ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Groupe Eau

Notes de travail n° 4

Le dessalement de l'eau de mer
Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau

Jean Dunglas
Membre de l'Académie d'agriculture de France

Manuscrit publié en février 2014

Les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'environ 2,5 % du volume d'eau existant sur la Terre. Or, les besoins en eau douce sont de plus en plus importants. Une bonne partie des zones consommatrices se trouvant proches des rivages océanique, une solution solution intéressante consiste à dessaler l'eau de mer .
Le procédé est en plein développement. Il est au cœur d'une gamme de problématiques humaines, environnementales et économiques.

1- Principes généraux

Energie minimale nécessaire
Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale.

L'eau de mer contient en moyenne 35g/l de sels qui sont essentiellement des chlorures de sodium (76%) et de magnésium(11%), des sulfates de magnesium (5%), de calcium (3,5%) et de potassium (2,4%). Dans l'eau, Les sels sont sous forme d'anions chlorures et sulfates parallèlement aux cathions sodium, magnesium, calcium et potassium.
La salinité de l'eau de mer n'est pas constante. Dans les zones maritimes chaudes et partiellement fermées elle est plus élevée : en méditerranée elle varie de 36 à 39g/l, dans

le Golfe Persique elle peut monter aun delà de 60g/l. C'est l'inverse dans les mers froides recevant de forts apports fluviaux : 7g/l dans la Baltique.

Le calcul théorique du coût énergétique du dessalement pur d'une eau à 35g/l, sans pertes annexes (dessalement isentropique), et dans les meilleures conditions possibles est de 536 Wattheures par m^3. C'est le cas d'un dessalement rejetant la saumure à une concentration en sels sensiblement inférieure à la saturation, la ressource en eau de mer étant bien plus grande que les besoins en eau douce. Cette valeur est évidemment la limite inférieure du coût en énergie. Dans la pratique, il existe des pertes inévitables qui vont alourdir le bilan.

2- Différents procédés de dessalement

a/ Procédés de distillation

Ils sont utilisés depuis longtemps sur les navires en utilisant la chaleur récupérée sur les gaz d'échappement des moteurs diesel ou des chaudières.

La distillation à simple effet produit directement, à la pression atmosphérique, de la vapeur qui est ensuite condensée. Elle n'est plus guère utilisée que sur les navires.

La distillation à multiple effet (MED) comporte une série de cellules fonctionnant à des pressions et des températures décroissantes. Les pertes de chaleur sont inférieures et le rendement meilleur. Il peut être augmenté s'il y a compression de la vapeur. Les coûts énergétiques importants sont de l'ordre de 15 kWh par m^3.

La distillation par détentes successives ou flash (MSF). L'eau salée froide est introduites dans les cellules successives dans des serpentins. Elle condense la vapeur qui s'y trouve en se réchauffant progressivement. Après chauffage elle est introduite à la base des cellules ou elle vaporise l'eau salée. Eau condensée et saumure sont récupérées. Le coût énergétique est plus faible, de l'ordre de 10kWh par m^3.

Une variante est la distillation par compression de vapeur (MVC). La vapeur produite elle participe à l'ébullition de l'eau de mer. Le rendement thermique de 6kWh par m^3 est bon.

b/ Procédés par filtration sur membrane.

L'électrodialyse (ED) utilise deux sortes de membranes lal'une filtrant les cations et arrétant les anions ll'autre filtrant les anions et arrétant les cations. L'eau de mer est soumise à un courant électrique qui entraîne les ions qui sont bloqués par les membranes. Le système est constitué par un empilement de cellules dans lesquelles les ions se concentrent ou se raréfient. Le système n'est rentable que pour les faibles concentrations (eaux saumâtres).

L'osmose inverse (RO) constitue l'évolution ultime de la filtration de l'eau. La figure 1 ci-dessous schématise l'opération

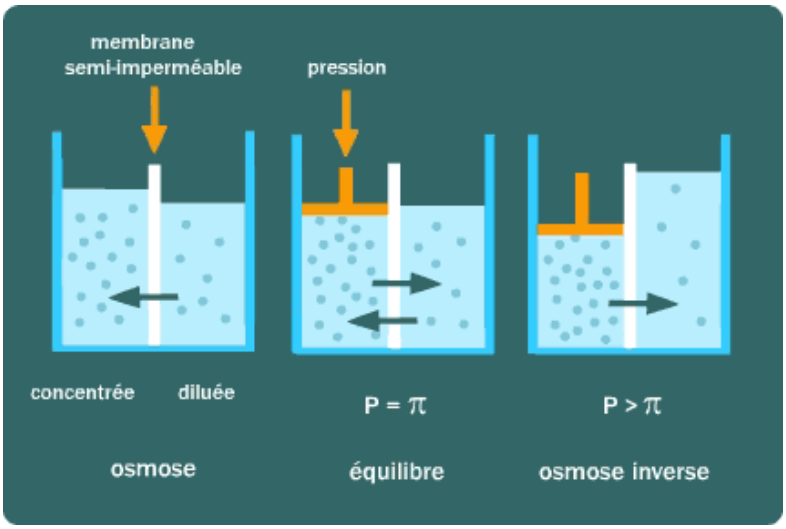

Fig. 1 - Principe de l'osmose inverse

Si l'on considère un récipient à 2 compartiments séparés par une membrane ne laissant pas passer les ions, l'eau aura tendance à aller de la solution diluée à la solution concentrée. L'équilibre est atteint quant la différence de niveau correspond à la "pression osmotique" souvent symbolisée par π.

La pression osmotique peut se calculer à partir de la formule des gaz parfaits (P.V =k.R.T) appliquée aux ions. Elle est proportionnelle à la concentration. Avec de l'eau de mer à 35g/L elle est de 2,87 MégaPascal (28,7 bars). En appliquant sur l'eau de mer une pression supérieure à π, les molécules d'eau vont passer de l'eau de mer au compartiment eau douce. Bien entendu, plus la concentration de la saumure augmente, plus il faut augmenter la pression dans le compartiment salé pour continuer à chasser les molécules d'eau à travers la membrane.

Dans ce procédé, l'énergie fournie est entièrement mécanique. On n'a plus à se soucier des pertes et de la récupération de chaleur et on évacue les problèmes de thermodynamique.
La dépense énergétique est relativement faible de l'ordre de 4 kWh/ m^3 . Les constructeurs estiment que cette dépense peut être encore sensiblement diminuée (3,5 kWh/ m^3 à Barcelone) . Le procédé se prête très bien à des applications modulaires donc à son industrialisation par fabrication en série de modules standarts. Il est un de ceux qui aboutissent à des coûts énergétiques et d'investissement les plus bas.

c/Distillation membranaire

Elle consiste à utiliser des membranes hydrophobes qui laissent passer les molécules d'eau sous forme de vapeur mais sont imperméables à l'eau liquide. Le gradient de pression est ici créé par chauffage. Il s'agit d'une technologie ecore en développement qui apparaît intéressante avec de l'énergie tbermique bon marché (solaire, nucléaire) .

d/ Procédés combinant plusieurs méthodes

Combinaison d'une unité de distillation et d'une unité d'osmose inverse associés à une centrale thermique. L'eau est produite et stockée quand la demande d'électricité extérieure par le réseau est faible. La chaleur récupérée à l'échappement des turbines (à gaz ou à vapeur) peut être utilisée en parallèle dans une installation annexe de distillation.

3- Schéma d'une unité de dessalement - problèmes annexes

L'eau est prélevée soit directement, soit par puits suffisamment près de la côte, dans une couche de terrain perméable contenant une nappe en continuité avec la mer.
L'utilisation de puits côtiers permet une préfiltration naturelle qui simplifie le prétraitement.

Le prétraitement proprement dit comprend une filtration, une chloration pour empêcher la prolifération de microorganismes, et un traitement antitartre pour limiter les dépôts de carbonate de calcium.
Le post-traitement de l'eau douce, à la sortie, est destiné à la potabiliser. Il s'agit d'une aération et 'une légère correction de pH par ajout de carbonate de calcium. Dans certains cas on opère un traitement à l'ozone pour éliminer des germes éventuels. Toutefois, , l'osmose inverse bloque complètement, en principe, le passage des bactéries et des virus.

Les boues et saumures sont rejetées à la mer dans une zone éloignée où la dispersion peut s'opérer sans risque. En principe, les concentrâts étant essentiellement d'origine marine ne constituent pas une pollution après dilution. Néanmoins, dans un certain périmètre autour de la zone de rejet, la salinité plus forte peut interférer avec la vie marine.
Le chlore utilisé comme biocide peut entraîner la formation d'hypochlorite dans l'eau de mer. Il est remplacé progressivement par le dioxyde de chlore qui est actif à des doses beaucoup plus faible.

Les polyphosphates utilisés comme antitartre peuvent entrainer des risques d'eutrophisation. L'utilisation de *coagulants* (chlorure ferrique) nécessaires en amont des installations d'osmose inverse pour compléter le filtrage, accroit la turbidité de la saumure ce qui peut se révéler dangereux pour la faune et la flore.

4- Une production encore minoritaire mais en plein développement.

Il y aurait actuellement environ 13000 unités de dessalement dans le monde, les 2/3 traitant de l'eau de mer et le reste des eaux saumâtres.
La production totale actuelle serait de l'ordre de 58 Mm^3 /jour (47 à partir d'eau de mer et 11 à partir d'eaux saumâtres). Les estimations de cette production varient suivant les sources (de 50 à 60 Mm^3 /jour). Cela représente environ 1% de la quantité d'eau potable consommée mais la production s'accroît de 10% par an.

a/ Grandes réalisations actuelles ou en projet.

Les plus grandes unités existant actuellement, également les plus anciennes, sont situées dans la Péninsule Arabique. L'usine de Jebel Ali (distillation), aux Emirats Arabes Unis reste la plus grande du monde avec une capacité de 900.000 m^3 /jour, celle de Jubail (également distillation), en Arabie Saoudite produit 800.000 m^3 /jour. La distillation est préférée dans ces zones d'exploitation pétrolière car elle utilise du gaz qui, autrement, serait brûlé.

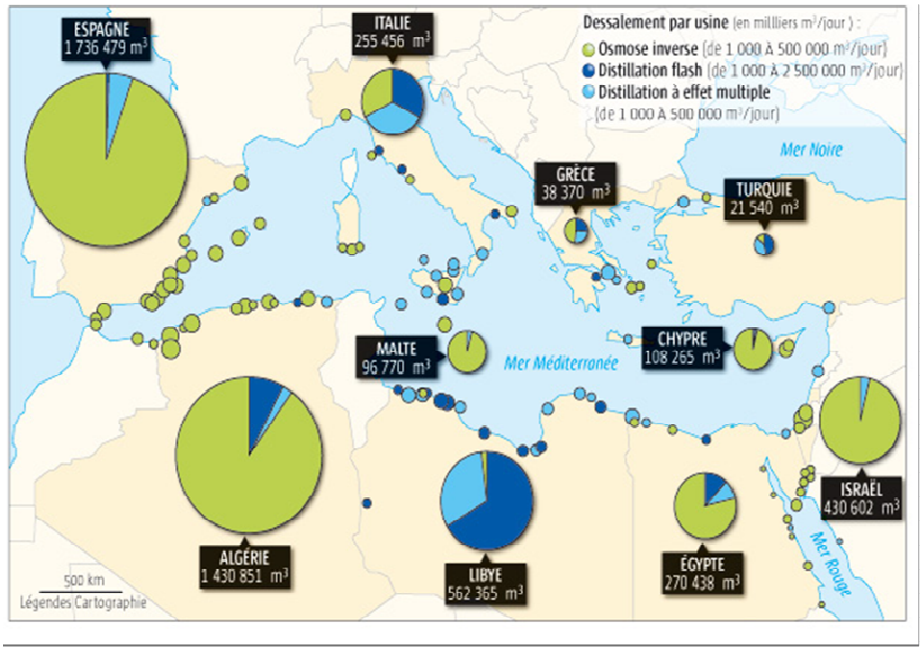

Fig. 2 - Usines de dessalement sur le pourtour méditerranéen

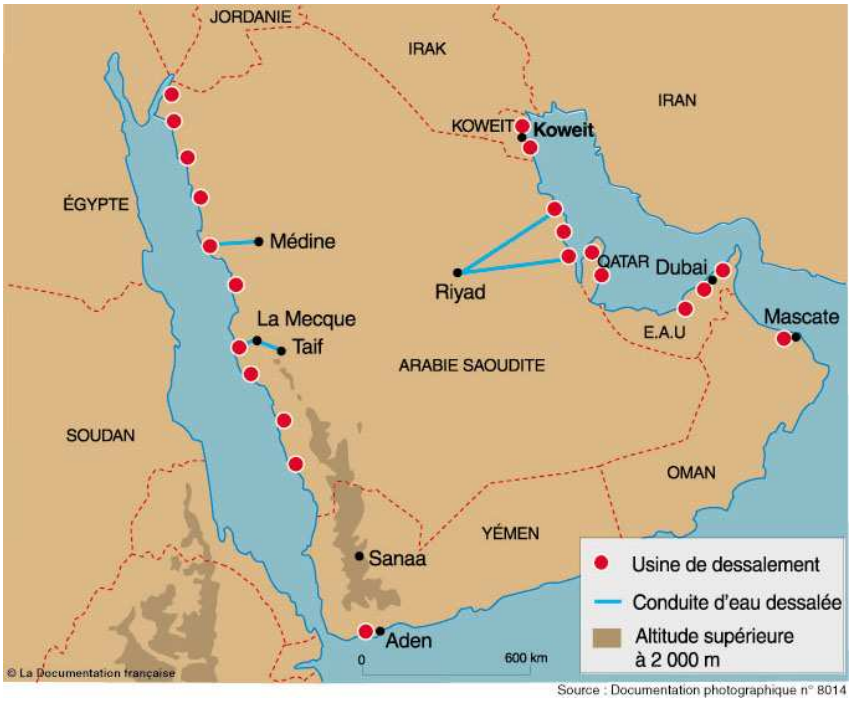

Fig. 3 - Les usines de dessalement sur le pourtour de la péninsule arabique

Partout ailleurs, l'osmose inverse est systématiquement utilisée car les besoins en énergie sont beaucoup moins élevés. Au Chili, l'usine de Minera Escondida fournit 45 000 m^3 /jour à la mine de Cuivre d'Antofagasta. L'Espagne est le quatrième producteur mondial d'eau dessalée (1 600 000 m^3 /jour). La plus ancienne et la plus importante est située à Carboneras en Andalousie sur la côte méditerranéenne elle produit 250 000 m^3 /jour. La plus récente est celle de Barcelone qui doit produire 200 000 m^3 /jour à terme.
La consommation d'énergie électrique a été optimisée et réduite à 3,5 kWh/ m^3. Par comparaison, l'usine de dessalement par distillation située aux Canaries a une consommation énergétique de l'ordre de 19 kWh/ m^3. Le prix de revient moyen se situerait entre 0,35 et 0,60 €/ m^3.

L'Algérie a un plan important de développement. L'usine de El Magtaa près d'Oran a une capacité de 500 000 m^3 /jour avec un objectif à terme de plus de 2 millions de m^3 /jour. Elle est l'une des plus grandes installations d'osmose inverse du monde.

L'Australie mise pleinement sur le dessalement pour alimenter ses grandes villes côtières. Suez Environnement avec l'australien Agbar vient de mettre en route la plus grande installation de dessalement de l'hémisphère sud à Melbourne avec une capacité de 450 000 m^3 /jour qui pourra être augmentée régulièrement en fonction des besoins.
Les caractéristiques énergétiques et de prix de revient sont analogues à celles de l'usine de Barcelone. La même société avait déjà construit à Perth, sur la côte ouest en 2005 une unité d'osmose inverse de 150 000 m^3 /jour.

Les 2 cartes ci-dessus illustrent l'ampleur des installations réalisées sur le pourtour méditerranéen et dans la péninsule arabique.

b/ Tendances techniques actuelles – évolution des coûts.

2.1. *Une première tendance est à la construction d'ensembles avec des capacités de plus en plus grandes,* ce qui amène à diminuer le prix du m^3 au final. L'osmose inverse qui est par nature de conception modulaire s'y prête bien, d'autant que les modules de base peuvent être produits en série. Cette caractéristique associée au bon rendement énergétique du procédé explique son succès.
La distillation sous ses diverses formes garde ses adeptes dans les zones où les ressources en gaz sont importantes et bon marché. Dans les pays producteurs de pétrole du Moyen Orient le gaz (dit fatal) des puits ne coûte que son acheminement vers l'usine. Les procédés thermiques gardent alors leur intérêt.

Les consommations énergétiques, même en osmose inverse, restent encore loin du minimum théorique de 0,563 kWh/ m^3. Au-delà du pur dessalement, il faut faire fonctionner tous les auxiliaires, faire circuler l'eau, la pomper ou la refouler enfin, il faut amener la saumure au large, puis la diluer avant de la rejeter. Le transport de l'eau reste coûteux et demande de l'énergie. *Les meilleures installations actuelles* semblent dépenser, au fonctionnement optimal, de 2,5 à 3,5 kWh/ m^3.

Le coût final du m^3 d'eau dessalée ne peut être fourni de façon générale et précise. Il varie, évidemment avec les conditions économiques locales, l'époque de la construction de l'usine, la technique de dessalement, la position par rapport au rivage et aux consommateurs et, bien entendu en fonction du prix de l'énergie thermique et de l'électricité. On constate simplement que les prix de revient ont une tendance générale à baisser, avec l'accroissement de la taille des installations et le choix de l'osmose inverse. Dans les dernières usines construites en Espagne et en Australie, on arrive à des valeurs de l'ordre de 0,5 $/ m^3 correspondant à 0,40 €/ m^3 (avec un € à 1,25 $). L'industrialisation de la fabrication des modules de filtration et la standardisation de celles des unités devrait confirmer cette tendance.

2.2. Parallèlement, l'osmose inverse se prête bien à la production de petits modules transportables (par exemple dans un camion) ou susceptibles d'être installés dans des zones isolées, semi désertiques ou insulaires. L'intérêt ne réside plus alors dans un prix de revient minimal mais dans la disponibilité locale d'eau douce potable.

2.3. L'attention a été rapidement attirée sur l'utilisation d'énergies renouvelables. Le solaire, comme l'éolien sont intermittents et l'électricité se stocke mal. Or le rendement énergétique moyen des batteries est sensiblement inférieur à 1 : de l'ordre de 0,70 pour les batteries au plomb, 0,8 pour les Ni-Cd, il ne dépasse 0,95 que pour les Li-ions. En outre elles sont chères et n'ont qu'une durée limitée. Stocker l'énergie sous formes d'eau dessalée peut être une excellente solution.

Bien évidemment, si l'électricité produite ne sert qu'au dessalement, le prix de revient du m^3 reflète le coût élevé de l'électricité solaire ou éolienne. Le village de Ksar Ghilène en Tunisie possède une installation de ce type alimentée en solaire photovoltaïque et traitant de l'eau saumâtre de salinité 4,5 g/l. Le m^3 d'eau douce y revient à un peu moins de 6 € .

Le solaire thermique peut aussi fournir des solutions simples et intéressantes.
Des distillateurs solaires directs sans aucune machinerie ont été imaginés et construits. Une installation de ce type est installée à Gwadar au Pakistan. Elle fournit 36 m^3 /jour à environ 12 $ / m^3.
Un distillateur multiple effet associé à des capteurs solaires thermiques mais ayant besoin d'électricité pour sa machinerie fonctionne à Almeria en Espagne. Il fournit 72 m^3/jour à 8 €/ m^3.

5- Perspective du dessalement en agriculture.

Diverses évaluations, souvent trop simplistes, ont été publiées, tendant à montrer qu'irriguer avec de l'eau dessalée n'était pas rentable.

Il est vrai qu'apporter de l'eau à 0,5 $ le m^3 à raison de 1000 mm/an (peut-être plus en zone très sèche) en vue de récolter du blé à 246 € la tonne ou du maïs à 227 € la tonne (même à 12T/ha) ne se justifie pas. L'opération a été tentée par Kadhafi et les Saoudiens avec des buts essentiellement politiques et de propagande.

Toutefois, il n'est peut-être pas exclu qu'en complément, et en quantité limitée (par exemple pour sauver une récolte dans un épisode de sécheresse), l'opération ne présente pas un certain intérêt.

Notons qu'en région PACA, à titre de comparaison, le Canal de Provence vend son eau actuellement, rendue chez l'agriculteur ou l'horticulteur, autour de 0,35 € le m^3.

Un rapport de la FAO de novembre 2005 aboutissait à l'époque aux conclusions suivantes :

- la principale application du dessalement de l'eau consiste en la fourniture d'eau potable;
- en règle générale, l'application de la technologie du dessalement de l'eau à l'agriculture n'est pas rentable; actuellement, le dessalement de l'eau est bien moins économique que la réutilisation des eaux résiduelles traitées à des fins agricoles;
- l'application du dessalement de l'eau à l'agriculture est encore aujourd'hui limitée à certaines zones; cette technologie n'est utilisée de façon efficace que pour certaines cultures à fort rapport économique et lorsque les investissements sont subventionnés par l'État.

La diminution sensible des coûts (divisés par plus de 2) depuis cette époque amène à nuancer ces conclusions. Cela étant, On peut faire les observations suivantes.

* Il existe, actuellement, des cultures sous serre, à haute valeur ajoutée, pour lesquels l'opération devient rentable. En Espagne, dans la région d'Almeria à Carboneras, 4 800 hectares de cultures sous serre de fruits et légumes demandent beaucoup d'eau. Mais la nappe locale surexploitée, s'épuise et risque de devenir inexploitable d'ici deux décennies. Or les agriculteurs continuent d'y pomper gratuitement leur eau. D'ores et déjà, l'eau dessalée est disponible à des coûts compris entre 0,4 et 0,7 €/m^3. Les coûts devant encore baisser, les maraichers d'Almeria voient l'avenir plus sereinement.

* Cependant, le dessalement peut aider indirectement beaucoup plus de productions. En alimentant les villes proches des rivages, il permet de réorienter vers l'irrigation un débit équivalent, plus haut dans les bassins versants. Il amène ainsi à une réorganisation complète des ressources. L'eau brute, non traitée va directement à l'agriculture, sans avoir besoin d'être transportées sur de longues distances. L'eau sortie de l'usine de dessalement après un traitement très léger est transformée en eau potable et est consommée quasiment sur place. C'est toute l'organisation du bassin versant qui est ainsi transformée et à revoir.

6- Impacts environnementaux

Ils sont liés aux rejets de saumures concentrées et aux effets de différents additifs nécessaires au traitement. On en a vu quelques aspects plus haut.

a/Evacuation de la saumure.

Il faut d'abord rappeler que les rejets sont soumis à la réglementation du protocole dit "Tellurique" de la Convention de Barcelone qui donne des limites des valeurs de nombreux types de rejet.
Bien entendu, l'effet du rejet dépend très largement des conditions physiques, chimiques et biologiques de la zone où les saumures sont évacuées. Par exemple, plusieurs études ont montré que *Posidonia* était très sensible à la salinité.

Le PNUE a fait un rapport très global sur le dessalement en Méditerranée en 2001 (réunion d'Athènes) avec un chapitre (3) détaillé sur les effets des rejets. Mais il est très théorique, se base sur peu d'exemples concrets et semble un peu dépassé. Beaucoup de précautions paraissent avoir été prises pour la nouvelle usine de Barcelone : rejets très au large, grande dilution de la saumure.

b/ rejet des produits de traitement

Il s'agit des résidus de corrosion, des produits d'ajustement du pH de l'eau, des produits antitartres et des agents anti-salissures, des agents antimousses et des dérivés du chlore. Leurs taux doivent être inférieurs à la norme.

Un aspect à ne pas négliger est l'impact que pourrait avoir des installations pompant des grands débits dans des mers fermées (Mer Rouge, Golfe Persique). Les capacités des grosses usines devront probablement être ajustées en fonction du taux de renouvellement des eaux dans ces espaces marins restreints.

.

6- Craintes et rêves

Beaucoup d'associations de défenseurs de l'environnement voient d'un mauvais œil le développement des techniques de dessalement qu'ils considèrent comme des solutions de facilité qui, en laissant les usagers consommer, évitent les mesures d'économies des ressources naturelles, mesures qu'ils estiment indispensables. Ils préconisent plutôt des plans de répartitions. Ils craignent également que les déversements de saumure ne soient pas faits avec suffisamment de précautions et aient des impacts sur la vie marine.

A l'opposé, les partisans du développement technologique estiment qu'en couplant une centrale nucléaire avec une usine de dessalement et en utilisant, à la fois, l'électricité et la centrale nucléaire avec une usine de dessalement et en utilisant, à la fois, l'électricité et la chaleur résiduelle aux condenseurs, on puisse encore baisser substantiellement le prix de revient du m^3 dessalé.

Certains calculs publiés aboutissent à des valeurs sensiblement inférieures à 0,3€/ m^3. Outre l'ampleur considérable des investissements, la principale objection à cette proposition est que la plupart des pays ayant le plus besoin d'eau se trouvent dans des zones politiquement instables comportant des risques d'attaques ou de sabotages inacceptables.

La position rationnelle paraît devoir se situer entre les extrêmes. Le dessalement est une technique prometteuse, en plein développement, susceptibles d'apporter des solutions économiques locales intéressantes sans grand risque. Aux aménageurs de l'utiliser au mieux des intérêts des utilisateurs dans le meilleur respect de l'environnement.

Bibliographie (succincte)

LA CITE DE LA MER – Cherbourg, *La mer à boire,* Rapport Technopole Cherbourg-Normandie, 33p. , Avril 2012 ;

MAUREL Alain, *Dessalement de l'eau de mer, énergie nucléaire, énergies renouvelables,* Atelier Plan Bleu / Méditerranée, eau, énergie et changement climatique, Carthage, décembre 2007;

MAUREL Alain, *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres,* 290 p. Ed. Tec&Doc Lavoisier , 2006 ;

MONTESQUIOU (de) Aymeri, *Protection de la Méditerranée contre la pollution,* Rapport au Sénat, mars 2000 ;

TATA-DUCRU Farid, *Dessalement de l'eau de mer; bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique*, AgroParisTech – ENGREF Montpellier – janvier 2009 ;

PNUE-UNEP, *Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens; impacts sur l'environnement*, Athènes, septembre 2001 ;

Sites :

Isentropic.org - ISENTROPIC Ltd – nombreuses références techniques
http// mshades.free.fr/dessalement/reflexiondessalement.html
http// mshades.free.fr/isentropiquedessalement.html