



REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTUDE DE CAS SUR LE DESSALEMENT D'EAU DE MER ET SON IMPACT SUR LE MILIEU MARIN



Novembre 2023

Contributeurs

Océanographie

-Ahmed MAKAOUI, Driss ETTOUAJE, Mustapha TOUNANI

-Tarek BAIBAI, Laila SOUMOUE, Said CHARIB

Chimie

Mariama ZBIRY, Imane AFANDI, Rachid CHFIRI, Fatima Zohra
NAJI, Abdelmouhcine ELGARNI

Ecotoxicologie

Amine BOUHALAOUI, Bouchra ELHAIMER, Hassan
OUBAMOUEH

Phytoplancton

Asmae BENNOUNA

Photographie

Khalid BELKADI

Synthèse faite par Ali BENHRA



Sommaire

Contributeurs.....	2
Liste des Figures.....	4
Liste des tableaux	5
Introduction.....	6
1-Le dessalement dans le monde	8
2-Les différentes techniques de dessalement	9
3- Etat des lieux au Maroc	11
4-Impacts environnementaux des activités de dessalement.....	14
4-1 Impacts liés au prélèvement d'eau d'alimentation	14
4-2 Impacts liés au rejet de saumures	15
5- Cas d'étude de la qualité des eaux au large de la station de dessalement de Chtouka Ait Baha dans la région d'Agadir	16
5-1 Localisation de la zone d'étude et réseau de prospection	16
5-2 Caractérisation physico-chimique de la colonne d'eau	17
5-3 Caractérisation des nutriments et du plancton	19
5-4 Caractérisation de la contamination par les métaux lourds du compartiment sédimentaire de la zone d'étude.	19
5-5 Caractérisation de l'impact écotoxicologique du compartiment sédimentaire prélevé aux niveau des stations du réseau	20
Conclusion sur le dessalement	22
Références bibliographiques	24

Liste des Figures

Figure 1. Nouvelle capacité de dessalement ajoutée chaque année dans le monde (1970-2020), par type de technologie GWI DesalData (2021).....	8
Figure 2. Répartition mondiale de la capacité de production d'eau dessalée et répartition mondiale de l'utilisation par secteur d'activité (d'après Jones et al., 2019).....	9
Figure 3. Principaux projet de désalinisation et de déminéralisation au Maroc (données ONEE 2022)	12
Figure 4. Unité de Dessalement d'Agadir.....	12
Figure 5. Carte de situation (a) et photo de la station de dessalement vue de mer (b)	16
Figure 6. Réseau d'échantillonnage réparti sur les trois radiales (côtière, intermédiaire et large).....	16
Figure 7. Distribution spatiale en surface et au fond des paramètres physiques (CTDO ₂ +Fluo+Turb) au niveau de la zone d'étude.....	18
Figure 8. Distribution spatiale de l'oxygène dissous en surface et au fond	18
Figure 9. Cartographie de la qualité écotoxicologique du compartiment environnemental représenté par le sédiment.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1. Type d'eau d'alimentation et salinité (inspiré de : Jones et al., 2019).	10
Tableau 2. Technologie de dessalement (inspiré de : Jones et al., 2019).....	10
Tableau 3. Réalisations de l'ONEE en dessalement SW et déminéralisation BW (El-Ghizel et al., 2021).....	13
Tableau 4. Programme de dessalement SW du Groupe OCP (OCP,2016 et 2020)	13
Tableau 5. Résultats d'analyse des métaux lourds dans les sédiments échantillonnés (mg/kg).....	20

Introduction

Les ressources en eau disponibles sur terre ne sont pas facilement utilisables. Les ressources en eau douce prêtes à l'emploi en raison de leur faible salinité ne représentent que 2,5% de l'eau totale présente sur la terre. Seulement 30 % de l'eau douce totale est potable, soit 0,75 % de l'eau totale sur terre, dont 70 % sous forme de ressources inaccessibles sous forme de glaciers et de calottes glaciaires, 30 % sous forme d'eau souterraine et 0,27 % sous forme d'eau de surface (Gleick et al., 2012).

L'eau salée représente près de 97,5 % de l'eau totale présente sur terre et est accessible à presque tous les pays, ce qui fait du dessalement la seule option pour sécuriser l'approvisionnement en eau dans de nombreux pays en situation de stress hydrique (Fritzmman, et al., 2007). La capacité mondiale actuelle de dessalement est de près de 100 millions de mètres cubes par jour (MCM/j) provenant d'environ 16 000 usines réparties dans 175 pays à travers le monde, les pays du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) détenant environ 50 % de la capacité de dessalement (Jones et al., 2019).

En 2016, la capacité totale de production d'eau dessalée de toutes les usines de dessalement en activité dans le monde était de 95,6 millions de m³/j, fournie par environ 18 983 projets (Jones et al., 2019). Fin 2017, la capacité de production déclarée était de 99,8 millions de m³/j (Zarzo et al., 2018). Ainsi, en 2020, le nombre d'usines de dessalement s'élève à 20 971 projets ce qui se traduit par une augmentation significative de la production d'eau dessalée à 114,9 millions de m³/j (GWI, 2020 et Eke et al., 2020). Les technologies de dessalement les plus utilisées dans ces projets sont l'osmose inverse (RO), le flash multi-étapes (MSF), la distillation multi-effets (MED), l'électrodialyse (ED) et les technologies hybrides avec une part de 63 %, 23 %, 8 %, 3 % et 3 %, respectivement (Ahmadi et al., 2020 et Siddiqi et al., 2018). Cette tendance confirme la croissance continue du marché du dessalement.

Le Maroc, de par sa position géographique, son climat, son littoral, est fortement impacté par le changement climatique. Réchauffement global moyen sur l'ensemble du territoire estimé à environ 1°C. la variabilité temporelle et spatiale des précipitations avec une diminution significative variant entre 3% et 30% selon les régions, l'accélération des phénomènes extrêmes (notamment les sécheresses et les inondations) constituent les principaux phénomènes identifiés au Maroc au cours des dernières décennies. Cette situation climatique a un impact négatif sur plusieurs secteurs, notamment la production d'eau destinée à l'eau potable et à l'agriculture. Au cours des dernières décennies, les ruissellements des eaux de surface sont faibles et irréguliers. Elles proviennent de quelques crues, souvent brèves et intenses. Les précipitations présentent d'importantes disparités régionales.

Pour pallier aux problèmes de pénurie d'eau, la mobilisation des ressources en eau non conventionnelles au Maroc, notamment le dessalement des eaux usées ou la réutilisation des eaux usées traitées, est une option à envisager en parallèle des actions de gestion de la demande, d'autant plus que le Maroc a 3 500 km de potentiel côtier et un poids corporel de l'ordre de 500 millions de m³ (Hssaisoune et al., 2020).

Le premier objectif de cette revue est de dresser un benchmark et une vue d'ensemble du dessalement dans le monde ainsi que des différentes techniques utilisées pour dessaler l'eau de mer ; et leurs impacts directs et indirects sur le milieu et les ressources. Le deuxième objectif de ce travail est de vérifier et préciser sur la base d'un cas d'étude de la station de Chtouka Ait Baha dans la région d'Agadir, les impacts sur la qualité des eaux et les ressources du milieu juxtaposant cette station qui a démarré en 2022. L'objectif général est de confirmer ou infirmer, à travers l'étude conduite par l'INRH, les appréhensions exposées dans la littérature relative aux effets des eaux rejetées dans le milieu par les procédés de dessalement. Notamment en prenant en compte les effets des saumures et des produits chimiques (métaux lourds) mais aussi les impacts additifs et intégrateurs à travers les indicateurs de qualité écotoxicologiques.

1-Le dessalement dans le monde

Selon l'Association Internationale de Dessalement (IDA), une organisation à but non lucratif affiliée aux Nations Unies travaillant exclusivement sur les technologies de dessalement et de réutilisation de l'eau, en 2019, plus de 300 millions de personnes dépendaient de l'eau douce produite par dessalement pour satisfaire tout ou partie de leurs besoins quotidiens. Cette eau douce était générée par l'une des 20 516 usines de dessalement présentes dans le monde entier. La capacité totale de ces usines à produire de l'eau douce s'élève à environ 122,32 millions de mètres cubes par jour (Association Internationale de Dessalement IDA, 2019).

En raison du coût associé à ces technologies, l'utilisation du dessalement de l'eau pour répondre à la demande en eau douce était initialement limitée principalement aux pays riches tels que l'Arabie Saoudite et le Koweït, ainsi qu'aux petits États insulaires comme Chypre et la Barbade, où les sources d'eau conventionnelles sont rares. Cependant, le développement de procédés de dessalement offrant de meilleures performances à des coûts moindres fait de cette méthode une option intéressante pour faire face à la crise de l'eau.

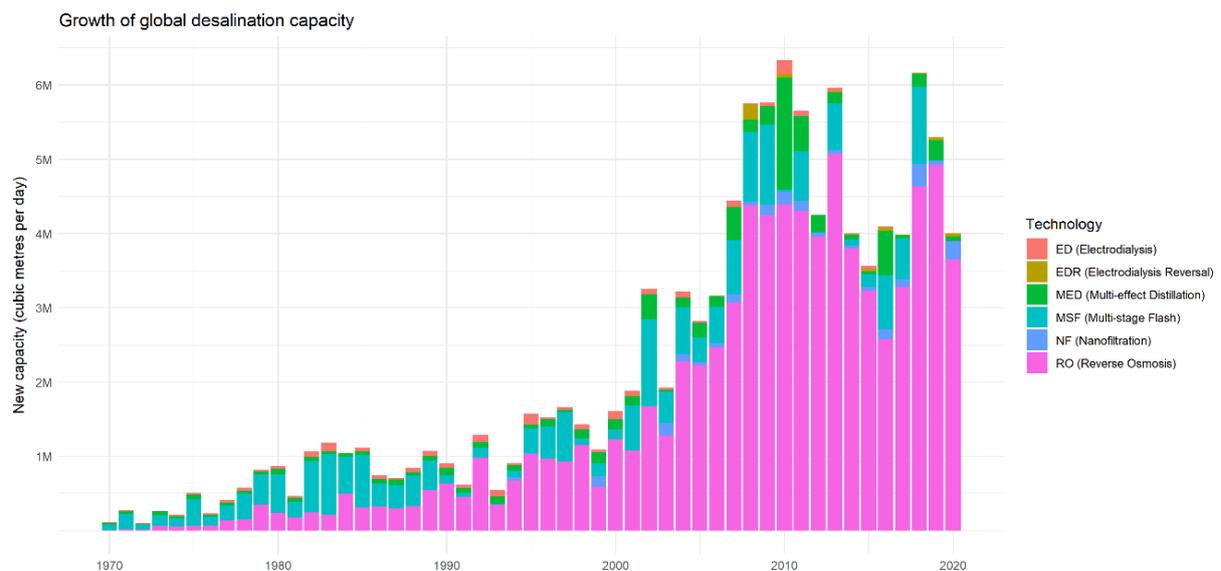


Figure1. Nouvelle capacité de dessalement ajoutée chaque année dans le monde (1970-2020), par type de technologie GWI DesalData (2021).

Les principales régions utilisant largement le dessalement de l'eau pour répondre à la demande comprennent le Moyen-Orient, le nord de l'Afrique, les États-Unis (en particulier la Floride et la Californie), la Chine, l'Australie et certaines parties de l'Europe. Ces régions du Moyen-Orient et du nord de l'Afrique représentent à elles seules environ 48 % de la capacité mondiale de production d'eau douce par dessalement.

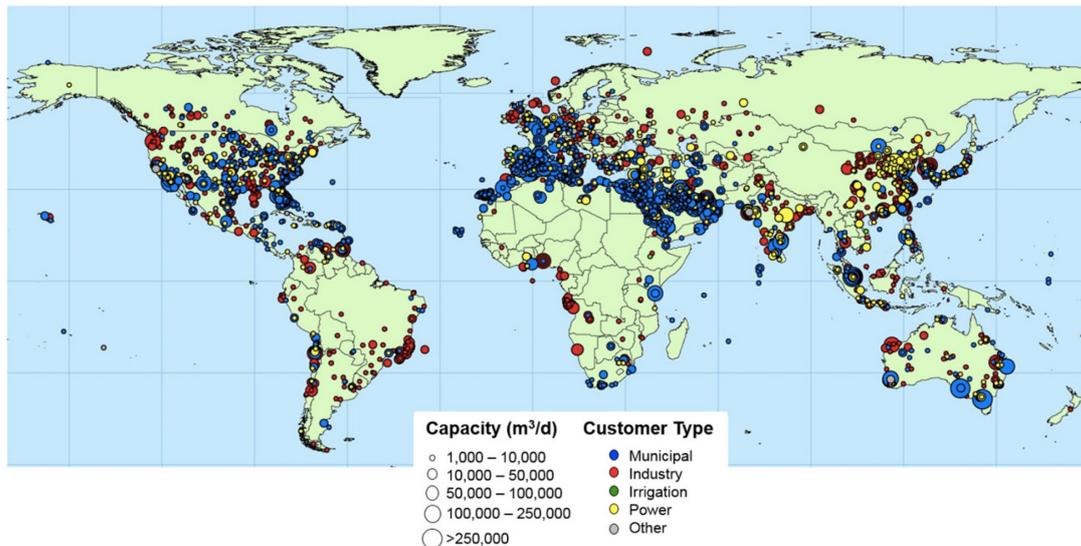


Figure 2. Répartition mondiale de la capacité de production d'eau dessalée et répartition mondiale de l'utilisation par secteur d'activité (d'après Jones et al., 2019).

La production d'eau dessalée à des fins de consommation humaine est répandue à l'échelle mondiale, avec une concentration significative au Moyen-Orient et dans le nord de l'Afrique. En Asie, une part considérable des installations de dessalement est dédiée à la production d'électricité, tandis qu'en Amérique du Sud, en particulier au Brésil, en Amérique du Nord, dans le sud-ouest de l'Afrique et en Europe, on trouve un nombre significatif d'installations de dessalement à des fins industrielles. De plus, la plupart de ces installations sont situées le long des côtes, où elles sont généralement de plus grande envergure que celles implantées à l'intérieur des terres. Les installations de dessalement en Afrique, en Asie du Sud, en Asie centrale et en Amérique du Sud, bien que moins nombreuses, sont généralement utilisées par le secteur industriel et privé (Jones et al., 2019).

Il est intéressant de constater que la plus grande portion de l'eau douce produite par dessalement est utilisée pour la consommation humaine (secteur municipal), soit environ 62 % de la quantité totale d'eau douce produite mondialement par dessalement, et ce, bien que presque la moitié des installations de dessalement soit utilisée à des fins industrielles. (Jones et al., 2019)

2-Les différentes techniques de dessalement

Les différentes technologies de dessalement se comparent principalement sur leur rendement ainsi que sur leur taux de rejets de saumure (BR). Le rendement d'une installation de dessalement va dépendre de la technologie utilisée et du type d'eau d'alimentation. (Jones et al., 2019) Les tableaux présentent respectivement les différents types d'eau d'alimentation possible ainsi que leur salinité et les technologies de dessalement les plus répandues. Les procédés de dessalement de l'eau peuvent être classés en deux grandes familles : (i) les procédés thermiques, par évaporation ou par distillation et (ii) la séparation par membranes ou osmose inverse. Les procédés membranaires reposent sur la séparation

du sel et de l'eau par le biais d'une membrane tandis que les procédés thermiques reposent sur le changement de phase de l'eau (Ejaz Ahmeda et al., 2019).

Tableau 1. Type d'eau d'alimentation et salinité (inspiré de : Jones et al., 2019).

Type d'eau d'alimentation	Salinité (mg/l)
Eau saumâtre (BW)	3 000 – 20 000
Eau douce (PW)	< 500
Eau salée (SW)	20 000 – 50 000
Eau de rivière (RV)	500 – 3 000
Saumure (BR)	> 50 000

Tableau 2. Technologie de dessalement (inspiré de : Jones et al., 2019).

Type de procédé	Technologie
Membranaire	Osmose inverse (RO)
	Nanofiltration (NF)
	Osmose (FO)
	Électrolyse (ED)
Thermique	Électrodéionisation (EDI)
	Électrolyse inverse (EDR)
	Distillation multi-effets (MED)
	Dessalement multiples flash (MSF)
	Compression de vapeur (VP)
Hybride	Distillation par membrane (MD)

La grande majorité des études réalisées par rapport au dessalement s'adresse aux aspects techniques. Plus précisément, l'osmose inverse est la technologie de dessalement qui est la plus étudiée dans l'histoire des technologies de dessalement. Toutefois, les procédés émergents de dessalement comme la nanotechnologie, la distillation par membrane ainsi que l'osmose font récemment l'objet d'un nombre grandissant d'études en raison de leur fort potentiel à l'égard du RR (Recovery Ratio) et de la quantité d'énergie nécessaire. Pour leur part, les procédés thermiques font l'objet de moins de recherches récentes. Cette tendance peut s'expliquer en raison de la quantité d'énergie nécessaire, le RR et les impacts environnementaux des procédés thermiques par rapport aux procédés par membranes. (Jones et al., 2019).

Indépendamment de la technologie employée, toutes les usines de dessalement requièrent de l'énergie pour leur fonctionnement, ainsi qu'une unité de prétraitement chimique pour l'eau saumâtre

brute (ou l'eau de mer) et une unité de post-traitement chimique pour l'eau traitée. Le dessalement thermique (distillation) repose sur la fourniture d'énergie thermique à l'eau saline d'alimentation, la chauffant, l'évaporant, puis la condensant pour obtenir de l'eau potable. Les technologies thermiques sont souvent utilisées dans des régions présentant des niveaux élevés de salinité de l'eau et des coûts énergétiques bas, comme dans les Caraïbes et au Moyen-Orient. Parmi les technologies bien établies, citons le dessalement à étages multiples (MSF) et la distillation à effets multiples (MED) (Zebbar, 2020)

Dans le cas du dessalement membranaire, les molécules d'eau ou les ions traversent des membranes à l'aide de pompes électriques ou à haute pression pour produire de l'eau douce. L'osmose inverse (RO) et l'électrodialyse sont largement utilisées. Les procédés membranaires, tels que l'osmose inverse (RO), ont connu un développement rapide depuis les années 1960 et sont de plus en plus populaires en raison de leur faible consommation d'énergie spécifique, de leur empreinte environnementale réduite et de leur flexibilité accrue par rapport à leurs homologues thermiques (Zebbar, 2020)

3- État des lieux au Maroc

La perception que le dessalement de l'eau de mer peut devenir une alternative de premier choix aux autres sources d'approvisionnement en eau a permis aux services des eaux du monde entier d'intégrer efficacement le dessalement de l'eau de mer comme alternative prometteuse à l'amenuisement des réserves d'eau. En 2016, la capacité mondiale totale de dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre s'élevait à environ 22 milliards de m³ / an. Au Maroc, le dessalement de l'eau de mer est également considéré comme une option crédible. Le Plan National de l'Eau (PNE) prévoit la construction d'usines de dessalement d'eau de mer pour produire près de 515 millions de mètres cubes par an en 2030.

Historiquement, en 1973, le Plan Directeur National d'Approvisionnement en Eau Potable a souligné la nécessité d'utiliser le dessalement des eaux usées et des eaux usées comme solution d'approvisionnement en eau potable. Depuis, l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE) a réalisé plusieurs projets relatifs à la construction, à l'exploitation et à l'entretien d'usines de dessalement, principalement dans les provinces du sud, pour des raisons d'aridité du climat, de rareté des ressources en eau conventionnelles. , mais aussi en raison de la disponibilité des ressources en eau potable et de la compétitivité, en termes de coût de dessalement par rapport aux autres modes d'approvisionnement en eau potable.

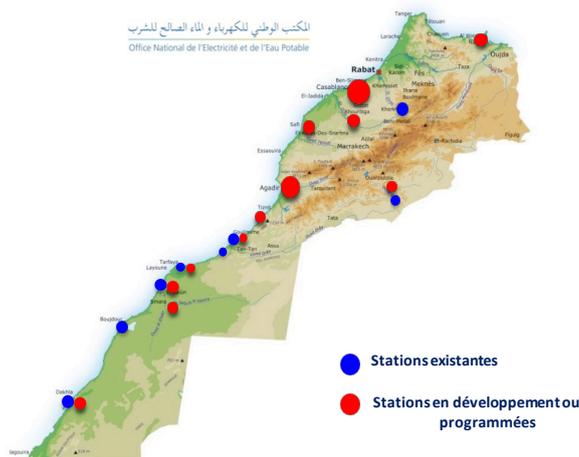


Figure 3. Principaux projet de désalinisation et de déminéralisation au Maroc (données ONEE 2022)

Aujourd’hui, l’ONEE approvisionne une dizaine de localités en eau potable issue du dessalement SW ou de la déminéralisation BW, pour une capacité totale de service d’environ 100 000 m³/j. Ces localités sont principalement Lâayoune, Boujdour, Dakhla, un village de pêcheurs de Sidi El Ghazi, Daoura, Tan Tan, Akhfennir, Tarfaya, Tagounite et Khénifra (ONEE, 2017 et Boulahfa, et al., 2019).

L’un des plus grands projets de dessalement est actuellement installé dans la ville côtière d’Agadir, au sud du Maroc, appelé usine Douira SWRO. Il s’agit du premier projet partagé (Partenariat Public Privé) en construction, l’eau dessalée produite serait dédiée conjointement à l’approvisionnement en eau potable et à l’irrigation. Ce projet dispose d’un budget de 3 milliards de dirhams marocains, et d’une capacité de traitement d’environ 75 millions de mètres cubes d’eau dessalée par an. Par ailleurs, l’usine devrait produire quotidiennement près de 275 000 m³ d’eau dessalée avant d’atteindre sa capacité maximale de 450 000 m³/j.



Figure 4. Unité de Dessalement d’Agadir

D’autres projets de dessalement, mais aussi de déminéralisation, sont développés par l’Office, totalisant une capacité d’environ 300 000 m³/j, notamment à Lâayoune avec une capacité de 26 000 m³/j, Sidi Ifni (8 600 m³/j), Zagora. (déminéralisation : 5 200 m³ /j), Tarfaya (1 296 m³ /j), Al Hoceima avec une capacité de 17 300 m³ /j (ONEE, 2020). Le tableau ci-dessous résume certaines des réalisations de

l'ONEE en matière de dessalement SW et de déminéralisation BW (Tahri et al., 2001 ; Zidouri, 2000; Boulahfa et al., 2019).

Tableau 3. Réalisations de l'ONEE en dessalement SW et déminéralisation BW (El-Ghizel et al., 2021)

Ville	Technologie	Nature d'eau	Capacité de production (m ³ /j)	Année de mise en service
Tarfaya	ED	BW	75	1976 (replaced by the unit realized in 2001)
	RO	BW	800	2001
	MED – VCD: Vapor	SW	250	1977 (replaced by units realized in 1995 and 2005)
Boujdour	Compression Distillation			
	RO	SW	3,700	1995–2005–2011
Laâyoune	RO	SW	26,000	1995–2005–2010
Tan Tan	RO	BW	12,000	2003–2014
Akhfenir	RO	SW	860	2011
Tagounite	RO	BW	400	2008
Khenifra	RO	BW	30,000	2012
Dakhla	RO	BW	17,280	2015
Khouribga	RO	BW	30,000	2019

SW : Eau de mer BW : Eau saumâtre ou terrestre

Dans une démarche citoyenne et volontaire, le Groupe OCP a lancé en 2008 son premier « Programme Eau » avec pour objectif d'abandonner les ressources en eau conventionnelles pour ses besoins d'ici 2020. Ce programme a été suivi d'un autre « Économie Circulaire Durable » en 2018, dans lequel le Groupe OCP vise à couvrir 100% de ses besoins en eau exclusivement à partir de ressources en eau non conventionnelles.

Le complexe Jorf Lasfar est approvisionné par la plus grande usine de dessalement SWRO du Maroc, d'une capacité annuelle de 25 millions de m³. Une extension de la station porte la capacité à 40 millions de m³/an. A Laâyoune, une station d'une capacité de 7,5 millions de m³ est prévue pour répondre aux besoins en eau de Phosboucraa, venant s'ajouter à une station actuelle de 1,2 million de m³.

Tableau 4. Programme de dessalement SW du Groupe OCP (OCP,2016 et 2020)

Usine	Capacité (million m ³ /an)	Objective	Année de mise en service
Jorf Lasfar	25 to 40	Manufacturing operations	2021
Safi	25	OCP Group needs	project
Phosboucraa	6	OCP Group needs	project
Laâyoune	7.5	OCP Group needs	2022

Enfin, il a été signalé qu'une grande usine de dessalement est en préparation pour Casablanca (environ 100 Mm³ / an d'ici 2025 à 2030, le SNE (2009) mentionne une capacité de 250 Mm³ / an). Pour la première phase de 100 Mm³ / an.

Presque toutes les usines de dessalement au Maroc fonctionnent avec des systèmes d'osmose inverse (RO), quelques-unes seulement utilisant la technologie de distillation multi-étages. La capacité actuelle

est répartie de manière relativement égale entre les usines de taille moyenne, grande et très grande. Étant donné que le Maroc importe 95% de ses besoins énergétiques, le RO restera probablement la technologie de prédilection pour l'avenir, étant donné que c'est la technologie la moins énergivore des technologies de dessalement. Cependant, les futurs projets de dessalement peuvent être combinés avec la production d'énergie renouvelable pour résoudre le problème des coûts énergétiques élevés.

4-Impacts environnementaux des activités de dessalement

Les technologies de dessalement présentent des aspects bénéfiques mais aussi préjudiciables pour l'environnement. Le principal avantage réside dans la création de volumes supplémentaires d'eau douce pour répondre à la demande croissante en eau et pallier la crise hydrique. Cependant, quel que soit le type de technologie de dessalement utilisée, plusieurs impacts environnementaux défavorables sont cités dans la littérature. En raison de l'importance cruciale du dessalement dans la lutte contre la crise de l'eau, il est essentiel de comprendre ces défis environnementaux afin de les accompagner avec des solutions durables.

4.1. Impacts liés au prélèvement d'eau d'alimentation

L'exploitation des installations de dessalement implique inévitablement la phase de prélèvement de l'eau d'alimentation. Bien que peu de données existent sur les véritables effets de ces prélèvements, leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques sont largement documentés. En effet, le prélèvement de l'eau entraîne l'entraînement et la collision d'organismes marins, ayant ainsi un impact significatif sur leurs populations dans les zones de prélèvement (ONU, 2017). L'entraînement est défini comme "le transport de petits organismes planctoniques avec le flux d'eau de mer vers les installations de dessalement" (ONU, 2017). Il est établi que les organismes présents dans l'eau d'alimentation succomberont au cours des différentes étapes du processus de dessalement (ONU, 2017). Afin de minimiser l'effet d'entraînement, il est recommandé de positionner les points de captage d'eau d'alimentation à l'écart des zones biologiquement productives, ce qui peut se traduire par des prélèvements en eaux profondes au large des côtes. Les petites installations peuvent également opter pour l'utilisation de puits souterrains côtiers.

La collision est le phénomène par lequel des organismes suffisamment grands pour ne pas passer à travers les écrans de prise d'eau sont capturés sur ces écrans en raison de la force d'aspiration (ONU, 2017). Cela peut influencer sur la population des organismes capturés ainsi que sur l'efficacité de l'installation de dessalement, qui prélève moins d'eau d'alimentation lorsque la prise d'eau est partiellement obstruée par des organismes aquatiques. Afin d'éviter ce problème, il est recommandé d'utiliser une combinaison d'écrans de captation et de maintenir une vitesse d'aspiration modérée lors du prélèvement de l'eau.

4.2. Impacts liés au rejet de saumures

Lors du processus de dessalement, l'eau d'alimentation est séparée en deux flux distincts : le flux de produits (eau douce) et le flux de sous-produits (saumure). Malgré la production d'eau douce, la saumure générée par les procédés de dessalement représente un problème environnemental majeur (Sola et al., 2019 ; Melián-Martel et al., 2013). La saumure, également désignée sous les termes de concentré ou de rejet, constitue l'eau salée fortement concentrée résultant du processus de dessalement. Environ 90 % des rejets totaux d'une installation de dessalement sont constitués par la saumure. Les 10 % restants comprennent d'autres sous-produits tels que les eaux usées issues du prétraitement et du nettoyage des équipements (Voutchkow, Kaiser, Stover, Lienhart et Awerbuch, 2019).

Ce flux liquide transporte la plupart des taux de sels (TDS) de l'eau d'alimentation sous une forme concentrée, ainsi que certains produits chimiques de prétraitement (par exemple, des résidus d'antitartre, de coagulants et de floculants) et des contaminants microbiens (Panagopoulos et al., 2019). La saumure peut présenter des risques environnementaux en raison de sa salinité, de sa température et de ses composés chimiques. La salinité et la température de la saumure dépendent du processus de production. La salinité de la saumure est de 1,6 à 2 fois supérieure à celle de l'eau de mer (35 g/L). En ce qui concerne la température, la saumure issue des technologies à membrane est à la température ambiante de l'eau de mer (22 °C), tandis que celle produite par les technologies thermiques est de 1,37 à 1,82 fois supérieure à 22 °C (Cambridge et al., 2017).

Étant donné que les processus de dessalement produisent des quantités importantes de saumure, différentes méthodes d'élimination de la saumure ont été développées par l'industrie du dessalement à travers le monde. Ces méthodes comprennent le rejet des eaux de surface, le rejet dans les égouts, l'injection en puits profonds, les bassins d'évaporation et l'épandage sur le terrain.

Le choix de la méthode d'élimination de la saumure la plus adaptée repose sur plusieurs facteurs, notamment la quantité, la qualité et la composition de la saumure, la situation géographique du site d'élimination, la disponibilité du site de réception, la légalité de l'option, l'acceptation du public, les coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que la capacité de l'installation pour une éventuelle expansion (Cambridge et al., 2017 ; Mickley, 2020). Le coût de l'élimination de la saumure varie de 5 % à 33 % du coût total des procédés de dessalement et dépend des caractéristiques et du volume de la saumure, du niveau de prétraitement, des moyens d'élimination et de la nature de l'environnement d'élimination (Eslamian et al., 2014).

Au Maroc, la plupart des usines de dessalement sont installées sur la côte atlantique. Jusqu'à aujourd'hui, les quantités de saumure produites sont faibles. Ainsi, ils sont dilués et rejetés dans l'océan Atlantique sans risque pour le milieu marin. En effet, contrairement à la mer Méditerranée qui est une mer fermée, l'océan Atlantique est ouvert et les courants marins sont forts.

5- Cas d'étude de la qualité des eaux au large de la station de dessalement de Chtouka Ait Baha dans la région d'Agadir

5.1. Localisation de la zone d'étude et réseau de prospection

La zone sujette à la présente étude se localise au niveau de la région d'Agadir, au large de la zone de Douira-sidi R'bat où est implantée sur la côte la station de dessalement de Chtouka Ait Baha.



Figure 5. Carte de situation (a) et photo de la station de dessalement vue de mer (b)

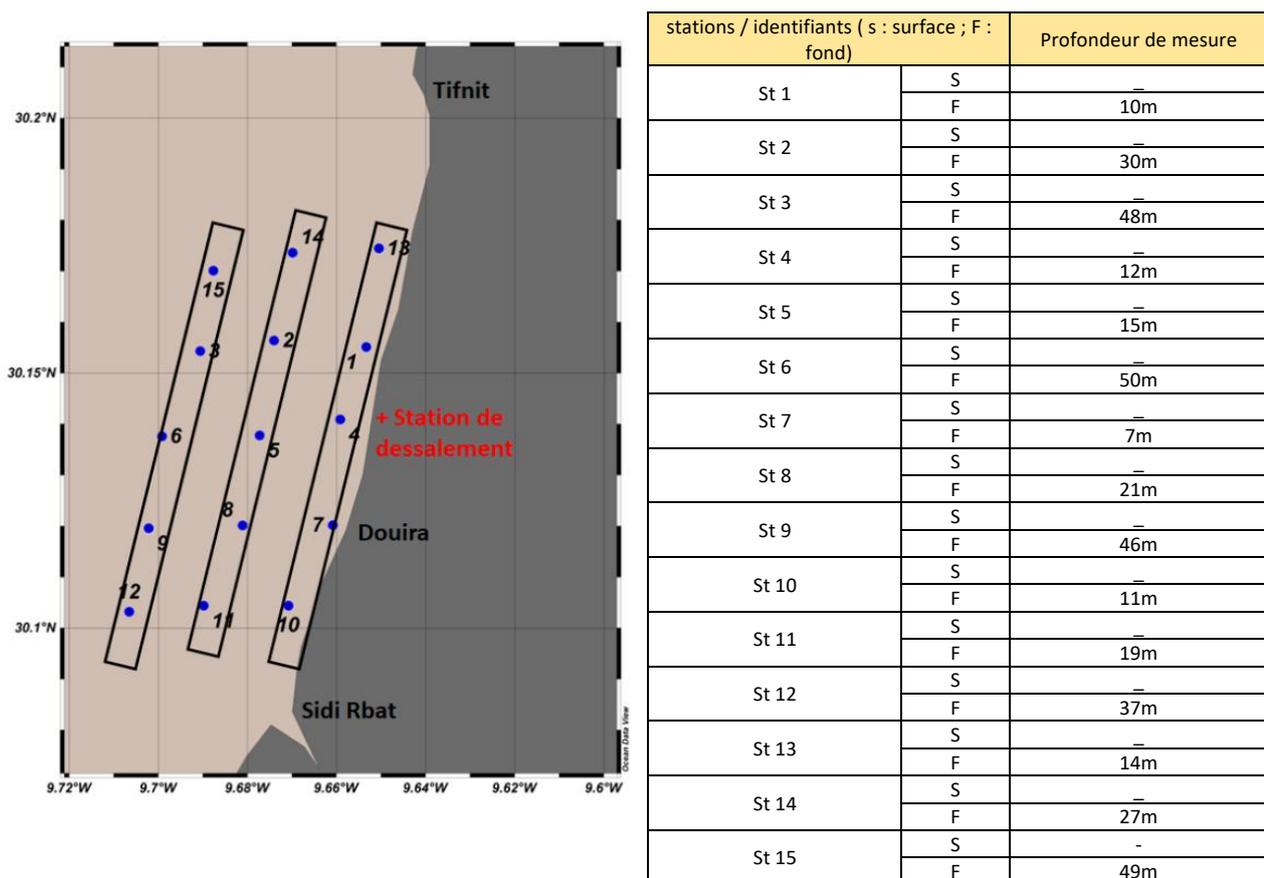


Figure 6. Réseau d'échantillonnage réparti sur les trois radiales (côtière, intermédiaire et large)

Le réseau d'échantillonnage est constitué des radiales perpendiculaires à la côte, comprises entre les profondeurs 10 m et 50 m. Durant cette campagne, 15 stations de profil CTD ont été réalisées selon le réseau présenté sur la figure 6.

La zone d'étude est définie par un réseau de prospection au large qui comporte des stations présentées sur la figure 6. Il compte 15 stations réparties sur 3 radiales longitudinales parallèles à la côte (côtière, intermédiaire et large) et s'étend entre les isobathes 10m et 50 mètres de la région atlantique entre Tifnit et Sidi Rbat.

5.2. Caractérisation physico-chimique de la colonne d'eau

Pour la colonne d'eau les stations sont échantillonnées en surface (-1 mètre) et au fond. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques (O₂ dissous, chlorophylle et nutriments). Des échantillons en double ont été effectués pour permettre les analyses planctoniques (Phytoplancton et zooplancton) et éco toxicologiques.

Les objectifs de la caractérisation physico-chimiques sont :

- La Prospection entre 10 et 50 mètres sur toute la colonne d'eau.
- La Cartographier les paramètres hydrologiques (Température, salinité, oxygène dissous, turbidité et chlorophylle a.

Durant cette prospection océanographique, les distributions en surface et au fond des paramètres physiques montrent une stratification des eaux de la côte vers le large. En effet, les eaux froides, moins turbides et moins salines ont été détectées pendant cette période au large, marquées par des taches d'eau froides (<17.5°C en surface et 15°C au fond) et de salinité (<36.2psu) au niveau de toute la zone prospectée entre Tifnit et Sidi Rbat. Alors qu'à la côte, les eaux sont moins stratifiées et sont relativement turbides, plus chaudes et plus salines sur toute la colonne d'eau et marquées par des températures dépassant 20°C et des salinités de l'ordre de 36.3psu principalement au niveau du rejet de la station de dessalement et au nord. Cette structure a favorisé une richesse chlorophyllienne importante au niveau de la zone côtière aussi bien au fond qu'à la surface (figure 7).

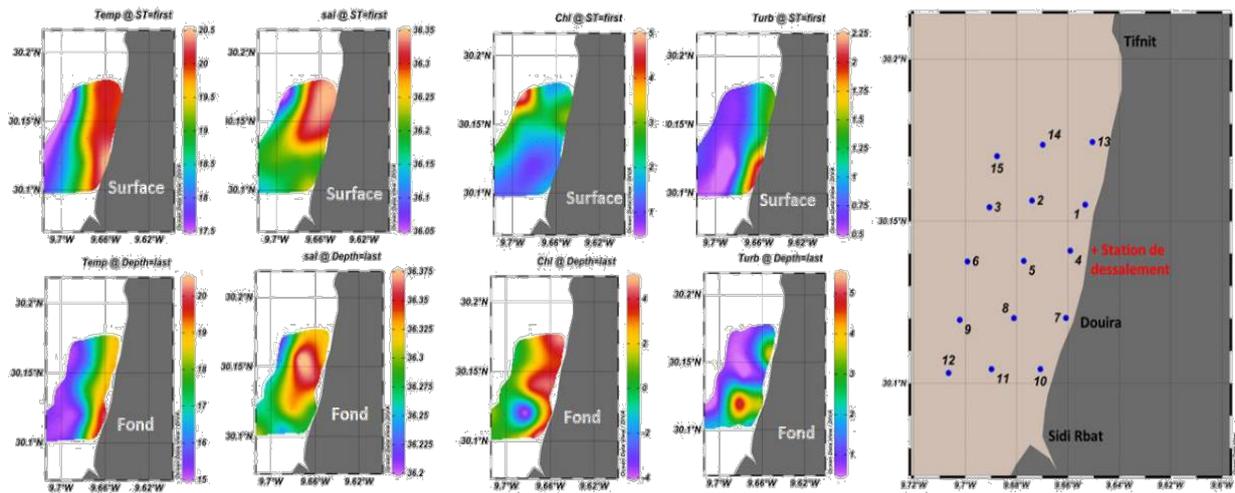


Figure 7. Distribution spatiale en surface et au fond des paramètres physiques (CTDO2+Fluo+Turb) au niveau de la zone d'étude

La distribution de la concentration de l'oxygène dissous indique une bonne saturation en surface de la zone d'étude. Les concentrations dépassent 6 ml/l au niveau de la zone côtière et sont plus saturée au large et peuvent atteindre 8ml/l. alors qu'au fond, la zone côtière est bien saturée et les concentrations dépassent 6ml/l. Alors qu'au large, les eaux profondes sont moins oxygénées et les concentrations sont de l'ordre de 5 à 4ml/l.

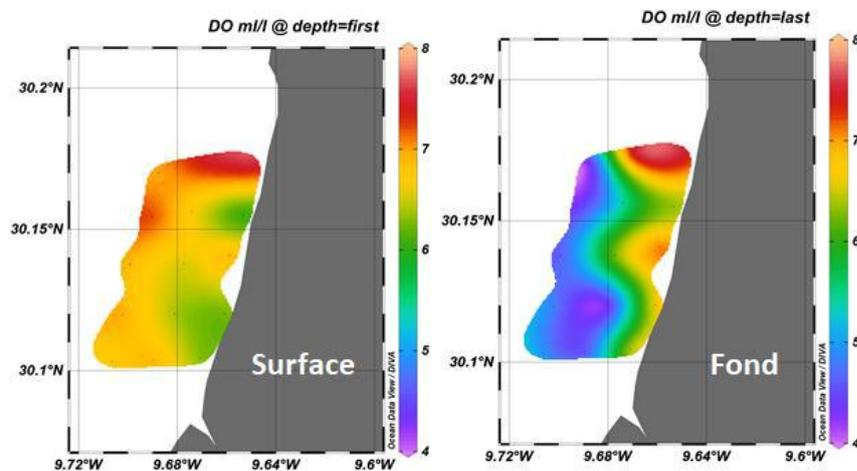


Figure 8. Distribution spatiale de l'oxygène dissous en surface et au fond

En conclusion de cette caractérisation des eaux de la région recevant les rejets de la station de dessalement, il apparait que les distributions spatiales des paramètres physico chimiques montrent une stratification des eaux de la côte vers le large. Les eaux froides, moins turbides et moins salines ont été détectées pendant cette période au large et sont plus saturées en oxygène dissous en surface qu'au fond. Alors qu'à la côte, les eaux sont moins stratifiées et sont relativement turbides, plus chaudes, saturées en oxygène et surtout plus salines sur toute la colonne d'eau et marquées par des

salinités relativement élevée de l'ordre de 36.3psu principalement au niveau du rejet de la station de dessalement et au nord.

Cette structure serait due à la dérive des eaux vers le nord causé par les vents sud-ouest pendant la période de la campagne et qui a favorisé une richesse chlorophyllienne importante au niveau de la zone côtière aussi bien au fond qu'à la surface.

5.3. Caractérisation des nutriments et du plancton

Suite aux analyses des eaux superficielles et profondes des stations situées le long du littoral de Douira, il ressort une bonne disponibilité des nutriments (phosphates, azote ammoniacal et silicates) dans les masses d'eaux avec une variation en fonction de l'éloignement par rapport à la côte, la profondeur et la stratification de la colonne d'eau.

En effet, l'emplacement dans la zone euphotique va accélérer leur assimilation par le phytoplancton et la régénération de certains éléments par le zooplancton. Ces nutriments, en association avec d'autres facteurs biotiques et abiotiques, ont probablement contribué aux bloom printanier des diatomées *Nitzschia* et des *Leptocylindrus* dans ces eaux. La richesse phytoplanctonique des eaux et leur diversité taxonomique reste assez similaire de celles relevées dans d'autres eaux marines atlantiques observées. La faible densité des espèces potentiellement toxiques ou nuisibles, principalement les dinoflagellés révèle un certain équilibre de cet écosystème. Cette étude ponctuelle nécessite un suivi saisonnier pour mieux cerner l'évolution de différents paramètres de cet écosystème et de ses populations phytoplanctoniques et de statuer sur l'existence ou non d'un impact de la station de dessalement.

5.4. Caractérisation de la contamination par les métaux lourds du compartiment sédimentaire de la zone d'étude.

Les résultats d'analyse des sédiments (tableau ci-dessous) montrent que toutes les concentrations enregistrées (ppm) sont inférieures aux valeurs PEL (Probable Effect Level; Canadian Sediment Quality guideline, 2001 et NOAA,2004).

Tableau 5. Résultats d'analyse des métaux lourds dans les sédiments échantillonnés (mg/kg)

Point	Cd	Co	Ni	Cu	As	Pb	U	Sr	Ba	Cr	Zn	Hg
ST01	0,18	12,12	26,47	11,12	11,97	14,09	8,45	146,10	408,25	74,62	74,52	0,0020
ST04	0,24	8,32	22,51	10,63	7,84	10,14	11,23	113,11	297,66	72,16	47,20	0,0029
ST05	0,22	7,83	18,28	10,52	8,91	10,71	8,53	139,15	325,47	54,74	41,63	0,0019
ST07	0,17	6,85	17,79	10,35	6,83	9,27	6,76	118,01	316,86	49,84	35,32	0,0019
ST10	0,14	8,43	20,11	10,86	9,34	10,51	6,76	90,47	256,29	54,81	45,28	0,0020
ST13	0,17	8,76	17,33	11,16	8,64	11,29	8,08	111,02	317,18	61,95	61,74	0,0025
PEL	4.2	-	42.8	108	41.6	112	-	-	-	160	271	-

Il apparait ainsi que les stations qui enregistrent des traces d'éléments métalliques sont celles qui se situent à proximité directe du point rejet de la station du dessalement. Dès qu'on s'éloigne de la zone de réception des déjection les valeurs observées restent très faible.

5.5. Caractérisation de l'impact écotoxicologique du compartiment sédimentaire prélevé aux niveau des stations du réseau

Concernant le compartiment sédimentaire, et suite à l'évaluation de la charge toxique globale qui est tracée par ce compartiment ; la cartographie de la qualité écotoxicologique a montré une corrélation avec les résultats des analyses chimiques mais aussi de la richesse faunistique et floristique des eaux de la région. En effet, ce sont les stations les plus proches ou même adjacentes au point rejet, notamment la station 4 qui montre une mauvaise qualité écotoxicologique. Cet effet s'estompe dès qu'on s'éloigne du point rejet. Ceci corrobore aussi bien les résultats des niveaux des contaminants métalliques que ceux des paramètres physiques (température et salinité), aux abords du point rejet.

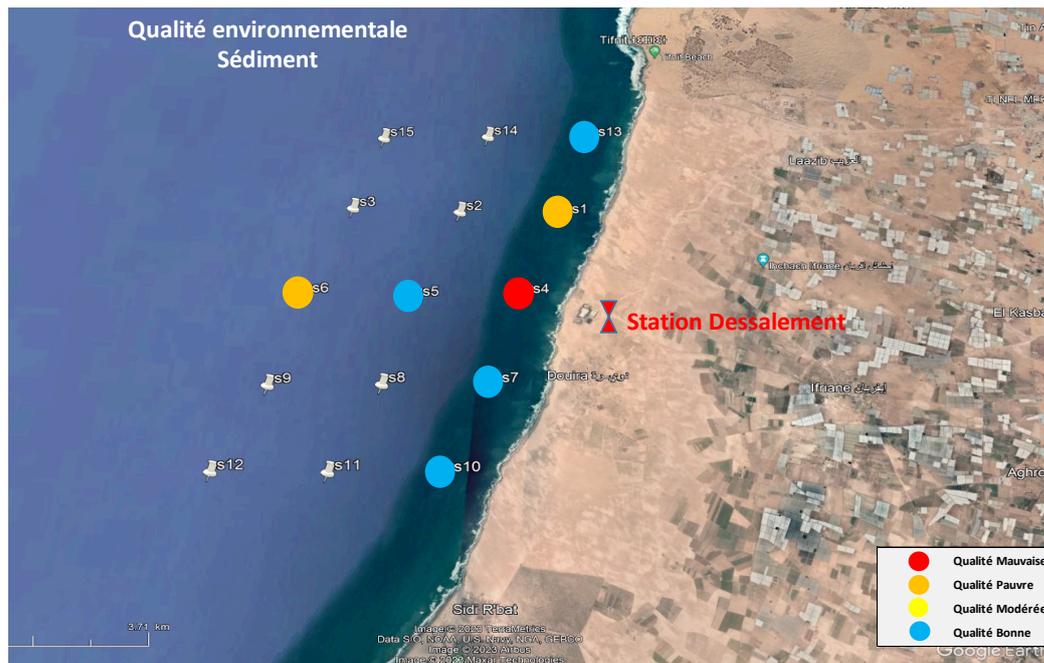


Figure 9. Cartographie de la qualité écotoxicologique du compartiment environnemental représenté par le sédiment

En conclusion de cette étude de prospection et d'évaluation de l'impact potentiel des rejets de la station de dessalement de Chtouka Ait Baha sur le milieu et les ressources biologiques, et suite aux analyses des eaux superficielles et profondes des stations situées le long du littoral de Douira, et de l'évaluation des charges toxiques des compartiments environnementaux de la zone, il ressort que :

- Les distributions en surface et au fond des paramètres physiques montrent une stratification normale des eaux de la côte vers le large.
- A la côte, et quand s'approche du point rejet les eaux sont moins stratifiées et sont relativement turbides, plus chaudes et légèrement plus salines sur toute la colonne d'eau et marquées par des salinités de l'ordre de 36.3psu principalement au niveau du rejet de la station de dessalement. Cette structure normale favorise même une richesse chlorophyllienne au niveau de la zone côtière aussi bien au fond qu'à la surface
- Une bonne disponibilité des nutriments dans les masses d'eaux avec une variation en fonction de l'éloignement par rapport à la côte, la profondeur et la stratification de la colonne d'eau. La richesse phytoplanctonique des eaux et leur diversité taxonomique reste assez similaire de celles relevées dans d'autres eaux marines atlantiques observées.
- La faible densité des espèces potentiellement toxiques ou nuisibles, principalement les dinoflagellés révèle un équilibre de cet écosystème.

- Les résultats d'analyse des métaux lourds dans le sédiment montrent que toutes les concentrations enregistrées sont inférieures aux valeurs guides de qualité environnementale et n'enregistrent aucune contamination par ces métaux toxiques.
- Il n'y a pas d'impact notable sur les caractéristiques physiques (T°, S, O2, Chlorophylle a) de la colonne d'eau avoisinant la station et donc des saumures rejetés dans le milieu ouvert de l'océan atlantique à grand pouvoir diluant ;
- Des effets écotoxicologiques sont cependant décelables à proximité de la station.

Conclusion sur le dessalement

Cette revue, qui dresse une vue d'ensemble du dessalement et ses techniques pratiquées, montre que le dessalement de l'eau de mer est une alternative sérieuse de par le monde pour parer au manque d'eau et au stress hydrique. L'état des lieux dressé au Maroc par rapport à ces projets de dessalement de l'eau de mer témoigne de l'intérêt grandissant que porte notre pays à cette solution qui le privilégie grâce à sa géographie et à ses façades maritimes aussi bien en méditerranée qu'en atlantique.

Les impacts environnementaux directs qui se résument principalement aux rejets de saumures (eaux plus chargées en sels) et certains produits chimiques (notamment les métaux lourds, certains résidus de flocculant, de coagulants ou de détartrants antisalissure), sont largement réduits ou éliminés dès qu'on s'éloigne de la proximité directe des points rejets. En effet, la courantologie, l'hydrologie et le pouvoir diluant de l'océan font que ces impacts observables de façon minime aux alentours directs des lieux de déjection des effluents du dessalement s'estompent au large.

Nous avons montré, à travers l'étude de cas de la station de Chtouka Ait Baha dans la région d'Agadir qui a démarré en 2022, que les impacts mineurs observés sur le milieu marin en termes de légères augmentations de salinité et de température de surface de l'eau et d'effets écotoxicologiques, ne concernent que la proximité directe de la zone réceptacle des rejets de la station. Les effets observés disparaissent dès qu'on s'éloigne du point rejet.

Les autres impacts relatifs au coût et à la consommation énergétique de certains procédés de dessalement et leurs effets environnementaux indirects d'un point de vue écologique sont dus principalement à leur empreinte Carbone. Cette problématique ne se poserait pas au Maroc, puisque le pays peut recourir avec sa variété climatique et à ses ressources au couplage entre des énergies renouvelables comme le solaire dans le sud, les éoliennes en montagne ou encore l'hydraulique avec les nombreux barrages construits à l'instar du dessalement.

Il apparaît aussi à travers ce benchmark que la plupart des projets de dessalement dans le monde sont souvent concentrés dans des zones géographiques à mer ou à bassin fermés et sous stress

hydrique. Leurs impacts environnementaux sont ainsi concentrés et/ou amplifiés du fait qu'il n'y ait pas d'effet de dilution océanique telle que c'est le cas en mers ouvertes. Ceci n'est pas le cas du Maroc qui dispose d'une longue façade maritime ouverte sur l'océan atlantique, en plus du fait que presque toutes les usines de dessalement au Maroc fonctionnent avec des systèmes d'osmose inverse qui a la moindre empreinte environnementale comparés aux autres techniques de dessalement.

Cependant, et dans un objectif de durabilité et d'essor du secteur du dessalement ; l'accompagnement de ces projets et la gestion par un plan de suivi environnemental s'imposent dans le futur.

Références bibliographiques

- ✚ A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Tec & Doc Lavoisier, 2006.
- ✚ Ahmadi, E., McLellan, B., Mohammadi-Ivatloo, B., & Tezuka, T. (2020). The role of renewable energy resources in sustainability of water desalination as a potential fresh-water source : An updated review. *Sustainability*, 12(13), 5233.
- ✚ Ahmed, F. E., Hashaikh, R., Diabat, A., & Hilal, N. (2019). Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction. *Desalination*, 469, 114092.
- ✚ Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.
- ✚ Boulahfa, H., Belhamidi, S., Elhannouni, F., Taky, M., El Fadil, A., & Elmidaoui, A. (2019). Demineralization of brackish surface water by reverse osmosis: The first experience in Morocco. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102937.
- ✚ Boye, H. (2008). Water, energy, desalination and climate change in the Mediterranean. Sophia Antipolis : Plan Bleu.
- ✚ Cambridge, M. L., Zavala-Perez, A., Cawthray, G. R., Mondon, J., & Kendrick, G. A. (2017). Effects of high salinity from desalination brine on growth, photosynthesis, water relations and osmolyte concentrations of seagrass *Posidonia australis*. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 252-260.
- ✚ Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633.
- ✚ El-Ghizel, S., Tahaikt, M., Dhiba, D., Elmidaoui, A., & Taky, M. (2021). Desalination in Morocco: status and prospects. *Desalination Water Treat.*, 231, 1-15.
- ✚ Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1-3), 1-76.
- ✚ Gleick, P. H., Allen, L., Christian-Smith, J., Cohen, M. J., Cooley, H., Heberger, M., Palaniappan, M., Schulte, P. (2012). *The World's Water Volume 7 : The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island press.
- ✚ Global Water Intelligence – Archive : Global Water Intelligence, Global Water Intelligence (“GWI”), Holding company and main office (UK), Media Analytics Limited, Registered in England and Wales, American Water Intelligence Inc (USA), Registered in the state of Texas,

Global Water Intelligence (Shanghai) Limited, 2020.

- ✚ GWI DesalData (2021) <https://www.desaldata.com/> (accessed 01/05/2021)
- ✚ Hssaisoune, M., Bouchaou, L., Sifeddine, A., Bouimetarhan, I., & Chehbouni, A. (2020). Moroccan groundwater resources and evolution with global climate changes. *Geosciences*, 10(2), 81.
- ✚ International Desalination Association (IDA). (2019). Connecting People and Ideas to Water Solutions. Repéré à <https://idadesal.org/>
- ✚ Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production : A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- ✚ Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M., Smakhtin, V. et Kang, Seong-mu. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- ✚ K. Tahri, Desalination experience in Morocco, *Desalination*, 136 (2001) 43–48.
- ✚ Li, Z., Siddiqi, A., Anadon, L. D., & Narayanamurti, V. (2018). Towards sustainability in water-energy nexus : Ocean energy for seawater desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3833-3847.
- ✚ M. ZEBBAR. Diagnostic et Commande Tolérante dans les Systèmes de Dessalement D'eau. 2020. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret.
- ✚ Melián-Martel, N., Sadhwani Alonso, J. J., & Pérez Báez, S. O. (2013). Reuse and management of brine in sustainable SWRO desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3), 560-566.
- ✚ Miller, J. E. (2003). Review of water resources and desalination technologies (No. SAND2003-0800). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab.(SNL-CA), Livermore, CA (United States).
- ✚ Office chérifien des phosphates, Programme de dessalement de l'eau de mer (Seawater desalination program) (OCP), OCP, Morocco, 2016.
- ✚ Office National de l'Électricité et de l'Eau potable, branche eau (National Office of Electricity and Drinking Water, Water Branch, Ministry of Energy, Mines and Environnement, Morocco), 2017. Available at: <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/488091516133312338/pdf/summary-report.pdf> (accessed September 7, 2020).
- ✚ Organisation mondiale de la santé (OMS). (2011). Safe drinking-water from desalination. Repéré

à https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/desalination_guidance_en.pdf

- ✚ Organisation mondiale de la santé (OMS). (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson: quatrième édition. Repéré à <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258887/9789242549959-fre.pdf?sequence=1>.
- ✚ Our Water Sustainability Program, OCP Group, Morocco. Available at: <https://www.ocpgroup.ma/water-program> (accessed September 24, 2020).
- ✚ Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review. *Science of the Total Environment*, 693, 133545.
- ✚ Sola, I., Sánchez-Lizaso, J. L., Muñoz, P. T., García-Bartolomei, E., Sáez, C. A., & Zarzo, D. (2019). Assessment of the requirements within the environmental monitoring plans used to evaluate the environmental impacts of desalination plants in Chile. *Water*, 11(10), 2085.
- ✚ Voutchkow, N., Kaiser, G., Stover, R., Lienhart, J. et Awerbuch. (2019). Sustainable management of desalination plant concentrate – Desalination industry position paper – Energy and environment committee of the international desalination association (IDA).
- ✚ Zarzo, D., & Prats, D. (2018). Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future ? *Desalination*, 427, 1-9.
- ✚ Zidouri, H. (2000). Desalination of Morocco and presentation of design and operation of the Laayoune seawater reverse osmosis plant. *Desalination*, 131(1-3), 137-145.