

Désalinisation de l'eau : Enjeux et Technologies



Novembre 2022

Sommaire

- 1. Contexte et enjeux autour de la désalinisation**
2. Le marché de la désalinisation
3. Technologies de désalinisation
4. Enjeux et verrous technico-économiques
5. Solutions alternatives : enjeux et initiatives remarquables à l'international

Contexte

Un déséquilibre entre la demande en eau potable et les ressources disponibles

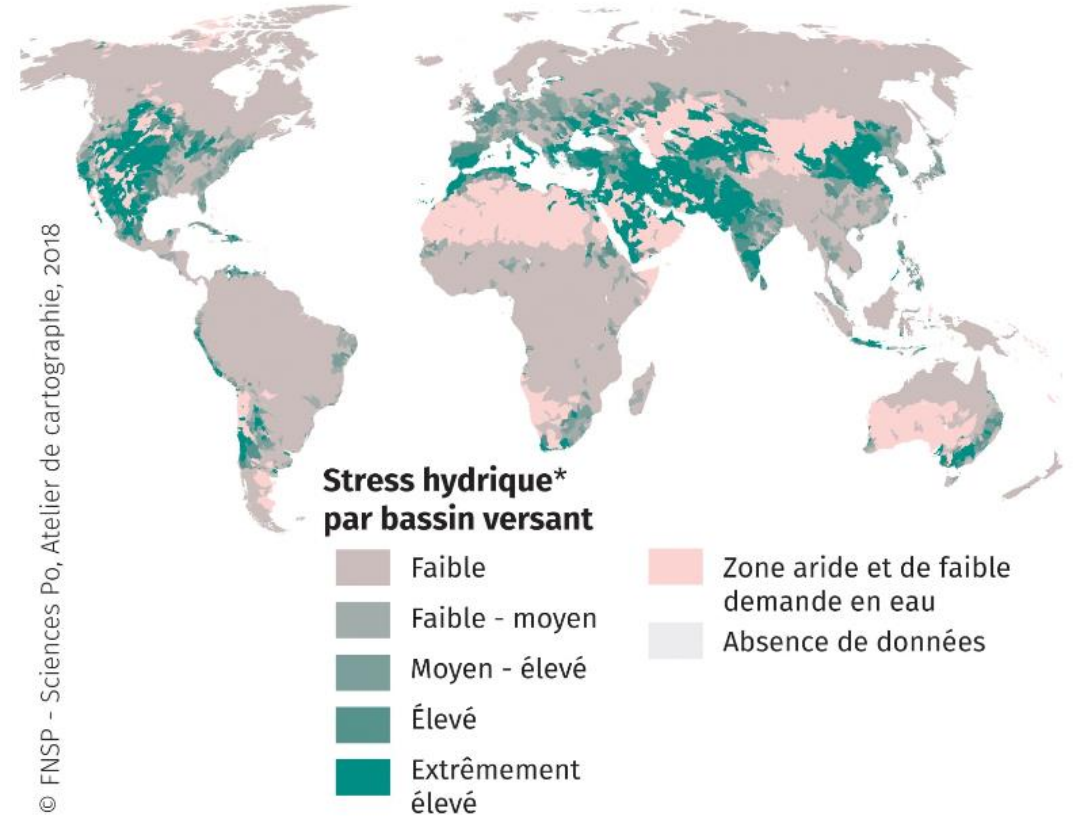
- La **demande en eau potable ne fait qu'augmenter** (changement climatique, agriculture intensive, croissance démographique).
- Le **dérèglement du climat promet d'aggraver la situation**



Ce contexte impose aux Etats de repenser leurs politiques hydriques pour préserver leur stabilité, résilience et souveraineté. **Les ressources d'eau non conventionnelles** peuvent alors avoir un rôle clé dans l'approvisionnement des populations en eau potable, **telle que la désalinisation de l'eau salée, qui représente 98% de l'eau du globe terrestre.**



Des solutions de dessalement existent et sont opérationnelles, cependant, **de forts enjeux sont liés à ces process.**



© FNSP - Sciences Po, Atelier de cartographie, 2018

* Le stress hydrique de référence mesure le rapport entre les prélèvements totaux annuels en eau et le total des ressources renouvelables annuelles disponibles, en tenant compte de l'utilisation en amont de la consommation. Des valeurs plus élevées indiquent plus de concurrence entre les utilisateurs.

Evolution des situations du stress hydrique en 2040.

(source : World Resources Institute)

Enjeux autour de la désalinisation

Des défis énergétiques, climatiques et environnementaux

- Des **procédés très énergivores**.
- Des usines qui fonctionnent majoritairement grâce aux énergies fossiles, **l'empreinte carbone est donc très élevée**. (~120 millions de tonnes de CO2/an).
- Des rejets importants de **saumure** dans l'écosystème

Des contraintes économiques et réglementaires

- **Des barrières économiques** liées à la complexité des processus de traitement qui induit des coûts de production très élevés.
- **Des barrières réglementaires**. Les membranes osmose ne sont par exemple par agréées pour les réseaux collectifs de distribution d'eau en France.

Des leviers pour faire face à ces enjeux

Les acteurs du secteur investissent en R&D pour tenter de :

- **Diminuer la consommation d'énergie** des sites de production
- **Réduire l'impact des procédés de désalinisation sur l'environnement** sur les rejets de saumures.
- **Réduire les coûts de production d'eau potable à partir de l'eau de mer**

On estime **si rien n'est mis en place pour rendre le dessalement plus durable, en 2050 pourrait être atteint un volume d'émissions de GES de 400 millions de tonnes de CO2/an**

Sommaire

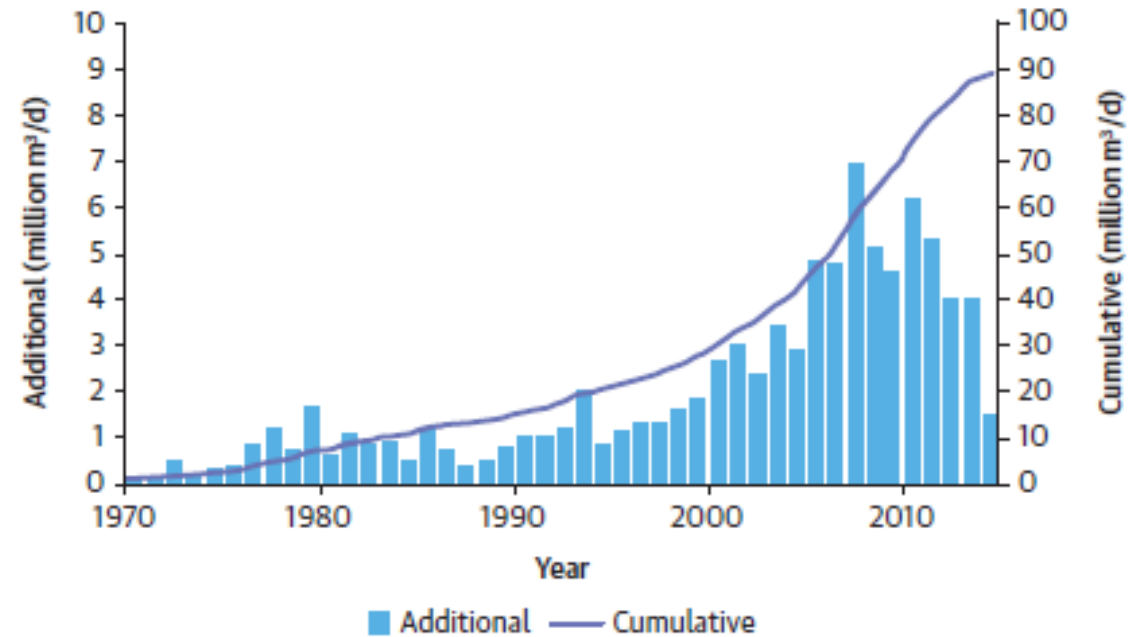
1. Contexte et enjeux autour de la désalinisation
2. **Le marché de la désalinisation**
3. Technologies de désalinisation
4. Enjeux et verrous technico-économiques
5. Solutions alternatives : enjeux et initiatives remarquables à l'international

Un marché en forte expansion

Un véritable « boom » des industries de dessalement est à l'œuvre depuis une vingtaine d'années.

- Plus de **21 000 stations de dessalement d'eau de mer en 2022**, soit deux fois plus qu'il y a 10 ans. [1]
- Près de **110 millions de m³ d'eau potable produite**. [1]
- Un **marché en croissance +6% à +12% de capacité par an**. [1]
- On estime que **300 millions de personnes bénéficient d'eau dessalée** [2]

Le Moyen-Orient représente 50% des capacités installées dans le monde. En 2030, les capacités de dessalement au Moyen - Orient devraient quasiment doubler.



Evolution des capacités de dessalement dans le monde (2019) [3]

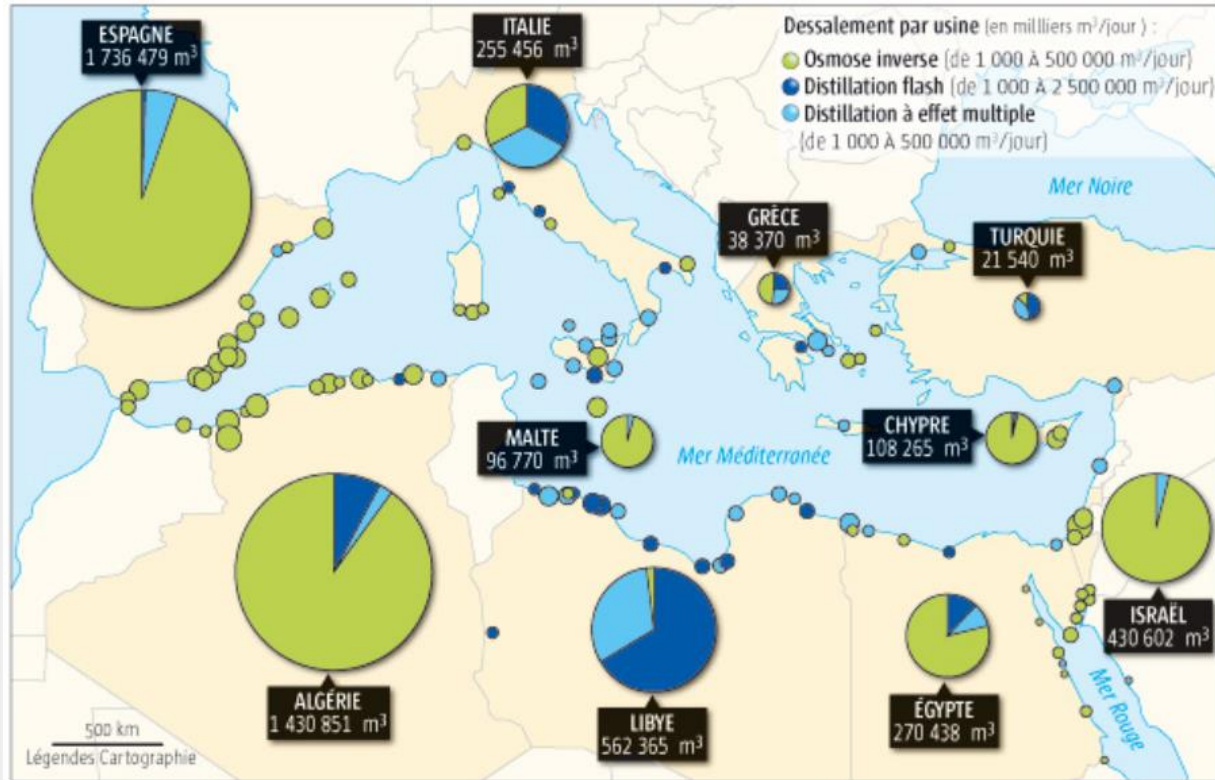
L'augmentation des capacités de dessalement s'explique par la raréfaction de la ressource en eau et par la rentabilité croissante de cette technologie.

[1] Etude de l'IFRI : Géopolitique du dessalement de l'eau de mer, septembre 2022

[2] <https://idadesal.org/> (IDA = International Desalination Association)

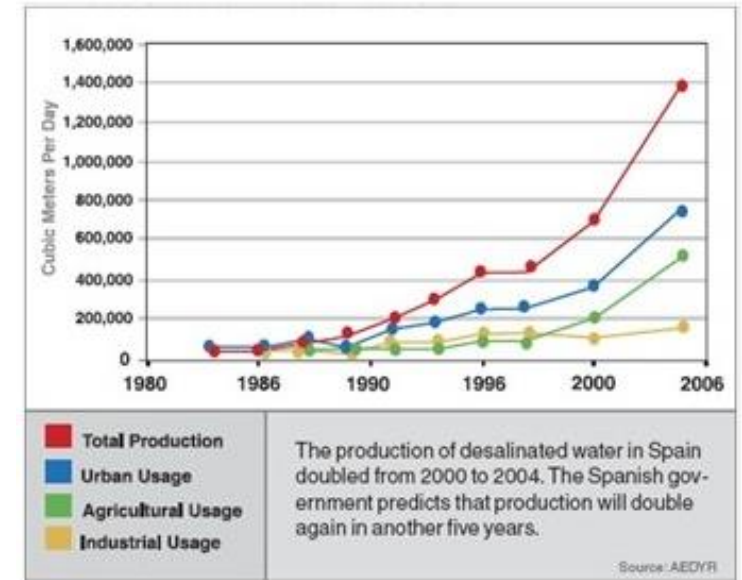
[3] « *The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World* », World Bank Group, mars 2019

Le dessalement en Europe



Usines de désalinisation en Méditerranée par technologie (2008) [1]

Focus sur l'Espagne :



Utilisation de l'eau dessalée en Espagne [1]

- Pour la consommation humaine
- Pour l'Irrigation des productions maraîchères intensives.

Focus sur la France :

Une **unité temporaire de dessalement sur l'île de Groix** pour contrer la sécheresse (été 2022) : « Cette nouvelle infrastructure a un coût, aussi bien financier (815 000 €) qu'énergétique (3 kWh pour 1 m³ d'eau produit). » [2]

La première alternative pour répondre aux besoins en eau en France reste le traitement des eaux usées.

[1] Source : <https://ecotoxicologie.fr/impacts-dessalement-eau-mer>

[2] Source : [article ouest-france](https://www.ouest-france.fr)

Les acteurs en place

Des leaders européens, des acteurs asiatiques ou locaux en plein essor

Les **acteurs européens** ont une **position leader** sur le marché par :

- leur facilité à réunir des fonds rapidement,
- leur expertise
- leur capacité à s'adapter aux besoins industriels des pays contractants.

France



Engie conserve une position leader dans la région Afrique du Nord/Moyen-Orient .



Veolia (fusion avec Suez qui ouvre de nouvelles perspectives en Amérique, au Moyen –Orient et en Europe)

Espagne



Les **entreprises asiatiques** rejoignent progressivement le marché du dessalement et font **concurrence** aux **acteurs traditionnels** :

Corée



Doosan Heavy Industries

Chine

ABENGOA

Une **grande partie** des pays qui se trouvent en situation de **stress hydrique** ont **développé** une **réelle expertise locale** sur le **dessalement** :

Israël (pionnier du secteur du dessalement)



IDE Technologies, qui a construit la totalité des usines du pays et dirige désormais de nombreux projets à l'international.

Arabie Saoudite



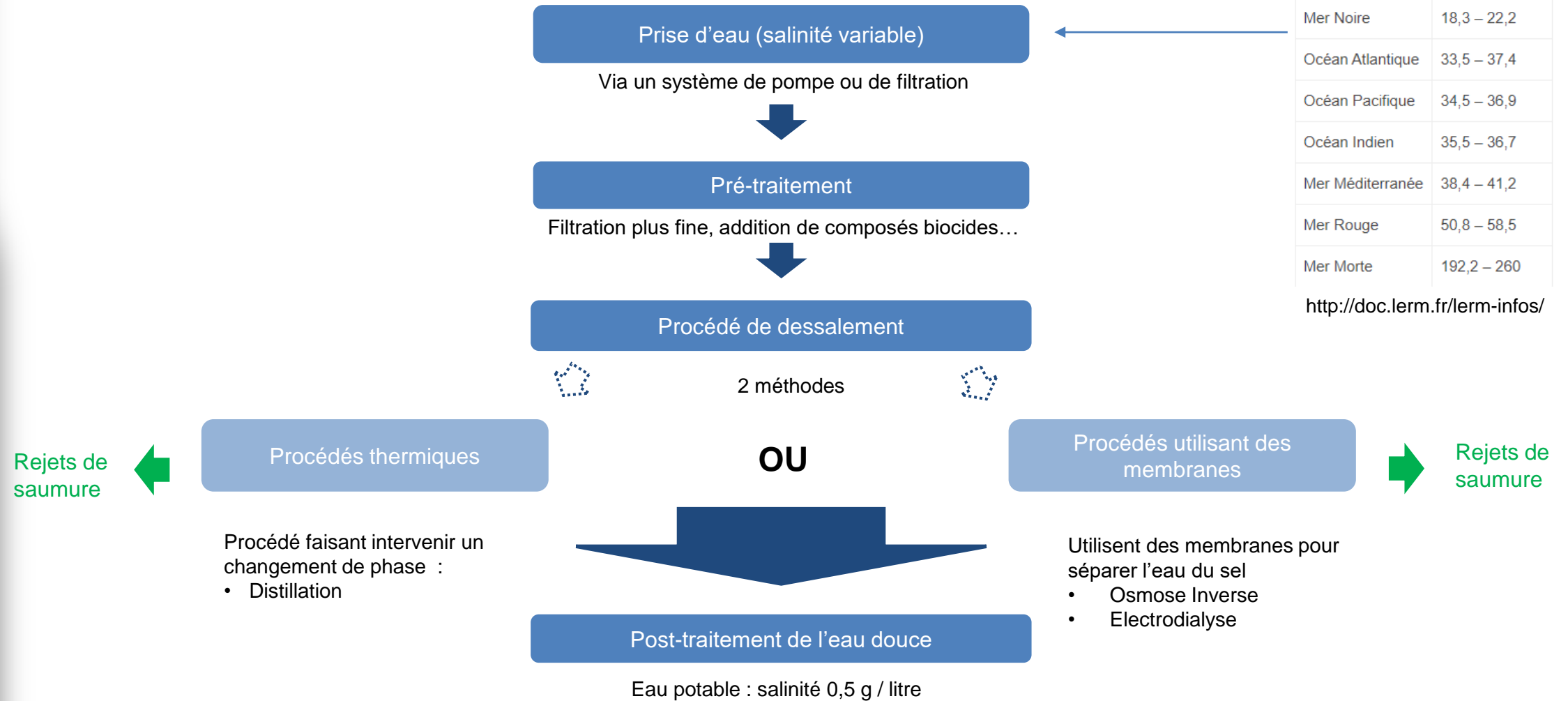
Emirats



Sommaire

1. Contexte et enjeux autour de la désalinisation
2. Le marché de la désalinisation
3. **Technologies de désalinisation**
4. Enjeux et verrous technico-économiques
5. Solutions alternatives : enjeux et initiatives remarquables à l'international

Principes généraux sur les process de désalinisation



| Mer considérée | Salinité en g/L |
|------------------|-----------------|
| Mer Baltique | 3 – 8 |
| Mer Noire | 18,3 – 22,2 |
| Océan Atlantique | 33,5 – 37,4 |
| Océan Pacifique | 34,5 – 36,9 |
| Océan Indien | 35,5 – 36,7 |
| Mer Méditerranée | 38,4 – 41,2 |
| Mer Rouge | 50,8 – 58,5 |
| Mer Morte | 192,2 – 260 |

<http://doc.lerm.fr/lerm-infos/>

Avec éventuellement une reminéralisation de l'eau produite. Post-traitement qui varie selon les normes locales et utilisations finales

Différentes applications :

Agriculture

Consommation

Industries

Industrie minière

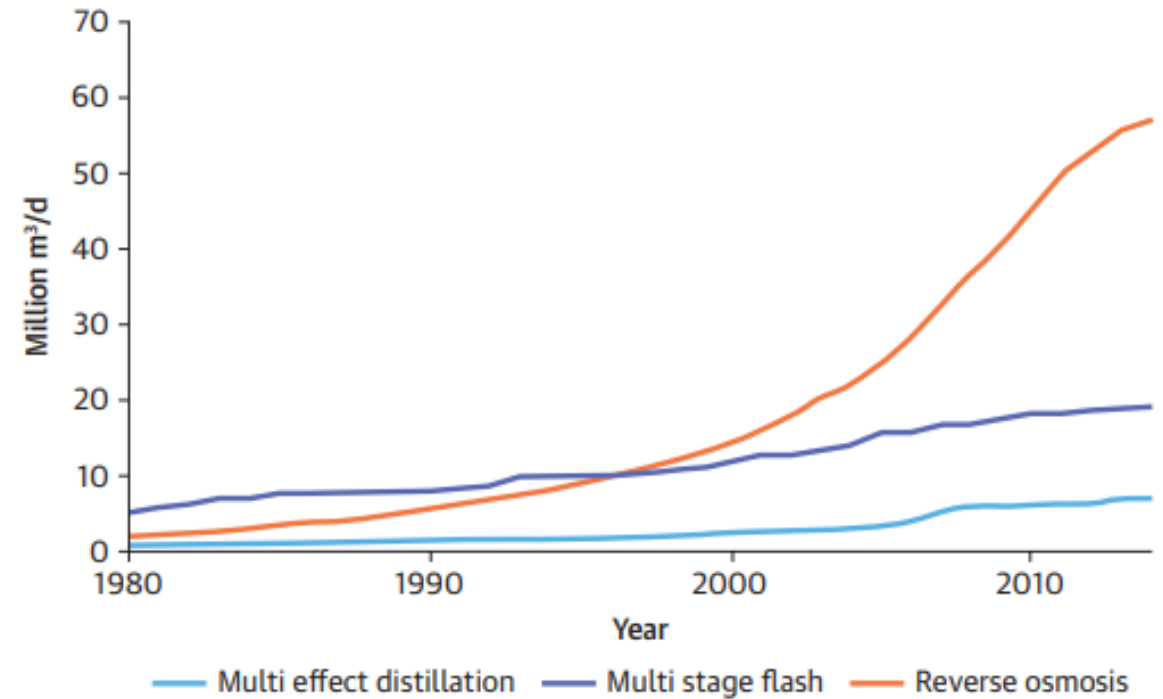
Principales technologies présentes sur le marché

Il existe plusieurs technologies de dessalement liées à ces 2 méthodes : procédés thermiques et utilisation de membranes. Certaines sont en cours de recherche ou en développement, mais les deux seules viables qui sont actuellement commercialisées et utilisées sont :

- **la distillation thermique :**
 - Procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)
 - Procédé de distillation à multiples effets (Multi- Effect distillation MED),
- **l'osmose inverse (OI)** (procédé de séparation par membranes).

Initialement, la majorité des usines étaient construites sur un modèle thermique, et notamment dans les pays du Golfe car le processus de MED est peu affecté par le degré de salinité de l'eau, qui peut détériorer les membranes. En 2015, 53% des usines de dessalement utilisaient le process thermique au Moyen Orient.

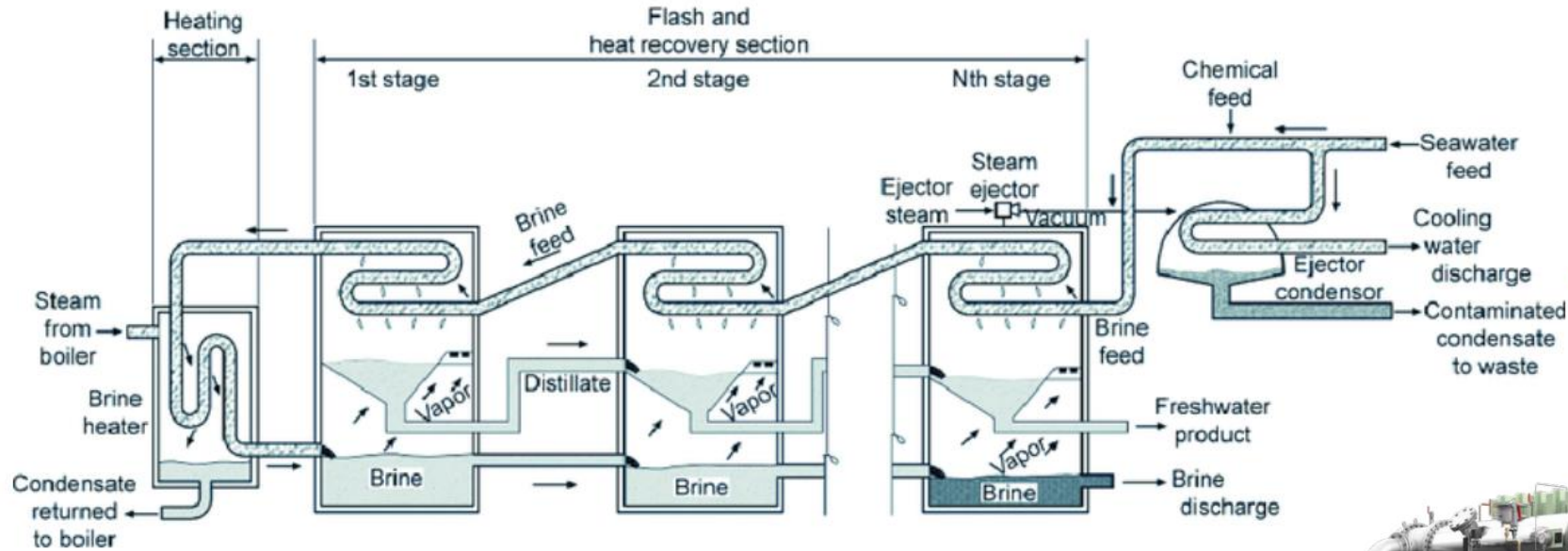
| OI | MSF | MED |
|-----|-----|-----|
| 63% | 23% | 8% |



Evolution des différentes technologies de dessalement dans le monde

Les technologies de distillation

Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)



Principe de fonctionnement du process MSF ([lien source](#))

- En général, 20 à 30 % de l'eau de mer d'alimentation est récupérée comme eau douce. [1]

Consommation : entre 19,6 et 27,3kWh/m³ d'eau dessalée. [2]



Multi Stage Flash Evaporators [3]

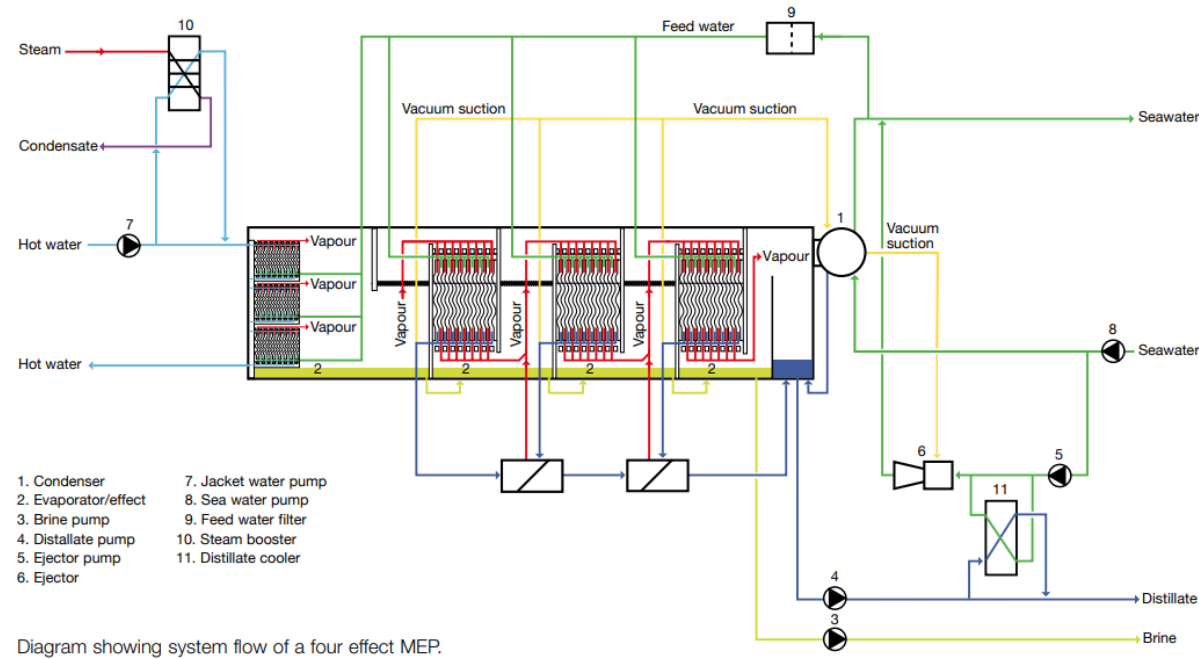
[2] Etude de l'IFRI : Géopolitique du dessalement de l'eau de mer, septembre 2022

[3] <https://www.wartsila.com/waw/freshwater/multi-stage-flash-evaporators>

[1] « The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World », World Bank Group, mars 2019

Les technologies de distillation

Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)



Principe de fonctionnement du process MED [3]



Unité de fonctionnement MED [3]

- En général, 25 % à 40 % de l'eau de mer d'alimentation est récupérée comme eau de production sous MED. [1]

Energies utilisées : Energie thermique à fournir à la chaudière pour produire la vapeur d'eau.

Consommation : Entre 14,5 et 21,4kWh/m³ d'eau dessalée [2]

*TVC = Thermal vapor compression

[1] « The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World », World Bank Group, mars 2019

[2] Etude de l'IFRI : Géopolitique du dessalement de l'eau de mer, septembre 2022

[3] <https://www.alfalaval.com/products/process-solutions/fresh-water-generation/multi-effect-desalination/mep-multi-effect-plate-evaporator/>

Les technologies d'osmose inverse (OI)

Peut être utilisée pour : dessalement de l'eau de mer / eau saumâtre et pour le traitement des eaux usées : La membrane ne permet pas le passage de certains types d'espèces de natures chimiques et biologiques ainsi que le passage de certaines grosses molécules ou des ions. [1]

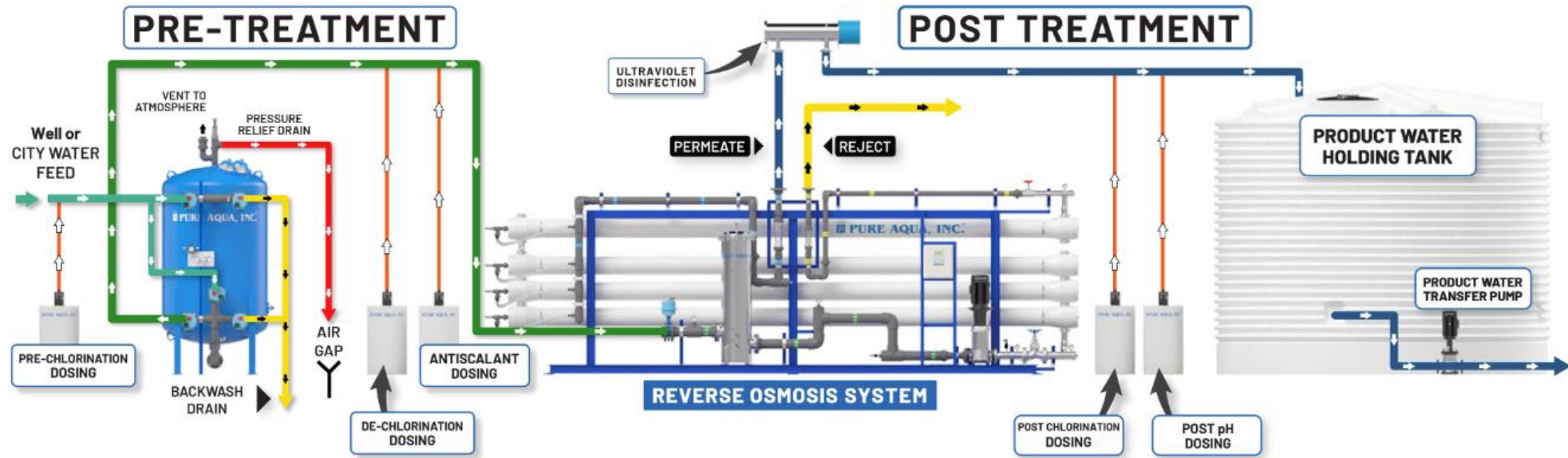


Schéma de principe du système d'osmose inverse industriel ([lien source](#))

Le taux de récupération est d'environ :

- 40 % à 60 % pour l'eau de mer
- 50 à 90 % pour les eaux saumâtres. [1]

Consommation énergétique :

Entre 2,5 et 3kWh / m³ d'eau dessalée. [2]

Un pré-traitement est nécessaire



Séparation de la saumure de l'eau via les membranes



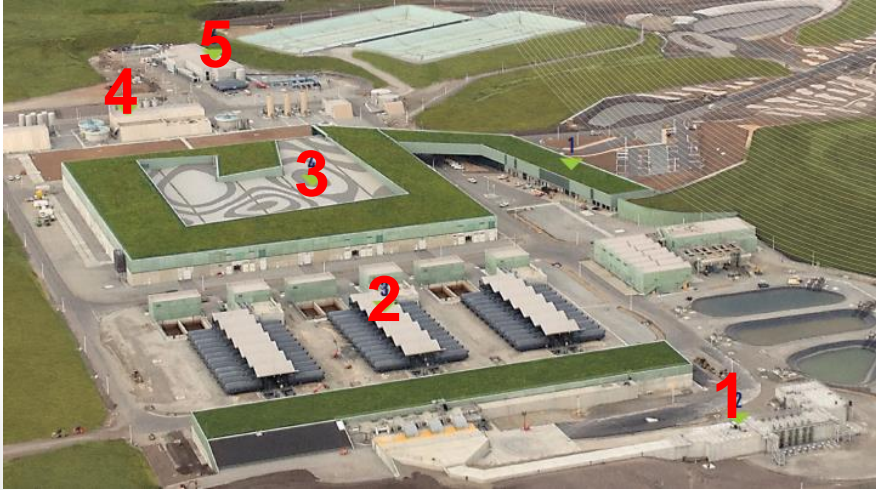
Post-traitement, de l'eau pour la rendre potable.

[1] « *The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World* », World Bank Group, mars 2019

[2] Etude de l'IFRI : Géopolitique du dessalement de l'eau de mer, septembre 2022

[3] <https://ecotoxicologie.fr/impacts-dessalement-eau-mer>

Composants d'une usine OI (cas de l'usine de Melbourne)



1. Station de relèvement

Aspire l'eau de mer via des tunnels souterrains.
Rejette l'eau de mer concentrée dans l'océan à l'issue du processus

- 12 pompes, chacune capable d'envoyer jusqu'à 1m³ d'eau par seconde.

2. Pré-traitement

Améliore la performance du process OI. Plusieurs dispositifs de filtrage pour les particules fines (sable, sédiments)

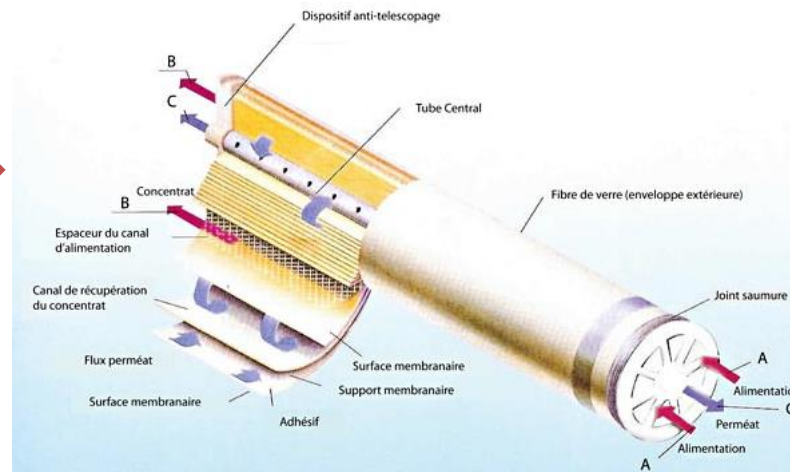
- 3 gros tambours filtrants retiennent les algues et autres matières en suspension.
- 72 filtres bicouches permettent de filtrer les particules plus fines



3. Process d'OI

Système de membranes. Ici, 2 étapes d'OI. Eau propulsée à haute pression au travers des membranes pour séparer le sel et l'eau.

- 3 lignes et 51 racks d'osmose inverse
- L'eau de mer passe par 55 000 membranes destinées à séparer le sel de l'eau



4. Ligne de potabilisation

Reminéralisation de l'eau en fonction des normes.

- Post-traitement (ajustement pH ...)

5. Station de transfert

Stockage de l'eau puis transfert
Evacuation de la saumure

Les usines hybrides

Des usines de **dessalement hybrides** combinent les éléments suivants :

- une installation de dessalement thermique (soit MSF, soit MED)
- un système de dessalement OI.

Ces installations combinées distillation/ OI sont généralement associées à une station de centrale électrique et elles partagent une prise d'eau et un exutoire communs.

Dans ces projets, généralement 2/3 du volume total d'eau dessalée sont produits par dessalement thermique et 1/3 par OI.

Ce couplage de 2 technologies est particulièrement **utile quand il y a de fortes variations de demande en électricité ou de demande en eau** (à la journée ou entre saisons)

- **l'excédent d'électricité peut être détourné vers la production d'eau** dans une configuration hybride.
- Permet aussi de s'adapter à la demande en eau en activant le process OI ou la technologie thermique selon ce qui coûte le moins cher en temps réel.

Sommaire

1. Contexte et enjeux autour de la désalinisation
2. Le marché de la désalinisation
3. Technologies de désalinisation
4. **Enjeux et verrous technico-économiques**
5. Solutions alternatives : enjeux et initiatives remarquables à l'international

Enjeux technico-économiques

| | MSF | MED-TVC | OI |
|--|--|--|--|
| Coût total de l'eau (en USD) | Entre 1,02 et 1,74/m3 | Entre 1,12 et 1,50/m3 | Entre 0,49 et 2,86/m3 Grande disparité de coût pour des usines similaires en taille : technologie sensible à la qualité de la source d'eau. |
| Consommation énergétique du process | Entre 19,6 et 27,3kWh/m3 d'eau dessalée | MED : Entre 14,5 et 21,4kWh/m3 d'eau dessalée MED – TVC : Entre 7 et 12kWh/m3 d'eau dessalée | Entre 2,5 et 3 kWh/m3 d'eau dessalée |
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> • Pas de traitement de l'eau après process • La qualité de l'eau de source a un impact limité sur les performances. | <ul style="list-style-type: none"> • Processus peu affecté par le degré de salinité de l'eau • Obtention d'une eau très pure | <ul style="list-style-type: none"> • Consommation énergétique moins élevée → moins de rejets de CO2. • Pas besoin de vapeur. • Les technologies membranaires peuvent également être utilisées pour le traitement des eaux usées. • Taux de récupération plus élevé (entre 40 et 60%) • Faible entartrage |
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> • Consommation d'énergie la plus élevée • Faible taux de récupération (entre 20 et 30%) | <ul style="list-style-type: none"> • Risque d'entartrage. • Plus complexe à exploiter que MSF. • Faible taux de récupération (entre 25 et 40%). | <ul style="list-style-type: none"> • Performance du système qui dépend de la qualité et du degré de salinité de la source d'eau. • Traitement pré-process et post-process nécessaires. • Maintenance des membranes régulière |

Enjeux géographiques et territoriaux

Le choix de la technologie dépend :

- des sources d'énergies disponibles et leur coûts
- De la salinité de l'eau

| Procédés thermiques (MSF et MED) | OI |
|---|--|
| <p>Procédés thermiques utilisés dans tout le Moyen-Orient :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mers de la région très salines et présentant des concentrations élevées de matières organiques (contraintes techniques pour la technologie de dessalement à membrane). • Les technologies thermiques peuvent utiliser la vapeur résiduelle des turbines de production d'électricité. <p>Ces raisons, associées au faible coût de l'énergie dans la région, font des procédés thermiques une technologie de dessalement plus attrayante au Moyen-Orient que dans la plupart des autres régions.</p> | <p>La fiabilité de la technologie est sensible à la qualité de la source d'eau.</p> <p>Les sources d'énergie renouvelables s'adaptent bien à la technologie OI.</p> <p>De plus en plus répandue pour les raisons suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consommation énergétique en baisse • Travaux de recherche en cours pour mettre au point des membranes plus fines qui permettrait de réduire la pression nécessaire à la désalinisation. |

Sommaire

1. Contexte et enjeux autour de la désalinisation
2. Le marché de la désalinisation
3. Technologies de désalinisation
4. Enjeux et verrous technico-économiques
5. **Solutions alternatives : enjeux et initiatives remarquables à l'international**

Enjeu de déploiement des EnR

- La problématique de l'intermittence.



| | Energie éolienne | Energie solaire | Energie houlomotrice |
|-----------------------------------|------------------|--|----------------------|
| Constance de l'offre | Faible | Faible | Elevée |
| Localisation usine | Côtes | Partout où il y a suffisamment de soleil | Côtes |
| Maturité de la technologie | Etablie | Etablie et en voie de d'amélioration | Prototype |
| Coût vs énergie fossiles | Compétitive | En décroissance | N/A |

- Seulement 1 % des usines de dessalement utilisent de l'énergie renouvelable actuellement.**
- Solutions envisagées :
 - ✓ **Couplage à d'autres sources d'énergie** : Energie solaire ou éolienne couplée par une connexion au réseau. Le couplage à une centrale nucléaire peut également être envisagé.
 - ✓ le **stockage thermique**, comme *via* les centrales d'énergie solaire concentrée qui peuvent stocker de la chaleur de façon à continuer de fonctionner même sans soleil.
 - ✓ L'installation d'un **stockage de l'eau** (construction de tours d'eau qui permettrait de stocker le surplus pour continuer la distribution d'eau la nuit).

Source : <https://alj.com/fr/perspective/de-leau-douce-et-des-idees-fraiches-lenergie-renouvelable-peut-elle-etre-lavenir-du-dessalement/>

Initiatives sur les énergies éoliennes



La plupart des projets de dessalement à grande échelle alimentés par des énergies renouvelables utilisent l'énergie éolienne pour produire de l'électricité et alimenter le process d'osmose inverse.

Selon l'International Renewable Energy Agency (IRENA), les centrales de dessalement éoliennes notables comprennent:

| Communes/ industriels (Pays) | Année d'installation | Technologie | Sources d'énergie | Capacité de production d'eau potable |
|------------------------------------|-------------------------|---|--|--|
| Gran Canaria (îles Canaries) | 1986 | OI A l'origine, l'usine utilisait la technologie électrodialyse. | NA | 50m3/jour |
| Fuerteventura (îles Canaries) | 1993 | NA | Système hybride éolien- diesel. | 56m3/jour |
| Perth (Australie) | 2006 | OI | Alimentée par un parc éolien qui permet d'alimenter les besoins de 180 GWh/an de l'usine. | 143 000m3/jour [1] |
| Sydney (Australie) | 2012 | OI | Alimentée à 100% par un parc éolien, production de 450GWh/an | 250 000m3/jour |



Usine de Sydney

Source : « *The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World* », World Bank Group, mars 2019

[1] <https://www.suezwaterhandbook.fr/etudes-de-cas/dessalement/usine-de-dessalement-d-eau-de-mer-par-Osmose-Inverse-de-Perth-Australie>

Initiatives sur l'énergie solaire

L'énergie solaire est considérée comme ayant le plus grand potentiel en tant que source d'énergie renouvelable à long terme pour un dessalement durable.



Pour les zones reculées, éloignées des réseaux énergétiques, des solutions modulaires se développent via le photovoltaïque :

Pour le moment ces systèmes à petite échelle sont encore **1,5 à 3 fois plus coûteux** (*Low Carbon Desalination Report, 2016*) mais la baisse du coût des photovoltaïques ces dernières années améliore sensiblement leur compétitivité.

- en Arabie Saoudite, Suez (désormais Veolia) a installé **des unités modulaires** en containers.
- [Mascara Renewable Water](#) a installé des **modulaires 100% autonomes** dans plusieurs pays à travers le monde (Afrique, Amérique du Sud, Asie Pacifique et Moyen-Orient).
 - Capacité de production : Jusqu'à 15 000 m³ d'eau douce / jour selon l'installation.



Modulaire Mascara

Etude de l'IFRI : Géopolitique du dessalement de l'eau de mer, septembre 2022

Usines de dessalement utilisant l'énergie solaire :

| Communes/ industriels (Pays) | Année d'installation | Technologie | Commentaires | Capacité de production d'eau douce |
|---|----------------------|-----------------|---|-------------------------------------|
| Al Khafji (Arabie Saoudite) | 2017 | Osmose inverse. | La plus grande centrale photovoltaïque. | 60 000m ³ /jour |
| Usine Metito, King Abdullah Economic City (Arabie Saoudite) | En cours | Osmose inverse | NA | 30 000 à 60 000m ³ /jour |
| Al Shuqaiq 3IWP (Arabie Saoudite) | 2021 | Osmose inverse | Investissement : 600M\$ | 450 000m ³ /jour |

Source : <https://alj.com/fr/perspective/de-leau-douce-et-des-idees-fraiches-lenergie-renouvelable-peut-elle-etre-lavenir-du-dessalement/>

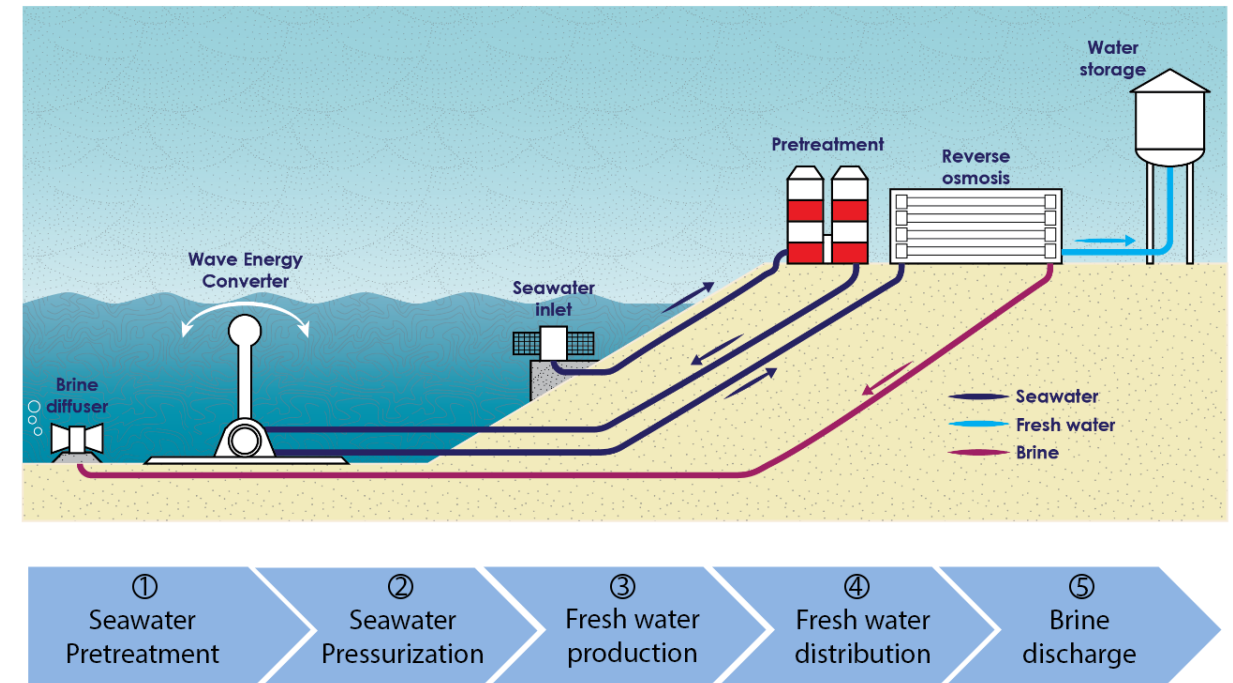
Initiatives sur l'énergie houlomotrice



Resolute Marine Limited (société irlandaise) : le premier système de dessalement alimenté par la force marémotrice

L'innovation Wave2O, portée par l'entreprise irlandaise Resolute Marine Limited (2007), est au stade prototype et sera testée au Cap Vert.

Environ 35 % de l'eau d'alimentation est transformée en eau douce, soit un taux de récupération relativement faible, mais qui présente des avantages liés à une maintenance réduite, une durée de vie prolongée de la membrane et une salinité moindre de la saumure. [1]



Capacité prévue : 4 000m³ d'eau douce / jour.

Le développeur, Resolute Marine Energy, affirme que la centrale appelée Wave2O produira de l'eau potable à un tiers du prix des systèmes conventionnels. [2]

[1] <https://www.resolutemarine.com/applications/>

[2] <https://cordis.europa.eu/article/id/241187-wave-power-for-clean-drinking-water/fr>

Autres technologies innovantes

Une technologie par extraction liquide - liquide

Start-up française créée en 2012. Elle a, à l'origine, développé une **solution innovante et écologique de dessalement et d'adoucissement de l'eau.**

1 brevet déposé en 2015 : dispositif et méthode de dessalement d'eau par déionisation thermique et liquide d'extraction ionique en phase liquide.

- **Solution technique** : Extraction liquide-liquide mettant en œuvre un liquide spécifique appelé le Flionex. Le Flionex rentre en contact avec l'eau à traiter pour en extraire les particules souhaitées.
- Piège ionique pour l'extraction de Lithium, Strontium, Baryum, Calcium...

Marchés et applications adressés par la solution Adionics : industries, marché du pétrole et du gaz, fabricants de produits à base de lithium.

Un business model qui, aujourd'hui, se concentre principalement sur l'extraction et la vente de métaux à forte valeur ajoutée



Recherches menées sur des techniques innovantes

- **Recherches sur la réduction de la consommation de l'OI :**
 - Pré-traitement,
 - Filtrage nanotechnologique
 - Méthodes électrochimiques laissent entrevoir un processus de dessalement plus efficace.
 - Une grande partie des études se concentre sur l'amélioration de l'efficacité des membranes.
- **Membranes biomimétiques** dotées de structures aquaporine calquées sur des micro-organismes : premiers stades de recherches mais permettraient un dessalement basse énergie. .
- L'agriculture dépend de plus en plus du dessalement. Or, l'osmose inverse, la principale technologie utilisée, gaspille beaucoup d'eau et élimine les nutriments essentiels, qui doivent donc être réintroduits par le biais d'engrais. De nouvelles solutions potentielles en développement :
 - **L'électrodialyse sélective intelligente** (ISDE, en anglais) élimine sélectivement de l'eau les ions que les plantes n'apprécient guère (à savoir les ions monovalents comme le sodium et le chlorure), tout en conservant les nutriments précieux comme le calcium et le magnésium. Cette solution pourrait permettre d'économiser jusqu'à 25 % en consommation d'eau et 30 % en utilisation d'engrais par rapport à l'osmose inverse.

Dossier rédigé par Nadège ROY, Lucile TREVISAN et Nicolas LOUEE, In Extenso Innovation Croissance (www.inextenso-innovation.fr)



Malgré le soin apporté à la réalisation de cette note, certains liens hypertextes peuvent ne pas fonctionner correctement, notamment en raison de modifications des sites internet ciblés (ex : « page not found ») ou d'options de sécurité de certains viewer de PDF.

Contact : Hasna AMBARKI – Hasna.Ambarki@cetim.fr – 09 70 82 16 80

MÉCATHÈQUE

Trouvez toutes nos études
en un seul clic !





Vers le futur