

DESSALEMENT ET REACTEURS NUCLEAIRES (1)

1. LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU

L'eau est indispensable pour la vie mais sa disponibilité n'est pas assurée partout. La pénurie d'eau se pose et se posera dans de nombreux pays. Pourtant les réserves d'eau sur le globe terrestre sont immenses. Elles sont supérieures à 1 milliard de km³ à comparer à une consommation mondiale inférieure à 1500 km³/an. Examinons le problème de plus près. La majeure partie de ces réserves (97,5 %) est sous forme d'eaux salines ou saumâtres et sur les 2,5 % disponibles, la plus grande partie (70 %) est sous forme de glace. Ce qui reste est souvent inaccessible : humidité du sol ou nappe profonde. En fin de compte, on estime la fraction d'eau réellement disponible à 75000 km³.

Par ailleurs les populations ont un accès très inégal à ces ressources. Ainsi le Comité sur les Ressources Naturelles (1) estime qu'en 1997, 80 pays étaient en état de pénurie ce qui représente environ 40 % de la population mondiale. Actuellement, la conséquence directe de cette pénurie est la détérioration de la qualité de l'eau potable qui aggrave l'état de santé des populations. On estime aujourd'hui que cette aggravation est responsable de 2 millions de morts par an dans le monde (2). La pénurie d'eau s'aggravera dans les années à venir et cette situation empirera si aucun remède n'y est apporté. Ainsi des estimations (3) montrent que pour la région méditerranéenne les besoins en eau dessalée s'élèveront à environ 15 millions de m³ par jour en 2025.

Le dessalement des eaux saumâtres et, a fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est d'ores et déjà en pleine expansion avec une progression d'environ 7 % par an (3).

2. LES PROCÉDES

Les procédés de dessalement ayant montré leur fiabilité se divisent en deux grandes familles : l'une utilise l'évaporation, l'autre utilise la séparation par membranes.

2.1. EVAPORATION

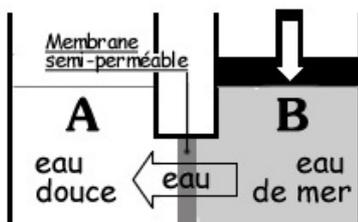
Il s'agit de chauffer de l'eau brute pour en vaporiser une partie. La vapeur d'eau purifiée ainsi produite est refroidie et condensée pour donner de l'eau douce. La première famille de procédés reproduit en accéléré le cycle naturel de l'eau (l'eau s'évapore des océans, la vapeur d'eau s'accumule dans les nuages et finit par retomber sur terre sous forme d'eau douce).

L'énergie consommée est principalement thermique (fournie à la chaudière) et électrique (pour les pompes de circulation de l'eau de mer). La transformation de l'eau liquide en eau vapeur nécessite beaucoup d'énergie (il faut 7 fois plus d'énergie pour transformer de l'eau liquide en vapeur que pour chauffer l'eau de 20°C à 100°C).

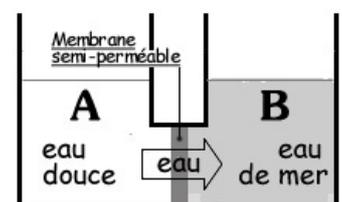
2.2. OSMOSE INVERSE

Considérons un système de deux compartiments communiquant à travers une membrane *semi-perméable* (un matériau qui laisse passer le solvant -l'eau dans notre cas- et bloque les sels dissous). A contient de l'eau douce, B contient de l'eau salée. Au cours du temps, on constate que l'eau migre de A vers B. Ce phénomène naturel, dénommé « osmose », est lié à l'existence d'une pression *interne* au système, dite « pression osmotique », dont la valeur dépend des solutions en présence. Pour le couple 'eau douce/eau de mer', la pression osmotique est voisine de 25 bars.

↳ Osmose inverse



Le phénomène d'osmose s'établit naturellement. Mais en revanche si on applique sur le compartiment contenant l'eau salée une pression supérieure à la pression osmotique le processus se fait dans le sens inverse les molécules d'eau passe du côté « eau salée » vers le côté « eau douce » puisque la perméabilité sélective de la membrane empêche la migration des molécules de sel. Ce processus est dénommé « osmose inverse ». Industriellement, il faut appliquer des pressions de l'ordre de 80 à 100 bars.



Osmose ↻

¹ La base de cette fiche est une conférence de M. Simon Nisan à la SFEN (3).

3. MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDES

3.1. DISTILLATION A EFFETS MULTIPLES

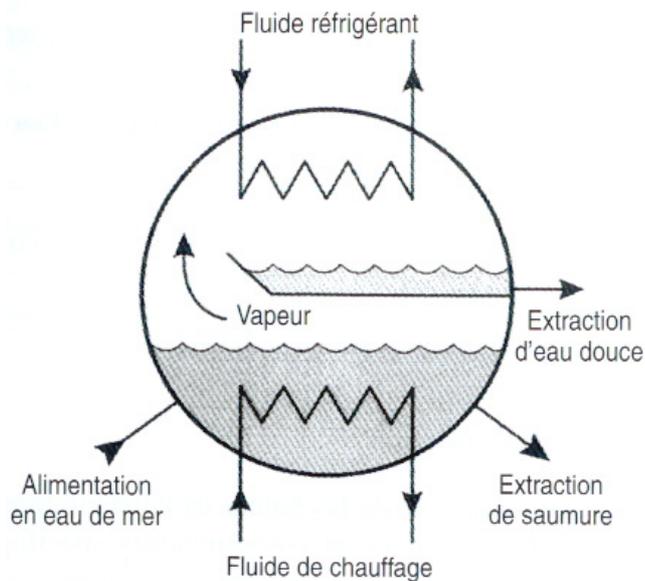


Figure1 : Distillation

La distillation, procédé qui permet de réaliser l'évaporation, est mise en œuvre depuis longtemps sur les navires avec les "bouilleurs marins". L'eau de mer est chauffée dans une enceinte étanche par un faisceau tubulaire ce qui provoque une évaporation de l'eau, la vapeur est condensée par un autre faisceau tubulaire dans lequel circule de l'eau de mer froide (figure 1).

Industriellement plusieurs évaporateurs sont mis en série. La vapeur produite par un premier évaporateur se condense dans un second, en libérant la chaleur de condensation qui sert à faire bouillir l'eau de mer du second et ainsi de suite. Il est nécessaire de piloter une décroissance de la température et de la pression de vapeur tout au long de la cascade. Le rendement thermique de l'installation est théoriquement égal au nombre d'effets, mais leur augmentation accroît le coût de l'investissement, un optimum est à rechercher

Le procédé par distillation à effets multiples produit à partir d'eau de mer contenant de 35000 à 45000 ppm, de l'eau pratiquement pure : 5 à 30 ppm TDS (totalité des sels dissous).

3.2. DISTILLATION PAR DETENTES SUCCESSIVES

De l'eau de mer chaude est introduite dans une enceinte sous vide où l'eau est en équilibre avec sa vapeur (figure 2). Si la température de l'eau chaude correspond à une pression de vapeur supérieure à celle de l'enceinte, il y a une vaporisation immédiate par détente (flash). La vapeur produite est condensée sur un faisceau tubulaire situé dans la partie supérieure de l'enceinte.

Une installation industrielle de distillation flash comprend plusieurs cellules en série. Comme pour le procédé par distillation à effets multiples, la cascade de cellules est sous pression et température décroissante. Les procédés par distillation consomment de la vapeur (pour apporter 50000 à 100000 kcal/m³) et de l'électricité pour les pompes et les auxiliaires (environ 4 kWh/m³).

Le procédé par détentes successives produit une eau pure à 5 à 25 ppm TDS. Il est adapté pour des installations de très grande capacité, ainsi l'usine de Al Jubail (3) en Arabie Saoudite a une capacité de 900000 m³/jour. Le procédé de distillation flash représente 62% de la capacité mondiale installée (4).

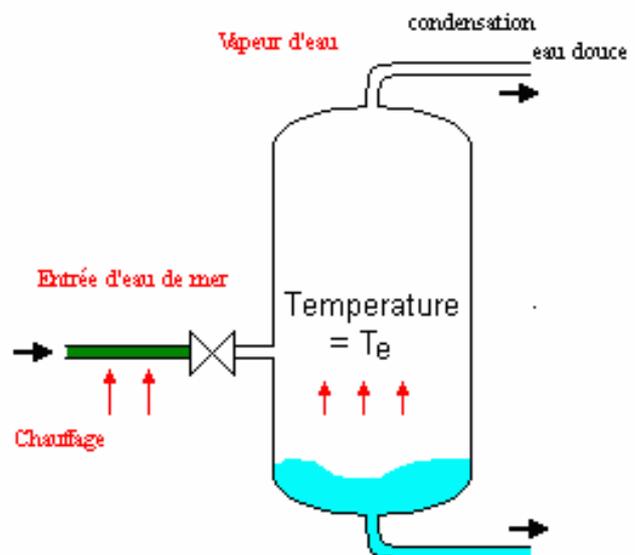


Figure 2 : Distillation flash

3.3. COMPRESSION DE VAPEUR

L'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte isolée, la vapeur est aspirée par un compresseur qui élève sa température et sa pression. Cette vapeur est envoyée dans un faisceau tubulaire en bas de l'enceinte, elle se condense en cédant sa chaleur à l'eau de mer qui est portée à ébullition.

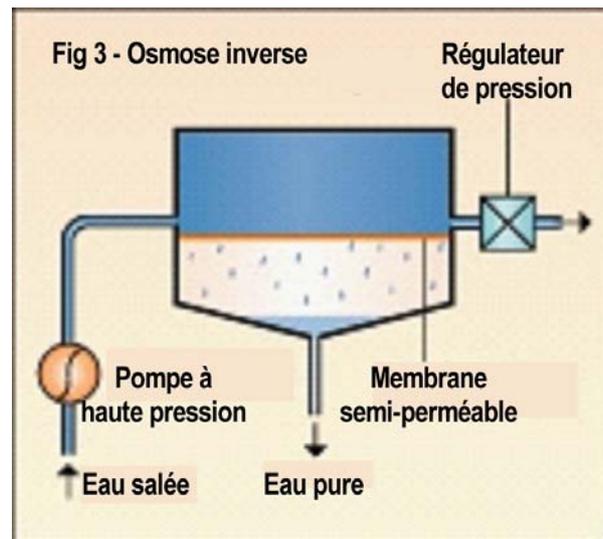
L'avantage du procédé est une faible consommation énergétique sous forme mécanique ou électrique (7 à 8 kWh/m³, pour des grandes installations). Toutefois la capacité des installations à compression de vapeur est limitée par la taille des compresseurs.

3.4. OSMOSE INVERSE

Une installation industrielle est représentée sur le schéma suivant (figure 3). L'osmose inverse permet d'obtenir de l'eau potable entre 200 et 300 ppm TDS. Le procédé demande un prétraitement de l'eau de mer afin de garder propres les surfaces de membranes. Des développements récents ont permis de réduire le coût du dessalement par osmose inverse :

- mise au point de membranes spirales
- développement des pompes, turbines, échangeurs de pression qui permettent de récupérer une partie de l'énergie (4)

Actuellement les installations d'osmose inverse consomment environ 3 à 4 kWh/m³. Ce procédé représente 27% de la capacité mondiale installée (4).



4. COUPLAGE AVEC LES REACTEURS NUCLEAIRES

Le choix d'un procédé de dessalement va dépendre du site choisi, de la capacité de l'installation, des conditions spécifiques. De même le choix de la source d'énergie sera influencé par les spécificités du projet. Le dessalement est un processus qui exige beaucoup d'énergie, une stratégie du futur fondée uniquement sur des ressources fossiles n'est pas souhaitable.

Le nucléaire n'émettant pas de gaz nocifs pour l'environnement tels que : CO₂, NO_x, SO_x permet de s'inscrire dans le domaine du développement durable. De plus l'énergie nucléaire est très compétitive, d'un coût 10 à 80 % inférieur (3) à une option conventionnelle de référence (centrale à charbon à lit fluidisé circulant).

Un réacteur peut fournir l'énergie nécessaire aux procédés de dessalement soit sous forme de chaleur (distillation à effets multiples, distillation par détentes successives) soit sous forme électrique (compression de vapeur, osmose inverse), sachant que l'intégration de tout procédé nécessite de l'électricité pour le pompage et d'autres services. A titre d'exemple un réacteur REP 900 couplé à une installation de dessalement par osmose inverse pourrait produire 5 millions de m³/jour avec un taux de charge de 90%.

Dans le cas d'un système à co-génération où une partie de l'énergie est utilisée pour le dessalement, le reste étant consacré à la production d'électricité, le réacteur nucléaire peut fournir de la chaleur dans une gamme large de température ce qui permet une adaptation à tous les procédés.

Des améliorations ont été proposées. Citons, par exemple, des systèmes hybrides en combinant distillation flash et osmose inverse ou distillation à effets multiples et osmose inverse. Ces systèmes sont particulièrement économiques lorsqu'on a besoin des deux produits : eau potable produite par osmose inverse à 200 à 300 ppm TDS et eau pure produite par distillation

Le projet européen EURODESAL s'est efforcé de récupérer la chaleur perdue à la source froide. Le rendement thermodynamique de la conversion d'énergie dans un REP est de 30 à 33 %. Les 2/3 de la chaleur produite sont rejetés à la mer ou à la rivière, la température de l'eau sortant du condenseur est de 32°C. Cette température permet de réduire la viscosité de l'eau et de réduire la pression osmotique. Ces deux effets procurent une réduction du coût du dessalement par osmose inverse d'environ de 7 à 15 % (3).

L'utilisation d'un réacteur à haute température type 4^e génération procurerait aux procédés de dessalement une température idéale de l'eau de mer : 80 à 110°C Cette chaleur est virtuellement gratuite car normalement évacuée à la source froide.

5. EXPERIENCE D'EXPLOITATION DE SYSTEMES INTEGRES DESSALEMENT / NUCLEAIRE

En janvier 2004, la capacité de dessalement d'eau de mer (4) atteignait dans le monde 22 millions de m³/jour. L'expérience d'exploitation des réacteurs de puissance est importante, environ 13000 années-réacteurs. Mais l'expérience du dessalement nucléaire est faible (100 années réacteurs environ). La capacité de dessalement de ces systèmes est relativement petite (< 2000 m³/jour).

En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie nucléaire, le premier réacteur couplé à une installation de dessalement a été le BN 350, réacteur de 125 MWe à neutrons rapides refroidi au sodium, installé à Aktau sur les bords de la mer Caspienne. Ce réacteur a fonctionné entre 1973 et 1999.

Aujourd'hui, 11 tranches de réacteurs nucléaires REP sont en exploitation au Japon. Ces réacteurs sont couplés à des installations de distillation et d'osmose inverse. Les capacités de production sont comprises entre 1000 et 2000 m³/jour. L'eau dessalée est utilisée pour des besoins locaux. Aucun problème technique ou lié à la sûreté n'est signalé jusqu'à ce jour.

L'Inde procède au couplage d'un système hybride distillation par détente successive/osmose inverse pour produire 2 x 170 MWe et 6300m³/ jour d'eau douce.

Un réacteur de 5 MWth couplé au procédé distillation à effets multiples est en opération depuis 1989 en Chine. Ce pays, par ailleurs, développe un programme de dessalement nucléaire basé sur des réacteurs dédiés proches du projet français THERMOS (Réacteur de 100 MWth dédié au chauffage urbain).

Les Russes proposent des unités de dessalement sur bateau qui fonctionnent suivant des cycles de 2 ans.

6. REFERENCES

- (1) A. Macoun

Alleviating Water Shortages-Lessons from the Middle East

The international Desalination and Water Reuse Quarterly vol 10/2 (2000)

- (2) ANS

Used of Nuclear Energy for desalination

Position Statement 62 mars 2005

- (3) Simon Nisan

Utilisation des réacteurs pour le dessalement de l'eau de mer

Conférence à l'ENS des Arts et Métiers à Aix en Provence le 17/01/2007

- (4) Alain Maurel

Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce

Ed. 2^e ed. 06 2006

.....