

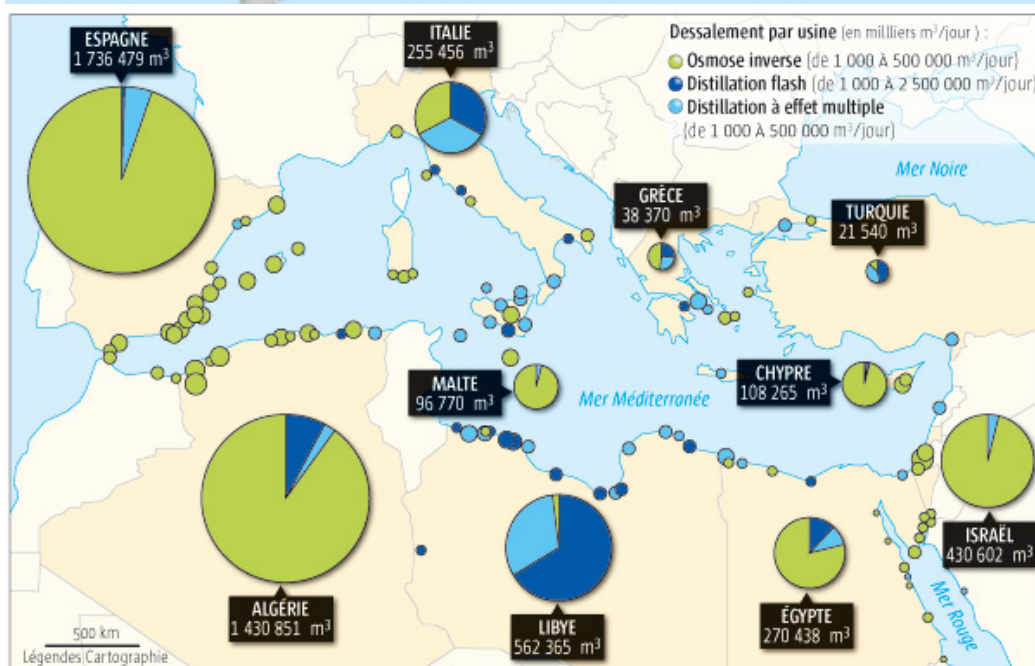
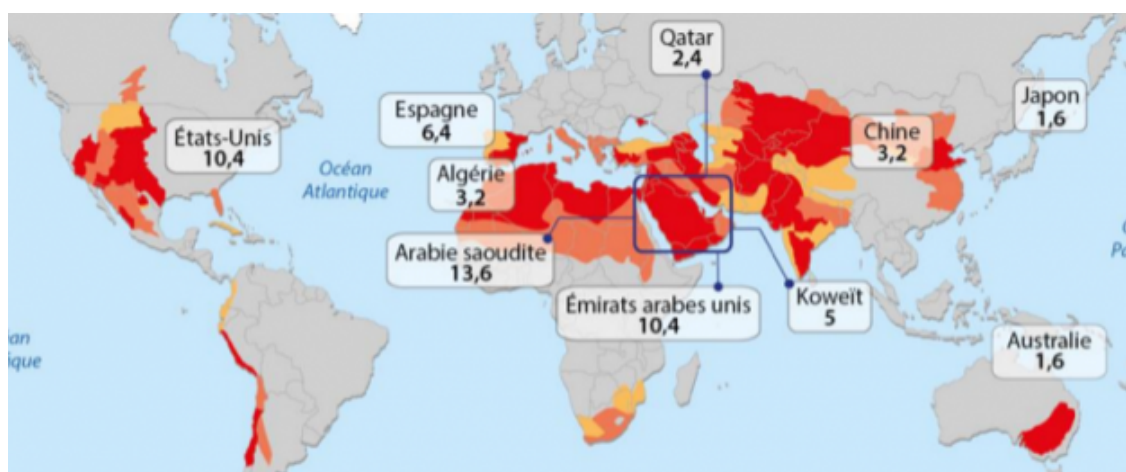


Dessalement de l'eau

1. Pourquoi dessaler de l'eau

Ce qui vient à l'esprit en premier c'est que ce sont les zones désertiques qui devraient profiter du dessalement de l'eau. Mais ce n'est pas toujours le cas car le dessalement n'est mis en œuvre que si la région est certes en stress hydrique (si la demande d'eau est supérieure à la capacité disponible), mais aussi s'il y a une source d'eau salée ou saumâtre pour fournir l'eau à traiter comme la mer, s'il y a suffisamment de personnes pour consommer l'eau et si l'activité économique de la région permet de financer la production de l'eau. Comme l'eau ne se transporte pas facilement il faut que toutes ces conditions soient réunies localement.

La carte ci-dessous présente les régions en stress hydrique dans le monde, de faible en jaune à rouge et les capacités de dessalement en million de m³/jour (2020). La carte suivante présente la situation du bassin méditerranéen



Pour les océans, l'eau de mer contient en moyenne 35 grammes de sels par litre, constitués à 86% de chlorure de sodium et 13% de carbonate et sulfate de magnésium et de calcium. La concentration en sels des mers peut être assez variable : Méditerranée, Golfe Persique, océans, mer Caspienne..., celle des eaux saumâtres est encore plus diverse.

Pour produire de l'eau douce à partir d'eau salée, il faut introduire l'eau brute dans un système auquel on apporte de l'énergie. En pratique, on n'extraît pas toute l'eau douce : par exemple on préfère concentrer l'eau de mer en sel d'un facteur deux environ.

2. Les procédés

2.1. Distillation

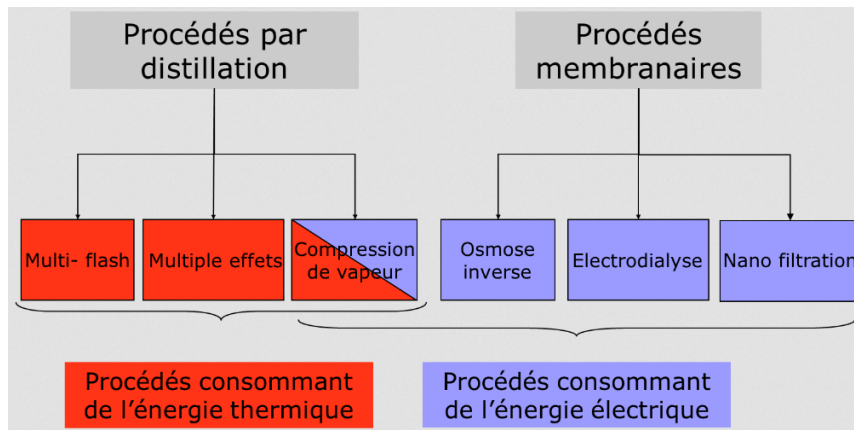
Bien sûr, rien ne paraît plus facile que d'imiter la nature : il suffit de faire évaporer de l'eau salée et récupérer l'eau douce par condensation de la vapeur. La première difficulté de la distillation est d'ordre économique. Pour évaporer un litre d'eau, rien qu'en considérant le coût de l'énergie thermique on atteindrait plusieurs dizaines d'euros par mètre cube ce qui est déraisonnable mais la récupération de chaleur permet d'utiliser la distillation dans des conditions économiques plus acceptables. Une deuxième difficulté est liée au caractère très corrosif et encrassant de l'eau de mer. L'eau de mer ne contient pas que de l'eau et du chlorure de sodium. Elle contient aussi d'autres sels dits à solubilité inverse : plus on les chauffe, moins ils sont solubles comme les carbonates et sulfates de magnésium et de calcium présents à hauteur de 4,5 grammes par litre. Et l'eau de mer est un milieu « vivant » : elle contient aussi de la matière organique et biologique. Sans précaution particulière, un bouilleur permettant d'évaporer de l'eau de mer va se corroder, s'entartrer, s'encrasser.

2.2. Osmose inverse

L'osmose inverse, industrialisée à partir des années 70 allait révolutionner le dessalement. À nouveau, c'est la nature qui a inspiré les ingénieurs. L'osmose est un mécanisme naturel d'échange présent dans tous les organismes vivants au niveau des cellules. Sous l'effet d'un écart de concentration, les molécules diffusent des régions les plus concentrées vers les moins concentrées, y compris à travers de fines membranes, comme celles des cellules, si leur nature physico-chimique le permet. Si ce n'est pas le cas, c'est l'eau qui va migrer à travers la membrane pour diluer la zone concentrée et équilibrer les concentrations. À l'équilibre, la différence de pression est appelée pression osmotique. L'osmose inverse, qui est au contraire un procédé de séparation, est exactement le phénomène inverse : en appliquant une pression suffisante, on force l'eau à quitter la zone concentrée pour rejoindre la zone à faible concentration. Si on considère l'eau de mer, la valeur de la pression osmotique est environ 29 bars. Pratiquement, pour obtenir un flux significatif, la pression de travail varie entre 60 et 70 bars.

2.3. Principaux procédés industriels utilisés

Les principaux procédés industriels actuellement utilisés sont des développements des méthodes présentées précédemment. Ils se classent en deux catégories : les procédés de distillation et les procédés membranaires. Selon la nature du procédé mis en jeu, la capacité de production peut varier de quelques litres par jour à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par jour. Le choix du procédé mis en œuvre dépend de multiples paramètres mais en premier lieu de la nature de l'eau à traiter - eau de mer ou eau saumâtre, de la capacité de production souhaitée, et de la source d'énergie disponible.



2.3.1. Procédé de vaporisation instantanée (MSF)

La vaporisation instantanée, plus connue sous son appellation anglo-saxonne MSF pour Multi-Stage Flash, consiste à chauffer l'eau de mer de 25 °C à 85 °C, sous pression atmosphérique, puis à l'introduire dans une suite de cellules où la pression diminue progressivement (passage de 1013 à 60 mbar par exemple). L'eau surchauffée va donc bouillir spontanément et assez violemment - d'où le nom de « flash » - pour retourner à l'état d'équilibre thermodynamique (pression 60 mbar, température 35 °C). La vapeur produite est condensée en utilisant l'eau de mer qui est ainsi préchauffée, ce qui permet d'économiser une partie de l'énergie nécessaire et de faire le vide souhaité. Bien sûr on peut coupler plusieurs cellules entre elles.

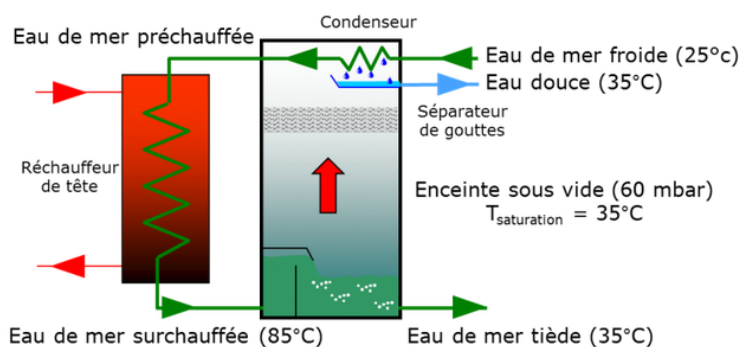
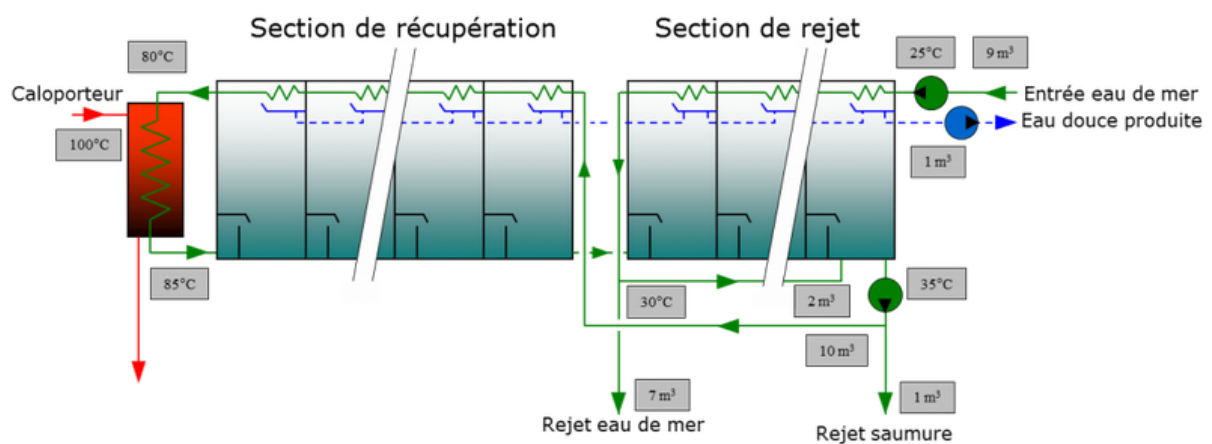


Fig. 11 : Usine de dessalement Al-Khobar II (Arabie saoudite) 223 000 m³/j MSF

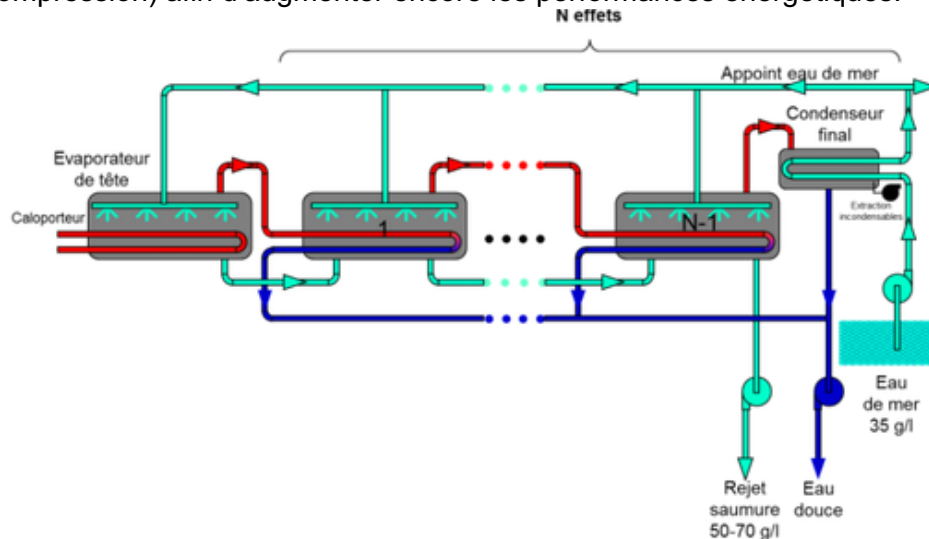


2.3.2. Le procédé à multiple-effet (MED)

Le procédé à multiple-effet (Multi-Effect Distillation, MED) a été spécifiquement développé dans le but d'économiser l'énergie thermique. La puissance thermique apportée à l'évaporateur de tête par un fluide caloporteur sert à faire évaporer de l'eau de mer. La vapeur produite est condensée dans l'évaporateur suivant, qu'on appelle le premier effet.

La chaleur de condensation sert alors à évaporer à nouveau de l'eau de mer et ainsi de suite jusqu'au condenseur final. Le débit d'eau douce globalement produit est théoriquement égal à la production du premier effet multipliée par le nombre d'effets. D'où le nom de multiple-effet. Pour que le système puisse fonctionner, il faut bien entendu que les températures et les pressions s'échelonnent de manière décroissante de l'évaporateur de tête vers le condenseur final afin de garantir un écart de température entre la vapeur qui se condense et l'eau de mer qui s'évapore. L'énergie thermique consommée décroît d'une manière quasiment linéaire quand le nombre d'effets augmente.

Les installations à multiple-effet sont maintenant presque toujours combinées avec une compression de vapeur - MVC (Mechanical Vapour Compression) ou TVC (Thermal Vapour Compression) afin d'augmenter encore les performances énergétiques.



Abutaraba (Libye) 13 300 m³/j MED-TVC (doc. Veolia - Sidem)

2.3.3. L'osmose inverse (RO)

Le principe de l'osmose inverse (Reverse Osmosis, RO) est de disposer d'une membrane séparatrice poreuse dont la taille des pores est suffisamment petite - quelques nanomètres - pour laisser passer les molécules d'eau mais pas les ions beaucoup plus gros.

Pour limiter les pertes de charge dues à l'écoulement de l'eau à travers ces membranes et donc minimiser la consommation d'énergie, elles sont extrêmement fines : leur épaisseur est souvent une fraction de micron. La pression osmotique s'opposant à l'écoulement dès que de l'eau pure traverse la membrane, il faut appliquer sur l'eau à traiter une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer le flux dans le sens de la séparation.

Bien sûr, si l'eau est faiblement salée, la pression à appliquer diminue et le taux de conversion peut être augmenté, ce qui a conduit à imposer l'osmose inverse comme le procédé de référence du traitement des eaux saumâtres.

Travailler à haute pression induit une seconde conséquence. Les membranes doivent résister à des écarts de pressions très importants. Pour les membranes en film qui sont le plus utilisées, la couche active extrêmement mince qui ne résiste pas seule à la pression est associée à d'autres couches très poreuses qui lui servent de support.

Les films ainsi constitués sont enroulés avec des espaceurs qui forment des canaux pour l'eau salée et pour l'eau pure. Un module ainsi constitué développe une surface de l'ordre de 40 m² pour un diamètre de 200 millimètres et une longueur de 1 mètre. Plusieurs modules, typiquement sept, sont ensuite assemblés dans un tube de pression ; des dizaines de tubes assemblés en parallèles constituent un train.

Comme pour les procédés de distillation, la consommation énergétique de l'osmose inverse est une préoccupation majeure. On peut citer le développement de récupérateur de pression qui permet d'utiliser la pression des fluides sortants pour comprimer les fluides entrants.

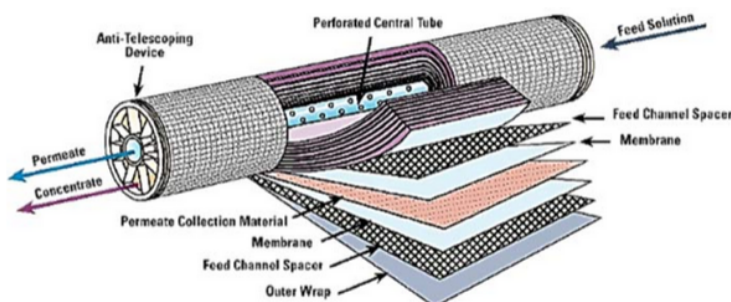


Fig. 22 : Usine de dessalement d'Ashkelon (Israël) - 320 000 m³/

3. Utilisation dans le monde

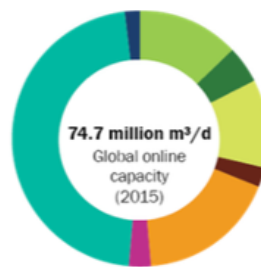
Le tableau suivant montre la comparaison de l'utilisation des procédés et leur coût de revient estimé en 2016. Ces estimations ne sont qu'indicatives car on comprendra bien que le coût de l'énergie n'est pas le même en Espagne ou en Arabie Saoudite. De même le coût du solaire baisse d'année en année, or ce tableau date de 2016. D'années en années les nouvelles installations utilisent majoritairement le procédé membranaire d'osmose inverse (SWRO et BWRO dans le tableau).

Procédé	Energie thermique kWh/m ³	Energie électrique kWh/m ³	Salinité de l'eau produite mg/l	Investissement US\$/m ³ /j	Prix de l'eau US*/m ³
MSF	70 - 80	2,5 - 5	10	1200 - 2500	0,6 - 2
MED	40 - 65	2 - 2,5	10	900 - 2000	0,5 - 1,5
MED+TVC	50	1 - 2	10	1000 - 2000	0,5 - 1
SWRO	0	4 - 6	400 - 500	900 - 2500	0,5 - 2
BWRO	0	1,5 - 2,5	200 - 500	300 - 1200	0,3 - 1,5
Solaire CSP+MED	40 - 65	2 - 2,5	10	900 - 2000	2,4 - 2,8
Solaire PV+SWRO	0	4 - 6	400 - 500	900 - 2500	12 - 16
Eolien SWRO	0	4 - 6	400 - 500	900 - 2500	2 - 10

- MSF-MultiStage Flash
- MED-Multi Effect Distillation
- TVC-Thermal Vapour Compression
- SWRO-Sea Water reverse Osmosis
- BWRO-Brackish Water Reverse Osmosis (eaux saumâtres)
- CSP-Concentrated Solar Power
- PV-Photovoltaïque



Fig. 29 : Capacité cumulée des installations de dessalement dans le monde – Source : Global Water Intelligence, DesalData.com



Source : GWI - DesalData.com

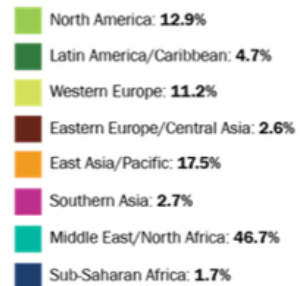


Fig. 30 : Capacité de dessalement en service en 2015 et ventilation par zone géographique - Source : Global Water Intelligence, DesalData.com

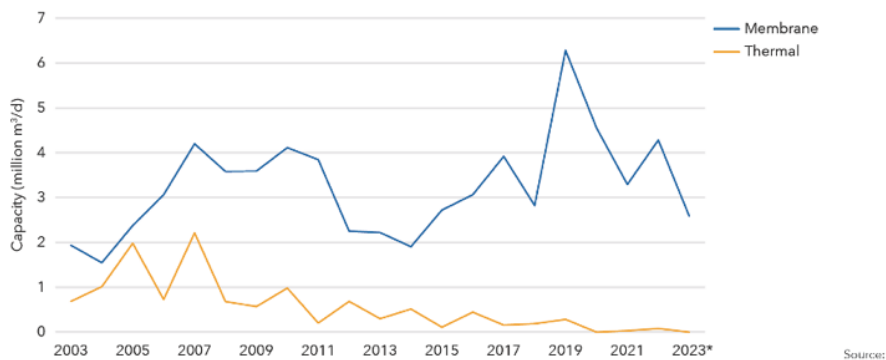


Figure 5 Nouvelles installations de dessalement par technologie thermique/osmose inverse

La production d'eau par désalinisation représente 0,5 % de la consommation mondiale d'eau.

4. Le nucléaire pour cela ?

Le couplage du dessalement avec un réacteur nucléaire peut être envisagé car un réacteur nucléaire produit de l'électricité à un prix compétitif et de la chaleur résiduelle qui peut être valorisée mais au détriment d'une partie de la production électrique. Ce couplage a déjà été mis en œuvre comme au Kazakhstan du temps de l'Union Soviétique.

Cependant il est rare actuellement car outre les contraintes citées au début de l'article se rajoutent les contraintes relatives au nucléaire comme la nucléarisation du pays (Algérie, Lybie, Maroc, Espagne, pays du Golfe Persique, Australie, Jordanie...) et le choix d'un site adéquat commun pour la centrale comme pour l'usine de dessalement dans le cas de l'utilisation de chaleur. De plus tous les pays produisant gaz et pétrole n'ont pas les mêmes problèmes d'utilisation de l'énergie que les autres pays.

Cependant le développement des procédés par Osmose inverse qui n'utilisent que de l'électricité devrait faciliter l'association nucléaire/dessalement. C'est par exemple ce qui est prévu en Égypte et aux Émirats Arabes unis.

L'un des avantages du nucléaire c'est d'être sans émission de CO₂ mais il se retrouve sur ce terrain en compétition avec les énergies renouvelables notamment dans les pays désertiques. Peut-être que l'émergence des SMR (Small Modular Reactor) cogénérant électricité et chaleur et plus facilement implantables dans un pays non nucléarisé permettra un regain dans le couplage nucléaire et dessalement eau de mer.

Référence principale de cet article : Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres – Philippe Bandelier – Encyclopédie de l'énergie nov. 2016