



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : REUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES

THEME :

Etude et analyse de l'efficacité de technique membranaire de la station de dessalement de l'eau de mer de CAP BLANC (wilaya d'Oran)

Présenté par :

Mkrarbech Rania

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HACHEMI Abdelkader	M.C.A	Président
KHALED HOULI Samia	M.C.A	Examineur
TAFAT Leila	M.C.A	Examineur
TOUIL Youcef	M.C.B	Examineur
DAHRIA DJOUDAR HALLA	M.C.A	Promoteur

Session Septembre 2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation et à la réussite de ce mémoire de fin d'études, un projet marquant dans mon parcours académique.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à ma promotrice, Mme Djoudar Dahbia, pour son encadrement exceptionnel, ses conseils avisés et sa disponibilité sans faille. Son expertise et son soutien constant ont grandement enrichi ce travail.

Je remercie également les professeurs de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique pour leur enseignement de qualité et leur engagement, qui m'ont permis de développer les compétences nécessaires à la concrétisation de ce projet.

Ma reconnaissance s'étend aux ingénieurs de l'Entreprise Nationale de Génie Civil et Bâtiment, Direction de Traitement des Eaux, ainsi qu'à l'équipe de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc à Oran, pour leur collaboration et leur appui technique. Un merci tout particulier à M. Islem Boughachiche, ingénieur en traitement des eaux, pour son implication remarquable, ses conseils éclairés et son soutien précieux.

Je tiens à adresser une mention spéciale à mes chers amis, qui ont été des piliers tout au long de ces cinq années universitaires. Votre présence, vos encouragements constants, votre aide précieuse et les moments de joie partagés ont été une source inestimable de force et de motivation. Vous avez rendu ce parcours non seulement possible, mais aussi mémorable.

Enfin, je rends un hommage particulier à ma famille, dont l'amour, le soutien moral et financier, ainsi que la confiance inébranlable m'ont porté tout au long de ce projet. Vos encouragements constants et votre foi en moi ont été le moteur de ma persévérance et de ma réussite.

À toutes ces personnes, je vous adresse mes plus sincères et profonds remerciements. Votre contribution, qu'elle soit académique, professionnelle ou personnelle, a été essentielle à l'aboutissement de ce mémoire, et je vous en suis éternellement reconnaissant.

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes sœurs et frère

A ma famille et mes amis

ملخص :

هذا الملخص يعرض فكرة هذا العمل الذي يندرج في إطار البحث عن الحلول البديلة لتغطية العجز في الموارد المائية، حيث يعتبر تحلية مياه البحر عن طريق التناضح العكسي من بين أهم التقنيات المستعملة اليوم لإنتاج مياه صالحة للشرب بجودة عالية وبكميات كبيرة تصل إلى 300000 م³/يومياً في محطة رأس أبيض – وهران. هذا البحث مخصص لدراسة ومقارنة نوعين من الأغشية المستعملة في عملية التناضح العكسي، وذلك من أجل تقييم أدائها من حيث كفاءة الترشيح، استهلاك الطاقة، وضمان استمرارية عمل المحطة. ومن خلال نتائج هذه الدراسة، تبين أن الأغشية من نوع ألجي شام هي الأنسب لعملية التناضح العكسي، لكونها تساهم في تقليل استهلاك الطاقة الكهربائية وبالتالي تخفيض التكاليف التشغيلية للمحطة.

الكلمات المفتاحية : تحلية مياه البحر – التناضح العكسي الأغشية – الاستهلاك الطاقوي – محطة رأس الأبيض

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de solutions alternatives pour pallier le déficit en ressources hydriques. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse constitue aujourd'hui l'une des techniques les plus utilisées pour produire une eau potable de qualité en grande quantité, comme c'est le cas de la station de Cap Blanc – Oran, dont la capacité atteint 300 000 m³/jour. Ce travail est consacré à l'étude comparative de deux types de membranes utilisées dans le procédé d'osmose inverse, afin d'évaluer leurs performances en termes d'efficacité de filtration, de consommation énergétique et de durabilité du système. Les résultats obtenus ont montré que les membranes LG Chem sont les plus adaptées, car elles permettent de réduire la consommation d'énergie électrique et donc de diminuer les coûts opérationnels de l'installation.

Les mots clé : Dessalement de l'eau de mer – Osmose inverse – Membranes – Consommation énergétique – Station de Cap Blanc

Abstract:

This thesis is part of the search for alternative solutions to address the shortage of water resources. Seawater desalination by reverse osmosis is today one of the most widely used techniques to produce high-quality drinking water in large quantities, as in the case of the Cap Blanc plant in Oran, with a capacity of 300,000 m³/day. This work focuses on a comparative study of two types of membranes used in the reverse osmosis process, in order to evaluate their performance in terms of filtration efficiency, energy consumption, and system durability. The findings of this study demonstrated that LG Chem membranes are the most suitable, as they contribute to reducing electricity consumption and consequently lowering the operational costs of the plant.

Keywords: Seawater desalination – Reverse osmosis – Membranes – Energy consumption – Cap Blanc plant.

Listes des planches

- Planche 01 : plan de masse de la station de dessalement
- Planche 02 : plan de situation
- Planche 03 : plan de filtre à cartouches High Flow
- Planche 04 : plan d'arrangement RO 10 racks

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les différents technologies de dessalement	22
Tableau II.2 - Les différents modules d'osmose inverse	29
Tableau II.3 - Les avantages et les inconvénients des modules d'osmose inverse	29
Tableau III.1 - tableau des mesures les paramètres	38
Tableau III.2 - les analyses des données	39
Tableau IV.1 - Les données de base de filtre à cartouche High Flow	60
Tableau IV.2 -les données de base de filtre à cartouche classique	61
Tableau IV.3 -les critères d'évaluation de deux types de filtre à cartouche	63
Tableau V.7 - étude comparative entre deux types membranaires	89

Listes des figures

Figure I.1- Le dessalement par pays. Face à la pénurie en eau potable, de plus en plus de pays se tournent vers cette solution	07
Figure I.2- Répartition mondiale de la production d'eau de dessalement (en millions de m ³ /jour 2008)	08
Figure II.1- Les deux procédés les plus utilisés pour obtenir de l'eau douce	13
Figure II.2- Les techniques de déminéralisation sont utilisées dans divers domaines en fonction du niveau de salinité de l'eau à traiter	13
Figure II.3- principe fondamentale de la distillation	14
Figure II.4 - Schéma d'une distillation à simple effet	14
Figure II .5- Exploration du fonctionnement des systèmes à détente successives (MSF) à 3 niveaux	15
Figure II.6- Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets	15
Figure II.7- Conceptualisation d'une unité d'évaporation intégrant la Compression de Vapeur	16
Figure II.8- principe de dessalement d'une eau saline par l'électrodialyse	18
Figure II.9- le phénomène de l'osmose	19
Figure II.10- le procédé d'osmose inverse.	19
Figure II.11- pression osmotique	23
Figure II .12- Phénomène de polarisation	26
FigureIII.1- La station de dessalement de Cap Blanc depuis Google Earth	35
FigureIII.2- Précipitations de la région d'Oran	36
FigureIII.3- Représentation de la température pendant une année dans la Wilaya d'Oran	37
FigureIII.4 - Présentation des points de prélèvement d'échantillons d'eau	37
FigureIII.5- Tour de captage	40
FigureIII.6- : Vanne d'isolement	41
FigureIII.7 - Le dessablage	42
FigureIII.8 - Le dégrilleur	42
FigureIII.9- schéma du bassin de captage représentant le dégrilleur et le tamis rotatif	43
FigureIII.10 - Les pompes de captage	44
FigureIII.11 - Décanteur à agitation mécanique après injection du coagulant	44
FigureIII.12- mélangeur de fluculation (décanteur)	46

FigureIII.13 - Décanteur lamellaire	46
FigureIII.14 - Les filtres à sable	48
FigureIII.16 -les filtres à cartouches de forme racks	49
FigureIII.17 - Osmose inverse	49
FigureIII.18- Récupérateur d'énergie PX	50
FigureIII.19- cellule de calcite	52
Figure IV.1-Les filtres à cartouches de forme rack CAP BLANC	56
Figure IV.2-Schéma de châssis métallique	57
Figure IV.3- châssis assemblé	
Figure IV.3- tube à pression ROPV	58
Figure IV.5- filtre à cartouche	59
FigureV.1. Bilan hydraulique de la station de dessalement	66
FigureV.2. fenetre initiale de logiciel Wave	67
FigureV.3. Fenetre initiale de logiciel Wave	67
FigureV4. Project information	71
FigureV. 5. Water profil	72
FigureV.6. Les différents type d'eau	73
FigureV.7. osmose inverse de logiciel Wave	73
FigureV.8. Rapport de conception de logiciel Wave	74
FigureV.9. Composition chimique de logiciel	77
FigureV.10. La source d'eau utilisé	77
FigureV.11. Fenetre initiale du logiciel Q+	80
FigureV.12. Fenetre initiale du logiciel du simulation	81
FigureV.13. Project information de Q+	81
FigureV.14. Water profil de logiciel Q+	82
FigureV.15. Les différentes type d'eau proposé par Q+	83
FigureV.16. Design report de logiciel de simulation Q+	85
FigureV.17. Fenetre de project information de Q+	86

FigureV.18- Composition chimique de l'eau (logiciel de simulation LG Chem)

FigureV.17 – La source d'eau d'alimentation de logiciel LG Chem 87

FigureV.19 – Design Report de logiciel Q+ LG Chem 88

Symbole et abréviation

AEP : Alimentation en Eau Potable

CIP : Cleaning In Place

ERI : Energy Recovery Inc

DWEER : Dual Work Exchanger Energy Recovery

HMT : Hauteur Manométrique Totale

HP : Pompe haute pression

kWh: Kilowattheure

MED: Multi Effects Distillation

MENA: Middle East and North Africa

MES : Matières En Suspension

MLD : minimum liquids discharge

MSF: Multi Stage Flash

MSMT: Multi Stage Multi Turbo

NTU: Nephelometric Turbidity Unit OD: Osmose Direct

OD: Osmose Direct

OI : Osmose Inverse

PH : Potentiel hydrogène

Ppm : partie par million

PX : Echangeur de pression

SDI : Silt Density Index

SMBS : Métabisulfite de sodium

TDS: Total Dissolved Solids

VCD: Vapor Compression Distillation

PTM: Pression transmembranaire

Table des matières

Introduction générale :	1
-------------------------------	---

Chapitre I

Introduction :	2
I.1 Généralités sur le dessalement :	2
I .1.1. Différente eaux salines :	2
I .1.2. Salinité et composition des eaux dessalées :	2
I .1.3. Paramètres physico-chimiques des eaux salines :	3
I .1.3.1. Température	3
I .1.4. Teneur en matières en suspension :	3
I .2. Définition de dessalement :	4
I .3. Objectif et importance du dessalement :	4
I .3.1. Objectifs du dessalement :	4
I .3.2. L'importance de dessalement :	4
I .4. Historiques et évolution de dessalement :	5
I .4.1. Premières industries de dessalement dans le monde :	5
I .5. Situation du dessalement dans le monde :	7
I .5.1. Principaux pays utilisateurs de dessalements :	7
I .5.2. Tendances actuelles et perspectives futurs :	8
I .6. Historique du dessalement en Algérie :	10
I .6.1. Capacité et productions actuelles :	10
Conclusion :	11

Chapitre II

Introduction :	12
II.1. Les principales technologies de dessalement :	12
II.1.1. Procédé faisant intervenir à un changement de phase :	13
II.1.1.1. La distillation thermique :	13

II.1.1.2. Les différents types de la distillation :	14
II.1.1.2.1. Procédés de distillation à simple effet :	14
II.1.1.2.2. Procédé de distillation par détente successive (MSF) :	14
II.1.1.2.3. -procédé de distillation à multiples effets (MED) :	15
II.1.1.2.4. Procédé de distillation par compression de vapeur :	16
II.1.1.2.5. Le dessalement par congélation :	16
II.1.1.2. Les techniques chimiques :	17
II.1.1.2.1. Echangeur ioniques :	17
II.1.1.2.2. Extraction par solvants :	17
II.1.1.3. Les procédés de dessalement membranaires :	17
II.1.1.3.1. L'électrodialyse :	18
II.1.1.3.2. L'osmose inverse :	18
II.3. Comparatif globale des Technologies de Dessalement :	20
II.4. Analyse approfondie du procédé d'osmose inverse :	22
II.4.1. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :	22
II.4.2. Membrane d'osmose inverse :	26
II.4.2.1. Introduction aux membranes :	26
II.4.2.2. Classification des membranes utilisées en osmose inverse :	27
II.4.2.3. Duré de vie des membranes :	27
II.4.2.4. Les types de modules.....	28
II.4.2.4. Les performances des membranes :	29
II.4.2.5. Les différents problèmes touchant les membranes :	30
II.4.2.6. Le nettoyage des membranes :	33
Conclusion :	34

Chapitre III

Introduction :	35
III.1. Présentation de la zone d'étude :	35

III.1.1. Evaluation de la pluviométrie :	36
III.1.2. Evaluation de la population :	36
III.1.3. Evaluations de la température :	36
III.1.4. Prélèvement d'échantillons d'eau :	37
III.2. Descriptions détaillées de la station :	39
III.2.1. Prise d'eau de mer et station de pompage :	39
III.2.1.1. La tour de captage :	39
III.2.1.2. Acidification et préchloration :	40
III.2.1.3. Conduite d'amenée :	40
III.2.1.4. Bassin de captage :	40
III.2.1.5. Vannes d'isolement :	41
III.2.1.6. Système de dessablage :	41
III.2.1.7. Systèmes de dégrillage :	42
III.2.2. Bac d'eau de mer et station de pompage :	43
III.2.2.1. Bac de stockage d'eau de mer :	43
III.2.2.2. Pompes d'échantillonnage :	43
III.2.2.3. Pompes d'eau motrices :	43
III.2.2.4. Pompes d'alimentation en eau potable :	43
III.2.3. Prétraitement :	44
III.2.3.1. Coagulation :	44
III.2.3.2. Floculations :	45
III.2.3.3. Décantation lamellaire :	45
III.2.3.4. Filtration sur sable :	46
III.2.3.4. Filtration sur cartouches :	47
III.2.4. Osmose inverse :	47
III.2.4.1. Modules d'osmose inverse :	48
III.2.4.2. Échangeur de pression (PX) :	48

III.2.4.3. Contrôle de chlore résiduel :	49
III.2.4.3. Contrôle de SDI :	49
III.2.4.4. Injection de l'anti scalant :	49
III.2.4.5. Réservoir de perméat/rinçage :	50
III.2.5. Systèmes de reminéralisation :	50
III.2.5.1. Cellules de calcite :	50
III.2.5.2. Réservoirs de l'eau produite :	51
III.2.5.3. Pompes d'eau produite :	51
III.2.6. Systèmes de rejet :	51
III.2.6.1. Bâches de neutralisation :	52
III.2.6.2. Bâche de rejet :	52
Conclusion :	52

Chapitre VI

Introduction :	55
IV.1. Filtre à cartouche de type High Flow :	55
IV.1.1. Description de filtre à cartouche :	55
IV.2. Composition d'un rack :	56
IV. 2.1. Châssis métallique :	56
IV.2.2. Tube à pression :	57
IV.2.3. Cartouches filtrantes :	58
IV.2.4. Autres composants associés au rack	59
IV.3. Le dimensionnement :	59
IV.3.1. Le dimensionnement de filtre à cartouche High Flow :	59
IV.3.2. Filtres à cartouche de système classique (CORSO) :	61
IV.4. Étude comparative entre filtre high flow et filtre classique :	63
IV.5. Discussion et interprétation des résultats :	63
IV.5. 1. Avantages et inconvénients des filtres classiques :	63

IV.5. 2. Avantages et inconvénients des filtres high flow :	64
IV.5. 3.Choix optimal pour les installations de dessalement :	64
IV.5.4. Perspectives d'amélioration et recommandation :	65
Conclusion :	65

Chapitre V

Introduction :	66
V.1 -Différents bilans approximatifs de l'usine de dessalement :	66
V.2-Dimensionnement de l'installation d'osmose inverse :	67
V.2.1-Analyse du quantile des eaux :	68
V.3. – Utilité de WAVE :	69
V. 4-Fonctionnement et interface de WAVE :	70
V.5- Les onglets principaux :	70
V.5.1- Les informations du projet (information project) :	71
V.5.2- Barre d'outils complète :	71
V.5.3- Les données de qualité de l'eau :	72
V.5.4- Osmose inverse (Reverse Osmosis) :	73
V.5.5- Rapport de résumé (Summary Report) :	74
V.6 – Dimensionnement de la station de dessalement de Cap Blanc d'Oran :	75
V.6.1– Les étapes de dimensionnement :	75
V.6 .1.1– Les informations sur le projet :	75
V.6 .1.2 – Détermination le flux transmembranaire :	76
V.6 .1.3– Détermination les types d'éléments membranaire :	76
V.6 .1.3– Calcul le taux de conversion :	77
V.6 .1.4– Calcul le nombre d'éléments nécessaires :	78
V.6 .1.5– Calculer le nombre de tube de pression nécessaires :	79
V.7– Utilité de logiciel LG CHEM :	80
V.8– Fonctionnement et interface de Q+ :	80

V.9- Les onglets principaux :.....	80
V.9.1- Les information du projet (project information) :	81
V.9.2- Barre d'outils complète (comprehensive Toolbar) :	81
V.9.3- Panneau d'entrée de conception (Design Input Panel) :.....	82
V.9.4- Diagramme de flux de processus interactif (Interactive Process Flow Diagram) :	
V.9.5- Génération de rapports dans Q+ (Report generation) :.....	84
V.10- Dimensionnement de la station de dessalement de Cap Blanc d'Oran :	85
V.10.1-Les étapes de dimensionnement :	85
V.10.1.1- Détermination des paramètres de l'eau d'alimentation :	85
V.10.1.2- Définir les conditions de fonctionnement :.....	87
V.10.1.3- Lancer le calcul de spéciation :	87
V.11 – Interprétation les résultats :	88
V.11.1 – Interprétation simulation WAVE (membrane DuPont) :	88
V.11.2 – Interprétation simulation Q+ (membrane LG) :	88
V.12 – Comparaison synthétique entre les deux types de membrane :	89
V.13 – Recommandation technique pour Cap Blanc :	90
Conclusion :	91

[Bibliographiques](#)

Annexes

Introduction générale

Introduction générale :

L'eau douce constitue une ressource essentielle à la vie et au développement économique et social. Cependant, le monde fait face depuis plusieurs décennies à une crise hydrique sans précédent. Cette situation s'explique par plusieurs facteurs, tels que la croissance démographique, l'urbanisation accélérée, l'industrialisation, le changement climatique ainsi que la pollution des ressources naturelles.

Ces contraintes ont conduit à une raréfaction progressive des réserves d'eau douce disponibles, mettant en péril l'approvisionnement en eau potable dans de nombreuses régions. L'Algérie n'échappe pas à cette problématique mondiale. En raison de conditions climatiques arides, d'une pluviométrie irrégulière et d'une forte pression démographique, le pays est confronté à un déficit hydrique chronique. Pour répondre à cette situation critique, l'État a entrepris plusieurs projets stratégiques, notamment la mise en place de stations de dessalement de l'eau de mer, qui représentent aujourd'hui une solution incontournable pour garantir la sécurité hydrique nationale.

Parmi les différentes techniques de dessalement, le procédé membranaire d'osmose inverse s'est imposé comme la technologie la plus efficace et la plus répandue à l'échelle mondiale. Ce procédé permet de produire de grandes quantités d'eau potable de qualité, tout en réduisant de manière significative la consommation énergétique grâce à l'introduction récente de systèmes de récupération d'énergie. Ainsi, l'osmose inverse apparaît comme une réponse stratégique et durable pour atténuer la crise de l'eau, aussi bien en Algérie que dans le reste du monde. Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en cinq chapitres principaux :

Chapitre I : Le dessalement de l'eau de mer en Algérie et dans le monde.

Chapitre II : Les différents procédés de dessalement : distillation, procédés chimiques et procédés membranaires, avec un accent particulier sur l'osmose inverse.

Chapitre III : Description détaillée de la station de dessalement de l'eau de mer de Cap Blanc, depuis la tour de captage jusqu'au rejet de la saumure.

Chapitre IV : Redimensionnement et étude comparative de deux types de filtres à cartouches : le modèle high flow, utilisé à Cap Blanc, et le modèle classique.

Chapitre V : Dimensionnement et étude comparative de deux types de membranes par simulation à l'aide des logiciels WAVE et LG Chem.

Ainsi, ce travail vise à contribuer à une meilleure valorisation des technologies de dessalement en Algérie, et à mettre en lumière l'importance du choix des membranes et des filtres pour améliorer la durabilité et la rentabilité des installations.

Chapitre I

Le dessalement de l'eau de mer dans

l'Algérie et dans le monde

Introduction :

L'eau douce est une ressource essentielle pour notre vie quotidienne et de plus en plus menacée par la croissance démographique, le changement climatique et la pollution. Dans ce contexte, dessaler l'eau marine apparaît comme une option avantageuse pour satisfaire les besoins en eau potable en Algérie ainsi que dans plusieurs pays.

I.1 Généralités sur le dessalement :**I.1.1. Différentes eaux salines :**

Les questions de dessalement touchent principalement deux types d'eaux salées :

-  L'eau de mer
-  Les eaux saumâtres. (21)

I.1.2. Salinité et composition des eaux dessalées :**a. Les eaux de mer :**

La salinité des mers qui s'ouvrent sur les masses océaniques est généralement autour de 35 g/l, et c'est cette valeur qui est considérée comme la salinité standard de l'eau de mer.

1. -Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L-1,
2. -Mer Rouge : environ 40 g.L-1,
3. -Mer Caspienne : 13 g.L-1,
4. -Mer Morte : 270 g.L-1,
5. -Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L-1

Cependant, pour ce qui est des mers ouvertes, la composition en sels varie relativement peu. Plus précisément, la combinaison des ions chlorures et sodium constitue approximativement 85 % du poids global des sels. Cependant, dans les mers closes ou les lacs salés, la concentration par évaporation à partir d'eaux de surface légèrement salées mais différemment relativement à l'eau de mer, peut parfois conduire à des compositions ioniques très spécifiques.

b. Les eaux saumâtres :

Ces eaux peuvent être superficielles, mais elles sont généralement souterraines et s'enrichissent en sels en dissolvant certains minéraux présents dans les sols qu'elles traversent. Leur composition change selon le type de sols traversés et la rapidité de passage dans ces

derniers. On retrouve principalement du CaCO_3 , du CaSO_4 , du MgCO_3 et du NaCl parmi les sels dissous.

La composition de ces eaux est également influencée par d'autres facteurs, dont :

1. La vitesse de circulation de l'eau et, donc, le temps de contact : les solutés déjà existants (dont la solubilité est variable par la force ionique) peuvent permettre à des eaux contenant du chlorure et du gypse d'abriter des volumes de sulfate de calcium largement supérieurs à la solubilité du sulfate de calcium dans l'eau pure (comme on peut l'observer chez certaines eaux souterraines au Qatar).
2. L'évaporation (directe ou via l'évapotranspiration), étroitement associée aux conditions météorologiques, mais également à la profondeur du niveau piézométrique des nappes phréatiques (affectée par les méthodes d'irrigation). (21)

I.1.3. Paramètres physico-chimiques des eaux salines :

I.1.3.1. Température :

- a. **L'eau de mer** : Le long des côtes, la température de l'eau de mer peut varier de plusieurs degrés sous l'influence des courants polaires, et peut atteindre jusqu'à 35°C près de la péninsule arabique. Une haute température facilite la distillation, mais cet atout est restreint car l'eau possède une capacité thermique spécifique très faible comparée à son enthalpie de vaporisation (chaleur latente).
- b. **L'eau saumâtre** : La température des eaux saumâtres varie en fonction de leur provenance et de leur environnement. Les nappes phréatiques saumâtres, telles que celles présentes dans le Sahara, conservent une température assez constante, généralement entre 15 et 25°C . Toutefois, les eaux des estuaires et lagunes côtières connaissent des fluctuations saisonnières plus prononcées, oscillant de 10°C en hiver à 30°C en été. Les rejets industriels et les bassins de saumure provenant du processus de dessalement ont la capacité de générer des températures plus hautes, pouvant aller jusqu'à 40 - 50°C . Ces fluctuations de température ont un impact direct sur les processus de dessalement. Une eau trop froide diminue l'efficacité de l'osmose inverse. Alors qu'une température trop élevée peut nuire aux membranes et faire augmenter les dépenses énergétiques. (23)

a. I.1.4. Teneur en matières en suspension :

Les matières en suspension (MES), constituées de particules organiques (comme le plancton et les débris) et minérales (telles que l'argile et le limon), présentent des variations en fonction des environnements :

1. Eaux marines claires : $0,1$ à 5 mg/L (océans ouverts).

2. Eaux côtières : de 5 à 50 mg/L (impact des vagues et des sédiments).

3. Eaux saumâtres (estuaires, lagunes) : concentrations de 10 à 500 mg/L (variabilité importante en raison des marées et des débits fluviaux). (23)

I.2. Définition de dessalement :

Le dessalement est un processus qui vise à éliminer le sel et autres substances dissoutes présentes dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre, afin de la rendre appropriée à la consommation humaine et industriel.

I.3. Objectif et importance du dessalement :

I.3.1. Objectifs du dessalement :

1. Produire de l'eau potable douce :

Convertir l'eau salée (qu'elle provienne de la mer ou d'eaux souterraines saumâtres) en eau potable, destinée à l'usage humain, agricole ou industriel.

2. Combattre le manque d'eau :

Répondre aux exigences des zones arides, semi-arides ou éloignées où l'accès à l'eau douce est limité (par exemple, le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord).

3. Assurer la sécurité hydrique :

Atténuer les conséquences du changement climatique (telles que les sécheresses et la diminution des précipitations) ainsi que de l'exploitation excessive des aquifères.

4. Appuyer le progrès économique :

Rendre possible l'irrigation agricole, l'exploitation industrielle (par exemple, les centrales électriques) et le tourisme dans des régions où l'eau naturelle fait défaut.

5. Diminuer les tensions géopolitiques :

Réduire la dépendance à l'égard des cours d'eau transfrontaliers ou des ressources communes, qui sont à l'origine de tensions.

I.3.2. L'importance de dessalement :

1. Importance du dessalement Solution vitale pour les populations :

Plus de 300 millions de personnes dans le monde dépendent partiellement ou totalement de l'eau dessalée (ex. Arabie Saoudite, Californie).

2. Adaptation au changement climatique :

Garantir une ressource en eau stable malgré l'augmentation des sécheresses et la montée du niveau de la mer (intrusion saline dans les nappes).

3. Enjeu économique et social :

Sans eau ; industrie ou urbanisation n'est possible. Le dessalement permet le développement de régions autrefois inhabitables.

I.4. Historiques et évolution de dessalement :

L'histoire montre que l'humanité a découvert dès l'Antiquité le principe de base du dessalement : la vaporisation de l'eau saline, suivie de sa condensation, permet d'obtenir de l'eau déminéralisée. Une expérience similaire à la méthode de Saint-Basil (IX^e siècle) a été documentée à bord des navires, tandis que les premiers appareils de distillation ont été développés au XIX^e siècle pour répondre aux besoins maritimes. Cependant, ce n'est qu'au C'est au cours des années 1970 que le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est devenu un procédé industriel fiable pour produire de l'eau douce. Bien que largement utilisé depuis, Son coût élevé (entre 1 et 2 €/m³) a longtemps limité son adoption aux pays à revenu élevé. Ces dernières décennies, l'accroissement des capacités des usines et l'optimisation des technologies ont permis une réduction significative des coûts, élargissant son accès à d'autres régions.

I.4.1. Premières industries de dessalement dans le monde :

À l'échelle mondiale, les premières usines de dessalement ont été mises en place pour répondre aux besoins urgents en eau potable dans les régions arides :

- Années 1950 :

- Première usine industrielle de distillation (MSF – Multi-Stage Flash) construite à Koweït en 1957, avec une capacité de 1,36 million de gallons par jour (environ 5 150 m³/j), développement par : Société Weir West Garth (Royaume-Uni), pionnière des technologies thermiques.

- Années 1960 :

- Première usine MED (Multi-Effet Distillation) en Arabie Saoudite (1965), avec une capacité de 2 500 m³/j, Développement par Entreprise SIDEM (France), aujourd'hui filiale de Veolia.

- Années 1970 :

- Émergence de l'osmose inverse (RO) comme alternative économe en énergie. La première usine à grande échelle utilisant cette technologie est construite en 1975 aux États-Unis (station de Coalinga , Californie), avec une capacité de 150m³/j

- Expansion mondiale :

- Les pays du Golf (Émirats arabes unis, Arabie Saoudite) et Israël deviennent leaders dans le dessalement, avec des usines géantes comme Ashkelon (Israël, 2005 – 330 000 m³/j) et Ras Al-Khair (Arabie Saoudite, 2014 – 1 036 000m³/j).

En Algérie, confrontée à un stress hydrique croissant, le dessalement s'est imposé comme une solution stratégique :

- Premières installations :

- 1964 : Mise en service de la première station à Arzew (capacité de 573 m³/j) utilisant la technologie MED (distillation à effets multiples).

- 1969 : Construction d'une seconde station à Arzew (capacité de 3 000 m³/j) avec la technologie MSF (distillation à évaporation Flash).

- 1980 : Introduction de l'osmose inverse (RO) en Espagne Ciés Islands avec une unité de 273m³/j. [7]

- Expansion depuis les années 1990 :

Pour répondre à la croissance démographique et aux défis hydriques, un programme ambitieux a été lancé, incluant :

- 30 stations de dessalement d'une capacité variant entre 25 000 et 500 000 m³/j, prévues d'être opérationnelles.

- 21 stations déjà en service, produisant 57 500 m³/j au total.

- Projet phare : La station d'Oran, d'une capacité de 500 000 m³/j, a été planifiée dès 2008 comme la plus grande installation d'(RO) d'Algérie. (Mémoire de abdesatar dok yrsli réfère

I.5. Situation du dessalement dans le monde :

I.5.1.Principaux pays utilisateurs de dessalements :

Les principaux pays utilisateurs du dessalement incluent les États du Golfe Persique, avec l'Arabie Saoudite en tête (20 % de la production mondiale), suivie des Émirats Arabes Unis, du Koweït, du Qatar et de Bahreïn, où 60 % des besoins en eau douce dépendent de cette technologie. La Chine se distingue par une croissance fulgurante, dépassant ses objectifs (3 millions de m³/jour visés en 2020), tandis que l'Australie, notamment à Perth, couvre un tiers de sa consommation urbaine via le dessalement. Les États-Unis (Californie), l'Espagne (leader européen) figurent aussi parmi les acteurs majeurs. Enfin, des pays émergents comme l'Algérie, le Chili ou l'Inde développent rapidement cette solution pour répondre aux stress hydriques, illustrant son passage d'une pratique régionale à une ressource vitale pour les mégapoles côtières et les zones arides mondiales (9)

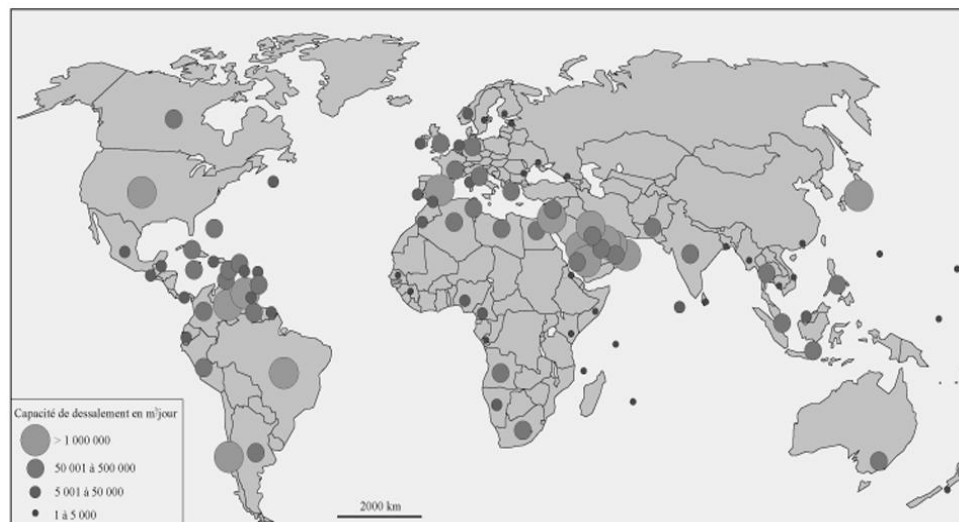


Figure I.1- Le dessalement par pays. Face à la pénurie en eau potable, de plus en plus de pays se tournent vers cette solution (2)

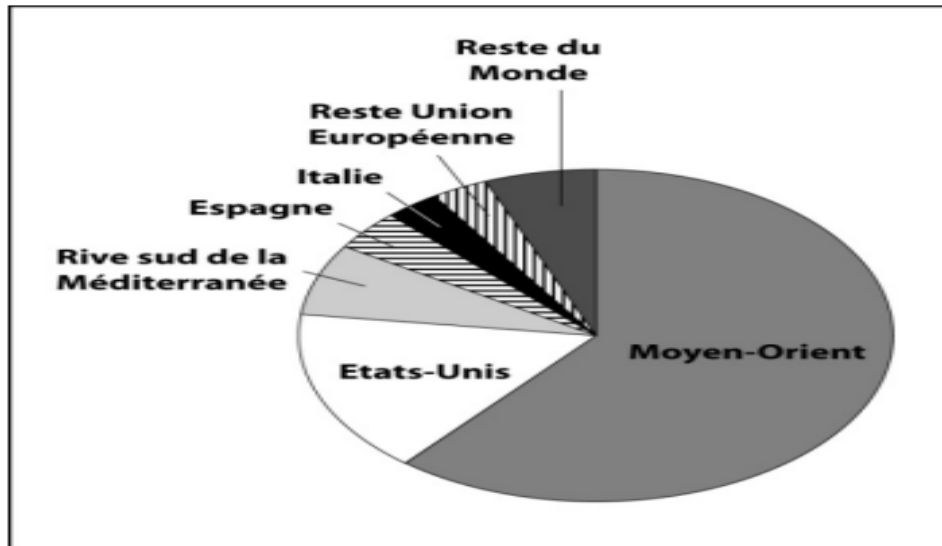


Figure I.2- Répartition mondiale de la production d'eau de dessalement (en millions de m³/jour 2008)

I.5.2. Tendances actuelles et perspectives futurs :

A. Tendance actuelle :

1. Croissance rapide de la capacité installée :

- ✚ La demande en eau douce explose dans les régions arides (Moyen-Orient, Afrique du Nord, Californie, Australie) et les zones urbaines surpeuplées.
- ✚ Des méga-projets voient le jour (ex : usine de Ras Al-Khair en Arabie Saoudite, 1,04 million de (m³/jour).
- ✚ Le marché mondial du dessalement devrait atteindre **30 milliards de dollars d'ici 2030**

(CAGR ~9%).

2. Dominance de l'osmose inverse (RO) :

- ✚ Technologie privilégiée (60-70% des installations) grâce à son efficacité énergétique (3-4 kWh/m³ contre 10-15 kWh pour la distillation thermique).
- ✚ Innovations : membranes polymères à haute perméabilité, systèmes de récupération d'énergie (ex : ERI récupérateur d'énergie).

3. Intégration des énergies renouvelables :

- ✚ Couplage avec le solaire (ex : usine d'Al Khafji en Arabie Saoudite) ou l'éolien pour réduire l'empreinte carbone.
- ✚ Projets pilotes de dessalement "zéro émission" (ex : énergie marémotrice en Australie).

4. Dessalement hybride et réutilisation des eaux :

- ✚ Combinaison RO + distillation membranaire (MD) pour améliorer le rendement.
- ✚ Recyclage des saumures (extraction de minéraux comme le lithium ou le magnésium).

5. Préoccupations environnementales :

- ✚ Gestion des saumures (rejets toxiques) et impacts sur les écosystèmes marins.
- ✚ Régulations plus strictes (ex : normes de dilution, surveillance des rejets).

B. Perspectives futures (2025–2050)

Face à l'aggravation du stress hydrique mondial, le dessalement d'eau de mer s'impose comme une solution stratégique et durable pour répondre à la demande croissante en eau douce. D'ici 2050, les priorités se concentreront sur la réduction de la consommation énergétique, l'intégration des énergies renouvelables et la limitation de l'impact environnemental des installations existantes.

Les tendances actuelles mettent en évidence une transition vers des unités de dessalement à haute efficacité énergétique, souvent alimentées partiellement par l'énergie solaire. Cette approche permet de diminuer le coût du mètre cube d'eau produit tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs projets de dessalement solaire, en Afrique et au Moyen-Orient notamment, ont déjà démontré la faisabilité de cette stratégie à grande échelle.

En parallèle, la décentralisation des systèmes de dessalement émerge comme une solution adaptée aux zones rurales et côtières isolées. Les stations modulaires et compactes permettent d'assurer une production d'eau continue à faible coût énergétique, contribuant ainsi à la sécurité hydrique locale. Cette approche favorise également la maintenance simplifiée et la participation des communautés locales à la gestion des ressources.

Par ailleurs, la valorisation des sous-produits issus du processus d'osmose inverse, notamment la saumure, constitue un levier prometteur pour réduire l'impact environnemental et renforcer

l'économie circulaire. Dans certaines installations modernes, les sels et minéraux sont récupérés pour des usages industriels, transformant les déchets en ressources valorisables.

Enfin, les perspectives du dessalement à l'horizon 2050 s'inscrivent dans une logique d'efficacité, de durabilité et d'intégration technologique. L'objectif principal demeure d'assurer un approvisionnement en eau fiable tout en respectant les contraintes énergétiques et environnementales mondiales.(9)

I.6. Historique du dessalement en Algérie :

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie pétrolière. Le recours au dessalement en vue d'un usage exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est quasi inexistant. Néanmoins une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. il s'agit de l'unité de déminéralisation de Ouled Djellal dans la Wilaya de Biskra (Sud-Est –Algérie). Dans l'industrie, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour assurer la fourniture de l'eau de chaudière, de refroidissement, de traitement. En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'Ouest du pays). Le procédé utilisé est « à tubes submergés » travaillant à basse pression. Au cours de la même année, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560m³/ J. Le procédé utilisé est MSF. Dès lors de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaires à l'activité des complexes de production d'électricité (Cap Djenet à l'est d'Alger) et de l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). D'autres petites unités ont été installées principalement dans le sud en vue de fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières. (11)

I.6.1. Capacité et productions actuelles :

- Premier programme UDEM: ce programme consiste en la réalisation de 11 usines de dessalement d'eau de mer réparties sur tout le littoral algérien totalisant une capacité de production de 2,1 m³/j.
- Programme d'urgence 2021 : Ce programme consiste en la réalisation de 3 nouvelles stations à Alger Est d'une capacité globale de 150.000 m³/j, répartie comme suit : Bateau Cassé 10 000 m³/j ; El Marsa 60 000 m³/j; Corso 80 000 m³/j.

- Programme complémentaire UDEM : consiste en la réalisation de cinq (05) UDEM d'une capacité unitaire de 300 000 m³/j au niveau des wilayas d'El Tarf, Béjaïa, de Boumerdès, de Tipaza et d'Oran, totalisant une capacité de production de 1,5 M m³/j. (commencé en Février 2025). (12)
- Les programmes prévus pour 2026 incluent la réalisation de nouvelles stations de dessalement dans wilayas de Jijel ; Tlemcen ; Mostaganem ; Chlef ; Tizi Ouzou et Skikda ; avec une capacité 300 000 m³/j pour chacune.

Conclusion :

Ce chapitre introductif a posé les bases théoriques et techniques du dessalement, une solution clé pour répondre aux enjeux croissants de la raréfaction de l'eau, en mettant en avant son rôle crucial dans la transformation des eaux saumâtres ou marines en ressources viables. À l'échelle mondiale, y compris en Algérie, un pays confronté à un stress hydrique aigu, cette technologie connaît un essor marqué. En conséquence, elle s'inscrit dans une dynamique accélérée avec le lancement, en février 2025, de projets structurants tels que les stations de CAP DJENNAT(Boumerdes), CAP BLANC(Oran), FOUKA(Tipaza), BEJAIA et TAREF, illustrant son engagement à renforcer sa sécurité hydrique.

Le prochain chapitre offrira une étude détaillée d'une de ces infrastructures.

Chapitre II

Les différents procédés de dessalement

Introduction :

Ce chapitre se consacre à l'étude approfondie des procédés de dessalement, en mettant en lumière leurs principes scientifiques, leurs avantages, leurs limites et leurs domaines d'application. Nous aborderons d'abord les méthodes thermiques, héritées des techniques traditionnelles, telles que la distillation à multiples effets (MED) ou la distillation instantanée multi-étapes (MSF), qui reposent sur l'évaporation et la condensation de l'eau. Ensuite, nous analyserons les procédés membranaires, dominés par l'osmose inverse (RO), devenue la technologie phare en raison de son efficacité énergétique et de son coût compétitif. Enfin, nous explorerons des approches émergentes ou alternatives, comme l'électrodialyse (ED), la cristallisation ou l'utilisation de l'énergie solaire, qui ouvrent des perspectives innovantes pour un dessalement plus durable.

II.1. Les principales technologies de dessalement :

Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes de dessalement de l'eau de mer, dont beaucoup ont atteint le stade industrie ; les deux procédés les plus courants car les plus efficace sont l'osmose inverse et les procédés de distillation, à détente étagée ou à multiples effets ; On peut classer ces méthodes en trois grandes catégories : (2)

1) Méthodes impliquant un changement d'état :

❖ Évaporation.

❖ Congélation.

2) Méthodes chimiques :

❖ Échange d'ions.

❖ Extraction par solvant.

3) Méthodes de perméation sélective à travers une membrane :

❖ Transfert d'ions sous l'effet d'un champ électrique (électrodialyse).

❖ Transfert d'eau sous l'effet d'un gradient de pression (osmose inverse)

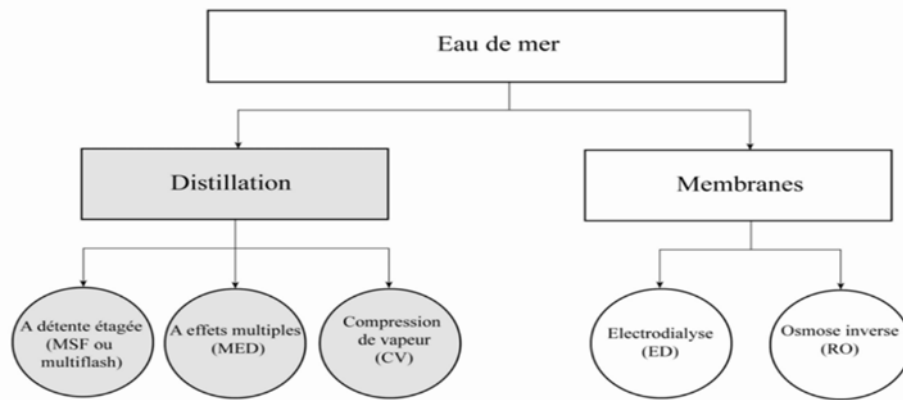


Figure II.1-Les deux procédés les plus utilisés pour obtenir de l'eau douce

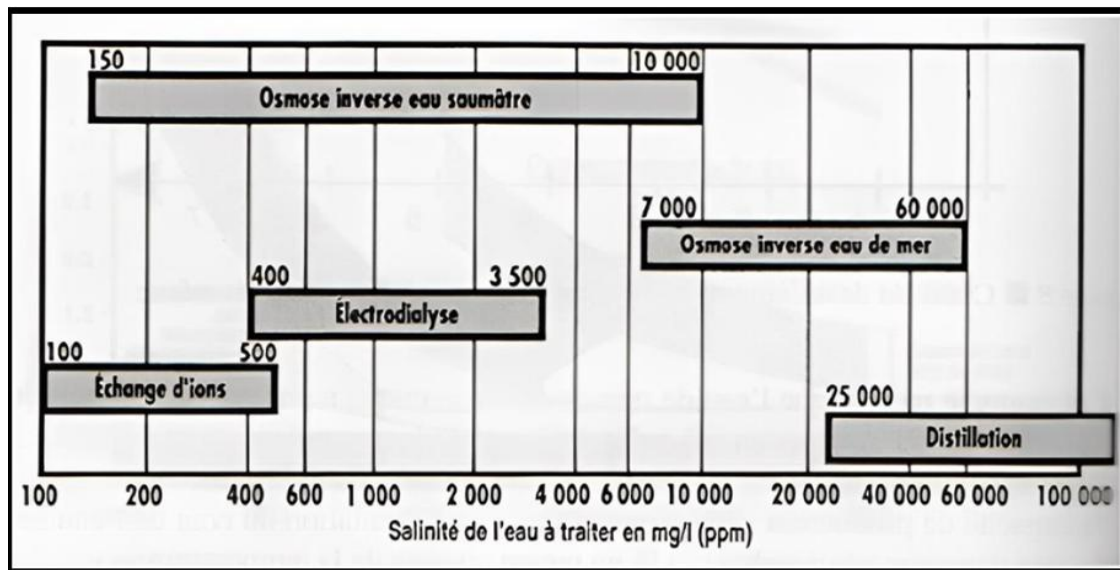


Figure II.2-Les techniques de déminéralisation sont utilisées dans divers domaines en fonction du niveau de salinité de l'eau à traiter (17)

II.1.1. Procédé faisant intervenir à un changement de phase :

II.1.1.1. La distillation thermique :

Consiste simplement à évaporer l'eau de mer. Dans ce cas, principalement on chauffe l'eau dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'évaporent, laissant en dépôt le sel et les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour récupérer de l'eau douce. Ce système exige beaucoup d'énergie : la consommation est d'environ trois fois supérieure à celle du procédé précédent : environ 15 kWh/m³. Mais il donne une eau très pure. Le coût est de 0,65 à 1,8 euro/m³. Cette technique

est en plein essor depuis les années 2000 car on a amélioré le rendement, mais, encore trop gourmande en énergie, elle reste l'apanage des pays riches en pétrole. (4)

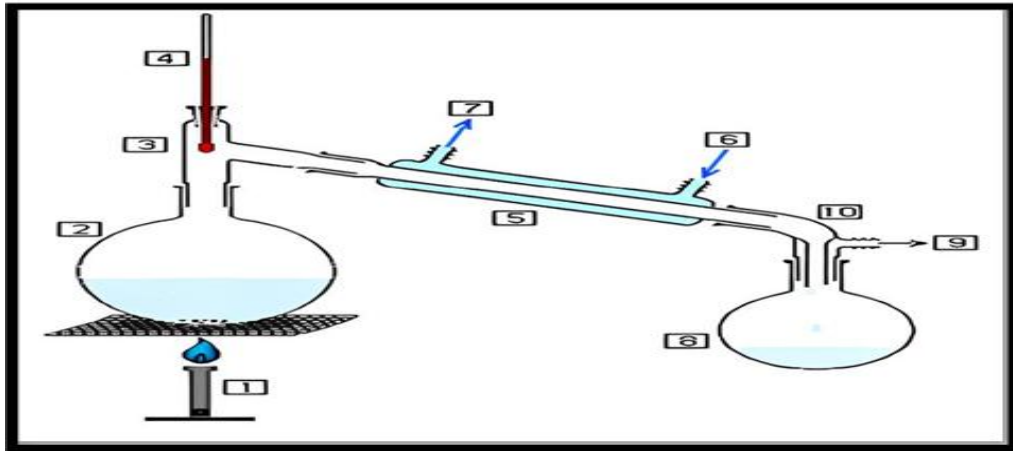


Figure II.3-principe fondamentale de la distillation (17)

II.1.1.2. Les différents types de la distillation :

La distillation est une méthode qui permet de séparer les éléments d'un mélange liquide en les transformant d'abord en vapeur puis en les recondensant. On utilise plusieurs techniques de distillation :

II.1.1.2.1. Procédés de distillation à simple effet :

On utilise une unique étape de condensation pour la production d'un distillat.

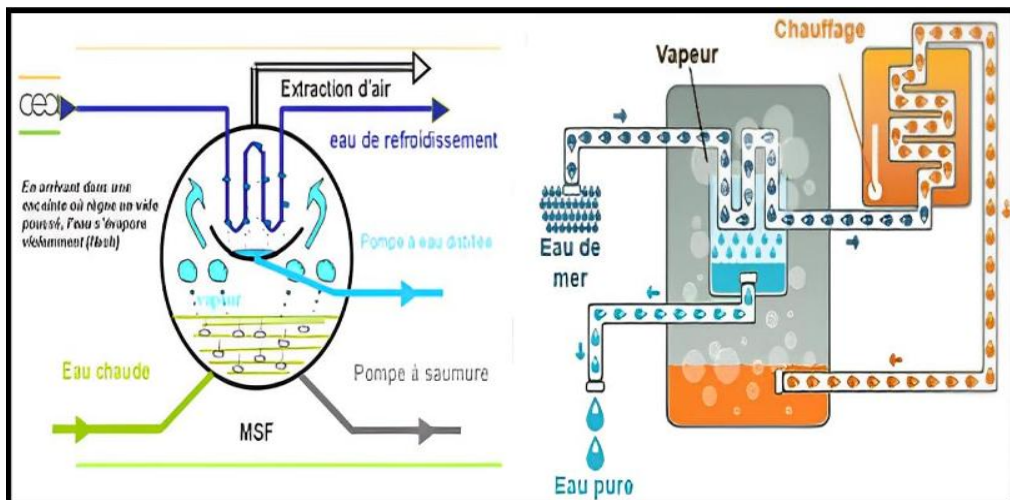


Figure II.4 - Schéma d'une distillation à simple effet (17)

II.1.1.2.2. Procédé de distillation par détente successive (MSF) :

Cette technique consiste en fait à garder l'eau sous pression pendant la durée du chauffage, sa température atteint les 120°C ensuite elle sera introduite dans le premier étage qui possède une pression plus faible. C'est le principe flash, qui va permettre la vaporisation immédiate d'une partie de l'eau à dessaler. Ensuite, l'eau restante traverse un deuxième étage qui a une

pression plus faible que le premier, ce qui permettra la vaporisation, et ainsi de suite. La température de l'eau de mer augmente d'étage en étage pour enfin atteindre 120 °C dans la chaudière (cf. schéma). (6)

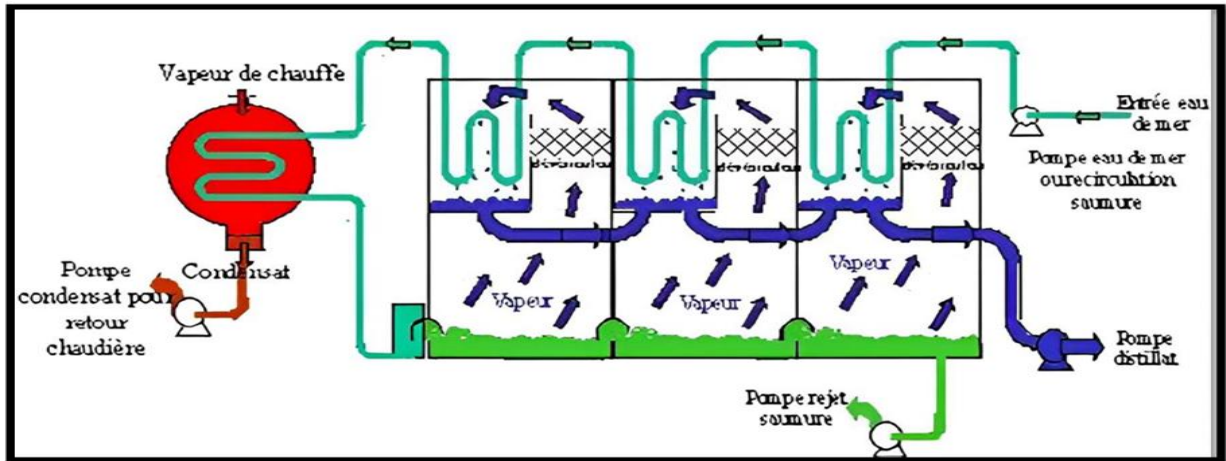


Figure II .5- Exploration du fonctionnement des systèmes à détente successive (MSF) à 3 niveaux (17)

II.1.1.2.3. -procédé de distillation à multiples effets (MED) :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange ; La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression inférieure. Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (8)

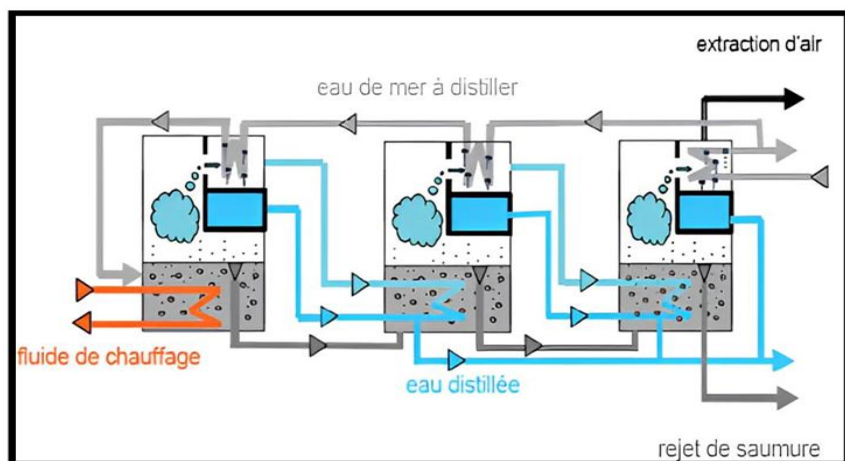


Figure II.6- Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (17)

II.1.1.2.4. Procédé de distillation par compression de vapeur :

Le principe est celui d'une pompe à chaleur. L'eau de mer est évaporée après avoir été préchauffée dans un échangeur récupérateur de chaleur. La vapeur d'eau produite est comprimée après avoir été débarrassée des gouttelettes entraînées par le séparateur. Sa pression ayant été élevée, la vapeur se condense alors à une température supérieure à celle qui règne dans l'évaporateur, grâce au transfert de la chaleur latente de condensation. L'eau douce est extraite ainsi que la saumure à travers tout le cycle d'évaporation - condensation. (8)

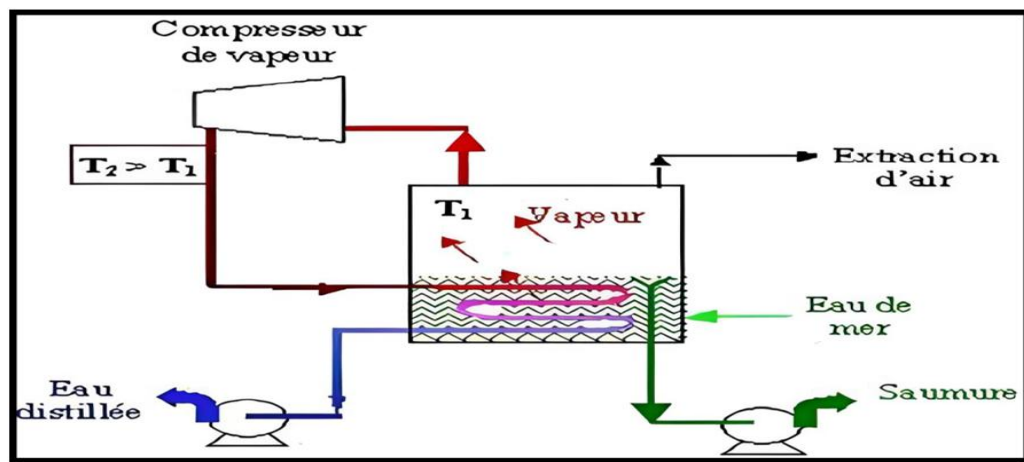


Figure II.7- Conceptualisation d'une unité d'évaporation intégrant la Compression de Vapeur

II.1.1.2.5. Le dessalement par congélation :

La technique de dessalement par congélation consiste à abaisser la température de l'eau de mer jusqu'à environ -2°C , ce qui entraîne la formation de cristaux de glace contenant de l'eau douce. À cette température, l'eau de mer gagne en concentration et présente une plus grande résistance à la congélation. En réduisant davantage la température, la production de glace augmente. Toutefois, lorsque la température descend à environ -9°C , le sulfate de sodium déca hydraté a une tendance à cristalliser, ce qui restreint la génération d'eau potable. Par conséquent, pour obtenir de l'eau pure, il est conseillé de ne pas refroidir la température de l'eau en dessous de Cette méthode est particulièrement bénéfique dans les zones où la température de l'eau est fréquemment sous les 0°C , car elle permet l'utilisation de réservoirs à ciel ouvert. Dans ce contexte, les bassins sont d'abord remplis d'eau en petite quantité, puis une fois qu'une fine couche de glace d'approximativement 1 à 1.5 cm est créée, la saumure est éliminée et la glace est rassemblée. Cette glace est ensuite lavée et fondue, nécessitant environ 30 à 35% de l'eau douce produite pour le processus de nettoyage.

II.1.1.2. Les techniques chimiques :**II.1.1.2.1. Echangeur ioniques :**

La technologie de l'échange d'ions est fréquemment utilisée pour retirer des impuretés spécifiques de l'eau destinée à la consommation. L'échange d'ions, grâce à sa sélectivité élevée, se démarque des autres techniques et est couramment employé dans diverses applications à grande échelle. Il autorise une suppression spécifique de la dureté, des nitrates, du bore, des substances organiques naturelles, des perchlorates, des chromates, de l'uranium ainsi que d'une diversité d'autres métaux. L'échange d'ions consiste en un échange réversible entre les ions structurels d'un matériau qualifié d'échangeur ionique et les ions présents dans la solution. Cette interaction se produit lorsque la solution contenant les ions est en contact avec l'échangeur ionique.

Application dans le dessalement : L'élimination des minéraux de l'eau par échange d'ions nécessite de faire passer l'eau à travers des conteneurs remplis de résines cationiques et anioniques. La résine cationique substitue chaque cation (ions à charge positive) par un cation d'hydrogène, alors que la résine anionique remplace chaque anion (ions à charge négative) par un anion d'oxygène. Les atomes d'hydrogène et d'oxygène, présentant un manque d'électrons, se reforment et finissent par fusionner pour créer des molécules d'eau.

II.1.1.2.2. Extraction par solvants :

L'extraction par solvant est une méthode de séparation employée en chimie pour obtenir un certain composé d'une solution liquide grâce à l'utilisation d'un autre liquide, nommé solvant. Lors de l'extraction d'eau douce à partir d'une solution saline, on utilise un solvant qui se mélange à l'eau mais n'est pas un solvant pour les sels. Par exemple, on peut utiliser l'éthanol comme solvant.

Quand ce solvant est incorporé à la solution saline, il se combine avec l'eau, cependant les sels demeurent non dissous et se distinguent du mélange en formant un précipité. Suite à cette phase, il est possible d'extraire l'eau douce du mélange liquide, alors que les sels demeurent dans le résidu.

II.1.1.3. Les procédés de dessalement membranaires :

Les membranes possèdent la capacité de différencier et de séparer de façon sélective les sels qui sont dissous dans l'eau. En utilisant cette caractéristique de manière distincte dans chaque situation, deux techniques de désalinisation de l'eau par membrane ont été mises au point : l'électrodialyse (ED) et l'osmose inverse (OI).

II.1.1.3.1. L'électrodialyse :

L'électrodialyse est une technique électro membranaire qui permet le transfert des ions à travers des membranes à perméabilité sélective. Le but de l'opération est d'extraire les sels d'une solution, d'où on l'obtient alors, d'un côté une solution saumure très concentrée et de l'autre une solution dessalée sous l'effet d'un courant électrique appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ et les ions Cl^- sont attirés vers l'électrode vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes, les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions traversent les membranes anioniques. On obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments.

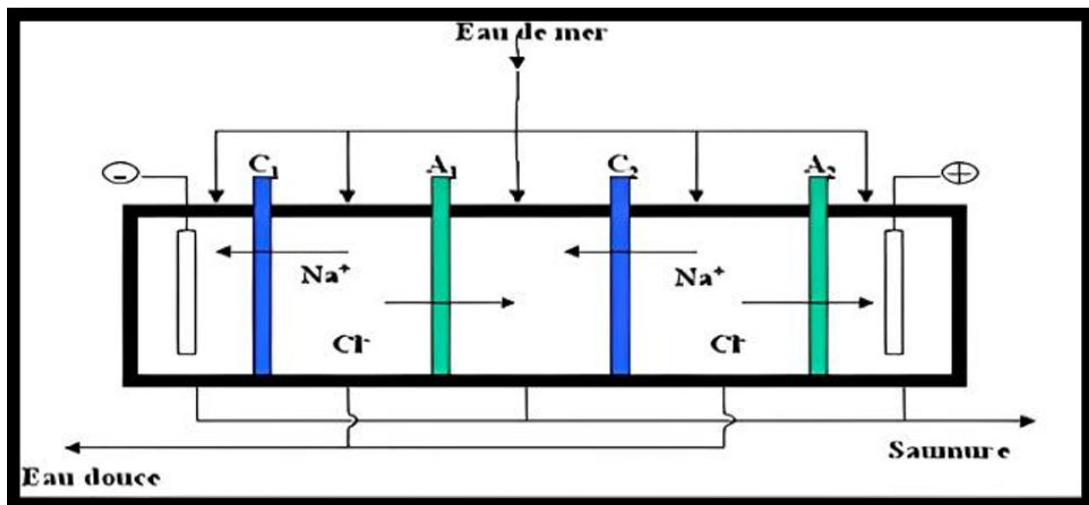


Figure II.8- principe de dessalement d'une eau saline par l'électrodialyse

II.1.1.3.2. L'osmose inverse :

II.1.1.3.2.1. Définition :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour traiter l'eau de mer). Ce processus opère à température ambiante et n'engendre pas de transition de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de 0,5 g. L⁻¹. (13)

II.1.1.3.2.2. Principe de l'osmose inverse :

Pour saisir le concept de l'osmose inverse ; il est essentiel de commencer par la compréhension le phénomène inverse à savoir l'osmose :

L'osmose se base sur un principe essentiel d'équilibre. Lorsque deux liquides avec des concentrations variées de solides dissous entrent en contact, ils se mélangent. Jusqu'à ce

que leurs concentrations se stabilisent. Si une membrane semi-perméable sépare ces deux liquides, qui autorise le passage des liquides tout en retenant les solides. Dissous dans leurs compartiments respectifs, le liquide avec la concentration la plus faible en Les solides dissous vont migrer à travers la membrane vers le liquide avec une concentration plus Élevée. Au fil du temps, le niveau d'eau sera plus élevé d'un côté de la membrane, engendrant une différence de hauteur appelée pression osmotique. (13)

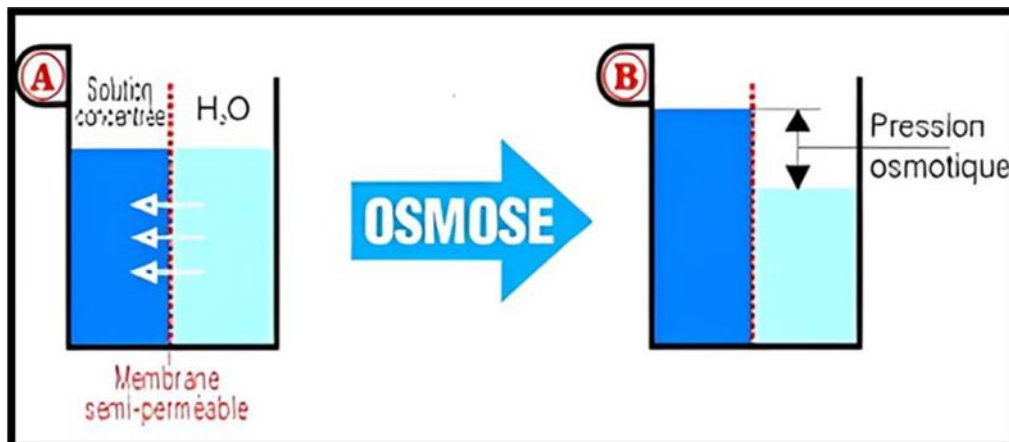


Figure II.9-le phénomène de l'osmose (13)

II.1.1.3.2.3. Description de l'osmose inverse :

L'osmose est définie comme le déplacement d'un solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration. Considérons un système constitué de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable ; et contenant deux solutions de concentrations variées (figure 1). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si nous faisons l'hypothèse simplifiée que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre se nomme pression osmotique. (13)

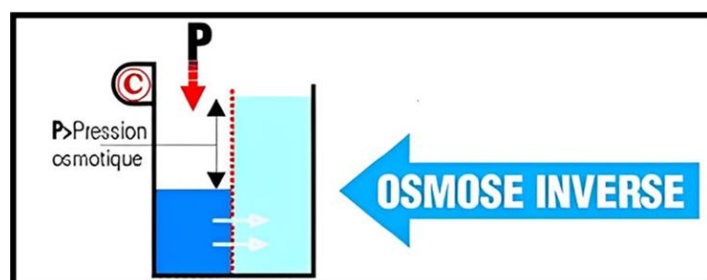


Figure II.10-le procédé d'osmose inverse.

II.3. Comparatif globale des Technologies de Dessalement :

Le tableau illustre une comparaison entre les systèmes de dessalement cités :

Procédé	Cout Investissement	Consommation d'énergie	Avantages principaux	Principaux points faible	Type d'énergie nécessaire
Distillation Multi Flash (MSF)	Elevé	Elevé	1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide et fiable 3. Moins de prétraitement nécessaire. 4. Convient pour une eau Alimentation à TDS élevé	1. Nécessite beaucoup d'eau 2. Plus de saumure à évacuer 3. Grande consommation d'énergie	Chaleur + Courant
Distillation Multi effets (DME) ou compression de vapeur thermique (TVC)	Moyen	Elevé	1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide et fiable 3. Peut utiliser une chaleur de faible intensité 4. Convient pour une eau d'alimentation à TDS élevé 5. Moins de prétraitement nécessaire	1. Grande consommation de chaleur spécifique 2. Faible taux de récupération lorsque l'eau de refroidissement est utilisée	Chaleur + courant
Compression de vapeur mécanique (MVC)	Faible à élevé	Elevé	1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide 3. Petite taille 4. Convient pour une eau	1. Fort entartrage lors de conditions changeantes. 2. Le compresseur mécanique nécessite	Courant électrique

			d'alimentation à TDS élevé	des compétences en F & E	
L'osmose inverse	Moyen	Faible	1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Fiable 3. Petite taille 4. Taux de récupération élevé 5. Temps de mise en route et d'arrêt réduit 6. Convient pour une eau d'alimentation à TDS élevé	1. Le prétraitement nécessite une conception attentive. 2. Sensible à l'encrassement des différents types de membrane. 3. Le changements fréquents des conditions de fonctionnement et/ou les cycles fréquents de mise.	Courant électrique
Electrodialyse	Faible	Faible	1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Fiable 3. Petite taille 4. Taux de récupération élevé	Convient à des TDS jusqu'à 3000 mg/l	Courant électrique
Congélation	Elevé	Elevé	1. l'eau minéralisée et aérée 2. Les appareillages sont moins à la corrosion à basse température	1. coût élevé 2. La séparation des cristaux de glace et de la couche de saumure résiduelle.	Courant électrique

Echangeur s d'ions	Modéré à élevé	Faible	1.Elimine les ions dissous en solution 2.Procédé économique de purification de l'eau	1. N'élimine pas efficacement les bactéries ; les composés organiques les particules et les pyrogène.	énergie chimique
Extraction par solvants	Elevé	Modéré à élevé	1.Utile pour le traitement des solutions à forte concentration	1.Coût élevé 2.Risques associés à la toxicité et à la capacité inflammable des solvants	Energie chimique

Tableau II.1 : Les différents technologies de dessalement

II.4. Analyse approfondie du procédé d'osmose inverse :

II.4.1. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :

On étudier ce processus d'osmose inverse, il est indispensable de comprendre ces paramètres :

a. Pression osmotique :

On peut déterminer la pression osmotique en considérant le comportement des molécules de soluté comme celui des molécules gazeuses.

Dans le cas d'une solution diluée, on peut appliquer la loi des gaz parfaits :

$$\pi V = nRT$$

π : pression osmotique

V : volume de la solution

n : nombre de moles de soluté

R : constante des gaz parfaits

T : température absolue

On peut calculer la pression osmotique en se basant sur la loi de Van't Hoff, qui précise que la pression osmotique d'un soluté est équivalente à celle qu'il exercerait s'il était sous forme gazeuse parfaite occupant le même volume (V) et à la même température (T). Lorsque le soluté se dissocie en i ions, la pression osmotique sera multipliée par i .

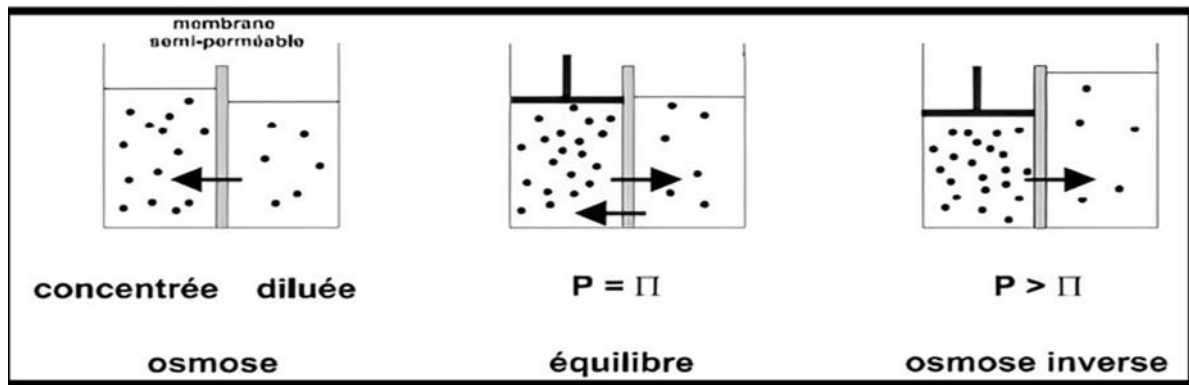


Figure II.11- pression osmotique (13)

La concentration en solutés d'une solution est directement proportionnelle à sa pression Osmotique :

$$\pi = i C R T$$

π : pression osmotique en bar

i : nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : concentration molaire en mol/l

R : constante des gaz parfaits (0,082 l.bar.mol⁻¹. K⁻¹)

T : température absolue en K (14)

Pour une solution saline, on peut estimer de manière approximative que la pression osmotique avoisine les 0,7 bar par gramme par litre de salinité.

$$\pi = 0,7 C$$

π : pression osmotique en bar

C : concentration en sel en g/l

b. Taux de conversion :

Dans la conception et le dimensionnement d'une unité d'osmose inverse, le taux de conversion constitue un critère crucial. Effectivement, un haut taux de conversion permet de minimiser le flux d'alimentation, ce qui conduit à une réduction de la consommation d'énergie. Cependant, cela peut entraîner une augmentation de la charge globale de réactifs chimiques pour éviter la précipitation des sels et prévenir la formation de tartre ; Il est donc essentiel de considérer à la fois les aspects techniques et économiques pour déterminer le meilleur compromis lors du choix d'un taux de conversion optimal.

$$T = 100\% \times Q_p / Q_a$$

Q_p : Débit du perméat (m³/h) ;

Q_a : Débit d'eau d'alimentation des membranes (m³/h). (15)

Le taux de conversion dans le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse correspond à la proportion d'eau douce obtenue par rapport à l'eau salée traitée.

En général, ce taux varie entre 30% et 60%, selon la technologie utilisée et les conditions de fonctionnement.

- Dans le cas des petites unités, un taux de conversion de 10% est parfois adopté. Cela s'explique par le fait que ces unités disposent d'un prétraitement sommaire, ce qui signifie que l'eau de mer n'est pas soumise à un processus de purification avancé avant d'être filtrée par les membranes d'osmose inverse. Ce choix est souvent fait pour réduire la consommation énergétique.
- 30 à 40% : Ce taux est généralement adopté pour les installations de grande capacité qui disposent d'un prétraitement complet. L'objectif est de minimiser les investissements et la consommation énergétique, car un taux de conversion plus élevé nécessiterait une pression plus importante et donc une consommation accrue d'électricité.
- 50 à 60% : Ce taux est de plus en plus utilisé pour réduire les coûts, notamment lorsque la salinité de l'eau de mer est modérée (entre 35 et 36 g/l). Une salinité plus faible permet d'optimiser le fonctionnement des membranes d'osmose inverse et d'améliorer l'efficacité du processus.

c. Le taux de rétention :

C'est un paramètre déterminé par le type de membrane sélectionnée, illustrant sa sélectivité.

La formule :

$$R=100\%(1-C_p/C_a)$$

C_p : concentration de solides dissous dans le perméat en g/l

C_a : concentration de solides dissous dans l'alimentation en g/l

D'ailleurs on peut exprimer le taux de rétention par la conductivité au lieu de la concentration comme suit :

$$R=100\%(1-\sigma_p/\sigma_e)$$

σ_p : La conductivité d'eau du perméat en $\mu\text{s/cm}$

σ_e : La conductivité d'eau d'alimentation en $\mu\text{s/cm}$. (15)

d. Le passage des sels PS :

C'est le rapport entre la concentration du côté production et celle du côté alimentation :

$$\text{PS} = 100 \times C_p / C_A$$

e. Le rejet de sels :

C'est le rapport entre la concentration des sels du côté du rejet et celle du côté de l'alimentation.

$$\text{RS} = 100 \times \frac{C_R}{C_A} = 100 - \text{PS}$$

f. La sélectivité R d'une membrane :

La sélectivité est déterminée par son taux de rejet (ou de rétention) de l'espèce qu'elle est destinée à retenir.

$$R = C_0 - \frac{C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0}$$

C_0 : la concentration de l'espèce à retenir dans la solution ;

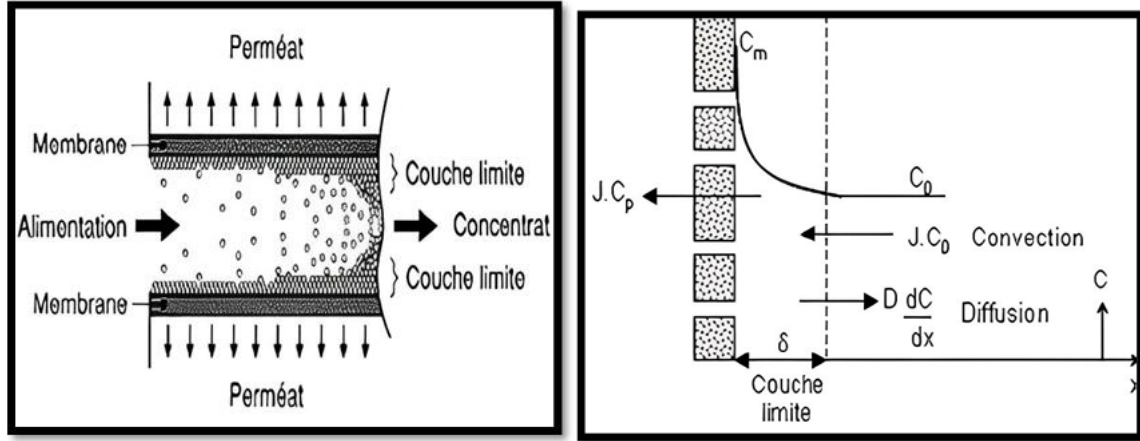
C_p : la concentration de la même espèce dans le perméat. (16)

g. Phénomène de concentration polarisée :

La polarisation de concentration se produit au niveau des membranes sélectives, où s'effectue une accumulation progressive de substances ou une concentration en surface de substances retenues. Ce processus provoque généralement une augmentation de la pression osmotique, ce qui réduit l'écoulement de perméation lorsque la pression moyenne exercée reste stable, tout en entraînant une baisse de la rétention observée.

Dans le cadre de l'osmose inverse, un phénomène restrictif se produit et est désigné sous le terme de polarisation de concentration à proximité de la membrane. Comme le montre la figure ..., cette polarisation se définit par une accumulation d'espèces retenues à la surface de la membrane. La concentration d'une espèce proche de la membrane (C_m) augmente jusqu'à ce qu'un équilibre soit établi entre le flux transféré à travers la membrane en raison du

gradient de pression ($J.C_0$) et le flux de diffusion dans le sens opposé provoqué par le gradient de concentration. Le phénomène réversible de la polarisation de concentration disparaît lorsque la force motrice est supprimée. est donc la formule de facteur de la polarisation est : $\gamma = C_m / C_0$.



Processus de formation de la couche de Polarisation

Variation des paramètres à l'interface membrane-solution

Figure II .12- Phénomène de polarisation (18)

II.4.2. Membrane d'osmose inverse :

III.4.2.1. Introduction aux membranes :

Une membrane est une barrière sélective, faite d'une mince couche, qui offre la possibilité de distinguer un solide d'un liquide à l'échelle microscopique sous l'influence d'une force motrice. Cette force, induite par un gradient de pression, de concentration ou de potentiel électrique, conditionne l'efficacité du processus de séparation. Parmi les applications phares L'osmose inverse se distingue, notamment utilisée dans le dessalement de l'eau de mer, parmi les applications importantes. Les membranes employées dans ce processus, principalement produites à partir d'acétate de cellulose ou de composite polyamide, sont réputées pour leur efficacité hors du commun : elles atteignent des taux de rejet de sels dépassant 99,8 %, proposant ainsi une réponse idéale aux défis globaux de l'accès à l'eau potable. Ces matériaux, qui combinent perméabilité et résistance, illustrent parfaitement comment l'ingénierie membranaire combine principes physico-chimiques et innovation technologique pour des applications durables et ciblées.

II.4.2.2. Classification des membranes utilisées en osmose inverse :

Voici des exemples de membranes fréquemment utilisées en osmose inverse :

a. Membranes organiques :

Membranes organiques : les premiers types de membranes organiques ont été élaborés à partir de dérivés de cellulose et de polyamides aromatiques. Ces substances sont trop sensibles aux bactéries, ce qui les poussées à opter pour les matériaux suivants : acétate de cellulose, poly sulfone, aramide, poly acrylonitrile, polypropylène. Ils utilisent une technique de production qui repose sur l'association d'un polymère et d'un solvant. La distinction des zones riches en polymère qui forment la membrane et des zones vides qui constituent les pores est rendue possible par l'évaporation de ce collodion. Les membranes organiques sont relativement réactives au pH acide et aux températures élevées. (19)

b. Membranes inorganiques ou minérales :

Ces membranes sont constituées de substances totalement minérales, en grande partie des matériaux céramiques, du métal fritté et du verre. Ils ont permis de travailler dans des conditions extrêmes, tant au niveau des températures que de l'exposition chimique. (20)

c. Membranes composites :

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales. (21)

d. Membranes à charge électrique :

Ces membranes peuvent être à densité élevé ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs. Les membranes ayant une charge positive favorisent le passage de cations, celles chargées négativement favorisent le passage d'anions. Donc la séparation à l'aide des membranes chargées est basée principalement sur la répulsion d'ions de même charge, mais également sur la dimension des pores. Le contrôle de la séparation se fait par la charge et la concentration des ions. (20)

I.12 II.4.2.3. Duré de vie des membranes :

Il est difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse. En effet cette durée dépend de la nature de la membrane et les conditions d'utilisation : pression de fonctionnement, température de l'eau, PH et qualité du prétraitement. Les performances des membranes d'osmose inverse évoluent lentement avec le temps, En général, on effectue le

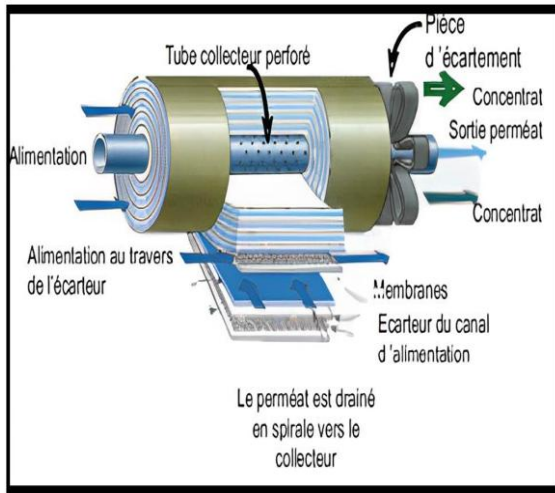
remplacement lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Cependant, pour diverses raisons, l'exploitant peut très bien augmenter la durée de vie des membranes en faisant fonctionner l'installation au-delà de ce seuil. (21)

II.4.2.4. Les types de modules :

Pour être mis en œuvre, les membranes doivent être montées dans des supports modules. Actuellement quatre types de modules sont disponibles dans le marché : (21)

Module	Description
Tubulaire	Des membranes sont disposées ou créées au sein de tubes de support poreux ou perforés (diamètre : 10 à 40 nm). Tubes disposés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique. L'eau de mer sous pression circule à l'intérieur du tube et l'eau douce produite est récupérée à l'extérieur du tube.
Fibre creuses	On regroupe les membranes en paquets et on immerge leurs extrémités dans des embouts adhésifs, qui distinguent le perméat de l'eau à traiter. L'eau traverse les fibres et le perméat est recueilli dans un conteneur où les paquets sont assemblés.
Plan	Ce dispositif utilise des membranes en forme de feuilles, qui constituent la configuration la plus Basiques, similaire à un filtre-presse. Toutefois, la zone de filtration reste restreinte par rapport à l'espace qu'elle occupe.

Spirale



Les modules spiralés sont des cylindres multicouches, constitués d'une superposition de couches de membranes organiques (flexibles) enroulées autour d'un tube perforé qui retient le perméat. Il s'écoule en spirale vers le tube central pendant que le concentrât se déplace le long de l'axe, à travers les canaux formés par les couches de membranes.

Tableau II.2- Les différents modules d'osmose inverse

Module	Avantages	Inconvénients
Tubulaire	Facilité de nettoyage Faible colmatage	Consommation d'Énergie élevé Volume mort important
Fibre creuse	Faible consommation d'énergie Faible volume mort	Sensibilité au colmatage Sensibilité à la viscosité
Plan	Prétraitement simplifié Faible emprise du sol	Faible compacité Volume mort élevé
Spirale	Compacité élevée Faible volume mort Coût d'investissement faible	Sensibilité au colmatage Difficulté de nettoyage

Tableau II.3- Les avantages et les inconvénients des modules d'osmose inverse

(21)

II.4.2.4. Les performances des membranes :

Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour évaluer la performance d'une membrane :

a. La sélectivité :

La sélectivité désigne la capacité de la membrane à capter les substances solubles.

Elle se caractérise par une rétention Tr :

$$Tr = \frac{TDS_{Alimentation} - TDS_{perméat}}{TDS_{Alimentation}} \times 100$$

Où :

$TDS_{Alimentation}$: total de matières dissoutes dans l'alimentation (g/l) ;

$TDS_{Perméat}$: Total des solides dissous dans le perméat (g/l)

b. Le flux transmembranaire :

Il représente la productivité du processus, déterminée par le ratio entre le flux de perméat et la surface de la membrane. Cela traduit aussi la vitesse du fluide à la surface de la membrane.

$$J_p = \frac{Q_p}{S_m}$$

Où :

Q_p : flux du perméat qui traverse la membrane (m³/s)

S_m : surface active de la membrane (m²).

c. La pression transmembranaire :

Il s'agit de la force opérationnelle déterminée par la moyenne des pressions d'alimentations P_a ; moins celle du perméat P_p ; à laquelle on déduit le concentrat P_c

$$P_{tm} = \frac{P_a + P_c}{2} - P_p$$

II.4.2.5. Les différents problèmes touchant les membranes :**a. Définition du colmatage :**

Est une accumulation ou un dépôt réversible ou irréversible de matière solide indésirable ; soit à la surface ou à l'intérieur de la membrane. En général ; cette accumulation modifie l'intégrité de la membrane. Cette modification entraîne une baisse générale de la performance du procédé.

b. Les types de colmatage :

Le colmatage on peut classer en trois types :

1. Colmatage par entartrage :

La saturation des éléments inorganiques dépassant leur seuil de solubilité est la cause principale de l'entartrage d'une membrane, ce qui conduit à une précipitation accélérée sur sa surface. Les dépôts de tartre, qui incluent principalement du carbonate de calcium, du sulfate de calcium, de l'hydroxyde de magnésium et de la silice, créent une fine couche bloquant le passage des matières à travers la membrane.

2. Colmatage par dépôt :

Le colmatage de la membrane peut être dû soit à l'obturation des pores qu'elle contient (bouchage des pores), soit à dépôt de substances sur sa surface par convection. L'obstruction des pores fait référence à l'infiltration et à l'obstruction partielle ou complète des pores de la membrane par des particules susceptibles d'adsorber des composés. Le dépôt de substances par convection a lieu lorsque des particules contenues dans les fluides se fixent sur la surface de la membrane, leur dimension étant équivalente ou supérieure à celle des pores de cette membrane.

3. Colmatage par adsorption :

L'adsorption est un processus irréversible qui résulte des interactions physico-chimiques entre le soluté et la membrane, créant une ou plusieurs couches moléculaires à sa surface et/ou à l'intérieur de ses pores. Une élimination de ce genre de colmatage exige un nettoyage chimique spécifiquement adapté. (22)

c. Évaluation du potentiel de colmatage :

Pour évaluer le colmatage potentiel des membranes d'osmose inverse (OI), différentes méthodes ont été développées. Les plus couramment utilisées sont le Silt Density Index (SDI) et le Modified Fouling Index (MFI) :

1. SDI (Indice de densité des particules) :

Le SDI est perçu comme un baromètre illustratif du potentiel de colmatage d'une eau saline utilisée dans une procédure d'osmose inverse. Il est affecté à la fois par le nombre de particules et d'autres éléments colloïdaux présents dans l'eau. L'essai SDI consiste à faire passer un échantillon d'eau à travers une membrane de 0,45 μm (microfiltration) dotée d'une surface de filtration de $1,73 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, sous une pression transmembranaire stable de 2,07

bar. Le SDI est calculé en mettant en simultané les durées de filtration, t_1 et t_2 , requises pour filtrer un volume défini à l'instant initial (temps 0) et après une durée t spécifique.

$$SDI = \frac{(1 - \frac{t_1}{t_2}) \times 100}{t}$$

Avec :

SDI : Silt Density Index (%min-1)

t_1 : temps initial pour filtrer un échantillon de 500 ml (sec) ;

t : temps après le départ de la mesure (min) ;

t_2 : temps pour filtrer un échantillon de 500 ml après le temps t (sec).

Le **SDI₁₅** ($t = 15$ minutes) est défini comme le temps nécessaire pour des essais précis et normalisés.

Il est nécessaire de conserver le SDI en dessous de 5 pour l'Osmose inverse. Malgré sa popularité dans le secteur du dessalement, le SDI présente diverses contraintes : il s'appuie sur une membrane de microfiltration plutôt que sur une membrane d'osmose, les pressions mises en œuvre durant cette épreuve sont considérablement inférieures à celles imposées en osmose inverse, et les tests se déroulent de manière frontale au lieu de tangente, comme c'est le cas en osmose inverse.

2. MFI (Modified Fouling Index):

L'Indice de colmatage modifié (MFI) segment le processus de filtration en trois étapes distinctes : l'obstruction des pores, la création d'un gâteau non compressible, et la production d'un gâteau compressible. Lors d'une filtration frontale à pression constante, la création d'un gâteau incompressible entraîne une correspondance linéaire entre t/V et V .

Le MFI est déterminé de manière graphique en examinant la pente de la portion linéaire du graphique $t/V=f(V)$.

Il est spécifiquement lié à la formation d'un gâteau à la surface de la membrane, caractéristique du colmatage. Identifié comme MFI_{0,45} dans ce contexte d'utilisation d'une membrane de 0,45 μm , il se démarque donc par rapport à d'autres indicateurs. Sa détermination pratique est comparable à celle du SDI, et son objectif principal est de décrire la fraction particulaire de l'eau plutôt que d'évaluer directement l'obstruction des membranes d'OI. On évalue le volume filtré toutes les 30 secondes sous une pression transmembranaire

de 210 kPa (2,07 bar), et ce, pour une durée maximale de 20 minutes. Il est ensuite possible d'effectuer le calcul du MFI.

$$\text{MFI} = \frac{u_{20}}{u_t} \frac{\Delta P}{\Delta p_0} \tan \alpha$$

Avec :

u_{20} : Viscosité de l'eau à la température 20°C (Pa.s) ;

u_t : Viscosité de l'eau à la température de la solution (Pa.s) ;

ΔP : Pression Transmembranaire appliquée (kPa) ;

ΔP_0 : Pression Transmembranaire à 210 kPa (Référence) ;

$\tan \alpha$: Pente de la partie linéaire de la courbe de $t/V=f(V)$

Pour assurer un rendement idéal de l'osmose inverse (OI), il est conseillé d'avoir un MFI qui se situe idéalement entre 0 et 2 s/L². Toutefois, dans les systèmes d'osmose inverse, établir un lien entre le MFI et l'encrassement provoqué par les colloïdes s'avère complexe. On associe fréquemment ceci à la présence de particules colloïdales dont la taille est inférieure à 0,45 µm. Ainsi, le MFI partage la même contrainte que le SDI quant à l'évaluation du potentiel d'obstruction.

perméat ou uniquement d'air est aussi suggéré. Toutefois, indépendamment de la

II.4.2.6. Le nettoyage des membranes :

On a deux types de nettoyage de membranes le plus utilisable :

a. Les rétro-lavages :

Les rétro-lavages impliquent l'inversion du flux à travers la membrane et l'ajustement du gradient de pression pour diriger le perméat à travers la membrane, facilitant ainsi l'enlèvement des dépôts et des particules susceptibles d'obstruer les pores. La performance d'un processus de filtration est en grande partie conditionnée par l'efficacité des contre-lavages pour assurer une productivité élevée. Bien que les nettoyages à contre-courant soient généralement réalisés avec du perméat, l'emploi d'air et de méthode d'application, les opérations de rétro-lavage ne parviennent généralement pas à rétablir complètement la perméabilité des membranes sur le long terme.

b. Les nettoyages chimiques :

Pour assurer que l'installation fonctionne conformément à ses performances nominales, les nettoyages chimiques sont presque toujours indispensables. Le choix de réaliser un nettoyage

chimique peut dépendre de divers facteurs : une limite maximale de perte de charge à respecter, une réduction du flux de perméat atteignant 20 à 25% par rapport au débit standard, ou un calendrier de nettoyage préétabli, en particulier dans les installations majeures comprenant une grande quantité de modules. Cela offre la possibilité d'effectuer une partie des modules de nettoyage tout en garantissant la production pour le reste.

Conclusion :

Ce chapitre a fourni une analyse détaillée des diverses technologies de dessalement en usage actuellement. Notre analyse comparative a démontré que chaque méthode possède des attributs distincts en matière d'efficacité, de coût et d'impact sur l'environnement.

Chapitre III

Description de la station de dessalement de Cap Blan

Introduction :

Ce chapitre offre une vue d'ensemble de la zone d'étude, à savoir la station de dessalement de CAP BLANC qui se trouve à Ain Kerma dans la wilaya d'Oran. Cette station revêt une grande importance puisqu'elle satisfait la demande pressante en eau douce de la région. Dotée d'une capacité de production de 300 000 m³/j, l'installation de la station de CAP BLANC est un acteur clé pour satisfaire les demandes en eau des communautés locales et appuyer plusieurs secteurs industriels.

III.1. Présentation de la zone d'étude :

La station de dessalement de Cap Blanc se trouve à Ain El Karma, une commune située dans la wilaya d'Oran, en Algérie.

La station s'étend sur une surface totale de 12 ha et possède une superficie construite de 10,58 ha, délimitée de la manière suivante :

- Du côté ouest : par des terrains agricoles ;
- Du côté est : également par des terres agricoles ;
- Au nord : par les eaux de la mer Méditerranée ;
- Au sud : par la montagne du Djebel Eng El Djemel.

La station de dessalement se trouve à la localisation GPS suivante : 35.6855230, -0.9830772.

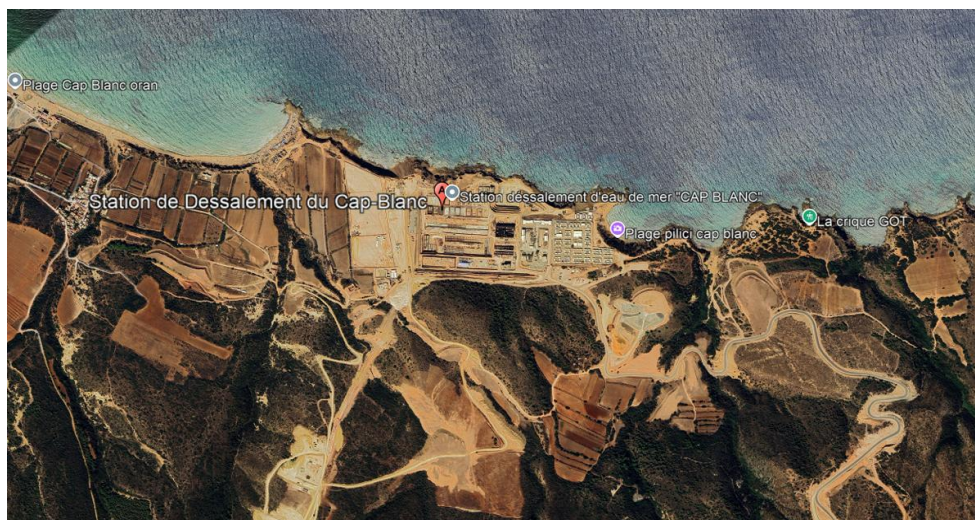


Figure III.1- La station de dessalement de Cap Blanc depuis Google Earth

III.1.1. Evaluation de la pluviométrie :

Dans la zone nord-ouest, on observe généralement des précipitations importantes et inégales. Il y a des années où l'humidité est constante, tandis que d'autres sont marquées par de violents orages qui génèrent en quelques heures l'ensemble des précipitations annuelles.

En 2022, les mois qui ont enregistré le plus de précipitations dans la région d'Oran sont février et novembre. Toutefois, la moyenne mensuelle des précipitations varie et est imprévisible, avec des phases de sécheresse qui s'étendent de juin à août.

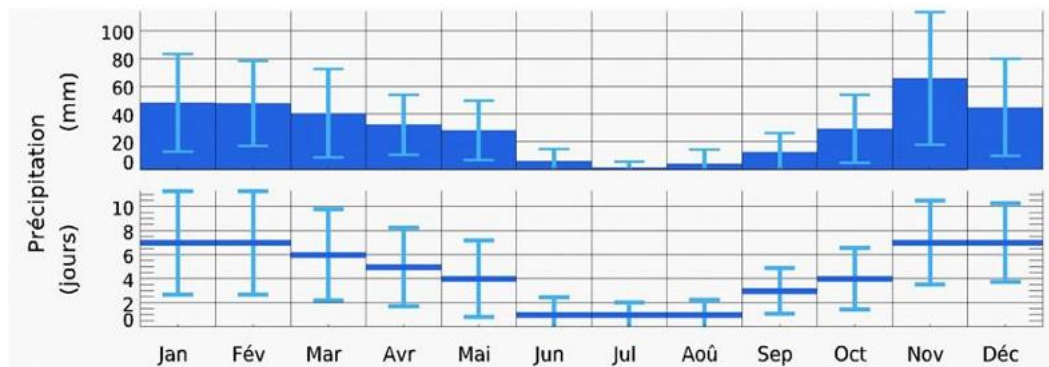


Figure III.2- Précipitations de la région d'Oran (25)

III.1.2. Evaluation de la population :

La station de dessalement de Cap Blanc dessert l'aire urbaine d'Oran, qui comptait environ 1,76 million d'habitants en 2020. En 2025, cette population est estimée à 1,8 million, avec une croissance annuelle d'environ 16 000 habitants. Cette augmentation, observée depuis des décennies (par exemple, de 325 500 habitants en 1966 à 490 800 en 1987), accroît la demande en eau dans une région semi-aride. La station est donc dimensionnée pour fournir 300 000 m³ d'eau par jour afin de répondre aux besoins de cette population croissante. (26)

III.1.3. Evaluations de la température :

Les équipements d'une station de dessalement peuvent être affectés défavorablement par la température de l'air, ce qui peut accroître l'accumulation de tartre, la multiplication des bactéries, la consommation énergétique et la corrosion. Elle peut aussi diminuer l'efficacité des membranes d'osmose inverse ainsi que la génération d'énergie. Il est souvent indispensable de mettre en place des dispositifs de régulation thermique, tels que la climatisation ou l'isolation, afin de limiter ces effets et garantir un rendement optimal de la station.

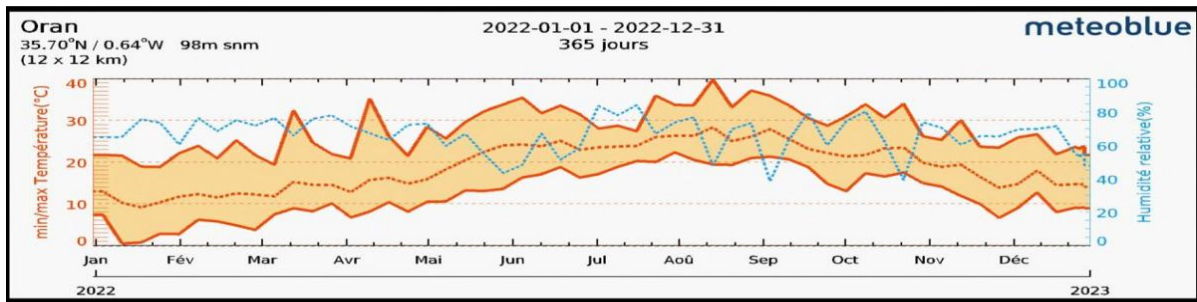


Figure III.3- Représentation de la température pendant une année dans la Wilaya d'Oran (25)

III.1.4. Prélèvement d'échantillons d'eau :

Les prélèvements d'échantillons d'eau de mer sont essentiels lors de l'étape de planification et de conception d'une station de dessalement. Ils permettent de déterminer les caractéristiques chimiques et physiques de l'eau source et d'en évaluer la compatibilité avec diverses technologies de dessalement. La collecte d'échantillons d'eau et de sédiments marins en vue d'analyses chimiques et biologiques en laboratoire a été effectuée durant le mois de juillet 2022, à six (06) stations situées entre les profondeurs -12 m et -22 m.



Figure III.4 - Présentation des points de prélèvement d'échantillons d'eau (25)

Le tableau présente les mesures in-situ réalisées sur les sites d'étude pour les paramètres suivants :

- ✚ Température (T) ;
- ✚ Potentiel hydrogène (pH) ;
- ✚ Salinité ;
- ✚ Oxygène dissous ;
- ✚ Conductivité ;
- ✚ Turbidité.

N° Station		Profondeur (m)	Turbidité (NTU)	T (°C)	S ‰	O ₂	PH	Conductivité (mS/cm)
ST1	S	-1	0.59	24.2	38	8.62	8.17	57.4
	I	-6.5	0.45	24	37.5	8.70	8.17	56.6
	F	-12	0.45	23.5	37.7	9.8	8.16	56.6
ST2	S	-1	0.53	24.2	37.5	8.88	8.17	56.5
	I	-8.5	0.60	23.5	37.6	10.02	8.16	56.6
	F	-18	0.58	23.1	37.5	8.85	8.14	56.5
ST3	S	-1	0.52	24.2	37.9	8.88	8.15	56.5
	I	-8	0.50	24.0	37.9	9.65	8.12	56.7
	F	-15	0.48	23.4	37.7	8.75	8.12	56.7
ST4	S	-1	0.59	24.5	37.5	9.10	8.15	56.8
	I	-11	0.70	24.1	37.6	9.46	8.15	56.6
	F	-21	0.71	23.7	37.5	9.10	8.13	56.1
ST5	S	-1	0.59	23.7	38.4	9.17	8.18	56.5
	I	-8	0.56	23.3	37.6	10.06	8.17	57.8
	F	-15	0.64	23.1	37.6	8.72	8.18	57.7
ST6	S	-1	0.43	25.2	37.4	8.94	8.17	56.8
	I	-10	0.46	24.7	37.4	8.94	8.15	56.5
	F	-19	0.49	24.7	37.5	8.98	8.15	56.6

S : Surface ; I : Intermédiaire ; F : Fond. (25)

Tableau III.1- tableau des mesures les paramètres

Analyse des données :

Température (°C)	23-25.2
Potentiel hydrogène (PH)	8.15
Salinité (‰)	37.75
Oxygène dissous (mg/l)	9.14
Conductivité (mS/cm)	56.75
Turbidité (NTU)	0.43-0.71

Tableau III.2- les analyses des données

III.2. Descriptions détaillées de la station :

La station est constituée de trois éléments essentiels :

1. La chaîne de production d'eau qui se compose de :

- Captage
- Prétraitement
- L'osmose inverse
- La reminéralisation
- Le pompage d'eau produite

2. le bâtiment administratif.

3. laboratoire d'analyse d'eau.

III.2.1. Prise d'eau de mer et station de pompage :

La station de pompage prélève l'eau de mer directement depuis la mer à l'aide de pompes.

Plusieurs phases cruciales sont impliquées dans ce processus :

III.2.1.1. La tour de captage :

Est un dispositif conçu pour rassembler l'eau de mer et la rediriger vers les canalisations d'amenée. Elle est dotée d'un système de dégrillage destiné à éliminer les résidus flottants comme les poissons et autres déchets volumineux.



Figure III.5- Tour de captage

III.2.1.2. Acidification et préchloration :

a. Acidification :

Grâce à une pompe doseuse, l'acidification est réalisée en introduisant une grande quantité d'acide sulfurique H_2SO_4 par le biais d'un tuyau connecté au tuyau de collecte. Cette technique permet d'éviter la précipitation des carbonates de calcium sur les membranes et de maintenir le pH entre 6,9 et 7,2, ce qui favorise à la fois la coagulation et la préchloration.

b. Préchloration :

La préchloration implique d'injecter une dose intensive d'hypochlorite de sodium $NaOCl$ à travers une pompe de dosage dans un tuyau connecté à la conduite de captage. Le but est d'empêcher la croissance des êtres vivants et d'éviter son obstruction.

III.2.1.3. Conduite d'amenée :

Deux conduites parallèles en PEHD d'un diamètre DN 2500 PEHD x 2 et s'étendant sur une longueur de 550 m acheminent l'eau de mer captée vers l'ouvrage de réception.

III.2.1.4. Bassin de captage :

L'eau de mer est captée dans le bassin, qui se trouve à 7 mètres sous le niveau de la mer, avec un débit approximatif de 674 000 m^3/h . Elle est par la suite aspirée vers le réservoir de réception pour continuer le processus de traitement.

➤ **III.2.1.5. Vannes d'isolement :**

Deux vannes motorisées placées sur l'alimentation permettent de couper les conduits si nécessaire.



Figure III.6- : Vanne d'isolement

III.2.1.6. Système de dessablage :

Est un dispositif de dessablage mis en place au niveau de l'arrivée de l'eau sert à retirer le sable et d'autres particules sédimentaires, qui sont par la suite décantées dans une fosse dédiée.



Figure III.7 - Le dessablage

III.2.1.7. Systèmes de dégrillage :

Est un système de dégrillage grossier retire les déchets volumineux comme les poissons, suivi d'un système de dégrillage fin qui permet de capturer les particules plus petites. Le bac de réception est subdivisé en trois sections, toutes pourvues de ces deux formes de gilles (grilles à barreaux) verticales à 90°.



Figure III.8 - Le dégrilleur

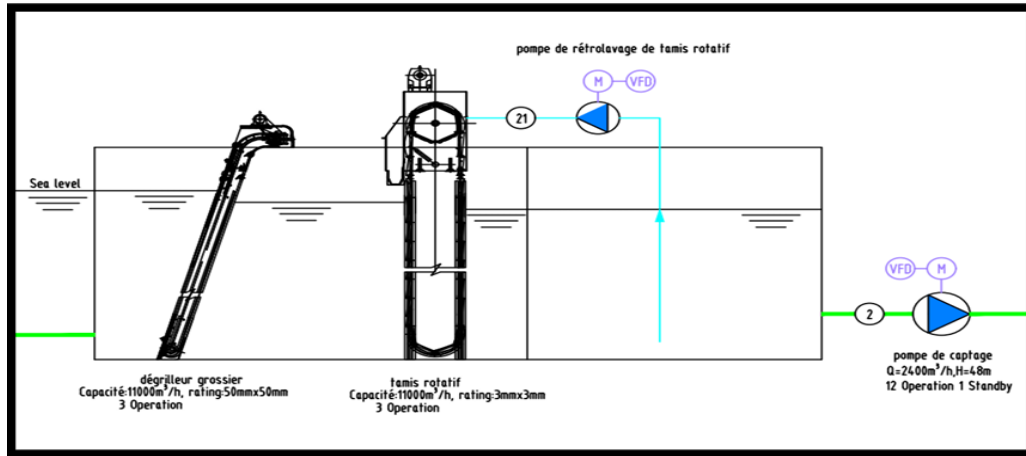


Figure III.9- schéma du bassin de captage représentant le dégrilleur et le tamis rotatif

III.2.2. Bac d'eau de mer et station de pompage :

Le bac d'eau de mer et la station de pompage garantissent le stockage et le transport de l'eau de mer traitée vers les différentes phases du processus de dessalement. Ce système comprend les éléments essentiels suivants :

III.2.2.1. Bac de stockage d'eau de mer :

Ce bac emmagasine l'eau de mer prétraitée avant son transfert vers les installations de dessalement. Il dispose de deux transmetteurs de niveau qui autorisent le contrôle et la gestion du fonctionnement des pompes d'approvisionnement en eau brute.

III.2.2.2. Pompes d'échantillonnage :

Les pompes d'échantillonnage puisent de l'eau du bac pour alimenter les instruments de mesure et assurer un contrôle constant de la qualité de l'eau.

III.2.2.3. Pompes d'eau motrices :

Ces pompes garantissent le déplacement de l'eau de javel utilisée pour la désinfection des deux tours de captage.

III.2.2.4. Pompes d'alimentation en eau potable :

12 pompes à partir d'eau de mer (11 en fonction et 1 en secours) fournissent l'eau potable pour les installations.



Figure III.10 – Les pompes de captages

III.2.3. Prétraitement :

III.2.3.1. Coagulation :

Des bacs de coagulation atténuent les charges des particules afin de les déstabiliser. Un agitateur mécanique garantit l'homogénéisation sur un temps de séjour de 2 min.



Figure III.11 – Décanteur à agitation mécanique après injection du coagulant

III.2.3.2. Flocculations :

Elle se réalise dans des bacs de floculation qui agrègent les particules déstabilisées en flocs plus volumineux grâce à un polymère (floculant) et un mélangeur lent, avec un temps de séjour de 24 heures.



Figure III.12- mélangeur du floculation (décanteur)

III.2.3.3. Décantation lamellaire :

Les flocs sont séparés de l'eau à l'aide de décanteurs lamellaires grâce à la force de gravité. Un dispositif de raclage des boues transporte les sédiments vers une fosse d'extraction.



Figure III.13 - Décanteur lamellaire

III.2.3.4. Filtration sur sable :

- Deux systèmes de filtres à sable horizontaux sous pression garantissent une filtration précise de l'eau avant le processus d'osmose inverse.
- La vitesse de filtration nominale est de 5,5-6,50 m/h.
- Le nettoyage en contre-courant des filtres est réalisé grâce à une saumure stockée dans une bêche.



FigureIII.14 - Les filtres à sable



FigureIII.15 - Les couches de filtre à sable

III.2.3.4. Filtration sur cartouches :

Des filtres en cartouche préservent les membranes d'osmose inverse en éliminant les particules fines restantes après la filtration sur sable.



Figure III.16 -les filtres à cartouches de forme racks

III.2.4. Osmose inverse :

- L'eau qui a été prétraitée et décolorée est acheminée vers l'unité d'osmose inverse destinée à l'eau de mer (SWRO) afin de produire de l'eau dessalée dont la salinité varie entre 57 et 178 mg/l.
- Avant de traverser les membranes, la pression de l'eau est élevée grâce à des pompes haute pression.
- Le taux de conversion fait référence à la séparation du flux d'alimentation en deux parties : 45 % est converti en eau produite (perméat), tandis que 55 % est rejeté sous forme d'eau salée (saumure).
- L'unité d'osmose inverse est dotée de pompes haute pression qui compressent l'eau d'alimentation à environ 60 bars, les tubes de pressions contenant les membranes, un système de récupération d'énergie ainsi que des pompes surpression.



Figure III.17 - Osmose inverse

III.2.4.1. Modules d'osmose inverse :

- L'eau sous pression alimente les tubes RO, où près de 45 % d'entre elle traverse les membranes pour produire de l'eau douce. Le surplus est récupéré sous forme de saumure.
- La perte de charge à travers les membranes est de 1,5 et 2 bars.
- Un système de récupération d'énergie utilise l'énergie provenant du concentré pour alimenter une partie de l'eau d'alimentation destinée aux membranes.
- Le perméat issu de l'osmose SWRO est collecté dans le réservoir de rinçage.

III.2.4.2. Échangeur de pression (PX) :

- L'échangeur de pression transmet l'énergie de la saumure à l'eau d'alimentation RO avec un rendement de 95 % à 97 %.
- Cela permet de minimiser les dimensions des pompes haute pression et d'enregistrer plus de 90% de l'énergie contenue dans la saumure.



Figure III.18- Récupérateur d'énergie PX

III.2.4.3. Contrôle de chlore résiduel :

Le contrôle périodique du chlore résiduel post-microfiltration garantit une protection efficace des membranes d'osmose inverse en préservant des niveaux de désinfection adéquats, tout en empêchant d'éventuels dommages. Ceci favorise l'allongement de la durée de vie des membranes et assure une production constante d'eau douce de qualité supérieure. De surcroît, ce contrôle offre des détails sur l'efficacité de l'étape antérieure (la déchloration), facilitant ainsi la vérification du fonctionnement correct de la pompe doseuse de SMBS.

III.2.4.3. Contrôle de SDI :

Un appareil appelé « SDI AUTOMATIC ANALYZER » est utilisé pour mesurer le SDI (l'indice de colmatage des membranes) à la station.

Si la valeur du SDI atteint ou dépasse 5, cela signifie que le prétraitement antérieur n'a pas été performant et que l'eau prétraitée pourrait entraîner le colmatage des membranes d'osmose inverse. Dans cette situation, le mécanisme d'opération dirige l'eau prétraitée vers la mer par bypass. Si le SDI est en dessous de 5, l'eau est orientée vers le processus d'osmose inverse. Avant son arrivée à l'OI, le pH, la température, la conductivité et la turbidité de l'eau microfiltrée sont mesurés grâce à des capteurs.

III.2.4.4. Injection de l'anti scalant :

Avant de diriger l'eau vers l'osmose inverse, il est indispensable d'ajouter un antiscalant. L'anti-scalant est un agent inhibiteur de la formation de tartre, en particulier du CaCO_3 et du CaSO_4 .

L'anti-scalant augmente le niveau de saturation en eau et en sels, offrant ainsi une protection aux membranes contre la formation de dépôts de sels de calcium.

L'anti-scalant est introduit de manière continue grâce à une pompe doseuse dans un mélangeur statique, et la quantité à utiliser est déterminée par le logiciel « ROPUR » suite à une simulation basée sur les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau à traiter.

Il faut souligner que :

1. Lors de l'application de l'anti-scalant, les deux pompes haute pression et le booster doivent être en marche.
2. Suite à une absence de fonctionnement de la station pendant plusieurs jours, il est crucial de réaliser L'injection de biocide est effectuée afin d'éliminer les croissances biologiques des micro-organismes et de préserver les membranes d'osmose inverse contre le biofilm.

3. L'injection du biocide se fait à l'aide d'une pompe doseuse dans le même mélangeur statique que celui utilisé pour l'anti-scalant.
4. Lors de l'injection du biocide, la pompe haute pression est active tandis que la pompe booster est inactive.

III.2.4.5. Réservoir de perméat/rinçage :

Une partie de l'eau produite par les installations d'osmose inverse est stockée dans un réservoir en PRV³, servant à rincer les unités et à approvisionner la station de nettoyage chimique des membranes.

III.2.5. Systèmes de reminéralisation :

La reminéralisation modifie l'indice de saturation calcique (LSI) du perméat issu de l'osmose inverse afin d'obtenir une eau neutre, dépourvue de corrosion et d'accumulation de tartre. Cela nécessite l'ajustement de la dureté et de l'alcalinité de l'eau par la dissolution de calcite (calcaire) et en injectant de l'acide ou du CO₂.

III.2.5.1. Cellules de calcite :

Le flux de perméat sortant des racks d'osmose inverse est divisé en deux parties distinctes. Une partie est par la suite combinée à l'eau reminéralisée, alors que l'autre partie est dosée en CO₂ et introduite dans des cellules de calcite.



Figure III.19- cellule de calcite

III.2.5.2. Réservoirs de l'eau produite :

Deux réservoirs rectangulaires en béton armé contiennent l'eau traitée avant sa distribution. Un revêtement époxy protège les parois face à l'agressivité de l'eau.

III.2.5.3. Pompes d'eau produite :

Des pompes garantissent le pompage vers le réseau de distribution.

III.2.5.4. Pompes d'eau potable :

Deux pompes (une en fonctionnement et une de secours) alimentent le réseau d'eau potable.

III.2.6. Systèmes de rejet :

III.2.6.1. Bâches de neutralisation :

Elle collecte les eaux issues du nettoyage des filtres à sable ainsi que les eaux usées provenant du nettoyage chimique des membranes. Le pH de l'eau est neutralisé par la soude caustique et l'acide chlorhydrique.

III.2.6.2. Bâche de rejet :

Elle accueille les eaux saumures en surplus de la bâche de saumure. Elle garantit le transfert des rejets vers la conduite d'évacuation. Il y a également des systèmes pour doser l'acide et la soude caustique.

III.2.6.3. Chaîne de traitement des boues :

Elle traite les eaux de lavage des filtres à sable et des boues du décanteur lamellaire. Ces eaux sont collectées dans une bâche puis pompées vers deux décanteurs lamellaires. Les eaux claires sont dirigées vers la bâche de neutralisation, tandis que les boues sont acheminées vers deux épaisseurs. L'eau claire provenant des épaisseurs est dirigée vers le réservoir de neutralisation, tandis que la boue épaissie est transférée vers les centrifugeuses pour améliorer sa sécheresse. La déshydratation de la boue est recueillie et le liquide de drainage est réacheminé vers la bâche de neutralisation.

Conclusion :

En conclusion ; ce chapitre à présenter l'analyse détaillé de la zone d'étude et les caractéristiques de l'eau de mer qui constitué une étape cruciale pour une bonne planification de station de dessalement Cap Blanc. Et donne les processus offshore et onshore détaillé, depuis la prise d'eau jusqu'à post-traitement ; chaque filière joue un rôle essentiel pour garantir la production d'eau potable de qualité.

Chapitre IV

Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

Introduction :

Dans le processus de dessalement par osmose inverse, la filtration finale en prétraitement joue un rôle déterminant pour protéger les membranes contre le colmatage et assurer l'efficacité globale du système. Ce chapitre se concentre sur le dimensionnement et l'analyse comparative de deux technologies de filtres à cartouches utilisées comme dernière étape de prétraitement : un système innovant High Flow sous en rack installé à Cap Blanc (Oran) et une configuration classique. À travers une approche combinant données terrain, calculs théoriques et observations opérationnelles, nous évaluerons leurs performances techniques (efficacité de filtration, perte de charge, impact sur les membranes) et économiques (coûts d'investissement et d'exploitation). Cette étude vise à déterminer la solution optimale pour les installations algériennes de dessalement, en tenant compte à la fois des contraintes locales et des enjeux de durabilité. Les résultats permettront d'établir des recommandations concrètes pour l'amélioration des systèmes existants et la conception de futures installations.

IV.1. Filtre à cartouche de type High Flow :

IV.1.1. Description de filtre à cartouche :

Définition :

Un filtre à cartouche de type high flow est un dispositif de filtration mécanique utilisé en prétraitement dans le dessalement de l'eau de mer, conçu pour traiter un haut débit tout en éliminant les particules en suspension de taille supérieure à 5 μm et autres impuretés avant leur passage dans les membranes d'osmose inverse.

Il se compose d'un support en plastique, qui contient à l'intérieur une cartouches filtrantes amovibles. Ces cartouches, fabriquées à partir de matériaux poreux tels que le polypropylène, le polyester ou des fibres synthétiques, capturent les particules lorsque l'eau de mer circule à travers elles.

Ce type de filtre est intégré dans un système rack, un châssis préassemblé facilitant l'installation et l'intégration, comprenant des tubes de pression, chacun abritant une cartouche

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

filtrante. Cette configuration garantit une filtration efficace, protège les membranes d'osmose inverse et permet une maintenance aisée grâce à la facilité de remplacement des cartouches.



Figure IV.1-Les filtres à cartouches de forme rack CAP BLANC

IV.2. Composition d'un rack :

Un rack pour filtre à cartouche de type high flow est un système préassemblé conçu pour faciliter l'installation et l'opération de filtration en prétraitement du dessalement. Il regroupe plusieurs composants essentiels, décrits ci-dessous :

IV. 2.1. Châssis métallique :

1. Description :

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

Le châssis est une structure, généralement fabriquée en acier inoxydable (comme l'acier 316L) ou en acier au carbone revêtu pour résister à la corrosion causée par l'eau de mer et les environnements salins. Il sert de base pour supporter et organiser tous les autres composants du rack.

2. Fonction :

Assure la stabilité et l'alignement des tubes à pression, des tuyauteries et des instruments.

Peut inclure des points de levage, des pieds réglables ou des ancrages pour une installation sur site.

3. Caractéristiques :

Structure soudée ou boulonnée, avec un revêtement anti-corrosion (peinture époxy ou galvanisation).

Dimensions compactes adaptées aux contraintes d'espace des usines de dessalement.

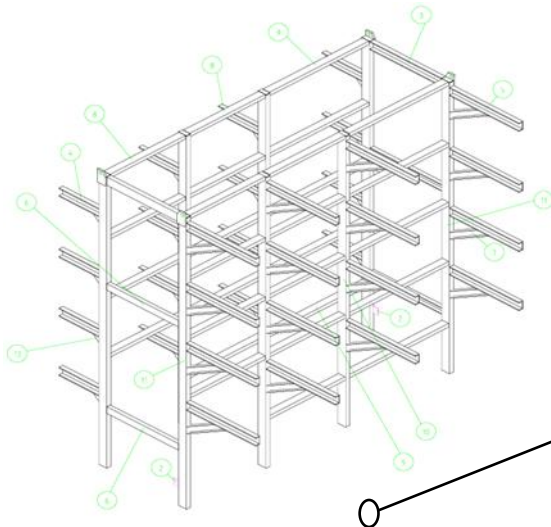


Figure IV.2-Schéma de châssis métallique



Figure IV.3- châssis assemblé

IV.2.2. Tube à pression :

1.Description :

Les tubes à pression, également appelés boîtiers de filtration, sont des cylindres robustes conçus pour contenir les cartouches filtrantes. Ils sont généralement fabriqués en acier inoxydable (316L) ou en matériaux composites comme le plastique renforcé de fibres (FRP, Fiber-Reinforced Plastic) pour résister aux pressions élevées (jusqu'à 10 bars ou plus) et à la corrosivité de l'eau de mer.

2.Fonction :

Logent les cartouches filtrantes high flow et assurent une étanchéité parfaite pour diriger le flux d'eau à travers les cartouches.

Protégés contre la pression élevée générée par les pompes en amont.

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

Permettent un accès facile pour le remplacement des cartouches grâce à un couvercle amovible (souvent à boulons ou à fermeture rapide).

3.Caractéristiques :

- ✚ Diamètre et longueur adaptés à la taille des cartouches high flow (généralement de 6 à 8 pouces de diamètre).
- ✚ Équipés de raccords d'entrée et de sortie (type à brides ou fileté) pour une intégration avec la tuyauterie du skid.
- ✚ Incluent des joints d'étanchéité (en EPDM ou Viton) pour prévenir les fuites.



Figure IV.3- tube à pression ROPV

IV.2.3. Cartouches filtrantes :

1.Description :

La cartouche filtrante est l'élément actif du système, composée de matériaux poreux tels que le polypropylène plissé, le polyester, la cellulose ou d'autres fibres synthétiques. Elle est conçue pour offrir une grande surface de filtration, permettant un haut débit tout en retenant les particules fines.

2.Fonction :

Capture les particules en suspension (supérieures à 5 μm , comme les sédiments, algues ou matières organiques) pour protéger les membranes d'osmose inverse en aval.

Minimise la perte de pression grâce à sa conception optimisée pour les hauts débits.

Facilement remplaçable pour réduire les temps d'arrêt lors de la maintenance.

3.Caractéristiques :

- ✚ Taille standard pour les filtres high flow (longueur de 20 à 60 pouces, diamètre de 6 à 8 pouces).
- ✚ Porosité typique de 1 à 10 microns, adaptée aux besoins du dessalement.
- ✚ Structure plissée pour maximiser la surface filtrante et prolonger la durée de vie de la cartouche.
- ✚ Résistance chimique et mécanique pour supporter l'eau de mer et les cycles de nettoyage.

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches



Figure IV.5- filtre à cartouche

IV.2.4. Autres composants associés au rack

1. Tuyauteries et vannes :

En acier inoxydable ou PVC résistant à la corrosion, elles acheminent l'eau de mer vers et depuis les tubes à pression. Les vannes (manuelles ou automatiques) permettent d'isoler les tubes pour la maintenance.

2. Instrumentation :

Des manomètres, débitmètres ou capteurs de pression sont souvent intégrés pour surveiller les performances du système et détecter les colmatages.

IV.3. Le dimensionnement :

IV.3.1. Le dimensionnement de filtre à cartouche High Flow :

1. Les données de base :

Caractéristique de filtre High Flow	
Diamètre de cartouche	155mm
Longitude de cartouche	1627mm
Débit nominal d'un seul élément	$60m^3/h$
Différentielle de pression	1.5bar
Seuil de rétention	$\geq 98\%$
Capacité de filtration	5 μm

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

Tolérance de PH	0_12
Epaisseur	1,4_1,6 mm

Caractéristique de Tube à pression	
Diamètre de tube	250mm
Matériel	PRV
La pression	10 bar
Longitude	1835mm
Température de fonctionnement	14~30 °C

Tableau IV.1- Les données de base de filtre à cartouche High Flow

2. Calcul :

1. Calcul débit d'entrée filtre à cartouche :

$$Q_{\text{entrée}} = \frac{Q_{\text{production}}}{\text{taux de conventions}}$$

$$Q_{\text{entrée}} = \frac{300\,000}{0,45}$$

$$Q_{\text{entrée}} = 666\,666,67 \text{ m}^3/\text{J} = 27\,777,78 \text{ m}^3/\text{h}$$

2. Calcul de débit de filtre à cartouche pour une ligne :

$$Q_{\text{ligne}} = \frac{Q_{\text{entrée}}}{\text{nombre de ligne}}$$

$$Q_{\text{ligne}} = \frac{27\,777,78}{10}$$

$$Q_{\text{ligne}} = 2\,777,78 \text{ m}^3/\text{h}$$

3. Calcul de nombre des éléments dans un filtre à cartouches :

$$N = \frac{Q_{\text{ligne}}}{\text{débit nominal d'un seul élément}}$$

$$N = \frac{2777,78}{60}$$

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

N= 46,29

On choisit : N= 47 éléments

Chaque filtre à cartouche comporte

$$47 \left\{ \begin{array}{l} \text{tubes de pression} \\ 47 \text{ filtre éléments} \end{array} \right\}$$

IV.3.2. Filtres à cartouche de système classique :

1. Description de système classique :

C'est un processus de prétraitement de l'eau de mer, avant son dessalement dans les modules d'osmose inverse, qui inclut le système de filtration par cartouches. Le but de ce système est de réaliser une filtration sécuritaire afin de capturer les particules de taille réduite susceptibles de nuire aux équipements du système.

Les cartouches de filtration sont principalement produites à partir de polypropylène en raison de sa capacité d'absorption d'eau minimale. Ce matériau présente une densité très faible, comprise entre 0.90 et 0.93 gr/cm³, ce qui confère aux cartouches une légèreté appréciable. Par ailleurs, c'est un matériau qui se recycle aisément, un point crucial à considérer puisque les cartouches de filtres nécessitent un changement périodique.

Pour garantir une protection efficace des membranes d'osmose inverse, le choix d'une cartouche de microfiltration ayant un seuil de rétention de 5 micromètres (µm) et une efficacité de filtration de 99,9 % s'avère conseillé. Cela indique que la cartouche peut efficacement capturer 99,9 % des particules de 5 µm ou supérieures dans le courant à filtrer, offrant ainsi une protection efficace contre les impuretés de taille capable d'endommager les membranes d'osmose inverse.

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

2. Les données de calcul :

Caractéristique de cartouche filtrante classique	
Diamètre de cartouche	60mm
Longitude de cartouche	1778mm
Débit pour chaque filtre	995 m^3/h
Perte de charge	1bar
Vitesse de filtration	14,21 m/h
Seuil de rétention	5 μm
Capacité de filtration	99%

Tableau IV.2-les données de base de filtre à cartouche classique

3.Calcul du filtre à cartouche :

La surface de chaque cartouche :

$$S = 2 \pi r (h + r)$$

$$S = 2 \times 3.14 \times 0.03(1.778 + 0.03)$$

$$S = 0.34 m^2$$

Calcule le nombre des cartouches pour chaque filtre :

$$N = \frac{Q}{v \times S}$$

$$N = \frac{995}{14.21 \times 0.34}$$

$$N = 205.94$$

Donc on prend chaque filtre contient 206 cartouches type PP-5

Calcule la surface totale des cartouches par un seul filtre :

$$St = S * N$$

$$St = 0.34 * 206$$

$$St = 70.04 m^2$$

Calcule la Vitesse adoptée :

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

$$V = \frac{Q}{S_t}$$

$$V = \frac{995}{70.04}$$

$$V = 14.21 \text{ m/h}$$

IV.4. Étude comparative entre filtre high flow et filtre classique :

Voici un tableau comparatif qui insérer des critères techniques, économiques, environnementaux :

Critère d'évaluation	Filtre à cartouche classique	Filtre high flow
Perte de charge initiale	plus élevées	plus faibles
Durée de vie des cartouches	Courte (remplacement fréquent)	Longue (intervalle plus espacé)
Qualité de filtration	Bonne (finesse 5µm)	Equivalente ou supérieure 5µm
Nombre de cartouches nécessaire	Elevé	Réduit (moins d'éléments pour le même débit)
Coût d'investissement initial	Plus faible	plus élevé
Coûts d'exploitation	Plus élevé (cartouches nombreuses ;main d'œuvre)	Plus faible (moins de cartouches à remplacer)
Encombrement de l'installation (footprint)	Installation volumineuse	Compacte ;rack réduit
Durabilité /impact environnemental	Plus de déchets solides	Moins de déchets ; plus durable

Tableau IV.3 -les critères d'évaluation de deux types de filtre à cartouche

IV.5. Discussion et interprétation des résultats :

IV.5. 1. Avantages et inconvénients des filtres classiques :

Les filtres à cartouches classiques présentent l'avantage d'un cout d'investissement initial réduit et d'une technologie largement disponible sur le marché. Leur fonctionnement est

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

simple ; ce qui facilite leur intégration dans les petites installations ou dans les systèmes où les contraintes de débit sont limitées.

Cependant, leur capacité hydraulique unitaire reste faible ($20 \approx m^3/h$ /cartouche), ce qui entraîne la nécessité d'un nombre important de cartouches pour traiter un débit global élevé.

Cela se traduit :

- Un encombrement important du système (skids volumineux)
- Une fréquence élevée de remplacement des cartouches,
- Des coûts d'exploitation supérieurs liés à la main d'œuvre et à la gestion des déchets.

IV.5. 2. Avantages et inconvénients des filtres high flow :

Les filtres High Flow se distinguent par leur forte capacité hydraulique (jusqu'à $113m^3/h$ /cartouche) et leur grande surface filtrante plissée, permettant de réduire considérablement le nombre d'éléments nécessaires. Ainsi, pour un même débit, on peut remplacer plusieurs dizaines de cartouche par une seule cartouche High Flow.

- Réduction de l'encombrement (housings plus compacts, rack plus léger),
- Baisse des coûts d'exploitation (moins de remplacements, moins de main d'œuvre),
- Réduction de l'impact environnemental (jusqu'à 90% de déchets solides en moins),
- Durée de vie prolongée grâce à une meilleure répartition des flux sur la surface filtrante.

En revanche, ces filtres nécessitent un investissement initial plus élevé et une dépendance vis-à-vis de fabricants spécifiques (technologie propriétaire). Dans certains cas, leur remplacement peut également être limité par la disponibilité locale des cartouches.

IV.5. 3.Choix optimal pour les installations de dessalement :

Le choix entre filtres classiques et filtres High Flow dépend fortement du contexte d'exploitation :

- Pour des petites unités de dessalement ($< 500m^3/jour$) , les filtres classiques peuvent suffire car les débits restent modérés et l'investissement initial est limité.
- Pour des installations de grande capacité ($\geq 10\,000m^3/jour$), les filtres High Flow deviennent plus pertinents, car ils permettent une réduction significative de l'espace occupé, des coûts opérationnels et de la fréquence de maintenance.

Chapitre IV Redimensionnement et étude comparative de deux types des filtres à cartouches

IV.5.4. Perspectives d'amélioration et recommandation :

- Optimisation économique : une étude de coût global (CAPEX+OPEX) doit être systématiquement réalisée pour justifier le choix du type de filtre.
- Durabilité : encourager l'utilisation de cartouches recyclées ou de solutions hybrides afin de limiter l'impact environnemental.
- Suivi en exploitation : la mise en place d'un suivi en continu de la perte de charge (ΔP) et de qualité d'eau filtré est recommandée afin d'optimiser la durée de vie des cartouches.
- Perspectives technologiques : l'intégration de systèmes automatiques de nettoyage ou le développement de matériaux filtrants plus performants pourrait constituer une alternative intéressante pour réduire davantage les coûts et les déchets.

Conclusion :

Ce chapitre a analysé le dimensionnement des filtres à cartouche de type High Flow et des filtres classiques dans le cadre du prétraitement pour le dessalement de l'eau de mer, en mettant en lumière leurs performances à travers une étude comparative. L'examen des caractéristiques techniques, telles que la capacité de débit, l'efficacité de rétention des particules et la résistance aux conditions salines, a révélé que les filtres High Flow offrent une solution performante pour les installations à haut débit, grâce à leur faible encombrement et leur maintenance simplifiée. Les filtres classiques, quant à eux, se distinguent par leur coût initial réduit et leur simplicité d'intégration. Cette analyse comparative a permis d'identifier des critères déterminants pour le choix des filtres, tels que l'efficacité de filtration, la durabilité et les coûts d'exploitation, essentiels pour optimiser la protection des membranes d'osmose inverse.

Ces résultats soulignent le rôle critique des filtres à cartouche dans la chaîne de prétraitement, en garantissant une eau d'entrée de qualité pour l'osmose inverse, réduisant ainsi les risques d'encrassement et prolongeant la durée de vie des membranes. Ce chapitre pose les bases pour les investigations futures, notamment l'évaluation des performances en conditions réelles et l'optimisation des paramètres de prétraitement, l'intégration des filtres dans des systèmes de dessalement à grande échelle. Les conclusions tirées ici guideront le développement de solutions de filtration plus efficaces et durables pour répondre aux défis du dessalement de l'eau de mer.

Chapitre V

Dimensionnement de l'installation d'osmose inverse

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons nous pencher sur le dimensionnement de l'unité d'osmose inverse de la station de dessalement située dans la commune de CAP Blanc d'Oran. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel de simulation WAVE, un outil spécialisé dans la modélisation et l'analyse des systèmes de traitement de l'eau, en particulier ceux reposant sur la technologie de l'osmose inverse. Notre étude se concentrera sur une configuration à un seul étage, ce qui nous permettra d'explorer en détail les différentes options de configuration adaptées aux besoins spécifiques de ce projet. De plus, nous procéderons à une comparaison entre l'unité d'osmose inverse actuellement en place, équipée de membranes de type Dupont, et une alternative utilisant des membranes LG Chem, en nous appuyant sur les résultats obtenus à partir du logiciel dédié. Ainsi, ce chapitre vise à fournir une analyse approfondie et éclairée des choix technologiques dans le domaine du dessalement.

V.1 -Différents bilans approximatifs de l'usine de dessalement :

Le débit de captage nécessaire pour produire $300\,000\text{m}^3/\text{J}$ est $666\,666.68\text{m}^3/\text{J}$ et on ajoutant 10% de cette débit pour le nettoyage de la station (perte des boues et backwash de filtre à sable) à une salinité 36g/l. sue ce débit :

- a) Débit de production par rack $Q = 1250\text{m}^3/\text{h}$ (45%) ayant une salinité 194mg/l
- b) Débit de rejet sous forme de saumure $Q = 1527\text{m}^3/\text{j}$ (55%) ayant une salinité 65g/l

Le taux de conversion de 45 %, le processus de dessalement vise à concentrer les sels présents dans l'eau de mer brute jusqu'à 55 % du volume pompé.

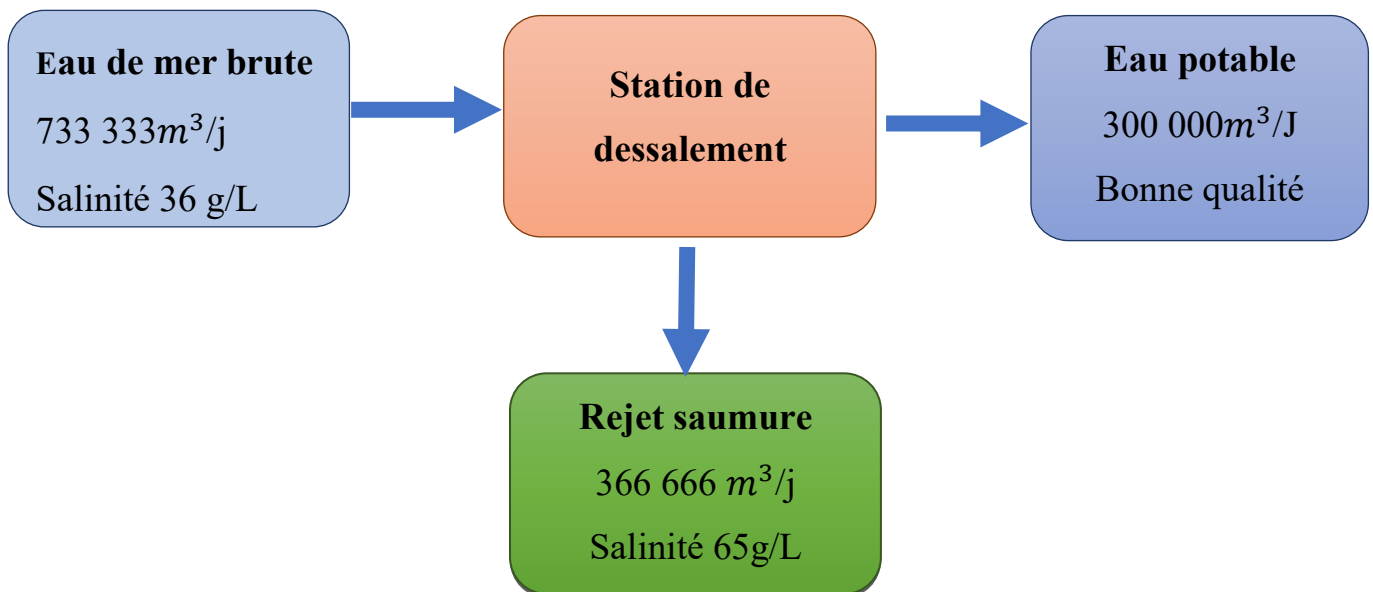


Figure V.1 - Bilan hydraulique de la station de dessalement

V.2-Dimensionnement de l'installation d'osmose inverse :

Nous allons dimensionner l'installation d'osmose inverse en fonction des analyses réalisées en laboratoire après le passage du filtre à sable. Nous effectuerons ensuite une simulation de ces résultats en utilisant le logiciel WAVE de membrane. Ensuite une analyse comparative des racks d'osmose inverse en fonction de deux types de membranes à l'aide du logiciel LG dédié aux membranes.

On obtient les analyses à partir du laboratoire de la station de dessalement de l'eau de mer de la commune de Cap Blanc d'Oran 29Mai 2025. Les analyses présentent dans le tableau V.1 ci-dessous :

Tableau V.1 : les analyses de l'eau de mer avant le prétraitement

Paramètres	Valeurs
Température (°C)	19.3
PH	8.17
Conductivité (ms/cm)	55.12
TDS (g/l)	38.58
Turbidité (NTU)	3.45

[Source : Station de dessalement Cap Blanc 2025]

Tableau V.2 : les analyses de l'eau de mer Après le prétraitement

Paramètre	Valeurs
Température (°C)	19.5
PH	8.17
Conductivité (ms/cm)	55.12
TDS (g/l)	38.58
Turbidité (NTU)	3.45
Ca^{2+} (mg/l)	421.7
Mg^{2+} (mg/l)	1.314
Na^{+} (mg/l)	11.033
K^{+} (mg/l)	408.4
Ba^{2+} (mg/l)	0.00
NH_4^{+} (mg/l)	0.00
Sr^{2+} (mg/l)	8.14
Somme des cations	850.587
so_4^{2-} (mg/l)	2.776
cl^{-} (mg/l)	19.804
HCO_3^{-} (mg/l)	104.7
F^{-} (mg/l)	1.33
CO_3^{2-} (mg/l)	17.21
Silice (mg/l)	1.00
NO_3^{2-} (mg/l)	0.00
CO_2 (mg/l)	0.42
PO_4^{3-} (mg/l)	0.00
Br^{-} (mg/l)	68.85
Boron (mg/l)	4.59
Somme des anions	220.68

[Source : station de dessalement Cap Blanc]

• **V.2.1-Analyse du quantile des eaux :**

a. **La balance ionique :**

$$\bullet \text{ Balance ionique} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \text{ (meq/l)} < 3 \% \dots\dots\dots(\text{IV.1})$$

$$\bullet \text{ La masse equivalent (Me)} = \frac{\text{la masse molaire}}{\text{valence}} \dots\dots\dots(\text{IV.2})$$

$$\bullet [\text{Mg/l}] \text{ caco}_3 = \frac{\frac{\text{Mg}}{1} * 50}{\text{Me}} \Rightarrow \text{Mg/l} = \frac{\frac{\text{Mg}}{1} \text{ CaCo}_3}{50} \dots\dots\dots(\text{IV.3})$$

$$\bullet [\text{Meq/l}] = \frac{\frac{\text{Mg}}{1} * V}{\text{Masse molaire}} \dots\dots\dots(\text{IV.4})$$

b. **PH :**

La mesure d'un pH de 8,17 pour l'eau de mer confirme son caractère basique, une propriété typique due notamment à l'équilibre acido-basique du système carbonate.

$$6.5 < 8.17 < 8.5 \rightarrow \text{vérifié}$$

Le tableau IV.3 présente les résultats du calcul de l'équilibre ionique :

Tableau V.3: les résultats de calcul la balance ionique.

Les éléments	Valence	Masse molaire	Masse équivalente	[Mg/l] caco3	[Mg/l]	[meq/l]
Ca^{2+}	2	40.078	20.039	1.53	421.69	21.05
Mg^{2+}	2	24.3050	12.1525	5.4	1.13	108.09
Na^+	1	22.9898	22.9898	24.016	11.03	479.908
K^+	1	39.0983	39.0983	522.74	408.41	10.44
Ba^{2+}	2	137.327	68.6635	0.00	0.00	0.00
NH_4^+	1	18.04	18.04	0.00	0.00	0.00
Sr^{2+}	2	87.62	43.81	9.29	8.13	0.18
$\Sigma \text{ cations}$						619.668
SO_4^{2-}	2	96.0636	48.0318	2,891.886	2,775.629	57.78
Cl^-	1	35.4527	35.4527	27.95	19.8	558.61
HCO_3^-	1	61.01714	61.01714	87.96	107.25	1.75
F^-	1	18.998	18.998	3.5	1.33	0.07
CO_3^{2-}	2	60.01	30.005	24.47	14.67	0.449
NO_3^{2-}	1	62	62	0.00	0.00	0.00
PO_4^{3-}	3	94.97	31.65	0.00	0.00	0.00
Br^-	1	79.90	79.90	43.12	68.85	0.86
$\Sigma \text{ Anions}$						619.519

$$\text{Balance ionique} = \frac{619.668 - 619.519}{619.668 + 619.519}$$

Balance ionique = 0.00012 < 3% est vérifié

V.3. – Utilité de WAVE :

1. Dimensionnement des unités de dessalement par osmose inverse (RO)

- Permet de calculer le nombre de modules membranaires nécessaires.
- Donne la configuration optimale (nombre de passes, nombre de modules par pression Vessel, nombre de trains).

2. Simulation des performances

- Estime le débit de perméat produit par le système.
- Calcule la qualité de l'eau produite (salinité, conductivité, taux de rejet des sels).
- Simule l'évolution des paramètres en fonction de la température, de la salinité de l'eau brute, du pH, etc.

3. Analyse hydraulique et énergétique

- Fournit la pression d'alimentation requise.
- Estime la consommation énergétique du système (kWh/m³).
- Permet de tester l'effet de l'utilisation d'échangeurs d'énergie (ERD).

4. Optimisation économique et technique

- Aide à comparer plusieurs configurations de membranes pour identifier la solution la plus économique et durable.
- Intègre les données des membranes DuPont (FilmTec) → les calculs sont fiables et conformes aux spécifications fabricants.

5. Prévention des problèmes d'exploitation

- Permet de prévoir les risques de colmatage, fouling ou scalage.
- Suggère des ajustements de prétraitement ou l'ajout d'antiscalant

V. 4-Fonctionnement et interface de WAVE :

Quand on exécute le programme WAVE, une fenêtre s'affichera automatiquement avec l'aspect montré à la figure :

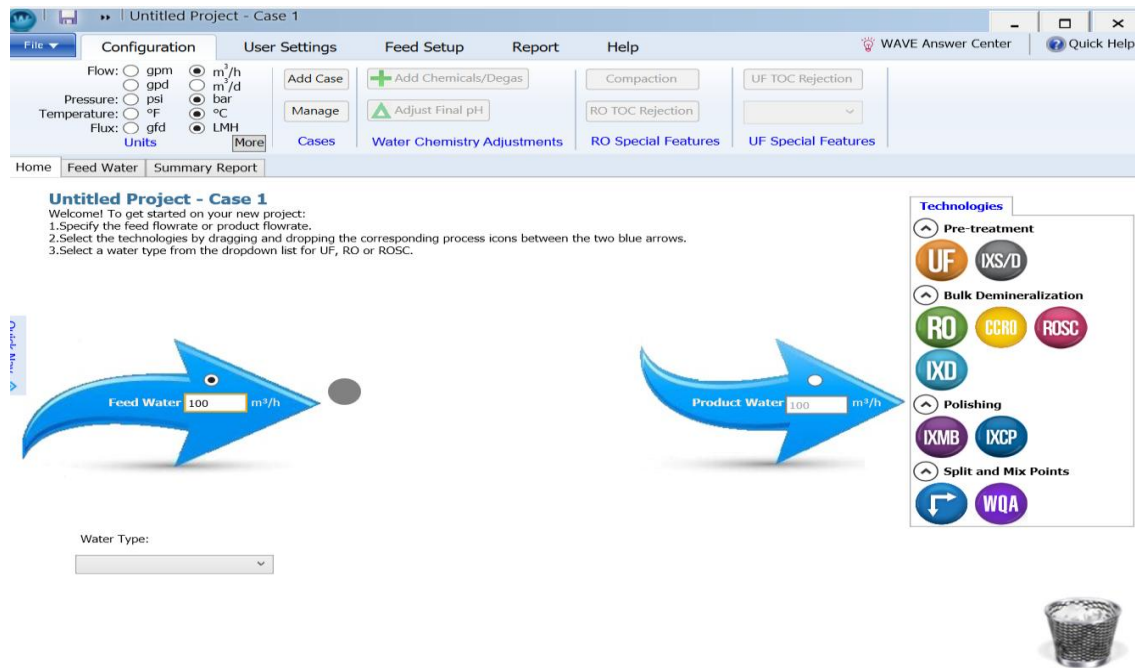


Figure V.2 – fenêtre initiale de logiciel WAVE (logiciel de simulation WAVE 2025)

V.5- Les onglets principaux :

1. Les informations du projet (informations Project).
2. Barre d'outils complète.
3. Les données de qualité d'eau (Feed water).
4. Osmose inverse (Reverse Osmosis).
5. Rapport de résumé (Summary Report).

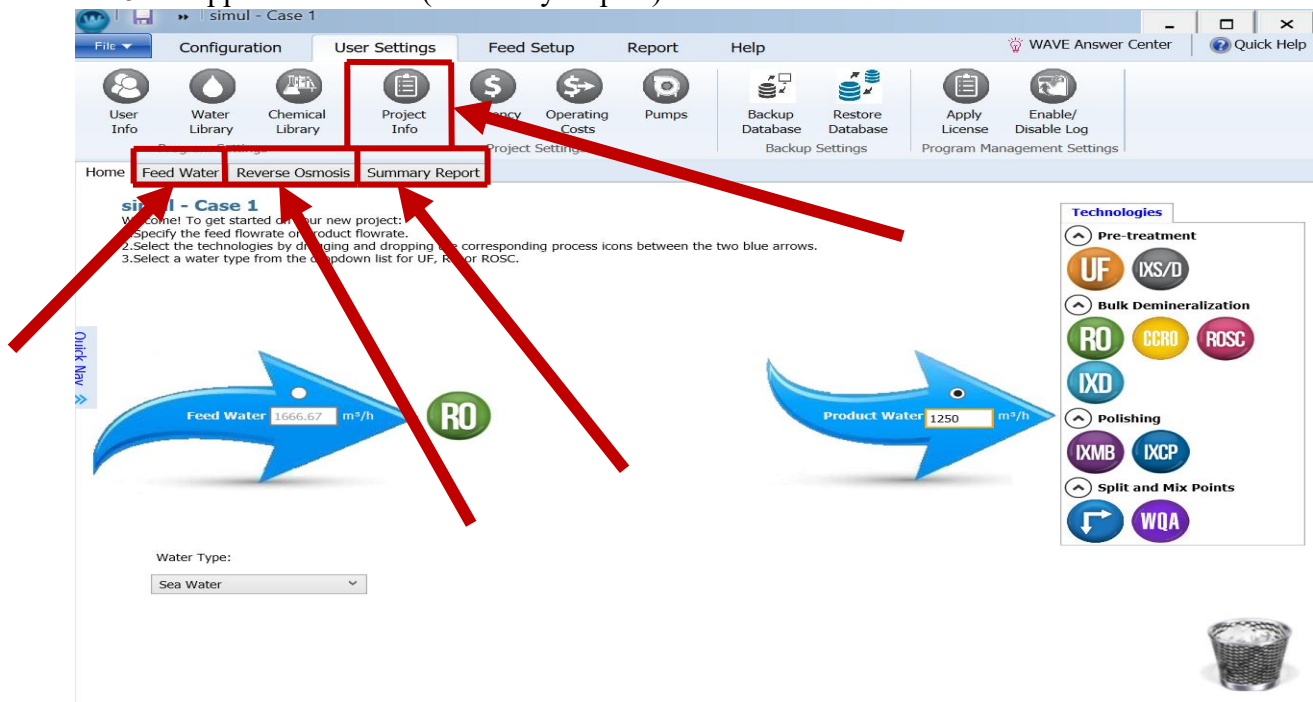


Figure V.3 – Fenêtre initiale du logiciel WAVE (logiciel de simulation WAVE 2025)

-

- **V.5.1- Les informations du projet (information project) :**

Au démarrage du programme Wave ; l'utilisateur doit ouvrir le menu User Setting et choisir l'option project info. Une fenêtre intitulée Project Information apparaît alors (voir figure).

Dans cette interface, L'utilisateur est tenu de spécifier le nom du projet, qui sera automatiquement utilisé comme nom de fichier lors de l'enregistrement. Cette section permet aussi de déterminer les préférences qui seront mises en œuvre durant l'ensemble du projet, comme le nom de l'utilisateur et le nom de l'entreprise. La date du projet sera consignée de manière automatique.

The screenshot shows the 'Project Information' dialog box. It has a title bar with a close button. The form includes the following elements:

- Project Name:** A text input field.
- Prepared by:** A text input field.
- Company:** A text input field containing 'DuPont'.
- Customer:** A text input field.
- WAVE Version:** A text input field containing '1.82.824'.
- Database:** A text input field containing '30'.
- Calc Engine:** A text input field containing '01.12.06.00'.
- Date Created:** A text input field containing '09/14/2025'.
- Date Last Revised:** A text input field containing '09/15/2025'.
- Country:** A text input field.
- Project Notes:** A large text area.
- Case Names :** A text input field containing 'Case 1'.
- Case Notes:** A text input field containing 'Case 1'.
- Key Words:** A text input field.
- Case Name:** A dropdown menu showing '1'.
- of:** A text input field showing '1'.
- Buttons:** 'Cancel' and 'Save' buttons at the bottom right.

Figure V.2 – Project information (logiciel de simulation2025)

- **V.5.2- Barre d'outils complète :**

Le logiciel Wave propose diverses fonctionnalités utiles pour la gestion des fichiers. Le logiciel Wave inclut une fonctionnalité qui permet de générer un fichier neuf, de sauvegarder un fichier déjà existant et d'ouvrir plusieurs fichiers simultanément.

- **V.5.3- Les données de qualité de l'eau :**

Les utilisateurs ont la possibilité de définir les propriétés de l'eau brute, essentielles pour la conception et l'amélioration du système. Parmi les caractéristiques, on note :

- La salinité : elle est quantifiée en TDS (Total Dissolved Solids) et constitue un critère déterminant pour choisir la membrane appropriée ainsi que les modalités de fonctionnement du système. Cette partie expose le tableau indiquant la composition chimique de l'eau brute. L'application offre la possibilité de choisir une composition chimique par défaut ou d'appuyer sur le bouton « AJOUTER NOUVEAU » pour saisir manuellement la composition de l'eau de mer.
- pH : Le pH de l'eau brute est un paramètre crucial qui affecte la capacité de dissolution des sels et l'efficacité des membranes. Un pH inadapté peut provoquer une détérioration des membranes ou une diminution.
- Température : la viscosité de l'eau et, par extension, son débit à travers les membranes, sont influencés par la température de l'eau brute. Des températures plus hautes peuvent accroître le débit, mais aussi majorer la probabilité de dégradations aux membranes.

Wave--9/15/2025 wah - Case 1

File Configuration User Settings Feed Setup Report Help

WAVE Answer Center Quick Help

Save To Water Library Adjust pH Add Sodium Add Chloride Adjust Cations Adjust Anions Adjust All Ions mg/L NaCl mg/L MgSO4 Quick Entry

Open Water Library Add Calcium Add Sulfate Adjust total CO₂/HCO₃/CO₃ Charge Balance Adjustment

Add Ammonia

Home Feed Water Reverse Osmosis Summary Report

Stream Definition Stream 1 100.00 % Add Stream

Feed Water - Stream 1

Feed Parameters Water Type: Sea Water Water Sub-type: Membrane pretreatment, SDI < 3

Solid Content Turbidity: 0.00 NTU Total Suspended Solids (TSS): 0.00 mg/L SDI₁₅: 0.00

Organic Content Organics (TOC): 0.00 mg/L

Temperature 10.0 °C 25.0 °C 40.0 °C Minimum Design Maximum pH @25.0°C: 7.00 pH @25.0°C: 7.00 Additional Feed Water Information

Cations

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄ ⁺	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000
Sr	0.000	0.000	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000
Total Cations:	0.000		0.000

Anions

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₃	0.000	0.000	0.000
HCO ₃	0.000	0.000	0.000
NO ₃	0.000	0.000	0.000
Cl	0.000	0.000	0.000
F	0.000	0.000	0.000
SO ₄	0.000	0.000	0.000
Br	0.000	0.000	0.000
PO ₄	0.000	0.000	0.000
Total Anions:	0.000		0.000

Neutrals

Symbol	mg/L
SiO ₂	0.000
B	0.000
CO ₂	0.000
Total Neutrals:	0.000

Total Dissolved Solids : 0.000 mg/L Charge Balance: 0.000000 meq/L Estimated Conductivity: 0.00 µS/cm

Figure V. 4 – Water profil (logiciel de simulation Wave 2025)

On clique sur le bouton « Water Type » et « Water sub-type » pour choisir le type de l'eau ; après on insère sur le bouton « Open Water Library » pour choisir les caractéristiques de l'eau.

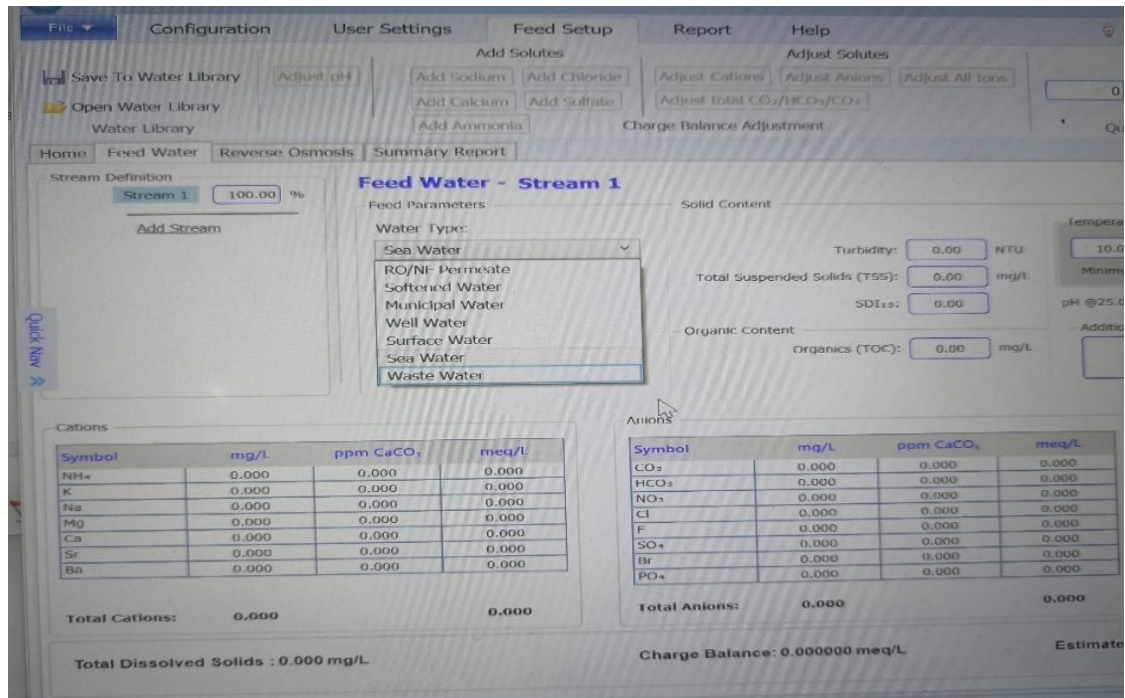


Figure V.5 – les différents type d'eau (logiciel de simulation Wave 2025)

V.5.4- Osmose inverse (Reverse Osmosis) :

Tout d'abord commencez par Sélectionner les technologies en glissant-déposant les icônes de processus correspondantes entre les deux flèches bleues. Après avoir défini le type d'eau utilisé, Cliquez sur le bouton « Reverse Osmosis » pour configurer l'unité d'osmose inverse. Saisir ensuite les caractéristiques de l'osmose inverse : Recovery (taux de conversion), PV par stage (nombre de tube à pression par racks), ELS par pv (nombre des éléments par tube), Type d'élément (type de membrane utilisée).

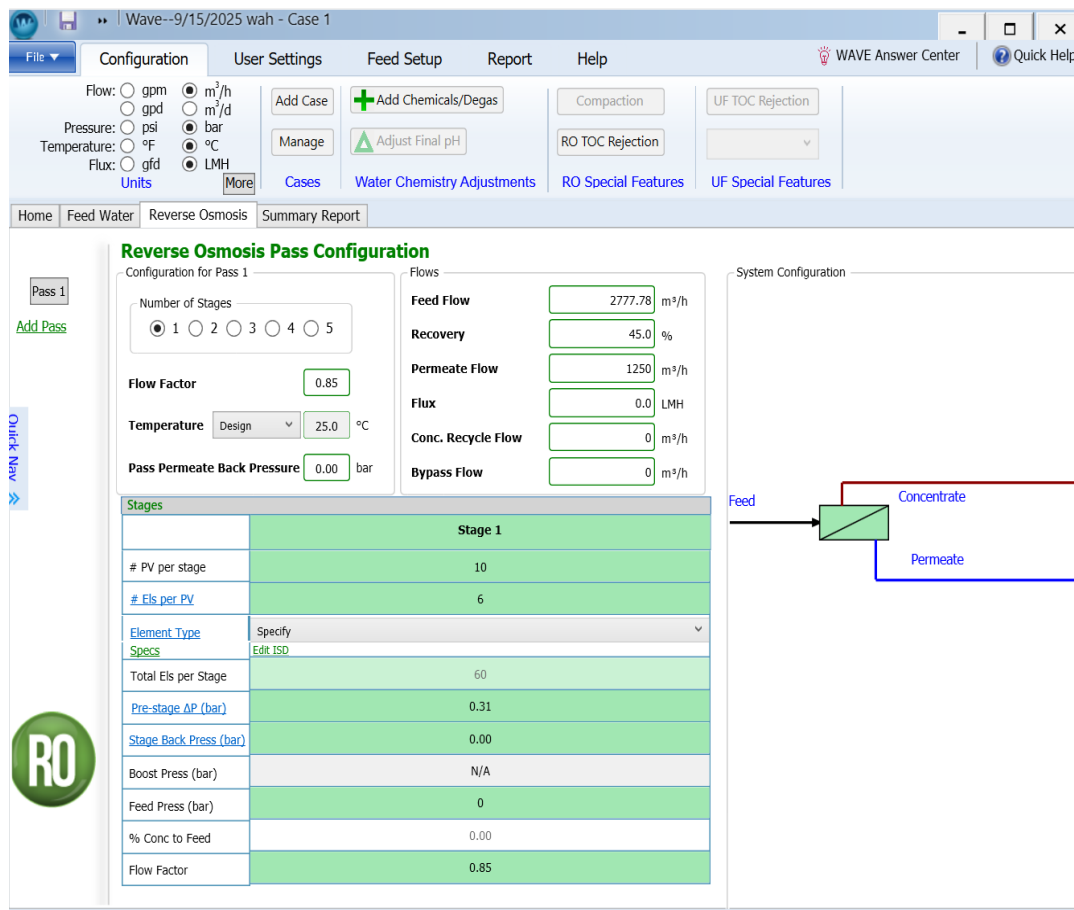


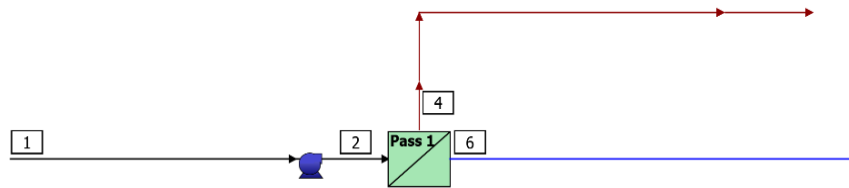
Figure V.6 – osmose inverse (logiciel de simulation Wave 2025)

• V.5.5- Rapport de résumé (Summary Report) :

Une fois la conception d'un système RO achevée dans Wave, les utilisateurs ont la possibilité de consulter un onglet spécifique à la création de rapports. Cette fonctionnalité est essentielle pour consigner les résultats de la conception et partager les informations pertinentes auprès des parties intéressées, comme les clients, les investisseurs ou encore les équipes de projet. Les rapports produits par Wave intègrent plusieurs sections cruciales qui offrent une vue d'ensemble détaillée des performances du système RO :

1. Performances des éléments RO : Cette section présente des données spécifiques concernant les membranes utilisées, incluant leur type, leur surface, leur efficacité ainsi que leur durée de vie prévue. De plus, les utilisateurs peuvent également visualiser des diagrammes et tableaux illustrant le débit d'eau, la diminution de la salinité et autres performances.
2. Composition des flux : les rapports intègrent des données relatives à la composition chimique de l'eau brute, de l'eau produite et de l'eau rejetée. Ceci offre la possibilité d'apprécier l'efficacité du dispositif quant à la diminution des polluants et le respect des critères de qualité de l'eau.
3. Analyse de sensibilité : dans le cas où cette option a été mise en œuvre, le rapport pourrait également comporter une étude de sensibilité, démontrant comment les

fluctuations des paramètres d'entrée influencent les performances du système. Cela contribue à la détection des facteurs essentiels à surveiller.



#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	2,778	41,124	0.0
2	Net Feed to Pass 1	2,770	41,237	62.3
4	Total Concentrate from Pass 1	1,524	74,791	60.9
6	Net Product from RO System	1,250	223.3	0.0

Figure V.7 – Rapport de conception (logiciel de simulation Wave 2025)

V.6 – Dimensionnement de la station de dessalement de Cap Blanc d’Oran :

V.6.1– Les étapes de dimensionnement :

Le dimensionnement de la station de dessalement d’une capacité de 300 000m³/j nécessite de suivre les étapes suivantes :

V.6 .1.1– Les informations sur le projet :

Au démarrage du programme Wave ; l’utilisateur doit ouvrir le menu User Setting et choisir l’option project info. Il est nécessaire d’entrer les détails du projet et les informations personnelles de l'utilisateur.

Project Information

Project Name: simulation projet de fin d'étude

Prepared by: mkrarbec rania WAVE Version: 1.82.824 Database: 30 Calc Engine: 01.12.06.00

Company: ENSH Date Created: 09/15/2025 Date Last Revised: 09/15/2025

Customer: ENSH Country:

Project Notes:

Case Names : Cap Bland

Case Notes: Case 1 Key Words:

Case Name: 1 of: 1

Cancel Save

Figure V.8-Project information (logiciel de simulation Wave 2025)

Il faut choisir la technologie de l'osmose inverse et indiquer le débit de production par rack.

La station de dessalement d'eau de mer doit opérer de façon efficace et fiable, en atteignant sa pleine capacité dans le cadre des conditions standards du site. Au stade de la conception, l'entrepreneur doit considérer les conditions minimales et maximales indiquées dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Unité	Minimum	Maximum
Température	°C	14	30
Total des matières solides dissoutes (TDS)	mg/l	35 000	40 000
Total des matières solides en suspensions (TSS)	mg/l	-	50
Hydrocarbures	mg/l	0	0.1
Bore	mg/l	3.76	4.00

Tableau V.4- Les conditions des références SDEM Cap Blanc

De plus, d'autres critères de l'analyse de l'eau de mer, selon les spécifications présentées dans le tableau ci-après et utilisés dans le logiciel de projection d'OI :

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	μS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	μg/l	50
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Tableau V.5- Les conditions de l'analyse de l'eau de mer

Open From Water Profile Library

Open From Library: Seawater - Standard Reference

Water Type: Sea Water

Turbidity: 0.00 NTU

Total Suspended Solids (TSS): 0.00 mg/L

Organics (TOC): 0.00 mg/L

SDI: 0.00

pH: 8.10

Temperature: 5.0 °C (Minimum) 25.0 °C (Design) 40.0 °C (Maximum)

Cations	
Symbol	mg/L
NH ₄	0.00
K	408.41
Na	11,032.98
Mg	1,313.67
Ca	421.69
Sr	8.14
Ba	0.00
Total Cations:	13,184.89

Anions	
Symbol	mg/L
CO ₃	14.67
HCO ₃	107.26
NO ₃	0.00
Cl	19,804.22
F	1.33
SO ₄	2,775.63
PO ₄	0.00
Br	68.86
Total Anions:	22,771.96

Neutrals	
Symbol	mg/L
SiO ₂	1.00
B	4.59
CO ₂	0.43
Total Neutrals:	6.02

Total Dissolved Solids : 35,984.12 mg/L

Charge Balance: 0.00 meq/L

Delete Cancel Copy To Feed Water

Figure V.9- Composition chimique de l'eau (logiciel de simulation Wave 2025)

Avant de reproduire les valeurs de la composition de l'eau de mer, il est essentiel de spécifier le type d'eau. Dans ce contexte, il s'agit d'eau de mer collectée directement avec un SDI inférieur à 3.

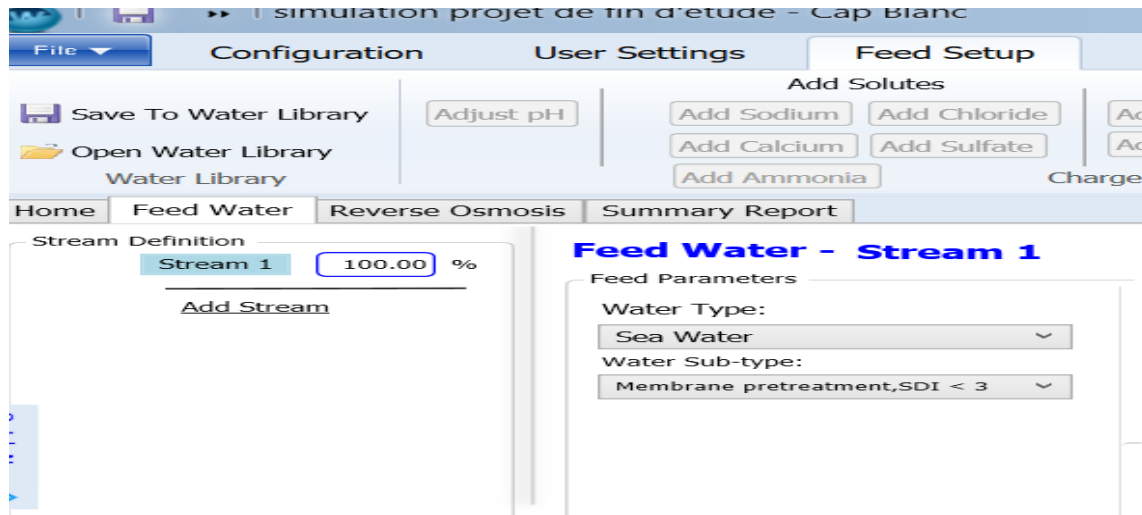


Figure V.10- La source d'eau utilisée (logiciel de simulation Wave 2025)

V.6 .1.2 – Détermination le flux transmembranaire :

La valeur du flux transmembranaire est obtenue à partir du design proposé par le logiciel LG, qui permet de modéliser et d'optimiser les performances des membranes en fonction de la pression, de la température et de la composition de l'eau. L'objectif est de maximiser l'efficacité du procédé de dessalement par osmose inverse.

Dans notre étude, l'eau d'alimentation correspond à de l'eau de mer prélevée par prise ouverte. Le flux transmembranaire retenu est 13.

Il est recommandé de travailler avec une valeur de flux transmembranaire relativement faible, même si cela implique l'utilisation d'un plus grand nombre de membranes. Cette démarche permet de prolonger la durée de vie des membranes d'osmose inverse.

V.6 .1.3– Détermination les types d'éléments membranaire :

Le choix des éléments à utiliser dépendra de plusieurs facteurs, notamment la salinité de l'eau d'alimentation, son potentiel de colmatage, le taux de rejet de sel à atteindre et la consommation d'énergie.

Dans notre cas de dimensionnement, nous avons opté pour les membranes SW30HRLE440, qui sont spécifiquement conçues pour le traitement de l'eau de mer (Sea Wter).

Ces membranes à haute récupération (high recovery low energy), avec une surface de 440 ft2, répondent efficacement à nos besoins en matière de dessalement tout en optimisant

l'utilisation de l'énergie.

Rappelons que le taux de conversion est le rapport entre la quantité d'eau douce produite et la quantité d'eau de mer entrante dans l'installation.

$$Y = 100 \% \frac{Q_p}{Q_a}$$

V.6 .1.3– Calcul le taux de conversion :

Débit de conception	Valeurs en m^3/h	Valeurs en m^3/j
Débit d'alimentation total	2777.78	666 666.67
Débit alimentation par ligne	277.778	6 666.67
Débit de perméat total	12 500	300 000
Débit de perméat par ligne	6250	150 000
Débit de saumure d'OI total	15240	365 760
Débit de saumure par ligne	7620	182 880

Tableau V.6- Les débit de conception

$$Y = 100\% \frac{300\,000}{666\,666.67}$$

$$Y \approx 45\%$$

V.6 .1.4– Calcul le nombre d'éléments nécessaires :

Pour l'élément sélectionné, le débit de perméat spécifié QP doit être divisé par le flux f et la surface de membrane SE.

$$N_e = \frac{Q_p}{f \cdot S_e}$$

N_e : nombre d'élément

Q_p : débit de perméat de conception du système

F : le flux transmembranaire

S_e : surface de membrane active de l'élément sélectionné

$$N_e = \frac{1250}{13 \times 41 \times 0.001}$$

$N_e = 2345$ éléments par racks

V.6 .1.5– Calculer le nombre de tube de pression nécessaires :

La station est divisée sur 10 lignes de production identiques dont chaque ligne contient N nombre des tubes à pression, chaque tube à pression contient 7 membranes de type SW (eau de mer) :

Q_p : Débit nominal par ligne

N_{EPV} : Nombre de membrane par tube

fl : Flux

Se : Surface de membrane

$$N_{\text{tube}} = \frac{Q_p \times 1000}{N_{EPV} \times fl \times Se}$$

$$N_{\text{tube}} = \frac{1250 \times 1000}{7 \times 13 \times 41} = 335 \text{ tubes par rack}$$

V.7– Utilité de logiciel LG CHEM :

Ce logiciel aide les utilisateurs à simuler différents scénarios de traitement de l'eau en changeant des réglages pour voir comment cela affecte le fonctionnement du système. Ceci comprend la simulation de divers types d'eau (comme l'eau de mer, l'eau saumâtre.....) et l'analyse du rendement des membranes dans diverses conditions de fonctionnement.

V.8– Fonctionnement et interface de Q+ :

Quand on exécute le programme Q+, une fenêtre s'affichera automatiquement avec l'aspect montré à la figure :

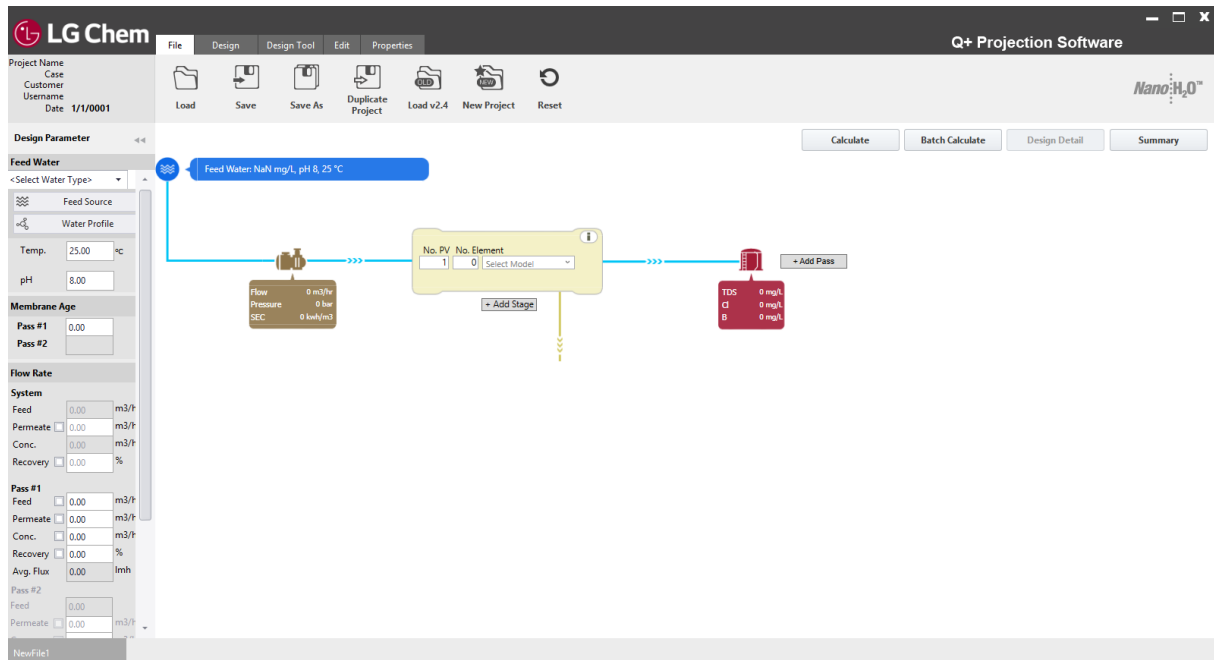


Figure V.11- Fenêtre initiale du logiciel Q+ (logiciel de simulation LG Sea Water solution)

V.9- Les onglets principaux :

1. Les informations du projet (Project information)
2. Barre d'outils complète (Comprehensive Toolbar)
3. Panneaux d'entrée de conception (Design Input Panel)
4. Diagramme de flux de processus interactif (Interactive Process Flow Diagram)
5. Génération de rapports (Report Generation)

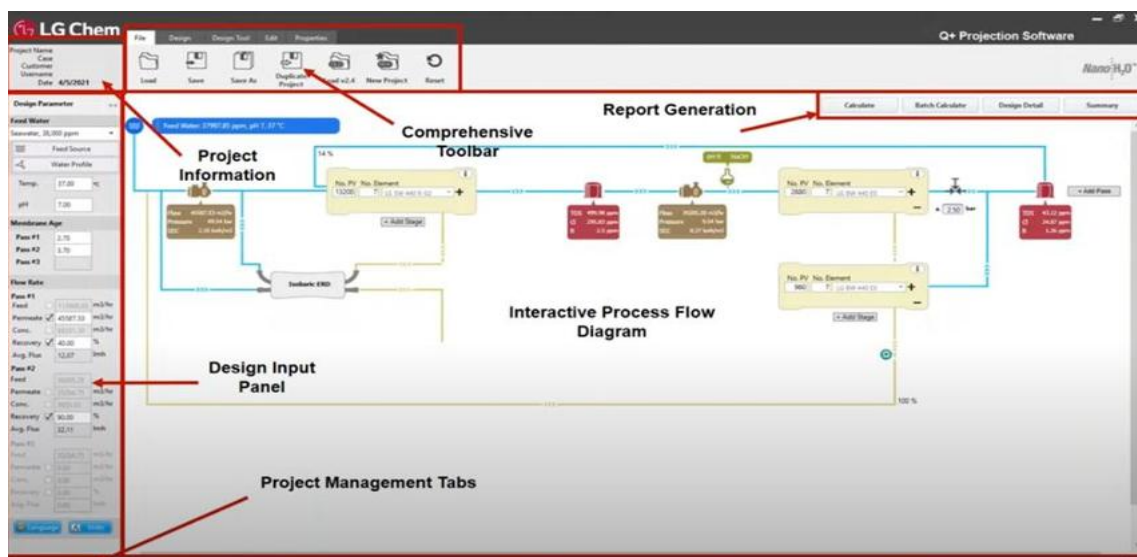


Figure V.12 - Fenêtre initiale du logiciel de simulation Q+ (Logiciel de simulation LG Sea Water)

V.9.1- Les information du projet (project information) :

Au démarrage du programme Q+ ; il affiche la fenêtre project information (voir la figure).

Dans cette interface, L'utilisateur est tenu de spécifier le nom du projet, qui sera automatiquement utilisé comme nom de fichier lors de l'enregistrement. Cette section permet aussi de déterminer les préférences qui seront mises en œuvre durant l'ensemble du projet, comme le nom de l'utilisateur et le nom de l'entreprise. La date du projet sera consignée de manière automatique.

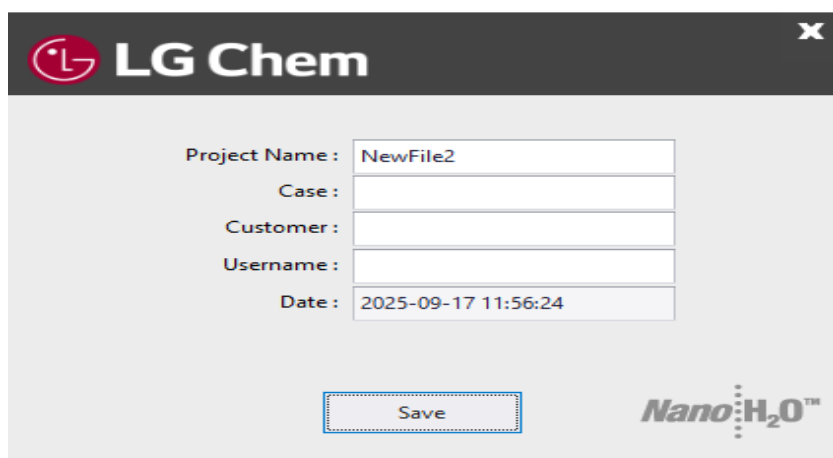


Figure V.12 – Fenêtre du project information (logiciel du simulation Q+)

V.9.2- Barre d'outils complète (comprehensive Toolbar) :

Le logiciel Q+ propose diverses fonctionnalités utiles pour la gestion des fichiers. Le logiciel Q+ inclut une fonctionnalité qui permet de générer un fichier neuf, de sauvegarder un fichier déjà existant et d'ouvrir plusieurs fichiers simultanément.

V.9.3- Panneau d'entrée de conception (Design Input Panel) :

Les utilisateurs ont la possibilité de renseigner les paramètres nécessaires à la conception du système d'osmose inverse (RO). Cela comprend les caractéristiques de l'eau brute comme la température, le pH et la salinité, ainsi que les exigences liées à la qualité de l'eau produite, les contraintes de pression et de débit, et les coûts énergétiques. De plus, ce panneau propose des options pour choisir le type de membrane RO, le nombre d'étages et de passes, ainsi que les configurations de récupération d'énergie.

Water Profile Seawater, 36,000 ppm Add New Manage

Total Dissolved Solid (TDS) 35999.95 mg/L pH 8.00 Temp. 25.00 °C
 Total Osmotic Pressure 25.60 bar
 Charge Balance All Ions Balance Ion Selection

Name	mg/L	mg/L as CaCO ₃	Balanced mg/L
Ammonium (NH ₄)	0	0	0
Sodium (Na)	10905.94	23718.88	10906.71
Potassium (K)	503.52	643.89	503.56
Magnesium (Mg)	1338.24	5504.9	1338.33
Calcium (Ca)	431.37	1076.27	431.4
Strontium (Sr)	7.37	8.41	7.37
Barium (Ba)	0.01	0.01	0.01
Fluoride (F)	1.29	3.39	1.29
Chloride (Cl)	19591.37	27632.4	19589.99
Sulfate (SO ₄)	3055.05	3180.36	3054.83
Nitrate (NO ₃)	0	0	0
Carbonate (CO ₃)	4.05	6.74	4.05
Bicarbonate (HCO ₃)	157.63	129.17	157.63
Boron (B)	4.78	22.11	4.78

Balance & Save Close Nano H₂O™

Figure V.13 – Water Profil du logiciel de simulation Q+ LG Chem Sea Water

Water Source Well Water (SDI < 3) Edit

	Pass #1	Pass #2	Pass #3
Flow Loss	7 %	5.00 %	5.00 %
Salt Passage Increase	7 %	5.00 %	5.00 %
Membrane Age	0.00 Yr	0.00 Yr	0.00 Yr
Flow Factor	1	1.00	1.00
Safety Factor	1.00	1.00	1.00

Save Cancel Nano H₂O™

Figure V.14 – les différentes type d'eau proposé par Q+

V.9.4- Diagramme de flux de processus interactif (Interactive Process Flow Diagram) :

Les utilisateurs ont la possibilité d'intégrer et de modifier des diagrammes afin d'explorer différentes branches d'un processus. Cela leur permet de simuler divers scénarios et d'observer l'impact des changements sur l'ensemble du flux. L'outil Q+ propose des options de personnalisation qui facilitent l'adaptation des diagrammes aux besoins spécifiques d'un

projet. Les utilisateurs peuvent, par exemple, ajouter des annotations, utiliser des couleurs ou insérer des symboles afin de rendre le diagramme plus clair, informatif et visuellement attrayant.

Les diagrammes réalisés avec Q+ peuvent être exportés dans divers formats (PDF, PNG, etc.) ou intégrés directement dans des outils de gestion de projet, ce qui renforce la collaboration et le partage d'informations.

Par ailleurs, ces diagrammes présentent de nombreux avantages : ils offrent une vision globale et claire de processus complexes, ce qui rend les informations plus accessibles. Grâce à l'analyse des flux, les équipes sont en mesure d'identifier des opportunités d'amélioration et d'ajuster les processus pour mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Enfin, les diagrammes favorisent l'implication des parties prenantes en leur permettant de visualiser et de comprendre plus facilement les processus en jeu.

V.9.5- Génération de rapports dans Q+ (Report generation) :

Le développement d'un système RO a été achevé dans Q+, permettant aux utilisateurs d'accéder à un onglet spécifique pour créer rapports. Cette capacité est essentielle pour consigner les résultats de la conception et diffuser les informations appropriées aux intervenants, comme les clients, les investisseurs ou les équipes de projet. Les rapports produits par Q+ incluent plusieurs parties essentielles qui offrent une vision globale exhaustive des performances du système RO :

1. Performances des éléments en RO : cette partie fournit des informations précises sur les membranes mises en œuvre, comprenant leur catégorie, leur superficie, leur performance et leur longévité prévue. Il est également possible pour les utilisateurs de consulter des graphiques et des tableaux démontrant le cours de l'eau, la diminution de la salinité et d'autres indicateurs clés.

2. Composition des flux : les documents contiennent des données concernant la composition chimique de l'eau brute, de l'eau produite et de l'eau rejetée. Cela permet d'apprécier l'efficacité du système quant à la diminution des contaminants et le respect des normes de qualité de l'eau.

3. Coûts d'exploitation : les usagers ont la possibilité d'obtenir une évaluation des coûts opérationnels du système, englobant les frais énergétiques, les dépenses de maintenance et les

coûts associés au changement des membranes. Cette partie est indispensable pour les études de rentabilité et pour la prise de décisions financières.

4. Étude de sensibilité : Dans l'éventualité où cette option a été utilisée, le bilan pourrait aussi comprendre une étude de sensibilité, illustrant la manière dont les modifications des paramètres d'entrée influencent le rendement du système. Ceci permet de repérer les éléments clés à surveiller.

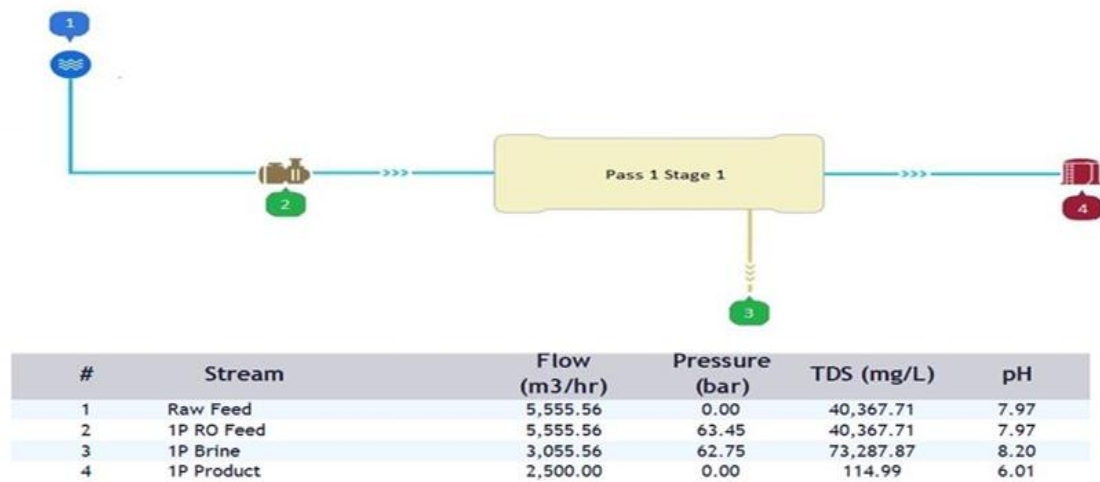


Figure V.15 –Design Report de logiciel de simulation Q+ LG Chem Sea Water

V.10- Dimensionnement de la station de dessalement de Cap Blanc d'Oran :

V.10.1-Les étapes de dimensionnement :

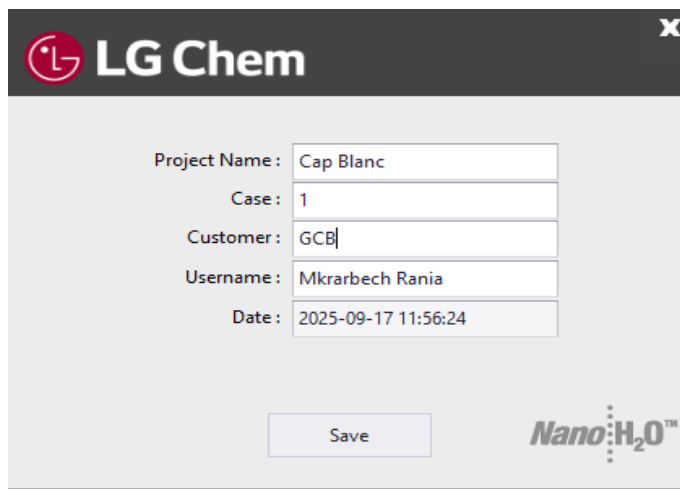
Le dimensionnement de la station de dessalement d'une capacité de $300\,000\text{m}^3/\text{j}$ nécessite de suivre les étapes suivantes :

V.10.1.1- Détermination des paramètres de l'eau d'alimentation :

Le dimensionnement du système est fonction de la qualité de l'eau d'alimentation et de l'utilisation prévue. Il est crucial d'examiner attentivement la source d'eau disponible, d'effectuer une évaluation approfondie de celle-ci, et de définir le volume d'eau à traiter ainsi que sa qualité.

Cette phase initiale implique l'utilisation du logiciel Q+ de LG Chem Water Solution pour dimensionner et comparer les résultats issus de la simulation d'une unité d'osmose inverse (OI) d'une capacité de 300 000 m³/jour, en utilisant les mêmes paramètres opérationnels principaux que la station de dessalement Cap Blanc. Pour compléter cette phase, il faut traverser plusieurs étapes avant d'arriver au rapport final de la simulation.

Au démarrage du programme Q+ ; l'utilisateur doit ouvrir l'option project info. Il est nécessaire d'entrer les détails du projet et les informations personnelles de l'utilisateur.



Project Name :	Cap Blanc
Case :	1
Customer :	GCB
Username :	Mkrarbech Rania
Date :	2025-09-17 11:56:24

Save

Nano H₂O™

FigureV.16 – Fenêtre de Project Information de logiciel Q+ LG Chem Sea Water

La station de dessalement d'eau de mer doit opérer de façon efficace et fiable, en atteignant sa pleine capacité dans le cadre des conditions standards du site. Au stade de la conception, l'entrepreneur doit considérer les conditions minimales et maximales indiquées dans le tableau ci-dessus voir tableauV.4.

De plus, d'autres critères de l'analyse de l'eau de mer, selon les spécifications présentées dans le tableau ci-après et utilisés dans le logiciel de projection d'OI voir tableau V.5.

Water Profile Seawater, 40,000 ppm [Add New] [Manage]

Total Dissolved Solid (TDS) 40000.61 mg/L
 Total Osmotic Pressure 28.70 bar
 Charge Balance All Ions Balance Ion Selection

Name	mg/L	mg/L as CaCO ₃	Balanced mg/L
Ammonium (NH ₄)	0	0	0
Sodium (Na)	12248.42	26638.58	12249.71
Potassium (K)	504.41	645.03	504.46
Magnesium (Mg)	1487.68	6119.62	1487.84
Calcium (Ca)	432.12	1078.14	432.17
Strontium (Sr)	7.39	8.43	7.39
Barium (Ba)	0.01	0.01	0.01
Fluoride (F)	1.29	3.39	1.29
Chloride (Cl)	22103.43	31175.5	22101.09
Sulfate (SO ₄)	3049.69	3174.78	3049.37
Nitrate (NO ₃)	0	0	0
Carbonate (CO ₃)	5.3	8.83	5.3
Bicarbonate (HCO ₃)	157.21	128.83	157.21
Boron (B)	4.78	22.11	4.78

[Balance & Save] [Close] Nano:H₂O™

FigureV.18- Composition chimique de l'eau (logiciel de simulation LG Chem)

Avant de reproduire les valeurs de la composition de l'eau de mer, il est essentiel de spécifier le type d'eau. Dans ce contexte, il s'agit d'eau de mer collectée directement avec un SDI inférieur à 3. Ainsi, il faut cocher la case pour « Seawater-Open Intake (SDI<3) ».

Edit Water Profile
 Add - Press clear button, fill in the information, then press add.
 Delete - Select the item to be deleted, then press delete.

Water Type

Seawater, 32,000 ppm
Seawater, 34,000 ppm
Seawater, 36,000 ppm
Seawater, 38,000 ppm
Seawater, 40,000 ppm
Seawater, 42,000 ppm
NaCl, 32,000 ppm
NaCl, 2,000 ppm
NaCl, 1,500 ppm
NaCl, 500 ppm
Cap Blanc station
cap blanc
cap

[Clear] [Add] [Delete]

Name CAP BLANC

Option ☐ NaCl ☒ Seawater

TDS 20000 mg/L

Name	mg/L	mg/L as CaCO ₃
Barium (Ba)	0	0
Fluoride (F)	133	350
Chloride (Cl)	19804	27932.3
Sulfate (SO ₄)	2775	2888.82
Nitrate (NO ₃)	0	0
Carbonate (CO ₃)	1467	2444.67
Bicarbonate (HCO ₃)	10726	8789.38
Boron (B)	459	2123.03
Bromide (Br)	6886	4308.92
I Silica (SiO ₂)	1,00	0

FigureV.17 – La source d'eau d'alimentation de logiciel LG Chem

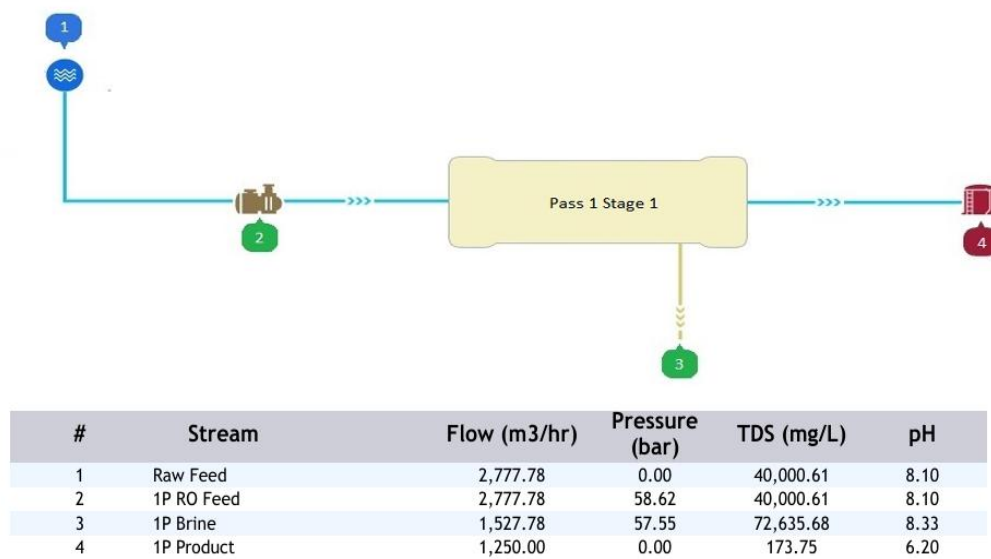
V.10.1.2- Définir les conditions de fonctionnement :

La température est fixée à 25°C et le pH à 8.1

V.10.1.3- Lancer le calcul de spéciation :

Accédez à la fonction calculatrice ; le programme effectuera les calculs et fournira les résultats.

Il est désormais possible d'exporter les résultats en format PDF ou EXCEL.



FigureV.19 – Design Report de logiciel Q+ LG Chem

V.11 – Interprétation les résultats :**V.11.1 – Interprétation simulation WAVE (membrane DuPont) :**

La simulation réalisée sous WAVE pour une membrane DuPont présente un débit d'alimentation de 2,778 m³/h, un débit produit de 1,250 m³/h et un débit concentré de 1,528 m³/h, ce qui correspond à une récupération de 45,0 %. La conductivité (TDS) de l'alimentation est d'environ 40 000 mg/L, tandis que le perméat affiche = 223.3 mg/L, traduisant un rejet de sel supérieur à 99% (qualité de perméat adaptée aux besoins d'eau industrielle/potable après post-traitement). La salinité du concentrat atteint = 74.97 mg/L, indiquant une forte concentration des sels dans la saumure. La pression d'alimentation simulée

est = 62.3 bar, ce qui implique une PTM élevée et donc une consommation énergétique notable pour produire l'eau perméable. Les indices de saturation montrent un risque modéré de précipitation de gypse ($SI_{\text{gypse}} > 0$) tandis que la calcite paraît sous-saturée ($SI_{\text{calcite}} < 0$). En conséquence, un anti scalant ciblé et un contrôle de la récupération sont recommandés pour éviter l'entartrage, ainsi qu'un suivi régulier des SI en fonctionnement.

• **V.11.2 – Interprétation simulation Q+ (membrane LG) :**

La simulation sous Q+ (LG) donne des résultats proches : débit d'alimentation 2,771 m^3/h , perméat 1,250 m^3/h , recovery $\geq 45,1\%$. Le TDS d'entrée est légèrement inférieur ($\approx 35\,984$ mg/L) et le perméat est comparable (= 194 mg/L). Le concentrat atteint = 54 071 mg/L, donc moins concentré que dans la simulation DuPont à récupération identique.

La pression d'alimentation calculée est = 53,3 bar, inférieure à celle requise dans la simulation DuPont. Ceci se traduit par une PTM globale plus faible et donc une consommation énergétique attendue plus basse pour produire le même volume d'eau perméable. Les SI estimés suggèrent là aussi un risque de gypse modéré. La membrane LG fournit une qualité de perméat similaire, avec l'avantage potentiel d'une pression d'alimentation moindre.

V.12 – Comparaison synthétique entre les deux types de membrane :

Paramètre	WAVE- DuPont	Q+ - LG	Commentaire
Feed (m^3/h)	2.778	2.771	Valeurs d'entrée très proche
Perméate/ Product (m^3/h)	1.250	1.250	Même débit produits
Brine/ Concentrate (m^3/h)	1.528	1.521	Valeurs très proche
Conversion (%)	45%	45.1%	Taux de conversion similaire
TDS Feed (mg/l)	40 000	40 000	Similaire
TDS Perméat (mg/L)	223.3	194.2	Perméat de bonne qualité
TDS Concentrate (mg/l)	74.79	54 071	Concentrate plus salé sur DuPont
Pression d'alimentation (bar)	62.3	53.3	DuPont nécessite P légèrement supérieur

PTM (bar)	43.12	44.68	Pression transmembranaire de LG élevé par rapport DuPont
Rejet de sel (%)	99.5%	99.5%	Rejection très élevée pour les deux
Consommation énergétique (kwh/m ³)	3.8	3.2	LG plus économique
Cout de membrane (Dollars)	680	550	LG moins cher que le DuPont

Tableau V.7- étude comparative entre deux types membranaires**Comparaison syénitique :**

1. Qualité du perméat : Presque identique pour les deux membranes → les deux solutions répondent aux exigences de qualité de l'eau traitée.
2. Taux de conversion : presque identique (~45 %) - même fraction d'eau extraite.
3. Concentrat : plus concentré avec DuPont (= 74.79 mg/L) qu'avec LG (= 54.071 mg/L) → signale une plus forte accumulation de sels côté saumure pour DuPont, possiblement dû à différences d'hydrodynamique interne et rendement de passage d'eau.
4. Pression et énergie : DuPont requiert une pression d'alimentation plus élevée (≥ 57.6 bar vs ≥ 53.3 bar pour LG) → LG offre un avantage énergétique relatif.
5. Risque d'entartrage : SI gypse positifs sur les deux simulations → nécessité d'anti scalant et ajustement du prétraitement (pH, / Clarification, dosage anti scalant) pour les deux membranes.
6. LG Chem est plus performant en termes de consommation énergétiques et de qualité d'eau produite. Grace à une pression d'alimentation plus faible.
7. La fonctionnement de DuPont est plus énergivore.

V.13 – Recommandation technique pour Cap Blanc :

Si la priorité est la réduction de la consommation énergétique, la membrane LG paraît préférable (pression d'alimentation plus faible pour un perméat équivalent). Si l'objectif est de minimiser le nombre d'éléments (i.e. débit par élément élevé) tout en acceptant une pression légèrement supérieure, la solution DuPont peut être considérée. Dans tous les cas, la présence d'un SI gypse positif impose la mise en place d'un programme d'anti scalant et le contrôle de la récupération pour prévenir la précipitation.

Cependant ; il convient de souligner que les modules DuPont représentent une solution optimale pour les grandes stations de dessalement ; notamment depuis l'intégration des technologie modernes de récupération d'énergie ; qui permettent de compenser la

consommation électrique liée à la pression plus élevée et d'améliorer l'efficacité globale du procédé.

Conclusion :

L'étude comparative menée entre les membranes DuPont et LG Chem souligne que le choix de la technologie membranaire dépend étroitement des priorités de conception et d'exploitation. Les résultats des simulations montrent que la membrane LG Chem est particulièrement adaptée lorsque l'objectif principal est la réduction de la consommation énergétique, grâce à sa pression d'alimentation plus faible pour un perméat équivalent.

En revanche, la membrane DuPont se distingue par un débit spécifique plus élevé par élément, permettant ainsi de réduire le nombre de d'éléments nécessaires. Cette caractéristique représente un avantage décisif dans le cas des stations de grande capacité, où la compacité et la productivité sont des critères essentiels.

Dans le cas spécifique de la station de Cap Blanc, le recours aux membranes DuPont constitue la solution la plus avantageuse. En effet, l'intégration des technologies modernes de récupération d'énergie permet de compenser la pression d'alimentation légèrement supérieure, tout en garantissant une optimisation de la production et de l'efficacité globale de l'installation.

Conclusion

Conclusion

Conclusion générale :

La raréfaction croissante des ressources en eau douce impose aujourd'hui le recours à des solutions durables et performantes telles que le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse. L'objectif de ce mémoire était de souligner l'importance du choix des équipements, en particulier les filtres à cartouches et les membranes, dans l'optimisation des performances et la réduction des coûts d'exploitation des stations de dessalement. L'analyse menée a montré que les filtres à cartouches de type high flow sont mieux adaptés aux grandes installations puisqu'ils permettent de traiter des débits élevés avec une perte de charge réduite et une durée de vie plus longue, ce qui en fait une solution plus économique à long terme dans les stations modernes comme celle de Cap Blanc. Les filtres classiques, en revanche, trouvent leur utilité dans les petites et moyennes unités où les coûts d'investissement doivent rester limités, mais ils exigent une maintenance plus fréquente et un remplacement régulier. En ce qui concerne les membranes d'osmose inverse, le module DuPont High Flow est particulièrement efficace pour les grandes stations nécessitant une optimisation énergétique et un traitement de volumes importants, tandis que le module LG Chem se distingue par sa bonne résistance chimique et sa flexibilité, ce qui le rend plus adapté aux conditions variables de qualité d'eau et aux installations devant s'adapter à des contraintes changeantes. Le choix entre ces deux types de membranes dépend donc du contexte d'exploitation et des priorités fixées par la station. Par ailleurs, cette étude a mis en évidence l'influence de plusieurs facteurs opérationnels sur la performance du procédé, notamment la température, puisque la baisse de celle-ci augmente la viscosité de l'eau et donc la pression nécessaire, ainsi que la salinité et la qualité de l'eau brute qui déterminent la pression osmotique, sans oublier l'encrassement progressif des membranes qui réduit le flux et impose des opérations de nettoyage régulières. En définitive, ce mémoire a montré que l'efficacité et la durabilité des stations de dessalement reposent sur un choix judicieux des filtres et des membranes, adapté aux réalités techniques et économiques de chaque contexte. L'adoption de technologies modernes telles que les filtres high flow et les membranes à haut rendement représente une orientation incontournable pour assurer la sécurité hydrique et réduire l'impact de la crise mondiale de l'eau, aussi bien en Algérie que dans le reste du monde.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques :

- (1) Revue Paralia, Dessalement d'eau de mer, Puits Ingénieur Conseil, 32 Chemin du Moulin, France. « jean.bouguis@wanadoo.fr (histoire de dessalement)
- (2) Salomon, J. (2012). Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir. Pág. 237 a 26
- (3) fr.wikipedia.org/wiki/Osmose_inverse.
- (4) www.actuenvironnement.com/.../developpement_dessalement_eau_6101.php4).
- (6) <https://tpedessalementmaroc.weebly.com> distillation-par-deacutetent...
- (7). H Mahmoudi; SA Abdul Wahab; M F A Goosen; S S. Sablani, J. Perret, A. Ouagued, N. Spahis, Weather data and analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries, Desalination 222 (2008) 119-127
- (8) Dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire en vue de l'irrigation d'une serre agricole « T. Tahri, 1 A. Bettahar, 1 M. Douani, 2 S.A. Abdul-Wahab, 2 H. Al-Hinai, 3 Y. Al-Mulla ».
- (9) World Bank (2024). Water Security and Desalination Initiatives in Developing Regions. Washington, D.C.
- (10) Ayat-Allah Bouramdane. Minéraux de la Transition Énergétique : Criticité Géologique, Géostratégique et Environnementale. énergie/mines & carrières, 2023.
- (11) Dans le document Impact des arrêts Techniques de l'usine de dessalement de l'eau de Mer sur l'entreprise et l'environnement (Page 80-85)
- (12) principale acteur de dessalement de l'eau de mer ; ASMA ARBIA -chef département R&D de l'AEC
- (13) 6] http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf. consulté le 19/03/2013.
- (14) TAHRAOUI DOUMA. N (2010) : « Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès, Chlef. Impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique) ». Hassiba Benbouali Chlef.
http://www.univchlef.dz/uahbc/seminaires_2010/communication_tahraouidoumanaima_201pdf
.
- (15) ARZATE, A. (Mai 2008) Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire, Saint-Norbert d'Arthabaska, Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole Inc, 56p.
- (16) Valérie JACQUET VIOLLEAU (1999) : « Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant application au lactosérum ». Thèse présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR de l'Institut National Polytechnique de TOULOUSE.FRANCE.
<http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000013/01/violleau.pdf>.
- (17) Le dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël. (google scholar).

(18) Valérie JACQUET VIOLLEAU (1999) : « Déminéralisation par électrodialyse en Présence d'un complexant application au lactosérum ». Thèse présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR de l'Institut National Polytechnique de TOULOUSE.FRANCE.

<http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000013/01/violleau.pdf>.

[19] LACHHABE Ahmed (2004) : « Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration pour le dessalement de l'eau de faibles concentrations en sel ». Mémoire de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Etat en Hydraulique, université Aboubakr Belkaid -Tlemcen-.

[20] Alfa Arzate, Ph.D (2008) : « Procédés de séparation membrane et leur application dans l'industrie alimentaire ». 142, Rang Lainesse Saint-Norbert d'Arthabaska Québec.

(21) livre ALAIN MAUREL ; le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce.

(22) google scholar : colmatage de membrane « 2004 Mémoire de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Etat en Hydraulique »- université Aboubakr Belkaid-Tlemcen-.

(23) UNESCO (1981) - "Practical Salinity and Temperature in Brackish Waters" (donne des normes pour les mesures).

(24) M.M. Rahman, C. Lusk and M.J. Guirguis, 'Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices', Master Degree of Science, University of South Florida, 2011.

(25) dimensionnement de la station de dessalement de Cap Blanc -menée par l'équipe du bureau d'étude de l'entreprise nationale de génie civil et bâtiment ENGCB.

(26) Wikipedia (2020) : Population de l'aire urbaine d'Oran. World Population Review (2025) : Population d'Oran. Persée (1987) : Données historiques indiquant une population d'Oran

Annexes

Les annexes :



Product Data Sheet FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes



FilmTec™ SW30HRLE-440



Seawater High Permeate Quality Reverse Osmosis Membrane Element with Higher Productivity

Key Features

- Optimized combination of water production and permeate quality.
- Permits low system capital cost by maximizing production capacity.
- Excellent durability resulting in stable, long-term performance.
- Longer storage time and warranty coverage with improved sustainability footprint versus our wet RO membrane elements.

Key Applications

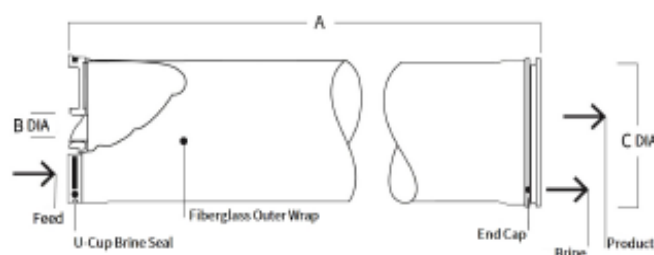
- Seawater desalination for municipal and industrial applications.
- Suitable for medium and high feed water salinity.
- Offers balance between permeate quality and energy consumption.
- Applicable for optimized Internally Staged Designs (ISD) in combination with other FilmTec™ seawater membranes.

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flowrate		Stabilized Boron Rejection (%)	Stabilized Salt Rejection (%)	Minimum Salt Rejection (%)
	(ft²)	(m²)		(gpd)	(m³/d)			
SW30HRLE-440	440	41	28	8,000	30.2	92	99.80	99.65

1. The above benchmark values are based on the following test conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary $\pm 15\%$.
3. Sales specifications may vary as design revisions take place.

Element Dimensions



FilmTec™ supplies coupler part number 311158 with each element. Each coupler includes two 3/32 GPR O-rings (part number 151785).

FilmTec™ SW30HRLE-440 Dimensions – inches (mm)	
A	40.0 (1,016)
B	1.125 ID (29 ID)
C	7.9 (201)

ID - Inner Diameter
DIA - Diameter

1. For element weight information, refer to [What is the weight of FilmTec™ elements as delivered?](#)
2. For element packing and shipping information, refer to [How are FilmTec™ elements packaged and shipped?](#)

Suggested Operating Conditions ¹

Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
Maximum Operating Temperature ^{2,3}	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure ³	1,200 psig (83 bar)
Maximum Element Pressure Drop	
Per element	15 psig (1.0 bar)
Per pressure vessel (minimum 4 elements)	50 psig (3.5 bar)
pH Range	
Continuous Operation ²	2 – 11
Short-term Cleaning (30 min) ⁴	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance ⁵	< 0.1 ppm

1. For recommended feed and permeate flow rates, flux, and recovery for various feed sources, refer to [FilmTec™ Design Guidelines for multiple-element systems of 8-inch elements](#) (Form No. 45-D01605-en).
2. Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
3. Consult your DuPont representative for advice on applications above 95°F (35°C). Relevant information regarding operation at high temperature and pressure: [FilmTec™ Seawater Elements Operating Limits](#) (Form No. 45-D00691-en) and [Shimming Elements](#) (Form No. 45-D01057-en).
4. Refer to [FilmTec™ Cleaning Guidelines](#) (Form No. 45-D01606-en).
5. Oxidation damage is not covered under warranty. DuPont recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to [Dechlorinating Feedwater](#) (Form No. 45-D01569-en) for more information.

General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- For successful operation of Reverse Osmosis (RO) and Nanofiltration (NF) membrane systems, the operation must follow the guidelines provided in the [FilmTec™ Reverse Osmosis / Nanofiltration Elements Operation Excellence and Limiting Conditions Tech Fact](#) (Form No. 45-D04388-en).
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Avoid static permeate-side backpressure at all times.
- Permeate obtained from the first hour of operation should be discarded.
- The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Important Information

Please consider good operating practices for the optimal performance of the Reverse Osmosis membrane elements to assure damage free operation:

1. [Loading of Pressure Vessels - Preparation & Element Loading](#) (Form No. 45-D01602-en)
2. System Operation, including plant [Start-Up Sequence](#) (Form No. 45-D01609-en) and [RO & NF Systems Shutdown](#) (Form No. 45-D01613-en)
3. [Handling, Preservation, and Storage](#) (Form No. 45-D03716-en)

Full information of plant design, system operation and troubleshooting is given in the [FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual](#) (Form No. 45-D01504-en).

Regulatory Note

This product may be subject to drinking water application restrictions in some countries; please check the application status before use and sale.



Have a question? Contact us at:
www.dupont.com/water/contact-us

All information set forth herein is for informational purposes only. This information is general information and may differ from that based on actual conditions. Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where DuPont is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Please note that physical properties may vary depending on certain conditions and while operating conditions stated in this document are intended to lengthen product lifespan and/or improve product performance, it will ultimately depend on actual circumstances and is in no event a guarantee of achieving any specific results. DuPont assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "DuPont" or the "Company" mean the DuPont legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED. No freedom from infringement of any patent or trademark owned by DuPont or others is to be inferred.

©2022 DuPont. DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all trademarks and service marks denoted with ™, ® or ® are owned by affiliates of DuPont de Nemours Inc., unless otherwise noted. The Edison Seal is a trademark of Edison Best Five Product Awards.

Form No. 45-D00695-en, Rev. 4
November 2022

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/l	0,2
	Ammonium	mg/l	0,5
	Baryum	mg/l	0,7
	Bore	mg/l	- Eaux conventionnelles : 1 - Eaux dessalées ou déminéralisées : 1,3
	Fluorures	mg/l	1,5
	Nitrates	mg/l	50
	Nitrites	mg/l	0,2
	Oxydabilité	mg/l O ₂	5
	Acrylamide	µg/l	0,5
	Antimoine	µg/l	20
	Argent	µg/l	100
	Arsenic	µg/l	10
	Cadmium	µg/l	3
	Chrome total	µg/l	50
	Cuivre	mg/l	2
	Cyanures	µg/l	70
	Mercure	µg/l	6
	Nickel	µg/l	70
	Plomb	µg/l	10
	Sélénium	µg/l	10
	Zinc	mg/l	5
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux	µg/l	0,2
	Fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (1,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (3,4) pyrène	µg/l	0,01
	Benzène	µg/l	10
	Toluène	µg/l	700
	Ethylbenzène	µg/l	300