica (presión de equilibrio), el disolvente va a emigrar de la solución concentrada a la solución diluida. Es la ósmosis inversa.



La presión osmótica π es igual a: $\pi.V = n.R.T$ $\pi = i.C.R.T$

Ejemplo: con el agua de mar a 35 g / L a 20 ° C: $i = 2$ (Cl- y Na +), $MNaCl = 58,5$ g / mol $2 \times 35 / 58.5 \times 0.082 \times 293 = \pi = 28,7$ bar => presión mínima para filtrar el agua de mar.

Figura 9 : Principio de la ósmosis inversa (Fuente : veoliaeau.com)

capacidad típica/ costo	6 000 m³/día / 0.56€/m³
Capacidad máxima en servicio	375 000 m³/d (Sulaibiya, Koweït)

Destilación con membranas (DM)

La destilación con membrana es una nueva tecnología para la desalación. En esta tecnología: la fuerza que permite la desalación es la diferencia de presión de vapor de agua a través de la membrana, en vez de la presión total. Las membranas de DM son hidrófobas, lo que permite el paso del vapor de agua y no del agua líquida.

El gradiente de presión de vapor es creado por el calentamiento del agua, aumentando así su presión de vapor. El principal consumo energético es el térmico. Se espera que el costo total de agua producida sea inferior a \$ 0,50 / m3, y hasta \$ 0,26 / m3. Esta técnica se encuentra aún en fase experimental.

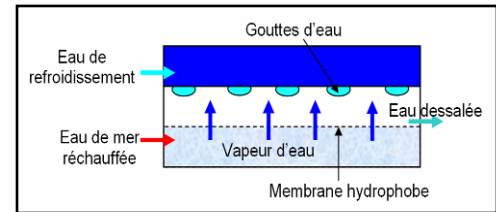


Figura 10 : Principio de la destilación con membranas

(Macedonio F., Drioli E., 2008)

SISTEMA HÍBRIDO

La desalación por sistema híbrido combina dos o tres procesos para ofrecer una mejor solución técnica y económica.

Los tres elementos que se incluyen son:

- Una unidad de destilación en general "Multiflash" (MSF);
- Una unidad de ósmosis inversa OI;
- Una central térmica.

Por lo tanto, es posible satisfacer, a un costo más bajo, la demanda de agua y electricidad. En efecto, contrariamente a la electricidad, el agua puede ser almacenada durante los períodos de baja demanda de energía. La totalidad o parte del exceso de producción de electricidad se utiliza para la desalación por ósmosis inversa. La producción puede variar rápidamente, lo que permitiendo ajustar la producción en función de la necesidad. Otra ventaja importante es la regulación de la temperatura de alimentación mediante el uso de agua de refrigeración de la destilación. Funcionando a altas temperaturas (hasta 40 ° C), se reduce el número de unidades de ósmosis OI. (A. Maurel, 2006)

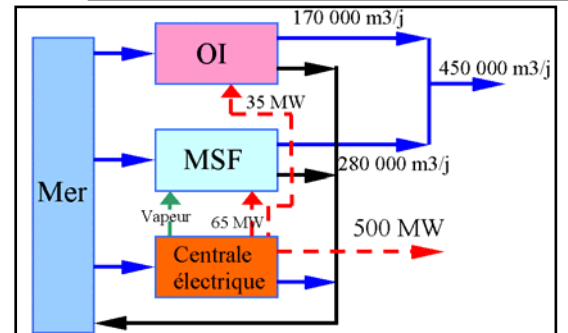


Figura 11 : Sistema híbrido (Maurel A., 2006)

Capacidad típica / costo correspondiente	Una sola planta de este tipo, costo estimado de 0,41 € / m3
Capacidad máxima en servicio	454 000 m³ / d (Fujairah 1, Emiratos Árabes Unidos)

FUENTES DE ENERGÍA

En términos generales y en particular para las grandes fábricas, el costo más bajo se obtiene mediante el acoplamiento de una central eléctrica y una unidad de producción de agua; se utiliza el vapor de escape de las turbinas para alimentar las unidades de desalación.

Turbina de gas y planta de desalación

La potencia eléctrica es producida por una turbina de gas (alimentada por combustibles fósiles). El calor generado por la planta es utilizado para producir vapor a presión a través de un intercambiador de calor. Este vapor es utilizado en la planta de desalación para producir agua dulce. Se produce de esta forma 1.000 MW de electricidad por 450.000 m³/día de agua.

TURBINA DE VAPOR Y planta de Desalación

Esta configuración combina una caldera de alta presión con una turbina de vapor para generar electricidad y suministrar vapor de baja presión para la unidad de desalación.

La proporción potencia/agua producida es de 500MW de electricidad para 450.000 m³/día de agua.

Planta de energía nuclear y planta de desalación

Recientemente se han realizado proyectos en los que se asocian las centrales nucleares con las plantas de desalación. Esta combinación es muy eficaz puesto que permite producir agua dulce a bajo costo.

→ Precio bajo de desalación con planta nuclear (posible uso en la agricultura con mayor capacidad). (Misra B.M., 2004 ; Misra B.M., 2005)

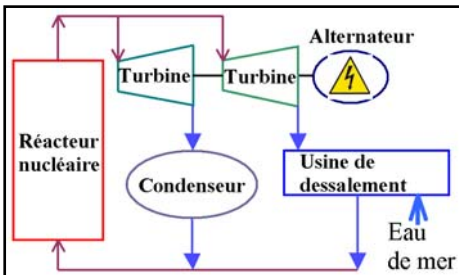


Figura 12 : Planta de energía nuclear y planta de Desalación (IAEA, 2000)

• Etude CEA/FRAMATOME publiée dans International Journal of Nuclear Desalination, vol 1, n 1, 2003.
Réacteur 600 MW_{th} → 284 MW_e électricité + 42.000 m³/jour eau douce

Estimation du coût du m ³ d'eau douce en \$/m ³		
Charges financières 950 \$/m ³ /jour 20 ans à 5 % 95 % de disponibilité	$\frac{950 \times 0,08}{365 \times 0,95} = 0,22$ \$/m ³	51 %
Energie Thermique Electrique 2 kWh/m ³ @ 3,5 cents US/kWh	0 $2 \times 0,035 = 0,07$ \$/m ³	16 %
Exploitation – Maintenance 5% de l'investissement	$\frac{950 \times 0,05}{365 \times 0,95} = 0,14$ \$/m ³	33 %
Coût total	0,43 \$/m³	100 %

Soit 0.31 €/m³

Desalación mediante ENERGÍAS RENOVABLES

Destilador solar directo

Teniendo en cuenta su baja productividad (alrededor de 4 litros / día / m²) y su alto costo de producción (entre 6,5 y 13 € / m³), esta técnica está reservada para las instalaciones pequeñas y alejadas de cualquier otra fuente de energía. (A. Maurel, 2006)

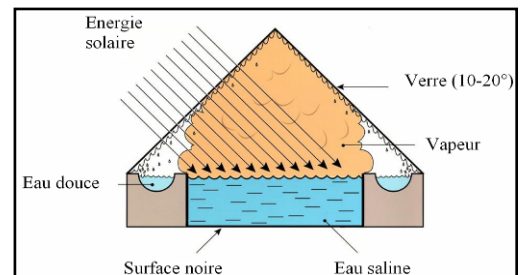


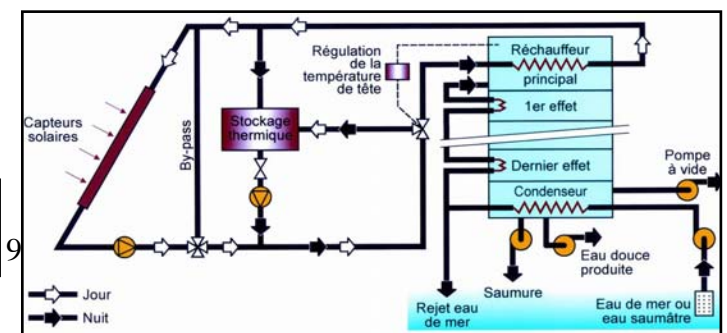
Figura 13 : Destilador solar directo (Fuente : Maurel A., 2006)

Capacidad típica / costo correspondiente	1 m ³ /día -10 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	36 m ³ /día (2 Gwadar, Pakistán)

Destilación y energía solar

capacidad Típica / costo correspondiente	10 m ³ /día - 8 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	72 m ³ /día (Almería, España)

Figura 14 : Destilador a efectos múltiples con energía solar (Source : Maurel A., 2006)



Ósmosis inversa y energía solar (fotovoltaica)

Este proceso que sólo utiliza energía eléctrica o mecánica, es relativamente sencillo (una bomba de alta presión), además es el más eficiente en términos de energía o sea 2kWh/m³ en el caso del agua de mar.

Ejemplo: UNIDAD de desalación solar "ÓSMOSIS INVERSA + FOTOVOLTAICO- PUEBLO de KSAR GHILÈNE EN TÚNEZ (pueblo de 300 habitantes situado al sur de Túnez región de Kébili).

unidad de desalación	condiciones de funcionamiento
Salinidad del agua salobre = 4,5 g / litro	(Verano = 35 Kwh./d) o sea, 7.5 h/d x 2 m ³ /h = 15 m ³ /día
Capacidad ósmosis inversa = 2 m ³ /h tasa de conversión =70%	(Invierno = 16 k.o./día) o sea, 3.75 h x 2 m ³ /h = 7.5 m ³ / d
Potencia requerida = 3.57 kWatt	costo del agua producida
Consumo de energía = 1,70 Kwh./m ³	# 5,6 € / m ³ contra 8,5 € / m ³ para el transporte por camión

Ósmosis inversa y energía eólica

1) caso de las unidades de pequeña capacidad (0,5 hasta 200m³/día)
Estas pequeñas unidades operan con un almacenamiento de energía en batería, lo que implica elevados costos (duración limitada, pérdida de energía,...).
Dichas unidades deben tener en cuenta un entorno difícil:
Clima: altas temperaturas, humedad, viento, arena...
contexto socioeconómico: baja tecnología, problemas de mantenimiento a largo plazo.
(Forstmeier M., 2007)

2) Caso de grandes unidades (> 1000 m³/día)
Descartando el uso de batería, es necesario realizar una conexión a la red eléctrica para superar los vaivenes de la energía renovable, asegurando así el funcionamiento de la unidad de desalación las 24 horas.

capacidad típica / costo	10 m ³ /día - 6 € / m ³
Capacidad máxima en servicio	6000 m ³ /día (Marruecos)

Se deben de tener en cuenta dos características esenciales de las energías renovables:

- su alto costo
- la discontinuidad: alternancia regular entre el día y la noche para el proceso solar, cambio arbitrario de clima (sol y viento) por lo que se requiere almacenar energía. (A. Maurel, 2006)

COMPARACIÓN

Comparación entre las diferentes técnicas

A) Agua salobre

Cuadro 3 : Comparacion de los procesos	Osmosis inversa	Electro diálisis
Temperatura de funcionamiento (°C)	< 45	<45
Energía utilizada	mecánica (a través de la electricidad)	electricidad
Consumo eléctrico (kWh / m ³)	4-7	1
Salinidad del agua bruta (g / l)	1 – 45	0,1 – 3
Salinidad del agua tratada (mg / l)	< 500	< 500
Capacidad de un modulo (m ³ /j)	1 – 10.000	1 – 12.000
Ventajas	Modularidad	

→ La electrodiálisis compite con la OI por debajo de 3mg / L de sales.

B) Agua de mar

La desalación es un proceso de alto consumo de energía. Para las plantas MED y MSF, la fuente principal de energía es el calor, aunque se necesita un poco de electricidad para el funcionamiento de las bombas y de los auxiliares. La ósmosis inversa utiliza solamente energía eléctrica, siendo esta más "noble".

Cuadro 4: Comparación de los procesos	MSF	MED	MED-TVC	MVC	OI
Temperatura de funcionamiento (° C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45
Principal fuente de energía	térmica	térmica	térmica	Mecánica	Mecánica
Consumo térmico (kWh / m³)	12	6	21	No aplica	No aplica
Consumo eléctrico (kWh / m³)	3.5	1.5	1.5	8-14	4-7
Salinidad del agua bruta (g / l)	30 – 100	30 – 100	30 – 100	30 – 50	1 – 45
Salinidad del agua tratada (mg / l)	< 10	< 10	< 10	<10	< 500
Capacidad de un modulo (m³ / d)	5.000-60.000	500 – 12.000	100 – 20.000	10 – 2.500	1 – 10.000
ventajas	Tecnología fiable	20% más barato que MSF	Capacidad, solidez	Simplicidad	Modularidad
Inconvenientes	inversión consumo	Menos capacidad que MSF	consumo	Capacidad limitada	Fragilidad

Cada técnica detiene una particularidad que la hará ser más apropiada en un caso que en otro. Así, las técnicas térmicas se adaptan a salinidades y a temperaturas altas, mientras que las tecnologías de membranas son más baratas en condiciones de salinidad media y de baja temperatura (alrededor de 25 ° C).

Por otro lado, el costo de la energía es muy diferente de un país a otro. Por ejemplo, en los países productores de petróleo, el barril es muy barato y por lo tanto las autoridades prefieren las técnicas térmicas. Por otra parte, la falta de combustibles fósiles favorecerá la ósmosis inversa.

COMPARACIÓN ECONÓMICA

Las siguientes tablas permiten comparar el costo del agua producida según la técnica empleada con respecto a una determinada capacidad (independientemente de la fuente de energía). Se puede ver claramente el efecto de la capacidad en el costo final. El efecto de escala es importante. (Wittholz M.K. et al., 2008 ; Frioui S., Oumeddour R., 2008)

Capacidad (m3/día) 10000				
Tecnología	OI (agua salobre)	OI (agua de mar)	MSF	MED
Inversión (€ / m3/día)	575	1427	3408	2023
Costo del agua (€ / m3)	0.27	0.67	1.40	0.83

Capacidad (m3/día) 50000				
Tecnología	OI (agua salobre)	OI (agua de mar)	MSF	MED
Inversión (€ / m3/día)	376	1050	2122	1539
Costo del agua (€ / m3)	0.18	0.50	0.87	0.63

Capacidad (m3/día) 275000				
Tecnología	OI (agua salobre)	OI (agua de mar)	MSF	MED
Inversión (€ / m3/día)	241	756	1286	1153
Costo del agua (€ / m3)	0.11	0.36	0.53	0.48

Capacidad (m3/día) 500000				
Tecnología	OI (agua salobre)	OI (agua de mar)	MSF	MED
Inversión (€ / m3/día)	206	676	1078	1042
Costo del agua (€ / m3)	0.10	0.32	0.44	0.43

Costes de desalación, por tipo de energía (IC Karagiannis, PG Soldatos, 2008):

Costes en función del tipo de energía	Agua de mar	Agua salobre
Convencionales	0,35€ - 2,70€	0,21€ - 1,06€
eólica	1,00€ - 5,00€	
Fotovoltaica	3,14€ - 9,00€	4,50€ - 10,32€
Solar	3,50€ - 8,00€	

Dificultades encontradas en las plantas de desalación

Sea cual sea el método utilizado, no está exento de inconvenientes:

En la toma de agua:

La extracción de agua puede alterar el fondo del mar e perturbar las rutas de navegación.

En el vertido de la salmuera:

La salmuera se vierte en el mar lo más lejos posible de la costa.

Salinidad y temperatura: La exposición continua a una salinidad superior (1,5 a 2 veces a la media) y a una temperatura más alta (hasta + 5 ° C) perjudica a determinadas especies mientras que favorece a otras.

En España el alto contenido salino de las evacuaciones de la ósmosis inversa, puede afectar negativamente a los bancos de plantas acuáticas Posidonia, clasificados como hábitat prioritario por la directiva europea para la conservación de los habitats de fauna y flora. (Sánchez-Lizaso J.L., 2008 ; WWF, August 2006)

Biocida: En la mayoría de plantas de desalación, se le agrega cloro al agua para reducir el taponamiento, formando así hipoclorito e hipobromitos en el agua de mar.

El dióxido de cloro se presenta actualmente como una alternativa a la dosificación de cloro. El dióxido de cloro es un oxidante fuerte, pero forma menos trihalometanos que el cloro. (Lattemann S., T. Höpner, 2008)

Metales pesados: Las aleaciones cobre-níquel son utilizadas generalmente como material para fabricar intercambiadores de calor. La contaminación de la salmuera con el cobre causada por la corrosión puede ser una fuente de contaminación, ya que a dosis altas el cobre es tóxico. (Lattemann S., T. Höpner, 2008)

Anti costra: problemas de eutrofización debido a la presencia de polifosfatos. (Lattemann S., T. Höpner, 2008)

Coagulantes (OI): el cloruro férrico utilizado en las estaciones de ósmosis inversa aumenta la turbidez de la salmuera a la salida, pudiendo perjudicar a la fauna y flora. (Lattemann S., T. Höpner, 2008)

Agentes antiespuma (térmico): El poliglicol contenido en estos agentes es poco biodegradable. (Lattemann S., T. Höpner, 2008)

El principal inconveniente es en la que el impacto de la salmuera en el medio ambiente, especialmente en el caso de la ósmosis inversa, donde los vertidos son más concentrados. Si la estación está situada a orillas del mar, se utilizarán difusores para diluir el concentrado lo más lejos posible de las costas. Si la planta se encuentra en el interior (lo que ocurre a veces en el caso del agua salobre), se utilizan los pantanos salinos para evaporar el agua residual de la salmuera. (A. Maurel, 2006)

Por otra parte, si se toma en cuenta que la producción de agua requiere mucha energía, se emitirán igualmente elevadas cantidades de gases de efecto invernadero debido al funcionamiento de las centrales térmicas (Cuadro 5).

Cuadro 5 : Emisiones toxicas de centrales juntas con procesos MSF, MED y RO (Nisan S., 2008.)

Centrales	MSF (Mt/year)				MED (Mt/year)				RO (Mt/year)			
	CO ₂	SO _x	NO _x	Particulas	CO ₂	SO _x	NO _x	Particulas	CO ₂	SO _x	NO _x	Particulas
Charbon	197.28	0.25	0.41	0.03	105.86	0.1327	0.2166	0.0166	24.06	0.0302	0.0492	0.00377
Diesel	161.3	0.98	0.22	0.02	86.41	0.5249	0.1197	0.0130	19.20	0.1166	0.0266	0.00288
Turbine à gaz, cycle combiné	105.61	0.01	0.17	0.01	55.69	0.00583	0.0913	0.0051	9.60	0.001	0.01574	0.00089

CONCLUSIÓN

Las instalaciones de destilación son robustas. Son especialmente adecuadas para el agua caliente, muy salada y con características variables.

La destilación multiefecto se reservó originalmente a las pequeñas unidades. Después de sucesivas mejoras, es más competitiva e incluso supera ahora a la técnica de MSF, si combinamos sus ventajas con las de la compresión de vapor.

La ósmosis inversa es una técnica más reciente que proporciona ahorros efectivos de energía.

Gradualmente se fue imponiendo frente a los usuarios reticentes a esta técnica tan diferente a la destilación. Mientras tanto, los fabricantes de membranas mejoraron sus productos, de modo que hoy en día la ósmosis inversa es el proceso que compite con la destilación.

Una solución reciente consiste en añadir una unidad de ósmosis inversa al dúo “central térmica y destilación”. La ósmosis inversa consume electricidad cuando la demanda es baja, mientras que la destilación puede funcionar en cualquier momento del día con vapor de baja presión. Esto proporciona un híbrido lo suficientemente flexible como para adaptarse a los cambios en la demanda de agua y electricidad, mientras se reduce al mínimo el consumo de energía. La ósmosis inversa y la destilación pueden ser dos procesos complementarios.

En cuanto a las energías renovables acopladas a las plantas de desalinización, su alta inversión y su baja competitividad no les permiten ser utilizadas a escala industrial. Sin embargo en algunos casos, la desalación eólica o solar de pequeña capacidad para lugares aislados, puede ser una solución más económica que las técnicas convencionales.

Recientemente, han surgido dos alternativas prometedoras. La primera es una nueva técnica que proporcionan una calidad del agua muy buena a costos mucho más bajos que las técnicas convencionales: es la destilación por membrana.

La otra alternativa es sustituir las centrales térmicas convencionales por centrales nucleares para proporcionar calor a las plantas de desalinización.

Nos beneficiamos pues en dos campos : no hay liberación de gases de efecto invernadero y se obtiene una disminución en el precio global de la producción de agua. Esta solución permitiría proponer la desalación para el riego y no sólo para el consumo doméstico.

Bibliografía :

- Danis P., juin 2003. *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J 2700, 15 p.
- DesalData, [mis à jour : 01/10/2008]. *Home-DesalData*, Global Water Intelligence. Disponible sur Internet : <http://desaldata.com/> [consulté le 05/11/2008]
- Forstmeier M., 2007. Feasibility study on wind-powered desalination, *Desalination* 203, 463-470
- Frioui S., Oumeddour R., 2008. Investment and production costs of desalination plants by semi-empirical method, *Desalination* 223, 457-463
- Helal A.M.; 2004. Optimal design of hybrid RO, MSF desalination plants, *Desalination* 160, 13-27
- International Atomic Energy Agency, 2000. *Examining the Economics of Seawater desalination Using the DEEP Code*, IAEA, Vienna, Austria. Technical Document 1186.
- Karagiannis I.C., Soldatos P.G., 2008. Water desalination cost literature: review and assessment, *Desalination* 223, 448-456.
- Lattemann S., Höpner T., 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220 (1-3), 15 p.
- Maurel A., 2006. *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. Paris, Lavoisier Tec&Doc.
- Macedonio F., Drioli E., 2008. *Pressure-driven membrane operations and membrane distillation technology integration for water purification*, *Desalination* 223, (396-409).
- Degrémont Suez, 2005. *Mémento technique de l'eau*. Rueil Malmaison, Degrémont, 2 tomes, 1718 p.
- Misra B.M., 2004. Role of nuclear desalination in meeting the potable water needs in the water scarce areas in the coming decades, *Desalination*, 166, 1-10
- Misra B.M., 2005. *Desalination of seawater using nuclear energy*, *Division of Nuclear Power*, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
- Nisan S., 2008. A Comprehensive economic evaluation of desalination systems, using renewable, fossil fuelled based and nuclear energies, including external environmental costs, *Desalination*, 229, 125-146.
- Sánchez-Lizaso J.L., 2008. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants *Desalination* 221, 602-607.
- Tian L. et al, 2004. Economic evaluation of seawater desalination for nuclear heating reactor with multi-effects distillation, *Desalination* ,180, 53-61
- Wilf M., 2005. Optimization of seawater RO system design, *Desalination* 173, 1-12.
- Wittholz M.K., O'Neill B.K., Colby C.B., D. Lewis, 2008. Estimating the cost of desalination plants using a cost database, *Desalination* 229, 10-20.
- WWF, August 2006. *Rich Countries, Poor Water*. Zeist (NI) WWF.