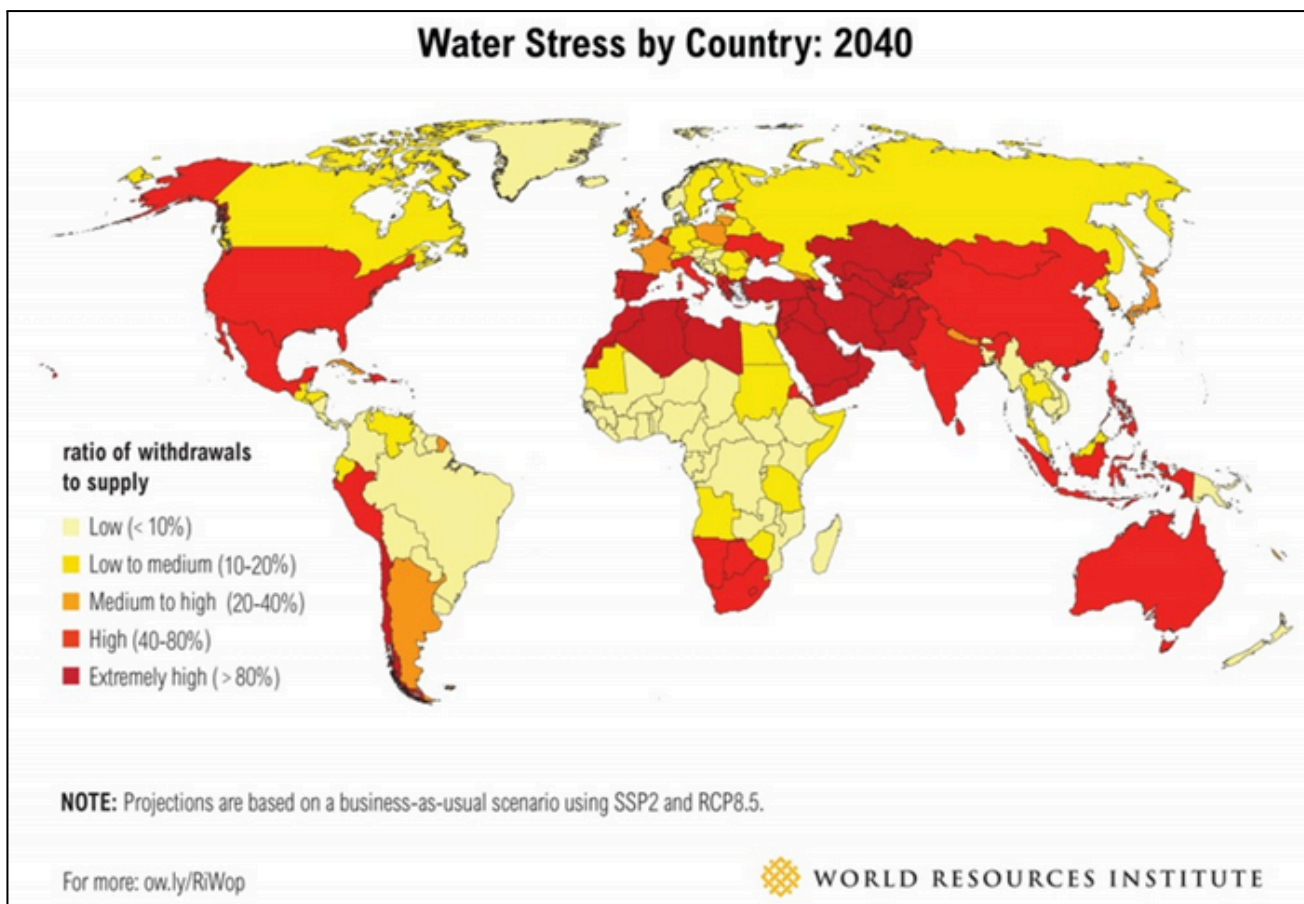


DESSALEMENT ET RÉACTEURS NUCLÉAIRES

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, 2,2 milliards de personnes ne disposent pas d'un accès à une eau potable, 5,5 milliards vivent sans un assainissement satisfaisant et 2,6 milliards, surtout des enfants meurent chaque année de maladies liées à l'eau ou à l'hygiène.

La population mondiale, 8,2 milliards en 2024, pourrait croître jusqu'à 10,3 milliards en 2080. Associée à des situations géopolitiques complexes (guerres, famines, immigration massive...) cette démographie exigera des actions fortes pour approvisionner le monde en eau potable et en eau pour l'agriculture.



Le dessalement de l'eau de mer ou saumâtre peut être une solution attrayante pour subvenir aux besoins en eau des deux tiers environ de la population mondiale. À ce jour, la capacité mondiale de production d'eau par dessalement est de l'ordre de 100 Mm³/jour dans 22.800 installations en majeure partie situées dans la région des États du Golfe. Les diverses techniques de dessalement sont décrites succinctement dans la fiche jointe.

Le dessalement nucléaire a une intensité de carbone moindre et son coût est intéressant par rapport à celui des autres méthodes, telles que les techniques fondées sur les combustibles fossiles. Forts de centaines d'années-réacteurs d'exploitation réussie, l'Inde, le Japon et le Kazakhstan sont les pays qui ont le plus d'expérience en matière de dessalement nucléaire. Son développement semble devoir s'intensifier en Asie et tout particulièrement en Chine.

Bien qu'encore peu mise en œuvre, cette solution est susceptible d'offrir un accès viable, décarboné et abordable à l'eau potable à des milliers de communautés.

« Les centrales nucléaires pourraient aider à répondre à la demande croissante d'eau potable et donner de l'espoir aux régions souffrant de graves pénuries d'eau dans de nombreuses zones arides et semi-arides » (AIEA Septembre 2023).

1. LA PROBLÉMATIQUE 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 de l'ordre de 3.900 km³/an en 2020.

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 75.000 km³.

Par ailleurs, les populations ont un accès très inégal à ces ressources. Un quart de la population mondiale, vivant dans 25 pays, est exposé à un niveau de base de stress hydrique « extrêmement élevé », consommant plus de 80 % de leurs réserves renouvelables annuelles d'eau douce. Le stress hydrique n'est pas sans lourdes conséquences sur la stabilité sociale et on estime que 10 % de la hausse des flux migratoires sur la planète sont liés à des déficits hydriques¹.

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. En 2019, 1,4 millions de décès dans le monde ont été attribués à un défaut d'accès à l'eau, l'assainissement ou l'hygiène². La pénurie d'eau s'aggravera dans les années à venir et cette situation empirera si aucun remède n'y est apporté.

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, de l'ordre de 5 % par an, comme le montre la Figure 1³.

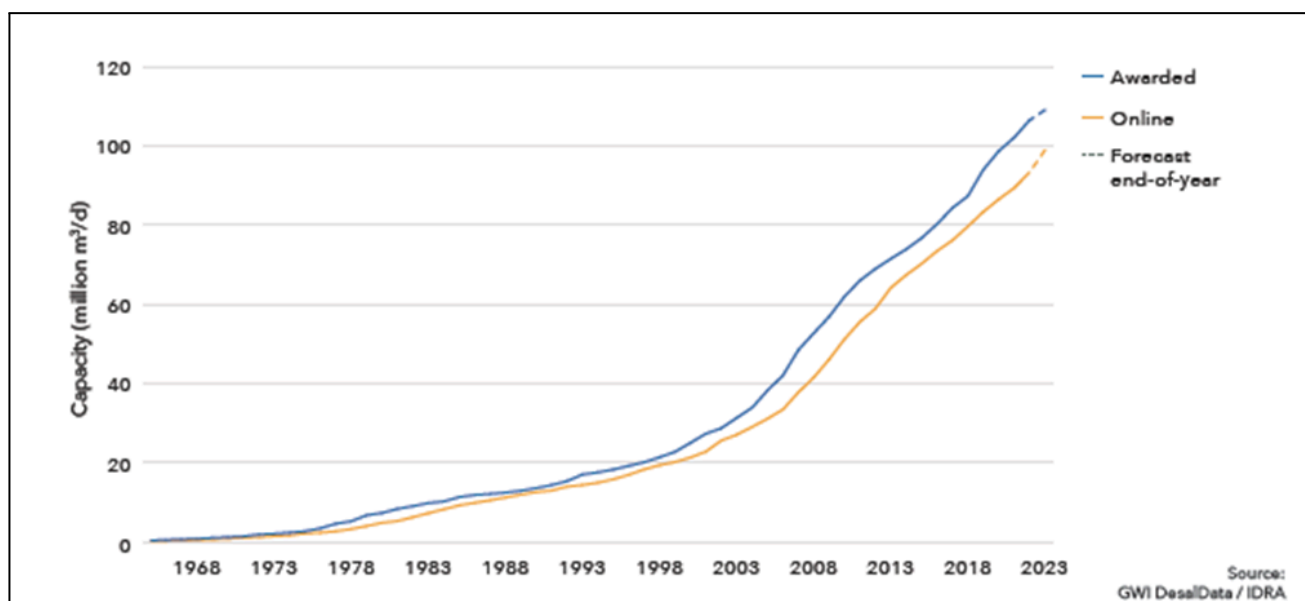


Figure 1 : Capacité de dessalement mondiale (en million m³/jour)

2. LES PROCÉDÉS

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. ÉVAPORATION

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).

¹ Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024

² Actualités ONU <https://news.un.org/fr/story/2023/06/1136542>

³ IDRA DESALINATION & REUSE HANDBOOK 2023 – 2024

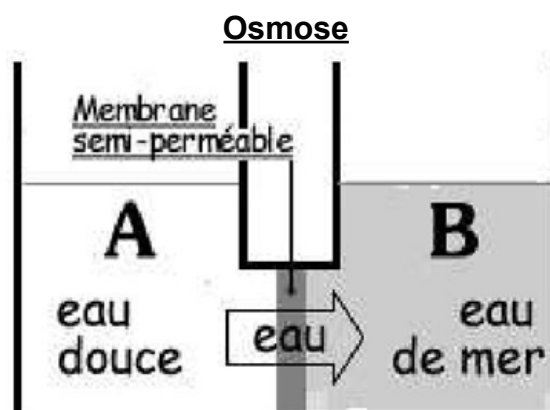
L'énergie consommée est principalement thermique (fournie à la chaudière) et électrique (pour les pompes de circulation de l'eau de mer). La transformation de l'eau liquide en eau vapeur nécessite beaucoup d'énergie (il faut 7 fois plus d'énergie pour transformer de l'eau liquide en vapeur que pour chauffer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

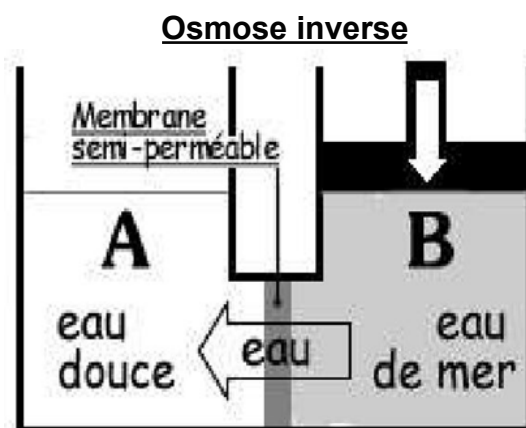


Le phénomène d'osmose s'établit naturellement.

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 passent 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.



3. MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDÉS⁴

3.1. DISTILLATION À EFFETS MULTIPLES

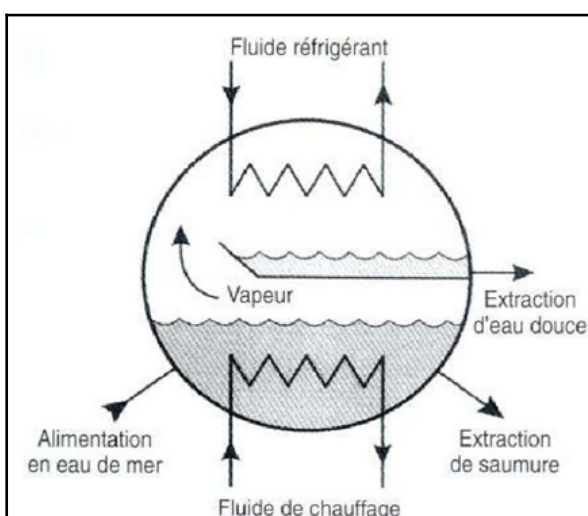


Figure 2 : Distillation

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 2).

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.

⁴ **Alain Maurel** : Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce - Ed. 2ème éd. juin 2006

Le procédé par distillation à effets multiples produit à partir d'eau de mer contenant de 35.000 à 45.000 ppm, de l'eau pratiquement pure : 5 à 30 ppm TDS (totalité des sels dissous).

3.2. DISTILLATION PAR DÉTENTES SUCCESSIVES

De l'eau de mer chaude est introduite dans une enceinte sous vide où l'eau est en équilibre avec sa vapeur (Figure 3). 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 50.000 à 100.000 kcal/m³) et de l'électricité pour les pompes et les auxiliaires (environ 4 kWh/m³).

Le procédé par détente successive 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 en Arabie Saoudite a une capacité de 900.000 m³/jour (mise en service en 2010).

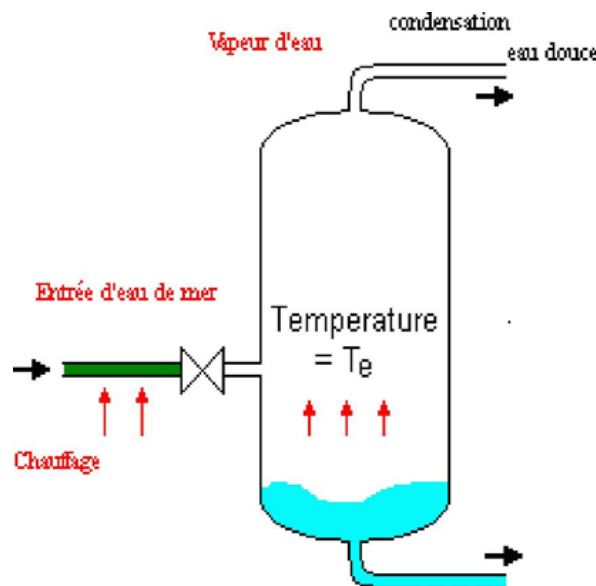


Figure 3 : Distillation flash

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

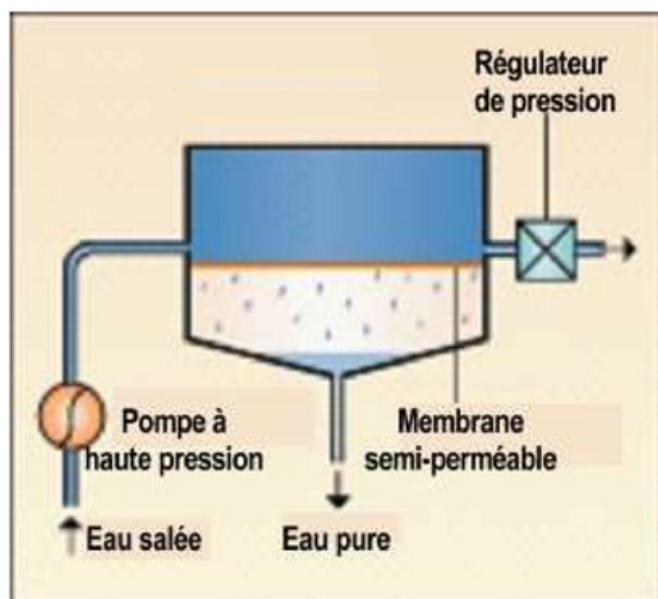


Figure 4 : Osmose inverse

Une installation industrielle est représentée sur le schéma suivant (Figure 4). 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.

Actuellement les installations d'osmose inverse consomment environ 2.7 à 3 kWh/m³.

Le procédé de dessalement par osmose inverse est très majoritairement celui retenu dans les installations récentes comme le montre le diagramme en Figure 5.

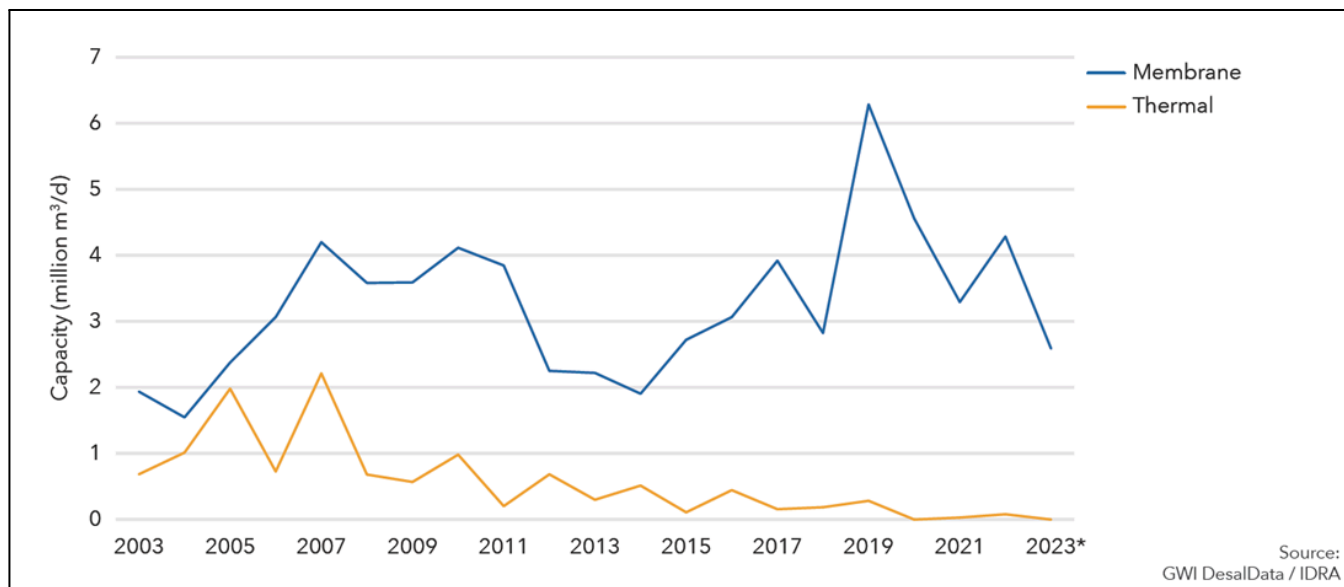


Figure 5 : Nouvelles installations de dessalement par technologie thermique/osmose inverse

4. COUPLAGE AVEC LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

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 dangereux pour l'environnement tels que : CO₂, NO_x, SO_x permet de s'inscrire dans le domaine du développement durable.

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.

À 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.

5. EXPÉRIENCE D'EXPLOITATION DE SYSTÈMES INTÉGRÉS DESSALEMENT-NUCLÉAIRE

En 2023, la capacité de dessalement d'eau de mer et saumâtre s'élève dans le monde à près de 100 millions de m³/jour (voir Figure 1) produits par 22 800 installations.

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.

L'expérience d'exploitation des réacteurs de puissance est importante, elle atteint environ 19 751 années-réacteurs à fin 2023⁵.

Mais l'expérience du dessalement nucléaire reste faible.

⁵ AIEA Nuclear Power Reactors in the World Edition 2024

Sur 411 réacteurs en fonctionnement en 2023, 8 sont couplés à un système de dessalement dont 1 en Inde et 7 au Japon.

Plusieurs projets associés à des installations nucléaires sont en cours en Chine (Lianjiang NPP, Xudapu NPP, Shidaowan NPP, Sanmen NPP, Hongyanhe NPP, Ningde NPP), en Turquie (Akkuyu NPP) et en Corée du Sud (Shinhanul NPP).

6. RÉFÉRENCES

1. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024
2. Actualités ONU <https://news.un.org/fr/story/2023/06/1136542>
3. IDRA DESALINATION & REUSE HANDBOOK 2023 – 2024
4. **Alain Maurel** : Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce - Ed. 2ème éd. 06 2006
5. AIEA Nuclear Power Reactors in the World Edition 2024