

## Empreinte de Carbone des Stations de Dessalement en Algérie

\*M. Ammitouche, H. Baloul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département du Génie des Procédés, Faculté de Technologie, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, Algérie

\*Corresponding author:

### RÉSUMÉ

Face aux prévisions de stress hydrique, les États d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (ANMO) s'engagent dans des plans d'action à long terme afin d'augmenter leurs capacités de résilience au stress hydrique. Le développement du dessalement est au cœur de ces plans quinquennaux : dans la grande majorité des pays de la région, les capacités de dessalement vont doubler d'ici à 2030, 2050 au plus tard. **Les perspectives de stress hydrique rendent inéluctable l'augmentation de la demande d'eau dessalée [1].**

Les chiffres actuels indiquent qu'ils existent environ 16000 usines de dessalement dans le monde produisant d'environ 95 millions m<sup>3</sup> d'eau dessalée et 142 millions m<sup>3</sup> de rejet de saumure chaque jour avec différentes technologies [ 2]. (Figure 1)

La production de l'eau par dessalement de l'eau de mer se développe activement dans plusieurs domaines dans le monde y compris les côtes méditerranéennes par environ 47,5 % de la production mondiale.

Plusieurs techniques de dessalement existent bien que l'osmose inverse (OI) est le plus utilisé dans le monde en raison de son efficacité énergétique et son faible coût de production d'eau douce.

L'Algérie dispose 11 grandes stations de dessalement opérationnelles réparties sur un littoral de 1200 Km , de capacité totale d'environ 2,1 millions m<sup>3</sup> d'eau dessalée par jour et qui représente d'environ 17% de la consommation en eau potable .(Figure 2)

La technologie de l'osmose inverse est utilisée dans 10 /11 usines, à l'exception de la station Kahrama à Oran avec la technique du MSF.

Selon le ministère des ressources en eau à la fin de l'année 2023 le nombre des stations de dessalement s'augmentera à 22 stations pour satisfaire 42% de la consommation en eau potable et dépassera 50% en 2030.

Le dessalement ne peut jamais se faire avec « zéro énergie ». La quantité minimale d'énergie à séparer l'eau salée varie en fonction de la technologie utilisée, de la salinité de l'eau à dessaler et du pourcentage d'eau douce à rétablir (taux de conversion). Toutefois, des améliorations de processus qui rapprochent la consommation d'énergie réelle du minimum possible réduit l'empreinte carbone d'une usine de dessalement.

Ce travail consiste à estimer l'empreinte carbone sur les 11 grandes stations de dessalement en Algérie. Cette réalisation objective permettrait de comprendre l'impact environnemental causé par ces installations sur l'environnement.

**Mots clés:** dessalement, environnement, empreinte carbone, Algérie.

### 1. Introduction

Le dessalement d'eau s'impose progressivement comme la solution de premier plan pour faire face au stress hydrique croissant, c'est-à-dire au déséquilibre entre la demande en eau et la quantité disponible. Les Nations

unies estiment qu'en 2025, les deux tiers de la population mondiale seront concernés par ces défis. Si les causes de la raréfaction de l'eau sont multiples (changement climatique, agriculture intensive et croissance démographique), elle impose aux États de repenser leurs politiques hydriques, centrales pour la préservation de leur stabilité, résilience et souveraineté. Face aux prévisions de stress hydrique, les États d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (ANMO) s'engagent dans des plans d'action à long terme afin d'augmenter leurs capacités de résilience au stress hydrique. Le développement du dessalement est au coeur de ces plans quinquennaux : dans la grande majorité des pays de la région, les capacités de dessalement vont doubler d'ici à 2030, 2050 au plus tard. **Les perspectives de stress hydrique rendent inéluctable l'augmentation de la demande d'eau dessalée.** (Figure 3). Le dessalement d'eau est une industrie qui émet une quantité importante d'émissions de GES. Les procédés de dessalement sont très énergivores et leur consommation énergétique varie selon la méthode utilisée. Parmi les méthodes thermiques (25 % des usines) qui sont les plus énergivores ; la méthode MSF (*multi-stage flash*) consomme entre 19,6 et 27,3 kWh par m<sup>3</sup> d'eau dessalée ; la méthode MED (*multi-effect distillation*) consomme entre 14,5 et 21,4 kWh pour 1 m<sup>3</sup> d'eau dessalé ; et la méthode MVC (*mechanical vapor compression*) consomme entre 7 et 12 kWh pour 1 m<sup>3</sup> d'eau dessalée. Les méthodes par membranes ont une consommation énergétique moins élevée : l'osmose inverse consomme entre 2,5 et 3 kWh par m<sup>3</sup> d'eau dessalée, et l'électrodialyse consomme entre 2,7 et 5,6 kWh/m<sup>3</sup>. Puisque les usines de dessalement fonctionnent majoritairement grâce aux énergies fossiles, leur empreinte carbone est particulièrement élevée. Le calcul énergétique actuel est assez clair : le dessalement de 1 000 m<sup>3</sup> (un million de litres) par jour consomme l'équivalent approximatif de 10 000 tonnes de pétrole par an<sup>9</sup>. L'empreinte carbone du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse (RO) a été calculée entre 0,4 et 6,7 kilogrammes de CO<sub>2</sub> équivalent par mètre cube (kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>). Cela signifie que le dessalement de 1 000 m<sup>3</sup> d'eau de mer pourrait potentiellement libérer jusqu'à 6,7 tonnes de CO<sub>2</sub>. [3]. Les énergies renouvelables restent pour le moment faiblement utilisées par le dessalement dans le monde puisqu'une étude menée en 2017 estime qu'elles ne fournissent que 1 % de la demande d'énergie nécessaire au dessalement<sup>14</sup>. Ainsi, si la consommation d'énergie varie selon le mix énergétique, le type d'usine et sa taille, on peut

néanmoins estimer que chaque année, au moins 120 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>/an sont dues aux secteurs du dessalement. Le pétrole brut contribuerait par ailleurs quatre fois plus aux émissions de GES que les autres combustibles fossiles utilisés pour le dessalement<sup>15</sup>. Les techniques par osmose inverse sont considérées comme étant les moins négatives pour le climat puisqu'elles mettaient entre 2,1 à 3,6 kg de CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> d'eau dessalée tandis que les technologies thermiques se situent plutôt entre 8 à 20 kg de CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> d'eau dessalée [1].

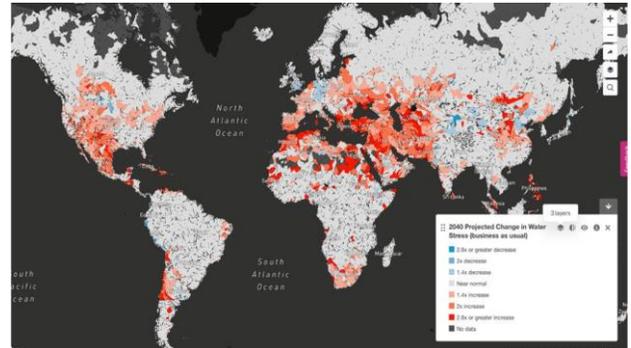


Figure 3: Évolution des situations du stress hydrique en 204  
Source : World Ressource Institute.

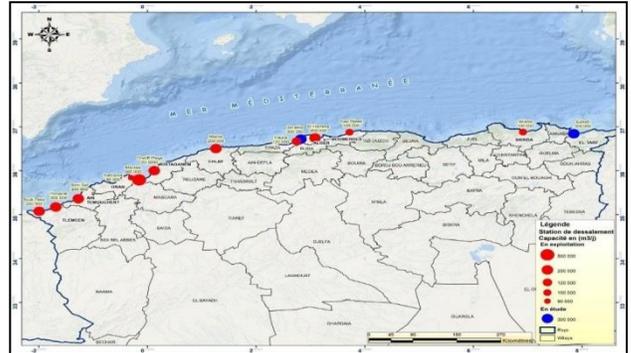


Figure 2: Répartition des stations de dessalement de l'eau de mer en l'Algérie.

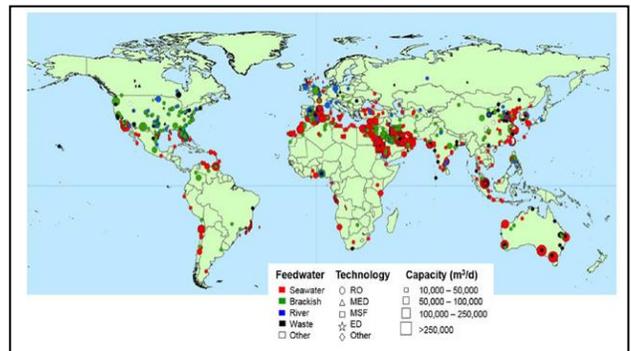


Figure 3: Répartition mondiale des grandes usines de dessalement par capacité, type d'eau d'alimentation et technologie de dessalement [2]

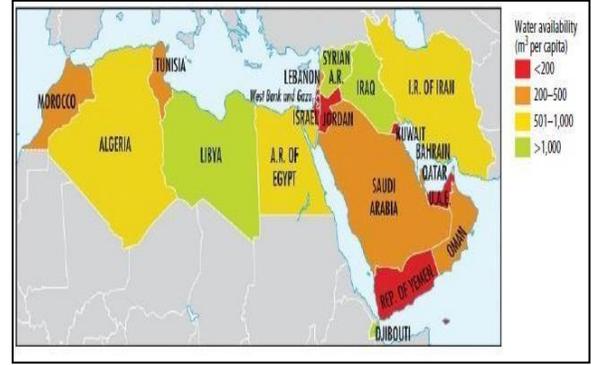


Figure 4: Station de dessalement Cap Djinet

### 1. Ressources hydriques, dessalement de l'eau de mer et change-ments climatiques

L'eau et l'énergie sont deux biens inséparables qui régissent notre vie et favorisent la civilisation. Pour tout pays, l'accès à l'eau est essentiel pour le développement économique et social global, au-delà des besoins humains immédiats. Ceci est particulièrement pertinent en Algérie où les ressources en eau sont limitées, vulnérables et inégalement réparties car la majeure partie de son territoire est soit aride soit semi-aride. La disponibilité moyenne d'eau par habitant est déjà faible, même de légères variations créent des conditions catastrophiques. Selon l'analyse future, si le climat suit la tendance moyenne prévue, la pénurie d'eau en Algérie augmentera considérablement dans tous les scénarios de changement climatique en raison de l'augmentation de la demande et de la réduction de l'offre (Figure 5) [5] (International Bank for Reconstruction and Development (IBRD), 2012).

Le pays compte déjà beaucoup sur le dessalement pour couvrir une partie importante de son approvisionnement en eau et faire face à la hausse des besoins en eau. Pourtant, la grande dépendance au dessalement exigera également une plus grande attention à ses impacts environnementaux négatifs. La consommation d'énergie élevée pour le dessalement d'eau de mer soulève des inquiétudes sur les émissions de gaz à effet de serre contribuant davantage aux changements climatiques et donc une attention accrue est accordée à la réduction ou l'élimination des émissions de gaz à effet de serre en alimentant le dessalement avec des énergies renouvelables, directement ou indirectement.



développement émetteurs de gaz à effet de serre, L'Algérie contribue avec 0,36% au réchauffement climatique de la planète, un chiffre qui doit être mis en perspective avec les 4% que représente l'Afrique dans les émissions globales de dioxyde de carbone [7] (Taabni, et al., 2012).

### 3. Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre

Le dessalement a des impacts environnementaux importants qui affectent à la fois l'atmosphère et les sources d'eau. La forte demande en énergie thermique et électrique du procédé produit des impacts atmosphériques secondaires sous la forme d'émissions de CO<sub>2</sub>. Les systèmes hydriques sont de grands utilisateurs d'énergie et par conséquent contribuent à la production de gaz à effet de serre. L'énergie est consommée dans chaque étape de la production d'eau. Elle est nécessaire pour transporter l'eau des sources situées à distance, pour pomper l'eau stockée dans aquifères souterrains, et de le traiter pour répondre aux niveaux réglementaires rigoureux. L'utilisation de l'énergie contribue à l'empreinte carbone dans le secteur de l'eau.

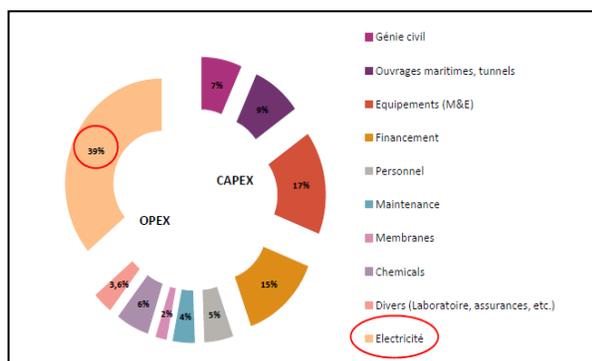


Figure 6 : Structure des coûts d'un projet de dessalement

Actuellement, l'énergie utilisée dans les procédés thermiques et RO est fournie par les combustibles fossiles. Quelle que soit la source d'énergie, qu'elle soit électrique ou thermique (Figure 6), d'importants volumes de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz sont produits et émis dans l'atmosphère. Les préoccupations environnementales associées à la demande d'énergie sont donc indirectement associées au processus de dessalement ou les émissions de polluants atmosphériques et les eaux de refroidissement provenant de la production d'énergie électrique, de la source de combustible et du transport de carburant [9].

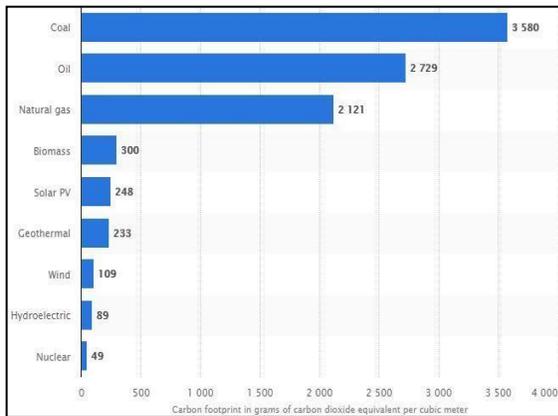
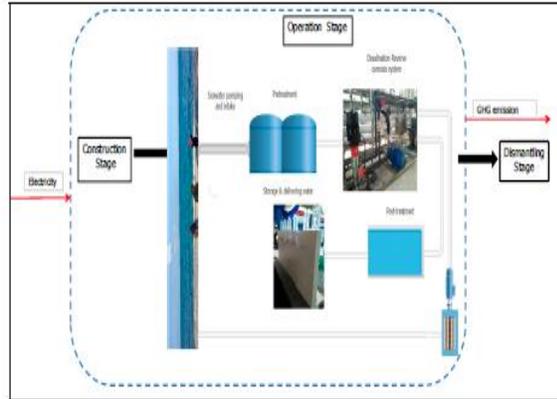
La production d'un mètre cube d'eau de mer dessalée, utilisant la technologie basse énergie RO, dégage en moyenne 2,0 kg de CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>. La technologie de dessalement thermique telle que MSF générera en moyenne 10 kg de CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>. En moyenne, on estime que la production de chaque m<sup>3</sup> d'eau dessalée dans la région méditerranéenne a émis environ 3,45 kg de CO<sub>2</sub>. En se basant de ces estimations, l'étude, calcule que les émissions totales de CO<sub>2</sub> de toutes les usines de dessalement d'eau de mer en exploitation dans la région méditerranéenne au cours de 2013 étaient équivalentes à 15 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> / an. En utilisant la même combinaison de technologies de dessalement d'eau de mer, l'étude prévoit une émission totale de CO<sub>2</sub> allant de 38 à 50 tonnes / an au cours de l'année 2030. (Selon Plan Bleu (2009), le marché du dessalement de l'eau de mer dans la région méditerranéenne devrait atteindre d'ici 2030 entre 30 et 40 millions de m<sup>3</sup> / jour. La capacité installée pourrait être multipliée par cinq ou six d'ici 2030, même si en se basant sur le meilleur scénario et s'assurant que tous les futurs dessalements utiliseront uniquement la technologie OI. Les émissions totales de CO<sub>2</sub> estimées au cours de l'année 2030 varieront entre 22,75 à 29,0 millions de tonnes / an [10].

### 4. Empreinte carbone du dessalement

L'empreinte carbone est définie comme la somme des émissions individuelles de GES, dans lesquelles le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) sont exprimés en équivalents dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>eq) en convertissant les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O en fonction de leur potentiel de réchauffement global (PRG) [11].

Le dessalement est une méthode à forte consommation énergétique par rapport au projet de détournement d'eau. Cependant, avec le développement d'une nouvelle technologie, l'efficacité énergétique, peut être effectivement améliorée. Avec différents carburants et modes de production, l'empreinte carbone a une large gamme de fluctuation. (Liu, et al., 2015), ont étudié la gamme de fluctuation des émissions de carbone dans les trois différentes techniques de dessalement. Pour la méthode MSF, l'empreinte carbone de la production d'eau varie de 1,98 kg à 34,68 kg de CO<sub>2</sub> pour la méthode MED et de 1,19 kg à 26,94 kg de CO<sub>2</sub> pour la méthode OI [12].

Basant sur les émissions de gaz à effet de serre associées à l'énergie de production, l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter une installation d'osmose inverse permettra d'obtenir une empreinte carbone de 248 grammes d'équivalent dioxyde de carbone par mètre cube (Figure 7).



Empreint directe GES Kg CO <sub>2</sub> par M3 d'eau douce	
Reverse Osmosis (RO)	2.1 – 3.6
Multi-effect Distillation with Thermovapor Compression (MED-TVC)	8 – 16
Multistage Flash (MSF)	10 – 20

Figure 7: Empreinte carbone du dessalement

Tableau 1 : Exigences représentatives en électricité, chaleur et exergie de l'eau de mer [13]

	Specific power consumption	Thermal energy of steam	Steam extraction pressure <sup>10</sup>	Equivalent power loss (exergy of steam)	Total exergy input
	kWh <sub>e</sub> /m <sup>3</sup>	kWh <sub>t</sub> /m <sup>3</sup>	bar (abs)	kWh <sub>e</sub> /m <sup>3</sup>	kWh <sub>e</sub> /m <sup>3</sup>
SWRO (Mediterranean Sea)	3.5	0	n.a.	0	3.5
SWRO (Arabian Gulf)	4.5	0	n.a.	0	4.5
MSF	4-5	78	2.5-2.2	10-20	14-25
MED-TVC	1.0-1.5	78	2.5-2.2	10-20	11-21.5
MED	1.0-1.5	69	0.35-0.5	3	4-4.5

Tableau 2: Calcul des émissions de GES (grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mètre cube d'eau douce) associés à la production d'énergie pour conduire un 3,5 moderne à grande échelle Usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse kWh/m<sup>3</sup> [13]

Coal	Oil	Natural Gas	Biomass	Solar PV	Geothermal	Wind	Hydro-electric	Nuclear
Average lifecycle GHG emissions for electricity production <sup>19</sup> (g CO <sub>2</sub> e/kWh <sub>e</sub> )								
1023	780	606	86	71	67	31	25	14
× 3.5 kWh <sub>e</sub> /m <sup>3</sup>								
Carbon footprint associated with powering a modern RO plant (g CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )								
3580	2729	2121	300	248	233	109	89	49
g/m <sup>3</sup>								

**Tableau 3:** Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> des grandes usines de dessalement en Algérie

Station	Capacité (m <sup>3</sup> /j)	kg CO <sub>2</sub> /jour (Gaz Naturel)	kg CO <sub>2</sub> /jour (Energie Solaire)	kg CO <sub>2</sub> /jour (Energie Eolienne)
Kahrama	90 000	190890	22320	9810
Hamma	200 000	424200	49600	21800
Skikda	100 000	212100	24800	10900
Beni Saf	200 000	424200	49600	21800
Souk Tlata	200 000	424200	49600	21800
Fouka	120 000	254520	29760	13080
Mostaganem	200 000	424200	49600	21800
Honaïne	200 000	424200	49600	21800
Cap Djinet	100 000	212100	24800	10900
Ténès	200 000	424200	49600	21800
Magtaa	500 000	1060500	124000	54500
<b>Total</b>	<b>2 110 000</b>	<b>4475310</b>	<b>523280</b>	<b>229990</b>

2 110 000 m<sup>3</sup>/j 17% 4475310 kg CO<sub>2</sub>/j en 2022

6 200 000 m<sup>3</sup>/j 50% 13150200 kg CO<sub>2</sub>/j en 2030

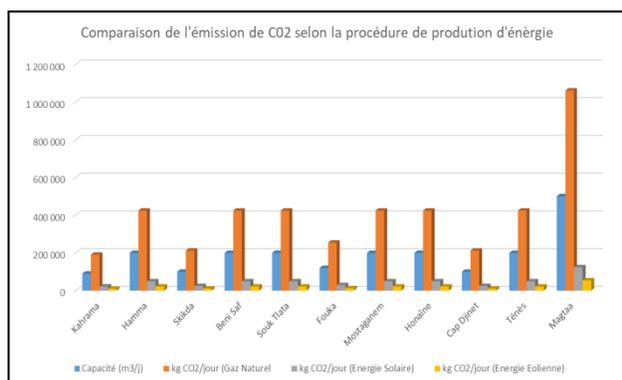
### 5. Le dessalement durable a) énergies renouvelables

Vue de sa localisation géographique dans la Ceinture du Soleil. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

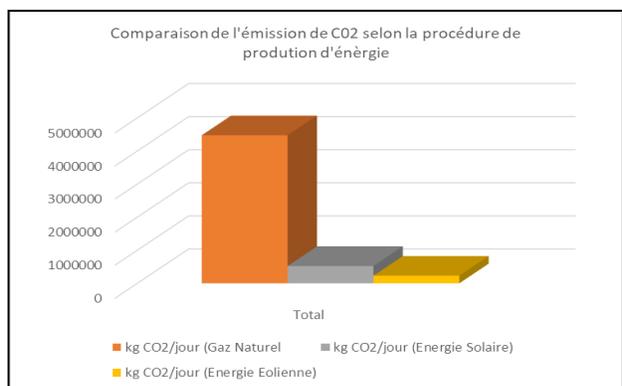
L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263

kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays (Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, 2007)(figure 10). La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWe d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWe par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. En mai 2015, le Conseil des Ministres a adopté un nouveau programme national de développement des énergies renouvelables qui est une actualisation de celui de 2011, qui visait à produire 12 000 méga watts à l'horizon de 2030 montrant la volonté de l'Algérie à investir dans les énergies propres. Le programme consiste à installer jusqu'à 22 000 MW de capacités de production d'électricité à partir de sources renouvelables entre 2011 et 2030. Dans ce programme, les énergies renouvelables sont au cœur des politiques énergétiques et économiques de l'Algérie : on estime qu'environ 40% d'électricité produite pour la consommation domestique proviendra des sources d'énergie renouvelable à l'horizon de 2030. L'Algérie vise en effet à être un acteur majeur dans la production d'électricité à partir de l'énergie solaire et photovoltaïque (CDER, 2011).

En outre, le ministère de l'Énergie et des Mines a projeté, dans son nouveau programme des Énergies Renouvelables, d'installer des parcs éoliens d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) (figure 11) pour atteindre 5010 MW à l'horizon 2030 (CDER, 2011).



**Figure 8:** Empreinte de carbone des 11 grandes stations de dessalement en Algérie en fonction de la source d'énergie.



**Figure 9:** Empreinte de carbone totale de dessalement en fonction de la source d'énergie.

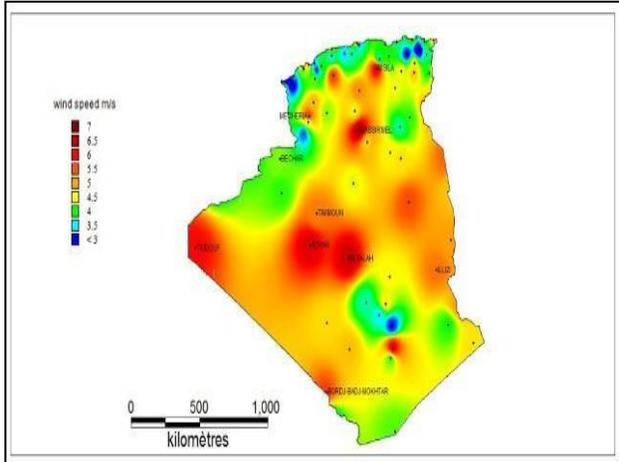


Figure 10: carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne période 2002-2011 (CDER, 2011) [14]

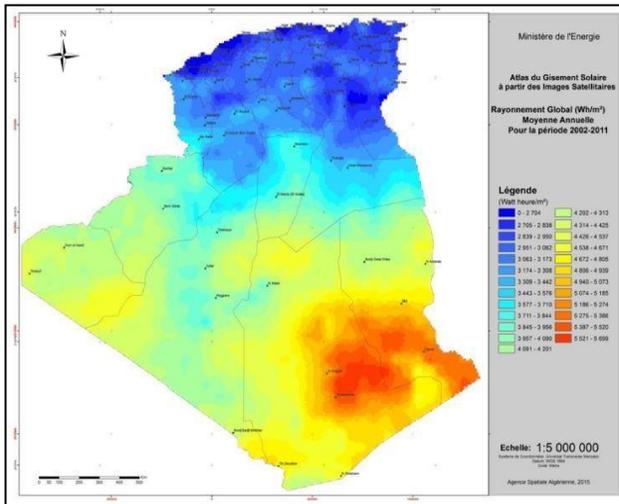


Figure 11: Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles) [14] (CDER, 2011)

Le couplage des sources d'énergie renouvelable (ER) avec le dessalement a le potentiel de fournir une source durable d'eau potable. De plus, le couplage de ces deux technologies réduira l'empreinte carbone du dessalement en raison de sa forte dépendance à l'égard des combustibles fossiles. Les différentes applications à travers le monde ont montré que les unités de dessalement solaire et éolien de petite capacité, bien conçues et exploitées, peuvent permettre d'alimenter en eau de bonne qualité des sites isolés, à des coûts intéressants. (Une multitude d'options sont envisageables pour associer le procédé de dessalement aux énergies renouvelables. Cependant, l'utilisation des énergies renouvelables pour le dessalement conventionnel souffre de deux contraintes : leur coût élevé et la discontinuité de la production

(alternance jour/nuit pour le solaire et aléas climatiques pour l'éolien) [15].

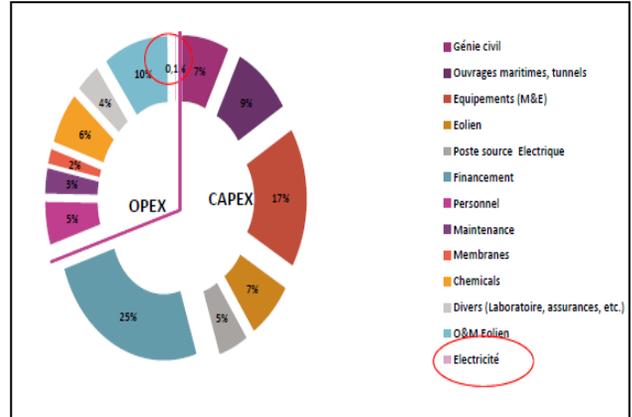


Figure 12: Structure des coûts d'un projet combinant Dessalement et Eolien

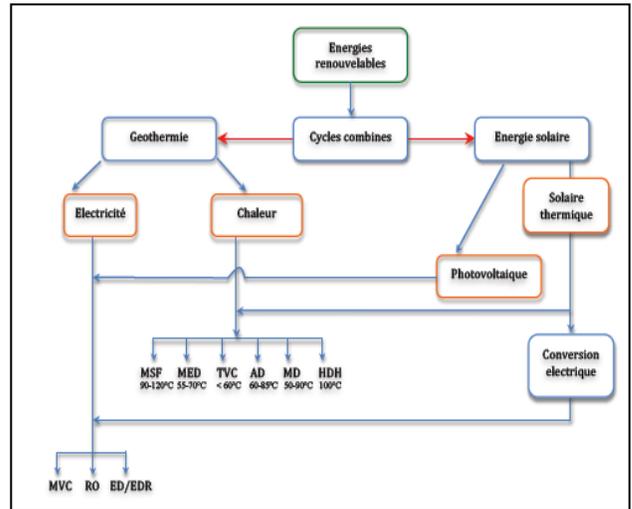


Figure 13: Les différentes combinaisons possibles entre les sources d'énergie renouvelable avec les procédés de dessalement conventionnelles et innovantes [17].

### a) Récupération d'énergie de la saumure

Dans le procédé d'osmose inverse (RO) pour le dessalement de l'eau de mer (Figure 14) environ 40 à 45% de l'eau d'alimentation est récupéré en tant qu'eau douce (perméat) : il s'agit du taux de conversion (Recovery). Les 55-60% restants (saumure) sont rejetés dans la mer à une pression légèrement inférieure à la pression qu'ils avaient avant d'entrer dans le module. C'est alors que les ingénieurs ont conçus des systèmes de récupération d'énergie pour améliorer le bilan énergétique. (Figure 15)

Toutes les installations commerciales sont pourvues, en principe, de ces systèmes de « récupération d'énergie » leur permettant de récupérer une partie de l'énergie de l'écoulement de cette saumure. Bien que la « turbine Pelton », avec son rendement d'environ 74%, soit la plus utilisée, elle est progressivement remplacée par les « Booster de Pression Hydraulique » (HPB) qui sont des systèmes plus élaborés et plus efficaces (Figure).

Le principe des HPB est simple : l'énergie de la saumure est transférée directement à l'écoulement de l'eau d'alimentation qui est déjà sous pression, sans avoir à être convertie en énergie de rotation. Le rendement global de tels systèmes est d'environ 94%, ils ont déjà été mis en oeuvre dans plusieurs installations commerciales atteignant une consommation spécifique d'énergie de 2 kWh par m<sup>3</sup> d'eau douce produite.

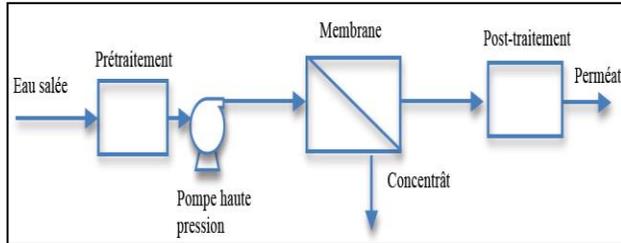


Figure 14: principe de fonctionnement de l'osmose inverse

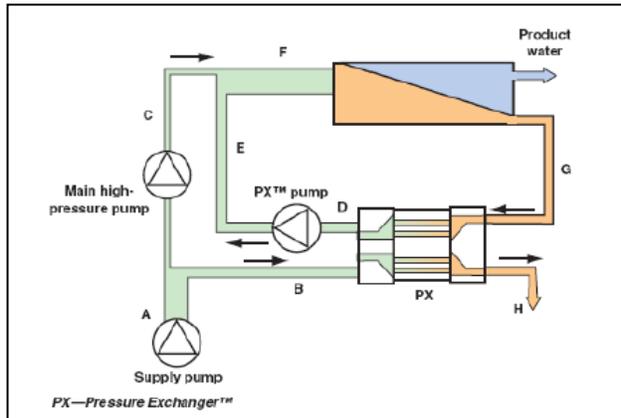


Figure 15: Schéma de principe d'un échangeur de pression (Récupération d'énergie) [18]

## 6. Conclusion et recommandation

Dans un tel contexte de fort accroissement de la demande en eau, pour les besoins de l'industrie, de l'agriculture et des populations, l'industrie du dessalement d'eau de mer connaît une très forte croissance au cours de ces vingt

dernières années. Outre le changement climatique qui entraîne la raréfaction des sources d'eau douce et des sécheresses, mais aussi en parallèle la croissance démographique, l'augmentation de la demande d'eau vient de l'épuisement des ressources disponibles, comme c'est le cas des nappes phréatiques en Arabie Saoudite par exemple. Dès lors, l'écart entre les ressources d'eau disponibles et la demande de celle-ci se creuse : c'est ce que l'on appelle le *water demand gap*.

Dessaler l'eau de mer est un procédé cher, énergivore et qui rejette des quantités importantes de gaz à effet de serre (GES) dans la plupart des pays dotés d'un mix électrique très intensif en CO<sub>2</sub>. La consommation électrique des usines est élevée, variant selon les techniques à l'œuvre si les procédés de dessalement thermique, de moins en moins utilisés, consomment plus de 5 kilowattheures (kWh) d'énergie par m<sup>3</sup> d'eau dessalée, le procédé de dessalement par osmose inverse, le plus répandu désormais .

Dès lors, si le recours au dessalement semble inévitable et voué à connaître une expansion très forte, il est urgent de sortir de la dépendance de ces procédés aux énergies fossiles car le doublement des capacités installées devrait provoquer une hausse importante des émissions.

L'énergie renouvelable est une solution intéressante pour réduire l'empreinte carbone des usines d'osmose inverse, diminuer leur coût de fonctionnement ainsi que d'éliminer le lien entre les prix de l'eau et les coûts du carburant. Dessalement par OI est largement considéré pour les applications de dessalement à énergie renouvelable en raison de sa faible GES par rapport aux autres processus.

Energie solaire-OI et Energie éolienne-OI sont les technologies les plus largement déployées pour le dessalement alimenté par les énergies renouvelables contribuant à hauteur de 32 % et 19%, respectivement.

**Afin de réduire l'empreinte de carbone des installations de dessalement, on recommande à :**

- ✓ L'optimisation de la consommation énergétique de l'installation.
- ✓ La récupération de l'énergie de saumure et le développement et l'amélioration des systèmes de récupération.
- ✓ L'utilisation des énergies renouvelables à grande ou petite échelle (par intermittence avec les énergies conventionnelles) (fonctionnement hybride). la mise en place d'usines de dessalement alimentées par des sources d'énergies bas carbone (champs de

panneaux solaires, solaire à concentration, éoliennes, énergie houlomotrice, voire nucléaire) et éventuellement des centrales à cycle combiné pour l'appoint (éventuellement en cycle fermé), et donc la décarbonation des mix électriques pour assurer une alimentation bas carbone de ces usines.

- Desalination Alliance, World Water Security Lab ,October 17-18, 2016
14. M. Walton, « Desalinated Water Affects the Energy Equation in the Middle East », International Energy Agency (IEA), 21 janvier 2019, disponible sur : [www.iea.org](http://www.iea.org).

## Références

1. Marc-Antoine Eyl-Mazzega et Élise Cassagnol, « Géopolitique du dessalement d'eau de mer », *Études de l'Ifri*, Ifri, septembre 2022.
2. Edward Jones "The state of desalination and brine production: A global outlook" *Science of the Total Environment* 657 (2019) 1343–1356
3. Eric M.V. Hoek, and al." Sustainable Desalination and Water Reuse" Copyright © 2021 by Morgan & Claypool, [www.morganclaypool.com](http://www.morganclaypool.com)
4. CDER Programme des énergies renouvelable et de l'efficacité énergétique (rapport)- Alger :ministère de l'énergie et des mines,2011
5. Alejandro Ramos-Martin and Sebastian Ovidio Perez-Baez"Study of the Ecological Footprint and Carbon Footprint in a Reverse Osmosis Sea Water Desalination Plant Federico Leon \* *Membranes* 2021, 11, 377. <https://doi.org/10.3390/membranes11060377>
6. Latifah Abdul Ghani and al."Carbon Footprint-Energy Detection for Desalination Small Plant Adaptation Response »*Energies* 2021, 14, 7135. <https://doi.org/10.3390/en14217135>
7. A. Al-Karaghoul, L.L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 24 (2013)343–356.
8. M. W. Shahzad *et al.*, 2017, « Energy-Water-Environment Nexus Underpinning Future Desalination Sustainability », *op. cit.*, p. 52-64.
9. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World », World Bank Group, mars 2019, disponible sur : <https://documents1.worldbank.org> (PDF).
10. K. Al-Shayji et E. Aleisa, « Characterizing the Fossil Fuel Impacts in Water Desalination Plants in Kuwait: A Life Cycle Assessment Approach », *Energy*, vol. 158, septembre 2018, p. 681-692, disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.077>.
11. Ghaffour N, Reddy V.K, Abu-Arabi M. Technology development and application of solar energy in desalination: MEDRC contribution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 15 (2011) 4410–4415.
12. Ghaffour N, Bundschuh J, Mahmoudi H, Goosen M.F.A . Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. In press. *Desalination*, 2014
13. Abdul Latif Jameel."Low Carbon Desalination Status and Research, Development, and Demonstration Needs"*Report of a workshop conducted at the Massachusetts Institute of Technologyin association with the Global Clean Water*