

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

Farid TATA-DUCRU  
[comptech@orange.fr](mailto:comptech@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](http://www.agroparistech.fr)

**Agence Française de Développement**  
5, rue Roland Barthes  
75598 PARIS Cedex 12  
FRANCE  
TEL. 01 53 44 31 31  
TEL INT. + 33 1 53 44 31 31  
FAX 01 44 87 99 39  
FAX INT. + 33 1 44 87 99 39  
[www.afd.fr](http://www.afd.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 250m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 CaCO<sub>3</sub>, le CaSO<sub>4</sub>, le MgCO<sub>3</sub> 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 <sub>2</sub>	3,8 g/l	11%
MgSO <sub>4</sub>	1,7 g/l	5%
CaSO <sub>4</sub>	1,26 g/l	3,5%
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	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 Italimpianti (Société Italienne), Doosan (Corée du sud), GE Water (USA), Suez Energy International (France), IDE (Israël).

**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 Mm<sup>3</sup>/jour, soit 42Mm<sup>3</sup> d'eau de mer dessalée et 10Mm<sup>3</sup> d'eau saumâtre.

Tableau 2 : Répartition de la production d'eau dessalée (eau de mer)	Mm <sup>3</sup> /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

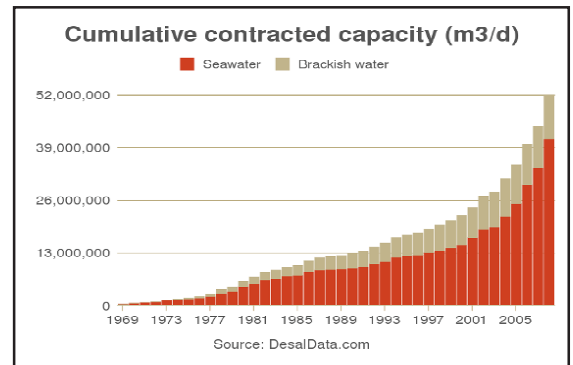


Figure 1 : Capacité de dessalement installée dans le monde (Source : desaldata.com)

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

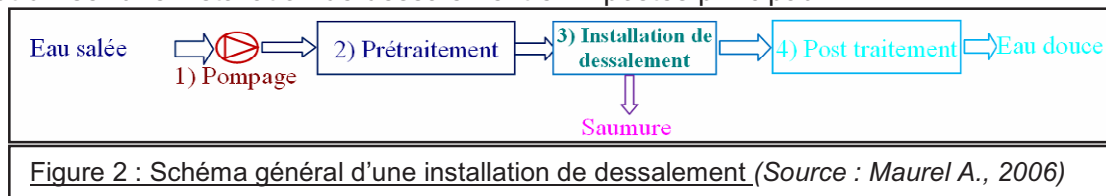
Historiquement, les pays du golfe ont été les premiers à utiliser le dessalement et sont actuellement les plus gros producteurs d'eau dessalée dans le monde. Certains pays comme le Qatar dépendent même à 95% de cette ressource. En Europe, c'est l'Espagne qui est de loin le premier pays producteur d'eau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



➤ **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)<sub>2</sub> ou du CaCO<sub>3</sub>.
- 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.

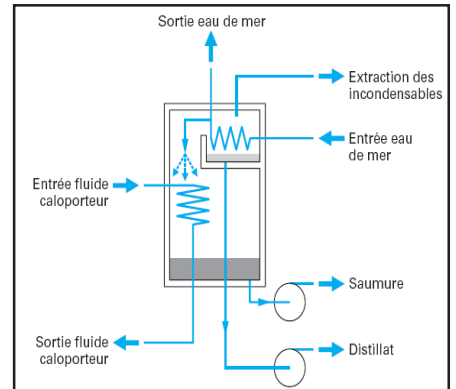


Figure 3 : Distillateur simple effet  
(Source : Danis P., 2003)

### 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):

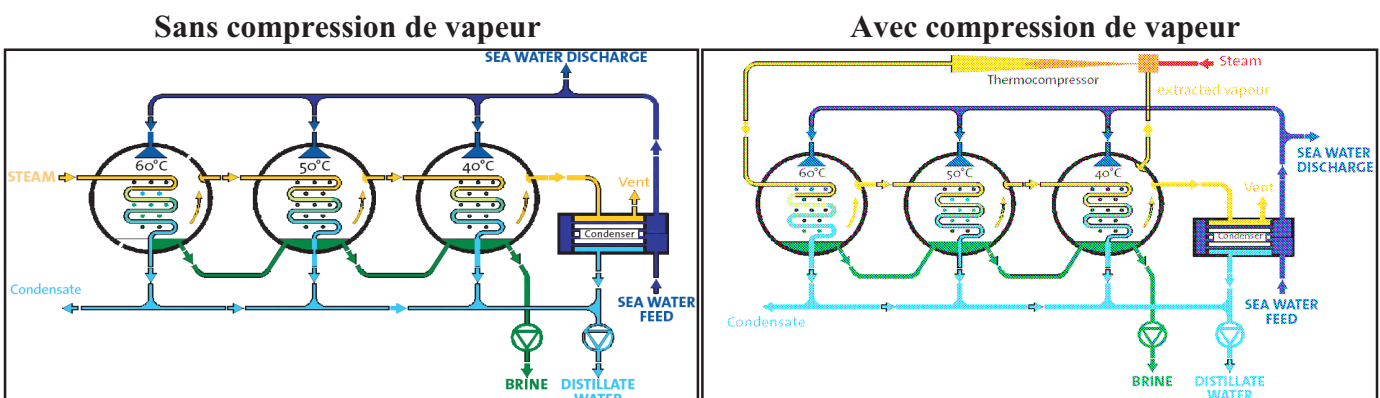


Figure 4 : Distillateurs à effets multiples (Source : sidem-desalination.com)

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

### Procédé par détente successive ou procédé Flash (MSF)

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

L'eau salée est introduite à  $T_0$  et serpente à travers les différentes chambres en condensant de la vapeur au passage. Elle passe ensuite dans un réchauffeur où elle atteint  $T_{max}$  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)

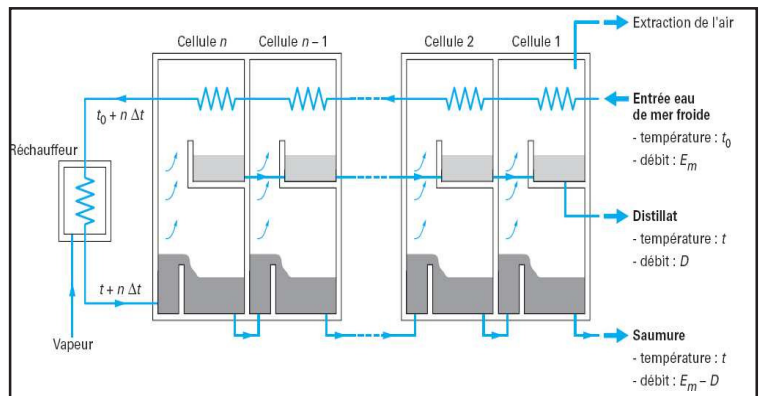


Figure 5 : Distillateur par détente successive  
(Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	25 000 m <sup>3</sup> /jour / 0.88€/ m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	880 000 m <sup>3</sup> /j (Shoiba 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.

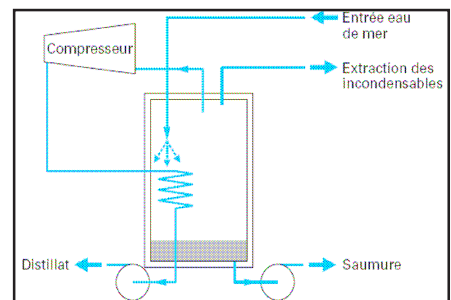


Figure 6 : Compression mécanique de vapeur  
(Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	3 000 m <sup>3</sup> /jour / 0.56€/ m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	80 000 m <sup>3</sup> /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  $C_0$ . 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.

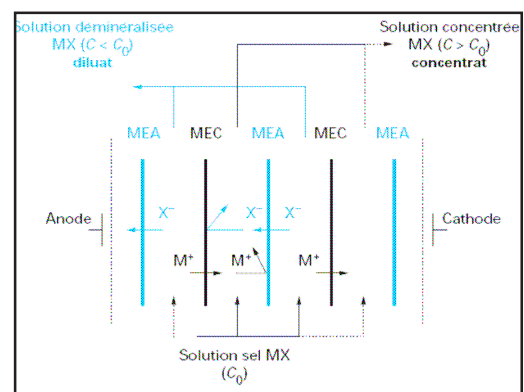


Figure 7 : Electrodialyse  
(Source : Danis P., 2003)

Capacité typique/ coût correspondant	3 000 m <sup>3</sup> /jour / 0.56€/ m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	80 000 m <sup>3</sup> /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.

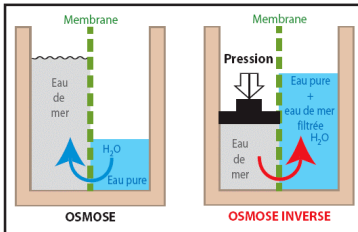


Figure 9 : Principe de l'osmose inverse

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  $\pi$  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.

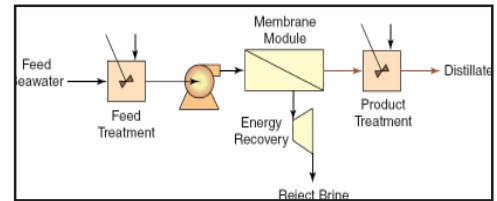


Figure 8 : Filière de traitement par osmose inverse  
 (Source : Wilf M., 2005)

Capacité typique/ coût correspondant	6 000 m <sup>3</sup> /jour / 0.56€/m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	375 000 m <sup>3</sup> /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/m<sup>3</sup>, et même \$0,26/m<sup>3</sup>. Cette technique est encore à l'état expérimental.

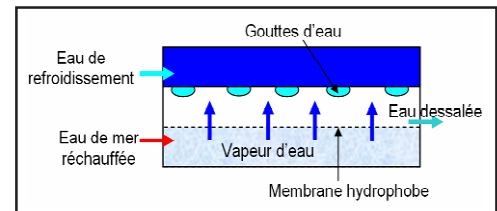


Figure 10 : Principe de la distillation Membranaire  
 (Macedonio F., Drioli E., 2008)

## 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 « multflash » (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

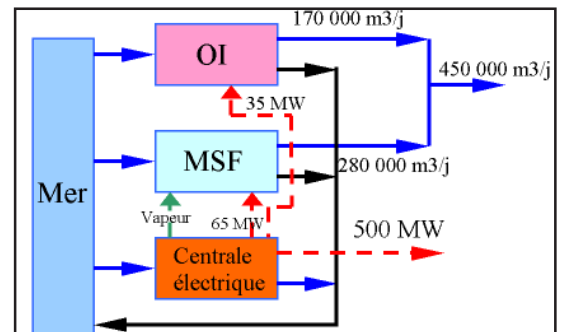


Figure 11 : Installation hybride  
 (Maurel A., 2006)

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 <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	454 000 m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 )

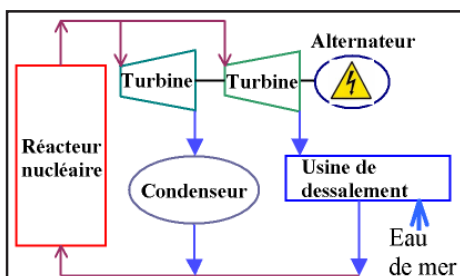


Figure 12 : Couplage centrale nucléaire – usine de dessalement (International Atomic Energy Agency, 2000)

• Etude CEA/FRAMATOME publiée dans International Journal of Nuclear Desalination, vol 1, n 1, 2003. Réacteur 600 MW <sub>th</sub> → 284 MW <sub>e</sub> électricité + 42.000 m <sup>3</sup> /jour eau douce		
<i>Estimation du coût du m<sup>3</sup> d'eau douce en \$/m<sup>3</sup></i>		
<b>Charges financières</b> 950 \$/m <sup>3</sup> /jour 20 ans à 5 % 95 % de disponibilité	$\frac{950 * 0,08}{365 * 0,95} = 0,22$ \$/m <sup>3</sup>	51 %
<b>Energie Thermique</b> 0	0	
<b>Energie Electrique</b> 2 kWh/m <sup>3</sup> @ 3,5 cents US/kWh	$2 * 0,035 = 0,07$ \$/m <sup>3</sup>	16 %
<b>Exploitation – Maintenance</b> 5% de l'investissement	$\frac{950 * 0,05}{365 * 0,95} = 0,14$ \$/m <sup>3</sup>	33 %
<b>Coût total</b>	<b>0,43 \$/m<sup>3</sup></b>	<b>100 %</b>
<b>Soit 0.31 €/m<sup>3</sup></b>		

→ 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/m<sup>2</sup>) et son coût de production élevé (entre 6,5 et 13 €/m<sup>3</sup>), 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 <sup>3</sup> /jour -10€/ m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	36 m <sup>3</sup> /jour (Gwadar 2, Pakistan)

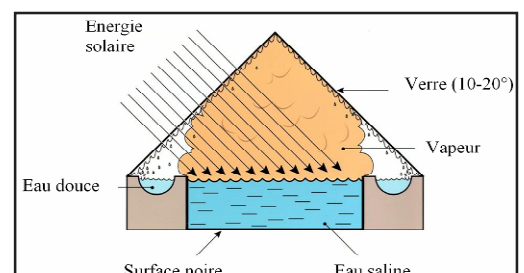
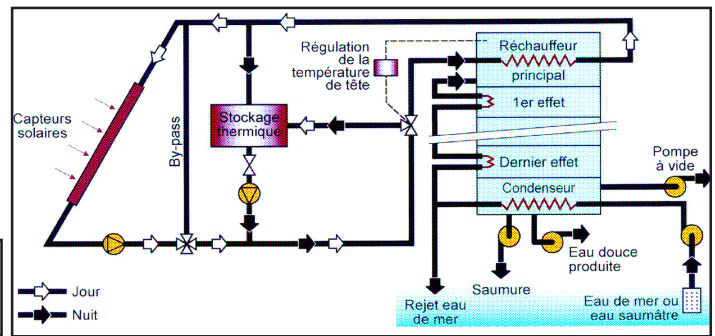


Figure 13 : Distillateur solaire direct (Source : Maurel A., 2006)

## Distillation et énergie solaire

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

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



## Osmose 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/m<sup>3</sup> 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 <sup>3</sup> /h = 15 m <sup>3</sup> /j
Capacité osmose inverse = 2 m <sup>3</sup> /h	Hiver= 16 kWh/j soit = 3,75 h x 2 m <sup>3</sup> /h = 7,5 m <sup>3</sup> /j
Taux de conversion = 70 %	
Puissance nécessaire = 3,57 kWatt	<b>Coût de l'eau produite</b>
Énergie consommée = 1,70 kWh/m <sup>3</sup>	# 5,6 €/m <sup>3</sup> contre 8,5 €/m <sup>3</sup> pour le transport par camion

## Osmose inverse et énergie éolienne

### 1) CAS D'UNITÉS DE PETITE CAPACITÉ (0,5 à 200 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup> /jour - 6€/ m <sup>3</sup>
Capacité maximale en service	6000 m <sup>3</sup> /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

<i>Tableau 3 : Comparaison des procédés</i>	RO	ED
Température de fonctionnement (°C)	< 45	<45
Energie utilisée	Mécanique (via électricité)	Electrique
Consommation électrique (kWh/m <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> /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 ».

<i>Tableau 4 : Comparaison des procédés</i>	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 <sup>3</sup> )	12	6	21	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique (kWh/m <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> /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:

Les 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 trihalométhane 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 <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Particules	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Particules	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	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.