

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Master Professionnel

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Dessalement et Traitement des Eaux

Thème :

**Caractérisation des eaux des différentes unités de la
station de dessalement d'El Marsa, Skikda.**

Présenté par :

Melle. OTMANI Loubna

Soutenue le : 18/06/2025 devant le jury composé de :

Dr OTMANI Lhadi	Président	MCB	Univ. El-Tarf
Dr BENIDIR Sofiane	Encadrant	MCB	Univ. El-Tarf
Dr AITBARA Adel	Co-Encadrant	MCA	Univ. El-Tarf
Dr OUCHENE Abdelali	Examineur	MCB	Univ. El-Tarf

Année Universitaire : 2024/2025



Dédicace



Je dédie ce travail, ainsi que tous mes succès :

♥ *À mes parents, **Otmani Azzedine et Zidi Naima.***

*Mes sœur **Nihad, Rouiya, Malak et Farah** ♥*

Toujours présents dans mes joies comme dans mes doutes. Merci pour votre sagesse, vos sacrifices, votre soutien indéfectible, vos encouragements et votre confiance. Grâce à votre amour et à vos prières, je peux avancer et atteindre mes objectifs.

♥ *À mes tantes, Merci pour votre sollicitude et pour votre soutien moralement et matériellement ♥*

♥ *À mes précieuses amies : **Faten Ayat, Farah Kendi, Khawla***

***Smaali, Doua Bensalem, Khaoula Haouli** ♥*

♥ *Et à toutes celles et ceux que j'ai pu oublier ou ne pas citer, merci du fond du cœur. ♥*

OTMANI Loubna.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord **Allah Tout-Puissant** de nous avoir accordé la force, la volonté, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes **sincères remerciements** à l'ensemble de mes enseignants pour la qualité de leur enseignement tout au long de mon parcours universitaire.

Je remercie tout particulièrement mon **encadrant Dr BENIDIR Sofiane**, pour son encadrement exemplaire, son soutien constant et ses conseils précieux, ainsi que ma **Co-encadrant Dr AITBARA Adel**, pour son aide et son accompagnement.

Je remercie vivement aussi les membres de mon jury **Dr OTMANI Lhadi et Dr OUCHENE Abdelali** d'avoir acceptés d'examiner ce travail.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui m'ont soutenu, en particulier les ingénieurs de la station de dessalement El-Marsa, la wilaya de Skikda et le personnel des laboratoires d'Annaba et de Bouteldja, dans la réalisation de ce travail. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous.

Liste des Figures et Tableaux

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Répartition de l'eau sur la planète.	3
Figure I.2 : Cycle de l'eau naturelle.	5

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma du procédé de dessalement par distillation à détente étagée	18
Figure II.2 : Schéma de principe du dessalement de l'eau de mer par distillation multi-effet.	19
Figure II.3 : Comparaison des processus d'osmose directe et d'osmose inverse.	21
Figure II.4 : Composants rejetés selon la technique de filtration membranaire.	22
Figure II.5 : Électrodialyse avec membrane bipolaire : production de H ₂ SO ₄ et NaOH.	23
Figure II.6 : Types d'électrodialyse et leurs fonctions dans le Dessalement.....	23
Figure II.7 : Représentation schématique de la perméation membranaire.	24
Figure II.8 : Échange d'ions dans le processus de traitement et dessalement de l'eau.	25
Figure II.9 : Procédé d'extraction liquide-liquide pour la désalinisation.	25
Figure II.10 : Capacité de rétention d'une membrane d'OI selon les contaminants.....	27
Figure II.11 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse appliqué à la désalinisation.	27
Figure II.12 : Structure interne d'une membrane d'osmose inverse spirale.	28
Figure II.13 : Éléments filtrants pour osmose inverse.	29
Figure II.14 : Types de colmatage des membranes dans les systèmes de filtration	30

Chapitre III

Figure III.1 : Vu d'enter de la station de dessalement d'eau de mer – La Marsa.	32
Figure III.2 : Localisation de la zone d'El-Marsa.	33
Figure III.3 : Schéma représente les étapes de dessalement.	34
Figure III.4 : Chambre des vannes de la station.	35
Figure III.5 : Lits de décantation lamellaire.....	36
Figure III.6 : Filtre sur sable.....	37
Figure III.7 : a) Cartouche de filtration, b) : Membrane de microfiltration.	38
Figure III.8 : Modules de membranes d'osmose inverse.	39
Figure III.9 : a) : Lit de Calcite, b) : Roches de carbonate de calcium.....	40
Figure III.10 : Schéma d'échantillonnage des différentes étapes du procédé de dessalement par osmose inverse à la station d'El Marsa.....	41
Figure III.11 : a) Conductimètre, b) Turbidimètres, c) pH-mètre.	42

Liste des Figures et Tableaux

Figure III.12 : Appareil multi éléments et deux sondes (NH_4^+ , NO_3^-).....	42
Figure III.13 : Fioles présentant des variations de couleur en présence d'ions calcium.....	43
Figure III.14 : Fioles présentant des variations de couleur en présence de TH.	44
Figure III.15 : Fioles présentant des variations de couleur en présence d'ions chlorure.....	44
Figure III.16 : Fiole présentant une coloration rose en présence de NO_2^-	44
Figure III.17 : Spectrophotomètre HACH DR 6000.....	45

Chapitre IV

Figure IV.1 : Evolution de pH au cours du processus de dessalement.	49
Figure IV.2 : Evolution de la conductivité au cours du processus de dessalement.	50
Figure IV.3 : Evolution de la température au cours du processus de dessalement.	51
Figure IV.4 : Evolution de la salinité au cours du processus de dessalement.	52
Figure IV.5 : Evolution de TDS (total des solides dissous) au cours du processus de dessalement.	52
Figure IV.6 : Evolution de la turbidité au cours du processus de dessalement.	53
Figure IV.7 : Evolution des chlorures au cours du processus de dessalement.	54
Figure IV.8 : Evolution de la concentration des ions Ca^{2+} au cours du processus de dessalement.	55
Figure IV.9 : Evolution de la concentration des ions NH_4^+ au cours du processus de dessalement.	56
Figure IV.10 : Evolution de la concentration des nitrates au cours du processus de dessalement.	57
Figure IV.11 : Evolution de la concentration des nitrites au cours du processus de dessalement.	58
Figure IV.12 : Evolution de la concentration des phosphates au cours du processus de dessalement.	59
Figure IV.13 : Evolution de la concentration des sulfates au cours du processus de dessalement.	59
Figure IV.14 : Evolution de la concentration des ions magnésium (Mg^{2+}) au cours du processus de dessalement.....	60
Figure IV.15 : Evolution de la concentration des ions sodium (Na^+) au cours du processus de dessalement.	61
Figure IV.16 : Evolution de la concentration de bicarbonates (HCO_3^-) au cours du processus de dessalement.....	62

Liste des Figures et Tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Divers exemples de contaminants qui causent la turbidité .	7
Tableau I.2 : La dureté de l'eau.	7
Tableau I.3 : Valeurs maximales des paramètres de potabilité de l'eau selon le décret exécutif n°11-219.	10
Tableau I.4 : Substances chimiques et leurs normes dans l'eau potable.	12
Tableau I.5 : Principaux Ions Dissous dans l'Eau de Mer	14
Tableau I.6 : Gaz dessous dans l'eau de mer	15
Tableau I.7 : Propriétés physiques des eaux de mer.	15

Chapitre II

Tableau II.1 : Techniques des dessalements	17
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la distillation MSF	18
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de DME	19
Tableau II.4 : Avantages et inconvénients de la distillation par compression de vapeur	20
Tableau II.5 : Avantages et inconvénients de la congélation	20
Tableau II.6 : Différences entre Osmose directe et osmose inverse	21
Tableau II.7 : Comparaison entre UF et NF	22
Tableau II.8 : Avantages et inconvénients de le procédé de l'électrodialyse	23
Tableau II.9 : Avantages et inconvénients de la pervaporation	24
Tableau II.10 : Avantages et inconvénients de le procédé échange d'ion	25
Tableau II.11 : Avantages et inconvénients de la procédé extraction par solvants	26
Tableau II.12 : Avantages et limites de le procédé de l'osmose inverse	30

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractérisation de l'eau de mer.	48
--	----

Table des matières, Liste des Figures et Tableaux

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Liste des figures et tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre I :

Généralité sur les eaux potables et les eaux de mer.

I.1 Introduction..... 3

I.2 Caractéristiques des eaux naturelles..... 3

I.2.1 Cycle de l'eau 3

I.2.2 Étapes du Cycle de l'Eau 4

I.2.2.1 Évaporation..... 4

I.2.2.2 Condensation 4

I.2.2.3 Précipitations 4

I.2.2.4 Infiltration 4

I.2.2.5 Ruissellement..... 4

I.2.2.6 Stagnation dans les Réservoirs Naturels..... 4

I.2.3 Types d'Eaux Naturelles..... 5

I.2.3.1 Eaux Souterraines 5

I.2.3.2 Eaux de Surface 5

I.2.3.3 Eaux de Mer..... 5

I.2.4 Caractéristiques des eaux naturelles 5

I.2.4.1 Caractéristiques Physiques 5

I.2.4.2 Caractéristiques Chimiques 6

I.2.4.3 Eaux Minérales Naturelles..... 6

I.3 Paramètres de caractérisation des eaux potables 6

I.3.1 Caractérisations physiques..... 6

I.3.1.1 Température..... 6

I.3.1.2 Turbidité 6

I.3.1.3 Couleur 7

I.3.1.4 Gout et odeur 7

I.3.2 Caractérisations chimiques 7

I.3.2.1 pH 7

Table des matières, Liste des Figures et Tableaux

I.3.2.2 Dureté	7
I.3.2.3 Teneur en chlore	8
I.3.2.4 Nitrates et nitrites.....	8
I.3.2.5 Métaux lourds	8
I.3.3 Caractérisations microbiologiques.....	8
I.3.3.1 Bactéries et virus	8
I.3.3.2 Parasites et protozoaires	8
I.4 Normes de potabilité.....	8
I.4.1 Organisations internationales	8
I.4.1.1 Organisation mondiale de la santé.....	8
I.4.1.2 Organisation internationale de normalisation (ISO).....	9
I.4.2 Normes européennes.....	9
I.4.3 Normes algériennes de l'eau potable.....	10
I.5 Eléments indésirables dans les eaux potables	11
I.5.1 Substances Chimiques.....	11
I.5.1.1 Nitrates (NO_3^-).....	11
I.5.1.2 Arsenic (As).....	11
I.5.1.3 Fluor (F).....	11
I.5.1.4 Métaux Lourds (Plomb, Cadmium, Mercure)	11
I.5.1.5 PFAS (Substances Per- et Polyfluoroalkylées)	11
I.5.2 Substances Biologiques.....	12
I.5.2.1 Micro-organismes Pathogènes.....	12
I.5.2.2 Autres Micro-organismes	13
I.5.3 Sources clés de pollution.....	13
I.5.3.1 Pollution agricole.....	13
I.5.3.2 Pollution industrielle.....	13
I.5.3.3 Pollution domestique	14
I.5.3.4 Pollution accidentelle	14
I.6 Composition physico-chimique des eaux de mer.....	14
I.6.1 Composition chimique	14
I.6.2 Propriétés physiques	15
I.7 Conclusion	15

Table des matières, Liste des Figures et Tableaux

Chapitre II :

Procédés de dessalement des eaux

II.1 Introduction	17
II.2 Techniques des dessalements	17
II.2.1 Procédés thermiques.....	18
II.2.1.1 Distillation à détente étagée	18
II.2.1.2 Distillation à multiples effets	18
II.2.1.3 Distillation par compression de vapeur.....	19
II.2.1.4 Congélation	20
II.2.2 Procédés membranaires	20
II.2.2.1 Osmose directe et l'osmose inverse	20
II.2.2.2 Ultrafiltration (UF) et Nanofiltration	22
II.2.2.3 Électrodialyse (ED).....	23
II.2.2.4 Pervaporation	24
II.2.3 Autres procédés.....	24
II.2.3.1 Echange d'ion.....	24
II.2.3.2 Extraction par solvant.....	25
II.3 Osmose Inverse.....	26
II.3.1 Principes fondamentaux de l'osmose inverse	27
II.3.2 Description technique d'un système d'osmose inverse	28
II.3.3 Membranes d'osmose inverse.....	28
II.3.3.1 Matériaux	29
II.3.3.2 Structures.....	29
II.3.3.3 Innovations	29
II.3.4 Applications de l'osmose inverse.....	29
II.3.5 Problèmes liés à l'utilisation et les solutions possibles	29
II.3.6 Avantages et limites de la technique	30
II.4 Conclusion.....	31

Chapitre III :

Méthodologie et dispositif expérimental

III.1 Introduction	32
III.2 Localisation de la station.....	32

Table des matières, Liste des Figures et Tableaux

III.3 Capacité de la station	33
III.4 Installation et processus	33
III.4.1 Étapes de dessalement	34
III.4.2 Description détaillée de la station	34
III.4.2.1 Prise d'eau de mer.....	34
III.4.2.2 Prétraitement	35
III.4.2.3 Osmose inverse	38
III.4.2.4 Post-traitement (eau traitée).....	40
III.5 Plan d'échantillonnage au cours du processus de dessalement	40
III.6 Méthodologies d'analyse	41
III.6.1 Ammonium (NH_4^+)	42
III.6.2 Nitrates (NO_3^-).....	42
III.6.3 Bicarbonate (HCO_3^-)	43
III.6.4 Calcium (Ca^{2+}).....	43
III.6.5 Magnésium (Mg^{2+}).....	43
III.6.6 Chlorure (Cl^-)	44
III.6.7 Nitrites (NO_2^-)	44
III.6.8 Phosphates (PO_4^{3-})	45
III.6.9 Sulfates (SO_4^{2-}).....	45
III.6.10 Sodium (Na^+).....	45
III.6.11 Salinité et TDS	45
III.7 Conclusion	46

Chapitre IV :

Analyses et interprétation des résultats.

IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Caractérisation de l'eau de mer.....	47
IV.3 Évolution des paramètres de contrôle après traitement.....	49
IV.3.1 Résultats de mesure de pH, conductivité et la température.....	49
IV.3.2 Résultats de calcul de TDS et salinité	51
IV.3.3 Résultats de mesures de la turbidité	53
IV.3.4 Résultats d'analyse des Chlorures	54
IV.3.5 Résultats d'analyse de Calcium (Ca^{2+}) et Ammonium (NH_4^+).....	55
IV.3.6 Résultats d'analyse des Nitrates, Nitrites et Phosphates.....	57

Table des matières, Liste des Figures et Tableaux

IV.3.7 Résultats d'analyse des Sulfates (SO_4^{2-}).....	59
IV.3.8 Résultats de calcul de Magnésium, Sodium et Bicarbonates (HCO_3^-)	60
IV.4 Conclusion	62
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	64

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie, à l'environnement et au développement socio-économique. Malgré l'abondance apparente de l'eau sur Terre, seule une infime fraction est directement utilisable pour les besoins humains. En effet, l'eau douce représente à peine 2.5 % du volume total de l'eau de la planète, dont une grande partie est piégée dans les glaciers ou les nappes phréatiques profondes [1]. Ce déséquilibre accentué par la croissance démographique, l'urbanisation et le changement climatique a conduit plusieurs régions, notamment celles situées dans les zones arides et semi-arides, à se tourner vers des solutions alternatives telles que le dessalement de l'eau de mer pour garantir un accès durable à l'eau potable [2,3].

L'Algérie, pays à climat majoritairement semi-aride, fait face à des défis croissants en matière de disponibilité en eau douce, surtout dans les zones côtières fortement peuplées. Pour pallier cette situation, le pays a initié, depuis les années 2000, une stratégie de diversification de ses ressources hydriques, incluant la mise en place de plusieurs stations de dessalement d'eau de mer, parmi lesquelles figure la station d'El Marsa, située dans la wilaya de Skikda [4,5]. Cette station joue un rôle central dans l'approvisionnement en eau potable de la région, en utilisant des technologies avancées de dessalement, principalement l'osmose inverse.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux dans les différentes unités de cette station revêt une importance particulière. Elle permet non seulement d'évaluer la performance du procédé de dessalement mais aussi de garantir la qualité de l'eau produite conformément aux normes internationales [6]. En effet, chaque étape du traitement – de la prise d'eau brute jusqu'à la distribution – peut influencer la qualité de l'eau finale, d'où l'intérêt d'une analyse approfondie des paramètres tels que la salinité, la turbidité, le pH, la conductivité électrique, la présence d'éléments traces, etc [7,8].

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré aux généralités sur l'eau potable et l'eau de mer, abordant les propriétés physico-chimiques de ces milieux ainsi que les exigences normatives liées à l'eau destinée à la consommation humaine.
- **Le deuxième chapitre** présente les différents procédés de dessalement de l'eau, avec un accent particulier sur la technologie de l'osmose inverse, largement utilisée dans les installations modernes, dont celle d'El Marsa.

- **Le troisième chapitre** décrit les matériaux, les outils analytiques et les méthodologies adoptée pour l'échantillonnage et l'analyse des différentes unités de la station.
- Enfin, **le quatrième chapitre** propose une analyse critique et une interprétation des résultats obtenus, mettant en lumière les performances du système de traitement et la qualité de l'eau produite.

À travers cette étude, nous visons à contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des unités de dessalement en contexte réel, tout en apportant des éléments utiles pour l'amélioration continue des procédés et la préservation des ressources en eau.

Chapitre I :

Généralité sur les eaux potables et les eaux de mer.

I.1 Introduction

L'eau, ressource vitale aux propriétés distinctes, se présente sous diverses formes naturelles nécessitant une caractérisation spécifique. Toute l'eau présente sur Terre n'est pas directement consommable, alors, 97.2 % est de l'eau salée et seulement 2.8 % est de l'eau douce [9]. On distingue principalement l'eau potable, destinée à la consommation humaine et soumise à des normes de qualité strictes, et l'eau de mer, naturellement riche en sels et impropre à la consommation sans traitement spécifique [10]. Ces deux types d'eau diffèrent en composition chimique, en caractéristiques, en origine et en usage.

I.2 Caractéristiques des eaux naturelles

I.2.1 Cycle de l'eau

La Terre, souvent surnommée la "planète bleue", est recouverte d'eau à hauteur de 70%, soit environ 1.4 milliard de km³. Cependant, seuls 2.8% de cette eau sont douce, tandis que 97.2% sont salée. La majorité de l'eau douce est piégée sous forme de glace polaire, ce qui la rend inutilisable.

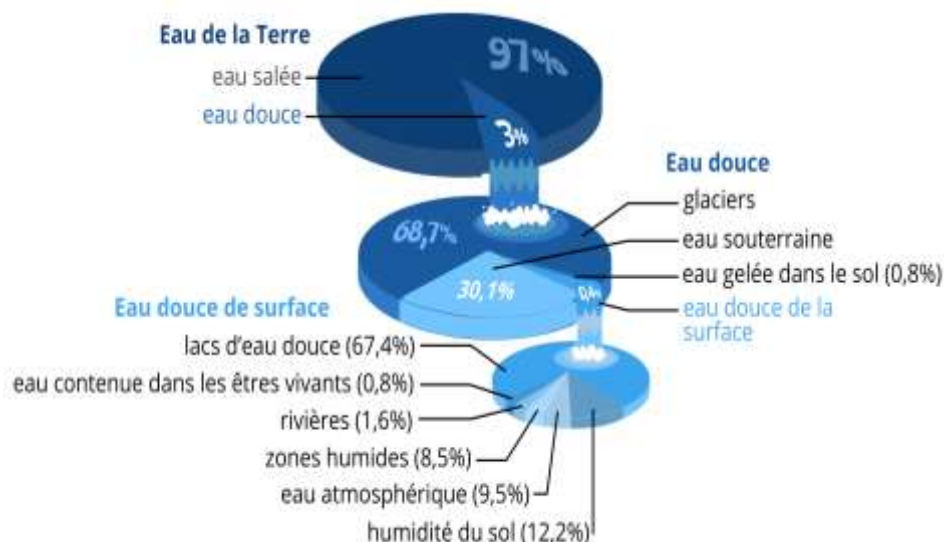


Figure I.1 : Répartition de l'eau sur la planète [9].

Par conséquent, seulement un quart de l'eau douce reste disponible pour répondre aux besoins de l'humanité, ce qui est très limité. Heureusement, cette eau se renouvelle rapidement. Cependant, il est crucial de protéger cette ressource précieuse contre la pollution pour préserver l'accessibilité de cette petite fraction d'eau douce utilisable par l'homme.

I.2.2 Étapes du Cycle de l'Eau

Les eaux naturelles (de surface ou souterraines) possèdent des caractéristiques physico-chimiques complexes, influencées par la géologie, le climat et les activités humaines. Les eaux minérales se distinguent par leur composition spécifique, tandis que les eaux de surface dépendent des processus hydrologiques. Cette compréhension est essentielle pour une gestion durable des ressources et la protection de la santé publique.

I.2.2.1 Évaporation

L'évaporation est le passage de l'eau de l'état liquide à gazeux sous l'effet de la chaleur solaire, principalement depuis les surfaces aquatiques et terrestres (évapotranspiration). Phase essentielle pour transférer l'eau vers l'atmosphère [11].

I.2.2.2 Condensation

La condensation se produit lorsque la vapeur d'eau dans l'atmosphère se refroidit et se transforme en gouttelettes d'eau, formant des nuages. Lorsque ces nuages deviennent saturés, ils libèrent de la pluie ou de la neige.

I.2.2.3 Précipitations

Les précipitations se produisent lorsque les nuages libèrent de la pluie, de la neige ou de la grêle. Ces précipitations retombent sur la Terre, alimentant les cours d'eau, les lacs et les nappes d'eau souterraine [12].

I.2.2.4 Infiltration

L'infiltration se produit lorsque l'eau des précipitations pénètre dans le sol, rechargeant les nappes d'eau souterraine. Cela est essentiel pour maintenir les réserves d'eau souterraine et soutenir la vie végétale [11].

I.2.2.5 Ruissellement

Le ruissellement est le processus par lequel l'eau qui n'a pas été absorbée par les sols s'écoule en surface vers les cours d'eau. Ce processus est crucial pour alimenter les rivières, les lacs et les océans.

I.2.2.6 Stagnation dans les Réservoirs Naturels

L'eau peut s'accumuler temporairement dans des réservoirs naturels tels que les lacs, les rivières et les océans. Cette phase permet à l'eau de se redistribuer et d'être réutilisée dans le cycle hydrologique.

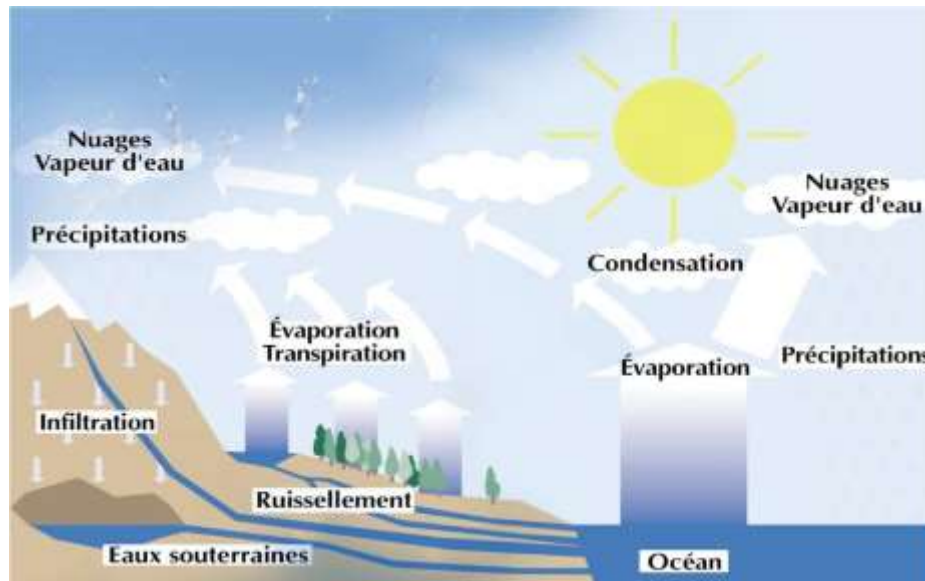


Figure I.2: Cycle de l'eau naturelle.

I.2.3 Types d'Eaux Naturelles

I.2.3.1 Eaux Souterraines

Ces types d'eaux se situent sous le sol où elles vont revêtir une composition, une température et une minéralisation qui seront bien souvent plus stables et minéralisées par rapport aux eaux de surface [13,14].

I.2.3.2 Eaux de Surface

Celles-ci regroupent notamment les rivières, les fleuves, les lacs, les étangs et les retenues d'eau, qui subissent directement l'influence des conditions climatiques et auront tendance à être plus turbides et à afficher des niveaux de masse d'oxygène plus variables pour suivre les conditions climatiques [14,15].

I.2.3.3 Eaux de Mer

Les océans et mers marins possèdent également une composition chimique différente puisqu'elles affichent une salinité forte et un pH légèrement alcalin mais ont une place à occuper dans le cycle de l'eau et dans les écosystèmes marins [16].

I.2.4 Caractéristiques des eaux naturelles

I.2.4.1 Caractéristiques Physiques

- a. **Température** : Varie selon la profondeur, la saison et la localisation géographique [13].

- b. Turbidité** : Reflète la clarté de l'eau, influencée par les particules en suspension ; une turbidité élevée réduit la pénétration de la lumière et limite la photosynthèse [14].
- c. Couleur** : Dépend des substances dissoutes comme les tanins issus de la décomposition organique, donnant à l'eau une teinte jaunâtre ou brunâtre selon leur concentration [14].

I.2.4.2 Caractéristiques Chimiques

- a. pH** : Généralement compris entre 6,5 et 8,5, ce paramètre influence la solubilité des minéraux et la disponibilité des éléments nutritifs [13].
- b. Oxygène dissous** : Élément vital pour les organismes aquatiques, sa concentration est plus élevée dans les eaux de surface en raison du contact direct avec l'atmosphère [13].
- c. Contaminants** : Substances polluantes d'origine anthropique, telles que nitrates, phosphates et pesticides, pouvant altérer la qualité de l'eau [15].

I.2.4.3 Eaux Minérales Naturelles

Les eaux minérales naturelles se distinguent par leur origine pure et le caractère stable de leur composition en minéraux et oligo-éléments. Échappant à la pollution et à tout traitement chimique de désinfection, elles voient leur composition constante à l'origine de propriétés préconisées respectivement par l'Académie de Médecine [17].

I.3 Eaux potables

L'eau potable provient généralement des nappes phréatiques, des rivières et des lacs, qui nécessite un traitement avant la consommation pour répondre à des critères stricts de qualité.

I.3.1 Caractérisations physiques

I.3.1.1 Température

La température essentielle pour l'acceptabilité et la sécurité sanitaire de l'eau potable [18].

I.3.1.2 Turbidité

La turbidité mesurant la clarté de l'eau via les particules en suspension, exprimée en NTU, mesurée par turbidimètre [19].

Tableau I.1 : Divers exemples de contaminants qui causent la turbidité [19].

Source	Exemple de contaminants	Origine
Sols et sédiments	Argile, limon, sable	Eaux de ruissellement, érosion
Déchets organiques	Déchets végétaux, matières organiques dissoutes	Matières en décomposition, pollution agricole
Micro-organismes	Bactéries, virus, parasites	Contamination fécale, eaux stagnantes
Métaux lourds	Fer, manganèse	Vieilles canalisations, sources souterraines

I.3.1.3 Couleur

Eau potable incolore, toute variation de couleur pouvant indiquer la présence de contaminants chimiques ou biologiques [20].

I.3.1.4 Gout et odeur

Eau potable exempte de goût ou d'odeur désagréable, important pour l'acceptabilité et pouvant signaler une contamination [21].

I.3.2 Caractérisations chimiques

I.3.2.1 pH

pH mesurant l'acidité ou l'alcalinité, entre 0 et 14 [18]. Dans le cas de l'eau potable, le pH est entre 6.5 et 8.5.

I.3.2.2 Dureté

La dureté de l'eau correspond à la concentration en sels de calcium et de magnésium, exprimée en mg/l de CaCO₃ (carbonate de calcium) ou en °fH (degré français) [18].

Tableau I.2 : la dureté de l'eau.

Dureté de l'eau	Concentration en CaCO ₃ (mg/l)	Degré français (°fH)
Eau très douce	< 60	< 6
Eau douce	60 – 120	6 - 12
Eau moyennement dure	120 – 180	12 - 18
Eau dure	> 180	> 18

I.3.2.3 Teneur en chlore

Le chlore (Cl_2) est un désinfectant largement utilisé dans le traitement de l'eau potable pour éliminer les bactéries, virus et autres micro-organismes pathogènes [21].

I.3.2.4 Nitrates et nitrites

Les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) sont des composés azotés présents naturellement mais augmentant par les activités humaines [18].

I.3.2.5 Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments naturellement présents dans l'environnement, issus soit de l'érosion géologique naturelle, soit d'apports anthropogéniques (rejets industriels, corrosion des réseaux, etc.) [20].

I.3.3 Caractérisations microbiologiques**I.3.3.1 Bactéries et virus**

Les bactéries et les virus pathogènes sont des micro-organismes pathogènes d'origine fécale pouvant causer des maladies infectieuses via eaux usées, ruissellement ou infiltration [18].

I.3.3.2 Parasites et protozoaires

Les parasites et les protozoaires sont des Micro-organismes résistants à certains désinfectants, transmis par [18] :

- Contamination fécale des sources d'eau potable (rejets humains ou animaux).
- Eaux de surface contaminées (rivières, lacs, eaux stagnantes).
- Traitement insuffisant de l'eau potable (résistance de certains parasites aux désinfectants classiques comme le chlore) [18].

I.4 Normes de potabilité

Les normes de potabilité de l'eau sont des critères établis pour garantir que l'eau destinée à la consommation humaine est sûre et exempte de contaminants nuisibles à la santé. Ces normes varient selon les pays et les organisations internationales.

I.4.1 Organisations internationales**I.4.1.1 Organisation mondiale de la santé**

Les directives de l'OMS sur l'eau potable visent à garantir la sécurité sanitaire de l'eau destinée à la consommation humaine, en tenant compte des contaminants microbiologiques, chimiques et radiologiques. Fondées sur une approche de gestion des risques, elles

considèrent les effets à long terme sur la santé, notamment pour les groupes vulnérables (enfants, femmes enceintes). L'OMS recommande leur adaptation au contexte local. En 2010, l'accès à l'eau potable a été reconnu comme un droit humain fondamental par les Nations Unies. [22].

I.4.1.2 Organisation internationale de normalisation (ISO)

L'ISO a élaboré plus de 1 400 normes sur l'eau, couvrant la qualité, la mesure, la durabilité et les infrastructures liées à l'eau, incluant l'eau potable, les eaux usées et pluviales, même si aucun standard universel n'est imposé.

- **Qualité de l'eau** : Environ 300 normes définissent les méthodes de prélèvement et le suivi des polluants.
- **Empreinte hydrique** : La norme ISO 14046 encadre l'évaluation de l'usage de l'eau.
- **Hydrométrie** : Une soixantaine de normes permettent l'évaluation des eaux et sédiments pour mieux gérer les ressources.
- **Systèmes d'eau potable et d'eaux usées** : Les normes ISO 24510, 24511 et 24512 visent à améliorer les services liés à l'eau.
- **Réutilisation de l'eau** : La norme ISO 20760-1 recommande des pratiques pour l'utilisation de l'eau récupérée en milieu urbain.
- **Assainissement autonome** : La norme ISO 30500 définit les critères pour les systèmes de traitement non collectifs des déchets fécaux.
- **Crise de l'eau** : Des normes comme ISO 24518, ISO/TS 24520 et ISO/TR 24525 sont en cours pour aider les communautés en situation de pénurie.
- **Irrigation avec eaux usées** : Les normes concernées visent à protéger la santé publique et l'environnement [23].

I.4.2 Normes européennes

En Europe, la qualité de l'eau potable est soumise à des normes précises, principalement établies par la directive européenne sur l'eau potable, qui a subi sa dernière mise à jour en 2020. Les normes européennes sur l'eau potable, encadrées par la directive (UE) 2020/2184, imposent une surveillance régulière et une communication transparente aux consommateurs. L'eau doit satisfaire à 63 critères de potabilité répartis en cinq catégories :

- **Physico-chimiques** (ex. : pH entre 6,5 et 9, dureté ≥ 15 °f),
- **Microbiologiques** (absence de bactéries pathogènes),
- **Chimiques** (limites sur le plomb, chrome, pesticides),

- **Radioactifs** (contrôle de l'uranium),
- **Sous-produits de désinfection** (comme les chlorates et acides halo acétiques).

I.4.3 Normes algériennes de l'eau potable

I.4.3.1 Cadre réglementaire

Le ministère de la Santé et le Conseil supérieur du secteur d'hygiène publique établissent les critères de potabilité de l'eau en Algérie. Elles correspondent aux préconisations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et intègrent des seuils pour différents paramètres physico-chimiques et microbiologiques [24,25].

Tableau I.3 : Valeurs maximales des paramètres de potabilité de l'eau selon le décret exécutif n°11-219 [25].

	Paramètres	Valeurs Maximale Admissible
Paramètres physico-chimiques	pH	6.5 à 9
	Turbidité	Inférieure à 5 NTU
	Température	Inférieure à 25 °C
	Conductivité	2800 µS/cm à 20 °c
Paramètres chimique	Nitrates (NO ₃)	50 mg/l
	Sulfates (SO ₄ ²⁻)	200 mg/l
	Chlorures	250 mg/l
	Calcium	200 mg/l
	Sodium	200 mg/l
Paramètres microbiologiques	Coliformes totaux	Absence dans 100 ml d'eau
	Escherichia coli	Absence dans 100 ml d'eau
	Streptocoques fécaux	Absence dans 100 ml d'eau

Plusieurs textes législatifs définissent les normes de potabilité de l'eau en Algérie, y compris le décret exécutif n° 11-219 du 12 juin 2011, qui établit les objectifs de qualité pour les eaux consommées par la population [25].

I.5 Eléments indésirables dans les eaux potables

Les eaux qui peuvent être considérées comme potables peuvent contenir des contaminants, d'un point de vue chimique et/ou biologique, indésirables et potentiellement dangereux pour la santé humaine, comprenant des éléments contaminants générés par l'industrie, l'agriculture et le milieu domestique, ainsi que d'origine naturelle ou accidentelle. Parmi ces contaminants, on trouve :

I.5.1 Substances Chimiques

I.5.1.1 Nitrates (NO_3^-)

Le nitrate non seulement contenu dans l'eau potable, peuvent se transformer en nitrites dans l'organisme, causant la méthémoglobinémie, une affection qui réduit la capacité du sang à transporter l'oxygène, surtout chez les nourrissons. Les nitrites peuvent aussi former des nitrosamines, composés potentiellement cancérigènes, bien que leur dangerosité reste à confirmer dans certains cas [26].

I.5.1.2 Arsenic (As)

L'arsenic, un contaminant toxique, est suspecté dans plusieurs types de cancers (peau, vessie, poumons) ainsi que dans des troubles cardio-vasculaires ; des lésions cutanées peuvent survenir lors de contacts prolongés, en même temps que des effets neurologiques.

I.5.1.3 Fluor (F)

En dose limitée, le fluorure permet d'éviter des caries dentaires. Mais avec une concentration trop forte, il peut y avoir fluorose dentaire et fluorose osseuse.

I.5.1.4 Métaux Lourds (Plomb, Cadmium, Mercure)

- **Plomb (Pb)** : le plomb peut entraîner des troubles neurologiques dans le développement de l'enfant, et peut également affecter le système cardiovasculaire des adultes.
- **Cadmium (Cd)** : le cadmium affecte les reins et peut être responsable de lésions osseuses.
- **Mercur (Hg)** : la neurotoxicité du mercure peut nuire au développement cérébral.

I.5.1.5 PFAS (Substances Per- et Polyfluoroalkylées)

Ce groupe de substances, persistantes et bioaccumulables dans l'environnement, est lié à un risque accru de cancer, de troubles endocriniens et d'atteintes au système immunitaire.

Les normes PFAS seraient différentes selon les juridictions. Aux États-Unis, quelques valeurs limites sont déjà fixées en de très faibles concentrations, au nanogramme près (ng/l).

Tableau I.4 : Substances chimiques et leurs normes dans l'eau potable [24].

Substance Chimique	Norme dans l'eau Potable
Arsenic	10 µg/l (OMS)
Fluorure	< 1.5 mg/l
Nitrates	≤ 50 mg/l
Nitrites	≤ 0.10 mg/l
Plomb	≤ 10 µg/l
Cadmium	≤ 5.0 µg/l
Mercure	< 0.001 mg/l
Bore	relevée à 2.4 mg/l
Bromates	≤ 10 µg/l
Chlorates	≤ 0.25 mg/l
Chlorites	≤ 0.25 mg/l
Sélénium	relevée à 20 µg/l
Uranium	nouvelle norme introduite
PFAS	nouvelle norme introduite

Ces normes sont basées sur diverses sources, notamment l'OMS et les directives européennes sur l'eau potable. Les valeurs pour les PFAS sont en cours de révision avec de nouvelles directives.

I.5.2 Substances Biologiques

I.5.2.1 Micro-organismes Pathogènes

I.5.2.1.1 Bactéries

- **Coliformes Fécaux (E. coli) :** E. coli est une bactérie présente dans les intestins des mammifères, servant d'indicateur de contamination fécale. Peut provoquer des gastro-entérites graves, incluant diarrhée sanglante et complications rénales potentielles.
- **Legionella :** Bactérie responsable de la légionellose, une infection pulmonaire grave. Pneumonies mortelles, fièvre, toux, douleurs thoraciques.

- **Campylobacter** : Bactérie provoquant des gastro-entérites. Diarrhée, douleurs abdominales, fièvre.

I.5.2.1.2 Virus

- **Norovirus** : Virus très contagieux provoquant des gastro-entérites aiguës, transmis par voie féco-orale, surtout en milieux clos, nécessitant une réhydratation constante.
- **Rotavirus** : Principal responsable de diarrhées sévères chez l'enfant, très contagieux par contact fécal ou surfaces, avec prévention par vaccination et traitement par réhydratation.
- **Hépatite A** : Infection hépatique transmise par l'eau ou les aliments contaminés, entraînant fatigue, jaunisse et douleurs, évitable par vaccination.

I.5.2.1.3 Parasites

- **Giardia** : Parasite intestinal transmis par voie féco-orale, causant la giardiase (diarrhées, douleurs, nausées), traité par des antiprotozoaires comme le métronidazole.
- **Cryptosporidium** : Parasite responsable de diarrhées aiguës, surtout chez les immunodéprimés, transmis par eau ou aliments contaminés, traité par nitazoxanide chez les personnes immunocompétentes.

I.5.2.2 Autres Micro-organismes

- **Algues Toxiques** : Certaines algues produisent des toxines nocives pour la santé humaine, comme les microcystines

I.5.3 Sources clés de pollution

I.5.3.1 Pollution agricole

La pollution agricole, par les engrais et pesticides, contamine les eaux souterraines et de surface via infiltration et ruissellement, favorisant l'eutrophisation par l'accumulation de nitrates et phosphates [27].

I.5.3.2 Pollution industrielle

Les rejets industriels d'eaux usées contiennent divers polluants (organiques, métaux, hydrocarbures, biocides, etc.) difficiles à éliminer, entraînant une pollution persistante de l'environnement.

I.5.3.3 Pollution domestique

Les eaux usées domestiques, riches en déchets organiques et produits ménagers toxiques, peuvent polluer les milieux aquatiques et menacer la santé publique si elles sont insuffisamment traitées.

I.5.3.4 Pollution accidentelle

Les déversements accidentels de produits toxiques dans les milieux aquatiques représentent une source de pollution grave, pouvant nuire fortement à l'écosystème aquatique et avoir des conséquences étendues sur la santé humaine et l'environnement.

I.6 Composition physico-chimique des eaux de mer

I.6.1 Composition chimique

La composition chimique de l'eau de mer est principalement constituée d'ions qui suivent la loi de **Dittmar**. Cette loi stipule que les proportions relatives des principaux ions dissous sont constantes, permettant de déterminer la salinité en mesurant un seul constituant, souvent le chlorure (Cl^-).

Tableau I.5 : Principaux Ions Dissous dans l'Eau de Mer,

Type d'ion	Ion	Concentration (g/kg)
Anions	Chlorure (Cl^-)	19.35
	Sulfate (SO_4^{2-})	2.71
	Hydrogénocarbonate (HCO_3^-)	0.108
	Bromure (Br^-)	0.0673
	Carbonate (CO_3^{2-})	0.0156
	Fluorure (F^-)	0.0013
Cations	Sodium (Na^+)	10.78
	Magnésium (Mg^{2+})	1.28
	Calcium (Ca^{2+})	0.412
	Potassium (K^+)	0.399

La concentration en chlorure est directement liée à la salinité globale, ce qui permet de calculer la salinité totale à l'aide d'une formule spécifique [28] :

$$S = 1.80655 \times [\text{Cl}]$$

Où : (S) est la salinité et [Cl] est la concentration en chlorure ;

Le coefficient **1.80655** représente le rapport moyen entre la masse totale des sels dissous et la teneur en ions chlorure dans l'eau de mer [29].

Cette méthode est pratique car elle permet de déterminer la salinité totale en mesurant un seul ion, ce qui simplifie les analyses chimiques [28].

Tableau I.6: Gaz dessous dans l'eau de mer,

Gaz	Proportion (%)
Azote (N ₂)	64
Oxygène (O ₂)	34
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1.8

I.6.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques de l'eau de mer sont déterminées par trois variables fondamentales : salinité, température et la pression. Ces paramètres influencent directement la densité, la conductivité électrique et le point de congélation de l'eau de mer [30].

Tableau I.7: Propriétés physiques des eaux de mer.

Propriété	Valeur typique
Salinité	35 g/kg (30-40 g/kg selon les régions)
Température	- 2°C à 30°C en surface
pH	8.0 à 8.3
Densité	1.020 à 1.029 g/cm ³ à 20°C
Point de congélation	Environ - 1.91°C à 35 g/kg de salinité
Conductivité électrique	Environ 50 mS/cm à 25°C et 35 g/kg de salinité

I.7 Conclusion

L'eau sur Terre se présente sous diverses formes, dont seule une faible proportion est directement utilisable par l'homme. L'eau potable se distingue par des critères stricts de qualité, tandis que l'eau de mer, riche en sels, nécessite un traitement spécifique. Le cycle de l'eau, ses caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques, ainsi que les différents

types d'eaux naturelles ont été détaillés. Les normes de potabilité à l'échelle internationale, européenne et algérienne ont été précisées, de même que les principaux contaminants pouvant nuire à la santé. Enfin, la composition chimique et physique de l'eau de mer a été présentée en lien avec sa salinité.

Chapitre II : Procédés de dessalement des eaux

II.1 Introduction

Confrontée à la croissance démographique mondiale, avec 9.7 milliards d'habitants escomptés en 2050 par l'ONU, aux dérèglements climatiques qui aggravent le stress hydrique, la solution technologique du dessalement devient incontournable. La démographie croissante (+ 80 millions/an) impose d'accroître de 64 milliards de m³ la fourniture d'eau douce chaque année [31], alors que 66 % de la population devrait vivre en milieu urbain, souvent soumis à des déficits en eau, en 2050 [32]. Le réchauffement climatique accélère l'évaporation (+7 % par °C selon le GIEC) et salinise les aquifères côtiers [33,34], alors qu'environ 40% de la population mondiale réside à moins de 100 km des côtes. Le dessalement répond ainsi aux enjeux d'approvisionnement en eau sur les zones côtières à l'échelon local, malgré des impacts environnementaux tels que le rejet de saumure sur les écosystèmes marins [35-37].

II.2 Techniques des dessalements

Les principaux procédés de dessalement utilisés dans le monde se répartissent entre deux familles : les procédés thermiques et les procédés membranaires.

Tableau II.1: Techniques des dessalements.

Procédés Thermiques	Distillation flash à détente étagée
	Distillation à multiples effets
	Distillation par compression de vapeur
	Congélation
Procédés Membranaires	Osmose directe et osmose inverse
	Ultra-filtration et Nano-filtration
	Electrodialyse
	Pervaporation

II.2.1 Procédés thermiques

II.2.1.1 Distillation à détente étagée

Le procédé MSF (Multi-Stage Flash) est une technique thermique de dessalement où l'eau de mer chauffée à environ 110 °C passe par plusieurs étages à pression décroissante. Cela provoque une vaporisation instantanée partielle de l'eau. La vapeur produite est ensuite condensée, et la chaleur récupérée via des échangeurs pour préchauffer l'eau d'alimentation, améliorant ainsi le rendement énergétique.

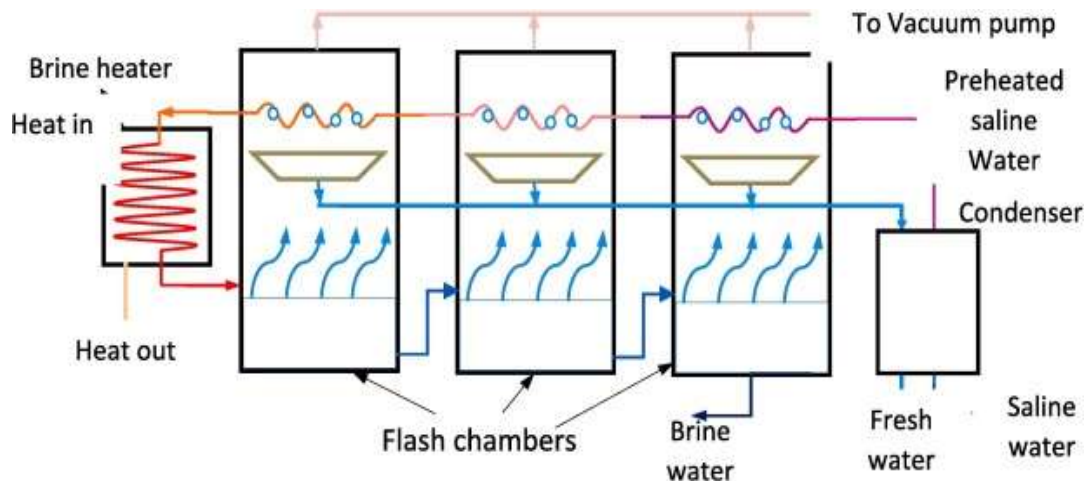


Figure II.1: Schéma du procédé de dessalement par distillation à détente étagée

Cette technologie, utilisée essentiellement dans les zones sèches, est le plus souvent intégrée dans des centrales en cogénération qui valorisent la chaleur résiduelle dans le traitement de très importants volumes ; les unités peuvent atteindre 78 000 m³/jour [38].

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la distillation MSF.

Avantages	Inconvénients
Traitement de grands volumes adapté aux usages industriels et municipaux	Consommation énergétique élevée
Production d'eau de haute qualité	Coûts d'investissement et d'entretien importants
Fiabilité et longue durée de vie opérationnelle	Sensibilité à l'entartrage et à la corrosion

II.2.1.2 Distillation à multiples effets

La distillation à multiples effets (DME) est un procédé thermique de dessalement de l'eau de mer utilisant une série d'évaporateurs à pressions et températures décroissantes. L'eau de mer y est chauffée dans le premier effet, puis la vapeur produite chauffe les effets suivants, chacun fonctionnant à une pression plus basse [39].

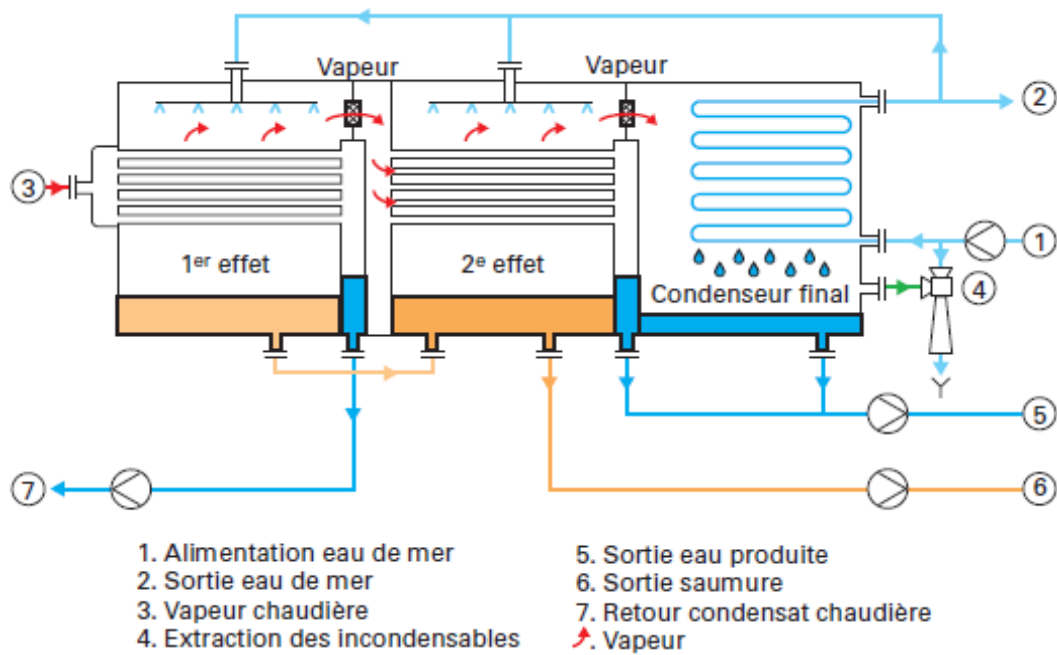


Figure II.2 : Schéma de principe du dessalement de l’eau de mer par distillation multi-effet.

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de DME.

Avantages	Inconvénients
Efficacité énergétique améliorée par récupération de chaleur	Coût d’investissement initial élevé
Fonctionnement à basse température limitant entartrage et corrosion	Maintenance régulière pour éviter entartrage et corrosion
Possibilité de couplage avec chaleur résiduelle pour meilleure efficacité	Besoin d’un espace important pour l’installation des effets

II.2.1.3 Distillation par compression de vapeur

La distillation par compression de vapeur (VC) est un procédé thermique de dessalement où l’eau salée est portée à ébullition pour produire de la vapeur, qui est ensuite comprimée mécaniquement ou thermiquement. Cette compression augmente la température et la pression de la vapeur, qui est réutilisée pour chauffer l’eau salée, favorisant son évaporation. La vapeur est ensuite condensée, et le cycle se répète de manière énergétiquement efficace, en récupérant une partie de l’énergie libérée lors de la condensation et de la compression [40].

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients de la distillation par compression de vapeur.

Avantages	Inconvénients
Efficacité énergétique élevée grâce à la récupération de chaleur latente.	Coût d'investissement initial élevé.
Compacité du système.	Maintenance régulière par personnel qualifié.
Adapté aux installations de petite à moyenne taille.	Sensibilité à la qualité de l'eau, nécessite prétraitement approprié.

II.2.1.4 Congélation

La congélation est une méthode de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres qui exploite le principe selon lequel, lors de la solidification, les cristaux de glace formés sont essentiellement constitués d'eau pure, laissant derrière eux les sels et autres impuretés.

Tableau II.5 : avantages et inconvénients de la congélation.

Avantages	Inconvénients
Énergétiquement plus efficace que les méthodes thermiques.	Mécaniquement complexe.
Réduit les risques d'entartrage.	Investissement initial élevé.
Production une eau de très haute pureté.	Sensible aux conditions climatiques chaudes.

Adaptée aux régions froides où le gel naturel réduit les coûts énergétiques, cette technique est aussi utilisée pour traiter les eaux usées industrielles ou concentrer des jus de fruits, préservant leurs propriétés sensibles à la chaleur grâce à l'absence de traitement thermique [41].

II.2.2 Procédés membranaires

II.2.2.1 Osmose directe et l'osmose inverse

II.2.2.1.1 Osmose Directe

L'osmose directe est un processus membranaire qui utilise une membrane semi-perméable pour concentrer des liquides en exploitant le gradient osmotique naturel entre deux solutions de concentrations différentes. Ce processus se déroule sans pression externe ni chaleur, ce qui préserve les molécules thermosensibles [42-44]. La solution de soutirage, riche en sel ou sucre, attire l'eau du liquide à concentrer grâce à la différence de pression osmotique,

permettant d'atteindre des concentrations élevées, généralement jusqu'à 65% de solides totaux [42-43].

II.2.2.1.2 Osmose Inverse

L'osmose inverse utilise une membrane semi-perméable et une pression élevée pour forcer l'eau à traverser la membrane, éliminant ainsi les sels et impuretés. Ce processus est largement utilisé pour le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

Tableau II.6 : Différences entre Osmose directe et osmose inverse.

Caractéristiques	Osmose Directe (OD)	Osmose Inverse (OI)
Principe	Gradient osmotique naturel, sans pression externe.	Pression élevée pour inverser le flux naturel [45-46].
Avantages	Préservation des molécules thermosensibles, faible coût d'équipement [42-43].	Efficace pour éliminer les sels, largement utilisée [45].
Inconvénients	Nécessite régénération de la solution de soutirage [42-43].	Encrassement des membranes, consommation d'énergie [45].
Applications	Concentration de liquides alimentaires, traitement de l'eau [42-43].	Dessalement de l'eau de mer, traitement industriel [45].

La pression appliquée est supérieure à la pression osmotique, permettant à l'eau de passer du côté concentré vers le côté dilué, produisant ainsi une eau pure [45-50].

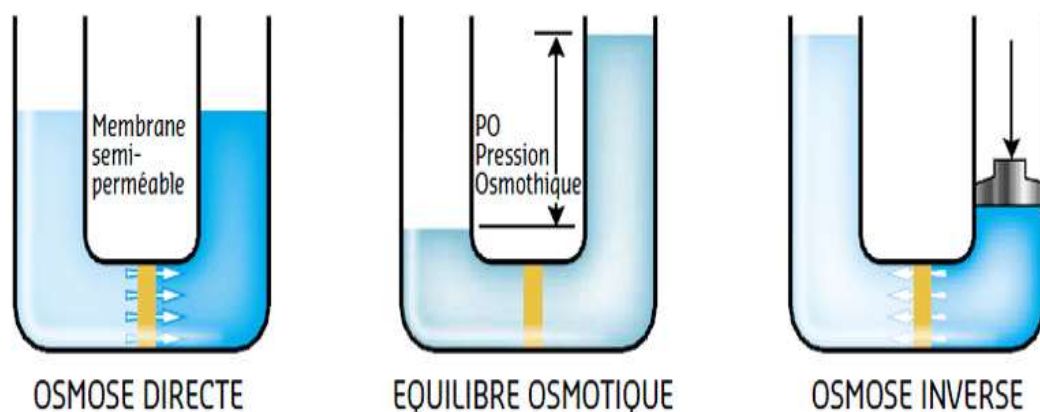


Figure II.3 : Comparaison des processus d'osmose directe et d'osmose inverse.

II.2.2.2 Ultrafiltration (UF) et Nanofiltration

L'ultrafiltration (UF) utilise des membranes (pores 0,01-0,1 µm) fonctionnant sous basse pression pour retenir particules, colloïdes et microorganismes, servant principalement de prétraitement avant osmose inverse ou nanofiltration.

La nanofiltration (NF), plus sélective, opère sous haute pression pour éliminer solutés dissous et petites molécules organiques (200-1000 Dalton), permettant déminéralisation partielle et réduction de turbidité.

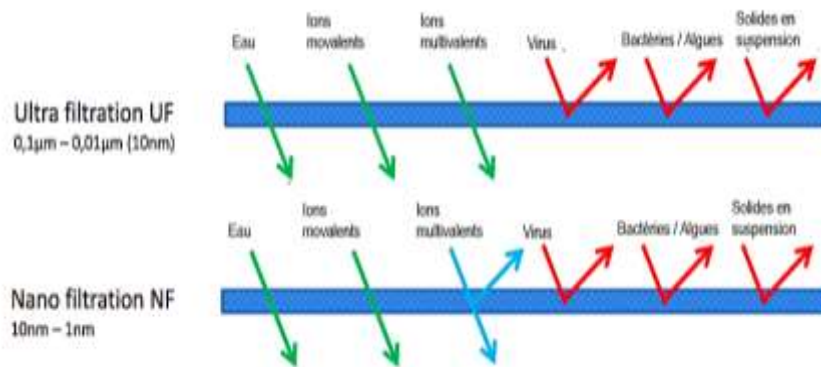


Figure II.4 : Composants rejetés selon la technique de filtration membranaire.

Ces technologies offrent des solutions adaptées à différents besoins en purification d'eau, de l'élimination des matières en suspension (UF) à la séparation moléculaire fine (NF).

Tableau II.7 : comparaison entre UF et NF [51-55].

Caractéristiques	Ultrafiltration (UF)	Nanofiltration (NF)
Taille des pores	0.04 à 0.1 µm	Environ 1 nm
Pression requise	Relativement basse	Plus élevée (minimum 6 bars)
Matériaux des membranes	PVDF, polymers	Composites polyamides
Applications	Prétraitement, élimination des particules en suspension, bactéries	Déminéralisation, réduction de la turbidité, traitement des eaux usées
Avantages	Économique, efficace pour les particules grossières	Meilleure capacité de rejet des sels et contaminants organiques
Inconvénients	Ne peut pas retirer les ions dissous	Coût énergétique plus élevé, risque d'encrassement accru

II.2.2.3 Électrodialyse (ED)

L'électrodialyse est un procédé membranaire utilisant un champ électrique pour transférer sélectivement des ions à travers des membranes échangeuses d'anions et de cations[56-58].

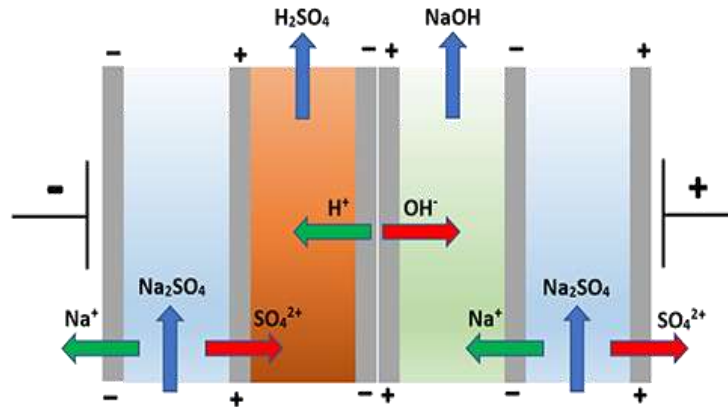


Figure II.5 : Électrodialyse avec membrane bipolaire : production de H₂SO₄ et NaOH.

Ses principales applications incluent le dessalement, l'agroalimentaire et la chimie fine

Tableau II.8 : avantages et inconvénients de le procédé de l'électrodialyse.

Avantages	Inconvénients
Faible impact environnemental.	Nécessite un prétraitement pour éliminer colloïdes et matières organiques.
Déméralisation selective.	Sensibilité au colmatage membranaire.
Adaptée aux solutions à faible salinité.	Coûts énergétiques élevés à haute salinité.
Conversion directe de sels en acides/bases.	Limites techniques (dissociation de l'eau à haute densité de courant).

L'électrodialyse comprend plusieurs types, chacun adapté à des applications spécifiques.

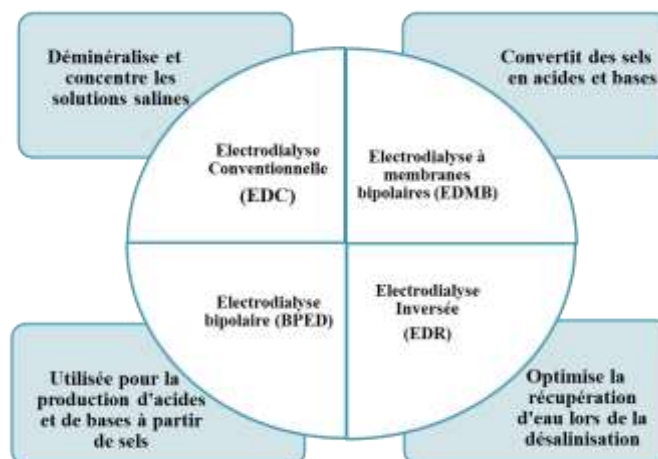


Figure II.6 : Types d'électrodialyse et leurs fonctions dans le Dessalement.

II.2.2.4 Pervaporation

La pervaporation est un procédé membranaire séparant des mélanges liquides par évaporation sélective à travers une membrane. Elle repose sur trois étapes :

- Adsorption des composés,
- Diffusion à travers la membrane,
- Désorption sous forme vapeur

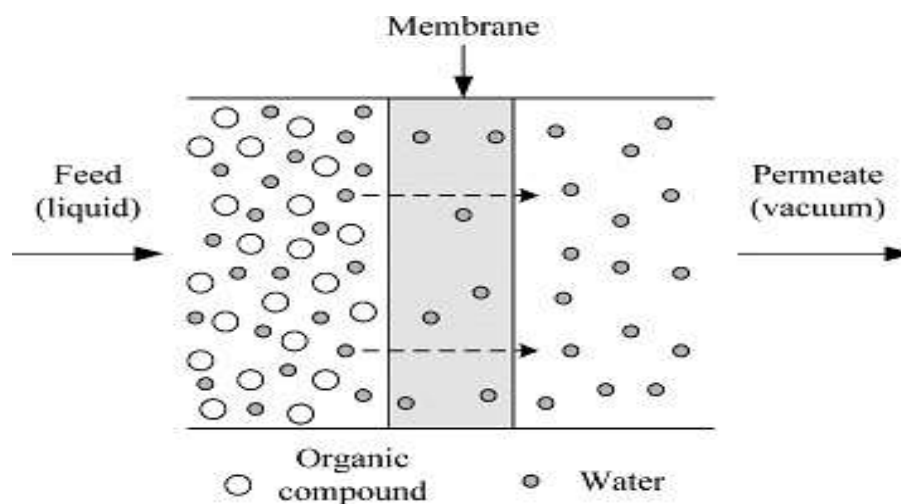


Figure II.7 : Représentation schématique de la perméation membranaire.

Sa sélectivité dépend du matériau membranaire, permettant notamment de briser des azéotropes ou déshydrater des solvants. Plus économe en énergie que la distillation, elle est utilisée en traitement des eaux, chimie et agroalimentaire [59-62].

Tableau II.9 : Avantages et inconvénients de la pervaporation.

Avantages	Inconvénients
Séparation efficace des azéotropes et mélanges complexes.	Coût élevé des membranes perméatives.
Faible consommation énergétique comparée à la distillation.	Colmatage membranaire dû à certains contaminants.
Procédé adapté aux mélanges sensibles à la chaleur.	Nécessite un prétraitement pour éliminer les impuretés.

II.2.3 Autres procédés

II.2.3.1 Echange d'ion

La technique chimique est basée l'échange d'ions qui, par utilisation de résines synthétiques, remplace des ions indésirables contenus dans l'eau par des ions inoffensifs.

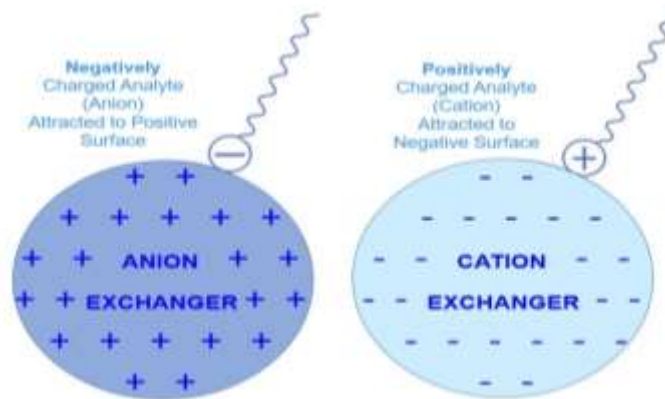


Figure II.8 : Échange d’ions dans le processus de dessalement de l’eau.

Ce procédé est principalement appliqué à l'adoucissement, la déminéralisation totale [63-64].

Tableau II.10 : Avantages et inconvénients de le procédé échange d’ion

Avantages	Inconvénients
Efficace pour les eaux peu salines (< 1 g/l)	Coûts opérationnels élevés
Flexibilité (adaptation à divers ions cibles)	Production de saumure polluante
Qualité d’eau élevée (déminéralisation)	Prétraitement obligatoire
Coûts modérés pour petites installations	Limité aux eaux saumâtres

II.2.3.2 Extraction par solvant

L'extraction liquide-liquide est une méthode de séparation qui utilise un solvant organique non miscible à l'eau pour extraire sélectivement un composé cible (métaux, molécules organiques) en exploitant la différence d'affinité entre les deux phases.

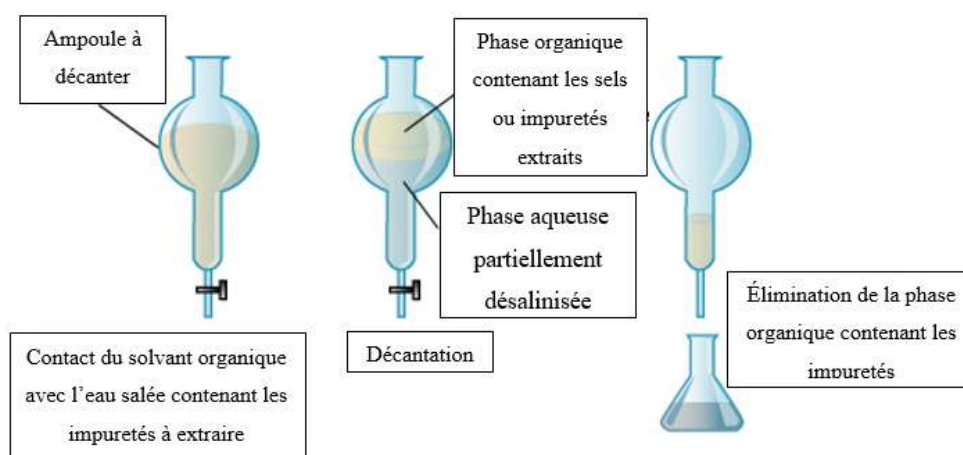


Figure II.9 : Procédé d’extraction liquide-liquide pour la désalinisation.

Le processus repose sur la distribution sélective du composé, suivie d'une séparation physique par décantation. Cette technique est largement employée en hydrométallurgie, traitement des effluents, pharmacie et agroalimentaire [65-67].

Tableau II.11 : Avantages et inconvénients de la procédé extraction par solvants.

Avantages	Inconvénients
Haute sélectivité (adaptée à des composés cibles spécifiques).	Utilisation de solvants toxiques ou polluants (risques environnementaux).
Efficace pour les faibles concentrations.	Processus souvent multi-étapes (coûts énergétiques élevés).
Adaptée à des applications industrielles complexes (ex. métaux rares).	Nécessité de régénérer ou recycler le solvant (complexité technique).
Possibilité de récupérer des produits de haute pureté.	Risque d'émulsions (difficulté de séparation des phases).
Évolutive (de l'échelle laboratoire à industrielle).	Coûts élevés pour la gestion des déchets solvants.

L'ensemble des procédés de désalinisation et de traitement de l'eau de mer, outre les performances relativement satisfaisantes qu'ils affichent, est dominé par la technologie éminente de l'osmose inverse, qui offre la meilleure performance en matière d'efficacité, permettant d'assurer un volume d'eau potable récupérable relativement important, mais également en termes de coûts d'exploitation utilisant très peu l'énergie, grâce à la filtration membrane à haute pression.

II.3 Osmose Inverse

L'osmose inverse (OI) est une technique de séparation membranaire qui inverse ce phénomène naturel en appliquant une pression hydrostatique supérieure à la pression osmotique. Cette pression force l'eau à traverser la membrane semi-perméable dans le sens inverse, permettant ainsi de retenir les solutés dissous (sels, minéraux, contaminants) et d'obtenir de l'eau purifiée. L'OI est largement utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, la purification des eaux polluées et diverses applications industrielles. Ce procédé offre une solution efficace et souvent moins énergivore que la distillation.

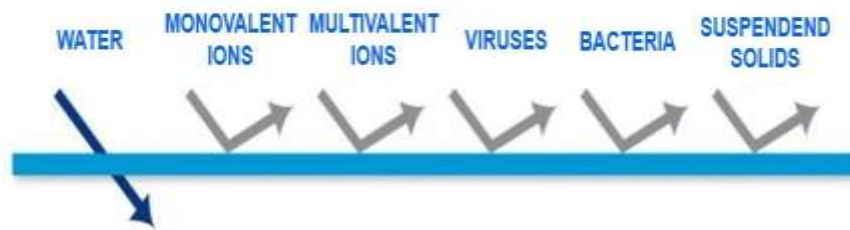


Figure II.10 : Capacité de rétention d'une membrane d'OI selon les contaminants.

II.3.1 Principes fondamentaux de l'osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel où l'eau traverse une membrane semi-perméable du côté le moins concentré en soluté vers le côté le plus concentré, jusqu'à l'équilibre des concentrations. Il consiste à appliquer une pression externe supérieure à la pression osmotique ($\Delta P > \Delta \pi$), forçant l'eau à traverser une membrane semi-perméable tout en retenant les solutés dissous (sels, minéraux, contaminants).

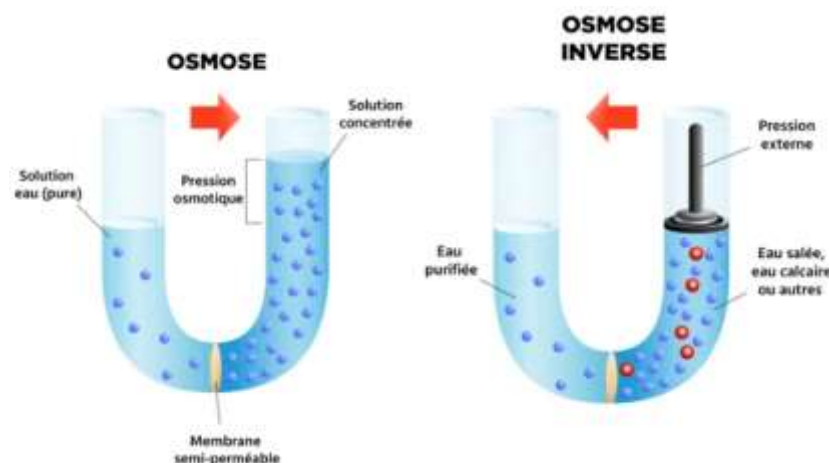


Figure II.11 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse appliqué à la désalinisation.

La performance dépend de la perméabilité de la membrane, de la pression appliquée, de la température et de la nature des solutés. L'OI est utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, le traitement des eaux usées et dans diverses industries comme l'agroalimentaire et pharmaceutique, offrant une solution clé pour la gestion des ressources en eau [68,69].

II.3.2 Description technique d'un système d'osmose inverse

Un système d'osmose inverse comprend généralement une pompe haute pression, des modules de membranes, des vannes, et un système de prétraitement pour protéger les membranes. L'eau est pressurisée et passe à travers les membranes, produisant un perméat (eau

purifiée) et un concentrât (résidus). Les paramètres clés sont la pression de fonctionnement, le débit, la température et la qualité de l'eau d'alimentation.

II.3.3 Membranes d'osmose inverse

Les membranes d'osmose inverse sont généralement composées d'une couche active très fine (0.1 à 1.5 μm) supportée par des couches plus poreuses et résistantes. Elles peuvent être de type anisotrope ou composite, et leurs efficacités dépendent de leurs perméabilités, sélectivités et résistance chimique. La sélectivité est assurée par la capacité de la membrane à dissoudre et à diffuser sélectivement les substances, permettant le passage de l'eau tout en retenant les ions et les molécules plus grosses[70,71].

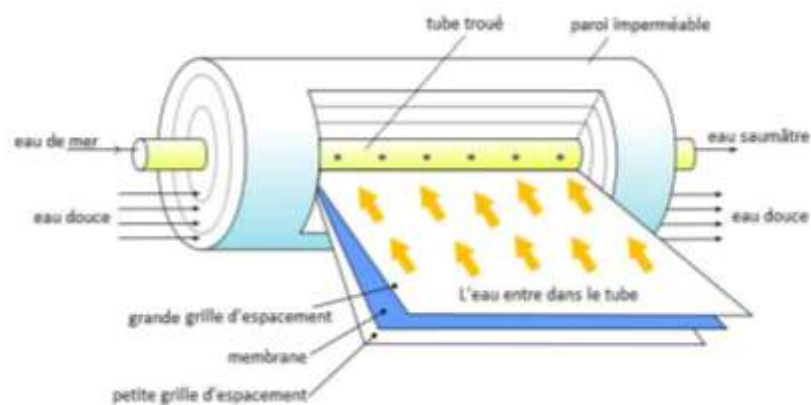


Figure II.12 : Structure interne d'une membrane d'osmose inverse spirale.

II.3.3.1 Matériaux

- Polyamide en couche mince (TFC) : Standard, haute rétention des sels, mais sensible au chlore.
- Cétate de cellulose (CA) : Résiste au chlore, mais présente une efficacité moindre en termes de rétention et une durée de vie limitée.

II.3.3.2 Structures

- Modules spirales : Compact et utilisé dans 90 % des systèmes d'osmose inverse.
- Modules tubulaires : Adaptés aux eaux très chargées en particules ou contaminants.

II.3.3.3 Innovations

- Membranes nanocomposites (graphène, MOFs) : Offrent une perméabilité accrue grâce à l'intégration de matériaux avancés.
- Membranes biomimétiques (aquaporines) : Imitent les canaux biologiques naturels pour améliorer l'efficacité énergétique et la sélectivité.



Figure II.13 : Éléments filtrants pour osmose inverse.

II.3.4 Applications de l'osmose inverse

L'osmose inverse est principalement utilisée pour :

- **Dessalement de l'eau de mer** : Production d'eau potable à grande échelle, représentant environ 60 % des usines mondiales de dessalement [72,73].
- **Traitement des eaux saumâtres** : Utilisation pour l'irrigation et dans diverses industries nécessitant une eau de qualité améliorée [74].
- **Applications industrielles** : Production d'eau ultrapure pour les secteurs de l'électronique et de la pharmacie, Recyclage des eaux usées dans les industries textile et agroalimentaire [75,76].
- **Applications médicales** : Purification de l'eau utilisée pour la dialyse rénale, assurant la sécurité et la qualité pour les patients [77].

II.3.5 Problèmes liés à l'utilisation et les solutions possibles

1. **Colmatage des membranes** : causé par les biofilms (bactéries, algues), les dépôts minéraux (scaling : CaCO_3 , SiO_2) et l'accumulation des particules (matières en suspension comme : argile, oxydes métalliques), réduit l'efficacité (jusqu'à 50 %) et augmente la consommation énergétique. Les solutions incluent un pré-traitement rigoureux (filtration, UV, antitartre) et des membranes innovantes [78].

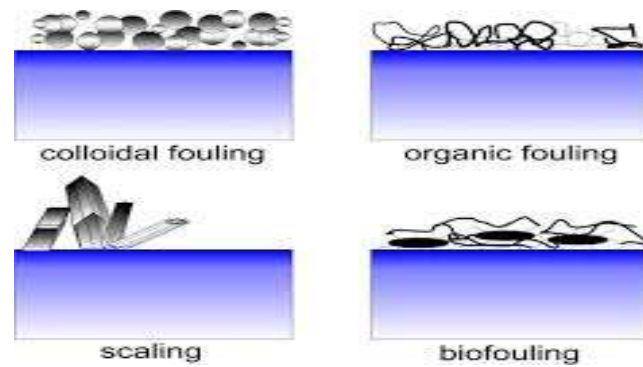


Figure II.14 : Types de colmatage des membranes dans les systèmes de filtration.

2. **Dégradation des membranes** : due au chlore (oxydation chimique), aux pH extrêmes (Hydrolyse des membranes en cas de $\text{pH} < 3$ ou > 10) ou à l'abrasion, entraîne des remplacements fréquents. Pour y remédier, on utilise la déchloration (charbon actif), des membranes résistantes (acétate de cellulose) et un contrôle du pH [79].
3. **Coûts élevés** : investissement initial, énergie, maintenance, sont atténués par des technologies comme les systèmes de récupération d'énergie, les membranes haute perméabilité et l'intégration d'énergies renouvelables.
4. **Gestion de la saumure** : polluante pour les écosystèmes marins, se modernise via la valorisation (production de sel) et les technologies ZLD (Zero Liquid Discharge : Évaporation sous vide, cristalliseurs), malgré leur coût.

II.3.6 Avantages et limites de la technique

Tableau II.12 : Avantages et limites de le procédé de l'osmose inverse.

Avantages	Inconvénients
Faible consommation énergétique comparée à la distillation (4-5 kWh/m ³ contre 15 kWh/m ³).	Colmatage des membranes par les matières organiques, les minéraux et les micro-organismes.
Capacité à produire de grandes quantités d'eau potable.	Rejets de concentrats et de produits chimiques (antitartres, agents de nettoyage) pouvant impacter l'environnement.
Amélioration continue des membranes et des systèmes de récupération d'énergie.	Coût initial élevé et nécessité d'un prétraitement rigoureux.

II.4 Conclusion

Face aux défis croissants liés à la rareté de l'eau douce, le dessalement s'impose comme une solution stratégique pour répondre aux besoins humains. Divers procédés sont employés, notamment les techniques thermiques (distillations MSF, DME, VC, congélation) et les procédés membranaires (osmose inverse, ultrafiltration, nanofiltration, électrodialyse, pervaporation). Chacun présente des avantages spécifiques selon le contexte d'utilisation. L'osmose inverse, en particulier, domine le secteur grâce à son efficacité, sa faible consommation énergétique et sa large applicabilité. Des limites existent toutefois, telles que le colmatage des membranes ou la gestion des rejets, nécessitant des optimisations techniques et environnementales.

Chapitre III :

Méthodologie et dispositif expérimental

III.1 Introduction

La disponibilité en eau potable représente aujourd'hui un défi majeur pour de nombreuses régions à climat semi-aride, comme c'est le cas en Algérie. Face à la diminution des ressources naturelles renouvelables et à la variabilité climatique, les autorités ont opté pour le recours aux eaux non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer. Ce choix s'inscrit dans une stratégie nationale visant à diversifier les sources d'approvisionnement et à sécuriser l'accès à l'eau pour la population et les secteurs économiques.

Parmi les projets réalisés dans ce cadre figure la station de dessalement « Chahid Mohamed Amirat » d'El-Marsa, située dans la wilaya de Skikda, a été mise en service le 19 mars 2023 pour répondre aux besoins en eau potable de la commune d'El Marsa et de ses environs. Elle utilise la technique d'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer.

III.2 Localisation de la station

Le site de la station de dessalement d'eau de mer d'El Marsa est localisé dans la commune d'El Marsa, à environ 60 km à l'est du chef-lieu de wilaya, à l'extrême ouest de la wilaya de Skikda, dans la région de Rémila. Cette région est caractérisée par un relief côtier accessible, avec une ouverture directe sur la mer Méditerranée, ce qui en fait un emplacement stratégique pour le captage d'eau de mer [80].



Figure III.1 : Vue d'enter de la station de dessalement d'eau de mer – La Marsa.

Le projet a nécessité un investissement de 1.6 milliard de dinars algériens, auquel s'ajoutent 170 millions de dinars pour le raccordement aux châteaux d'eau.

La station s'étend sur une superficie d'environ 4 hectares. Elle est la deuxième station de dessalement de la wilaya de Skikda, après celle de la zone industrielle, qui a une capacité de 100 000 m³/jour [80].

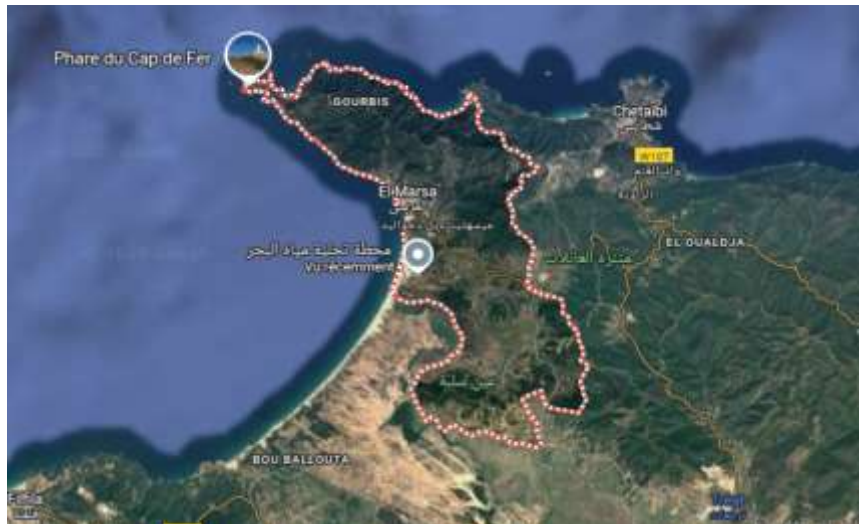


Figure III.2 : Localisation de la zone d'El-Marsa.

III.3 Capacité de la station

La station de dessalement d'El-Marsa a une capacité de 5000 m³/jour, soit 1.825 millions de m³ par an, permettant de couvrir les besoins en eau potable de plus de 250 000 habitants. Cette capacité peut être étendue en cas d'augmentation de la demande.

Cependant, à sa mise en service, elle a fonctionné à environ 50 % de sa capacité, soit 2500 m³/jour, avant de passer progressivement à son plein régime [80,81].

III.4 Installation et processus

Les différentes installations de la station de dessalement d'El-Marsa sont :

1. Prise d'eau de mer (captage) ;
2. Poste de prétraitement ;
3. Unité d'Osmose inverse ;
4. Poste de traitement et reminéralisation ;
5. Laboratoire d'analyse ;
6. Salle de contrôle de système ;

III.4.1 Étapes de dessalement

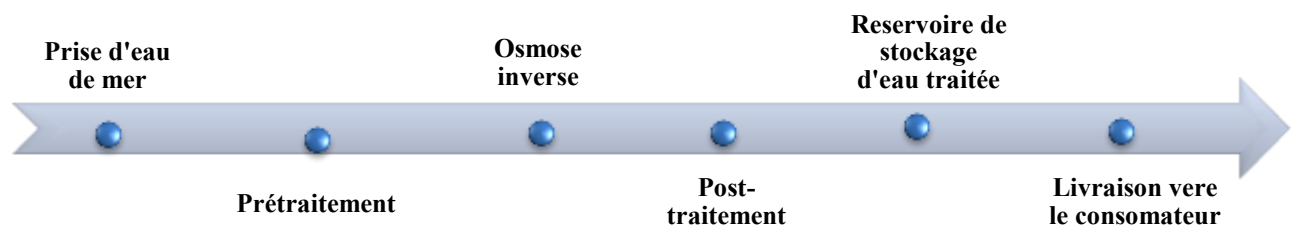


Figure III.3 : Schéma représente les étapes de dessalement.

III.4.2 Description détaillée de la station

La station de dessalement d'El Marsa est dotée d'un système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) assurant la supervision en temps réel de toutes les étapes du traitement, du captage d'eau de mer jusqu'au post-traitement. Il permet le contrôle automatique des équipements, la collecte et l'enregistrement des données (pression, débit, conductivité, etc.), la gestion des alarmes et l'aide à la maintenance. Le système repose sur des automates programmables interconnectés via un réseau industriel, offrant fiabilité, traçabilité et efficacité opérationnelle [81].

III.4.2.1 Prise d'eau de mer

La prise d'eau de mer constitue la première étape essentielle dans le procédé de dessalement. Elle assure l'acheminement de l'eau brute (eau de mer) depuis la source naturelle jusqu'à la station de traitement. Sa conception doit garantir un débit suffisant, une protection contre les impuretés marines (sable, algues, organismes), et un fonctionnement continu et sûr.

III.4.2.1.1 Système de pompage

- **Nombre de pompes** : 2 pompes électromécaniques.
- **Mode de fonctionnement** : En alternance (pompage en parallèle, une en service, l'autre en secours).

Ceci permet d'assurer une continuité de service et une maintenance sans interruption.

- **Débit unitaire** : 500 m³/h par pompe.
- **Débit total disponible** : 500 m³/h (une seule pompe fonctionne à la fois, l'autre en veille).
- **Type de pompe** : Pompe centrifuge immergée ou en surface (non précisé, mais généralement en surface pour dessalement côtier).

- **La conduite d'alimentation** : d'une longueur de 1 km entre la source et la bache à eau, permet le transport de l'eau de mer par écoulement gravitaire sur toute la distance (ce qui permet de réduire la consommation énergétique, la maintenance mécanique et les risques liés aux coupures électriques).
- **Matériau de la conduite** : PEHD (polyéthylène haute densité).
- **Diamètre estimé de la conduite** : DN 400, classée PN16, adaptée au transport sous pression jusqu'à 16 bars.

III.4.2.1.2 Sécurité et protection

Pour garantir la sécurité du système, plusieurs dispositifs sont mis en place :

- Grillage antidébris ou crépine à l'entrée marine pour empêcher l'intrusion d'algues, poissons ou sable.
- Surveillance continue du débit, pression et état des pompes (contrôle local).

III.4.2.2 Prétraitement

III.4.2.2.1 Chambre des vannes

Espace central regroupant les équipements de régulation et de traitement, permettant le contrôle et la distribution des flux d'eau (figure III.4).



Figure III.4 : Chambre des vannes de la station.

Injection des réactifs

1. **Injection d'hypochlorite de sodium (javel)** : Utilisée pour la désinfection de l'eau et la prévention de la prolifération biologique.
2. **Injection de polymère** : Composée d'une pompe doseuse et d'un mélangeur statique pour favoriser la coagulation et la floculation.
3. **Injection de chlorure ferrique (FeCl₃)** : Réalisée à l'aide d'une pompe doseuse et d'un mélangeur statique, servant à la coagulation des matières en suspension.

4. **Fortueuse (ou orifice de rinçage)** : Utilisée pour le nettoyage ou la purge localisée de la conduite.
5. **Vanne de vidange de conduite** : Permet l'évacuation complète de l'eau résiduelle dans la canalisation pour entretien ou arrêt.
6. **Débitmètre** : Instrument de mesure en ligne utilisé pour contrôler en temps réel le débit de l'eau traitée.

III.4.2.2.2 Décantation

L'étape de décantation constitue une phase essentielle du prétraitement de l'eau de mer. Elle est réalisée à l'aide d'un décanteur lamellaire, conçu pour améliorer l'efficacité de la séparation des matières en suspension grâce à l'inclinaison des plaques lamellaires qui favorisent la sédimentation gravitaire (figure III.5).



Figure III.5 : Lits de décantation lamellaire.

Pour éviter l'accumulation et la compaction des sédiments lourds, un racleur rotatif est installé au fond du décanteur. Celui-ci permet de maintenir un mouvement lent et continu du mélange eau-produits chimiques, empêchant ainsi la formation de dépôts solides indésirables.

La sortie du décanteur est divisée en deux voies :

- Une première partie est dirigée vers les lits de séchage pour le traitement des boues récupérées, à l'aide de pompes à boue dédiées.
- Une seconde partie constitue l'eau clarifiée, qui est stockée dans un réservoir tampon.

Avant d'être transférée vers les étapes de filtration, l'eau clarifiée passe par un turbidimètre en ligne, assurant un contrôle de la qualité (turbidité < 1 NTU selon les normes OMS).

Le transfert vers l'étape suivante est assuré par trois pompes d'alimentation (configuration 2+1), permettant une opération en redondance (deux en fonctionnement, une en secours).

III.4.2.2.3 Filtration sur sable

L'eau clarifiée provenant du décanteur est dirigée vers une batterie de 8 filtres à sable fonctionnant en parallèle (figure III.6). Chaque filtre a un volume de 14 m³ et est constitué de trois couches granulométriques superposées :

- Une couche de sable grossier ;
- Une couche de sable moyen ;
- Une couche de sable fin ;



Figure III.6 : Filtre sur sable.

Ce système multicouche assure une filtration efficace des particules, ne laissant passer que les molécules inférieures à 20 µm. Pour protéger les filtres de la corrosion, des plaques sacrificielles en aluminium sont intégrées dans la structure interne.

Lorsque la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un filtre dépasse 1.5 bar, un cycle de lavage est automatiquement déclenché pour restaurer la performance du filtre. Ce cycle suit les étapes suivantes :

1. **Repos (mise en sécurité) :** 1 minute,
2. **Vidange :** 1.5 minutes,
3. **Lavage à l'air (par surpresseur) :** 5 minutes,
4. **Désaération :** 1 minute,
5. **Lavage à l'eau (eau filtrée) :** 5 minutes,
6. **Remise en filtration:** 25 minutes.

L'eau utilisée pour le lavage provient d'un réservoir dédié d'eau filtrée. Le système est également équipé de deux compresseurs destinés à l'ouverture automatique des vannes pneumatiques, assurant un fonctionnement fluide et automatisé du lavage.

III.4.2.2.4 Microfiltration

Après la filtration sur sable, l'eau prétraitée subit une étape de microfiltration destinée à éliminer les particules résiduelles fines. Le système comprend 4 filtres (figure III.7.a), chacun équipé de 70 cartouches de membranes de type fibre creuse (figure III.7.b), un matériau performant pour la rétention des particules en suspension.

Caractéristiques techniques

- **Débit de production par filtre** : 117 m³/h,
- **Débit total de l'étape de microfiltration** : environ 470 m³/h,
- **Seuil de coupure des membranes** : < 4 μm, permettant de retenir les fines particules, les micro-algues, et certaines bactéries.

Ce système assure une protection essentielle des membranes d'osmose inverse situées en aval, en garantissant une qualité d'eau supérieure avec une faible turbidité. Grâce à leur structure en fibres creuses, les cartouches présentent une surface de filtration élevée et une efficacité durable.

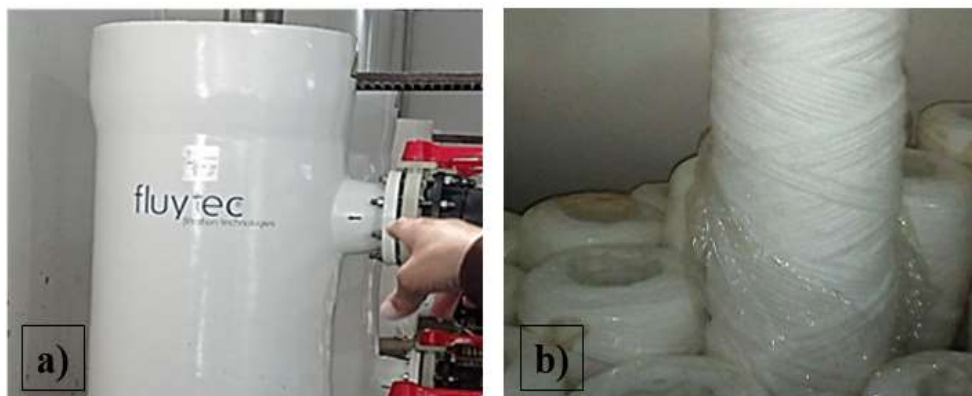


Figure III.7 : a) Cartouche de filtration, b) : Membrane de microfiltration.

III.4.2.3 Osmose inverse

Avant d'entrer dans le procédé d'osmose inverse (OI), une injection d'anti scalant est effectuée afin de prévenir l'entartrage des membranes par les sels dissous. Cette étape est cruciale pour assurer le bon fonctionnement et la longévité des membranes.

III.4.2.3.1 Configuration technique

- Nombre de racks d'osmose inverse : 2.
- Chaque rack comprend :
 - 2 vannes manuelles d'entrée,
 - 1 pompe booster,
 - 1 pompe haute pression (~70 bars),
 - 1 échangeur de récupération d'énergie (de type IRI),
 - 27 modules, chacun contenant 7 membranes spirales,
 - Capteurs de pression et manomètres manuels,
 - Débitmètre en ligne,
 - En sortie : un conductimètre et un pH-mètre pour contrôler la qualité de perméat.

Paramètres de contrôle

L'eau produite (perméat) doit respecter des seuils stricts de conductivité et de pH, indiquant une bonne rétention des sels minéraux.



Figure III.8 : Modules de membranes d'osmose inverse.

III.4.2.3.2 Système de nettoyage (CIP - Clean In Place)

Lorsque la différence de pression entre l'entrée et la sortie dépasse 1.5 bar, un lavage des membranes est nécessaire :

1. Lavage basique avec NaOH (neutralisation du pH et élimination des matières organiques),
2. Lavage acide avec acide citrique (détartrage),
3. Préservation des membranes en cas d'arrêt prolongé (> 6 mois) ou après une injection accidentelle de chlore en amont : injection de bisulfite de sodium (SMBS) dilué dans de l'eau déminéralisée.

III.4.2.4 Post-traitement (eau traitée)

À la sortie du système d'osmose inverse, l'eau osmosée est divisée en deux flux : 48% sont dirigés directement vers le réservoir de stockage de l'eau traitée, tandis que les 52% restants subissent un processus de reminéralisation.

Avant cette reminéralisation, une injection d'acide sulfurique (H_2SO_4) et de CO_2 est réalisée afin d'ajuster le pH et faciliter la dissolution du calcaire. L'eau passe ensuite à travers des lits de calcite (figure III.9.a) constitués de roches riches en carbonate de calcium ($CaCO_3$) (figure III.9.b), ce qui permet de rééquilibrer sa composition minérale et de prévenir la corrosion dans les canalisations.

L'eau reminéralisée est ensuite mélangée avec la partie précédemment dérivée vers le réservoir. En sortie de réservoir, une injection de chlore est effectuée à une concentration de 0.63 ppm pour assurer une désinfection finale.

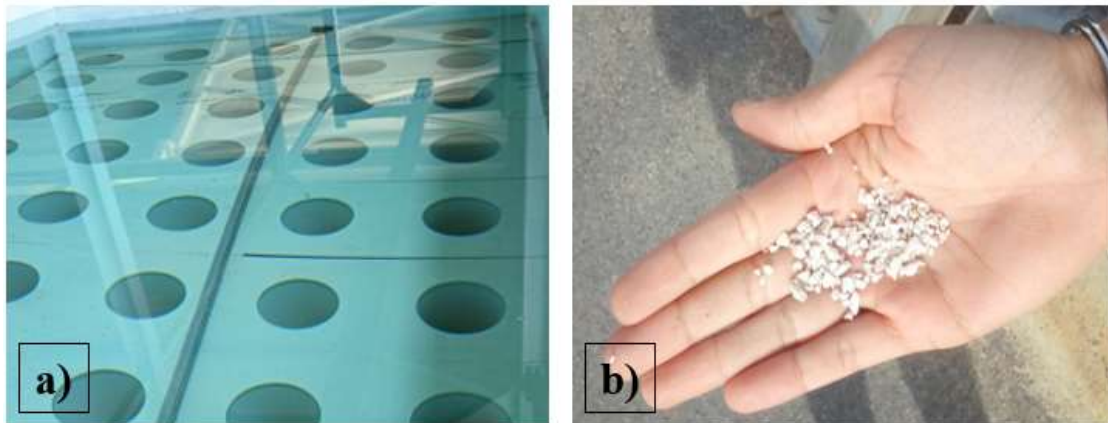


Figure III.9 : a) : Lit de Calcite, b) : Roches de carbonate de calcium.

Un système d'aspiration est intégré pour réguler la pression, suivi de deux pompes d'eau traitée qui refoulent l'eau vers le château d'eau, garantissant ainsi l'alimentation du réseau de distribution.

III.5 Plan d'échantillonnage au cours du processus de dessalement

Afin de suivre l'évolution de la qualité de l'eau tout au long du processus de dessalement de la station d'El Marsa (Skikda), un plan d'échantillonnage a été élaboré. Il consiste à effectuer des prélèvements d'échantillons aux différentes étapes clés du processus de dessalement, comme représenté dans le schéma (figure III.10). Ces points d'échantillonnage permettent d'évaluer l'efficacité de chaque étape du procédé, de montrer l'utilité des différents procédés dans la chaîne de dessalement, d'identifier d'éventuelles anomalies, et de garantir le respect des normes de qualité de l'eau.

Les points de prélèvement sont localisés comme suit :

- **Point 01** : Après la prise d'eau de mer – pour connaître les caractéristiques brutes de l'eau marine.
- **Point 02** : Après la décantation – pour évaluer l'efficacité de la séparation des matières en suspension.
- **Point 03** : Après la filtration sur sable – pour vérifier la qualité de l'eau filtrée mécaniquement.
- **Point 04** : Après la microfiltration – pour contrôler l'élimination des particules fines.
- **Point 05** : Après l'osmose inverse – pour mesurer la performance de déminéralisation.
- **Point 06** : Après le post-traitement – pour vérifier la qualité finale de l'eau produite avant distribution.

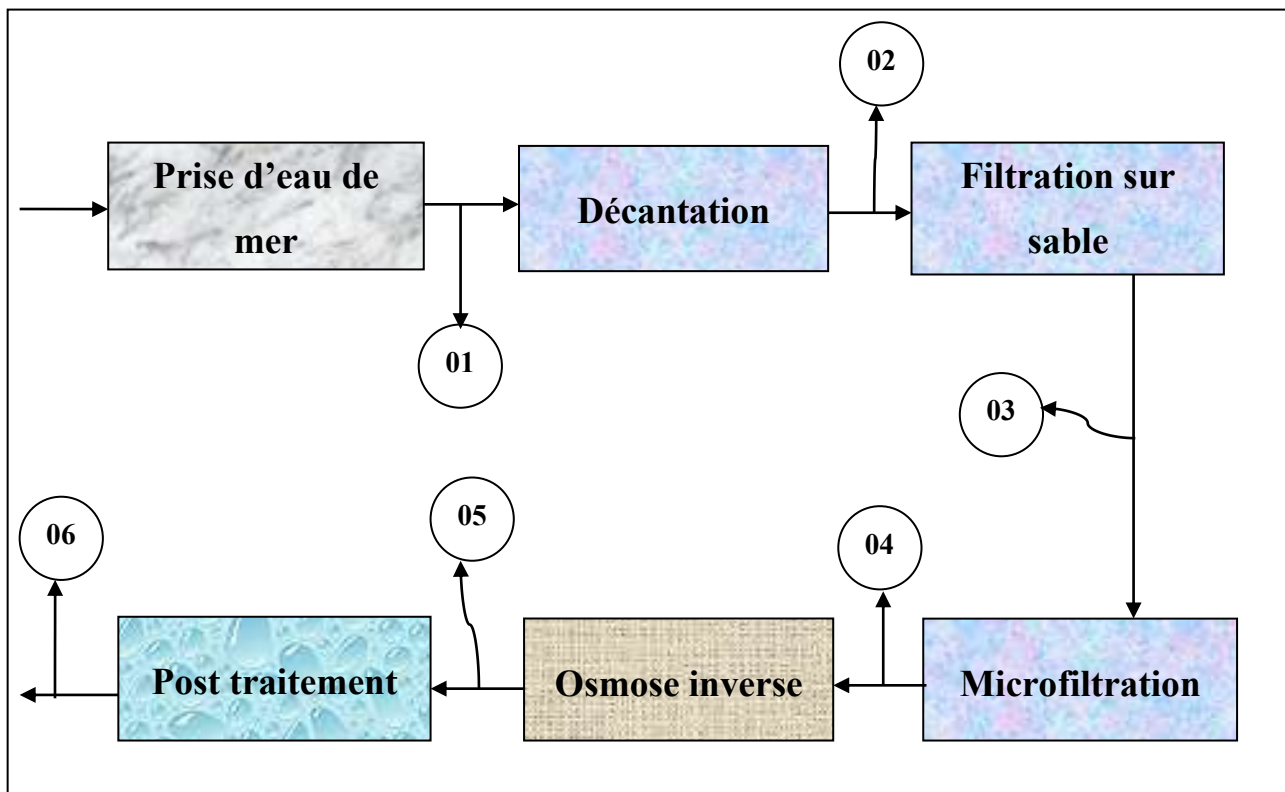


Figure III.10 : Schéma d'échantillonnage des différentes étapes du procédé de dessalement par osmose inverse à la station d'El Marsa.

III.6 Méthodologies d'analyse

Étant donné la composition physico-chimique des eaux après chaque étape de processus de dessalement de la station de dessalement d'EL Marsa, tous les paramètres ciblés par le contrôle après l'arrivée d'eau à la station, après chaque procédé de prétraitement (décantation, filtration sur sable et microfiltration), après le passage d'eau par les osmoseurs (osmose

inverse) et après post-traitement, ont été analysés au laboratoire dans les plus brefs délais en accord avec les règles de conservation et méthodes d'analyses normalisées [82,83].

Le pH a été analysé à l'aide d'un pH-mètre (**HACH sens ion 3**), la turbidité par un turbidimètre (**HACH TL2300**), la conductivité par un conductimètre (**HACH HQ14d**).

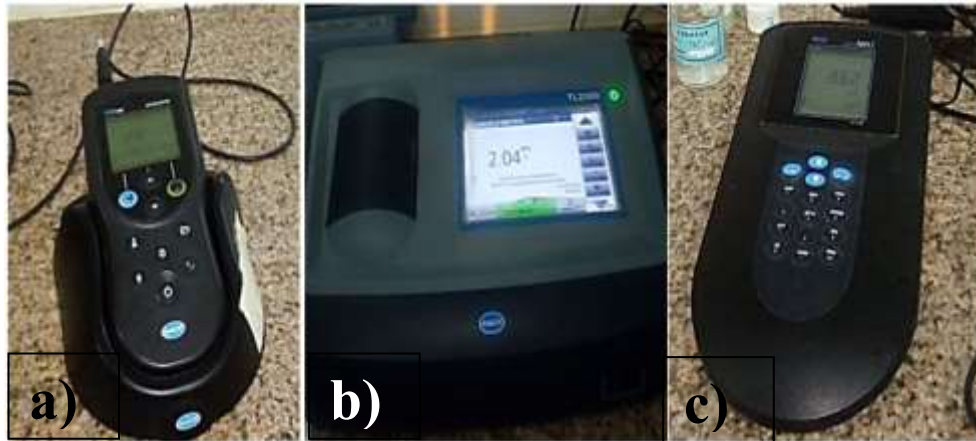


Figure III.11 : a) conductimètre, b) turbidimètres, c) pH-mètre.

III.6.1 Ammonium (NH_4^+)

La concentration en ammonium a été mesurée directement à l'aide d'un appareil d'analyse multiéléments **HACH SL1000**, après filtration préalable sur membrane $0.45 \mu\text{m}$ si nécessaire, sans traitement chimique supplémentaire.

III.6.2 Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates ont été analysés directement par l'appareil multiéléments **HACH SL1000**, après filtration simple, sans réaction chimique préalable.



Figure III.12 : appareil multi éléments et deux sondes (NH_4^+ , NO_3^-).

III.6.3 Bicarbonate (HCO_3^-)

Les ions bicarbonate ont été calculés à partir de l'alcalinité totale (TAC) selon une relation standard pour eaux naturelles :

Si le TAC est en meq/l,

$$[\text{HCO}_3^-] = \text{TAC} \times 61 \text{ (mg/l)} ;$$

Si le TAC est en mg/l de CaCO_3 ,

$$[\text{HCO}_3^-] = \text{TAC} \times 1,22 \text{ (mg/l)},$$

Où 61 est le poids équivalent du HCO_3^- .

III.6.4 Calcium (Ca^{2+})

L'analyse du calcium a été réalisée par titrage complexométrique à l'EDTA (acide éthylène diamine tétra acétique) en milieu basique, utilisant une solution titrante d'EDTA 10^{-2} mol/L et l'indicateur Noir Ériochrome T.

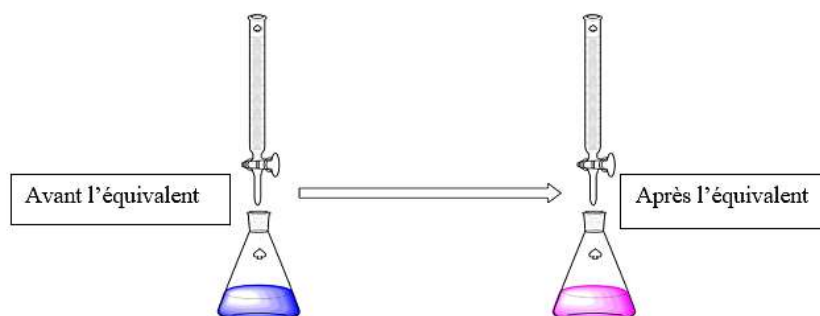


Figure III.13 : Fioles présentant des variations de couleur en présence d'ions calcium.

III.6.5 Magnésium (Mg^{2+})

La concentration en magnésium a été déduite indirectement de la dureté totale (TH) et du calcium via la relation :

$$[\text{Mg}^{2+}] = \text{TH} - [\text{Ca}^{2+}] \text{ (en meq/L)},$$

Le titre hydrotimétrique (TH) de l'eau est déterminé par un titrage complexométrique à l'EDTA. Le point d'équivalence est identifié par un changement de couleur, indiquant la fin de la réaction entre l'EDTA et les ions calcium/magnésium présents dans l'échantillon.

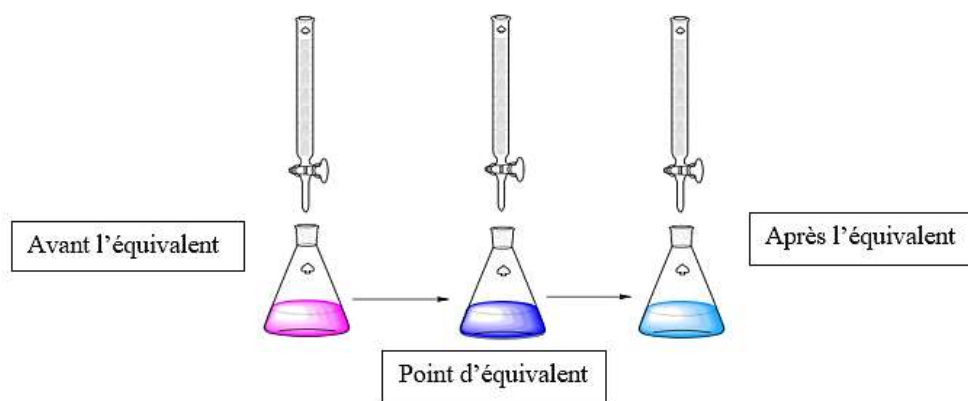


Figure III.14 : Fioles présentant des variations de couleur en présence de TH.

III.6.6 Chlorure (Cl^-)

Les ions chlorure ont été dosés par titrage argentométrique (méthode de Mohr), avec AgNO_3 (nitrate d'argent) comme titrant et K_2CrO_4 (chromate de potassium) comme indicateur, formant un précipité rouge-brique de Ag_2CrO_4 au point d'équivalence.

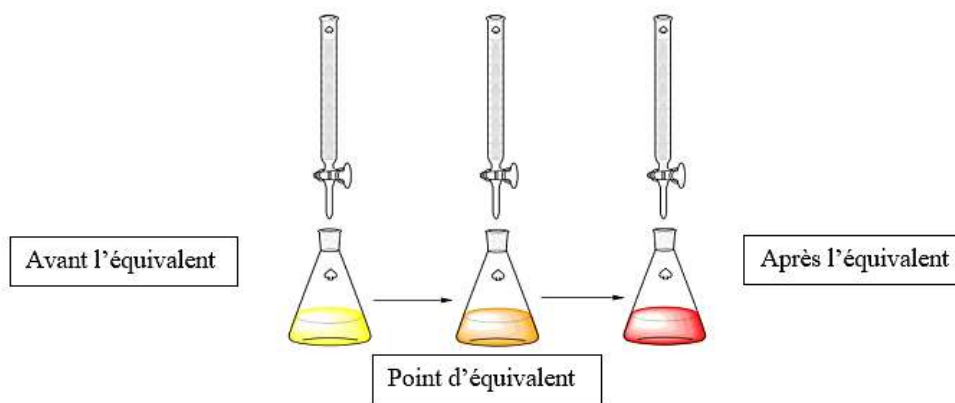


Figure III.15 : Fioles présentant des variations de couleur en présence d'ions chlorure.

III.6.7 Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites ont été quantifiés par spectrophotométrie via une méthode colorimétrique spécifique, mesurant l'absorbance du complexe coloré formé.

Soit $C_{\text{NO}_2^-}$ la concentration en ion nitrite (NO_2^-) en mol/l.

Si $C_{\text{NO}_2^-} > 0.02 \Rightarrow$ couleur rose

Si $C_{\text{NO}_2^-} \leq 0.02 \Rightarrow$ couleur transparente



Figure III.16 : Fiole présentant une coloration rose en présence de NO_2^- .

III.6.8 Phosphates (PO_4^{3-})

Les phosphates ont été quantifiés par spectrophotométrie selon une méthode colorimétrique. L'absorbance du complexe est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre HACH DR 6000.



Figure III.17 : Spectrophotomètre HACH DR 6000.

III.6.9 Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates ont été quantifiés par spectrophotométrie selon une méthode turbidimétrique. L'absorbance de la turbidité ainsi générée a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre HACH DR 6000.

III.6.10 Sodium (Na^+)

La concentration en sodium a été estimée indirectement par bilan ionique, en supposant l'électroneutralité de la solution ($\sum \text{anions} = \sum \text{cations}$). Ainsi, la concentration de Na^+ a été calculée comme suit :

$$[\text{Na}^+] = \sum \text{anions} - \sum \text{cations (hors Na}^+)$$

III.6.11 Salinité et TDS

La **salinité (g/L)** a été estimée à partir de la conductivité électrique (CE) via

$$\text{Salinité} = \frac{(a \times CE)}{1000} \text{ (CE en } \mu\text{S/cm)},$$

A est un coefficient empirique ($a \approx 0.5-0.7$).

Tandis que le **TDS (mg/l)** a été calculé par :

$$\text{TDS} = k \times CE \text{ (}\mu\text{S/cm)},$$

Avec $k \approx 0.5 - 0.7$.

III.7 Conclusion

La station de dessalement d'El Marsa, située à Skikda, constitue une réponse technologique moderne à la pénurie d'eau en zone côtière semi-aride. Fonctionnant par osmose inverse, elle dispose d'un système de traitement complet comprenant le captage, le prétraitement (décantation, filtration, microfiltration), le dessalement, la reminéralisation et la désinfection. Grâce au système SCADA, l'automatisation et le contrôle de l'ensemble du processus sont assurés en temps réel. Un plan d'échantillonnage rigoureux et des méthodes d'analyse physico-chimiques et microbiologiques garantissent une qualité d'eau conforme aux normes de potabilité.

Chapitre IV : Analyses et interprétation des résultats.

IV.1 Introduction

Étant donné la composition physicochimique des eaux après chaque étape de processus de dessalement des eaux de la station d'EL MARSA, Les différents procédés de la chaîne de dessalement sont, les prétraitements (coagulation floculation, décantation, filtration sur sable et la microfiltration), procédé de dessalement d'osmose inverse et post-traitement. Pour mieux évaluer la qualité de l'eau dans les différents points de prélèvements, nous avons opté pour suivi régulièrement quelques paramètres physiques et chimiques tels que : pH, conductivité, température, TDS, salinité, turbidité, ions chlorures, ions calcium, ions magnésium, ions ammonium, nitrates, nitrites et phosphates. L'analyse de la composition physico-chimique de l'eau après chaque étape du processus de dessalement met en évidence l'importance cruciale de chaque phase dans l'élimination progressive des éléments chimiques et impuretés [84].

Effectivement, chaque phase, que ce soit les prétraitements, l'osmose inverse ou le post-traitement, joue un rôle spécifique et complémentaire dans l'amélioration de la qualité de l'eau, en diminuant successivement la turbidité, la salinité, les composés organiques, les ions dissous et les micro-organismes. Non seulement cette progression graduelle des paramètres physico-chimiques met en évidence l'efficacité du processus global, mais elle souligne aussi l'importance d'une conception minutieuse et bien ordonnée du système de dessalement.

IV.2 Caractérisation de l'eau de mer

Les eaux naturelles qu'elles soient superficielles ou souterraines, contiennent des matières polluantes diverses de par leurs natures physique et chimique. De ce fait, la caractérisation des eaux de mer constitue une étape essentielle dans la conception et l'optimisation des procédés de dessalement. Elle s'appuie sur l'analyse de divers paramètres physico-chimiques tels que le pH, la température, la salinité, la conductivité électrique, la turbidité, ainsi que la concentration en ions majeurs tels que : les chlorures, calcium, potassium, sodium, magnésium, sulfate) et en matières organiques.

Le tableau IV.1 présente les résultats de caractérisation de l'eau de mer au niveau de la station de dessalement d'EL MARSA.

Tableau IV.1 : Caractéristiques de l'eau de mer.

Paramètre / Élément	Valeur / Concentration
Température	22 °C
Turbidité	5.16
pH	8.7
Conductivité	57 mS/cm
TDS	28.5 g/l
Salinité	28.5 g/l
Chlorure	22900 mg/l
Calcium	1200 mg/l
Magnésium	2560 mg/l
Ammonium	29.6 mg/l
Bicarbonate	1480 mg/l
Nitrate	1.2 mg/l
Nitrite	0.04 mg/l
Phosphate	0.35 mg/l
Sulfate	1600 mg/l
Sodium	16200 mg/l

Les résultats de la caractérisation physico-chimique de l'eau de mer prélevée dans la région d'EL MARSА de la wilaya de SKIKDA révèlent une composition comparable à celle des eaux typiques de la mer méditerranée. Le niveau de salinité est de 28.5 g/l les concentrations en ions majeurs tels que le sodium, le chlorure, le magnésium et le calcium sont consécutivement égale à 16.2 g/l, 22.9g/l, 2560 mg/l, 1200 mg/l, le pH est autour 8.7 et 57 ms/cm pour la conductivité électrique, toutes ces valeurs s'inscrivent dans les plages couramment observées dans le bassin méditerranéen. Cette similarité suggère une stabilité relative des caractéristiques marines régionales et ouvre la voie à l'usage de techniques de dessalement déjà testées dans d'autres régions méditerranéennes, tout en prenant en considération les possibles fluctuations saisonnières ou locales.

Une bonne compréhension de ces caractéristiques permet d'adapter les prétraitements, de prévoir l'encrassement potentiel des membranes, d'évaluer la corrosion des équipements, et d'assurer ainsi l'efficacité et la durabilité du système de dessalement. Une connaissance

détaillée et approfondie de la qualité de l'eau de mer est donc une étape essentielle pour tout projet de dessalement ou de valorisation de cette ressource [85].

IV.3 Évolution des paramètres de contrôle après traitement

IV.3.1 Résultats de mesure de pH, conductivité et la température

Cette partie d'étude vise à suivre l'évolution du pH, de la conductivité électrique et de la température pendant le processus de dessalement. Ainsi, pour évaluer la variation du pH, de la conductivité et de la température, cinq séries d'analyse ont été effectuées dans la période de 18 mars au 05 mai, dans chaque série, il y a six points de prélèvement, ces prélèvements ont été prises après chaque étape de dessalement. Les analyses effectuées sur l'échantillon d'eau de mer ont permis de mesurer des paramètres physico-chimiques essentiels à la compréhension de sa qualité et de son comportement dans un procédé de dessalement. Le pH mesuré se situe dans une plage légèrement basique, typique des eaux marines, généralement comprise entre 7.4 et 8.8 sur toute la durée contrôlée (figure IV.1). Ces valeurs reflètent l'équilibre naturel entre les espèces carbonatées présentes dans l'eau de mer (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}), la nature des espèces hydroxylées formés et joue un rôle important dans la solubilité des sels ainsi que dans la prévention de la corrosion des matériaux en contact avec l'eau. Les procédés de prétraitement et d'osmose inverse exercent une influence modérée sur le pH de l'eau, en raison des réactions chimiques mises en œuvre pour préparer l'eau d'alimentation et de la caractéristique intrinsèque du procédé à membrane.

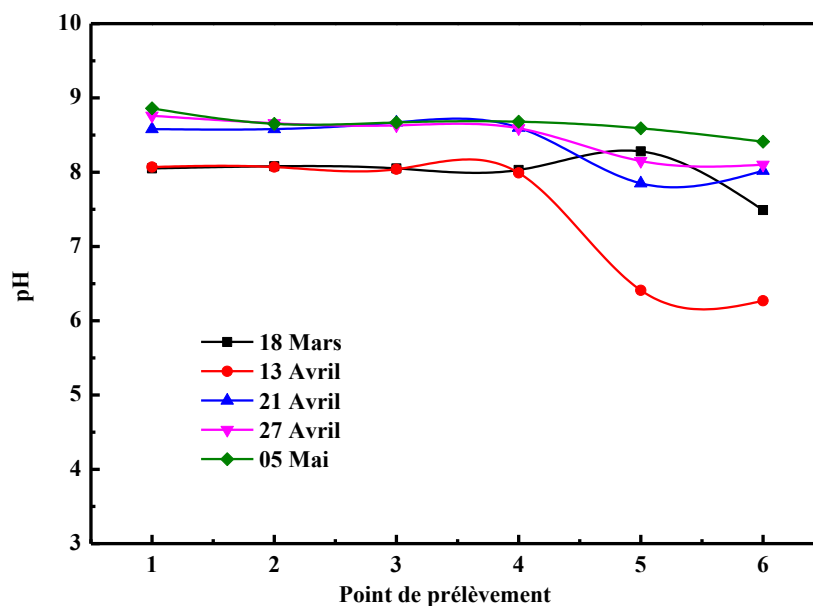


Figure IV.1 : Evolution de pH au cours du processus de dessalement.

Le suivi de la conductivité et de la température ont été étudiées (Figure IV.2 et IV.3).

Pour la conductivité électrique de l'eau de mer, c'est un paramètre important, il affecte d'une manière très significative le rendement des procédés de traitements et dessalements d'une façon très générale et surtout les techniques physico-chimiques [86], C'est pourquoi l'effet du type et de la concentration d'électrolytes sur l'efficacité des processus de traitements a été largement étudié. Dans le cas de dessalement des eaux, la conductivité électrique est un indicateur direct de la salinité de l'eau.

Des valeurs élevées (valeurs comprises entre 50 et 60 mS/cm pour l'eau de mer méditerranéenne) indiquent une forte densité d'ions dissous, notamment de chlorures, de sodium, de calcium, de sulfates et de magnésium. Ce paramètre est essentiel pour déterminer le dimensionnement des systèmes de traitement, notamment des membranes d'osmose inverse, qui doivent résister à des pressions élevées pour séparer ces sels de l'eau.

Les valeurs de conductivité enregistrées au niveau de la station d'EL MARSA varient entre 47 et 58 mS/cm pour les eaux brutes et celles ayant subi les étapes de prétraitement, ce qui reflète une salinité élevée typique de l'eau de mer. En revanche, des valeurs très faibles (~ 0.3 à 0.5 mS/cm) ont été mesurées après le passage par le procédé d'osmose inverse, et ce pour les différentes séries testées, indiquant une réduction significative de la concentration en sels dissous. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité et la complémentarité des différentes étapes du processus de dessalement, et confirment que l'osmose inverse constitue l'étape clé dans l'élimination de la majorité des sels contenus dans l'eau".

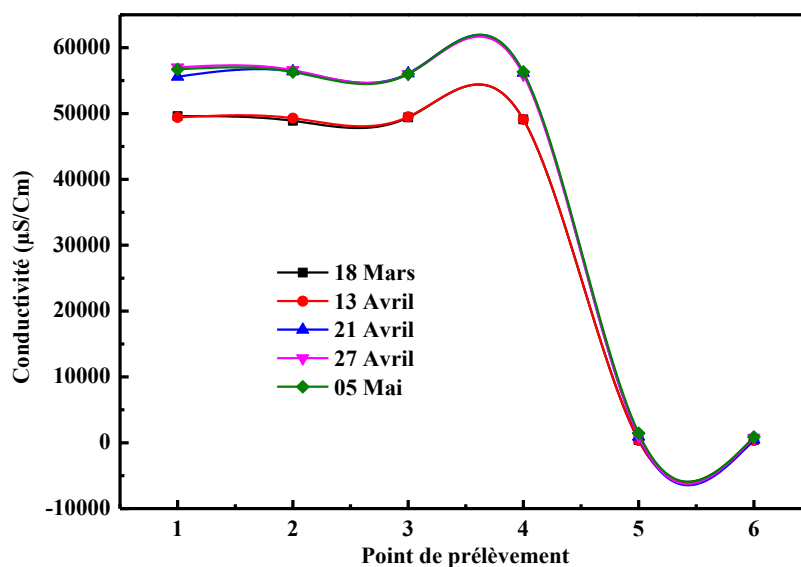


Figure IV.2 : Evolution de la conductivité au cours du processus de dessalement.

Le contrôle de la température après chaque prélèvement est essentiel, car celle-ci influence directement la viscosité de l'eau ainsi que la solubilité des sels. Ce paramètre a donc un impact notable sur les performances des procédés de prétraitement et de dessalement [87]. Les températures enregistrées varient entre 19 et 26 °C pour l'ensemble des séries. Cet écart s'explique principalement par la saison au cours de laquelle les échantillons ont été prélevés (hiver et printemps), ainsi que par les conditions climatiques spécifiques à la région. Les résultats du suivi de la température sont présentés dans la figure IV.3.

Il convient de noter que la température de l'eau après son passage par osmose inverse reste conforme aux normes de qualité des eaux potables.

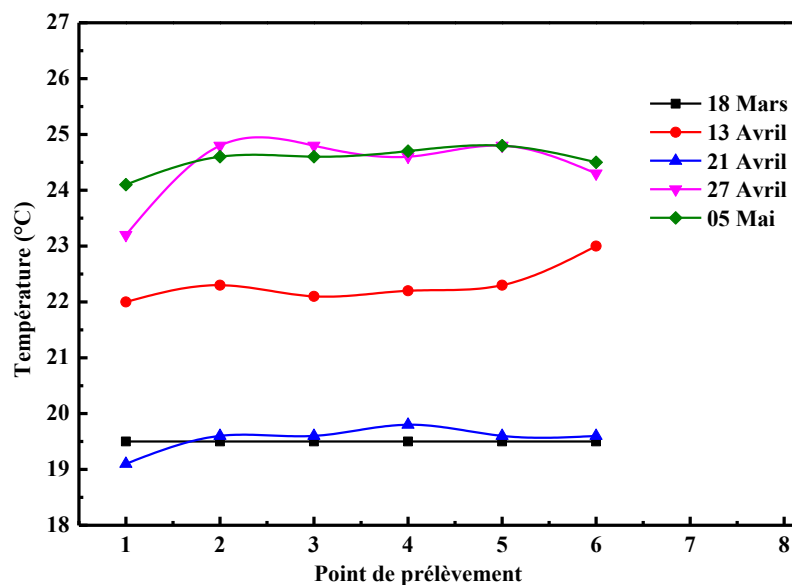


Figure IV.3 : Evolution de la température au cours du processus de dessalement.

IV.3.2 Résultats de calcul de TDS et salinité

L'objectif de cette partie de l'étude est de suivre l'évolution de deux paramètres, à savoir la salinité et les solides dissous totaux (TDS), au cours du processus de dessalement des eaux de la station d'EL MARSA.

En effet, la salinité est considérée comme l'un des paramètres physico-chimiques les plus importants d'une eau, car elle reflète la concentration en sels dissous dans les échantillons analysés. Les résultats de suivi de la salinité sont présentés dans la figure IV.4.

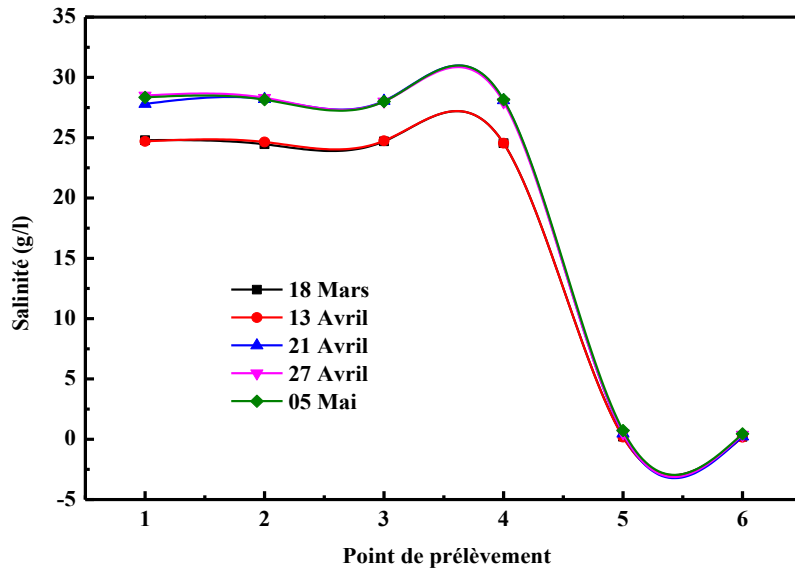


Figure IV.4 : Evolution de la salinité au cours du processus de dessalement.

D'après la figure IV.5, on observe clairement que la salinité reste pratiquement constante, entre 25 et 30 g/l, dans les quatre premiers points de prélèvement de chaque série. En revanche, après le passage de l'eau par le procédé d'osmose inverse, les valeurs enregistrées chutent considérablement, se situant entre 0.1 et 0.4 g/l. Ces résultats confirment que les procédés de prétraitement seuls ne permettent pas d'éliminer l'ensemble des sels dissous. Ainsi, même après une étape de microfiltration, l'eau conserve une salinité élevée, ce qui souligne l'importance et la complémentarité de chaque étape du procédé de dessalement.

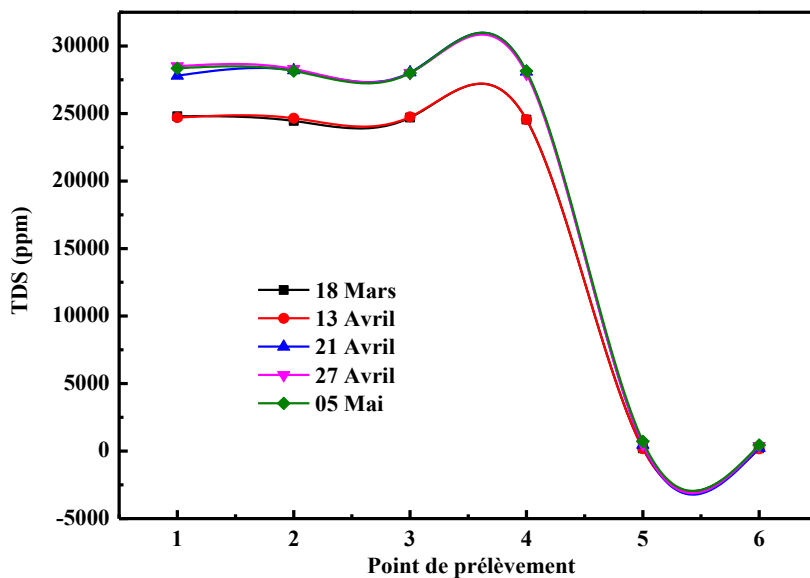


Figure IV.5 : Evolution de TDS (total des solides dissous) au cours du processus de dessalement.

Les résultats présentés dans la figure IV.5, illustrent l'évolution des solides dissous totaux (TDS) tout au long du processus de dessalement. On constate que la diminution significative des TDS n'est observée qu'après le passage de l'eau par le procédé d'osmose inverse, les valeurs enregistrées sont entre de 25 et 30 g/l. Cette observation met en évidence l'incapacité des procédés de prétraitement à éliminer efficacement les sels dissous. En effet, bien que ces étapes soient essentielles pour protéger les membranes d'osmose inverse contre l'encrassement et prolonger leur durée de vie, elles ne permettent pas à elles seules de réduire la charge saline de l'eau [88]. Ainsi, le rôle crucial de l'osmose inverse dans l'élimination des sels dissous est pleinement confirmé par ces résultats.

IV.3.3 Résultats de mesures de la turbidité

La mesure de la turbidité de l'eau de mer à l'arrivée de la station de dessalement d'El MARSA s'effectue par lecture directe et rapide comme nous avons indiqué auparavant à l'aide d'un turbidimètre, le résultat étant obtenu en quelques secondes seulement.

Les valeurs mesurées (figure IV.6) indiquent une turbidité moyenne variant entre 1.5 et 7 NTU, des niveaux comparables à ceux observés après certains traitements physico-chimiques ou biologiques. Cette variabilité met en évidence l'importance stratégique du point de prise d'eau de mer, notamment lors de conditions météorologiques agitées.

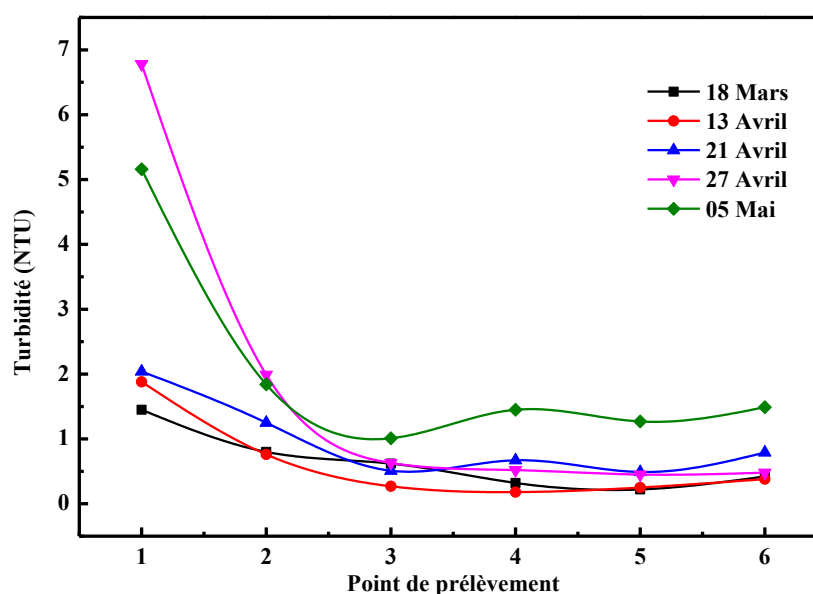


Figure IV.6 : Evolution de la turbidité au cours du processus de dessalement.

En effet, la présence de vagues peut fortement perturber la qualité de l'eau brute, en augmentant sa turbidité par la remise en suspension de particules fines et de matières

organiques. D'autre part, après le passage de l'eau par le procédé de filtration sur sable et microfiltration, les valeurs de turbidité chutent de manière significative, se stabilisant entre 0.1 et 0.5 NTU. Ces résultats confirment l'efficacité du système de prétraitement, en particulier la microfiltration, dans la clarification de l'eau.

IV.3.4 Résultats d'analyse des Chlorures

Les chlorures représentent l'un des paramètres les plus critiques à surveiller tout au long du processus de dessalement. Leur présence en concentration élevée dans l'eau, en particulier dans les eaux de mer, peut entraîner des effets corrosifs importants sur les équipements et compromettre la durabilité des installations. Par ailleurs, le chlore, sous ses différentes formes, est reconnu comme l'un des éléments les plus réactifs : il s'oxyde facilement en solution aqueuse, ce qui peut engendrer des réactions indésirables, notamment avec les membranes d'osmose inverse [89].

Dans le but d'évaluer l'efficacité des différentes étapes du traitement, notamment les procédés de prétraitement (coagulation floculation, décantation...etc.) et l'osmose inverse, la concentration en ions chlorure a été mesurée après chaque étape de la chaîne de dessalement de la station d'El MARSA. Cinq séries d'échantillonnage ont été réalisées entre le 18 mars et le 5 mai. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante (Figure IV.7), et permettent de visualiser l'évolution des teneurs en chlorures tout au long du processus.

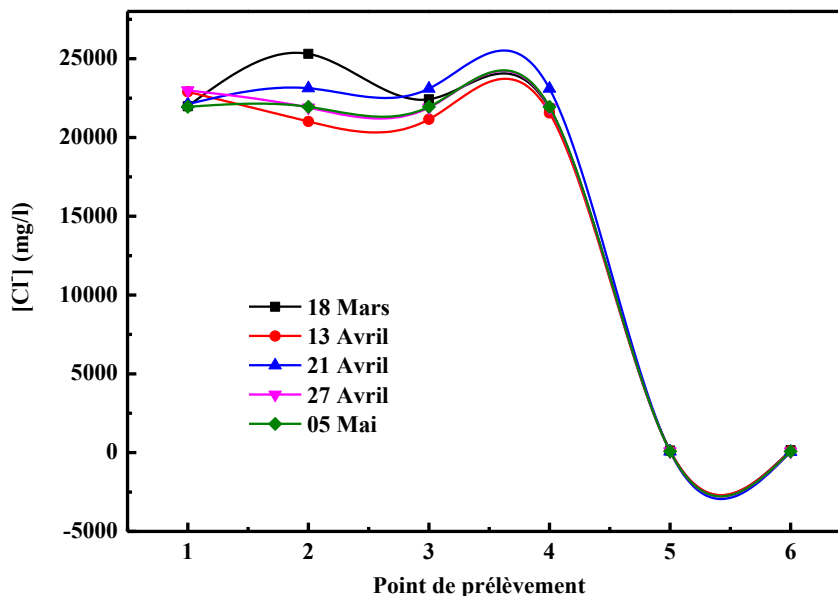


Figure IV.7 : Evolution des chlorures au cours du processus de dessalement.

D'après les résultats présentés dans la figure IV.7, on constate une élimination très efficace des chlorures après le passage de l'eau à travers les osmoseurs. Les concentrations mesurées en sortie varient entre 50 et 80 mg/l, par contre, les concentrations autour de 25 g/l à l'entrée de la station. Ainsi, les taux d'abattement des chlorures dans les différentes séries testées dépassent 98 %, ce qui témoigne de la performance du procédé d'osmose inverse par rapport ce facteur de chlorures.

Dans les procédés de dessalement utilisant l'osmose inverse, la présence de chlore résiduel constitue un risque majeur, car ce composé peut endommager de manière irréversible les membranes. Il est donc essentiel de surveiller en continu la concentration en chlore résiduel afin d'éviter ce type de dégradation, de garantir le bon fonctionnement des membranes et de préserver l'intégrité des installations [90].

IV.3.5 Résultats d'analyse de Calcium (Ca^{2+}) et Ammonium (NH_4^+)

Cette partie du travail a pour objectif de suivre, tout au long de la chaîne de dessalement, l'évolution des concentrations en ions calcium (Ca^{2+}) et ammonium (NH_4^+).

Pour ce faire, plusieurs séries d'échantillons ont été prélevées à différentes étapes du processus, entre le 18 mars et le 5 mai, afin de mesurer précisément la concentration de ces deux éléments essentiels. Les ions calcium sont étroitement liés à la dureté de l'eau, en association avec les ions magnésium. C'est dans cette optique que le suivi simultané du calcium et de l'ammonium a été intégré à cette étude. Les résultats de suivi de ces deux paramètres sont illustrés dans les figures IV.8 et IV.9.

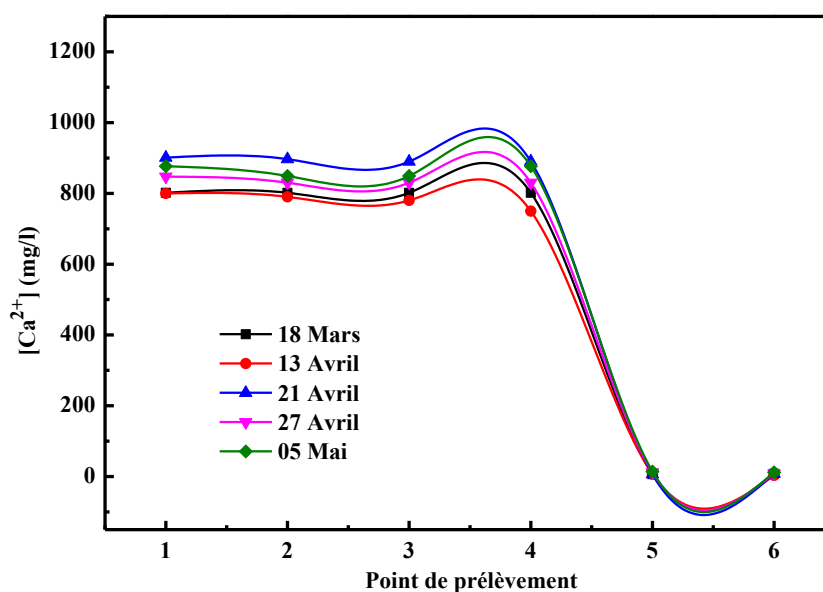


Figure IV.8 : Evolution de la concentration des ions Ca^{2+} au cours du processus de dessalement.

En raison de leur impact sur l'entartrage des équipements et la qualité de l'eau produite, il est pertinent de surveiller ce paramètre. Par ailleurs, le suivi des ions ammonium est également important, car leur présence peut indiquer une pollution organique ou une altération de la qualité microbiologique de l'eau.

Comme pour les autres paramètres, la concentration des ions calcium (Ca^{2+}) à l'entrée de la station de dessalement d'El MARSА varie entre 0.8 et 1.2 g/l. En revanche, après le traitement par osmose inverse, cette concentration chute de manière significative, se situant entre 14 et 6 mg/l. Il est important de souligner que les procédés de prétraitement, tels que la filtration sur sable et la microfiltration, n'ont pas d'effet notable sur la teneur en ions calcium. En revanche, l'osmose inverse s'avère particulièrement efficace pour éliminer ce type de cations présents à des concentrations élevées, ce qui confirme son rôle crucial dans la réduction de la dureté de l'eau.

Nous avons également choisi de suivre la concentration des ions ammonium (NH_4^+), afin de mieux comprendre les phénomènes impliqués tout au long de la chaîne de dessalement. L'analyse des échantillons prélevés a permis d'obtenir les résultats suivants (figure IV.9).

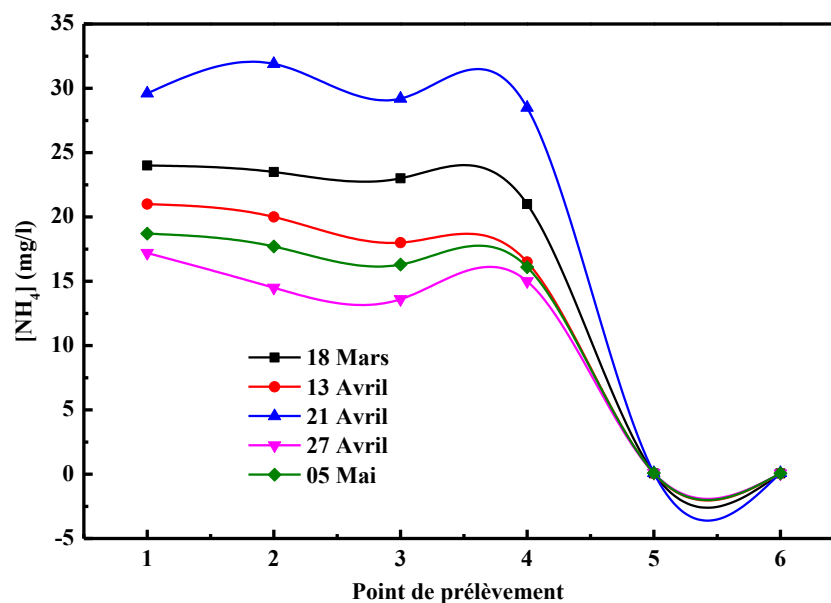


Figure IV.9 : Evolution de la concentration des ions NH_4^+ au cours du processus de dessalement.

Les résultats présentés dans la figure IV.9 montrent clairement que les ions ammonium subissent une élimination très significative grâce au procédé d'osmose inverse. Les concentrations initiales varient entre 16 et 30 mg/l, tandis qu'après le dessalement, elles chutent à environ 0.1 et 0.05 mg/l. Il est important de souligner que l'élimination complète des ions

ammonium est essentielle pour garantir une eau de qualité, car leur présence peut indiquer une contamination organique ou microbiologique et compromettre la potabilité de l'eau produite.

IV.3.6 Résultats d'analyse des Nitrates, Nitrites et Phosphates

Le suivi des concentrations en nitrates, nitrites et phosphates au cours du processus de dessalement revêt une importance cruciale. Les nitrites, en particulier, présentent une toxicité significative même à l'état de traces. De plus, les nitrates peuvent, dans certaines conditions, s'oxyder et former des nitrites. Quant aux phosphates, ils sont susceptibles de précipiter avec certains minéraux si les conditions physico-chimiques sont favorables. Les résultats du suivi des nitrates sont présentés dans la figure IV.10.

Les résultats du suivi de la concentration en nitrates montrent une réduction progressive pour l'ensemble des séries analysées. Les valeurs mesurées à l'entrée de la station varient entre 0.85 mg/l (analyse du 27 avril) et 1.3 mg/l (analyse du 5 mai).

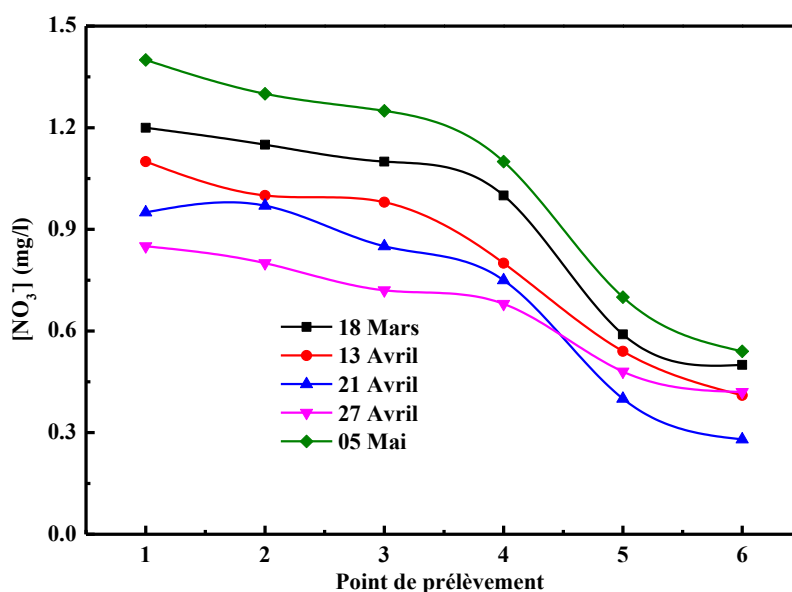


Figure IV.10 : Evolution de la concentration des nitrates au cours du processus de dessalement.

Il est à noter que ces concentrations restent comparables à celles généralement observées dans l'eau de mer Méditerranée. Par ailleurs, les concentrations relevées après les différentes étapes du dessalement se situent entre 0.3 et 0.6 mg/l, ce qui demeure largement en dessous de la concentration maximale admissible pour les nitrates, fixée à 50 mg/l.

Le suivi de la concentration en nitrites (figure IV.11) a montré que leur teneur à l'entrée de la station variait entre 0.031 et 0.042 mg/l. En revanche, après le procédé de dessalement par osmose inverse, seules des traces, voire des concentrations non détectables (< 0.01 mg/l), ont

été observées. Ces résultats confirment l'efficacité des membranes d'osmose inverse pour éliminer la quasi-totalité des ions nitrites présents dans l'eau après les étapes de prétraitement.

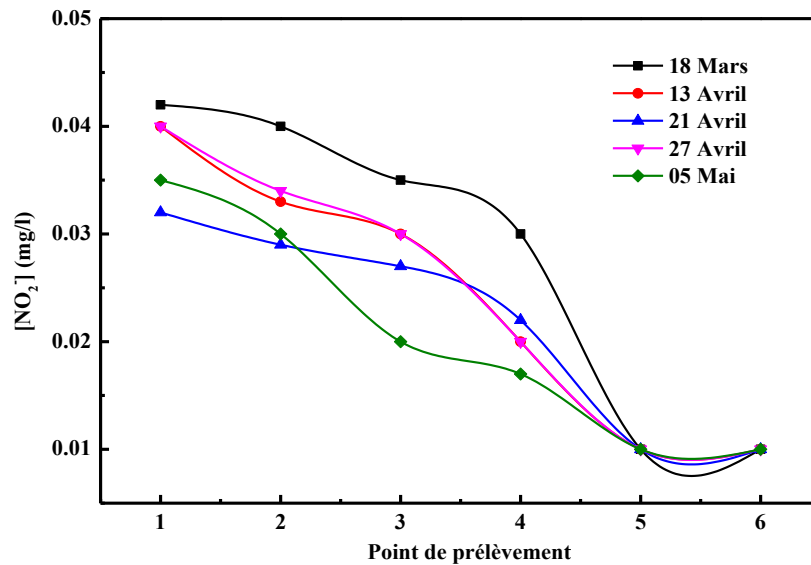


Figure IV.11 : Evolution de la concentration des nitrites au cours du processus de dessalement.

L'un des avantages majeurs de cette chaîne de dessalement réside justement dans sa capacité à réduire de manière significative la concentration en nitrites. Dans le cadre du traitement des eaux destinées à la consommation humaine, les agences nationales et internationales interdisent la présence de nitrites, même à très faibles concentrations (traces), en raison de leur toxicité.

Comme mentionné précédemment, le suivi de la concentration en phosphates a été réalisé (figure IV.12). Les résultats obtenus montrent une tendance similaire à celle observée pour les nitrates, avec une élimination progressive à chaque étape du traitement. Cette réduction des concentrations en phosphates et en nitrates peut-être expliquée par des phénomènes d'adsorption, notamment grâce aux floes formés lors des étapes de coagulation-floculation [91]. De plus, le sable utilisé dans les filtres présente une certaine capacité d'adsorption, contribuant ainsi à la diminution des concentrations. La microfiltration joue également un rôle important en renforçant l'élimination de ces composés.

Les concentrations mesurées à l'entrée de la station varient entre 0.24 et 0.35 mg/l, tandis que des teneurs négligeables ont été détectées après le dessalement par osmose inverse. Ces valeurs restent conformes aux normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

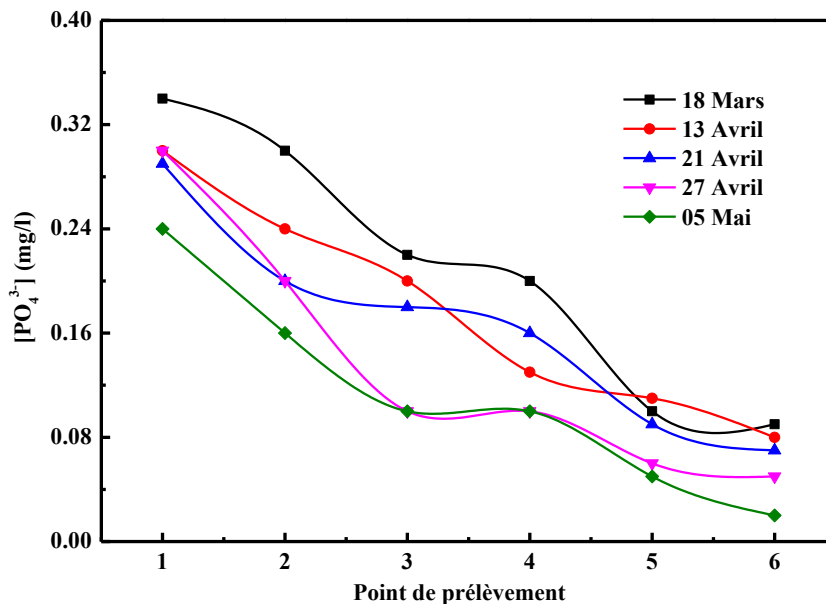


Figure IV.12 : Evolution de la concentration des phosphates au cours du processus de dessalement.

IV.3.7 Résultats d'analyse des Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates (SO_4^{2-}) sont considérés comme un paramètre essentiel à surveiller tout au long du processus de dessalement. Pour cette raison, entre autres, nous avons choisi de mesurer leur concentration dans l'eau de mer dès son arrivée à la station de dessalement, puis après chaque étape de prétraitement ou de dessalement, à travers cinq séries de mesures effectuées pendant la période d'étude, les résultats de suivi des sulfates sont illustrés dans la figure IV.13.

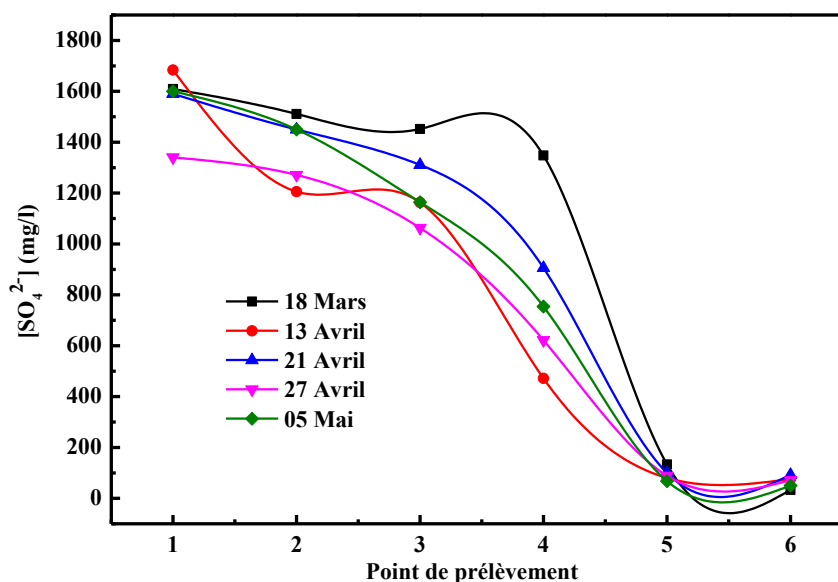


Figure IV.13 : Evolution de la concentration des sulfates au cours du processus de dessalement.

Les résultats d'analyse des sulfates indiquent une élimination progressive de ces ions tout au long du processus de traitement. Cette diminution s'explique par l'efficacité des prétraitements mis en œuvre. Toutefois, la réduction la plus significative est observée après les étapes de microfiltration (de 1600 mg/l à 500 mg/l pour la série de 13 avril) et d'osmose inverse (de 900 à 100mg/l pour la série de 21 avril). Ces résultats sont particulièrement intéressants, car ils soulignent la capacité des membranes de microfiltration à éliminer les particules colloïdales, et celles de l'osmose inverse à retenir efficacement les minéraux dissous, dont les sulfates. Les concentrations mesurées restent dans les limites acceptables pour l'eau potable.

IV.3.8 Résultats de calcul de Magnésium, Sodium et Bicarbonates (HCO_3^-)

Le magnésium, le sodium et les bicarbonates ont été suivis tout au long du processus de dessalement. Ces trois éléments jouent un rôle essentiel dans la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, car ils influencent directement l'alcalinité et la dureté de l'eau. Par conséquent, l'ajustement de leurs concentrations est indispensable afin de garantir la production d'une eau conforme aux normes de potabilité. Les résultats d'analyse de ces paramètres sont présentés dans les figures IV.14, 15 et 16.

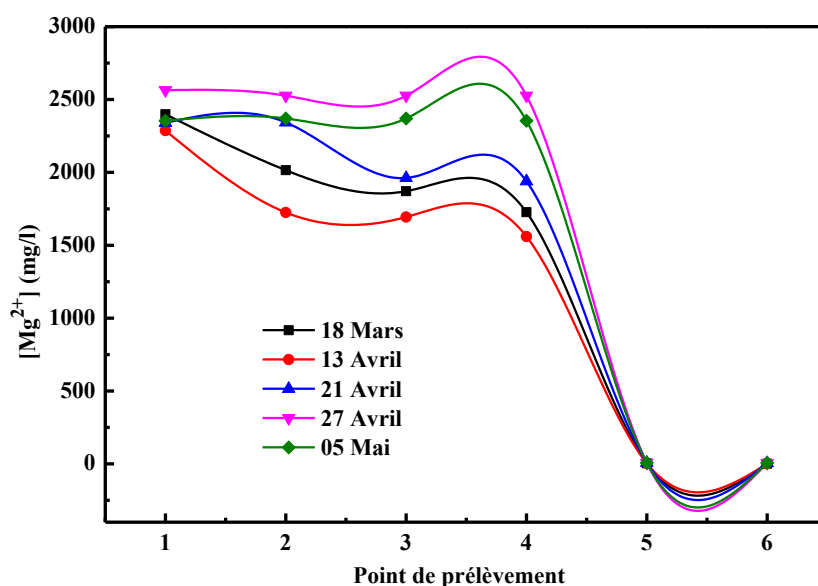


Figure IV.14 : Evolution de la concentration des ions magnésium (Mg^{2+}) au cours du processus de dessalement.

La figure IV.14 montre clairement que seul le procédé d'osmose inverse permet une réduction significative de la concentration en ions magnésium (Mg^{2+}) dans l'eau à dessaler. En effet, les concentrations mesurées à l'entrée de la station (eaux brutes) varient entre 2300 et

2600 mg/l, tandis que celles relevées aux points 2, 3 et 4 restent supérieures à 1500 mg/l. En revanche, après l'osmose inverse, les échantillons présentent une chute notable, avec des concentrations comprises entre 8 et 3.8 mg/l. Cette réduction s'explique par la haute efficacité des membranes d'osmose inverse, capables de retenir une grande partie des ions magnésium présents en solution.

Les mêmes phénomènes et mécanismes ont été observés dans le cas du sodium. Cet élément influence directement la salinité de l'eau, étant donné que la salinité et la conductivité de l'eau de mer sont étroitement liées aux concentrations en sodium et en chlorures, qui peuvent dépasser 20 g/l dans les eaux de la Méditerranée [92]. Dans notre étude, les concentrations en sodium mesurées à l'entrée de la station de dessalement d'El MARSA sont de l'ordre de 17 g/l (figure IV.15). En revanche, à la sortie de la chaîne de dessalement, ces concentrations chutent fortement, se situant entre 90 et 150 mg/l. Cette diminution importante témoigne de l'efficacité du procédé d'osmose inverse dans l'élimination du sodium.

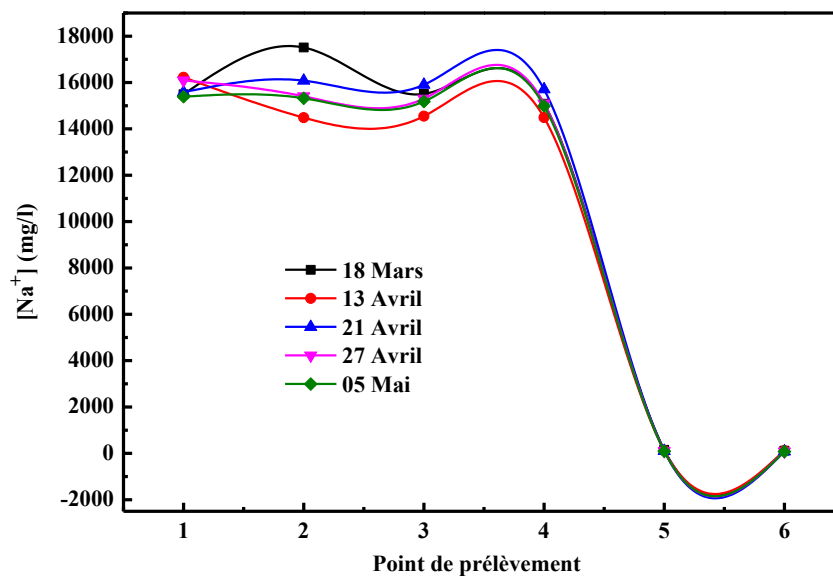


Figure IV.15 : Evolution de la concentration des ions sodium (Na^+) au cours du processus de dessalement.

En raison des échanges entre la surface de l'eau de mer et l'atmosphère, le dioxyde de carbone (CO_2) se dissout dans l'eau, formant ainsi de l'acide carbonique (H_2CO_3). Cet acide se dissocie ensuite en ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et bicarbonate, un processus influencé par la température et le pH de l'eau. Ce mécanisme de solubilisation du CO_2 est à la base de la formation des composés carbonatés dans l'eau. Il convient de noter que deux paramètres importants de la qualité de l'eau, l'alcalinité totale (TA) et l'alcalinité carbonatée (TAC), sont évalués principalement à partir de ce phénomène [93].

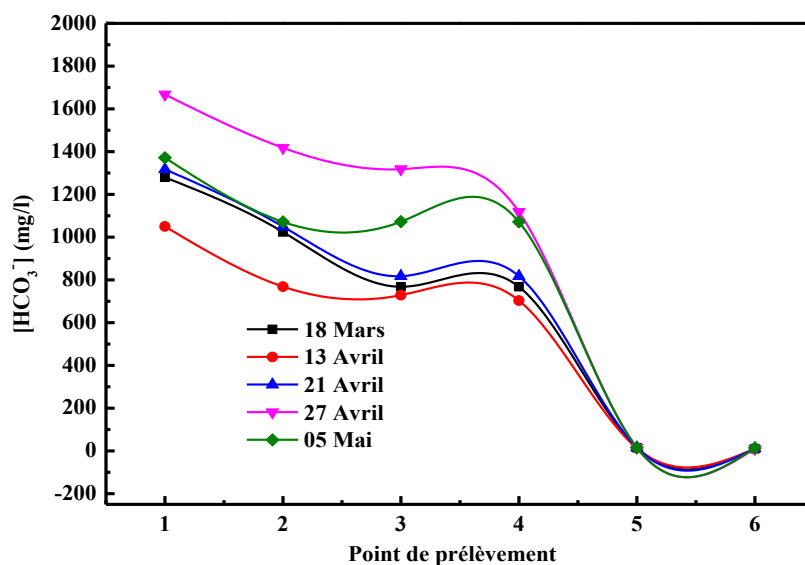


Figure IV.16 : Evolution de la concentration de bicarbonates (HCO_3^-) au cours du processus de dessalement.

Les résultats d'analyse des hydrogénocarbonates (HCO_3^-) indiquent des concentrations comprises entre 1000 et 1600 mg/l dans l'eau de mer brute. Au cours des étapes de prétraitement (points 2, 3 et 4), seules de faibles réductions de ces concentrations ont été observées, ce qui suggère une efficacité limitée de ces procédés vis-à-vis des espèces dissoutes comme les hydrogénocarbonates.

En revanche, une chute significative des concentrations a été enregistrée après l'étape d'osmose inverse, confirmant l'efficacité de cette technologie pour l'élimination des ions dissous. Cette réduction importante est cohérente avec le principe de fonctionnement des membranes d'osmose inverse, qui retiennent la majorité des sels et des composés minéraux, y compris les carbonates et hydrogénocarbonates [94,95]. Ce résultat est particulièrement pertinent dans l'optique de l'ajustement de l'alcalinité de l'eau dessalée en fonction des exigences de la potabilisation.

IV.4 Conclusion

Le processus de dessalement à la station d'EL MARSА combine prétraitements, osmose inverse et post-traitement pour éliminer efficacement les sels et impuretés. L'osmose inverse réduit drastiquement la salinité et les ions (chlorures, sodium, etc.), tandis que les prétraitements optimisent la clarification. Les paramètres analysés (pH, conductivité, turbidité, etc.) confirment la conformité aux normes d'eau potable. L'étude valide l'efficacité du système et souligne l'importance d'un suivi rigoureux pour garantir performance et durabilité.

Conclusion générale

Cette étude, bien que menée sur une période relativement courte, a permis d'approfondir la compréhension du fonctionnement global de la station de dessalement d'eau de mer d'El Marsa, dans la wilaya de Skikda, et d'évaluer de manière rigoureuse la qualité de l'eau tout au long des différentes étapes du traitement.

Dans un premier temps, une revue bibliographique détaillée a été effectuée afin de contextualiser les enjeux liés à la raréfaction des ressources en eau douce, en mettant en évidence le rôle stratégique que joue le dessalement dans les régions côtières. Une attention particulière a été portée à l'osmose inverse, procédé central utilisé par la station, en exposant ses principes de fonctionnement, ses avantages, mais aussi ses limites sur les plans énergétique et environnemental.

L'analyse des principales unités de traitement – incluant la prise d'eau, le prétraitement, l'osmose inverse proprement dite, et le post-traitement – a constitué l'axe principal du travail expérimental. Des prélèvements d'échantillons ont été réalisés à différentes étapes du processus, en collaboration avec le laboratoire central de l'ADE, permettant le suivi et l'interprétation des paramètres physico-chimiques clés (tels que le pH, la salinité, la turbidité, la conductivité et la concentration en ions). Ces analyses ont permis de mesurer l'efficacité du traitement et de comparer les résultats obtenus aux normes algériennes et internationales relatives à la potabilité de l'eau.

Par ailleurs, le stage pratique d'un mois effectué au sein de la station a constitué une expérience professionnelle enrichissante, offrant une immersion dans les réalités opérationnelles d'une infrastructure stratégique. Il a également permis d'identifier certains défis techniques et environnementaux auxquels la station est confrontée, notamment en lien avec la gestion des rejets salins et la consommation énergétique du procédé d'osmose inverse.

En conclusion, cette étude a permis de confirmer la performance satisfaisante de la station d'El Marsa en matière de production d'eau potable, tout en mettant en lumière certaines pistes d'optimisation, notamment en ce qui concerne la gestion durable des ressources, l'efficacité énergétique, et la réduction de l'impact environnemental. Elle ouvre ainsi la voie à des réflexions plus larges sur l'avenir du dessalement en Algérie, dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les ressources hydriques.

Références bibliographiques

- [1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris, France: UNESCO, 2020.
- [2] Borsani and S. Rebagliati, "Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 29–37, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.desal.2005.03.007.
- [3] A. M. K. El-Ghonemy, *Fresh Water Resources and Water Scarcity: Challenges and Solutions*. Cham, Switzerland : Springer, 2012.
- [4] H. Mebarki, "L’approvisionnement en eau potable en Algérie : enjeux et perspectives," Ph.D. dissertation, Univ. Alger, Alger, Algeria, 2017.
- [5] O. Bessaoud, "La politique de l'eau en Algérie : entre rareté et gouvernance," Ph.D. dissertation, Univ. Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algeria, 2020. Doi : 10.48303/iss.2020.104.
- [6] Organisation mondiale de la Santé (OMS), *Directives de qualité pour l’eau de boisson*, 4e éd. Genève, Suisse : OMS, 2017.
- [7] M. Al-Weshahi et al., "Review of seawater quality and desalination technologies," *Desalination and Water Treatment*, vol. 225, pp. 161–177, 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.26934.
- [8] O. Hentati, A. Wali, A. A. Ksibi, S. Ben Mansour, and A. Ben Amor, "Water quality and removal of contaminants in desalination processes," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 30, p. 100512, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.02.007.
- [9] C. Dupuy, "Étude de l’évolution de la ressource mondiale en eau dans un contexte de changement climatique et d’urbanisation," Ph.D. dissertation, Univ. Toulouse III, Toulouse, France, 2023.
- [10] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 3rd ed., vol. 1. Geneva, Switzerland: WHO, 2008.
- [11] G. Zhu et al., "Evaporation, infiltration and storage of soil water in different climates," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, pp. 3365-3379, 2022, doi: 10.5194/hess-26-3365-2022.
- [12] L. Oudin, "Les précipitations : définition et phénomènes associés," in *Hydrologie générale*, ch. 3 : « Précipitations », 2024.
- [13] J. Beauchamp, "Qualité des eaux souterraines," Thèse de doctorat, Univ. Picardie Jules Verne, Amiens, France, 2006.

Références bibliographiques

- [14] P. Mouchot and M. Roustan, "Caractéristiques et propriétés des eaux - Eau pure, eaux naturelles," in Technologies de l'eau. Paris, France : Lavoisier, 2011, ch. 4, pp. 87-112.
- [15] M. Leloup, "Évaluation de l'impact des blooms algaux et d'efflorescences bactériennes sur les caractéristiques de la matière organique des eaux naturelles," Revue des Sciences de l'Eau, vol. 26, no. 2, pp. 145-160, 2013, doi : 10.7202/1018555ar.
- [16] L. Loubersac, "Quelques réflexions sur le « fait maritime calédonien », les atouts et les enjeux du pays," in La Nouvelle-Calédonie et « l'Or Bleu ». Nouméa, Nouvelle-Calédonie : Éditions Île de Lumière, 2017, pp. 45-67.
- [17] Décret n°2007-49 du 11 janvier 2007 relatif à la sécurité sanitaire des eaux minérales naturelles*, art. L.1322-2, JORF n°0011 du 13 janvier 2007, p. 751.
- [18] W. K. Mulombo, D. Baza, J. F. Busogoro, and R. M. M. Nduwimana, "Évaluation des systèmes d'approvisionnement en eau potable en Afrique subsaharienne," Organisation Mondiale de la Santé (OMS), Geneva, Switzerland, Rapport OMS/WSH/2017.03, 2017.
- [19] World Health Organization (WHO), *Water Quality and Health - Review of Turbidity: Information for Regulators and Water Suppliers*. Geneva, Switzerland : WHO, 2017.
- [20] *Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du conseil*, Journal officiel de l'Union européenne, L 435/1, 23 décembre 2020.
- [21] Environmental Protection Agency (EPA), *Drinking Water Quality in Public Supplies 2020*. Washington, DC, USA : EPA, EPA 815-R-21-002, décembre 2021.
- [22] Organisation mondiale de la Santé (OMS), *Directives de qualité pour l'eau de boisson : Quatrième édition intégrant le premier additif*. Genève, Suisse : OMS, avril 2017.
- [23] Organisation internationale de normalisation (ISO), *L'ISO et l'eau : le monde va loin quand il s'accorde*. Genève, Suisse : ISO, 2011.
- [24] Organisation mondiale de la Santé (OMS), *Normes de l'OMS sur l'eau potable : Recommandations*, 3e éd. Genève, Suisse : OMS, 2006.
- [25] A. Ouyahia, "Règlementation des eaux destinées à la consommation humaine," Journal officiel de la République Algérienne, no. 34, pp. 12-15, juin 2011.
- [26] Health Canada, *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Nitrate and Nitrite*. Ottawa, ON, Canada: Health Canada, 2013.
- [27] Université Mentouri Constantine, "Chapitre 4 – La pollution de l'eau," Support de cours HYD401, Constantine, Algérie, 2019.
- [28] S. Ghaouaci, *Océanographie*, Support de cours, Univ. Hassiba Ben Bouali, Département Eau, Environnement et Développement Durable, Chlef, Algérie, 2020.
- [29] M. Knudsen, Hydrographical Tables, G.E.C. Gad, Copenhagen, 1901.

Références bibliographiques

- [30] G. Copin-Montégut, "Propriétés physiques de l'eau de mer," in **Caractérisation et propriétés de la matière**. Paris, France: EDP Sciences, 2002, pp. 145-178.
- [31] United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), **The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water**. Paris, France: UNESCO, 2023.
- [32] M. Elimelech, "Seawater Desalination: Energy and Environmental Trade-offs," *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 20, pp. 10841-10849, 2012, doi: 10.1021/es300889m.
- [33] P. H. Gleick, "Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria," *Weather, Climate, and Society*, vol. 6, no. 3, pp. 331-340, 2014, doi: 10.1175/WCAS-D-13-00059.1.
- [34] IPCC, "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 4: Water," Geneva, Switzerland: IPCC, 2022.
- [35] J. Borel, "Géopolitique de l'eau au Moyen-Orient," Ph.D. dissertation, Univ. Paris-Saclay, Paris, France, 2019.
- [36] M.-A. Eyl-Mazzega and A. Cassagnol, "Géopolitique du dessalement de l'eau de mer," Institut français des relations internationales (IFRI), Paris, France, Rapport IFRI, 2022.
- [37] T. M. Missimer, R. H. A. Maliva, and G. L. Amy, **Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities**. Berlin, Germany : Springer, 2015.
- [38] S. Rajesh and C. Chiranjeevi, "Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review," *Solar Energy*, vol. 270, pp. 112-125, 2024, doi : 10.1016/j.solener.2024.01.001.
- [39] M. Al-Shammiri and M. Safar, "Multi-effect distillation plants: State of the art," *Desalination*, vol. 177, no. 1-3, pp. 1-18, 2005, doi: 10.1016/j.desal.2004.11.009.
- [40] R. Kamali and M. Mohebinia, "Thermodynamic optimization and cost analysis of vapor compression desalination systems," *Energy*, vol. 263, Part A, p. 125654, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125654.
- [41] P. Danis, "Dessalement de l'eau de mer," in **Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique**, J. Dupont, Éd. Paris, France : Lavoisier, 2003, ch. 7, pp. 231-258.
- [42] Z. Lu and L. Xu, "Freezing Desalination Process," in **Thermal Desalination Processes - Vol. II**, Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE). Oxford, UK: UNESCO-EOLSS, 2010, pp. 112-135.
- [43] N. K. Rastogi, "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments," in **Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes**, A. Basile, Éd. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019, ch. 5, pp. 89-112.

Références bibliographiques

- [44] T. Y. Cath, A. E. Childress, and M. Elimelech, "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments," *Journal of Membrane Science*, vol. 281, no. 1-2, pp. 70-87, 2006, doi: 10.1016/j.memsci.2006.05.048.
- [45] S. Jafarinejad, "Forward osmosis membrane technology for nutrient removal/recovery from wastewater: Recent advances, proposed designs, and future directions," *Chemosphere*, vol. 263, p. 128116, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128116.
- [46] M. Nour-Mohammad and M. Fakhroleslam, "Sustainable Reverse Osmosis Desalination Systems: Comprehensive Superstructure Modeling and Multi-Objective Optimization," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 64, no. 1, pp. 123-145, 2025, doi: 10.1021/acs.iecr.4c01234.
- [47] J. Song, X. Zhang, and H. Li, "A review of the current status of small-scale seawater reverse osmosis desalination," *Water International*, vol. 42, no. 5, pp. 618-631, 2017, doi: 10.1080/02508060.2017.1331538.
- [48] S. Kim, J. Park, and K. Lee, "Design and optimization of hybrid seawater reverse osmosis-solar-driven desalination-pressure retarded osmosis system for energy efficient desalination maximizing economic potential," *Water Research*, vol. 215, p. 118272, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118272.
- [49] B. Rahimi, A. G. Kashani, and M. K. Moraveji, "A feasibility study of solar-powered reverse osmosis processes," *Desalination*, vol. 500, p. 114879, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114879.
- [50] S. M. Shalaby, M. A. Antar, and A. S. Alsaman, "Reverse osmosis desalination systems powered by solar energy: Preheating techniques and brine disposal challenges - A detailed review," *Energy Conversion and Management*, vol. 251, p. 114902, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114902.
- [51] A. Altaee, G. Zaragoza, and H. R. van Tonningen, "Comparison between Forward Osmosis-Reverse Osmosis and Reverse Osmosis processes for seawater desalination," *Desalination*, vol. 336, pp. 50-57, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2013.12.038.
- [52] V. C. Mota et al., "Evaluation of an ultrafiltration membrane for the removal of fish viruses and bacteria in aquaculture water," *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, p. 1054321, 2022, doi : 10.3389/fmars.2022.1054321.
- [53] S. Chen, H. Wang, and B. Ning, "Efficacy and safety of early ultrafiltration in patients with acute decompensated heart failure: a meta-analysis," *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 10, p. 1256789, 2023, doi : 10.3389/fcvm.2023.1256789.

Références bibliographiques

- [54] X. Ding et al., "A pilot study on the dual membrane process of ultrafiltration and nanofiltration to treat algae-laden raw water compared to O₃-BAC," *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 72, no. 3, pp. 300-315, 2023, doi : 10.2166/aqua.2023.085.
- [55] J. Zhou et al., "Pilot Study of Ultrafiltration-Nanofiltration Process for the Treatment of Raw Water from Huangpu River in China," *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 1, no. 3, pp. 186-194, 2009, doi: 10.4236/jwarp.2009.13023.
- [56] J. Winter, "Nanofiltration and tight ultrafiltration membranes for drinking water treatment – system design and operation," Technical Report, American Water Works Association, Denver, CO, USA, 2017.
- [57] F. Lutin, "L'électrodialyse et ses nombreuses applications," *L'Actualité Chimique*, no. 330, pp. 15-21, 2009.
- [58] H. Roux de Balmann and E. Casademont, "Électrodialyse," in **Chimie verte : concepts et applications**, P. Colonna, Éd. Paris, France : Lavoisier, 2006, pp. 145-167.
- [59] J. Neel and R. François, "La pervaporation : une nouvelle technique de fractionnement des mélanges liquides. Aspects physico-chimiques du procédé," *Journal de Chimie Physique*, vol. 85, no. 3, pp. 207-221, 1988, doi : 10.1051/jcp/1988850207.
- [60] J. Neel and R. Clement, "La pervaporation : un nouveau procédé de fractionnement des mélanges liquides," *Houille Blanche*, no. 2, pp. 125-136, 1985, doi : 10.1051/lhb/1985009.
- [61] A. J. Toth et al., "Treatment of Pharmaceutical Process Wastewater with Hybrid Separation Method: Distillation and Hydrophilic Pervaporation," *Waste Treatment and Recovery*, vol. 4, no. 3, pp. 112-125, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.002.
- [62] C. Castel, M. Bailly, and D. Roizard, "Pervaporation - Des matériaux membranaires aux procédés et à leurs applications industrielles," in **Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique**, 3e éd., P. Le Cloirec, Éd. Paris, France : Lavoisier, 2020, ch. 12, pp. 345-378.
- [63] F. de Dardel, "Échange d'ions - Technologies d'applications," in **Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique**, 1re éd., J. P. Dal Pont, Éd. Paris, France : Techniques de l'Ingénieur, 1998, ch. J 3 720.
- [64] F. de Dardel, "Échange d'ions - Principes de base," in **Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique**, 2e éd., J. P. Dal Pont, Éd. Paris, France : Techniques de l'Ingénieur, 2015, ch. J 3 710.
- [65] J. Rydberg, M. Cox, C. Musikas, and G. R. Choppin, **Solvent Extraction Principles and Practice**, 2nd Ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.

Références bibliographiques

- [66] V. S. Kislik, **Solvent Extraction: Classical and Novel Approaches**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012.
- [67] European Food Safety Authority (EFSA), "Scientific Opinion on the re-evaluation of extraction solvents," *EFSA Journal*, vol. 19, no. 3, p. 6421, 2021, doi: 10.2903/j.efsa.2021.6421.
- [68] S. S. Dukhin, V. V. Taranov, and P. V. Lebedev, "Modelling Reverse Osmosis," *Russian Chemical Reviews*, vol. 57, no. 6, pp. 572-587, 1988, doi: 10.1070/RC1988v057n06ABEH003365.
- [69] S. M. Rao, "Reverse Osmosis," *Resonance*, vol. 16, no. 12, pp. 1264-1275, 2011, doi: 10.1007/s12045-011-0147-4.
- [70] R. Audinos, "Membranes semi-perméables - Membranes d'osmose inverse," in **Caractérisation et propriétés de la matière**. Paris, France: Lavoisier, 2000, ch. 8, pp. 201-230.
- [71] H. K. Lonsdale, "Recent advances in reverse osmosis membranes," *Desalination*, vol. 13, no. 3, pp. 317-332, 1973, doi : 10.1016/S0011-9164(00)82006-9.
- [72] N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability," *Desalination*, vol. 309, pp. 197-207, 2013, doi: 10.1016/j.desal.2012.10.015.
- [73] M. A. Shannon et al., "Science and technology for water purification in the coming decades," *Nature*, vol. 452, pp. 301-310, 2008, doi: 10.1038/nature06599.
- [74] M. Elimelech and W. A. Phillip, "The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment," *Science*, vol. 333, no. 6043, pp. 712-717, 2011, doi: 10.1126/science.1200488.
- [75] Q. Li and M. Elimelech, "Organic Fouling and Chemical Cleaning of Nanofiltration Membranes: Measurements and Mechanisms," *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 17, pp. 4683-4693, 2004, doi: 10.1021/es0354162.
- [76] S. S. Madaeni and Y. Mansourpanah, "Chemical cleaning of reverse osmosis membranes fouled by whey," *Desalination*, vol. 161, no. 1, pp. 13-24, 2004, doi: 10.1016/S0011-9164(04)90036-3.
- [77] J. T. Daugirdas, P. G. Blake, and T. S. Ing, **Handbook of Dialysis**, 5th ed. Philadelphia, PA, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2015.
- [78] A. Maurel, "Techniques séparatives à membranes - Considérations théoriques," in **Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique**, 2e éd., P. Le Cloirec, Éd. Paris, France : Lavoisier, 1993, ch. 9, pp. 275-302.

Références bibliographiques

- [79] N. Combernoux, "Traitement d'effluents nucléaires aqueux : étude de la dégradation des membranes d'osmose inverse sous irradiation gamma," Ph.D. dissertation, Univ. Montpellier, Montpellier, France, 2015.
- [80] Algérie Eco, "Dessalement d'eau de mer : mise en service de la station d'El Marsa (Skikda)," 26 mars 2023. Disponible : <https://www.algerie-eco.com/2023/03/26/dessalement-deau-de-mer-mise-en-service-de-la-station-del-marsa-skikda/>
- [81] I. Kaab and N. Hama, "Suivi du procédé de dessalement de l'eau de mer de la station d'El Marsa et caractérisation des rejets de saumure," Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), Alger, Algérie, 2023.
- [82] Association Française de Normalisation (AFNOR), *Normes françaises relatives à la qualité de l'eau*. Paris, France : AFNOR, 2023.
- [83] Comité Européen de Normalisation (CEN), *Normes européennes de qualité de l'eau potable*. Bruxelles, Belgique: CEN, 2023.
- [84] S. M. J. Seyed Sabour and B. Ghorashi, "A comprehensive review of major water desalination techniques and mineral extraction from saline water," *Sep Purif Technol*, vol. 349, p. 127913, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2024.127913.
- [85] J. Eke, A. Yusuf, A. Giwa, and A. Sodiq, "The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity," *Desalination*, vol. 495, p. 114633, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.DESAL.2020.114633.
- [86] S. Phuntsho, S. Sahebi, T. Majeed, F. Lotfi, J. E. Kim, and H. K. Shon, "Assessing the major factors affecting the performances of forward osmosis and its implications on the desalination process," *Chemical Engineering Journal*, vol. 231, pp. 484–496, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.CEJ.2013.07.058.
- [87] A. Abushawish et al., "Desalination Pretreatment Technologies: Current Status and Future Developments," *Water* 2023, Vol. 15, Page 1572, vol. 15, no. 8, p. 1572, Apr. 2023, doi: 10.3390/W15081572.
- [88] M. Badruzzaman, N. Voutchkov, L. Weinrich, and J. G. Jacangelo, "Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants: A review," *Desalination*, vol. 449, pp. 78–91, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.DESAL.2018.10.006.
- [89] M. Al-Abri et al., "Chlorination disadvantages and alternative routes for biofouling control in reverse osmosis desalination," *NPJ Clean Water*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, Dec. 2019, doi: 10.1038/S41545-018-0024-8.

Références bibliographiques

- [90] B. M. Souza-Chaves et al., “Extending the life of water reuse reverse osmosis membranes using chlorination,” *J Memb Sci*, vol. 642, p. 119897, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.MEMSCI.2021.119897.
- [91] L. K. Wang, M.-H. S. Wang, N. K. Shammass, and H. H. Hahn, “Physicochemical Treatment Consisting of Chemical Coagulation, Precipitation, Sedimentation, and Flotation,” pp. 265–397, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-61002-9_6.
- [92] H. Ferchichi, M. F. Ben Hamouda, B. Farhat, and A. Ben Mammou, “Assessment of groundwater salinity using GIS and multivariate statistics in a coastal Mediterranean aquifer,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, no. 11, pp. 2473–2492, Nov. 2018, doi: 10.1007/S13762-018-1767-Y/METRICS.
- [93] D. P. Panday, A. Kumari, and M. Kumar, “Alkalinity-salinity-sustainability: Decadal groundwater trends and its impact on agricultural water quality in the Indian Peninsula,” *Science of The Total Environment*, vol. 978, p. 179459, May 2025, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2025.179459.
- [94] L. A. Richards, B. S. Richards, and A. I. Schäfer, “Renewable energy powered membrane technology: Salt and inorganic contaminant removal by nanofiltration/reverse osmosis,” *J Memb Sci*, vol. 369, no. 1–2, pp. 188–195, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.MEMSCI.2010.11.069.
- [95] Y. Cohen, R. Semiat, and A. Rahardianto, “A perspective on reverse osmosis water desalination: Quest for sustainability,” *AIChE Journal*, vol. 63, no. 6, pp. 1771–1784, Jun. 2017, doi: 10.1002/AIC.15726.

Mémoire de fin d'étude en Master : **Caractérisation des eaux des différentes unités de la station de dessalement d'El-Marsa, Skikda.**

Présenté par : **Melle. OTMANI Loubna,**

Encadré par : **Dr. BENIDIR Sofiane et Dr. AITBARA Adel.**

Résumé :

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau douce, le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution stratégique pour garantir l'approvisionnement en eau potable, en particulier dans les régions côtières algériennes. Cette étude se concentre sur l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau aux différentes étapes du traitement au sein de la station de dessalement d'El Marsa (Skikda). L'analyse des échantillons prélevés tout au long du processus permet de suivre l'évolution de la qualité de l'eau et d'évaluer les performances des différentes unités de traitement. Les résultats obtenus offrent des éléments clés pour une meilleure compréhension du procédé, tout en ouvrant des perspectives d'optimisation de la gestion de la station dans une logique de durabilité et d'efficacité.

Mots clés : Eau de mer ; Dessalement ; Station d'El Marsa ; Qualité de l'eau ; Osmose inverse.

Abstract :

In the face of increasing freshwater scarcity, seawater desalination emerges as a strategic solution to ensure a sustainable supply of drinking water, particularly in Algeria's coastal regions. This study focuses on assessing the physicochemical characteristics of water at various stages of the treatment process in the El Marsa desalination plant (Skikda). The analysis of samples collected from different treatment units allows for monitoring changes in water quality and evaluating the performance of the process. The results provide valuable insights for a better understanding of the system and support efforts to optimize plant management from a sustainability perspective.

Key words : Seawater ; Desalination ; El Marsa plant ; Water quality ; Reverse osmosis.

الملخص :

في ظل التناقص المستمر في موارد المياه العذبة، يُعدّ تحلية مياه البحر حلاً استراتيجياً لضمان توفير مياه الشرب، خاصة في المناطق الساحلية الجزائرية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه في مختلف مراحل المعالجة بمحطة تحلية المياه في المرسى (سكيكدة). تُمكن تحاليل العينات المأخوذة من مختلف وحدات المعالجة من متابعة تطور جودة المياه وتقييم كفاءة العملية. تساهم النتائج المتحصّل عليها في فهم أفضل لأداء النظام، وتدعم جهود تحسين تسيير المحطة في إطار رؤية مستدامة وفعّالة.

الكلمات المفتاحية : مياه البحر؛ التحلية؛ محطة المرسى؛ جودة المياه؛ التناضح العكسي.
