



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : RÉUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES (RENC)

THEME :

**DIMENSIONNEMENT DE LA CHAINE DE
PRETRAITEMENT DE LA STATION DESSALEMENT
BENI SAF WATER COMPANY
(W. D'AIN TEMOUCHENT)**

Présenté par :
CHEMIRIK Miloud

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
DERNOUNI Youcef	M.A.A	Président
KHALED HOULI Samia	M.A.A	Examineur
KHEDIM ALLAH Abderrahmane	M.A.A	Examineur
TAFAT Leila	M.A.A	Examineur
HACHEMI Abdelkader	M.C.A	Promoteur

Remerciements

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, qui m'a donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents, dont le soutien indéfectible a été une source constante de motivation. Mon père, par ses efforts inlassables, et ma mère, par son encouragement continu, ont joué un rôle essentiel dans l'aboutissement de ce projet.

Je remercie également l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique, qui m'a offert une éducation de qualité, ainsi que des ressources précieuses qui m'ont permis de grandir tant sur le plan académique que professionnel. Les compétences acquises au sein de cette institution m'ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements vont également aux ingénieurs de la station de dessalement de Beni Saf Water Company SPA, dont le soutien a été inestimable. Je pense particulièrement à mon cousin, **Chemirik Mustapha**, et à **Mahmoud Mekhloufi**, qui m'ont offert un encadrement précieux tout au long de cette période. Leur expertise et leurs conseils ont été essentiels pour mener à bien ce projet. Je tiens également à remercier **Bourraoui Mohamed** et **Belaidi Atalah**, qui ont aidé à trouver plusieurs solutions différentes.

Je tiens à exprimer ma gratitude particulière à mon encadrant, Monsieur **Hachemi Abdelkader**, pour son accompagnement et ses conseils avisés. Sa rigueur et sa disponibilité ont été des atouts majeurs dans la rédaction de ce mémoire.

Ma pensée va également à tous les travailleurs et responsables du CTH (Organisme National de Contrôle Technique des Ouvrages Hydrauliques), en particulier Monsieur **Moudjeb Miloud**, pour leur collaboration et leur soutien tout au long de mon parcours.

Je souhaite remercier chaleureusement mon frère, **Chemirik Hammou**, ingénieur en génie civil, pour les informations et les conseils qu'il m'a prodigués depuis mon enfance. Son appui, dès mes premières années scolaires, a grandement contribué à ma réussite.

Finalement, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce mémoire de fin d'études. Mes chers amis, votre soutien indéfectible tout au long de ces cinq années universitaires a été essentiel à mon épanouissement personnel et académique. Vos encouragements, votre aide précieuse et les moments partagés ont été inestimables. Je remercie

également toutes les personnes qui ont joué un rôle clé dans la réalisation de ce mémoire. Votre expertise, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été d'une aide précieuse. Enfin, je n'oublie pas ma famille, dont le soutien moral et financier m'a permis de mener à bien ce projet. Votre confiance en moi et vos encouragements constants ont été une source de motivation inépuisable. À toutes ces personnes, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre contribution a été déterminante pour la réussite de ce mémoire et je vous en suis profondément reconnaissant.

يستكشف هذا البحث تصميم سلسلة المعالجة الأولية لمحطة تحلية المياه، مع التركيز على تحسين العمليات لضمان تحسين جودة المياه المنتجة. بعد التحليل المعمق لمختلف مراحل المعالجة الأولية، تم اقتراح حلول تقنية لتبسيط وجعل هذا التصميم أكثر فعالية.

الهدف الرئيسي هو ضمان إنتاج مياه صالحة للشرب تتوافق مع المعايير المعمول بها مع تقليل تكاليف التشغيل. وأخيراً، تم إجراء دراسة لتقييم الخيارات المختلفة لتغذية المحطة بالطاقة المتجددة، مع مراعاة الموارد المتاحة مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وغيرها من المصادر المستدامة، بهدف تقليل البصمة الكربونية وضمان تشغيل أكثر صداقة للبيئة والمحطة.

ملخص:

يستكشف هذا البحث تصميم سلسلة المعالجة الأولية لمحطة تحلية المياه، مع التركيز على تحسين العمليات لضمان تحسين جودة المياه المنتجة. بعد التحليل المعمق لمختلف مراحل المعالجة الأولية، تم اقتراح حلول تقنية لتبسيط وجعل هذا التصميم أكثر فعالية.

الهدف الرئيسي هو ضمان إنتاج مياه صالحة للشرب تتوافق مع المعايير المعمول بها مع تقليل تكاليف التشغيل. وأخيراً، تم إجراء دراسة لتقييم الخيارات المختلفة لتغذية المحطة بالطاقة المتجددة، مع مراعاة الموارد المتاحة مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وغيرها من المصادر المستدامة، بهدف تقليل البصمة الكربونية وضمان تشغيل أكثر صداقة للبيئة والمحطة.

الكلمات المفتاحية: المعالجة الأولية، مياه صالحة للشرب، تحلية المياه، الطاقة المتجددة

Résumé :

Ce mémoire explore le dimensionnement de la chaîne de prétraitement d'une station de dessalement, en mettant l'accent sur l'optimisation des processus. Après une analyse approfondie des différentes étapes de prétraitement, des solutions techniques ont été proposées pour simplifier et rendre plus efficace ce dimensionnement. L'objectif principal est d'assurer une production d'eau potable conforme aux normes en vigueur tout en minimisant les coûts d'exploitation. Enfin, une étude a été réalisée pour évaluer les différentes options d'alimentation en énergie renouvelable de la station, en tenant compte des ressources disponibles telles que l'énergie solaire, éolienne, et autres sources durables, afin de réduire l'empreinte carbone et d'assurer une opération plus écologique de la station.

Keywords: prétraitement , eau potable , dessalement , énergie renouvelable

Abstract:

This thesis explores the design of the pretreatment chain for a desalination plant, focusing on optimizing processes. After an in-depth analysis of the various pretreatment stages, technical solutions were proposed to simplify and make this design more efficient. The primary goal is to ensure the production of potable water that meets existing standards while minimizing operating costs. Finally, a study was conducted to evaluate the various options for powering the plant with renewable energy, considering available resources such as solar, wind, and other sustainable sources, with the aim of reducing the carbon footprint and ensuring a more environmentally friendly operation of the plant.

Les mots clés : pretreatment , potable water , desalination , renewable energy

Table des matières

Chapitre I : Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Aperçu historique :.....	3
I.3. Qualité de l'eau de mer	3
I.3.1. Salinité.....	3
I.3.2. Température :	4
I.3.3 Teneur en matières en suspension :.....	4
I.4. Disposition typique d'une installation de dessalement :	4
I.4.1. L'alimentation en eau de mer :.....	5
I.4.2. Le prétraitement :	5
I.4.3. Installation de dessalement :	5
I.4.4. Le post-traitement :	6
I.5.1. Techniques de dessalement par transition de phase :.....	7
I.5.2. Les procédés membranaires :	11
I.5.3. Les Techniques Chimiques :	14
I.3.2. Extraction par solvants :.....	15
I.5.4. Diverses méthodes de dessalement :.....	15
I.6. La quantité d'énergie requise pour le dessalement :	16
I.7. L'effet du dessalement sur l'écosystème :.....	17
I.7.1. Rejets atmosphériques :.....	17
I.7.2. Rejets chimiques :	17
I.7.2. Rejets de saumure :	17
I.8. Zone de rejet de la saumure :.....	18
I.9. Les difficultés techniques rencontrées dans le processus de dessalement :.....	18
I.9.1. La corrosion :	18
I.9.2. L'entartrage :.....	19
I.10. Les avantages et les inconvénients de dessalement :.....	19
I.11. Conclusion :	20
Chapitre II : Le procédé d'osmose inverse	
II.1. Introduction :	23
II.2. Le fonctionnement de l'osmose inverse :.....	23
II.2.1. Qu'est-ce que l'osmose ? :.....	23

II.2.2. Qu'est-ce que l'osmose inverse ? :.....	24
II.3. Pression osmotique :.....	25
II.4. Composants essentiels d'une unité d'osmose inverse :	26
II.4.1. Prise d'eau de mer :	26
II.4.3. Le pompage haute pression :	29
II.4.4. Récupération d'énergie :	29
II.4.6. Poste traitement :	30
II.4.7. Poste de nettoyage chimique :	30
II.5. Fonctionnement des systèmes membranaires :.....	31
II.5.1. Filtration frontale :.....	31
II.5.2. Filtration Tangentielle :	31
II.6. Optimisation des Conditions pour l'Osmose Inverse :	33
II.6.1 La pression motrice ΔP :.....	33
II.6.2 La conversion Y :.....	33
II.6.3 Le passage des sels PS	33
II.6.4 Le rejet de sels	33
II.6.5 La sélectivité R d'une membrane :.....	33
II.7. Mécanisme de transfert :	34
II.8. Phénomène de concentration polarisée :	35
II.9. Membranes d'osmose inverse :.....	36
II.9.1. Introduction aux membranes	36
II.9.2. Classification des membranes utilisées en osmose inverse :	36
II.9.3. Durée de vie des membranes :	36
II.10.2. Les types de modules :.....	37
II.12. Limitations de l'osmose inverse :	39
II.12.1. Définition du colmatage :	39
II.12.2. Les types de colmatage	39
II.3.3. MFI-UF (Modified Fouling Index by using Ultrafiltration membrane):	42
II.13. Le nettoyage des membranes :	42
II.13.1. Les rétro-lavages :.....	42
II.13.2. Les nettoyages chimiques :.....	43
II.13.3. Nettoyage enzymatique :	43
II.14. Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse :	43
II.15. Conclusion :.....	44

Chapitre 03 : Présentation et diagnostic de station dessalement

III.1 Introduction :	46
III.2.1 Vue d'ensemble de l'installation de dessalement de l'eau de mer :	46
III.2.2 Géologie :	47
III.2.3 Cadre climatique :	47
III.2.4 Analyse chimique des constituants de l'eau de mer :	47
III.2.5 Pompage et stockage de l'eau de mer :	48
III.2.6 Traitement préliminaire de l'eau de mer :	49
III.2.7 Utilisation de procédé d'osmose inverse et le système de récupération d'énergie :	52
III.2.8 Dosage chimique :	55
III.2.9 Équipement de nettoyage :	57
III.3 Défis techniques rencontrés dans le processus de dessalement :	58
III.3.1 Corrosion :	58
III.3.2 L'entartage :	59
III.3.3 Le colmatage :	59
III.3.4 Surconsommation des pompes :	60
III.3.5 Autres défis rencontrés :	61
III.4 Conclusion :	61

Chapitre IV : Dimensionnement de la chaîne de prétraitement

IV.1. Introduction :	63
IV.2. Les analyses d'eau brute :	63
IV.3. Les déroulements de prétraitement :	63
IV.3.1 Le prétraitement physique :	64
b) Filtration a lite :	68
b) Filtration a anthracite :	73
c) Filtre a cartouche (microfiltration) :	75
d) La décantation lamellaire :	80
IV.3.2 Le prétraitement chimique :	84
IV.4 Osmose inverse :	87
IV.4.1 Fonctionnement de la membrane :	87
IV.4.3 Les principaux procédés d'osmose inverse :	87
IV.4.4 Calcule le débit de production :	88
IV.4.5 Calcule le débit de rejet :	88
IV.4.6 Calcule la concentration des rejet (la saumure) :	88

IV.5 Le système de reminéralisation :.....	89
IV.6 Eau potable :	89
IV.6.2 Contrôle de qualité :	90
IV.7 Conclusion :	90

Chapitre V : Comparaison entre les types de prétraitement (gravitaire et sous pression)

V.1 Introduction :.....	93
V.2 Le prétraitement gravitaire :.....	93
V.2.1 Traitement préliminaire :	93
V.2.2 Le traitement physicochimique :	93
V.2.3 Les bâches de coagulation	94
V.2.4 Les bâches de Flocculation :	94
V.2.5 Décantation lamellaire :.....	95
V.2.6 La filtration par média granulaire :.....	96
V.2.7 La filtration a cartouche :.....	97
V.3 Etude Comparaison des Prétraitements (Gravitaire vs Pression) :.....	97
V.3.1 Efficacité de la filtration :.....	97
V.3.2 Efficacité de surface	98
V.3.3 Filtres Gravitaires :	98
V.3.4 Filtres Sous Pression :.....	98
V.3.5 Le Cout De Construction :.....	98
V.3.6 Le Cout De La Consommation énergétique :.....	99
V.4 Conclusion :.....	99

Chapitre VI : Alimentation de la station par l'énergie renouvelable

VI.1 Introduction :.....	101
VI.2 Implémentation des Énergies Renouvelables :	101
VI.2.1 Les Pelâmes :.....	101
VI-1-2 Les Panneaux Photovoltaïques :	105
VI-1-3 les Éoliennes Terrestres :	107
VI-1-4 Les Eoliennes Offshores :.....	110

Liste des figures

Figure I.1: Schéma général d'une installation de dessalement.....	05
Figure I.2: Les procédés de dessalement.....	07
Figure I.3 : Les techniques de déminéralisation sont utilisées dans divers domaines en fonction du niveau de salinité de l'eau à traiter.	07
Figure I.4 : Principe Fondamental de la distillation.	08
Figure I.5: Schéma d'une distillation à simple effet.	09
Figure I.6: Schéma d'une distillation à multiple effet.	09
Figure I.7: Exploration du fonctionnement des systèmes à détente successive (MSF) à 3 niveaux.....	10
Figure I.8 : Conceptualisation d'une unité d'évaporation intégrant la Compression de Vapeur.....	13
Figure I.9 : Alimentation unité d'électrodialyse.....	13
Figure I.10 : Principe de l'électrodialyse	15
Figure I.11: Principe du distillateur serre.....	15
Figure I.12 : Distillateur solaire.	16
Figure II.1: Phénomène de l'osmose.	24
Figure II.2: Procédé de l'osmose inverse.	24
Figure II.3: Perfectionnement du Processus de Séparation en Phase Liquide par Perméation à Travers une membrane.....	25
Figure II.4: Pression osmotique.	25
Figure II.5 : Les Composants essentiels d'une unité d'osmose inverse.	26
Figure II.6: Tuyau de captage de l'eau de mer (Ténès, willaya de Chlef).	26
Figure II.7: Prétraitement conventionnel.	27
Figure II.8: Racks d'osmose inverse.....	30
Figure II.9: Station de dessalement.....	30
Figure II.10: Exploration du Mécanisme de la Filtration Frontale.	31
Figure II.11: Exploration du Mécanisme de la filtration tangentielle.....	31
Figure II.12: La dimension des matériaux éliminés par les méthodes de filtration membranaire.	32

Liste des figures

Figure II.13: Phénomène de polarisation.....	37
Figure II.14: Optimisation des Modules à Fibres Creuses.....	37
Figure II.15: Exemple de module à plaques.....	38
Figure II.16 : Exploration d'un Module Spiralé pour le Processus d'Osmose Inverse.....	38
Figure II.17 : Détermination graphique du MFI.....	41
Carte III-1 : Situation Géographique de la Station de Dessalement.....	46
Figure III.1 : Variation de l'augmentation de la salinité de l'eau de mer à Chatt El Hillal.....	47
Figure III.2 : Prescriptions minimales pour la prise d'eau et le rejet de Saumures.....	48
Figure III.3 : Bassin de stockage.....	48
Figure III.4 : Les pompes de captage.....	48
Figure III.5 : Le filtre rotatif.....	49
Figure III.6 : Les collecteurs des filtres.....	49
Figure III.7 : Ensemble des filtres à sable et à Anthracite.....	51
Figure III.8 : Les Filtres à Cartouches.....	51
Figure III.9 : Modules d'osmose inverse.....	52
Figure III.10 : Un rack avec le système de récupération d'énergie.....	53
Figure III.11 : Rejet de saumure vers la mer.....	55
Figure III-12 : Station de contrôle pour dosage chimique.....	56
Figure III-13 : Ensemble des collecteurs et des tuyaux communs.....	57
Figure IV. 1 : Le dérailleur.....	68
Figure IV. 2 : La matière de la lite.....	70
Figure IV. 3 : les ballons de filtration (arrivé et la sortie de l'eau).....	71
Figure IV.4 : Demi tuyau pour la circulation d'eau comme un canal.....	73
Figure IV.5 : les ballons de filtration (lavage des filtres).....	74
Figure IV.6 : Les filtres à cartouche.....	77
Figure IV.7 : Le remplissage d'une cartouche.....	78
Figure IV.8 : Courbes d'évolution de l'efficacité en fonction de la taille.....	79
Figure IV.9 : perte de charge par rapport à la durée de vie.....	81

Liste des figures

Figure IV.10 : Les réservoirs hypochlorite de sodium.....	86
Figure IV.11 : le réservoir anti coup bélier.....	86
Figure IV.12 : Les réservoir acide sulfurique.....	87
Figure V-1 : Les mélangeurs dans le réservoir de coagulation.....	95
Figure V-2 : Principe générale de décanteur lamellaire.....	97
Figure V-3 : La filtration par média granulaire (multi couche).....	97
Figure VI.1 : Les articulations des pelâmes. Côtes.....	103
Figure VI.1 : Pelâmes Installer le Long de Côtes.....	103
Figure VI-3 : Schéma d'Implantation d'une Ferme de Pelâmes. (Pelâmes Wave Power).....	104
Figure VI-4 : Analyse Comparative de l'Intensité du Champ Magnétique selon la Distance par Rapport au Câble Électrique pour des Courants Alternatif (à droite) et Continu (à gauche)....	106
Figure VI-5 : Photographie d'un Champ des Panneaux Photovoltaïque.....	106
Figure VI-6 : Énergie Renouvelable : Les Champs d'Éoliennes en Photographie.....	108
Figure VI-7 : Composition de la Nacelle d'une Eolienne (Syndicat des Energies Renouvelables de France, 2009).....	109
Figure VI-8 : La puissance d'une éolienne en fonction du vent	109
Figure VI-9 : Calcul de la Vitesse des Vents Moyens à Différentes Altitudes.....	110
Figure VI-10 : Comparaison Données Constructeur et Vitesse Moyenne Annuelle à la région de Beni Saf (Modèle VESTAS V126)	110
Figure VI-11 : Parc d'éoliennes offshore au Danemark.....	111
Figure VI-12 : Différents Types d'Ancrage des Eoliennes Offshores.....	112
Figure VI-13 : Disposition de Parcs Eoliens Offshores en Arc de Cercle et en Quadrillage...	112

Liste Des Tableaux

Tableau III-1 : Nombre de racks, tubes de pressions et des membranes.....	53
Tableau IV.1 : la composition d'eau brute (eau de mer).....	64
Tableau IV.2 : les diamètres des conduites partie captage.....	65
Tableau IV.3 : la variation des valeurs recommandée.....	66
Tableau IV.4 : Les espacement et épaisseurs des barreaux.....	67
Tableau IV.5 : les valeurs de beta pour chaque type de barreau.....	69
Tableau IV.6 : Les caractéristique du matériau (lite).....	71
Tableau IV.7 : les diamètres des conduites filtration a lite.....	72
Tableau IV.8 : Les caractéristiques de l'antracite.....	75
Tableau IV.9 : les diamètres des conduites filtration a anthracite.....	76
Tableau IV.10 : Les analyses pour contrôle qualité d'eau.....	92
Tableau VI-1 : Caractéristiques d'un Pelâmes (LL< Power)	104
Tableau VI-2 : Comparaison du Dimensionnement entre Différents Modèles de Panneaux Photovoltaïques (Ministère de l'énergie et du développement durable en France, 2012).....	107
Tableau VI-3 : Caractéristiques du Modèle VISTAS V126.....	110

Nomenclature:

MSF: Multi Stage Flash

VTE: Vertical Tube Evaporator

HTE: Horizontal Tube Evaporator

VC : Compression Vapeur

OI : Osmose Inverse

ED: Electro-dialyse

TDS: Total Dissolved Solids

MES : Matière En Suspension

SDI : Silt Density Index MF : Micro Filtration

UF : Ultra Filtration

NF : Nano Filtration

MFI: Modified Fouling Index

ERI: Energy Recovery Index

PRFV : Plastique Renforcé de Fibre de Verre

Introduction Générale

Le dessalement de l'eau est devenu une solution incontournable face aux défis croissants de l'accès à l'eau potable, en particulier dans les régions arides et semi-arides où les ressources en eau douce sont limitées. La station de dessalement de Beni Saf Water Company SPA joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau de la région, en transformant l'eau de mer en une ressource précieuse pour les populations locales. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche visant à optimiser le processus de prétraitement de cette station, élément clé pour assurer l'efficacité et la durabilité de l'ensemble de la chaîne de dessalement.

Le premier chapitre de ce travail propose un cadre général sur le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres, en fournissant des définitions essentielles ainsi qu'un aperçu historique de l'évolution de ces technologies à travers le monde. Le deuxième chapitre explore les différentes méthodes d'élimination des sels, avec un focus particulier sur l'osmose inverse, qui est la méthode prédominante dans l'industrie du dessalement. Ces chapitres offrent une base théorique solide pour aborder les spécificités de la station de Beni Saf. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une description détaillée de la station, identifié les problèmes rencontrés et proposé des solutions pour les résoudre.

Le cœur de ce mémoire, abordé dans le quatrième chapitre, est le dimensionnement de la chaîne de prétraitement. Ce chapitre examine en détail les étapes critiques, du captage de l'eau à travers les filtres à sable et à anthracite, jusqu'aux filtres à cartouche, tout en proposant des ajustements pour remédier aux problèmes identifiés sur site.

Le cinquième chapitre compare les deux principales approches de prétraitement utilisées dans les stations de dessalement : le prétraitement gravitaire et le prétraitement sous pression. Cette comparaison s'appuie sur plusieurs critères, tels que l'efficacité d'élimination des particules, la consommation énergétique, la facilité de maintenance, et l'adaptabilité aux variations de la qualité de l'eau brute. L'objectif est de déterminer laquelle de ces approches offre les meilleures performances dans le contexte spécifique de la station de Beni Saf, tout en tenant compte des contraintes locales et des exigences en matière de durabilité.

Enfin, le sixième chapitre explore les possibilités d'intégration des énergies renouvelables pour l'alimentation de la station. Dans un contexte où la transition énergétique est devenue une priorité mondiale, ce chapitre propose une analyse détaillée de la consommation énergétique globale de la station et examine l'impact potentiel de différentes sources d'énergie renouvelable, telles que les éoliennes, les panneaux solaires et l'énergie éolienne. L'étude évalue non seulement les aspects techniques de l'intégration de ces technologies, mais aussi leur viabilité économique à long terme, leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et leur rôle dans l'amélioration de l'indépendance énergétique de la station.

Ce mémoire se propose ainsi de contribuer non seulement à l'amélioration technique de la station de dessalement de Beni Saf, mais aussi à une réflexion plus large sur l'optimisation des processus de dessalement dans un contexte mondial où l'eau est plus que jamais une ressource stratégique.

Chapitre I :

Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres

I.1. Introduction :

Le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres représente une réponse primordiale à la demande croissante en eau potable, face aux défis grandissants liés à la disponibilité des ressources en eau. Ce processus, qui implique l'utilisation de technologies telles que l'osmose inverse, la distillation et l'électrodialyse, permet de convertir l'eau salée en eau douce. Ce chapitre explore les fondements techniques du dessalement, ainsi que ses avantages, ses défis et ses répercussions économiques, environnementales et sociales. Il offre une vue d'ensemble détaillée du rôle essentiel joué par le dessalement dans la satisfaction des besoins mondiaux en eau douce

I.2. Aperçu historique :

Le processus de dessalement de l'eau est aussi vieux que la Terre elle-même. Il tire ses racines du cycle naturel de l'eau, où l'évaporation des océans et des mers donne naissance à de la vapeur d'eau, qui en se condensant, forme de l'eau douce sous forme de pluie ou de neige. Ce processus est considéré comme le plus grand système de dessalement sur terre. Des traces historiques suggèrent que les humains étaient conscients de ce phénomène depuis longtemps. Par exemple, des références dans l'Évangile évoquent l'échange d'ions, tel que l'utilisation du bois pour adoucir l'eau. Plus tard, Aristote mentionne dans son livre "Météorologie" le processus où de l'eau douce peut être obtenue en plaçant un récipient en terre dans l'eau de mer, ce qui permet la séparation des sels.

Des preuves datant du 4^{ème} siècle montrent également que les humains connaissaient le principe de la distillation pour obtenir de l'eau potable. Au 7^{ème} siècle, Jaber ibn Hayane a énoncé quelques règles de la distillation, mais le premier travail scientifique publié sur le sujet est celui d'Ibn Mansour Moaffak ibn Ali Adaoui à la fin du 9^{ème} siècle. La première station rudimentaire semble avoir été construite sur la plage de Tunis en 1650. En 1883, une station de dessalement par distillation solaire a été construite au Chili, à Saint Salinas. La première station industrielle, avec une capacité de 2400 m³ par jour, a été érigée dans l'une des îles hollandaises en 1930.

Au fil du temps, ces techniques de distillation se sont développées, en particulier au XIX^{ème} siècle avec l'avènement de la machine à vapeur. Pendant la Seconde Guerre mondiale, ces méthodes ont connu une véritable révolution. À partir des années cinquante, de nouveaux procédés ont émergé, notamment des méthodes ne nécessitant pas de changement d'état de l'eau salée pour son dessalement, mais plutôt une séparation dans la même phase, généralement à travers l'utilisation de membranes. [1]

I.3. Qualité de l'eau de mer

L'eau de mer est la matière première de l'usine de dessalement. Chacun peut observer ses changements de température, de limpidité d'un lieu ou d'un jour à l'autre ; les écarts de salinité sont moins connus. Salinité, température et matières en suspension sont les paramètres majeurs du fonctionnement d'une unité de dessalement. [2]

I.3.1. Salinité

La concentration en sels dissous, appelée salinité, varie selon la localisation géographique. Les régions polaires affichent les salinités les plus faibles, tandis que les zones proches de l'équateur présentent des concentrations plus élevées, dépassant parfois 50 g/L,

notamment le long de la côte Est de l'Arabie Saoudite où l'évaporation est favorisée par la chaleur et les hauts-fonds.

Quelques valeurs moyennes de la salinité de l'eau de mer :

- ✚ Océan Atlantique : 35 g/L.
- ✚ Mer Méditerranée : 38 g/L.
- ✚ Mer Rouge : 40 g/L et plus.
- ✚ Golfe Persique : 50 g/L et plus.

En dehors du chlorure de sodium qui représente 85 % de la salinité totale, on note la présence des ions bicarbonates, calcium et sulfates. Ces ions sont des sources potentielles d'entartrement selon les conditions de température, de concentration et de pH. Or tout procédé de dessalement implique une concentration de l'eau. Il restera donc à l'opérateur le choix de la température et du pH pour limiter sinon éviter l'entartrement des appareils. **[3]**

I.3.2. Température :

La température de l'eau de mer peut fluctuer de quelques degrés le long des côtes, influencée par les courants polaires, jusqu'à atteindre 35 °C aux abords de la péninsule arabique. Une température élevée favorise la distillation, mais cet avantage est limité du fait que l'eau a une capacité thermique spécifique très faible par rapport à son enthalpie de vaporisation (chaleur latente).

I.3.3 Teneur en matières en suspension :

L'environnement marin est dynamique, transportant à la fois des minéraux et des organismes vivants, souvent microscopiques. En haute mer, le plancton prédomine, tandis qu'à proximité des côtes, la quantité de sable augmente. Cette concentration varie en fonction des courants et de la profondeur des fonds marins. Les déchets urbains ou industriels peuvent entraîner une pollution significative. Le choix du site et de la conception des prises d'eau vise à éviter toute pollution et à minimiser l'apport de particules en suspension.

La distillation, moins sensible aux particules en suspension, nécessite uniquement une filtration grossière pour protéger les pompes et les échangeurs.

I.4. Disposition typique d'une installation de dessalement :

Une installation de dessalement peut être divisée en quatre composantes principales.

- ✚ Pompage
- ✚ Prétraitement
- ✚ Installation de dessalement
- ✚ Post-traitement

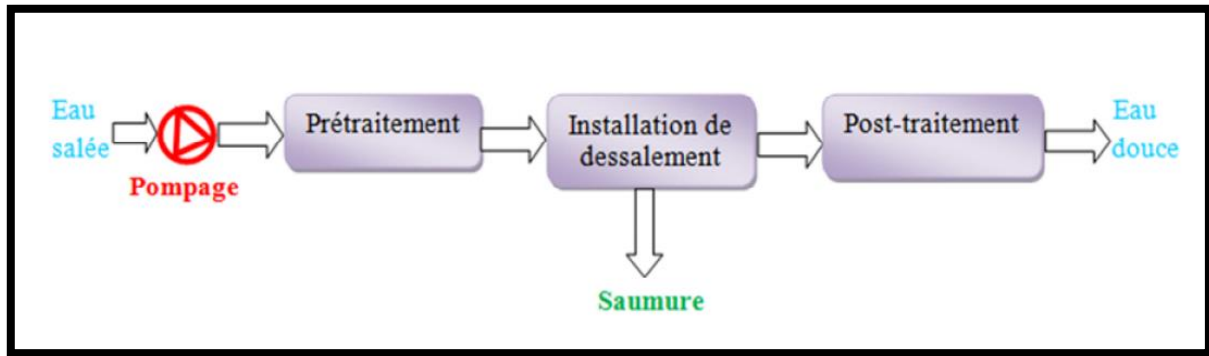


Figure I.1: Schéma général d'une installation de dessalement [3]

I.4.1. L'alimentation en eau de mer :

L'extraction de l'eau peut se faire de deux manières : directement à partir de la source ou par l'intermédiaire de puits côtiers. Ce dernier système offre l'avantage d'obtenir une eau claire, réduisant ainsi la nécessité de traitements préliminaires [4].

Dans le cas où l'eau est prélevée en mer via une prise à ciel ouvert, le système inclura les têtes de prises d'eau, les conduites qui les relient aux puits côtiers, la station de pompage dans les puits et les canalisations terrestres reliant les puits à l'installation de prétraitement. Il est essentiel que les têtes de prises d'eau soient bien positionnées pour éviter l'aspiration de débris flottants ou de sédiments, assurant ainsi un approvisionnement adéquat en eau salée [5].

I.4.2. Le prétraitement :

La composition en salinité, matières en suspension et matières organiques dans les océans et mers du monde entier est hautement variable. Les prétraitements utilisés avant le dessalement de l'eau de mer visent à éliminer les particules en suspension et le plancton, qui pourraient obstruer les équipements de dessalement. [6].

- ✚ **Chloration** : Bloque la prolifération des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites.
- ✚ **Filtration** : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
- ✚ **Antitartre** : La distillation favorise la précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur [7].

I.4.3. Installation de dessalement :

Le processus en question élimine les sels présents dans l'eau brute, qu'elle soit saumâtre ou de mer. Ce procédé peut prendre la forme d'un "système membranaire", d'un "système thermique" ou d'une autre méthode. Le choix de la technologie de dessalement la plus appropriée peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la géographie, l'environnement, le niveau de développement de la technologie, la qualité de l'eau brute et de l'eau produite, la disponibilité des technologies, la disponibilité énergétique pour faire fonctionner l'installation, la capacité des opérateurs à utiliser cette technologie et les coûts associés [8].

I.4.4. Le post-traitement :

Le processus de post-traitement de l'eau provenant de l'unité de dessalement se déroule en deux étapes importantes pour garantir sa potabilité.

- ✚ **Correction de la corrosivité** : L'eau traitée par le processus de dessalement est souvent déminéralisée, ce qui peut la rendre corrosive pour les infrastructures de distribution et les équipements avec lesquels elle entre en contact. Afin de remédier à cela, on ajoute du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hydroxyde de calcium) ou du CaCO_3 (carbonate de calcium) à l'eau. Ces substances réagissent avec l'eau pour augmenter sa teneur en minéraux, réduisant ainsi sa corrosivité et protégeant les infrastructures de distribution d'eau et les équipements.

- ✚ **Désinfection finale** : Bien que des processus comme l'osmose inverse soient efficaces pour éliminer la plupart des contaminants, y compris les microorganismes, il est nécessaire de réaliser une désinfection supplémentaire pour garantir la sécurité microbiologique de l'eau. Cette désinfection finale peut être effectuée à l'aide de produits chimiques désinfectants tels que le chlore ou le dioxyde de chlore, ou par d'autres méthodes comme l'exposition à la lumière ultraviolette. Cette étape est cruciale pour s'assurer que l'eau est sûre à la consommation et conforme aux normes de qualité de l'eau potable.

Différentes méthodes de dessalement :

Un auteur a identifié 27 méthodes distinctes de dessalement. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories principales :

1) Méthodes impliquant un changement d'état :

- ❖ Évaporation.
- ❖ Congélation.

2) 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).

3) Méthodes chimiques :

- ❖ Échange d'ions.
- ❖ Extraction par solvant.

Parmi ces méthodes, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont l'efficacité a été démontrée pour le dessalement de l'eau de mer. En effet, ces deux méthodes sont les plus utilisées sur le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un développement significatif dans le domaine, principalement en raison de problèmes liés à la consommation d'énergie et/ou aux coûts élevés d'investissement qu'elles nécessitent

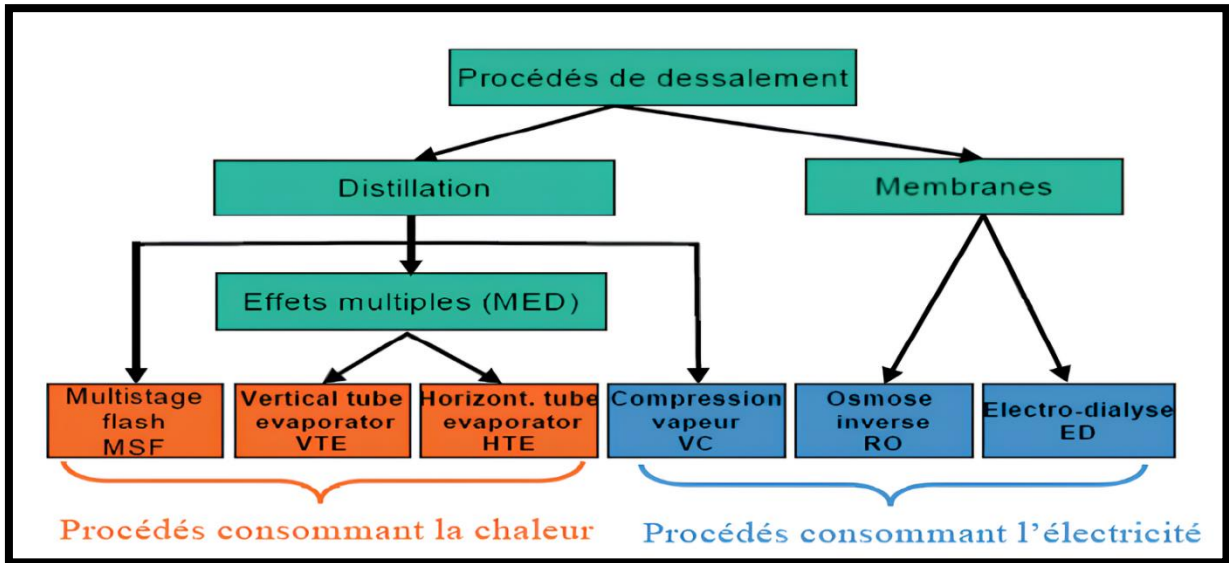


Figure I.2: Les procédés de dessalement [9].

En fonction de la salinité de l'eau à traiter, la figure fournit les domaines d'application de différentes techniques de dessalement.

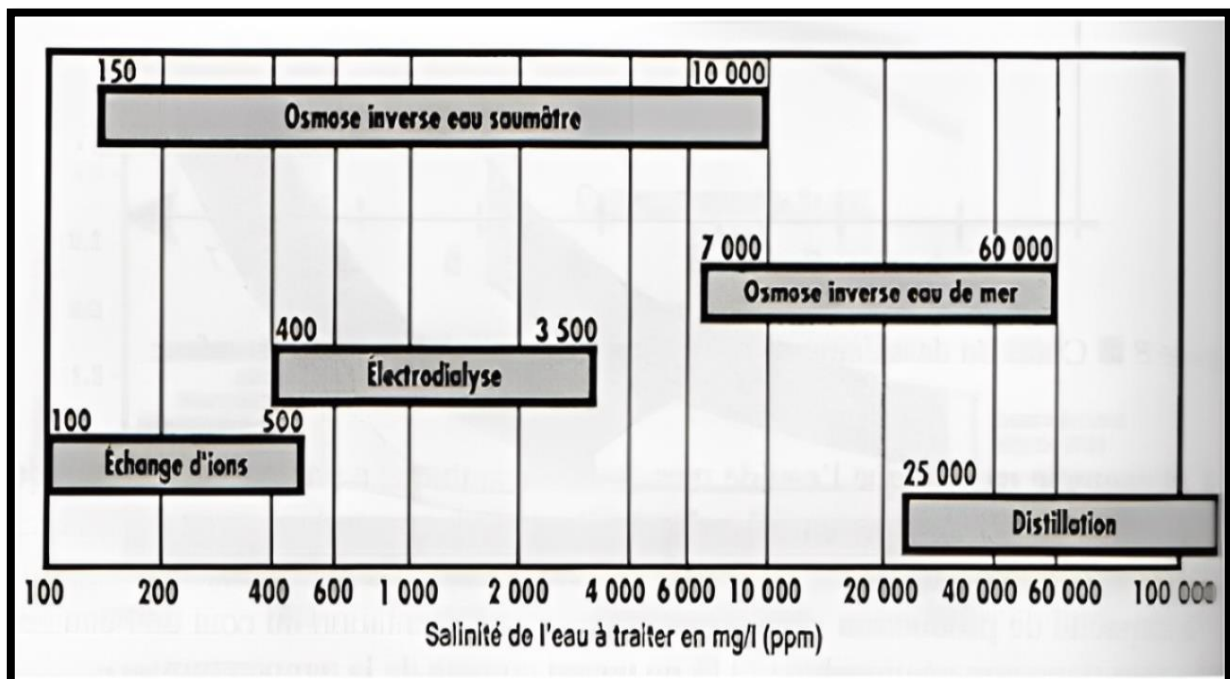


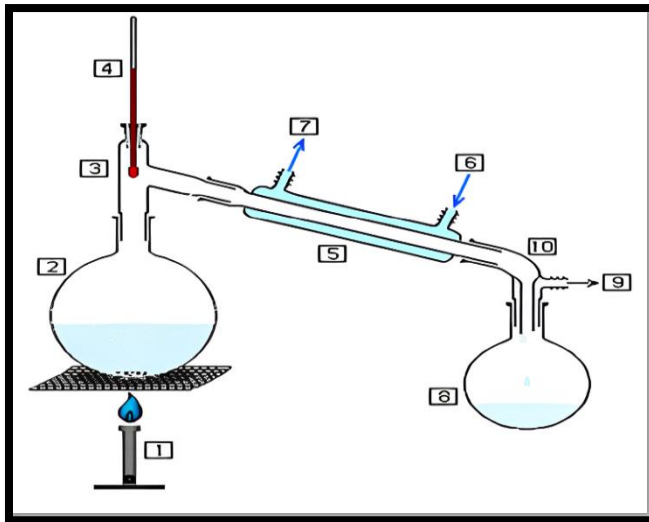
Figure I.3 : Les techniques de déminéralisation sont utilisées dans divers domaines en fonction du niveau de salinité de l'eau à traiter [9].

I.5.1. Techniques de dessalement par transition de phase :

I.5.1.1. La distillation :

Cette méthode, la plus ancienne dans l'histoire du dessalement de l'eau de mer, semble avoir été choisie en raison de sa simplicité. Elle implique l'évaporation de l'eau salée en utilisant soit la chaleur générée par une chaudière, soit plus simplement l'énergie solaire. Pendant ce

processus, les sels et autres composés dissous se déposent pendant que la vapeur d'eau s'élève. Ensuite, cette vapeur est condensée pour récupérer l'eau douce [9].



a- Principe de fonctionnement :

Dans ce dispositif, l'eau de mer contenue dans le réservoir (2) est chauffée à l'aide d'un bec bunsen (1). Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur et circule vers (3), où sa température est mesurée à l'aide d'un thermomètre (4). Ensuite, la vapeur passe à travers (5) une colonne réfrigérante alimentée en eau froide (6 et 7). Là, elle se condense et redevient liquide. De cette manière (8), on obtient de l'eau pure et totalement potable.

Figure I.4 : Principe Fondamental de la distillation [9].

b- Les différents types de la distillation :

La distillation est un processus de séparation des composants d'un mélange liquide en les vaporisant puis en les condensant. Plusieurs méthodes de distillation sont utilisées :

1) Distillation à simple effet : Une seule étape de condensation est utilisée pour produire un distillat.

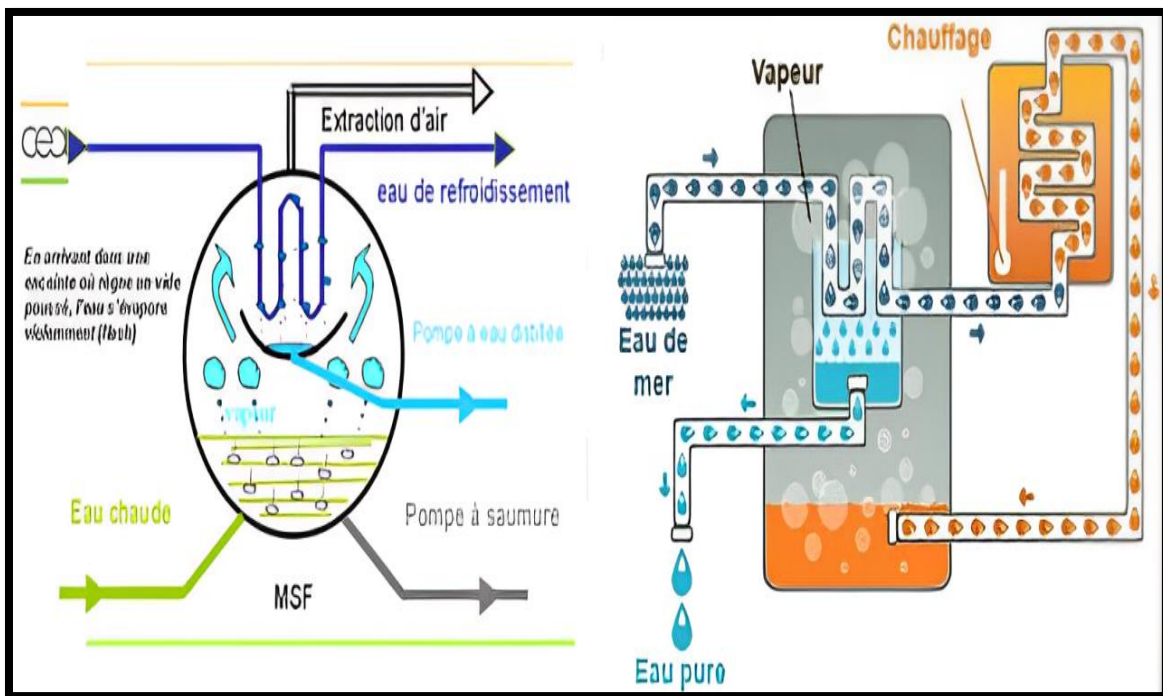


Figure I.5: Schéma d'une distillation à simple effet [9].

2) *Distillation à multiple effet* : La vapeur produite dans une étape de distillation est réutilisée pour entraîner une autre étape, augmentant ainsi l'efficacité du processus.

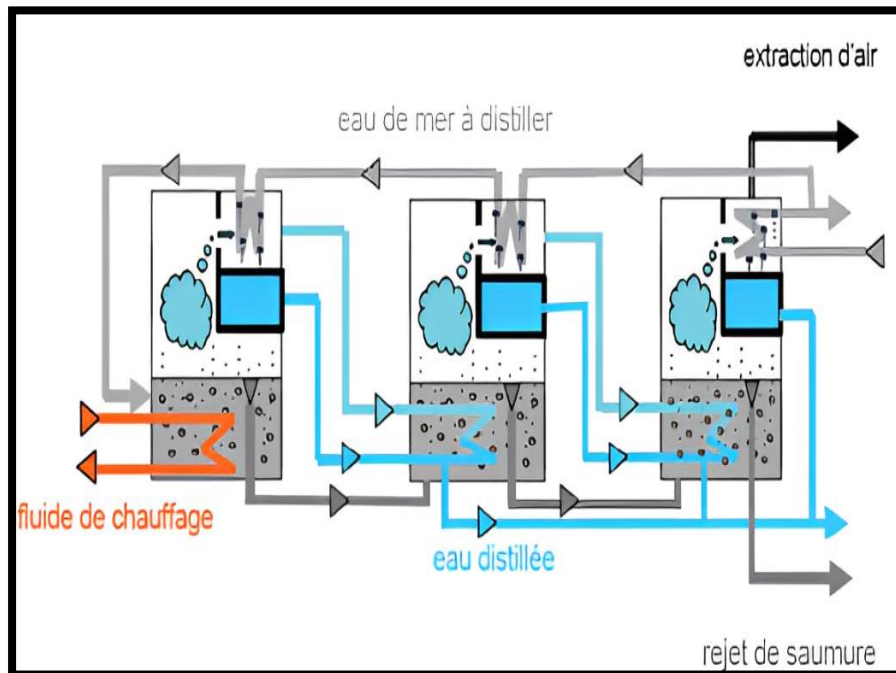


Figure I.6: Schéma d'une distillation à multiple effet [9].

3) *Distillation par détente successive* : ou multi-flash : Le liquide subit plusieurs étapes de détente progressive pour vaporiser ses composants à différentes températures.

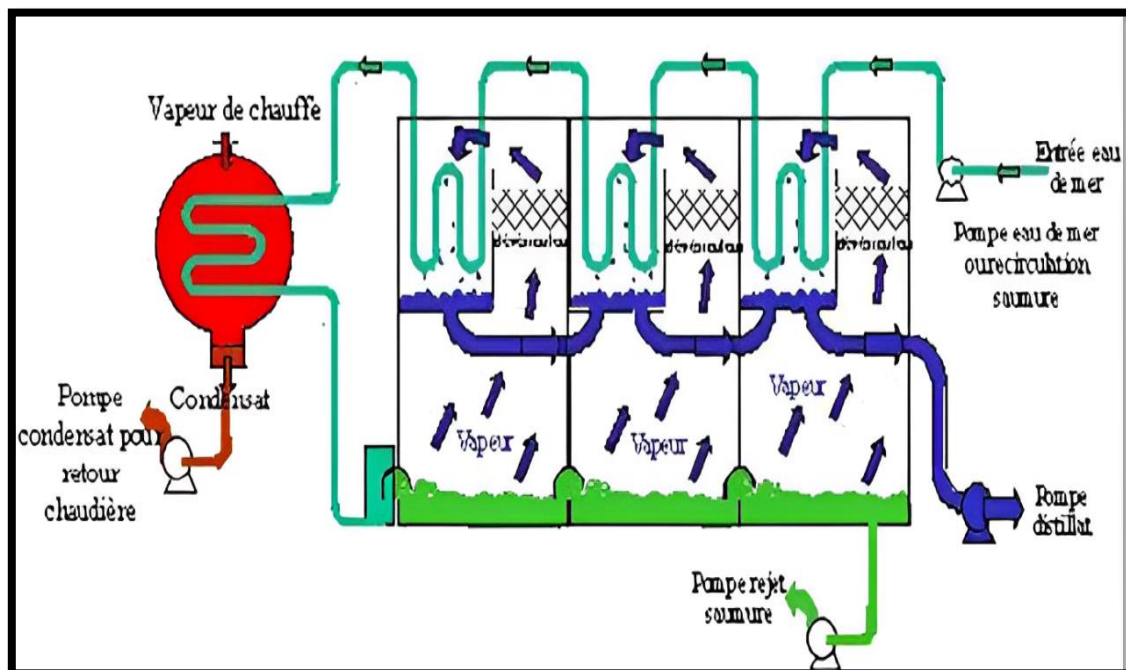


Figure I.7: Exploration du fonctionnement des systèmes à détentes successives (MSF) à 3 niveaux [9].

4) **Distillation par compression de vapeur** : La pression est utilisée pour forcer la vaporisation des composants, suivie de la condensation pour obtenir le distillat.

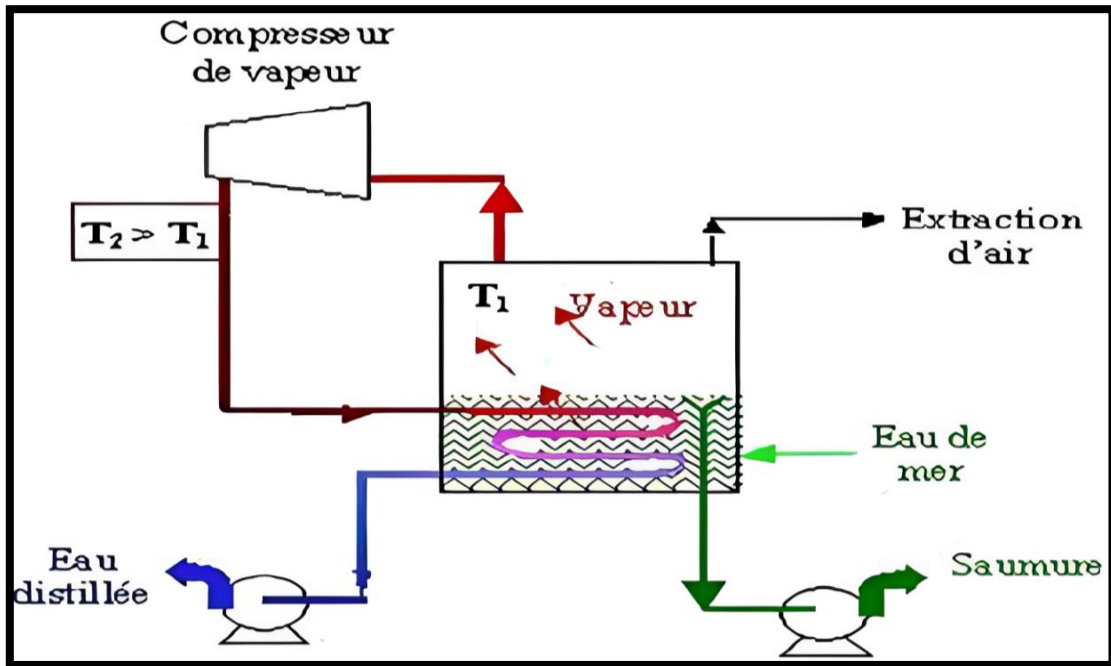


Figure I.8 : Conceptualisation d'une unité d'évaporation intégrant la Compression de Vapeur [9].

c- Les avantages et les inconvénients de la distillation :

1) Les avantages :

- ✚ Indépendance à la variation de la qualité d'eau brute
- ✚ Utilisation pour des grandes capacités de production d'eau
- ✚ Exploitation relativement aisée
- ✚ Une eau produite présentant un TDS faible requis particulièrement pour les besoins industriels [9].

2) Les inconvénients :

- ✚ Un taux de conversion bas (inférieur à 35%)
- ✚ Une consommation spécifique d'énergie relativement élevée
- ✚ Une non flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau
- ✚ Un coût d'investissement élevé [9].

I.5.1.2. La congélation :

La congélation de l'eau de mer produit des cristaux de glace sans sel. Depuis des temps immémoriaux, les habitants des régions côtières de l'Arctique ont utilisé cette méthode pour obtenir de l'eau douce [10].

a- Le dessalement par congélation :

Le processus de dessalement par congélation implique de refroidir de l'eau de mer jusqu'à environ -2°C , ce qui forme des cristaux de glace contenant de l'eau douce. À cette température, l'eau de mer devient plus concentrée et résiste mieux à la congélation. En abaissant encore la température, la production de glace augmente. Cependant, vers -9°C , le sulfate de sodium déca hydraté a tendance à se précipiter, ce qui limite la production d'eau pure. Ainsi, il est préférable de ne pas refroidir l'eau en dessous de cette température pour obtenir de l'eau pure.

Ce procédé est particulièrement avantageux dans les régions où la température de l'eau est souvent inférieure à 0°C , car des bassins à ciel ouvert peuvent être utilisés. Dans ces conditions, les bassins sont remplis d'une faible épaisseur d'eau, puis une fois qu'une couche de glace d'environ 1 à 1.5 cm s'est formée, la saumure est retirée et la glace est collectée. Cette glace est ensuite lavée et fondue, nécessitant environ 30 à 35% de l'eau douce produite pour le processus de nettoyage.

b- Les avantages et les inconvénients :**1) Les avantages :**

- ✚ Les appareillages sont moins exposés à la corrosion à de faibles températures comparativement aux températures d'ébullition atteintes lors de l'évaporation de l'eau
- ✚ Il n'y a pas de problèmes d'entartrage car les sels restent dissous à faible température
- ✚ L'eau douce obtenue est bien minéralisée et bien aérée ce qui constitue une excellente boisson

2) Les inconvénients :

- ✚ Cette technique est généralement plus onéreuse que l'évaporation de l'eau : la chaleur nécessaire pour congeler de l'eau est plus coûteuse que celle utilisée pour son évaporation
- ✚ Il existe une difficulté majeure concernant la séparation des cristaux de glace et de la saumure qui nécessite des opérations complexes : il reste une couche limite de saumure collée aux cristaux [11].

I.5.2. Les procédés membranaires :

Les méthodes membranaires représentent une avancée majeure dans le traitement de l'eau de mer, en adoptant une approche de séparation physique des microorganismes plutôt que chimique. Elles se distinguent par l'absence d'utilisation de réactifs chimiques, sauf pour leur

maintenance, et offrent une fiabilité élevée, permettant la production constante d'une eau d'une grande pureté et qualité.

I.5.2.1. L'osmose inverse (OI) :

L'osmose inverse (OI) est l'une de ces techniques. Elle repose sur le principe de transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Dans un système composé de deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant des solutions de concentrations différentes, l'osmose induit un flux d'eau de la solution diluée vers la solution concentrée.

L'application d'une pression sur la solution concentrée réduit le transfert d'eau par osmose, et avec une pression suffisamment élevée, le flux d'eau peut être annulé, définissant ainsi la pression osmotique. En dépassant cette pression osmotique, un flux d'eau inverse peut être observé, connu sous le nom d'osmose inverse.

Le processus d'osmose inverse sera exploré plus en détail dans le chapitre suivant.

I.5.2.2. Electrolyse :

L'électrolyse, un procédé établi depuis les années 1960, repose sur l'utilisation de membranes sélectives et d'un champ électrique pour éliminer sélectivement les sels dissous présents dans l'eau saumâtre. Cette technique repose sur la migration contrôlée des ions à travers les membranes, permettant ainsi de purifier l'eau en éliminant les impuretés [10].

a- Présentation détaillée du procédé :

Le procédé d'électrolyse repose sur le principe de la diffusion des ions à travers des membranes perméables sous l'influence d'un champ électrique. Contrairement à la dialyse, où les solutés se diffusent à travers une membrane perméable au solvant, l'électrolyse se concentre sur le transfert spécifique d'ions à travers des membranes sélectives. C'est essentiellement un processus électrochimique visant à extraire les ions d'une solution. Cette extraction se produit grâce à la migration des ions à travers des membranes sélectives, soit anioniques soit cationiques, stimulée par un champ électrique

a- La désalinisation à travers l'électrolyse :

L'électrolyse est une technique employée pour dessaler l'eau de mer. Le schéma ci-dessous illustre le fonctionnement d'une unité de dessalement en parallèle. À la fin du processus, on obtient à la fois de l'eau douce et de la saumure. D'autres configurations, telles que les unités en série et d'autres modèles de systèmes d'électrolyse, sont également disponibles.

Lorsqu'un courant est appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ se dirigent vers l'électrode négative tandis que les ions Cl^- vont vers l'électrode positive. En raison de la spécificité des membranes, les ions Na^+ peuvent seulement passer à travers les membranes cathodiques et les ions Cl^- à travers les membranes anioniques. Cela permet d'obtenir de l'eau douce dans deux des quatre compartiments

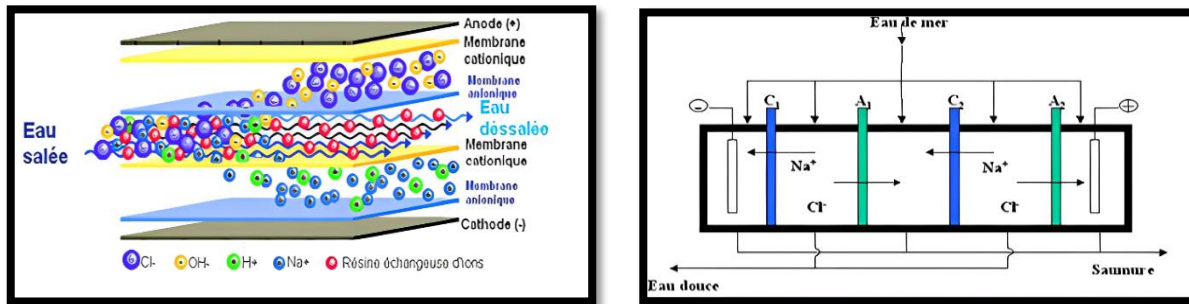


Figure I.9 : Alimentation unité d'électrodialyse **Figure I.10 :** Principe de l'électrodialyse [10].

Il est souvent indispensable d'entreprendre un prétraitement avant l'électrodialyse, notamment pour éliminer les solides en suspension dont le diamètre excède 10 μm , afin d'éviter tout risque d'obstruction des pores de la membrane. L'électrodialyse ne retient que les ions, laissant les particules en suspension passer à travers le processus et encrasser les membranes. C'est pourquoi un prétraitement de l'eau est nécessaire pour éliminer ces particules en suspension, telles que les anions organiques de grande taille, les oxydes de fer et de manganèse, qui peuvent neutraliser l'efficacité sélective de la membrane. En général, une filtration préalable adéquate est suffisante lorsque bien mise en œuvre. [12].

c- Les avantages et les inconvénients :

1) Les avantages :

- ✚ L'électrodialyse permet d'obtenir une eau de haute qualité avec une concentration en saumure considérablement réduite.
- ✚ Pour les eaux présentant une faible concentration en sel, l'électrodialyse se révèle être une option très compétitive par rapport à l'osmose inverse.
- ✚ La consommation d'énergie de l'électrodialyse est directement liée à la teneur en sel de l'eau, ce qui en fait une méthode économe en énergie lors du dessalement de solutions peu salines, comme les eaux saumâtres, avec une consommation énergétique comprise entre 3-8 kWh/m³. [13].

2) Les inconvénients :

- ✚ L'électrodialyse est inefficace pour les solutions très concentrées en sel, et son utilisation pour dessaler des solutions plus salées que les eaux saumâtres entraîne une consommation énergétique élevée, allant jusqu'à 15-25 kWh/m³.
- ✚ Les eaux contenant moins de 0,04% de sels ne sont généralement pas traitées par électrodialyse.
- ✚ L'électrodialyse produit des rejets de saumures qui augmentent la salinité des eaux où ils sont déversés. Ces rejets peuvent provoquer des dommages environnementaux,

notamment la dégradation des sols et des plantes, la contamination des nappes phréatiques, ainsi qu'une diminution de la biodiversité. [13].

I.5.3. Les Techniques Chimiques :

I.5.3.1. Échangeurs Ioniques :

L'échange d'ions est une technologie privilégiée pour éliminer des contaminants spécifiques de l'eau potable. En comparaison avec d'autres méthodes, l'échange d'ions se distingue par sa grande sélectivité et est largement utilisé dans de nombreuses applications à grande échelle. Il permet une élimination ciblée de la dureté, des nitrates, du bore, des matières organiques naturelles, des perchlorates, des chromates, de l'uranium et d'une variété d'autres métaux.

L'échange ionique implique une permutation réversible entre les ions structurels d'un matériau désigné comme "échangeur ionique" et les ions en solution. Cette interaction se produit lorsque la solution contenant les ions est en contact avec l'échangeur ionique [13].

a- Application en dessalement :

La déminéralisation de l'eau par échange d'ions implique de faire circuler l'eau à travers des réservoirs contenant des résines cationiques et anioniques. La résine cationique remplace chaque cation (ions chargés positivement) par un cation d'hydrogène, tandis que la résine anionique remplace chaque anion (ions chargés négativement) par un anion d'oxygène. Les atomes d'hydrogène et d'oxygène, ayant un déficit d'électrons, se reconstituent et finissent par se combiner pour former des molécules d'eau.

b- Les avantages et les inconvénients :

1) Les avantages :

- ✚ Supprime les ions en solution
- ✚ Régénère les résines par ionisation à l'aide d'acides et de bases
- ✚ Une méthode économique de purification de l'eau

2) Les inconvénients :

- ✚ Ne parvient pas à éliminer efficacement les bactéries, les composés organiques, les particules ou les pyrogènes.
- ✚ Capacité limitée : une fois que tous les sites d'ions sont occupés, les ions ne sont plus retenus.
- ✚ Les lits ionisés régénérés chimiquement peuvent générer des composés organiques et des particules.
- ✚ Les résines à usage unique requièrent une eau prétraitée de qualité pour obtenir des résultats efficaces et économiques.

I.3.2. Extraction par solvants :

L'extraction par solvant est une technique de séparation utilisée en chimie pour isoler un composé spécifique d'une solution liquide en utilisant un autre liquide, appelé solvant. Dans le cas de l'extraction d'eau douce à partir d'une solution saline, un solvant miscible avec l'eau mais non solvant pour les sels est utilisé. Par exemple, l'éthanol peut être utilisé comme solvant. Lorsque ce solvant est ajouté à la solution saline, il se mélange à l'eau, mais les sels restent insolubles et se séparent du mélange sous forme de précipité. Après cette étape, l'eau douce peut être récupérée du mélange liquide, tandis que les sels restent dans le précipité.

I.5.4. Diverses méthodes de dessalement :

I.5.4.1. Distillation solaire :

Le distillateur solaire représente probablement le système le plus rudimentaire pour la distillation de l'eau de mer. Il se compose d'un bassin recouvert d'une vitre transparente, renfermant de l'eau de mer souvent disposée en forme de V inversé. Ce bassin est revêtu d'un matériau sombre pour optimiser l'absorption des rayons solaires. Cette configuration crée un effet de serre où la vitre permet le passage des rayons solaires tout en bloquant efficacement les radiations infrarouges émises par le distillateur, emprisonnant ainsi la chaleur à l'intérieur. Sous l'effet de la température atteinte, l'eau de mer s'évapore, la vapeur monte, se condense au sommet de la vitre et glisse le long des bords inférieurs pour être recueillie dans un conduit de récupération. Un distillateur solaire efficace peut avoir un débit moyen de 3 à 4 litres par mètre carré par jour

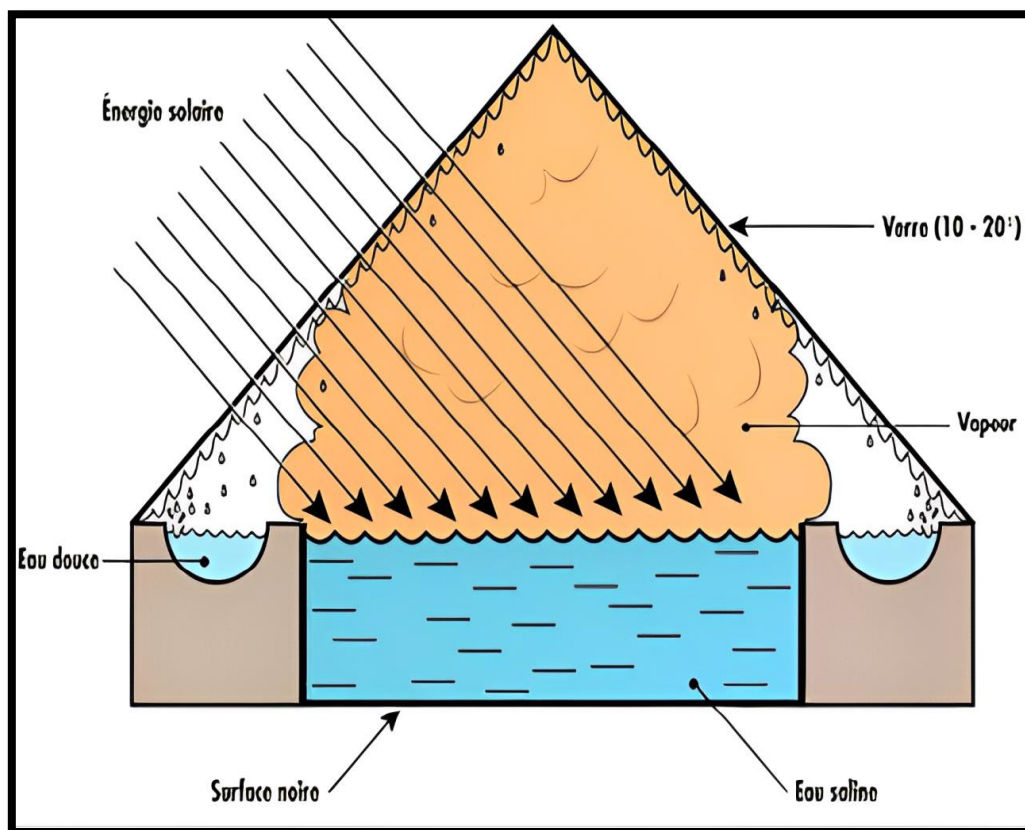


Figure I.11: Principe du distillateur serre [13].



Figure I.12 : Distillateur solaire [13].

a- Les avantages et les inconvénients :

1) Les avantages :

- ✚ Utilise l'énergie solaire
- ✚ Simple et facile d'utilisation.

3) Les inconvénients :

- ✚ Nécessite de grands espaces
- ✚ Peu pratique pour de grandes capacités

I.6. La quantité d'énergie requise pour le dessalement :

En théorie, la quantité minimale d'énergie requise pour produire un mètre cube d'eau douce est de 0,65 kilowatts par heure, quelle que soit la méthode de dessalement utilisée. Cette estimation est basée sur les lois de la thermodynamique et suppose les conditions suivantes :

- ✚ Les températures initiale et finale sont identiques ;
- ✚ La salinité de l'eau de mer, à partir de laquelle l'eau douce est extraite, reste constante.

Lorsque de l'eau douce est extraite d'un volume fini d'eau de mer, la salinité de cette dernière varie.

On remarque que la quantité d'énergie nécessaire dépend du taux de production, calculé comme le volume d'eau douce produit divisé par le volume d'eau de mer utilisé. Cependant, en pratique, les besoins énergétiques sont souvent bien supérieurs aux estimations théoriques. Cela s'explique par les diverses exigences énergétiques liées au fonctionnement des équipements mécaniques (moteurs, pompes de circulation, etc.), à la compensation des pertes de chaleur et à la réalisation même du traitement de l'eau.

Habituellement, la quantité d'énergie minimale nécessaire pour effectuer le dessalement de l'eau de mer est d'environ 3.5 kWh par mètre cube. À cette quantité, il convient d'ajouter l'énergie nécessaire pour transporter l'eau de mer jusqu'à l'usine de dessalement.

I.7. L'effet du dessalement sur l'écosystème :

Les impacts d'une usine de dessalement se divisent en deux catégories : ceux associés à la phase de construction et ceux liés à l'exploitation. Ils débutent par des changements dans l'occupation du sol, puis engendrent des perturbations visuelles et sonores, évoluant vers des émissions atmosphériques et des rejets dans l'eau, ainsi que des risques potentiels pour l'écosystème récepteur. Les activités de construction et d'exploitation peuvent entraîner une série d'impacts sur les zones côtières, incluant des altérations de la qualité de l'air et de l'eau, des perturbations de la flore et de la faune marines, ainsi que des dérangements dans des écosystèmes cruciaux.

Les répercussions de cet impact sont variées et se traduisent par :

I.7.1. Rejets atmosphériques :

Du fait que les usines de dessalement tirent principalement leur énergie des combustibles fossiles, elles engendrent ainsi, de manière directe ou indirecte, des substances polluantes dans l'atmosphère. Parmi ces polluants figurent le dioxyde de carbone, les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que des particules solides.

I.7.2. Rejets chimiques :

Les installations de dessalement recourent à l'utilisation de produits chimiques tant pour le traitement préalable de l'eau brute que pour le traitement final de l'eau dessalée. Ces produits sont principalement utilisés comme agents biocides, antitartres, anti-salissures et anti-mousses, et ils contribuent à altérer la composition de la saumure concentrée. De plus, la présence de certains métaux, issus de la corrosion des circuits, exerce également une influence sur la composition de cette saumure concentrée.

I.7.2. Rejets de saumure :

Les installations de dessalement rejettent effectivement la même quantité de sels que celle extraite de l'eau traitée, mais dans un volume d'eau réduit, ce qui entraîne une concentration plus élevée allant jusqu'à deux fois la concentration initiale avec la technique de l'osmose inverse. De plus, ces saumures sont rejetées à des températures plus élevées de 10 à 15°C lorsqu'un processus de distillation est utilisé. Habituellement, ces saumures sont déversées en mer ou injectées dans le sol.

Cela entraîne un impact négatif sur l'environnement, surtout lorsque les saumures sont déversées dans des écosystèmes fragiles, ce qui peut être très nocif pour la flore et la faune si

des mesures de précaution adéquates ne sont pas prises. L'élimination des saumures dans les zones côtières et intérieures n'a pas le même effet.

À l'intérieur des terres, l'utilisation d'étangs à sels est envisageable, mais cela présente un risque de pollution des eaux souterraines si l'étang n'est pas étanche. D'autre part, le rejet direct en mer, bien que plus simple en apparence, peut avoir un impact considérable sur l'écosystème marin en modifiant sa salinité et sa température.

Pour atténuer cet impact, la solution adoptée consiste à mettre en place des systèmes de diffuseurs pour contrôler la dilution de la saumure avec l'eau de mer, limitant ainsi la zone impactée dans l'espace. [13].

I.8. Zone de rejet de la saumure :

Idéalement, la saumure, avec sa concentration en sel significativement plus élevée que celle de l'eau brute, devrait être rejetée en mer. Toutefois, si cette option n'est pas possible, elle peut être déversée dans des puits ou des bassins d'évaporation à l'intérieur des terres. Lorsque le rejet est effectué en mer, il est crucial que les sites de décharge soient suffisamment éloignés des prises d'eau de mer et orientés de manière à éviter l'absorption de la forte salinité de la saumure par ces prises. Il est essentiel de tenir compte de l'"excès de salinité", qui indique que la salinité excessive de l'eau de mer se dilue à une distance de 12 à 15 mètres du point de rejet, avec une vitesse de rejet de 6,0 m/s et des concentrations de saumure à 5,8 % et d'eau de mer à 3,5 %. Il convient également de prendre en considération la direction des courants marins au lieu de déversement

I.9. Les difficultés techniques rencontrées dans le processus de dessalement :

Les difficultés dans les diverses méthodes de dessalement proviennent principalement de l'utilisation de solutions salines fortement concentrées ou de la création d'eaux agressives (avec un excès de dioxyde de carbone par rapport à l'équilibre). Ces problèmes incluent la corrosion, le dépôt de tartre et l'obstruction des équipements.

I.9.1. La corrosion :

La dégradation des matériaux par l'eau de mer est un phénomène crucial influençant la durabilité des installations et donc leurs coûts. Cette corrosion dépend de plusieurs facteurs, tels que la concentration élevée en chlorures, la présence d'oxygène dissous, et de H₂S, ainsi que la présence de particules solides, de bactéries et d'organismes marins comme les algues, et enfin de la conductivité, particulièrement élevée dans l'eau de mer, pouvant entraîner des effets galvaniques si les matériaux ne sont pas soigneusement choisis.

Pour les systèmes de haute pression utilisant l'osmose inverse, il est recommandé d'utiliser des aciers austénitiques ou ferriques, voire du titane (bien que coûteux), pour éviter la corrosion, malgré les surcoûts significatifs. Cette recommandation s'étend également aux évaporateurs manipulant de l'eau de mer à haute température.

La production d'eaux très corrosives par distillation ou osmose inverse nécessite une neutralisation avant leur utilisation dans les réseaux d'eau potable, parfois même une reminéralisation si la concentration en sels dissous est insuffisante. Dans le premier cas, une simple neutralisation, par exemple à la chaux ou la soude, peut suffire, tandis que dans le second cas, l'ajout de chaux doit être combiné avec celui de gaz carbonique.

I.9.2. L'entartrage :

L'entartrage est le résultat de l'accumulation de sels minéraux, principalement du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2), et du sulfate de calcium, sur les surfaces d'échanges. Pour que le tartre se forme, deux conditions doivent être remplies :

- ✚ **Une condition thermodynamique** : La solubilité des sels minéraux doit être dépassée, créant ainsi une situation de sursaturation dans l'eau.
- ✚ **Une condition cinétique** : La vitesse de dépôt des minéraux doit être suffisamment rapide pour permettre leur accumulation sur la surface.

L'entartrage est étroitement lié à la nature des solides formés, qu'ils soient amorphes ou cristallisés. Cette formation dépend de la température de l'eau, car la solubilité des sels minéraux diminue avec l'augmentation de la température. De plus, la composition de l'eau, en particulier la concentration des différents sels minéraux, influence également le processus d'entartrage. [14].

I.9.2.1. Différents moyens de lutte contre l'entartrage :

Pour éviter la formation de tartre et maintenir le bon fonctionnement des installations, différentes approches peuvent être envisagées.

La première solution consiste à modifier le processus lui-même. Par exemple, dans les procédés de distillation, on peut ajouter de l'énergie calorifique supplémentaire, tandis que dans les procédés membranaires, on peut appliquer une pression plus élevée.

La deuxième solution implique un prétraitement de l'eau, qui peut se faire de plusieurs façons :

- ✚ L'ajout d'acide pour décarbonater le milieu en éliminant le gaz carbonique formé à partir des hydrogénocarbonates.
- ✚ L'ajout de chaux et de germes de cristallisation pour favoriser la précipitation du carbonate de calcium, principal constituant du tartre.
- ✚ L'utilisation d'inhibiteurs d'entartrage tels que les poly phosphates, les organophosphates ou les polymères poly carboxyliques.

Cependant, quelle que soit la méthode choisie, elle entraîne généralement une augmentation des coûts de dessalement. Cela est dû aux matériaux et à l'énergie supplémentaires nécessaires pour mettre en œuvre ces solutions de prévention du tartre.

I.10. Les avantages et les inconvénients de dessalement :

Les bénéfices du dessalement de l'eau de mer sont multiples :

1) Les avantages :

- ✚ Il offre une solution précieuse dans les situations d'urgence, telles que les infiltrations d'eau salée dans les réserves d'eau, comme observé lors des tsunamis en Asie, par exemple.
- ✚ L'irrigation avec de l'eau dessalée est favorable à l'environnement en limitant la salinisation des sols.

3) Les inconvénients :

La désalinisation de l'eau de mer présente des avantages pour répondre aux besoins en eau douce, mais elle est également confrontée à plusieurs défis :

- ✚ Besoins énergétiques élevés : Les procédés de désalinisation nécessitent une grande quantité d'énergie, ce qui peut augmenter l'empreinte carbone et les coûts énergétiques.
- ✚ Usage de produits chimiques : Certains processus exigent l'utilisation de produits chimiques pour nettoyer les membranes, posant ainsi des risques environnementaux et de sécurité.
- ✚ Risque de contamination par des métaux lourds : Les installations de désalinisation présentent un risque de contamination par des métaux lourds, ce qui peut affecter la santé publique et les écosystèmes marins.
- ✚ Absence de réglementation spécifique : Il n'existe pas de réglementation spécifique sur la qualité de l'eau produite par désalinisation, soulevant des préoccupations quant à sa sécurité pour la consommation humaine.
- ✚ Production d'eau douce insuffisante : La quantité d'eau douce produite par rapport à l'eau de mer traitée peut être insuffisante pour répondre aux besoins croissants, limitant ainsi l'efficacité globale de la désalinisation.
- ✚ Impact environnemental : L'extraction et le rejet d'eau salée concentrée peuvent entraîner une détérioration de l'environnement marin en raison de la forte teneur en sels, affectant la vie marine et les écosystèmes côtiers.
- ✚ Il est donc crucial de prendre en considération ces défis lors de la mise en place de projets de désalinisation et de rechercher des solutions pour atténuer leurs impacts négatifs sur l'environnement et la société.

I.11. Conclusion :

Toutes les méthodes de dessalement sont très prometteuses en raison de leurs performances et de leur rentabilité, notamment grâce aux avancées technologiques des dix dernières années qui ont considérablement réduit les coûts de dessalement et augmenté la capacité des installations. Transformer des millions de kilomètres cubes d'eau de mer en eau potable a toujours été un objectif attrayant pour l'humanité, et grâce à ces nouvelles techniques, cela devient désormais réalisable tout en étant économiquement viable. Cependant, il y a maintenant des inquiétudes croissantes quant aux impacts environnementaux des usines de

dessalement. Il est donc impératif d'utiliser le dessalement avec précaution et discernement, en ne le déployant que dans les régions où il répond à un besoin réel en eau, tout en minimisant les risques pour l'environnement.

Chapitre II :

Le procédé d'osmose inverse

II.1. Introduction :

Au début du XXe siècle, des chercheurs se sont inspirés de la nature osmotique des parois cellulaires pour envisager l'utilisation d'une membrane afin de séparer le sel de l'eau de mer. Ce concept a été développé dans les années 1960 par des chercheurs américains et japonais qui ont créé des membranes semi-perméables à usage industriel, réalisant ainsi que ces membranes pourraient être employées pour dessaler l'eau de mer.

L'osmose, un phénomène crucial dans les équilibres biologiques de la nature, a été adaptée à des fins industrielles sous le terme de "osmose inverse". Dans ce processus, une forte pression, généralement supérieure à la pression osmotique et de l'ordre de 80 bars, est appliquée pour forcer l'eau salée à passer d'un compartiment concentré en sel vers un compartiment d'eau douce à travers une membrane. Ainsi, le compartiment d'eau douce s'enrichit en eau douce tandis que celui contenant de l'eau salée voit sa concentration en sel diminuer. En l'absence de membrane et de pression, dans un contexte naturel, l'eau douce se chargerait en sel et l'eau salée se diluerait.

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui permettent le passage de l'eau tout en bloquant tous les sels. Cette technique est employée principalement pour :

- ✚ Le dessalement des eaux de mer ;
- ✚ Le dessalement des eaux saumâtres
- ✚ La production d'eau ultra pure ;
- ✚ La production d'eau pour processus industriels. [16].

II.2. Le fonctionnement de l'osmose inverse :

II.2.1. Qu'est-ce que l'osmose ? :

L'osmose repose sur un principe fondamental d'équilibre. Lorsque deux liquides présentant des concentrations différentes de solides dissous entrent en contact, ils se mélangent jusqu'à ce que leurs concentrations se stabilisent. Si ces deux liquides sont séparés par une membrane semi-perméable, 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 solides dissous va migrer à travers la membrane vers le liquide avec une concentration plus élevée. Avec le temps, le niveau d'eau sera plus élevé d'un côté de la membrane, créant ainsi une différence de hauteur connue sous le nom de pression osmotique.

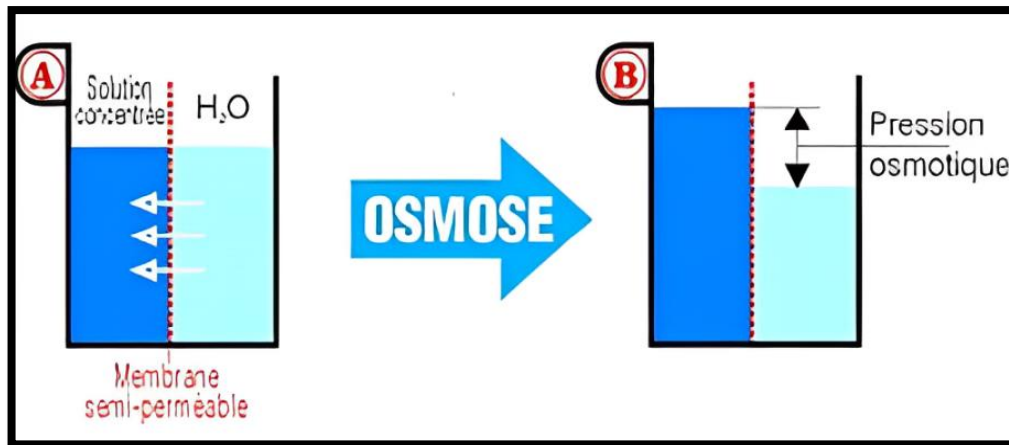


Figure II.1: Phénomène de l'osmose [16].

II.2.2. Qu'est-ce que l'osmose inverse ? :

L'osmose inverse est un processus qui consiste à faire passer de l'eau à travers des membranes semi-perméables, sous l'effet d'une pression différentielle, de la solution concentrée vers la solution diluée. En d'autres termes, il filtre les impuretés et les sels de l'eau, produisant ainsi de l'eau plus pure.

Le taux d'élimination, souvent exprimé en pourcentage de la salinité totale, indique la réduction de la concentration en sels dans l'eau traitée. Par exemple, pour de l'eau saumâtre, le taux d'élimination peut dépasser 92%, tandis que pour l'eau de mer, il peut atteindre plus de 98,5%. Cela signifie que plus de 92% des sels sont éliminés de l'eau saumâtre et plus de 98,5% des sels sont éliminés de l'eau de mer, produisant ainsi de l'eau douce ou très peu saline.

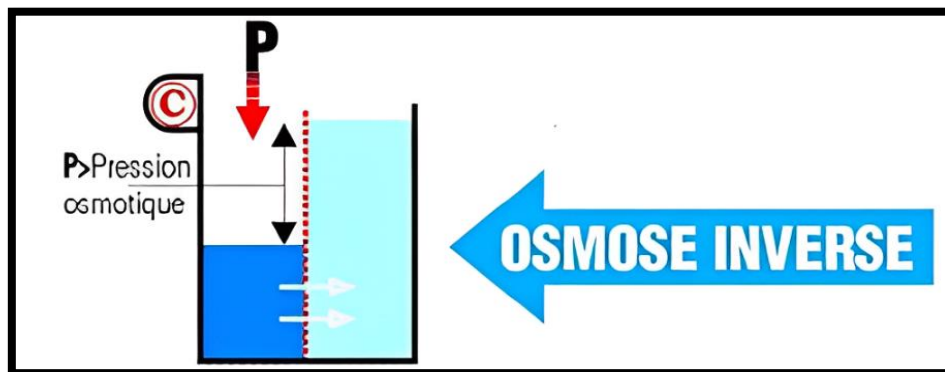


Figure II.2: Procédé de l'osmose inverse [16].

Le flux se déplace de manière continue et tangentielle à la membrane. À l'endroit où la membrane est située, une portion du liquide à traiter (débit Q_0) se sépare en deux parties ayant des concentrations différentes :

- Une partie traverse la membrane, nommée perméat (débit Q_p).
- Une partie ne traverse pas la membrane, appelée retentât ou concentrât (débit Q_c).

Cette partie contient les molécules ou particules retenues par la membrane. [16].

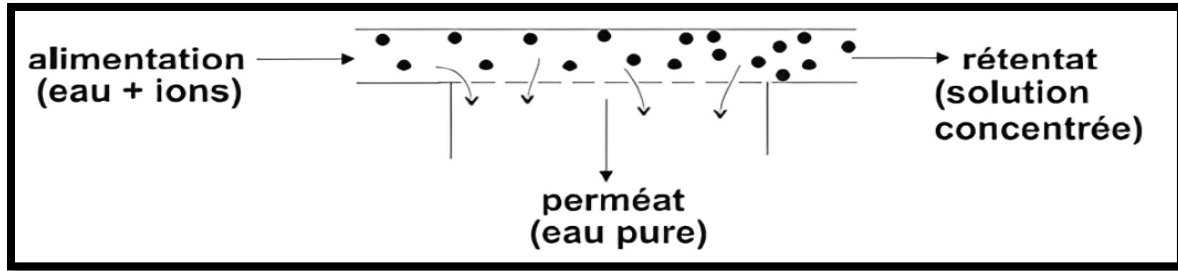


Figure II.3: Perfectionnement du Processus de Séparation en Phase Liquide par Perméation à Travers une membrane [16].

II.3. Pression osmotique :

La pression osmotique peut être déterminée en utilisant la loi de Van't Hoff, qui stipule que la pression osmotique d'un soluté équivaut à la pression qu'il exercerait s'il était dans un état gazeux parfait 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 .

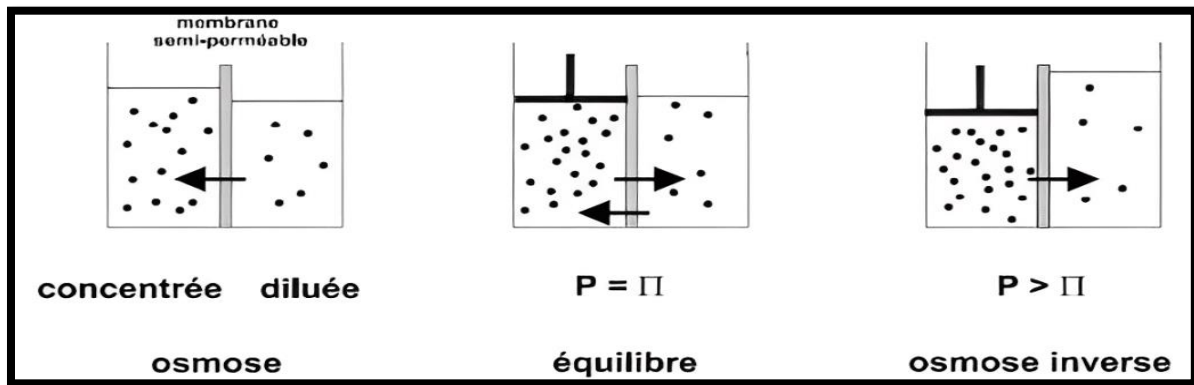


Figure II.4: Pression osmotique [16].

La concentration en solutés d'une solution est directement proportionnelle à sa pression osmotique.

$$\Pi = i * C * R * T \quad (\text{II-1})$$

Avec :

- Π : Pression osmotique (bar) ;
- i : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte ;
- C : Concentration molaire (mol. L^{-1}) ;
- R : Constante des gaz parfaits ($0,082 \text{ L.bar.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$) ;
- T : Température absolue (K). [17].

Pour une solution saline, on peut estimer approximativement que la pression osmotique est d'environ 0.7 bar par gramme par litre de salinité :

$$\Pi = 0.7 C$$

(II-2)

Avec :

- Π : pression osmotique (bar) ;
- C : concentration (mol).

II.4. Composants essentiels d'une unité d'osmose inverse :

Les composants fondamentaux d'une unité d'osmose inverse sont représentés sur la figure II.5 :

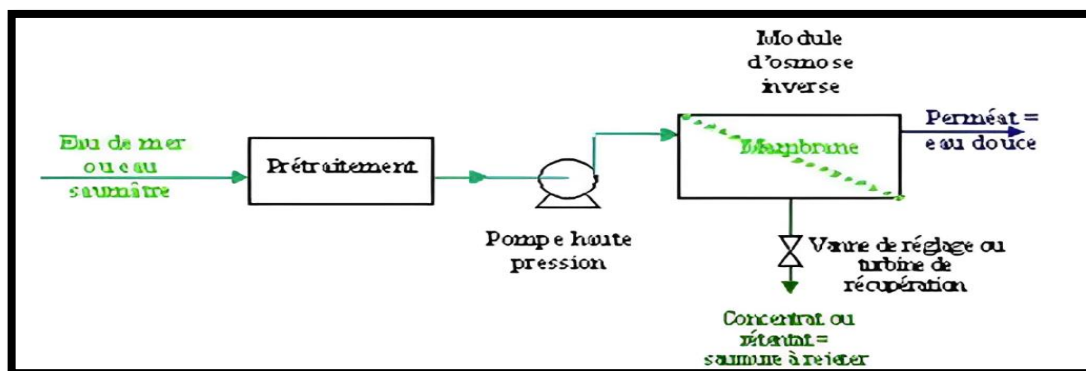


Figure II.5 : Les Composants essentiels d'une unité d'osmose inverse [16].

II.4.1. Prise d'eau de mer :

La sélection de la source d'eau de mer pour l'usine de dessalement est cruciale pour garantir une qualité optimale à l'entrée du processus. L'objectif principal est de minimiser les impuretés, en particulier les matières en suspension. Selon l'emplacement géographique de l'usine, deux options technologiques sont envisageables : les forages côtiers et les prises d'eau de surface.



Figure II.6: Tuyau de captage de l'eau de mer (Ténès, willaya de Chlef). [18].

Le prétraitement, crucial pour maximiser les performances et la longévité des membranes d'osmose inverse, constitue une étape essentielle dans la planification des systèmes de dessalement. Les caractéristiques de l'eau brute, qu'elle soit marine ou saumâtre, peuvent varier considérablement en raison de facteurs géographiques, saisonniers (tels que la température et la luminosité), ainsi que de la pollution locale, notamment par les hydrocarbures.

Pour prévenir l'encrassement rapide et le colmatage des membranes d'osmose inverse, il est impératif d'adapter la chaîne de prétraitement aux propriétés spécifiques de l'eau brute. Cela permet de réduire de manière significative :

- ✚ La turbidité et la concentration de matières en suspension (MES) : il est crucial que la turbidité soit maintenue en dessous de 0,1 unité.
- ✚ L'indice de colmatage (SDI) : la valeur cible moyenne de l'indice de colmatage devrait être inférieure à 3 en amont des membranes. Réduire cet indice implique l'élimination des algues, des planctons, des micro-organismes et des composés organiques.

Il existe deux principales filières de prétraitement : conventionnelle et à membrane.

II.4.2.1. Prétraitement conventionnel :

Habituellement, dans une usine de dessalement de l'eau de mer, le processus de prétraitement conventionnel comprend les étapes suivantes :

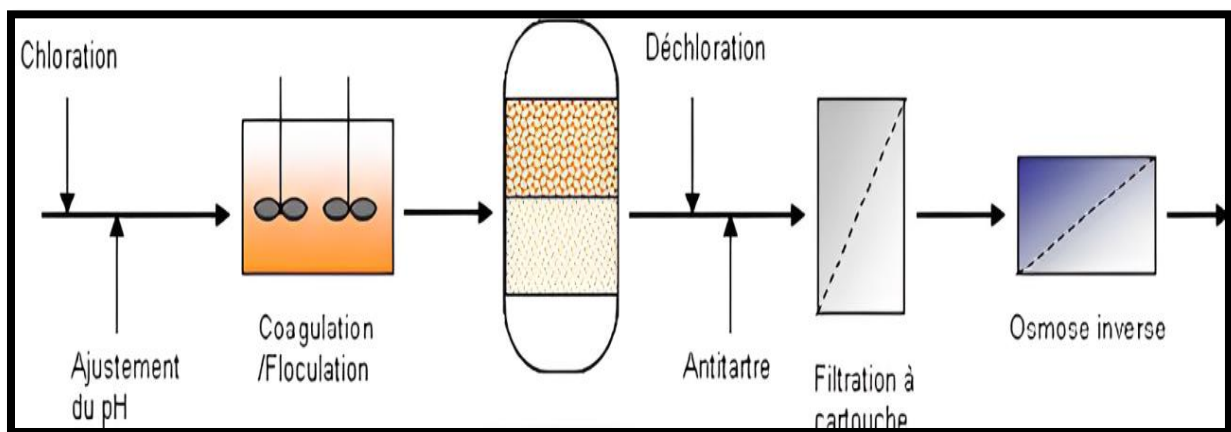


Figure II.7: Prétraitement conventionnel [16].

✓ Préfiltration grossière :

En premier lieu, l'eau subit une filtration grossière pour éliminer les éléments volumineux susceptibles d'endommager les équipements et de réduire l'efficacité globale du processus de traitement.

✓ Chloration :

La chloration vise à désactiver les micro-organismes (principalement les bactéries) ainsi que les micro-algues et les champignons, qui peuvent être pathogènes et entraîner un colmatage significatif des membranes, phénomène appelé biofouling.

✓ Ajustement du pH :

L'ajout d'acide, tel que l'acide sulfurique (H_2SO_4), est nécessaire pour prévenir l'entartrage causé par le $CaCO_3$.

✓ Coagulation et floculation :

La coagulation a pour but de neutraliser les charges primaires afin d'annuler les forces de répulsion, suivie par le piégeage des particules dans les précipités. Cette neutralisation est réalisée par l'ajout de composés de métaux lourds tels que Al^{3+} et Fe^{3+} . La floculation vise à augmenter les contacts entre les particules en provoquant une différence de vitesse entre elles.

✓ Décantation :

Après la coagulation-floculation, si la densité des floccs formés est supérieure à celle de l'eau, ceux-ci se déposent par décantation. Cependant,

✓ Filtration sur sable mono- ou bicouche :

La filtration sur sable est nécessaire pour éliminer les agglomérats produits lors de la coagulation.

- 1) Filtre monocouche : constitué par une hauteur de sable de granulométrie comprise entre 0,4 et 1 mm sur une hauteur de 1 m.
- 2) Filtre bicouche : constitué par une couche de 0,7 m de sable surmontée d'une couche de 0,3 m d'anthracite.

✓ Déchloration et antitartre :

Compte tenu de la grande sensibilité des membranes d'osmose inverse en polyamide, membranes les plus utilisées actuellement, il est indispensable d'assurer une déchloration de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre avant son entrée dans les modules.

- 1) Soit par ajouts de réactifs chimiques : bisulfite de sodium, c'est la solution la plus utilisée car elle est efficace et d'un coût relativement faible.
- 2) Soit par passage sur charbon actif (poudre ou grains) : des précautions sont nécessaires pour éviter le colmatage des modules d'OI par des fines de carbone.

Prévention du tartre : La méthode la plus utilisée pour éviter les tartres ($CaCO_3$, $CaCO_4$, $2H_2O...$) dans les modules d'osmose inverse consiste à injecter dans l'eau brute des inhibiteurs d'entartrage ou antitartres. Les produits utilisés sont :

- 1) Les poly phosphates : ces produits sont efficaces et bon marché mais ils peuvent éventuellement former des dépôts d'orthophosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse.
- 2) Les polymères carboxyliques : efficaces sur la plupart des tartres, ces produits ne posent pas de problèmes pour les rejets. Ils présentent l'inconvénient d'être chers. L'acidification de l'eau brute, en provoquant la décomposition des bicarbonates, est aussi un moyen efficace de prévenir les dépôts de $CaCO_3$. [19].

✓ Filtration sur cartouche :

La dernière étape du prétraitement conventionnel est la filtration sur cartouche avec une taille de maille de 5 à 10 μm pour protéger les membranes d'osmose inverse.

Le choix du prétraitement conventionnel doit donc être adapté selon la qualité de l'eau de mer brute pour assurer la meilleure qualité de l'eau possible en amont des membranes d'osmose inverse. [18].

II.4.2.2. Prétraitement par les procédés membranaires :

Afin de pallier aux limitations inhérentes au prétraitement conventionnel mentionnées précédemment, l'intérêt pour l'application des procédés membranaires à basse pression, tels que la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF) et la nano filtration (NF), n'a cessé de croître. Les principaux avantages de ces procédés membranaires sont les suivants :

- Flux de l'osmose inverse significativement accru ;
- Consommation moindre de produits chimiques ;
- Prolongation de la durée de vie des membranes d'osmose inverse ;
- Capacité à fonctionner avec une variété de qualités d'eau d'alimentation ;
- Réduction de la nécessité de désinfection et de nettoyage de l'osmose inverse.

II.4.3. Le pompage haute pression :

Avant d'atteindre les membranes d'osmose inverse, l'eau prétraitée est acheminée vers le système de pompage haute pression, où elle est généralement soumise à une pression comprise entre 55 et 85 bars, adaptée en fonction des variations de température et de salinité. [20].

II.4.4. Récupération d'énergie :

La récupération d'énergie dans les stations d'eau de mer est cruciale pour des raisons économiques et énergétiques. Les turbines Francis et Pelton étaient autrefois utilisées, mais leurs rendements étaient limités. Les systèmes d'échange d'énergie récents offrent des rendements supérieurs à 90% et nécessitent des pompes à haute pression plus petites, entraînant d'importantes économies d'énergie. Leur adoption permet des économies significatives sur les coûts opérationnels et contribue à réduire l'empreinte environnementale des installations. Ces avancées soulignent l'importance de l'innovation continue pour des solutions énergétiques plus efficaces et durables.

L'adoption de ces systèmes d'échange d'énergie représente donc une transition vers une utilisation plus efficace des ressources énergétiques disponibles, tout en réduisant les coûts opérationnels et l'impact environnemental des installations de traitement de l'eau de mer. En investissant dans ces technologies innovantes, les industries peuvent non seulement améliorer leur efficacité énergétique, mais aussi contribuer à la transition vers une économie plus durable et respectueuse de l'environnement.



Figure II.8: Racks d'osmose inverse
(L'installation de SOUK THLATHA)



Figure II.9: Station de dessalement
(SOUK THLATHA)

II.4.6. Poste traitement :

Le traitement final vise principalement à rétablir l'équilibre de l'eau en la mélangeant avec une autre source d'eau potable pour ajuster sa salinité à des niveaux acceptables pour la consommation, tout en augmentant sa dureté et son alcalinité. En outre, des étapes supplémentaires telles que l'élimination du bore et la chloration peuvent être nécessaires. [21].

Cette phase de traitement final se compose de deux étapes principales :

- 1) **Ajustement du pH** : L'eau produite par osmose inverse est souvent agressive, avec un pH inférieur au pH de saturation. Pour corriger cela, une solution alcaline (NaOH) est automatiquement ajoutée en fonction du pH afin de neutraliser l'eau. Cela permet d'éviter les problèmes associés au CO₂ dissous dans l'eau, assurant ainsi qu'elle ne soit ni agressive ni incrustante, ce qui présente de nombreux inconvénients.
- 2) **Chloration finale** : Même si les membranes d'osmose inverse retiennent la plupart des micro-organismes tels que les bactéries et les virus, il est crucial d'assurer une désinfection résiduelle pour prévenir toute contamination et la croissance biologique indésirable.

II.4.7. Poste de nettoyage chimique :

Le poste de nettoyage chimique nécessite un entretien périodique pour éliminer les dépôts qui pourraient diminuer ses performances. Les dépôts de carbonate de calcium et d'hydroxydes métalliques sont traités avec des solutions acides, tandis que les dépôts biologiques et bactériens sont éliminés avec des solutions basiques. Il est essentiel de respecter les recommandations du fabricant en termes de concentrations et de temps de contact pour assurer un nettoyage efficace tout en préservant l'intégrité des membranes. Un entretien régulier est recommandé pour maintenir les performances optimales du système [22].

II.5. Fonctionnement des systèmes membranaires :

Les systèmes membranaires opèrent selon deux modes principaux : la filtration frontale (en bout de course) et la filtration tangentielle (en flux tangentiel)

II.5.1. Filtration frontale :

Dans le mode frontal voir (Figure II.10), le flux d'alimentation arrive perpendiculairement au plan de la membrane. Les particules solides et les solutés sont retenus à la surface, formant un dépôt qui crée progressivement un colmatage sous forme de gâteau. Ce processus nécessite un nettoyage périodique.

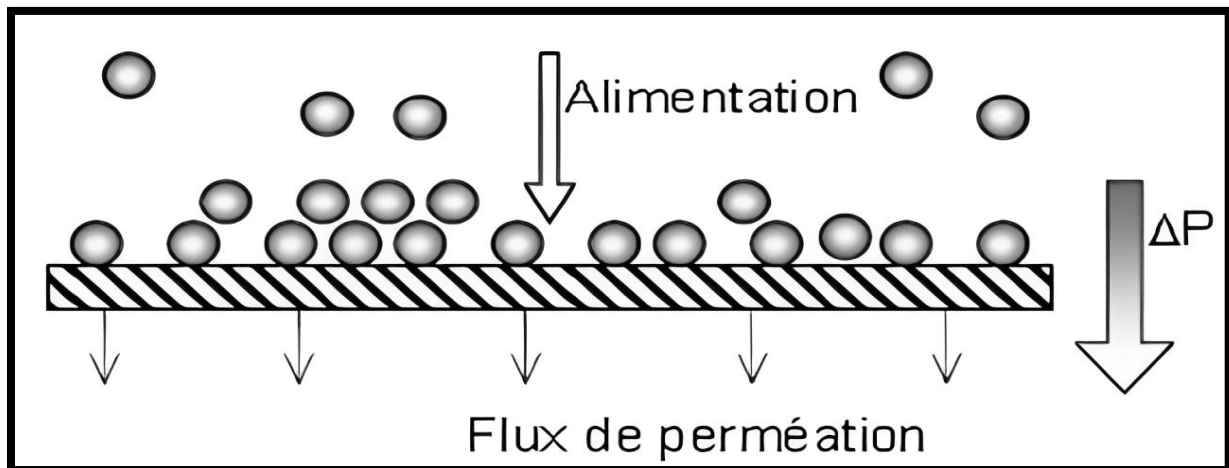


Figure II.10: Exploration du Mécanisme de la Filtration Frontale [22].

II.5.2. Filtration Tangentielle :

Dans la filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module et entre en contact avec la membrane selon un flux tangentiel. Ce mode de fonctionnement implique donc une entrée pour l'alimentation ainsi que deux sorties : le perméat, qui est la fraction du flux initial qui traverse la membrane, et le concentrât (ou retentât), qui représente la portion du flux initial qui ne traverse pas la membrane, comme illustré dans la figure II.11

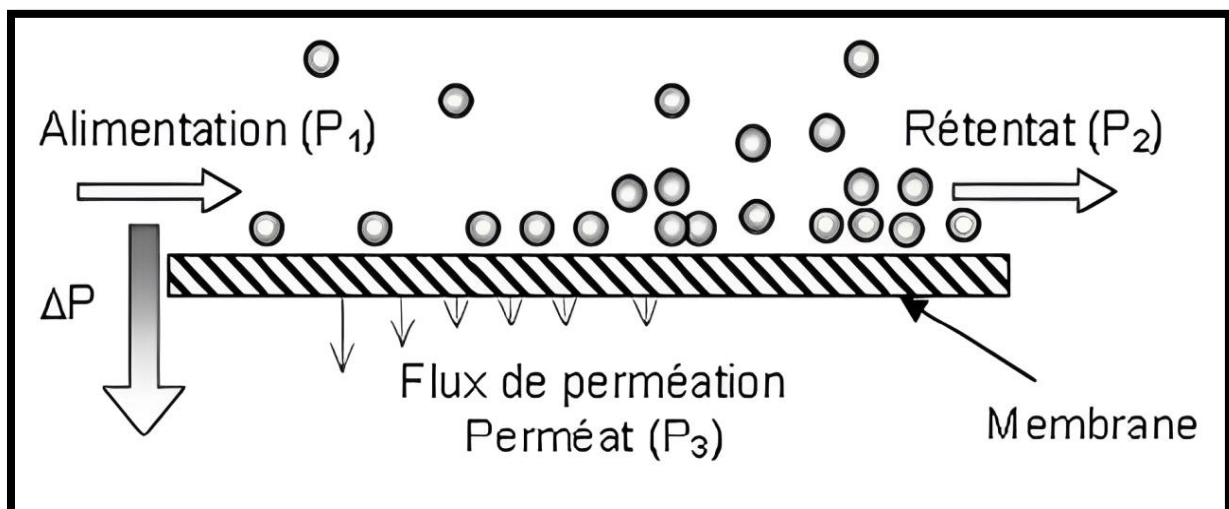


Figure II.11: Exploration du Mécanisme de la filtration tangentielle [22].

Remarque :

L'avantage principal de l'écoulement tangentiel par rapport à l'écoulement frontal réside dans le fait que le flux tangentiel de l'alimentation parcourt la surface de la membrane, limitant ainsi l'accumulation de particules et réduisant le risque de colmatage.

✓ **La nano-filtration (NF) :**

Est un procédé de séparation qui utilise la pression comme force motrice. Son pouvoir de séparation se situe entre celui de l'ultra-filtration (1 à 10 nm) et de l'osmose inverse (0,1 à 1 nm). Les membranes utilisées ont des seuils de coupure variant de 1 à 5 nm, permettant la perméation des ions monovalents et des molécules de diamètre équivalent.

✓ **La micro-filtration (MF) :**

Est un processus de séparation solide-liquide qui met en jeu des membranes ayant des diamètres de pores compris entre 0,1 et 10 μm . Elle permet ainsi de retenir les particules en suspension, les bactéries, ainsi que les colloïdes et certains ions de plus grande taille, après fixation de ces derniers sur des particules plus grosses obtenues par complexation, précipitation ou floculation.

✓ **Ultra-filtration (UF) :**

Elle utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores se situent entre 1 et 100 nm. Ces membranes laissent passer les petites molécules telles que l'eau et les sels, tout en arrêtant les molécules de masse molaire élevée comme les polymères, les protéines et les colloïdes. De ce fait, cette technique est employée pour éliminer les macromolécules présentes dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel ou médicale

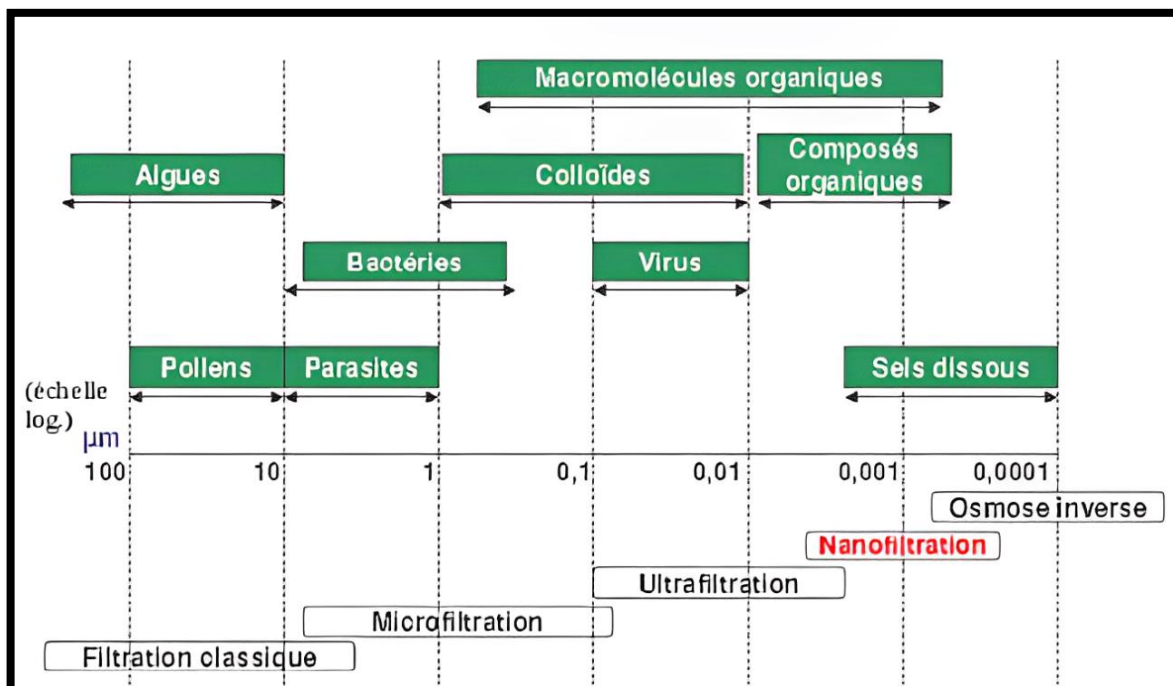


Figure II.12: La dimension des matériaux éliminés par les méthodes de filtration membranaire [22].

II.6. Optimisation des Conditions pour l'Osmose Inverse :

II.6.1 La pression motrice ΔP :

Est calculée en soustrayant la pression statique à la sortie du module d'osmose (du côté production) et la perte de charge due à l'écoulement de l'eau de la pression de refoulement de la pompe. En d'autres termes, elle représente la différence entre la pression de sortie et les pertes de pression.

II.6.2 La conversion Y :

Qui est le rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation, peut être définie par :

$$Y = 100 \times Q_P / Q_A \quad (\text{II-3})$$

Ce paramètre peut également être exprimé sous la forme du **facteur de conversion FC** :

$$FC = 100 / (100 - Y) \quad (\text{II-4})$$

Si $Y = 66 \%$, $FC = 3$, les sels seront donc concentrés 3 fois en admettant qu'ils sont entièrement retenus par la membrane

II.6.3 Le passage des sels PS est défini par le rapport entre la concentration du côté production et celle du côté alimentation :

$$PS = 100 \times C_P / C_A \quad (\text{II-5})$$

II.6.4 Le rejet de sels : également désigné par son complément, représente le rapport entre la concentration des sels du côté du rejet et celle du côté de l'alimentation.

$$RS = 100 \times C_R / C_A = 100 - PS \quad (\text{II-6})$$

II.6.5 La sélectivité R d'une membrane : est déterminée par son taux de rejet (ou de rétention) de l'espèce qu'elle est destinée à retenir.

$$R = C_0 - C_P / C_0 = 1 - C_P / C_0 \quad (\text{II-7})$$

Où

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

C_p : la concentration de la même espèce dans le perméat. [22].

Débits spécifiques ou densité de flux volumique :

Pour atteindre une sélectivité déterminée, il est impératif d'optimiser le débit par unité de surface, également appelé densité de flux volumique. Cette optimisation vise à réduire au minimum la surface de membrane nécessaire, ce qui permet de limiter les investissements associés.

II.7. Mécanisme de transfert :

Dans le processus d'osmose inverse, le transfert de solvant et de soluté s'opère à travers un mécanisme de solubilisation-diffusion. Toutes les molécules en présence, à la fois soluté et solvant, se dissolvent dans la membrane et se diffusent à travers elle, similaire à un liquide, sous l'influence d'un gradient de concentration et de pression. Ainsi, la taille des particules n'influe plus sur le transfert, mais plutôt leur capacité à se dissoudre dans le milieu membranaire. Les séparations résultent donc de propriétés chimiques, intimement liées au pouvoir solvant de la membrane. Les flux massiques de solvant (J_{solvant} , en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) et les débits volumiques de solvant (en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) à travers la membrane sont déterminés par des relations spécifiques.

$$J_{\text{solvant}} = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \text{ et } Q_P = A \cdot S / \rho \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (\text{II-8})$$

Où

- ✚ A : est la perméabilité de la membrane au solvant ($\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$) ;
- ✚ S : la surface de la membrane (m^2) ;
- ✚ ρ : la masse volumique du solvant ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- ✚ ΔP : la différence de pression de part et d'autre de la membrane ;
- ✚ $\Delta \Pi$: la différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.
- ✚ Le flux massique $J_{\text{soluté}}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) de soluté traversant la membrane est donné par la relation:

$$J_{\text{soluté}} = B \cdot (C_0 - C_p) \quad (\text{II-9})$$

Où

- ✚ B : est la perméabilité moyenne de la membrane au soluté ($m \cdot s^{-1}$) ;
- ✚ C_0 et C_p : sont respectivement la concentration en soluté de l'alimentation et du perméat de part et d'autre de la membrane ($kg \cdot m^{-3}$).
- ✚ On montre donc que le flux de solvant est proportionnel à la pression efficace ($\Delta P - \Delta \Pi$) tandis que le flux de soluté en est indépendant.

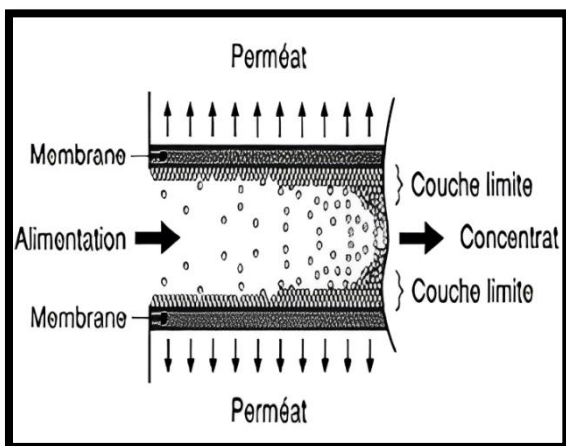
On montre également que le taux de rejet d'une membrane augmente lorsque la pression efficace augmente. [24].

II.8. Phénomène de concentration polarisée :

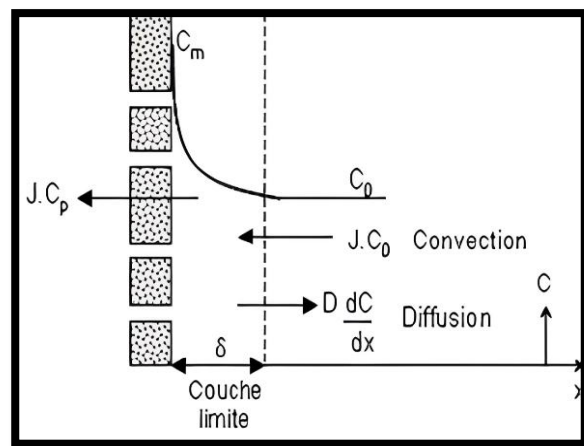
La polarisation de concentration se manifeste au sein des membranes sélectives, où une accumulation graduelle de matières ou une concentration en surface de matières retenues se produit. Ce phénomène entraîne généralement une augmentation de la pression osmotique, ce qui diminue le flux de perméation lorsque la pression moyenne appliquée reste constante, ainsi qu'une diminution de la rétention observée.

Dans le contexte de l'osmose inverse, un phénomène limitant survient, connu sous le nom de polarisation de concentration près de la membrane. Comme illustré dans la figure 11, cette polarisation se caractérise par une accumulation à la surface de la membrane des espèces retenues. La concentration d'une espèce près de la membrane (C_m) augmente jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint entre le flux transféré à travers la membrane sous l'effet du gradient de pression ($J \cdot C_0$) et le flux diffusant en sens inverse sous l'action de gradient de concentration

La polarisation de concentration, un phénomène réversible, disparaît lorsque la force motrice du transfert est éliminée. Le facteur de polarisation (γ) est exprimé par la formule suivante : $\gamma = C_m / C_0$.



a) Processus de formation de la couche de Polarisation



b) Variation des paramètres à l'interface membrane-solution

Figure II.13: Phénomène de polarisation [22].

II.9. Membranes d'osmose inverse :

II.9.1. Introduction aux membranes

Une membrane constitue une fine enveloppe qui, sous l'effet d'une force motrice, réalise une séparation sélective entre un solide et un liquide à l'échelle microscopique. Cette force peut résulter d'un gradient de pression, de concentration ou de potentiel électrique de part et d'autre de la membrane.

II.9.2. Classification des membranes utilisées en osmose inverse :

Quelques exemples de membranes couramment employées en osmose inverse incluent :

✓ Membranes organiques :

Les premières membranes organiques ont été réalisées à partir de dérivés cellulosiques et de polyamides aromatiques. La trop grande sensibilité de ces matières vis-à-vis des bactéries leur a fait préférer les matériaux suivants : Acétate de cellulose, Poly sulfone, Aramide, Poly acrylonitrile, Polypropylène. Leur méthode de fabrication est basée sur un mélange de polymère et de solvant. L'évaporation de ce collodion permet de distinguer des zones riches en polymère donnant la membrane et des zones creuses donnant les pores. Les membranes organiques sont assez sensibles au pH acide et aux fortes températures. [25].

✓ Membranes minérales ou inorganiques :

Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique. [26].

✓ 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. [25]

✓ Membranes à charge électrique :

Ces membranes peuvent être denses ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs. Les membranes chargées positivement favorisent le passage de cations, celles chargées négativement favorisent le passage d'anions. Donc la séparation avec des membranes chargées est basée principalement sur la répulsion d'ions de même charge, mais aussi par la taille des pores. La séparation est contrôlée par la charge et la concentration des ions [26].

II.9.3. Durée de vie des membranes :

La détermination précise de la durée de vie des membranes d'osmose inverse pose un défi majeur. Cette durée dépend non seulement de la nature intrinsèque de la membrane, mais également des conditions opérationnelles telles que la pression de fonctionnement, la température et le pH de l'eau, ainsi que la qualité du prétraitement. De plus, la définition même de la durée de vie d'une membrane reste floue. Les performances des membranes d'osmose inverse évoluent graduellement avec le temps, et généralement, on procède au remplacement lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Toutefois, pour diverses raisons, les opérateurs peuvent prolonger la durée de vie des membranes en maintenant l'installation en fonctionnement au-delà de ce seuil. [27].

II.10.2. Les types de modules :

Les modules de membranes sont conçus pour accueillir des membranes spécifiques. Actuellement, quatre types de modules sont disponibles sur le marché :

✓ Modules tubulaires :

Dans ces modules, les membranes sont placées ou formées à l'intérieur de tubes de support. Ces tubes, poreux ou perforés pour permettre le drainage, ont un diamètre variant généralement de 10 à 40 mm. Les tubes sont ensuite disposés en parallèle ou en série à l'intérieur d'une enveloppe cylindrique pour former le module complet. Ce système offre un hydrodynamique bien défini, permettant des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 6 (m/s) si un régime de forte turbulence est nécessaire. Ils ne nécessitent pas de préfiltration fine du liquide à traiter et sont relativement faciles à nettoyer. Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur encombrement important et leur coût élevé par mètre carré installé.

✓ Modules à fibres creuses :

Ces modules regroupent un ensemble de fibres creuses, mesurant de quelques centimètres à un mètre de longueur, et ayant une épaisseur d'environ 100 à 200 μm . Ces fibres sont assemblées en faisceau avec un diamètre global inférieur à 3 mm. Deux configurations sont possibles :

- **Intérieur-Extérieur (Int-Ext) :** Dans cette configuration, la solution à traiter circule à l'intérieur des fibres, tandis que le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Cela implique un écoulement tangentiel. Cette méthode est généralement utilisée lorsqu'on souhaite récupérer le concentrât.
- **Extérieur-Intérieur (Ext-Int) :** Ici la solution circule à l'extérieur des fibres, et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres en mode frontal. Cette technique est habituellement préférée lorsque l'accent est mis sur la récupération du perméat.

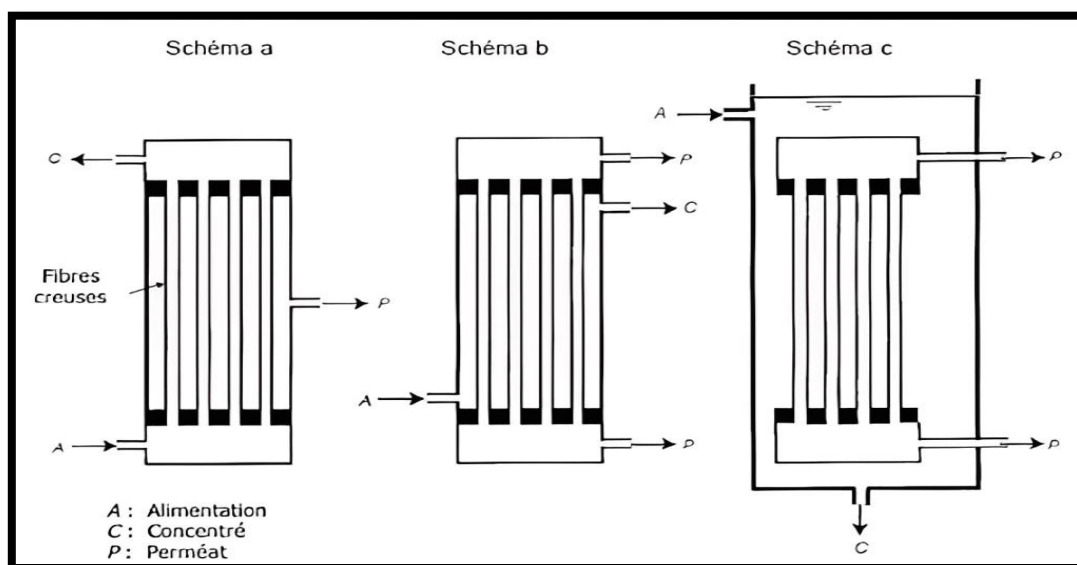
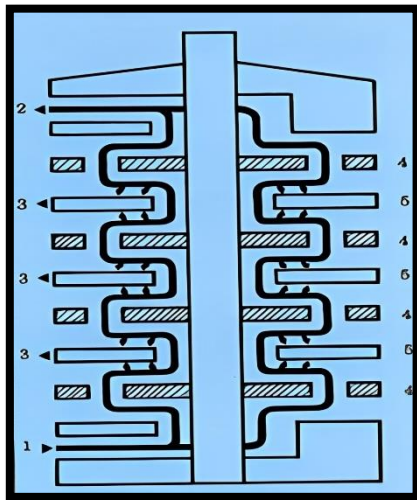


Figure II.14: Optimisation des Modules à Fibres Creuses [26].

✓ Modules à Plaques :

Ce système emploie des membranes en forme de feuilles, représentant la configuration la plus basique, comparable à un filtre-pressé. Néanmoins, la surface de filtration demeure limitée en comparaison de l'espace occupé.



1-Entrée d'eau brute.

2-Sortie du concentrât.

3-Sortie du perméat.

4-Plaque intermédiaire.

5-Ensemble membrane - plaque support

membrane

Figure II.15: Exemple de module à plaques [28]

✓ Les modules spiralés :

Sont des dispositifs utilisés dans les systèmes de filtration et de purification de l'eau. Ils consistent en des membranes planes enroulées de manière spirale autour d'un tube creux et perforé conçu pour recueillir le liquide filtré, appelé perméat. Entre les membranes, un grillage plastique d'une épaisseur comprise entre 0,8 et 1,2 mm est placé. Ce grillage a pour fonction de créer une turbulence dans le flux du liquide, favorisant ainsi une meilleure efficacité de filtration. Le résultat est un cylindre composé de plusieurs couches où le perméat est dirigé de manière spirale vers le tube poreux, tandis que le liquide à filtrer circule axialement à travers les canaux.

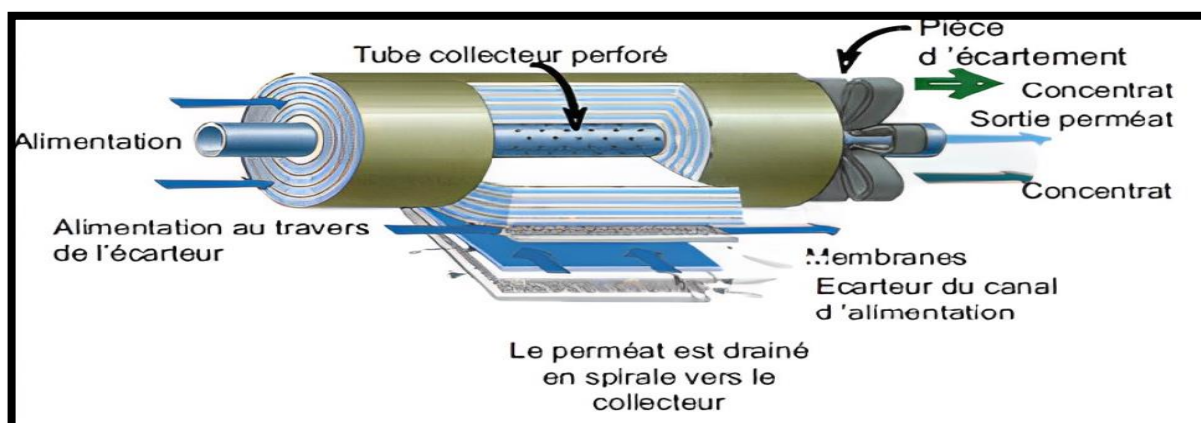


Figure II.16 : Exploration d'un Module Spiralé pour le Processus d'Osiose Inverse [28].

Analyse de la consommation énergétique et des implications financières de l'osmose inverse :

La consommation énergétique et le coût associé à l'osmose inverse sont des aspects cruciaux à considérer :

Le procédé d'osmose inverse, n'impliquant pas de changement de phase, devrait idéalement consommer moins d'énergie que d'autres méthodes de séparation, telles que la distillation. Cependant, dans la pratique, la consommation d'énergie reste souvent supérieure au minimum théorique.

Comme pour toute technologie, il est essentiel de minimiser les coûts énergétiques et économiques associés au procédé. La principale dépense provient généralement de la pompe nécessaire pour appliquer la pression de travail, représentant une consommation électrique de 7 à 10 kWh par mètre cube d'eau produite, sans récupération d'énergie. Ce coût tend à être plus élevé dans le traitement des eaux de mer que dans celui des eaux saumâtres moins concentrées, et il augmente également avec la concentration en sels.

En plus d'envisager des systèmes de récupération d'énergie, qui peuvent réduire la demande énergétique à 5 à 7 kWh par mètre cube, il est judicieux de coupler l'osmose inverse avec des sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien ou la géothermie. [21]

II.12. Limitations de l'osmose inverse :

II.12.1. Définition du colmatage :

Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des processus qui altèrent les propriétés de filtration d'une membrane, à l'exception de la compaction et des altérations chimiques. Ces processus peuvent être physiques, chimiques ou biologiques, et se produisent à l'interface entre la membrane et la solution, ou à l'intérieur des pores de la membrane. Le résultat de ces processus est l'obstruction des pores, ce qui entraîne à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité.

II.12.2. Les types de colmatage :

Les différents types de colmatage dans le contexte de l'osmose inverse peuvent être répartis en quatre catégories distinctes :

II.12.2.1. Colmatage par entartrage :

L'entartrage d'une membrane est principalement causé par la saturation des composants inorganiques au-delà de leur limite de solubilité, entraînant une précipitation rapide sur la surface de la membrane. Les dépôts de tartre, comprenant notamment du carbonate de calcium, du sulfate de calcium, de l'hydroxyde de magnésium et de la silice, forment une couche fine bloquant le transfert de matière à travers la membrane.

II.12.2.2. Colmatage par dépôt :

Le colmatage de la membrane peut résulter de l'obstruction des pores à l'intérieur de celle-ci (blocage des pores) ou du dépôt de matières en surface de la membrane par convection. Le blocage des pores implique la pénétration et le blocage partiel ou total des pores de la membrane par des particules sur lesquelles des composés peuvent être adsorbés. Le dépôt de matières par convection se produit lorsque des particules présentes dans les fluides se déposent à la surface de la membrane, leur taille étant supérieure ou égale à celle des pores de la membrane.

II.12.2.3. Colmatage par adsorption :

L'adsorption est un phénomène irréversible résultant des interactions physico-chimiques entre le soluté et la membrane, formant une ou plusieurs couches moléculaires à sa surface et/ou à l'intérieur de ses pores. Ce type de colmatage nécessite un lavage chimique adapté pour être éliminé.

II.12.2.4. Le bio-colmatage :

Les eaux de mer contiennent naturellement des microorganismes tels que des bactéries, des algues et des virus, qui excrètent des substances polymériques extracellulaires. Ces substances adhèrent à la surface de la membrane et favorisent la formation d'un biofilm. En osmose inverse, le colmatage par biofilm est un phénomène majeur.

II.12.3. 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)* [29].

II.12.3.1. SDI (Indice de densité des particules) :

Le SDI est considéré comme un indicateur représentatif du potentiel de colmatage d'une eau saline utilisée dans un processus d'osmose inverse. Il est influencé à la fois par la quantité de particules et d'autres composants colloïdaux présents dans l'eau. Le test SDI implique la filtration d'un échantillon d'eau à travers une membrane de 0,45 µm (microfiltration) ayant une surface de filtration de $1,73 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, à une pression transmembranaire constante de 2,07 bar. Le SDI est déterminé en comparant les temps de filtration, t_1 et t_2 , nécessaires pour obtenir un volume de filtration fixe respectivement au début (temps 0) et après un intervalle de temps t .

$$SDI_t = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{t} \quad (\text{II-10})$$

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 SDI_{15} ($t = 15$ minutes) est défini comme le temps nécessaire pour des essais précis et normalisés [17].

Le SDI doit être maintenu en dessous de 5 pour l'OI. Bien que le SDI soit largement utilisé dans le domaine du dessalement, il comporte plusieurs limitations : il repose sur l'utilisation d'une membrane de microfiltration plutôt que sur une membrane d'osmose, les pressions

utilisées lors de ce test sont bien plus basses que celles appliquées en OI, et les essais sont réalisés en mode frontal plutôt qu'en mode tangentiel, comme c'est le cas en OI.

II.12.3.2. MFI (Modified Fouling Index):

Le MFI (Indice de colmatage modifié) divise la filtration en trois phases successives : le blocage des pores, la formation d'un gâteau incompressible, et la formation d'un gâteau compressible. Dans le cas d'une filtration frontale à pression constante, la formation d'un gâteau incompressible conduit à une relation linéaire entre t/V et V , comme illustré dans la Figure II.18.

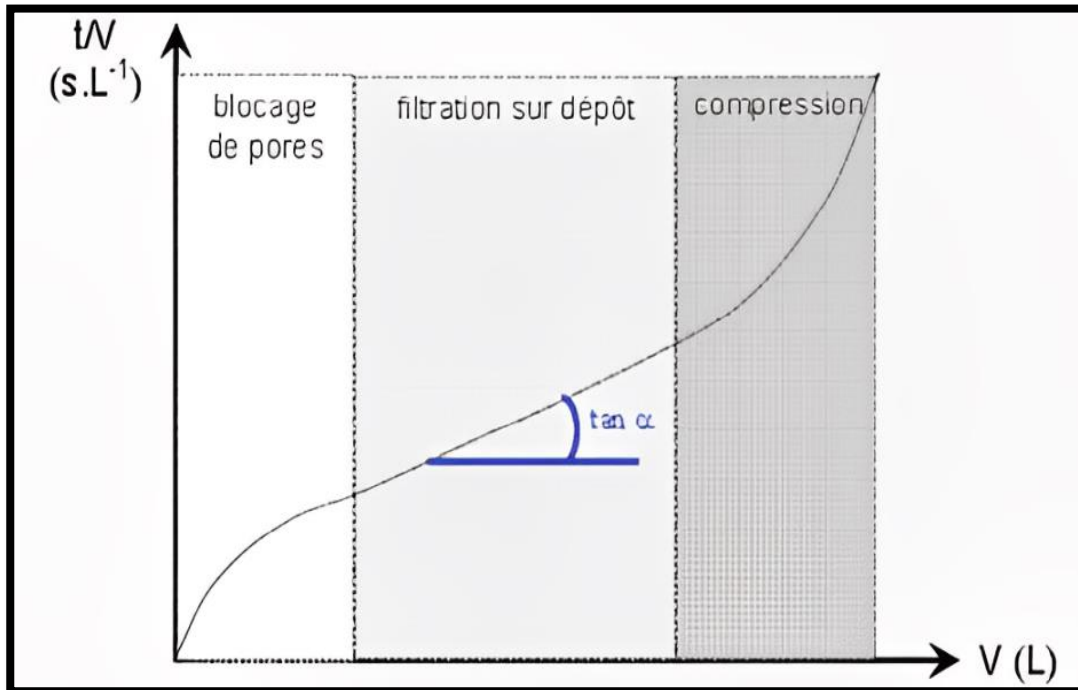


Figure II.17 : Détermination graphique du MFI [29].

Le MFI est calculé graphiquement en analysant la pente de la partie linéaire du tracé $t/V=f(V)$. Il est spécifiquement associé à la formation d'un gâteau à la surface de la membrane, caractéristique du colmatage. Étant noté comme $MFI_{0,45}$ dans ce contexte où une membrane de $0,45 \mu\text{m}$ est utilisée, il se distingue ainsi d'autres indicateurs. Sa détermination pratique est similaire à celle du SDI, et il vise principalement à caractériser la fraction particulaire de l'eau plutôt qu'à évaluer directement le colmatage des membranes d'OI.

Le volume filtré est mesuré sous une pression transmembranaire de 210 kPa (2,07 bar) toutes les 30 secondes pendant un maximum de 20 minutes. Le calcul du MFI peut ensuite être effectué.

$$MFI = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \tan \alpha \quad (\text{II-11})$$

Avec :

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

μ_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 garantir un fonctionnement optimal de l'osmose inverse (OI), le MFI recommandé se situe idéalement entre 0 et 2 s/L². Cependant, dans les installations d'osmose inverse, il est difficile de corrélérer le MFI avec le colmatage causé par les colloïdes. Ce dernier est souvent associé à la présence de particules colloïdales de taille inférieure à 0,45 µm. Par conséquent, le MFI présente la même limitation que le SDI en ce qui concerne l'estimation du potentiel de colmatage. [17].

II.3.3. MFI-UF (Modified Fouling Index by using Ultrafiltration membrane):

(Indice de Colmatage Modifié utilisant une membrane d'Ultrafiltration) diffère des indicateurs précédents (SDI et MFI_{0,45}) car il est basé sur un test utilisant une membrane d'ultrafiltration, dotée de pores plus fins. Cette approche vise à caractériser plus précisément la capacité de colmatage des eaux contenant des colloïdes suffisamment fins pour traverser une membrane ayant une porosité de 0,45 µm. Bien qu'il soit vrai que le dépôt formé sur une membrane de 0,45 µm puisse retenir certaines particules plus petites que la taille des pores de la membrane, l'utilisation d'une membrane d'ultrafiltration à faible seuil de coupure devrait permettre de retenir tous les colloïdes. Ainsi, le MFI-UF devrait fournir une meilleure évaluation du colmatage par rapport au SDI et au MFI_{0,45}, surtout dans les applications de nano filtration ou d'osmose inverse où les membranes ont des pores extrêmement fins.

$$MFI - UF = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \tan \alpha \quad (\text{II-12})$$

Avec :

S : Surface de la membrane (m²) ;

S₀ : Surface de la membrane du test de MFI (17,34*10⁻⁴ m²).

Les valeurs de MFI-UF se situent de 2 000 à 13 300 s. L⁻² [17].

II.13. Le nettoyage des membranes :

Trois types de nettoyage sont généralement pratiqués :

II.13.1. Les rétro-lavages :

Les rétro-lavages consistent à inverser le sens d'écoulement à travers de la membrane et à modifier le gradient de pression afin d'envoyer le perméat à travers la membrane, permettant ainsi l'élimination des dépôts et des particules susceptibles de bloquer les pores. Le succès d'une opération de filtration dépend largement de l'efficacité des rétro-lavages pour maintenir une productivité élevée. Bien que les rétro-lavages soient généralement effectués à l'aide du perméat, l'utilisation d'air et de perméat ou uniquement d'air est également proposée.

Cependant, quel que soit le mode de mise en œuvre, les rétro-lavages ne permettent généralement pas de restaurer intégralement la perméabilité des membranes à long terme.

II.13.2. Les nettoyages chimiques :

Les nettoyages chimiques sont presque toujours nécessaires pour garantir le bon fonctionnement de l'installation selon ses performances nominales. La décision d'effectuer un nettoyage chimique peut être basée sur plusieurs critères : une valeur maximale de perte de charge à ne pas dépasser, une diminution du débit de perméat atteignant 20 à 25% par rapport au débit nominal, ou un programme de nettoyage systématique prédéterminé, notamment dans les installations importantes comportant un nombre élevé de modules. Cela permet d'avoir une partie des modules en nettoyage tandis que le reste assure la production.

II.13.3. Nettoyage enzymatique :

Le nettoyage enzymatique constitue une alternative aux traitements chimiques, notamment dans les cas où les membranes sont sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ou en cas de colmatage avancé. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes nécessitent des temps de traitement plus longs que les traitements chimiques et sont également plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont moins fréquemment utilisés.

Cependant, ces méthodes de nettoyage présentent plusieurs inconvénients significatifs, notamment l'arrêt de la production pour effectuer le nettoyage, une consommation élevée en eau pour le rinçage de l'installation, l'utilisation de produits chimiques néfastes pour l'environnement, le traitement nécessaire des effluents de nettoyage et la dégradation des propriétés mécaniques des membranes. [30].

II.14. Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse :

- **Les avantages :**

- 1) Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%) ;
- 2) Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m³) ;
- 3) Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ;
- 4) Un coût d'investissement relativement bas ;
- 5) Une durée de mise en œuvre réduite [31].
- 6) Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bioélectroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles :
- 7) Ph légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang généralement trop toxique).
- 8) Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins [33].

- **Les inconvénients :**

Malgré les avantages, il y a aussi des inconvénients comme :

- 1) Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions ;
- 2) Nécessité d'un personnel qualifié ;
- 3) Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement ;
- 4) Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent [31].
- 5) La perte de cinq litres d'eau pour un litre d'eau osmosée car la membrane doit être continuellement nettoyée. ∞ Comme l'eau est déminéralisée, elle est agressive et corrosive pour les tuyauteries.
- 6) L'eau perd tous ses minéraux y compris les minéraux bénéfiques comme certains alcalins, notamment le calcium et le magnésium. Il est donc préférable de reminéraliser l'eau avant de la boire [32].

II.15. Conclusion :

La technique de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse représente actuellement un pilier essentiel dans la production d'eau potable, particulièrement dans les régions confrontées à une rareté d'eau douce. Son objectif principal est d'éliminer les sels, les matières organiques et les microorganismes présents dans l'eau de mer.

Les avantages de cette méthode résident dans sa simplicité de mise en œuvre et son coût énergétique relativement bas par rapport au dessalement thermique. [61].

Cependant, malgré ses avantages, l'osmose inverse présente encore des limites. La principale limitation réside dans la pression de travail requise pour surmonter la pression osmotique, qui augmente avec la concentration en sels, limitant ainsi les taux de conversion atteignables. De plus, le phénomène de polarisation de concentration réduit les flux produits, tandis que le colmatage rend le procédé sensible à la qualité des prétraitements. Le rejet des concentrats non traités dans l'eau de mer perturbe également l'équilibre écologique et la biodiversité marine.

Chapitre 03 :
Présentation et diagnostic
de station dessalement

III.1 Introduction :

Les stations de dessalement sont essentielles pour fournir de l'eau potable dans les régions où les ressources en eau douce sont limitées. Ce chapitre présente le fonctionnement et les performances des stations de dessalement, en soulignant les principaux défis rencontrés, tels que l'encrassement des membranes, la consommation énergétique élevée et la gestion des rejets de saumure. Ces problèmes peuvent affecter significativement l'efficacité et la durabilité des stations. Pour bien comprendre et résoudre ces problèmes, une approche scientifique rigoureuse est nécessaire. Ce chapitre explore en détail ces différents défis, en fournissant des informations précises et des analyses approfondies. L'objectif est de permettre une meilleure compréhension des enjeux et de proposer des solutions efficaces pour améliorer le fonctionnement des stations de dessalement. En adoptant cette approche, nous espérons contribuer à l'optimisation des performances et à la durabilité de ces installations cruciales. Dans le chapitre suivant, nous tenterons de résoudre ces problèmes en proposant des solutions adaptées.

III.2.1 Vue d'ensemble de l'installation de dessalement de l'eau de mer :

Cette unité de dessalement a été implantée au Nord-Ouest de la ville d'Aïn Témouchent et à environ 16 km de cette dernière. Le site est localisé sur la rive gauche de Chatt El Hillal



Carte III-1 : Situation Géographique de la Station de Dessalement

III.2.2 Géologie :

La Wilaya d'Aïn Témouchent présente une géologie caractérisée par une diversité de formations. Dans sa partie nord-ouest, en bordure littorale, on retrouve des formations de lumachelles du Pliocène supérieur ainsi que des couches de marnes grises à vertes du Miocène supérieur. Sur le plan structural,

III.2.3 Cadre climatique :

L'aspect climatique est un facteur important à considérer pour un projet de dessalement des eaux de mer, car il intervient dans le fonctionnement du procédé de dessalement d'une part et d'autre part sur le choix du site. [46]

Le climat de la wilaya d'Aïn Témouchent se caractérise par une température douce, la faiblesse des écarts thermiques et l'alternance quasi quotidienne des brises de mer et de terre.

- ✓ **La précipitation** : La côte de la wilaya est soumise à des averses importantes, particulièrement dans la région Ouest du massif entre 700 et 1200 mm par année
- ✓ **La température** : les températures dans les zones côtières varient de 5 à 15 °C en hiver, et de 25 à 30°C en été.
- ✓ **Le vent** : Les vents dominants à travers les saisons de l'année sont généralement ceux du Nord-ouest et Ouest, les vents du Nord-Ouest dominent pendant l'automne et ceux de l'Ouest pendant l'hiver,
- ✓ **L'humidité (%)** : le taux d'humidité relative de l'air dans la région varie entre 69% et 79%.

III.2.4 Analyse chimique des constituants de l'eau de mer :

Les caractéristiques chimiques de l'eau de mer près d'Aïn Témouchent sont les suivantes

- La salinité varie de 35 à 36,5 g/l,

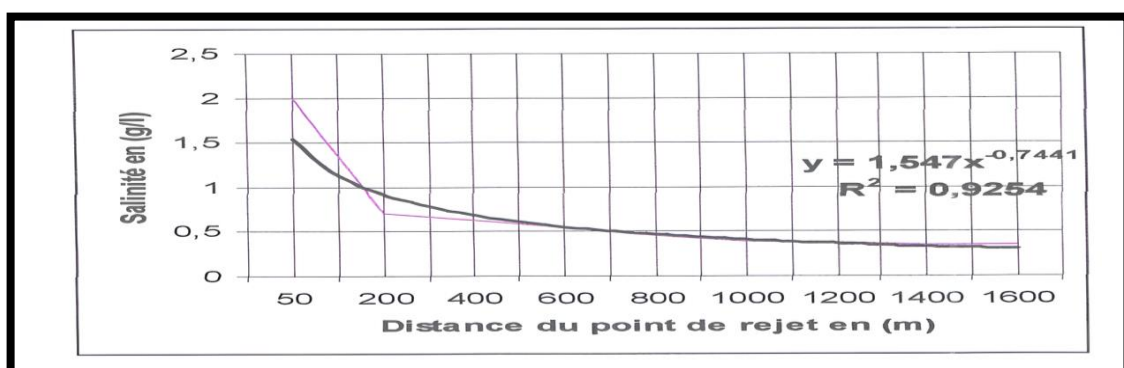


Figure III-1 : Variation de l'augmentation de la salinité de l'eau de mer à Chatt El Hillal

Les deux graph désigner indique que la salinité diminue de manière significative à mesure que l'on s'éloigne du point de rejet, ce qui est crucial pour les études environnementales et la gestion des écosystèmes marins.

- Le pH oscille entre 7,60 et 8,24, et la conductivité se situe entre 51 et 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De plus, on constate une augmentation de la salinité en fonction de la distance du point de rejet.

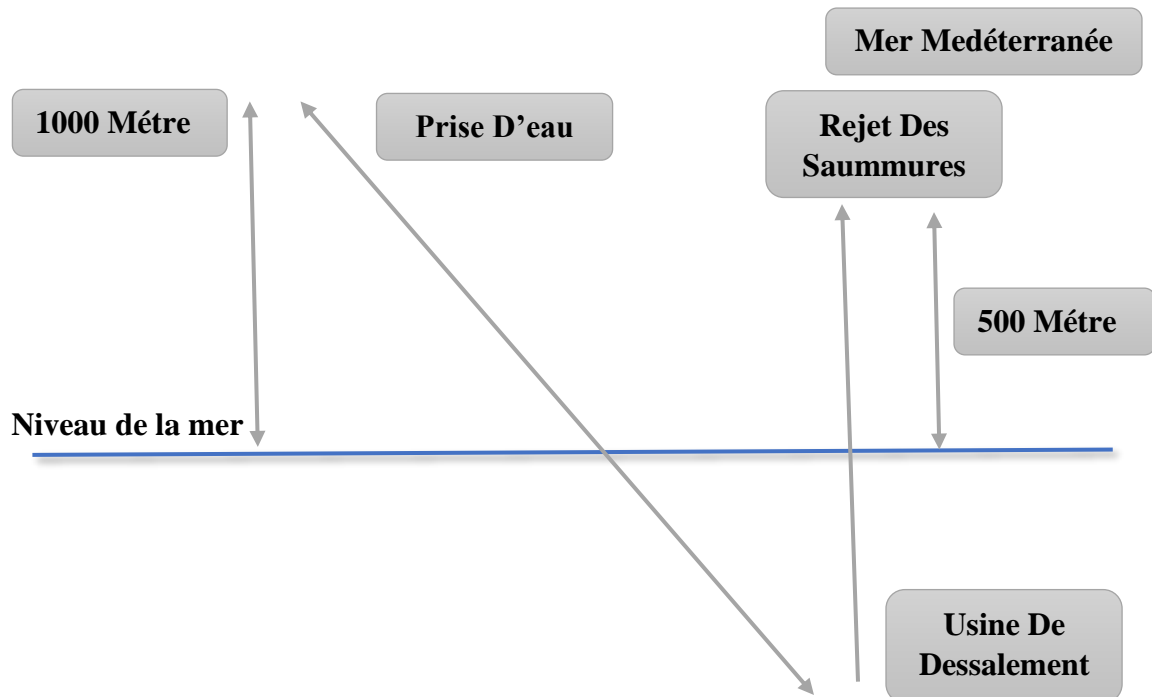


Figure III- 2 : Prescriptions minimales pour la prise d'eau et le rejet de Saumures.

II.2.5 Pompage et stockage de l'eau de mer :

Le système de captage et de pompage de l'usine a pour principales fonctions : la conduite de l'eau de mer jusqu'au réservoir d'où les pompes prélèvent l'eau de mer nécessaire



Figure III-3 : Bassin de stockage



Figure III-4 : Les pompes de captage

La filtration de l'eau par un système de filtrage composé de deux filtres rotatifs situés dans le réservoir d'aspiration et évacuation, par pompage, de l'eau contenant des matières en suspension issues du nettoyage des grilles mobiles.



Figure III-5 : Le filtre rotatif

III.2.6 Traitement préliminaire de l'eau de mer :

A. Filtration de l'eau de mer à l'aide des filtres à sable :

Les fonctions du système de filtrage à sable consistent à retenir les solides en suspension présents dans l'eau de mer et les floccs formés à l'étape préalable de coagulation.

Le système de filtrage à sable est constitué de deux trains de filtrage identiques constitué, chacun, de 24 filtres regroupés en 12 modules. Chaque module est constitué de 2 filtres identiques comportant chacun un collecteur supérieur permettant l'entrée de l'eau de mer et un collecteur inférieur permettant la sortie de l'eau filtrée.



Figure III-6 : Les collecteurs des filtres

Le milieu filtrant utilisé est le sable de silice constitué de deux couches de grosseurs différentes (bicouche) :

- 1) Une couche de sable grossier (couche support) située au bas des filtres
- 2) Une couche de sable plus fin (couche filtrante) recouvrant cette dernière et permettant la rétention des particules les plus fines.

En fonctionnement normal, le débit requis pour alimenter le système de filtrage à sable est de 18 000 m³/h.

Les caractéristiques (composition, températures, débit) de la procédure de filtrage à sables dépendent des modes de fonctionnement de l'usine et varient en fonction du mode activé : démarrage, arrêt, lavage, degré d'encrassement du filtre.

B. Filtration de l'eau brute à l'aide des filtres à anthracite :

Le système de filtrage à anthracite a pour fonction de retenir les agents résiduels et cancérigènes, la matière organique et, en général, les composés causant des problèmes de mauvaises odeurs et de mauvais goût dans l'eau.

Ce système est constitué de deux trains de filtrage comprenant deux séries de 6 modules ou paires de filtres (24 filtres au total). Chaque module est constitué de 2 filtres identiques fonctionnant comme une unité filtrante, avec collecteurs et vannes communes, 24 filtres à pression horizontale et à fond bombé sont installés en parallèle, afin que le débit d'eau soit uniformément réparti entre tous ces filtres.

Les filtres sont fabriqués en acier au carbone, recouverts à l'intérieur d'une couche de néoprène de 3mm d'épaisseur, et dont l'extérieur est peint à la peinture marine. La hauteur totale du lit filtrant est de 1000 mm

C. Filtration de l'eau brute à l'aide des filtres à cartouches :

Les fonctions des systèmes de filtrage à cartouches consistent à retenir les particules de plus petite taille (jusqu'à 5 μ absolus) qui n'ont pas été retenues par les filtres à sables et à anthracite et qui pourraient endommager les installations des modules d'osmose inverse. Ce système est constitué de 2 lignes de filtration formées de 10 filtres, de forme cylindrique (diamètre unitaire interne de 1,36 mètres et hauteur totale d'environ 4,285 mètres) et installés en parallèle.

On fait passer l'eau à travers les cartouches logées à l'intérieur des corps des filtres retenant les solides en suspension, par le biais d'une action mécanique.

Le débit d'eau filtrée qui alimente le système de filtration par cartouche est de 17996 m³/h.

A l'intérieur des filtres est placée une plaque-support qui soutient les cartouches. Sur cette plaque sont montées 380 cartouches en polypropylène. En effet, les cartouches ont une capacité limitée de rétention et, une fois que celle-ci a été atteinte, les cartouches doivent être remplacées



Figure III-7 : Ensemble des filtres à sable et à Anthracite



Figure III-8 : Les Filtres à Cartouches

III.2.7 Utilisation de procédé d'osmose inverse et le système de récupération d'énergie :

Les principales fonctions du système d'osmose inverse sont :

- Le dessalement de l'eau de mer pour produire de l'eau potable ;
- L'évacuation de la saumure de rejet à pression au système de récupération d'énergie

Le processus de dessalement s'effectue par le passage de l'eau de mer d'alimentation à travers des modules de membranes semi-perméables (Hydranautics SWC5) disposées en série à l'intérieur de chaque tuyau de pression et en parallèle dans chaque module.

Le système se compose de 10 modules identiques constitués chacun de 246 tubes de pression. Le passage du courant d'entrée au châssis d'osmose inverse (membrane), nécessite que la pression exercée sur celle-ci soit supérieure à sa pression osmotique. De cette manière, à partir du courant d'eau de mer qui a une plus grande concentration saline, il se produit un courant d'eau ayant une concentration plus faible, c'est le perméat, et un autre courant de rejet, la saumure, avec une teneur en sels bien supérieure à celle que possédait initialement le courant d'eau d'alimentation.

Le débit de perméat est de 840 m³/h pour une pression de 0.8 bar et le débit de rejet est de 1025 m³/h pour une pression de 1.8 bar.



Figure III-9 : Modules d'osmose inverse

Un système de récupération d'énergie dans une station de dessalement avec des ERI (échangeurs de chaleur à récupération d'énergie) est une installation conçue pour récupérer et réutiliser l'énergie thermique générée lors du processus de dessalement de l'eau de mer. Les ERI permettent de récupérer la chaleur de l'eau de mer concentrée et de la réutiliser pour préchauffer l'eau de mer entrante, réduisant ainsi la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau de mer jusqu'au point d'évaporation. Ce système contribue à améliorer l'efficacité énergétique globale

de la station de dessalement, réduisant ainsi les coûts opérationnels et l'empreinte environnementale de la production d'eau douce à partir de l'eau de mer. [33]

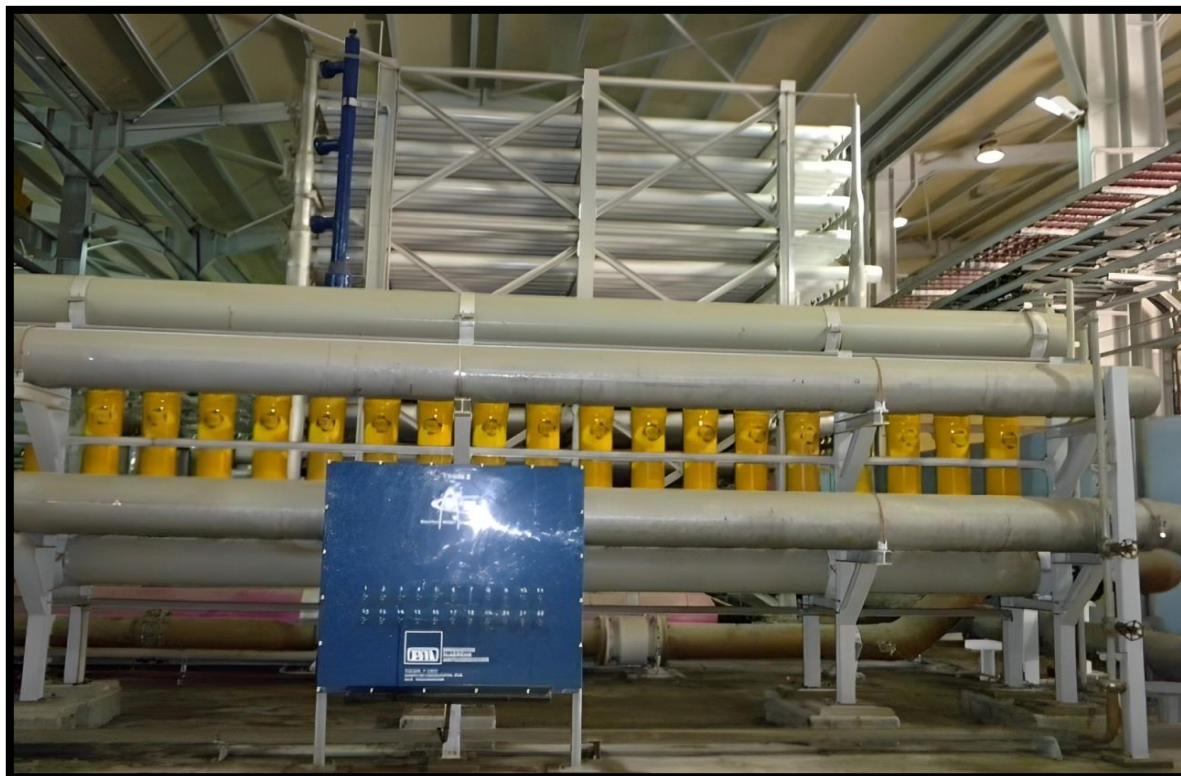


Figure III-10 : Un rack avec le système de récupération d'énergie

Le système d'osmose inverse est constitué d'un nombre d'instruments énumérés dans le tableau suivant (Tableau III-1).

Tableau III-1 : Nombre de racks, tubes de pressions et des membranes

Nombre de rack installé	10
Nombre de tubes par rack	280 (34 tube additionnels).
Nombre de membranes par tube	7
Nombre de membranes par rack	1960
Nombre total de membranes	19600 Membranes
Pourcentage de renouvellement annuel	10%
Quantité annuelle de membranes	1960 Membranes

Le système d'osmose inverse est localisé à l'intérieur du bâtiment de production et est organisé en trois sous-systèmes différenciés essentiellement par la nature du fluide qu'ils acheminent. Chaque sous-système dispose de ses propres collecteurs principaux, de ses instruments et de ses vannes associées. On distingue les sous-systèmes suivants :

A. Sous-système d'eau d'alimentation :

Le fluide circulant est l'eau de mer d'entrée au traitement d'osmose inverse. Celle-ci doit être préalablement conditionnée. Ce conditionnement est basé essentiellement sur un contrôle de la matière en suspension et sur un dosage chimique pour éviter la croissance biologique et la précipitation d'incrustations dans les membranes. Ce système est représenté par la couleur verte.

B. Sous-système d'eau dessalée :

Le fluide de circulation est l'eau qui a traversé les éléments de la membrane. Ce courant d'eau traitée est caractérisé par une très faible concentration saline que celle de l'eau de mer.

Le débit d'eau à travers une membrane est directement proportionnel à la pression nette exercée sur la membrane. (La pression nette est la différence entre la pression totale exercée sur la membrane et la pression osmotique de l'eau d'alimentation).

Ce système est constitué des tuyaux et des collecteurs de sortie de l'eau traitée depuis les tubes de pression jusqu'aux lits de calcite. Ce système est représenté par la couleur bleue.

C. Sous-système de rejet :

Le courant de saumure circule dans ce système. Il ne traverse pas les membranes : il s'agit du courant d'eau ayant la concentration saline la plus élevée. Les membranes utilisées sont constituées de fils de polyamide à enroulement en spirale, capable de retenir plus de 99,7% des sels. Le taux de conversion de l'usine est de 45%. Ce système est représenté par la couleur marron.

En cas de l'opération de nettoyage chimique du châssis, l'effluent de sortie de nettoyage chimique du module d'osmose inverse circule dans les collecteurs et les tuyaux communs à ceux de la sortie de l'eau de rejet, mais contrairement à l'effluent de rejet

Sur le tronçon proche du collecteur d'accès à l'osmose inverse, sont placés :

- Un manomètre de haute température ;
- Le rejet de l'équipement d'osmose inverse est transporté jusqu'à l'ensemble de chambres hyperbariques (récupérateurs d'énergie).

Ces chambres sont composées de cylindres ayant des pistons intérieurs permettant de séparer la saumure de l'eau de mer dont on veut élever la pression



Figure III-11 : Rejet de saumure vers la mer

III.2.6 Dosage chimique :

Pour contrôler les dosages chimiques, il ya une station des commandes graduées pour doser les eaux



Figure III-12 : Station de contrôle pour dosage chimique

A. Dosage de l'hypochlorite de sodium :

L'injection d'hypochlorite de sodium dans l'eau de mer se fait au niveau de la station des pompes de captage et de la tour de prise d'eau de mer. Cette injection a pour but l'élimination de la matière organique.

Il existe 2 réservoirs de stockage de 125 m³ de capacité chacune.

Le système d'injection d'hypochlorite de sodium dans l'eau produite permet la stérilisation de l'eau dessalée.

L'injection s'effectue au moyen des pompes doseuses.

B. Dosage de l'acide sulfurique :

C'est un dispositif doseur d'acide sulfurique qui vise à réduire le pH de l'eau de mer afin d'éviter la précipitation des carbonates et des bicarbonates, tout en générant une quantité de CO₂ suffisante pour la reminéralisation de l'eau produite dans la tour de calcite. Il se compose de deux réservoirs de stockage, d'une pompe de transfert et d'une pompe doseuse. La baisse du pH renforce l'efficacité bactéricide du chlore. Le traitement à l'acide sulfurique est effectué en amont des filtres à sable.

C. Dosage de bisulfite sodique :

L'objectif de l'ajout de ce produit est d'éliminer le chlore résiduel provenant du dosage d'hypochlorite sodique et de prévenir l'oxydation des membranes. L'équipement se compose de deux réservoirs de stockage, d'une pompe doseuse et d'une pompe de secours. Le produit est ajouté en ligne avant les filtres à sable et les filtres à cartouches pour prolonger au maximum le contact.

D. Dosage d'anti-incrustant :

Ce traitement est réalisé avant les filtres à cartouches pour empêcher les incrustations sur les membranes. Il s'agit d'un dispersant dilué dans deux réservoirs de dilution et de stockage, l'un en service et l'autre en réserve. L'anti-incrustant est dosé en continu de manière automatique et traverse le collecteur de refoulement.

E. Soude de neutralisation :

La soude concentrée à 40 % est utilisée et stockée dans un réservoir de dilution. Ce dernier est rempli à l'aide d'une pompe centrifuge de transfert. La soude est dosée automatiquement, de manière intermittente, dans le réservoir de nettoyage chimique des membranes en fonction du pH de l'effluent de nettoyage. L'opération de neutralisation est lancée manuellement. Ce système de dosage est représenté par la couleur rose au niveau de la station.



Figure III-13 : Ensemble des collecteurs et des tuyaux communs

III.2.9 Équipement de nettoyage :

A. Nettoyage des filtres :

Le lavage des filtres à sable et à anthracite se fait avec de l'eau de mer à l'aide d'une pompe de lavage principale et d'une pompe de secours. L'ajout du groupe soufflant assure un lavage efficace, tout en permettant une économie significative d'eau. Ce groupe est équipé de son propre filtre à air. Les tuyauteries d'eau et d'air de lavage sont en polyester renforcé de fibre de verre. Le débit d'eau de lavage est régulé par une soupape de contrôle située à la sortie des filtres.

B. Nettoyage des membranes :

Le nettoyage des membranes est essentiel pour le bon fonctionnement du processus. Il intervient en cas d'encrassement notable des membranes, détecté par le manomètre. Ce nettoyage est réalisé en utilisant une solution réactive mélangée à de l'eau produite, préparée dans un réservoir dédié. Cette solution, aspirée par deux pompes à travers la ligne d'alimentation, traverse les filtres à cartouches via les tubes de pression, puis est dirigée vers le réservoir de nettoyage pour y être neutralisée par de la soude avant d'être déversée dans la mer. Enfin, les modules sont rincés à l'eau dessalée. L'eau de rejet est évacuée via la tuyauterie de saumure vers le drainage général de l'installation.

III.3 Défis techniques rencontrés dans le processus de dessalement :

Lors du processus de dessalement, plusieurs problèmes techniques peuvent survenir, compromettant l'efficacité et la durabilité des installations. Parmi ces problèmes, l'entartrage des conduites est fréquent, causé par la précipitation de sels minéraux qui obstruent les canalisations et réduisent le débit d'eau. La corrosion est un autre défi majeur, affectant les surfaces métalliques et entraînant des fuites et des défaillances structurelles. Le colmatage des surfaces d'échanges, souvent dû à l'accumulation de particules et de matières organiques, diminue l'efficacité des échanges thermiques et augmente les coûts de maintenance. De plus, une chute de pression peut se produire, perturbant le flux d'eau à travers le système et nécessitant des ajustements fréquents pour maintenir une performance optimale. Enfin, le colmatage, qui peut se manifester à différents points du système, complique davantage le fonctionnement et nécessite des interventions régulières pour nettoyer et déboucher les composants affectés.

III.3.1 Corrosion :

La corrosion dans les stations de dessalement est la dégradation des métaux causée par l'action chimique de l'eau salée et de l'air. Elle se manifeste sous diverses formes, telles que la corrosion par piqûres, par crevasses, galvanique et sous contrainte. Les ions chlorure de l'eau de mer, les zones stagnantes, le contact entre métaux différents et les contraintes mécaniques aggravent ce phénomène. Ces types de corrosion peuvent entraîner des fissures, des ruptures et une réduction de l'efficacité des installations, compromettant ainsi la durabilité et la performance des équipements de dessalement.

A) Effets de la corrosion :

- Rupture des conduites
- Augmentation de la rugosité
- Fuites d'eau
- Contamination de l'eau par des agents extérieurs [39]

Dans notre station, bien que la corrosion soit présente, son impact sur le fonctionnement de la filière de prétraitement reste limité. Néanmoins, nous suggérons quelques méthodes pour la prévenir, parmi lesquelles nous proposons.

B) Techniques de protection contre la corrosion :

Sélection des Matériaux

La sélection des matériaux pour une installation de dessalement par osmose inverse doit prendre en compte les conditions spécifiques du procédé :

- Température ambiante allant de 0 à 45°C
- Eau salée entièrement aérée
- PH légèrement acide (pH = 6)
- Cycles de nettoyage avec pH acide (pH = 2) et basique (pH = 12)
- Pression élevée (50 à 70 bar)

- **Matériaux résistants à la corrosion** : Utilisation d'acier inoxydable à haute teneur en azote et d'alliages de nickel et de cuivre [40].
- **Revêtements et protection cathodique** : Application de revêtements polymères et nano composites et utilisation de la protection cathodique photoélectrochimique [40].
- **Contrôle des paramètres opérationnels** : Maintien d'un pH optimal et Gestion de la vitesse de circulation [41].
- **Inhibiteurs de corrosion** : Ajout d'inhibiteurs chimiques spécifiques dans l'eau [41]

Ces stratégies peuvent être combinées pour offrir une protection optimale contre la corrosion.

III.3.2 L'entartrage :

L'entartrage est un problème courant dans les stations de dessalement, caractérisé par la formation de dépôts de sels minéraux sur les surfaces d'échange. Ces dépôts, principalement constitués de carbonate de calcium (CaCO_3), d'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2) et de sulfate de calcium (CaSO_4), se forment lorsque deux conditions sont réunies : une sursaturation des ions dans l'eau (condition thermodynamique) et une vitesse de déposition rapide (condition cinétique).

L'entartrage est influencé par la température (la solubilité des sels diminue avec l'augmentation de la température) et la composition de l'eau. Les principaux types de dépôts rencontrés dans les processus de dessalement sont les carbonates, les hydroxydes et les sulfates [41].

A) Stratégies de Prévention de l'Entartrage :

Pour maintenir le bon fonctionnement des installations de dessalement, il est essentiel de prévenir la formation de tartre. Voici quelques approches :

Prétraitement de l'eau :

Ajout d'acide : Provoque la décarbonatation par dégazage du CO_2 formé à partir des hydrogénocarbonates.

Ajout de chaux et de germes de cristallisation : Facilite la précipitation du carbonate de calcium.

Utilisation d'inhibiteurs d'entartrage : Polyphosphates, organophosphates, polymères, polys carboxyliques.

Chaque méthode entraîne une augmentation des coûts de dessalement. Bien que l'entartrage soit un problème courant dans les installations de dessalement, à la station de Beni Saf Water Company, il est moins préoccupant comparé au principal problème de colmatage des membranes qu'on va trouver dans le traitement, que nous allons aborder.

II.3.3 Le colmatage :

B) Principe du colmatage :

Il existe quatre principales catégories de colmatage :

- a) Colmatage inorganique : Survient lorsque des particules minérales, telles que des argiles ou des oxydes métalliques, obstruent les pores d'une membrane ou d'un filtre. Cela réduit l'efficacité de la filtration et peut nécessiter des opérations de nettoyage ou de remplacement fréquentes.
- b) Colmatage organique : Se produit lorsque des substances organiques, comme des matières biologiques, des huiles ou des graisses, obstruent les pores d'une membrane ou d'un filtre. Cela diminue l'efficacité de la filtration et peut nécessiter des nettoyages ou des remplacements fréquents pour maintenir la performance du système.
- c) Colmatage par les matières colloïdales : telles que des argiles ou des oxydes métalliques, s'accumulent et bloquent les pores d'une membrane ou d'un filtre. Cela réduit l'efficacité de la filtration et peut nécessiter des nettoyages ou des remplacements fréquents pour maintenir la performance du système.
- d) Bio-colmatage : Des micro-organismes, tels que des bactéries et des algues, ainsi que leurs sous-produits métaboliques, obstruent les pores d'une membrane ou d'un filtre, diminuant l'efficacité de la filtration et nécessitant des nettoyages ou des remplacements fréquents pour maintenir la performance du système

C) Stratégies de Prévention de Colmatage :

Le colmatage peut être un facteur limitant important dans l'application des procédés membranaires. Dans les systèmes d'osmose inverse, la pollution par les colloïdes peut considérablement réduire les performances et la productivité.

- Prétraitement : Par exemple, l'ajout d'un décanteur.
- Contre-lavage des membranes : Utilisation d'eau ou d'air pour nettoyer les membranes.

III.3.4 Surconsommation des pompes :

La surconsommation des pompes représente un problème majeur en termes de perte d'énergie. En effet, les pompes fonctionnent souvent à 100 % de leur capacité énergétique, même lorsque ce n'est pas nécessaire. Cela est particulièrement problématique dans les stations de pompage qui transfèrent l'eau des bassins de captage vers les installations de traitement, ainsi que dans les systèmes de distribution d'eau potable vers les réservoirs de l'ADE. De plus, les pompes à haute pression, avec leur consommation énergétique élevée, exacerbent ce problème. Une gestion inefficace de la consommation énergétique des pompes entraîne non seulement des coûts opérationnels élevés, mais aussi une utilisation non durable des ressources énergétiques.

A) Optimisation énergétique des pompes en dessalement :

On propose un système de variation de vitesse pour les pompes permet d'ajuster la vitesse de rotation du moteur en fonction des besoins réels du processus. Cela signifie que la pompe ne fonctionne pas toujours à pleine capacité, mais s'adapte aux variations de demande, ce qui permet de réduire la consommation énergétique et d'améliorer l'efficacité globale.

Dans les stations de dessalement, les besoins en débit et en pression varient en fonction de la demande. Par exemple, pendant les périodes de faible consommation, il n'est pas nécessaire que les pompes fonctionnent à pleine capacité. Un système de variation de vitesse permet de moduler la vitesse de la pompe, réduisant ainsi la consommation d'énergie lorsque la demande est faible.

Les avantages de ce système incluent :

- Réduction de la consommation énergétique : En ajustant la vitesse de la pompe en fonction des besoins, on évite le gaspillage d'énergie. La puissance absorbée par une pompe centrifuge varie avec le cube de sa vitesse de rotation, donc une réduction de vitesse peut entraîner des économies significatives .
- Diminution de l'usure des composants : Les démarrages et arrêts en douceur réduisent les surintensités et les coups de bélier, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements .

III.3.5 Autres défis rencontrés :

Lors du lavage des filtres, nous avons observé une chute de pression, principalement due à l'encrassement des filtres par des particules solides, un débit d'eau insuffisant causé par une pompe défectueuse ou sous-dimensionnée, et des fuites dans le système de filtration. De plus, la pression élevée à l'intérieur des filtres a provoqué le déplacement des grains de filtration. Ce phénomène est attribué à une pression différentielle élevée à travers le filtre, à une taille inappropriée des grains de filtration, et à une conception du filtre qui entraîne une répartition inégale de la pression.

III.4 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a été structuré en deux étapes principales. La première étape a présenté de manière exhaustive notre station de dessalement, en détaillant les parties offshore et onshore, depuis la prise d'eau de mer jusqu'au post-traitement. La deuxième étape a mis en lumière les défis techniques rencontrés dans le processus de dessalement, défis qui sont courants dans presque toutes les stations, tels que l'entartage, le colmatage, la corrosion et la surconsommation des pompes. Nous avons proposé des solutions pour résoudre ces problèmes. Cependant, d'autres problèmes subsistent, notamment la chute de pression lors du lavage des filtres et le déplacement des grains à l'intérieur des filtres en raison de la pression élevée. Ces aspects seront abordés dans le chapitre suivant, qui se concentrera sur le dimensionnement de la chaîne de prétraitement pour améliorer le fonctionnement et l'efficacité de notre station.

Chapitre IV : Dimensionnement de la chaîne de prétraitement

IV.1. Introduction :

Le dimensionnement de la chaîne de prétraitement dans une station de dessalement, allant du bassin de captage à la filtration à cartouche, est une étape cruciale pour garantir une production d'eau de haute qualité. Ce processus implique une série de traitements et de technologies visant à préparer l'eau brute pour la dessalination, en éliminant les impuretés et en optimisant les conditions pour les étapes suivantes. Chaque composant de la chaîne, des pompes aux filtres, doit être soigneusement sélectionné et configuré pour assurer une efficacité maximale et une durabilité à long terme. Nous nous efforcerons de résoudre les problèmes rencontrés dans la chaîne, tels que les chutes de pression et les déplacements des graisses dus à des pressions élevées, afin d'améliorer la performance globale. L'objectif est de créer un système intégré et performant, capable de répondre aux exigences de qualité de l'eau tout en minimisant les coûts opérationnels et les impacts environnementaux.

IV.2. Les analyses d'eau brute :

Tableau IV.1 : la composition d'eau brute (eau de mer)

Les paramètres	Unité	Concentration
Calcium Ca⁺²	(mg/l)	418
Magnésium Mg⁺²	(mg/l)	1330
Potassium K⁺	(mg/l)	397
Chlorures Cl⁻	(mg/l)	19841
Sulfate SO₄	(mg/l)	2769
Bicarbonate HCO₃	(mg/l)	146
Sodium Na⁺	(mg/l)	11035
Strontium	(mg/l)	14
Bromures	(mg/l)	68
Fluorures	(mg/l)	1,4
Ph		7,8-8,3
Température	C°	25
Conductivité	(ds/m)	4-6 (ds/m)
Turbidité	(mg/l)	<27 (mg/l)

IV.3. Les déroulements de prétraitement :

Le Prétraitement le plus répandu dans le procédé de dessalement Beni saf d'eau de mer se compose comme suit :

- ✚ Préfiltration dans le captage
- ✚ Filtration directe à sable
- ✚ Filtration directe à Anthracite
- ✚ Micro filtration avec des filtres à cartouche

IV.3.1 Le prétraitement physique :

a) La partie captage

Le diamètre des conduites du système de captage et de pompage est établi en évaluant les vitesses dans les tuyaux avec le débit de fonctionnement selon le document de processus et les critères de vitesse dans les tuyaux établis dans les critères du projet mécanique

Le matériau des lignes du système a été sélectionné selon les critères du document de processus

Les matériaux utilisés sont résumés comme suit :

- ✚ Aspiration des pompes d'alimentation
- ✚ Refoulement des pompes d'alimentation

Les dimensions de largeur et de longueur du canal, ainsi que l'élévation des conduites d'aspiration, respectent les recommandations du HI ; Norme nationale américaine pour la conception de l'admission des pompes

Le NPSH disponible minimum à l'aspiration des pompes doit être calculé pour vérifier que le fabricant fournit un NPSH requis inférieur.

Calcule les diamètres des conduites (cote aspiration)

Le diamètre du tuyau sera calculé en fonction du débit de processus et de la vitesse maximale autorisée

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (\text{IV-1})$$

- d = diamètre intérieur du tuyau (m)
- Q = débit de processus (m³/h)
- v = vitesse du fluide (m/h)

Tableau IV.2 : les diamètres des conduites partie captage

Débit	(m ³ /h)	18000	9600	18000	1800
La vitesse Maximale	(m/s)	1.6	1.6	2.40	2.40
La vitesse de calcul	(m/s)	1.6	1.5	1.96	1.77
Diamètre Intérieure	m	2.000	1500	1.800	0.600

Dimensionnement de la trémie :

Pour le dimensionnement de la trémie, les exigences suivantes seront respectées à partir du diamètre d'entrée dans la cloche d'aspiration D :

Tableau IV.3 : la variation des valeurs recommandée

Variable	Variable Description	Valeur Recommandée
B	B : Distance du mur au centre de la cloche d'entrée du tuyau	$B = 0,75D$
C	C : Distance entre la cloche d'entrée et le sol	$C = 0,3D \text{ à } 0,5D$
W	W : Largeur de l'entrée du canal d'aspiration du tuyau	$W = \text{minimum } 2D$
X	X : Longueur du canal d'aspiration du tuyau	$X = \text{minimum } 5D$

Ces exigences sont énoncées de "HI, Norme nationale américaine pour la conception de l'aspiration de la pompe

Le fournisseur des pompes doit garantir leur bon fonctionnement ou indiquer les modifications nécessaires à leur bon fonctionnement. L'immersion nécessaire est calculée selon les recommandations de "HI; Norme nationale américaine pour la conception de l'aspiration de la pompe

L'immersion est déterminée à partir du diamètre extérieur de la cloche d'aspiration et du nombre de Froude

$$F_r = \sqrt{\frac{v}{g d}} \quad \text{(IV-2)}$$

$$F_r = \sqrt{\frac{1.5}{10 * 2}}$$

$$F_r = 0.28 < 1$$

- F= Nombre de Froude (sans dimension),
- V = Vitesse à l'entrée de l'aspiration (Débit / Surface)
- D = Diamètre extérieur de la cloche
- g = Accélération de la gravité

C'est une phase d'épuration grossière durant laquelle on élimine tous les éléments solides volumineux et grossiers qui pourraient d'ailleurs endommager les installations par la suite.

Base de calculs du dimensionnement du dégrilleur :

Pour dimensionner un dégrilleur, on doit déterminer la surface de la grille qui a pour rôle d'éliminer les déchets solides relativement volumineux. La formule est donnée par KIRSCHMER :

$$S = \frac{Q_e}{c v_e a} \quad (\text{IV-3})$$

- Q_e : débit maximal à travers la grille (m³/s)
- a : Coefficient de passage libre donné par la relation

$$a = \frac{\text{diamètre des barreaux}}{\text{diamètre des barreaux} + \text{espacement entre les barreaux}} \quad (\text{IV-4})$$

V_e = Vitesse de l'écoulement à travers la grille (m/s),

Sa valeur est comprise en générale entre 0,50 m/s et 1 m/s. Cette vitesse peut atteindre 1 à 1,20 m/s au débit maximal.

C : Coefficient de colmatage dépendant de la qualité de l'eau et du système de reprise des résidus.

Généralement : $0.1 < C < 0.3$ pour une grille manuelle. $0.4 < C < 0.5$ pour une grille automatique

Tableau IV.4 : Les espacement et épaisseurs des barreaux.

Paramètres	Grilles grossières	Grilles fines
d (cm)	2,00	1,00
e (cm)	5 à 10	0,3 à 1

Les données :

- $Q_e = 18000 \text{ (m}^3\text{/h)} = 5 \text{ (m}^3\text{/s)}$
- $V_e = 1.1 \text{ (m/s)}$
- $C = 0.1$ cm pour une grille manuelle
- $d = 2$ cm pour grilles grossières
- $e = 5$ cm pour grilles grossières

$$S = 31 \text{ m}^2$$

La largeur de dégrilleur :

$$L = N_e * e + N_b * b \quad (\text{IV-5})$$

- Nb : Nombre des barreaux
- Ne : Nombre d'espacement $N_e = N_b + 1$
- e : espacement entre les barreaux (m)
- b : diamètre des barreaux (m)

$$L = \frac{S}{H} \quad (\text{IV-6})$$

- On prend $L = 3 \text{ m}$

Calcul de nombre de barreaux :

$$N_e = N_b + 1$$

$$L = N_e * e + N_b * b$$

$$L = (N_b + 1) * e + N_b * d$$

$$N_b = 43$$

Le dégrilleur avec une surface de 31 mètres carrés et 44 barreaux est conçu pour capturer une grande quantité de débris solides dans les eaux usées. Sa grande surface de filtration réduit le colmatage et permet un traitement continu. Les 44 barreaux, disposés régulièrement, retiennent les particules tout en permettant le passage de l'eau, améliorant ainsi l'efficacité du traitement.



Figure IV. 1 : Le dégrilleur

- **Perte de charge**

Les pertes de charges à travers la grille sont données par l'équation de Kirschmer :

$$\Delta H = \beta \left(\frac{d}{e} \right)^{\frac{4}{3}} \sin \theta \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{IV-7})$$

- d : diamètre des barreaux (m)
- e : espacement entre les barreaux (m)
- θ : angle d'inclinaison de la grille par rapport à l'horizontal
- β : coefficient qui tient compte de la forme des barreaux

Les valeurs de β sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : les valeurs de beta pour chaque type de barreau

Type de barreau	β
Section rectangulaire	2.42
Section rectangulaire en semi-circulaire à l'amont	1.83
Section rectangulaire avec arrondi semi-circulaire à l'amont et à l'aval	1.67
Section circulaire	1.79
Section ovoïde avec une grande largeur à l'amont	0.76

Donc on trouve :

$$\Delta H = 0.043 \text{ m} = 43 \text{ mm}$$

b) Filtration a lite :

J'ai récemment proposé de remplacer le matériau de filtration traditionnel, le sable, par de la litière dans nos systèmes de filtration. Cette proposition vise à faciliter plusieurs aspects du prétraitement. En effet, le remplacement par de la litière offre plusieurs avantages pratiques. Premièrement, la litière est plus facile à manipuler et à mettre en place que le sable, ce qui réduit le temps et les efforts nécessaires pour entretenir et remplacer le matériau de filtration. Deuxièmement, la litière peut être plus efficace pour piéger les particules indésirables et réduire la turbidité de l'eau, améliorant ainsi la qualité de l'eau traitée. Enfin, la litière peut également être moins coûteuse que le sable, ce qui pourrait représenter des économies à long terme pour notre installation. En résumé, ce changement de matériau de filtration offre une solution plus pratique, efficace et économique pour notre processus de prétraitement.

- **Le but d'utilisation de la filtration à lite :**

Au cours des années récentes, les côtes algériennes ont connu une série d'épisodes de fortes précipitations, entraînant un niveau élevé de matières en suspension dans les eaux côtières. Principalement d'origine minérale, ces matières en suspension posent des défis pour la production d'eau potable et entraînent une hausse des coûts d'exploitation.

L'utilisation de Filtre à lite en remplacement du sable présente un scénario extrêmement compétitif. En effet, cette substitution permet de réduire les pertes de production causées par les rétro lavages fréquents, de diminuer la consommation d'eau nécessaire à ces rétro lavages, et d'optimiser les coûts d'exploitation, notamment en énergie, en cartouches et en nettoyage chimique



Figure IV. 2 : La matière de la lite

1) Fonction et description du système :

Le système de filtration à lite fait partie du prétraitement de l'eau de mer avant sa désalinisation dans les modules d'osmose inverse. Il est constitué de deux trains de 50 % de capacité dans lesquels les 24 filtres de chaque train sont disposés symétriquement par rapport aux collecteurs d'entrée et de sortie. Fonctionnellement, ils sont regroupés par paires de filtres qui fonctionnent comme un seul équipement, avec des collecteurs et des vannes communes



Figure IV. 3 : les ballons de filtration (arrivé et la sortie de l'eau)

2) Pression et Température de conception :

La pression de conception des filtres à sable est la même que celle du collecteur d'entrée d'eau de mer

Leur température de conception a été établie comme étant la température ambiante maximale

La pression et la température de conception des lignes du système sont les mêmes que celles des collecteurs auxquels elles se raccordent.

3) Caractéristiques du lit filtrant (lite)

Fabriqué spécifiquement pour les usines de traitement d'eau potable et pour les systèmes de prétraitement dans les installations de dessalement, Filtre a lite Pure est un filtre bicouche qui offre la possibilité de remplacer aisément le sable dans les filtres ouverts ou sous pression, sans nécessiter de modifications des équipements existants.

Il se compose de deux produits Filtre a lite Pure de masse volumique et de diamètre différentes, afin d'améliorer l'efficacité d'élimination des particules, d'augmenter les cycles des filtres et la capacité de production (débit)

On a prévu une hauteur totale du lit filtrant de 1300 mm

Tableau IV.6 : Les caractéristique du matériau (lite)

	La masse volumique (kg /m ³)	Granulométrie (mm)
Couche Supérieure	1000-1200	1.5-2.5
Couche inférieure	1500-1700	0.8-1.6

Les données de calcul :

- Diamètre du ballon : 3,7 m
- Longueur cylindrique du ballon : 11 m
- Capacité de filtration : 375 (m³/h)
- Nombre des filtres : 48
- Pression à l'entrée : 5 bar

a) Calcule du filtre a lite :

La Surface de la filtration :

$$S = (\text{Hauteur} * \text{Diamètre}) + 2m^2 \tag{IV-8}$$

$$S = 42.7 \text{ m}^2$$

La surface totale de la filtration :

$$S_t = S * \text{Nbr (unités)}$$

$$S_t = 2050 \text{ m}^2$$

Calcule le taux de filtration :

$$V = \frac{Q}{S} \tag{IV-9}$$

$$V = 8.8 \text{ (m/h)}$$

Pour une demande de 17996 m³/h (375 m³/h-filtre) et avec tous les filtres en fonctionnement, la vitesse de passage est de 8.8 m/h.

b) Calcule les diamètres des conduites (filtre a lite)

Le diamètre du tuyau sera calculé en fonction du débit de processus et de la vitesse maximale autorisée

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

- d = diamètre intérieur du tuyau (m)
- Q = débit de processus (m³/h)
- v = vitesse du fluide (m/h)

Tableau IV.7 : les diamètres des conduites filtration a lite

Débit	(m ³ /h)	18000	9000	4500	1500	750	375
La vitesse Maximale	(m/s)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
La vitesse de calcul (Corrigé)	(m/s)	1.96	1.88	1.96	1.47	1.66	1.47
Diamètre Intérieure	m	1800	1300	0.900	0.600	0.400	0.300

- Si on mesure la pression en aval on remarque qu'il ya une perde de charge ΔH=0.4 bar

c) Le déplacement des grains :

Dans le contexte d'une station de dessalement, la filtration à sable est essentielle pour éliminer les impuretés de l'eau de mer. Cependant, la pression de l'eau peut poser des problèmes. Elle peut déplacer les grains de sable, compromettant ainsi la filtration, et causer une compaction excessive du lit de sable, réduisant son efficacité. De plus, cette pression peut endommager les équipements. Pour contrer ces problèmes, il est nécessaire de concevoir des systèmes de filtration résistants à la pression et de mettre en place des mesures de surveillance pour détecter et résoudre les problèmes rapidement.

• Résoudre ce problème :

L'utilisation d'un demi-tuyau comme canal pour la circulation de l'eau dans un système de filtration à sable offre plusieurs avantages, notamment une distribution uniforme de l'eau sur toute la surface du lit de sable et une réduction des perturbations dans le flux. Cependant, ce système peut également présenter des défis, notamment le risque de déplacement des grains de sable sous l'effet de la pression de l'eau.

Pour résoudre ce problème, il est crucial de renforcer les supports maintenant le demi-tuyau en place. Ces supports doivent être conçus et installés de manière à garantir une stabilité optimale, même sous l'effet de pressions élevées. Cela peut nécessiter l'utilisation de matériaux robustes, tels que l'acier inoxydable ou l'aluminium, ainsi que des techniques d'installation appropriées pour assurer une fixation solide.

En parallèle, il est important de surveiller régulièrement le système pour détecter tout signe de déplacement des grains de sable. Cela peut être réalisé à l'aide de capteurs de pression placés à différents points du système, ainsi que par une inspection visuelle des supports et du demi-tuyau lui-même. En détectant les problèmes dès leur apparition, il est possible d'intervenir rapidement pour éviter toute perturbation du processus de filtration.

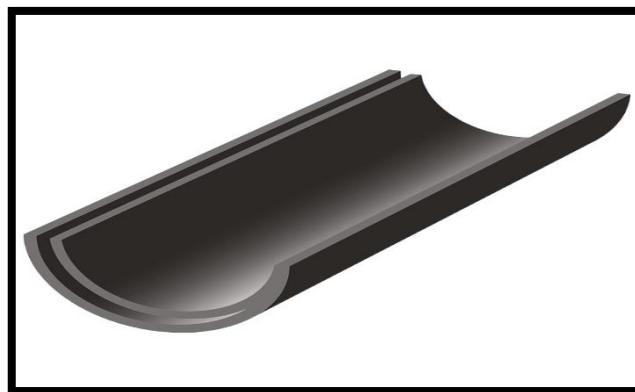


Figure IV.4 : Demi tuyau pour la circulation d'eau comme un canal

d) Lavage de filtre :

Pour rendre le lavage plus efficace, on introduit de l'air ascendant avant la troisième étape de lavage (lavage à la saumure). L'air provoque un frottement entre les grains de sable avec détachement des solides pour faciliter leur élimination à l'eau.

Le lavage à la saumure consiste à faire passer de la saumure avant le rejeter (venant du bassin) à contre-courant par le lit filtrant, dans le sens ascendant, ce qui permet non seulement d'éliminer les solides retenus au cours du filtrage mais aussi d'aérer le lit filtrant et de prévenir la formation de voies préférentielles lors des cycles ultérieurs, ce qui provoquerait une baisse de la qualité de l'eau filtrée.

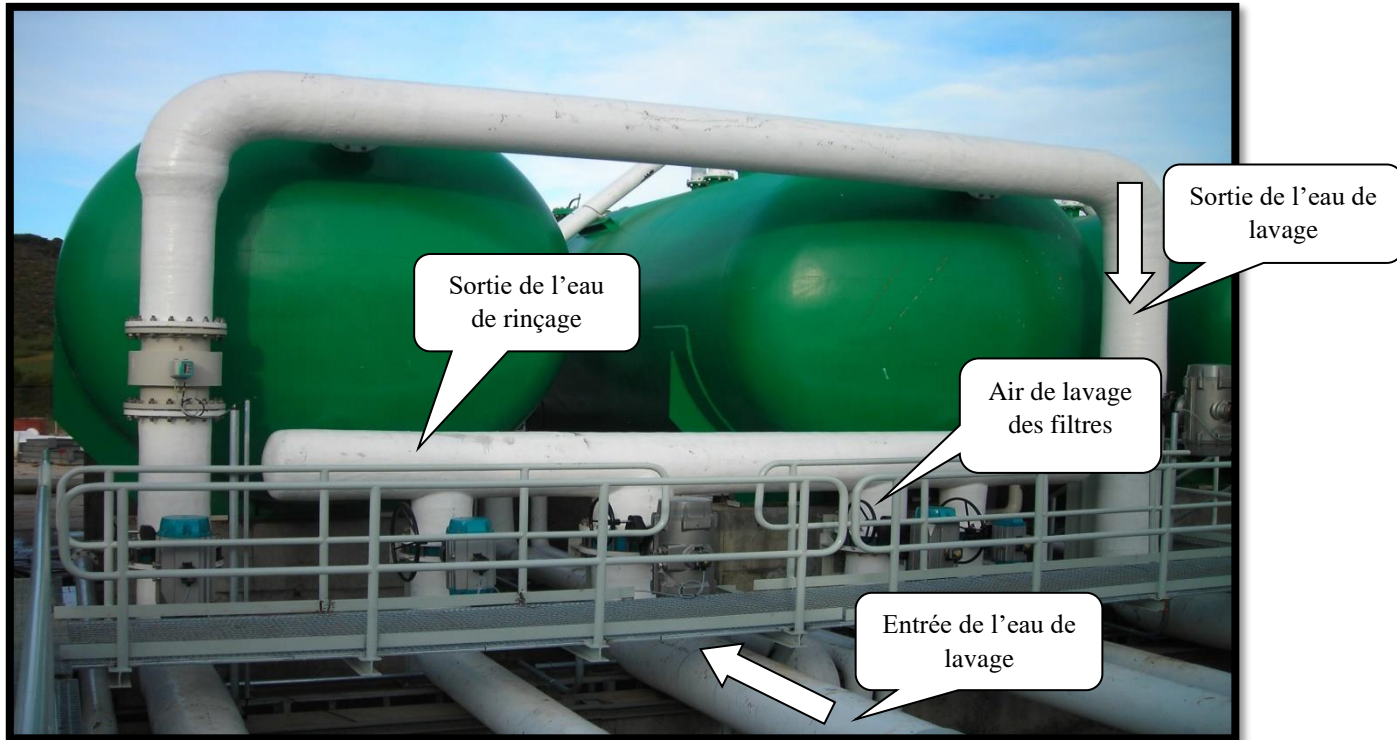


Figure IV.5 : les ballons de filtration (lavage des filtres)

b) Filtration a anthracite :

1) Fonction et description du système :

Le système de filtration à l'anthracite et de lavage des filtres fait partie du prétraitement de l'eau de mer avant sa désalinisation dans les modules d'osmose inverse. Il est constitué de deux trains de 50% de capacité, dans lesquels sont disposés un total de 28 filtres (14 filtres dans chaque train). Fonctionnellement, ils sont regroupés par paires de filtres qui fonctionnent comme une seule unité, avec des collecteurs et des vannes communes

Le sous-système de lavage des filtres est commun au lavage des filtres à lite et à l'anthracite et est constitué par le bassin d'eau saumâtre, trois pompes de lavage, trois soufflantes et les collecteurs et instruments associés.

2) Pression et température de conception :

La pression de conception des filtres à l'anthracite est la même que celle du collecteur d'entrée d'eau de mer.

Leur température de conception a été établie comme étant la température ambiante maximale.

La pression et la température de conception des lignes du système sont les mêmes que celles des collecteurs auxquels elles sont connectées.

Le matériau de toutes les lignes du système est PRFV, à l'exception des lignes de prélèvement d'échantillons qui sont en polypropylène.

3) Caractéristiques du lit filtrant (anthracite) :

On a prévu une hauteur totale du lit filtrant de 1000 mm

La granulométrie de l'anthracite et les dimensions des rainures des buselures empêchent toute fuite du matériau filtrant.

L'anthracite utilisée présente les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.8 : Les caractéristiques de l'anthracite

Taux de charbon (%)	> 90
Taille effective (mm)	1,2
Coefficient d'uniformité	1,4
Densité réelle (kg/m ³)	1400
Densité apparente (kg/m ³)	1050 (préliminaire)
Grosseur du pas de grain (microns)	186

Les données de calcul :

- Diamètre du ballon : 3,7 m
- Longueur cylindrique du ballon : 11 m
- Capacité de filtration : 643 (m³/h)
- Nombre des filtres : 28
- Pression à l'entrée : 4.5 bar

a) Calcul du filtre a anthracite :

La Surface de la filtration :

$$S = (\text{Hauteur} * \text{Diamètre}) + 2m^2$$

$$S = 42.7 \text{ m}^2$$

La surface totale de la filtration :

$$S_t = S * \text{Nbr (unités)}$$

$$S_t = 1195 \text{ m}^2$$

Calcule le taux de filtration :

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

$$V = 15.5 \text{ (m/h)}$$

Pour une demande de 17996 m³/h (643 m³/h·filtre) et avec tous les filtres en fonctionnement, la vitesse de passage est de 15.1 m/h.

b) Calcule les diamètres des conduites (filtre a anthracite) :

On garde la même formule :

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Tableau IV.9 : les diamètres des conduites filtration a anthracite

Débit	(m ³ /h)	9000	5124.9	3857.1	2571.5	1285.7	643
La vitesse Maximale	(m/s)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
La vitesse de calcul (Corrigé)	(m/s)	1.88	2.23	1.68	1.86	1.66	1.47
Diamètre Intérieure	m	1300	0.900	0.900	0.700	0.500	0.350

c) Lavage de filtre :

Le compartiment I du bassin à saumure doit être à son niveau normal pour pouvoir commencer le lavage des filtres. Si ce prérequis n'est pas assuré, le compartiment I doit être rempli d'eau de mer.

C'est seulement le cas où les filtres soit lite ou anthracite seraient lavés à l'eau de mer et non à la saumure.

c) Filtre a cartouche (c)

1) Le rôle de la microfiltration :

Le rôle de la microfiltration, via l'utilisation de filtres à cartouches, dans le dessalement des eaux usées est crucial. Ces filtres éliminent les particules et les impuretés présentes dans l'eau, protégeant ainsi les équipements de dessalement tels que les membranes d'osmose inverse contre l'encrassement et les dommages. Cela améliore l'efficacité du processus de dessalement en produisant une eau de meilleure qualité et réduit le risque de contamination des produits finaux. En résumé, la microfiltration contribue à produire une eau désalinisée de haute qualité et prolonge la durée de vie des équipements, tout en améliorant l'efficacité globale du processus de dessalement des eaux usées.

2) Fonction et description du système :

Le système de filtration à cartouches fait partie du prétraitement de l'eau de mer avant son dessalement dans les modules d'osmose inverse. L'objectif de ce système est d'effectuer une filtration de sécurité pour retenir les particules de taille inférieure qui pourraient endommager les équipements du système.

3) Pression et température de conception :

La pression et la température de conception des filtres à cartouche sont les mêmes que celles du collecteur d'entrée d'eau de mer.

La pression et la température de conception des lignes du système sont les mêmes que celles des collecteurs auxquels elles sont connectées.

Le matériau de toutes les lignes du système est PRFV, à l'exception des lignes de prélèvement d'échantillons qui sont en polypropylène.



Figure IV.6 : Les filtres à cartouche

1) Précautions pour l'installation :

Pour éviter que les modes opératoires, techniques d'exploitation ou états du système puissent endommager les équipements du système ou de l'installation, il faut vérifier que :

- ✚ Les raccords mécaniques sont en bon état
- ✚ Les vannes d'isolement fonctionnent correctement
- ✚ La plaque-support est en parfait état
- ✚ Toutes les cartouches sont correctement installées dans chaque filtre
- ✚ Les événements et purges du système ne sont pas obstrués
- ✚ Les disques de rupture sont correctement installés
- ✚ Les équipements sont parfaitement équilibrés pour éviter d'éventuelles irrégularités pendant la filtration

- ✚ L'instrumentation est opérationnelle
- ✚ Le système de protection contre les incendies est opérationnel

Les cartouches filtrantes sont surtout fabriquées en polypropylène en raison de sa faible absorption d'eau. La densité de celui-ci est très basse, entre 0.90 et 0.93 gr/cm³, ce qui permet aux cartouches d'être très légères. D'autre part, il s'agit d'un matériau facilement recyclable, aspect qu'il est important de prendre en compte étant donné que les cartouches des filtres doivent être remplacées régulièrement



Figure IV.7 : Le remplissage d'une cartouche

Une cartouche de microfiltration est définie par deux caractéristiques principales :

Son seuil de rétention, indiqué en micromètres (μm), qui représente la taille minimale des particules que la cartouche est capable de retenir.

Son efficacité pour ce seuil de rétention spécifique. Cette efficacité est exprimée en pourcentage de particules retenues par rapport au nombre total de particules présentes dans le flux à filtrer

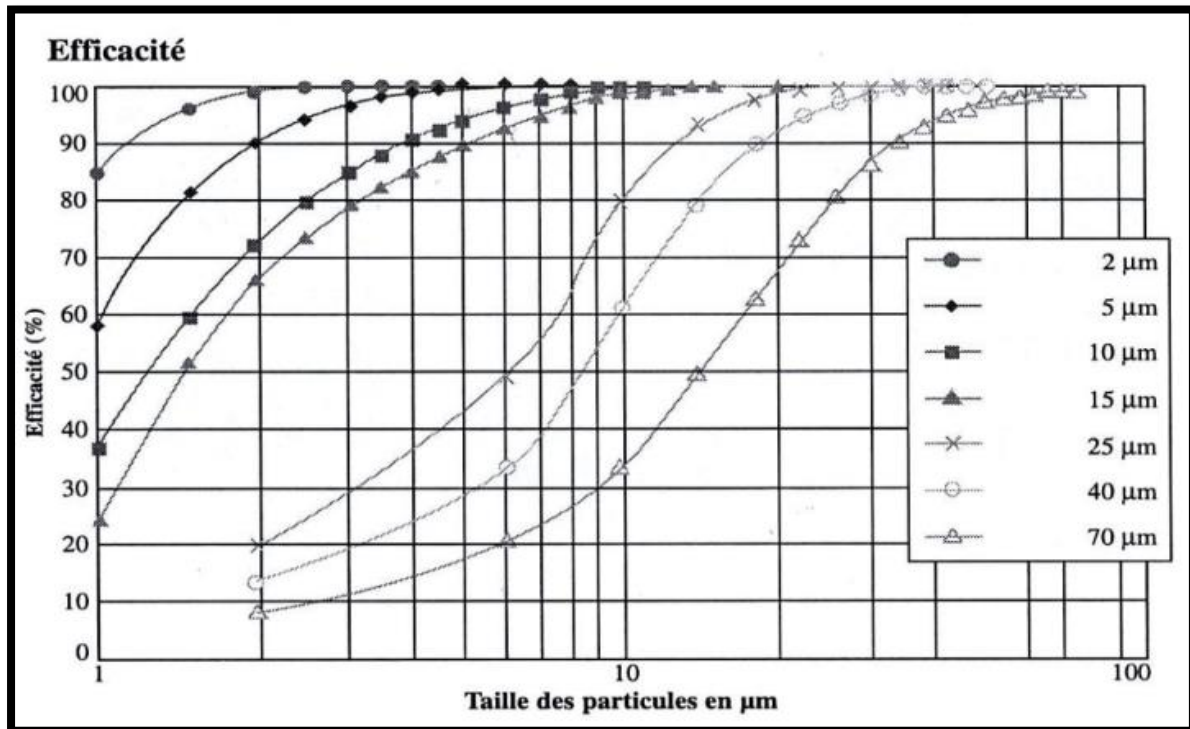


Figure IV.8 : Courbes d'évolution de l'efficacité en fonction de la taille [9].

Pour assurer une protection optimale des membranes d'osmose inverse, il est recommandé de sélectionner une cartouche de microfiltration avec un seuil de rétention de 5 micromètres (μm) et une efficacité de filtration de 99,9 %. Cela signifie que la cartouche est capable de retenir efficacement 99,9 % des particules de 5 μm ou plus dans le flux à filtrer, fournissant ainsi une barrière efficace contre les contaminants de cette taille susceptibles d'endommager les membranes d'osmose inverse.

Les données de calcul :

- Diamètre du cartouche : 1270 mm
- Longitude du cartouche : 61 mm
- Débit pour chaque filtre : 900 (m^3/h)
- Perte de charge : 1bar
- Vitesse de filtration : 4.18 (m/h)
- Seuil de rétention : 5 μm
- Capacité de filtration : 99%

2) Calcul du filtre a cartouche :

La surface de chaque cartouche

$$S = \text{diamètre} * \text{longitude} \quad (\text{IV-10})$$

$$S = 1.270 * 61$$

$$S = 0.78 \text{m}^2$$

Calcule le nombre des cartouches pour chaque filtre

$$N = \frac{Q}{V \cdot S} \quad (\text{IV-11})$$

$$N = \frac{900}{4.2 \cdot 0.78}$$

$$N = 274.72$$

Donc on prend chaque filtre contient 280 cartouches type PP-5

Calcule la surface totale des cartouches par un seul filtre :

$$S_t = S \cdot N \quad (\text{IV-13})$$

$$S_t = 0.78 \cdot 280$$

$$S_t = 215.3 \text{ m}^2$$

Calcule la vitesse adoptée :

$$V = \frac{Q}{S_t} \quad (\text{IV-14})$$

$$V = \frac{900}{215.3}$$

$$V = 4.18 \text{ (m/h)}$$

3) Description :

Le système de filtration par cartouches se situe à l'intérieur du bâtiment de production, dans sa zone nord. Il est constitué de deux lignes de filtration formées de dix (10) filtres chacune. Par conséquent, le système dispose en tout de vingt (20) filtres.

En règle générale, les filtres doivent retenir des particules solides d'une taille microscopique et il est nécessaire pour l'installation d'osmose inverse qu'il n'existe pas de solides supérieurs à 5 μm nominaux

Ce sont les systèmes les plus économiques quant à l'investissement initial. Ce sont également les plus simples à installer et à manier mais leur rentabilité économique et opérationnelle à moyen et long terme est fonction de la quantité de particules solides devant être retenues. En effet, les cartouches ont une capacité limitée de rétention et, une fois que celle-ci a été atteinte, les cartouches doivent être remplacées.

En amont des filtres à cartouche, on dose de l'anti-incrustant dans le système de captage et de pompage d'eau de mer pour éviter la précipitation de sels, ainsi que du bisulfite de sodium pour éliminer le chlore résiduel de l'injection d'hypochlorite de sodium qui est réalisée lors de la prise d'eau de mer pour désinfecter.

À l'issue de ce processus, un raccord de prélèvement d'échantillons est installé sur la ligne de sortie d'eau filtrée pour mesurer l'indice de colmatage SDI. À l'entrée et à la sortie de

chaque ligne, il y a une mesure de pression différentielle et un manomètre dans les collecteurs de sortie. Les manomètres et les collecteurs appartiennent au système de captage et de pompage

- **La perte de charge :**

La perte de charge par filtre est un élément crucial à prendre en compte dans le fonctionnement des cartouches filtrantes. Cette perte de charge est causée par le colmatage des particules dans les cartouches. Pour garantir leur efficacité et prolonger leur durée de vie, il est essentiel de limiter la perte de charge à 1 bar.

Cette valeur correspond à 76 % de la durée de vie maximale des cartouches, comme illustré dans la figure

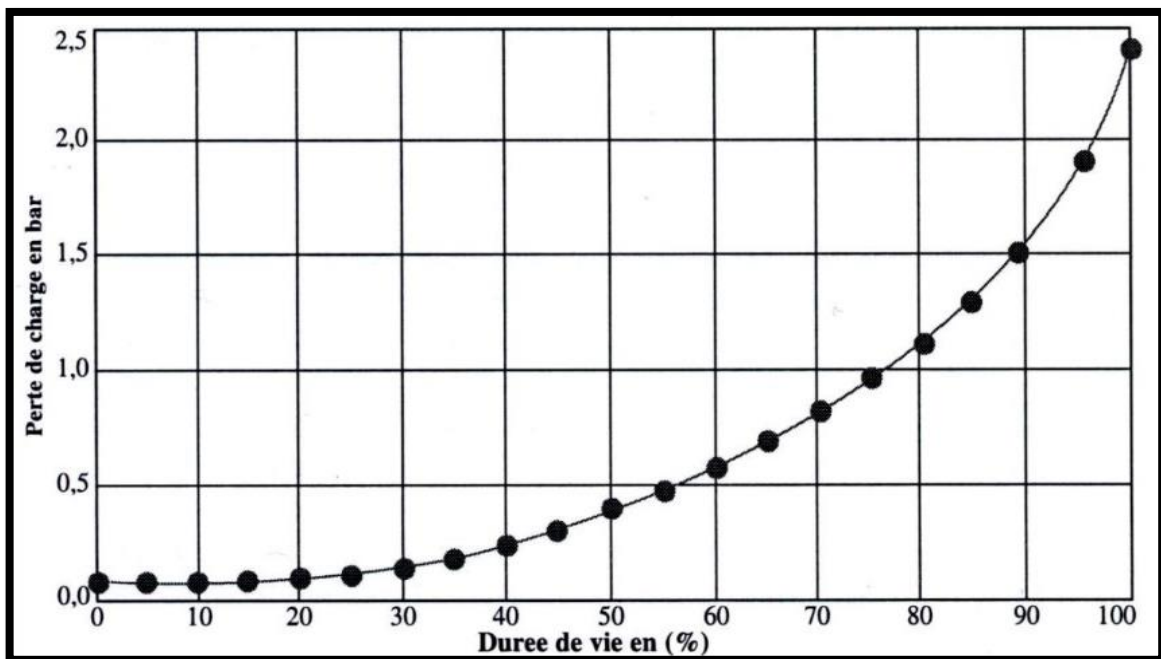


Figure IV.9 : perte de charge par rapport à la durée de vie [9].

Il est donc peu économique de dépasser une perte de charge de 1 bar. En effet, pendant les 24 % restants de la durée de vie des cartouches, augmenter la pression nécessaire au refoulement des pompes basse-pression entraîne une consommation accrue d'énergie électrique. De plus, il existe des risques de relargage de particules à prendre en compte.

d) La décantation lamellaire :

Dans notre station de dessalement située à Beni Saf, nous faisons face à des problèmes de turbidité élevée de l'eau de mer pendant la période hivernale. La turbidité peut parfois dépasser 50 mg/L et atteindre jusqu'à 100 mg/L. Cette situation entraîne l'arrêt complet de la station en raison du colmatage total des membranes et des pertes importantes dans le prétraitement, ce qui empêche l'eau traitée de répondre aux normes de qualité.

Pour remédier à ce problème, nous proposons d'ajouter un décanteur lamellaire en amont des filtres à sable dans la partie de captage. Le décanteur lamellaire permet de réduire efficacement la turbidité de l'eau en utilisant des modules lamellaires pour accélérer la séparation des particules en suspension. L'eau passe à travers ces modules, où les particules se déposent plus rapidement grâce à une surface de décantation augmentée. Cette solution devrait

diminuer la charge de turbidité sur les filtres à sable, réduisant ainsi le colmatage des membranes et améliorant la qualité de l'eau traitée.

Pour atteindre cet objectif, des lamelles, tubes ou structures hexagonales sont disposés selon un angle α par rapport à l'horizontale. Chaque élément agit comme un décanteur unitaire, augmentant ainsi la surface de décantation sans augmenter l'empreinte au sol. Cette configuration permet une sédimentation plus efficace des particules en suspension, améliorant ainsi la clarté de l'eau et réduisant les risques de colmatage en aval. En intégrant ces décanteurs lamellaires, nous pouvons traiter des volumes d'eau plus importants tout en maintenant une haute qualité de traitement, ce qui est essentiel pour la performance globale de la station de dessalement.

❖ Les différents types de décanteurs lamellaires

Il existe plusieurs types de décanteurs lamellaires :

- **À contre-courant** : L'alimentation se fait par le bas, et la circulation de l'eau s'effectue en sens inverse de la décantation de la boue.
- **À courant croisé** : L'eau et la boue circulent perpendiculairement. L'alimentation en eau flocculée se fait par le côté afin d'éviter la zone entre les plaques où l'eau remonte avec une vitesse opposée à la chute du floc.
- **À co-courant** : Dans ce cas, l'eau et la boue circulent dans le même sens, ce qui ne gêne pas la décantation.

Actuellement, la décantation à contre-courant est considérée comme le système le plus simple et le plus fiable par les constructeurs. En effet, les problèmes de reprise des eaux décantées en co-courant compliquent le système, et la décantation à flux croisés pose des problèmes d'équirépartition des flux hydrauliques.

Notre décanteur est divisé en trois compartiments :

- **1ère chambre** : L'eau brute entre dans cette chambre à faible débit, permettant ainsi le processus de coagulation-floculation. L'eau circule de bas en haut pour favoriser cette réaction.
- **2ème chambre** : Cette chambre est dédiée à la décantation. Elle retient les floccs (boue) formés dans la première chambre. L'eau partiellement décantée s'écoule ensuite vers la troisième chambre via un collecteur.
- **3ème chambre** : Ce compartiment sert à la fois de réservoir d'eau et de zone de finition de la décantation, assurant que l'eau est correctement clarifiée avant de poursuivre le processus de traitement.

A. Dimensionnement d'un décanteur lamellaire :

Paramètres caractéristiques d'un décanteur lamellaire

Deux caractéristiques fondamentales définissent les décanteurs lamellaires : l'espace inter-lamellaire et l'inclinaison des lamelles.

- L'espace inter-lamellaire « e » : C'est l'écartement orthogonal entre deux lamelles successives. Cet espace constitue un décanteur élémentaire ou un module lamellaire. Sa

valeur résulte d'un compromis entre la réduction de la hauteur de chute et la nécessité de ne pas trop rapprocher les lamelles pour éviter la remise en suspension des floccs déposés et les risques de bouchage.

- L'inclinaison des lamelles « α » : C'est l'angle formé par les lamelles avec l'horizontale. Sa valeur résulte d'un compromis entre la nécessité d'adopter une pente permettant l'évacuation facile des floccs déposés par écoulement gravitaire et le gain de performance qu'apporte une faible inclinaison.

Autres paramètres

Il existe également d'autres caractéristiques importantes :

- Largeur des lamelles : La valeur pratique se situe entre 1 et 1,25 mètre.
- Épaisseur : On cherche à avoir des épaisseurs les plus petits possibles, de l'ordre du millimètre voire moins.
- Forme : Initialement, des lamelles à profil plan étaient utilisées. Par la suite, différentes formes ont été conçues pour obtenir une surface de décantation plus importante, telles que les formes ondulées et hexagonales. La forme hexagonale est la plus utilisée car elle permet d'augmenter la surface de décantation tout en maintenant une surface au sol identique, rendant les ouvrages très compacts.

Le modèle de Hazen a été choisi pour sa simplicité et sa praticité. Ce modèle compare la vitesse de sédimentation des particules (V_s) à la charge hydraulique superficielle (V_h), qui est le rapport entre le débit (Q) et la surface de décantation (S). Bien que basé sur des hypothèses simples (à citer précédemment), il constitue une base solide pour le dimensionnement de tout type de décanteur. La relation idéale de décantation est donnée par :

$$V_s > V_h.$$

La vitesse de Hazen recommandée par le constructeur doit être inférieure à 0,6 m/h nous avons opté pour un décanteur lamellaire hexagonal de type contre-courant.

Les valeurs prise pour le dimensionnement :

- Largeur du décanteur : $l = 5000$ mm
- Longueur de décanteur : $L = 8500$ mm
- Hauteur des lamelles : $H = 500$ mm
- Séparation des lamelles : $e = 50$ mm
- Inclinaison des lamelles : $\alpha = 60^\circ$
- Longueur hexagone : $L_h = 70$ mm
- Hauteur hexagone : $H_h = 36$ mm
- Largeur hexagone : $l_h = 45$ mm
- Débit de filtration : $Q_f = 9000$ m³/h
- Le nombres de décanteurs utilisés : 2

Calcul du nombre de plaques :

$$N = \frac{L}{e * e} \quad (\text{IV-15})$$

$$N = \frac{8.5}{0.05 * 0.05}$$

$$N = 3400 \text{ Plaques}$$

Calcul de la largeur utile :

$$L_u = \frac{L * I_h}{L_h} \quad (\text{IV-16})$$

$$L_u = \frac{8.5 * 45}{70}$$

$$L_u = 5.4 \text{ m}$$

Calcul de la surface utile :

$$S_u = L_u * N * H \quad (\text{IV-17})$$

$$S_u = 5.4 * 3400 * 0.5$$

$$S_u = 9000 \text{ m}^2$$

Calcul de la surface totale projeté :

$$STP = S_u * \cos \alpha \quad (\text{IV-18})$$

$$STP = 9000 * 0.5$$

$$STP = 4000 \text{ m}^2$$

La surface moyenne d'un décanteur lamellaire est de 40 m² par m² d'emprise au sol. Ainsi, pour une emprise au sol totale de 4000 m², la taille effective du bassin sera de 100 m².

Il est essentiel de vérifier que la vitesse de Hazen est inférieure à 0,6 m/h.

$$V_{lim} = \frac{Q}{N * l * (L * \cos(\alpha) + e * \sin(\alpha))} \quad (\text{IV-19})$$

$$V_{lim} = \frac{9000}{3400 * 5 * (8.4 * \cos(60) + 0.05 * \sin(60))}$$

$$V_{lim} = 0.125 < 0.6$$

Donc la condition est vérifiée .

Remarque importante :

Nous avons installé des détecteurs de turbidité à la fois dans la tour de prise et dans la mer. nous allons intégrer un système automatique pour le décanteur, qui ne fonctionnera que lorsque la turbidité dépasse les normes établies. Cette approche permet d'optimiser l'efficacité du décanteur tout en réduisant les coûts énergétiques et d'entretien.

IV.3.2 Le prétraitement chimique :**a) Dimensionnement les réservoirs chimiques :****Hypochlorite de sodium**

L'hypochlorite de sodium est un élément essentiel dans une station de dessalement. Son rôle principal est la désinfection de l'eau brute, éliminant ainsi les micro-organismes potentiellement dangereux. De plus, il prévient la formation de biofilms dans les équipements de traitement, ce qui garantit leur bon fonctionnement. L'hypochlorite de sodium contrôle également la croissance microbienne dans les conduites et les réservoirs, assurant la qualité de l'eau traitée. Enfin, il aide à réduire la formation de chloramines, substances indésirables pouvant résulter de la désinfection. En somme, l'hypochlorite de sodium contribue à fournir une eau potable sûre et de qualité dans le processus de dessalement.

On a un 2 réservoirs cylindrique d'hypochlorite de sodium

Calcule le débit de drossage :

$$\text{Débit drossage} = \frac{\text{Dose de produit} \cdot \text{Débit}}{\text{Masse Volumique} \cdot 1000 \cdot \text{Concentration}} \quad (\text{IV-20})$$

- Concentration de dosage : 14 %
- Dose a utilisé : 3 ppm
- Masse volumique : 1.11 kg/l
- Débit d'écoulement : 18000 m³/h

$$\text{Débit drossage} = \frac{18000 \cdot 3}{1.11 \cdot 1000 \cdot 0.14}$$

$$\text{Débit drossage} = \mathbf{324 \text{ l/h}}$$

On a un 2 réservoirs cylindrique d'hypochlorite de sodium avec les dimensions suivant :

- Diamètre : 4 m
- Hauteur : 10 m

Le volume de réservoir :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \quad (\text{IV-21})$$

$$V = \frac{\pi \cdot (4)^2}{4} \cdot 10$$

$$V = 125 \text{ m}^3$$



Figure IV.10 : Les réservoirs hypochlorite de sodium

Réservoir anti coup bélier :

Le réservoir anti-coup de bélier dans une station de dessalement joue un rôle crucial en réduisant

les surpressions causées par la fermeture brutale des vannes. En absorbant ces pics de pression, il protège les équipements sensibles tels que les membranes d'osmose inverse et stabilise le système hydraulique. De plus, il prévient les fuites et les ruptures des tuyaux et des équipements en dissipant progressivement les fluctuations de pression.

En résumé, le réservoir anti-coup de bélier garantit le bon fonctionnement, la durabilité et la fiabilité de la station de dessalement d'eau de mer.



Figure IV.11 : le réservoir anti coup bélier

Réservoir acide sulfurique :

L'acide sulfurique joue un rôle crucial dans les stations de dessalement en neutralisant les bicarbonates présents dans l'eau de mer brute. Cette neutralisation empêche l'obstruction des membranes d'osmose inverse, essentielles pour le processus de dessalement. En ajustant le pH de l'eau à un niveau optimal, généralement bas, l'acide sulfurique réduit la formation de dépôts minéraux et prolonge la durée de vie des membranes. De plus, il élimine les carbonates et les sulfates de calcium, prévenant ainsi l'entartrage des équipements. En somme, l'acide sulfurique garantit une production d'eau potable efficace et de haute qualité, tout en optimisant la performance et la durabilité des installations de dessalement.

Calcule le débit de drossage :

$$\text{Débit drossage} = \frac{\text{Dose de produit} \cdot \text{Débit}}{\text{Masse Volumique} \cdot 1000 \cdot \text{Concentration}} \quad (\text{IV-22})$$

- Concentration de dosage : 98 %
- Dose a utilisé : 6.5 ppm
- Masse volumique : 1.84 kg/l
- Débit d'écoulement : 18000 m³/h

$$\text{Débit drossage} = \frac{18000 \cdot 6.5}{1.84 \cdot 1000 \cdot 0.98}$$

$$\text{Débit drossage} = 65 \text{ l/h}$$

On a un 2 réservoirs cylindrique acide sulfurique avec les dimensions suivant :

- Diamètre : 3 m
- Hauteur : 9 m

Le volume de réservoir :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \quad (\text{IV-23})$$

$$V = \frac{\pi * (3)^2}{4} \cdot 9$$

$$V = 64 \text{ m}^3$$



Figure IV.12 : Les réservoir acide sulfurique

IV.4 Osmose inverse :

IV.4.1 Fonctionnement de la membrane :

Le bon fonctionnement de la membrane est essentiel pour l'osmose inverse. En plus d'avoir une membrane de qualité et un module adapté, il est impératif de mettre en œuvre la technologie disponible et de choisir les conditions de fonctionnement appropriées, telles que la pression, la vitesse et la température. Ces facteurs sont d'une importance cruciale pour maintenir les performances du système aussi constantes que possible sur le long terme, en assurant une perméabilité maximale et une sélectivité conforme aux exigences désirées.

IV.4.2 Calcul de la pression osmotique :

Le calcul de la pression osmotique est réalisé à l'aide de la loi de Van't Hoff, qui stipule que la pression osmotique d'un soluté équivaut à la pression qu'il exercerait dans un gaz parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). La pression osmotique d'une solution est directement proportionnelle à la concentration de solutés.

$$\pi = I * C * R * T \quad \text{(IV-24)}$$

Avec :

PO : Pression osmotique (bar)

I : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : Concentration molaire (mol.L⁻¹)

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

T : Température absolue (K) on prend 25°C ; donc T = 273,15 + 25.

Pour les eaux de mer C_{NaCl} = 36 (g/l)

La masse molaire M_{NaCl} = 58.44 (mol/l)

$$\pi = 2 * (36 / 58.44) * 0.082 * 298.15$$

$$\pi = 30.12 \text{ bar}$$

Cette valeur de pression osmotique est approximative en raison de la présence d'autres ions que l'on trouve dans l'eau de mer, lesquels sont négligés

IV.4.3 Les principaux procédés d'osmose inverse :

A. Aspects techniques :

La pression de fonctionnement doit être nécessairement supérieure à la pression osmotique, établie à 30 bars pour une solution de NaCl à 36 g/l.

La sélectivité d'une membrane d'osmose inverse croît avec la pression, permettant ainsi de choisir la pression en fonction de la sélectivité désirée pour la membrane.

Pour une vitesse de circulation donnée, il existe une pression maximale où le flux de perméat cesse d'augmenter en raison du phénomène de polarisation de concentration. Il est crucial de connaître cette limite pour maintenir une marge de sécurité.

Des problèmes de tenue mécanique peuvent survenir lorsque la pression dépasse un certain seuil, affectant les membranes et les modules. Actuellement, la pression maximale se situe généralement entre 60 et 80 bars, avec une pression de fonctionnement de 65 bars pour cette étude.

B. Considérations économiques :

Le choix de la pression de fonctionnement doit être optimisé en tenant compte du compromis entre la consommation énergétique et le coût associé à la surface des membranes. Une augmentation de la pression entraîne une augmentation de la consommation d'énergie, mais réduit la surface de membrane requise pour une production donnée.

C. Choix de la température :

Le choix de la température de fonctionnement est déterminé par plusieurs facteurs :

À pression égale, le compactage de la membrane est plus important à des températures plus élevées.

Le débit d'eau à travers la membrane augmente avec la température en raison de la diminution de la viscosité, généralement d'environ 3% par degré.

Par conséquent, il est possible de :

Augmenter la température en récupérant les calories disponibles.

Diminuer la pression de fonctionnement si la température est trop élevée pour compenser les effets néfastes sur le compactage de la membrane.

IV.4.4 Calcule le débit de production :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (\text{IV-25})$$

Débit d'alimentation : $Q_a = 425000 \text{ (m}^3\text{/j)}$

Facteur de conversion : $Y = 45\%$

Débit de production = débit d'alimentation \times le taux de conversion

$$Q_p = Q_a * Y$$

$$Q_p = 0.45 * 425000$$

$$Q_p = 200000 \text{ (m}^3\text{/j)}$$

IV.4.5 Calcule le débit de rejet :

Débit de rejet = débit d'alimentation – débit de production

$$Q_r = Q_a - Q_p \quad (\text{IV-26})$$

$$Q_r = 425000 - 200000$$

$$Q_r = 225000 \text{ (m}^3\text{/j)}$$

IV.4.6 Calcule la concentration des rejet (la saumure) :

Le taux de rejet de la membrane TR est entre 96 à 99 %.

On prend $TR = 98 \%$

La concentration d'alimentation : $C_a = 35 \text{ (g/l)}$

$$TR = 1 - \frac{c_p}{c_a} \quad (\text{IV-27})$$

$$C_P = (1 - TR) \times C_a$$

$$C_P = (1 - 0.98) \times 35$$

$$C_P = 0.7 \text{ (g/l)}$$

La loi de continuité de débit :

$$Q_a \times C_a = Q_P \times C_P + Q_R \times C_R$$

On tire la concentration des rejet :

$$Q_R \times C_R = Q_a \times C_a - Q_P \times C_P \quad (\text{IV-28})$$

$$C_R = (Q_a \times C_a - Q_P \times C_P) / Q_R$$

$$C_R = (425000 \times 35 - 200000 \times 0.7) / 225000$$

$$C_R = 67 \text{ (g/l)}$$

IV.5 Le système de reminéralisation :

Le processus de reminéralisation est essentiel en raison des effets de l'osmose inverse qui élimine plus d'ions divalents et trivalents que d'ions monovalents, ce qui conduit à un perméat d'osmose inverse très adouci. Cependant, cette eau adoucie peut présenter des risques pour la santé lorsqu'elle est utilisée comme eau potable.

Pour corriger cela, l'eau dessalée issue de l'osmose inverse doit être reminéralisée. Ce processus implique l'injection de gaz carbonique (CO_2) et d'oxyde de calcium (Ca(OH)_2). La réaction chimique qui en découle forme du bicarbonate de calcium ($\text{Ca(HCO}_3)_2$), préservant ainsi la dureté et l'alcalinité du produit final.

Parallèlement, de l'hypochlorite de sodium est ajouté comme agent désinfectant pour contrôler la croissance bactérienne dans l'eau reminéralisée.

Une fois reminéralisée et désinfectée, cette eau peut être utilisée en toute sécurité comme eau potable ainsi que pour les divers services domestiques

IV.6 Eau potable :

Le système d'approvisionnement en eau potable repose sur un réservoir qui est alimenté par un système spécialisé de reminéralisation de l'eau. Ce réservoir est conçu avec une sécurité accrue, doté de deux transmetteurs de niveau, chacun offrant une redondance pour garantir la fiabilité du système. Ces transmetteurs sont équipés d'un sélecteur de signal de sortie et d'un indicateur de niveau local pour une surveillance précise.

Pour distribuer l'eau potable, le système est équipé de 10 pompes fonctionnelles en permanence, tandis qu'un autre reste en mode d'attente pour assurer une disponibilité constante.

Cette disposition garantit une distribution efficace et régulière de l'eau potable tout en assurant une sécurité et une fiabilité maximales

IV.6.2 Contrôle de qualité :

Lorsque l'eau potable se trouve dans le dernier réservoir avant d'être pompée vers le réseau de distribution, il est impératif de mesurer certains paramètres de contrôle pour garantir sa qualité et sa sécurité. Ces paramètres incluent généralement la turbidité, le pH, la concentration en chlore et d'autres indicateurs de contamination potentielle. La mesure précise de ces paramètres est essentielle pour s'assurer que l'eau atteint les normes de potabilité requises et pour identifier tout problème éventuel dans le processus de traitement de l'eau. En effectuant ces contrôles de manière régulière et rigoureuse, les opérateurs peuvent garantir la fourniture d'une eau potable sûre et de haute qualité à tous les utilisateurs du réseau de distribution.

Tableau IV.10 : Les analyses pour contrôle qualité d'eau

Analyse effectuée	Unité	Qualité garantie
Ph		8 à 8.5
TDS	ppm	350
Alcalinité	ppm CaCo ₃	65
Indice de Langelier		0 à 0.4
Chlore résiduel	ppm	0.5
Dureté	ppm CaCo ₃	50 à 65
Bore		<1.3

IV.7 Conclusion :

Le dimensionnement de la chaîne de prétraitement de la station de dessalement a été optimisé en intégrant des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la qualité de l'eau produite. L'utilisation de la filtration à lit au lieu de la filtration à sable a permis de simplifier les opérations de nettoyage et d'assurer une meilleure qualité de l'eau. Cette approche a non seulement facilité l'entretien, mais a également contribué à la réduction des coûts opérationnels.

De plus, l'ajout de filtres à anthracite a été crucial pour éviter les chutes de pression lors des opérations de nettoyage, garantissant ainsi une circulation d'eau constante et efficace. La proposition de systèmes de demi-tuyaux pour la circulation de l'eau à l'intérieur des filtres a également été une innovation clé. Ce design a permis de créer un canal de circulation optimisé, réduisant les pertes de charge et améliorant le rendement global du système.

L'ajout d'un décanteur lamellaire a également été essentiel pour diminuer la turbidité dans les cas de leur augmentation, évitant ainsi les pertes des membranes et assurant une meilleure filtration

Ces solutions combinées ont permis d'assurer un bon fonctionnement de la chaîne de prétraitement, tout en améliorant significativement la qualité de l'eau produite. En conclusion, les choix technologiques et les innovations introduites dans cette étude démontrent une avancée notable dans le domaine du dessalement, offrant des perspectives prometteuses pour l'optimisation des stations de traitement de l'eau.

Chapitre V :
Comparaison entres les
types de prétraitement
(gravitaire et sous pression)

V.1 Introduction :

L'approvisionnement en eau potable est crucial en Algérie, nécessitant des systèmes de prétraitement efficaces. Deux méthodes principales sont utilisées : le système sous pression et le système gravitaire. Le système sous pression, utilisé dans notre station, emploie des pompes pour forcer l'eau à travers des filtres, offrant une filtration efficace mais coûteuse en énergie et maintenance. Le système gravitaire, utilisé dans des stations comme celle de Corso, utilise la gravité pour faire passer l'eau à travers des filtres, étant moins énergivore mais potentiellement moins efficace.

Ce chapitre compare ces deux systèmes en termes de performance, de coût et de durabilité, afin de fournir des recommandations pour l'optimisation des processus de prétraitement en Algérie.

V.2 Le prétraitement gravitaire :

V.2.1 Traitement préliminaire :

Le déroulement :

Dans la partie offshore, les deux systèmes suivent des principes similaires pour l'aspiration et la préfiltration. Les deux utilisent des conduites d'aspiration pour amener l'eau vers des bassins de captage, où des trémies et des dégrilleurs sont utilisés pour éliminer les particules grossières et les matières flottantes. Ces étapes initiales sont cruciales pour préparer l'eau à la filtration finale. Le dimensionnement des dégrilleurs passe également par les mêmes étapes dans les deux systèmes de prétraitement.

Cependant, la principale différence réside dans le mécanisme de filtration : le système sous pression utilise des pompes pour pousser l'eau à travers des filtres, tandis que le système gravitaire repose sur la gravité pour faire passer l'eau à travers les filtres. Cette différence fondamentale influence non seulement l'efficacité de la filtration, mais aussi les coûts d'énergie et de maintenance associés à chaque système.

V.2.2 Le traitement physicochimique :

L'objectif principal du prétraitement physico-chimique est de préparer l'eau brute pour maximiser l'efficacité des étapes ultérieures, comme la filtration, la désinfection, et le dessalement par osmose inverse.

Ce processus élimine les impuretés et les particules en suspension, améliorant ainsi la performance des équipements et prolongeant leur durée de vie. En réduisant les contaminants, il permet de diminuer les coûts d'exploitation en minimisant la maintenance et l'utilisation de produits chimiques. De plus, il garantit que l'eau traitée répond aux normes de qualité requises. Le prétraitement gravitaire inclut des bassins de coagulation et de floculation, où des coagulants sont ajoutés pour déstabiliser les particules, formant des flocons plus gros qui sont ensuite retirés par sédimentation ou filtration. Ce processus initial est crucial pour assurer une eau de qualité et un traitement efficace et durable.

V.2.3 Les bâches de coagulation

L'ajout de coagulant se fait avant les réservoirs de sédimentation de prétraitement, les unités de flottation à air dissous ou les filtres. Les coagulants couramment utilisés sont les sels ferriques, car les sels d'aluminium sont moins efficaces et peuvent causer des problèmes d'encrassement. La dose optimale de coagulant dépend du pH, de la température de l'eau et doit être déterminée par des tests sur site.

La coagulation est essentielle pour améliorer la filtration, surtout pour les eaux de haute turbidité ou riches en matière organique naturelle. Le processus de coagulation réduit la charge de surface des particules, facilitant leur agglomération et leur élimination. Pour les eaux de faible turbidité, une quantité minimale de coagulant est plus efficace, avec un temps de contact prolongé pour la coagulation et la floculation.

Les systèmes de conditionnement chimique de l'eau source pour accélérer la sédimentation et la filtration comprennent des systèmes d'alimentation en produits chimiques, des réservoirs de coagulation et des réservoirs de floculation. La conception de ces systèmes varie en fonction de la rapidité de la coagulation



Figure V-1 : Les mélangeurs dans le réservoir de coagulation

V.2.4 Les bâches de Floculation :

Les floculants (polymères) sont ajoutés aux coagulants pour améliorer le prétraitement de l'eau, mais une surdose peut entraîner un encrassement des membranes RO. Les usines de dessalement évitent souvent d'utiliser des polymères en raison des risques potentiels d'encrassement. Si des polymères sont utilisés, ils doivent être non ioniques ou anioniques pour

éviter les problèmes, car les polymères cationiques peuvent endommager les membranes. Les tests en laboratoire déterminent le type et le dosage optimal de floculant, et une attention particulière doit être portée à la température de l'eau et aux risques d'overdosing.

Les floculants ne doivent pas augmenter le carbone organique total (TOC) de l'eau de plus de 0,2 mg/L pour éviter des problèmes d'encrassement et de remplacement prématuré des filtres.

V.2.5 Décantation lamellaire :

La technologie de la décantation lamellaire a été développée en réponse à la nécessité de créer des décanteurs compacts capables de traiter des débits élevés. Pour atteindre cet objectif, des structures lamellaires, telles que des plaques inclinées, des tubes ou des éléments hexagonaux, sont disposées à un angle α par rapport à l'horizontale. Chaque composant agit comme une unité de décantation indépendante. La décantation représente la première étape possible dans le traitement primaire de l'eau. On distingue deux types principaux de décantation : la décantation simple, et la décantation physico-chimique, qui inclut l'ajout de coagulants et de floculants.

Il existe plusieurs variantes de décanteurs lamellaires :

- À contre-courant : L'eau est introduite par le bas, et elle circule en sens opposé à la descente des boues, favorisant ainsi une séparation efficace.
- À courant croisé : Dans ce système, l'eau et les boues se déplacent perpendiculairement l'une à l'autre. L'eau floculée est alimentée par le côté, évitant ainsi les zones entre les plaques où l'eau pourrait remonter en sens inverse à la chute des floes.
- À co-courant : Dans ce cas, l'eau et les boues se déplacent dans la même direction, sans interférer avec le processus de décantation.

De nos jours, le système de décantation à contre-courant est considéré comme le plus simple et le plus fiable, et il est souvent privilégié par les constructeurs. En effet, les problèmes complexes liés à la récupération des eaux décantées dans les systèmes à co-courant, ainsi que les difficultés d'une répartition hydraulique uniforme dans les systèmes à flux croisés, rendent ces derniers moins attractifs.

En ce qui concerne les principes fondamentaux de la décantation lamellaire, cette méthode vise à augmenter la surface de séparation entre l'eau et les boues au sein d'une même installation. L'ajout de faisceaux lamellaires (tubes ou plaques parallèles) dans la zone de décantation crée de nombreuses cellules de séparation. Pour permettre une évacuation efficace des boues, il est essentiel que les lamelles soient inclinées à un angle α par rapport à l'horizontale. Comparée à la décantation traditionnelle, cette technique permet une formation plus rapide des boues sur les surfaces inclinées des tubes ou des plaques, car les particules doivent parcourir une distance relativement courte pour s'y déposer. [37].

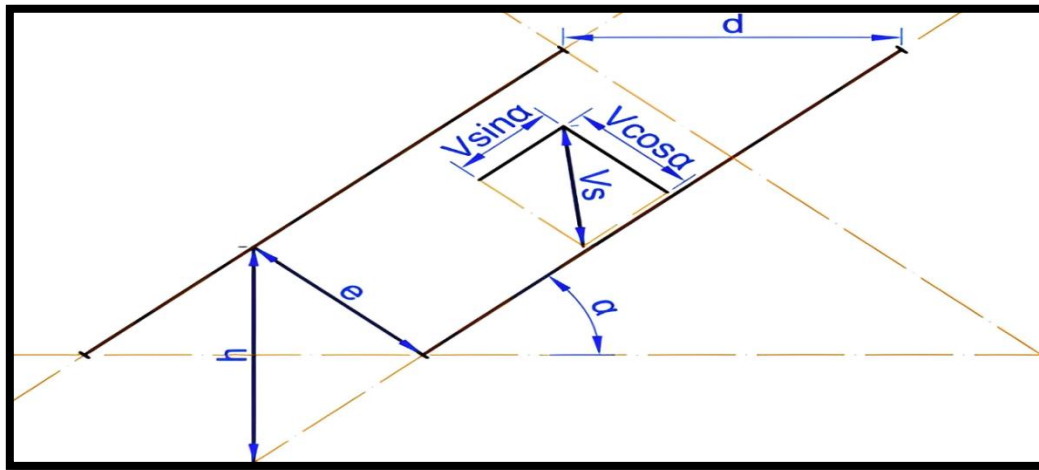


Figure V-2 : Principe générale de décanteur lamellaire

V.2.6 La filtration par média granulaire :

Dans cette étape, la différence principale entre les types de prétraitement réside dans la configuration des filtres. Le prétraitement gravitaire se distingue par sa capacité à intégrer plusieurs couches de matériaux filtrants, tels que le sable, l'antracite et le gravier, dans une seule et même cuve de filtration. Contrairement aux systèmes sous pression, où les filtres sont souvent séparés et traitent l'eau en plusieurs étapes distinctes, le prétraitement gravitaire permet à l'eau de passer successivement à travers ces différentes couches en une seule étape. Cette approche favorise une filtration progressive, où chaque couche de matériau joue un rôle spécifique dans la capture des impuretés. Par exemple, le sable élimine les particules plus grosses, tandis que l'antracite, grâce à sa structure plus fine, capture les particules plus petites et les matières organiques restantes. Cette configuration présente plusieurs avantages : elle optimise l'espace en réduisant le nombre de cuves nécessaires, simplifie la maintenance en centralisant le processus de filtration, et peut améliorer l'efficacité globale du traitement de l'eau en permettant un flux continu à travers des matériaux complémentaires. En somme, le prétraitement gravitaire est une solution compacte et efficace qui répond à divers besoins de purification tout en minimisant l'encombrement.

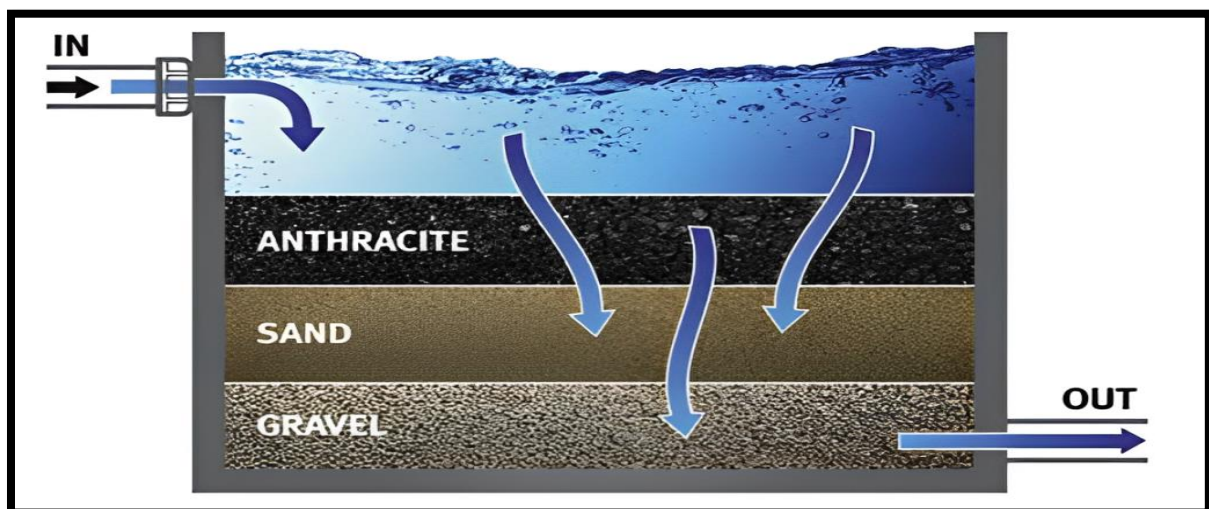


Figure V-3 : La filtration par média granulaire (multi couche)

V.2.7 La filtration à cartouche :

Dans les stations de dessalement qui utilisent un système de prétraitement gravitaire, l'intégration de la filtration à cartouche est non seulement bénéfique, mais souvent nécessaire pour assurer une performance optimale du processus global. Bien que le prétraitement gravitaire soit efficace pour éliminer une grande partie des impuretés, comme les particules en suspension, les matières organiques et autres contaminants, il ne garantit pas toujours la finesse de filtration requise pour protéger les membranes d'osmose inverse. C'est là que les filtres à cartouche interviennent. Placés en aval du prétraitement gravitaire, ces filtres agissent comme une barrière de sécurité supplémentaire, capturant les particules fines restantes qui pourraient encore être présentes dans l'eau. Leur rôle est essentiel pour prévenir l'encrassement des membranes, ce qui non seulement prolonge la durée de vie des équipements, mais aussi maintient l'efficacité du processus de dessalement. En filtrant les particules aussi petites que quelques microns, les filtres à cartouche contribuent à assurer que l'eau atteignant les membranes est de la plus haute pureté possible, minimisant ainsi les risques de détérioration des membranes et réduisant les coûts d'entretien. Par conséquent, même dans les systèmes dotés d'un prétraitement gravitaire robuste, la filtration à cartouche reste un élément clé pour garantir un fonctionnement sûr et efficace de la station de dessalement.

V.3 Etude Comparaison des Prétraitements (Gravitaire vs Pression) :

Pour réaliser une étude comparative entre les deux méthodes de prétraitement de l'eau, à savoir le système gravitaire et le système sous pression, il est essentiel de disposer des résultats de la qualité de l'eau traitée par une station utilisant le système gravitaire. Ces résultats permettront de les comparer avec ceux obtenus par notre propre station, qui fonctionne avec un système sous pression. Cette comparaison des données analytiques sur des paramètres comme la turbidité, la concentration en particules et la charge organique, est indispensable pour évaluer les performances respectives des deux systèmes et déterminer lequel offre une meilleure efficacité dans le contexte spécifique de notre étude.

Choix de la station :

Nous avons décidé de choisir la station du Hamma pour mener notre étude comparative. Ce choix est motivé par la nécessité d'analyser les performances du système de traitement gravitaire dans des conditions spécifiques, comparables à celles de notre station. En utilisant les données de Hamma, nous pourrions effectuer une évaluation rigoureuse et précise des deux méthodes de prétraitement, en tenant compte des similitudes en termes de qualité de l'eau brute et des conditions opérationnelles.

V.3.1 Efficacité de la filtration :

Les systèmes de prétraitement par filtration gravitaire et sous pression sont tous deux efficaces pour améliorer la qualité de l'eau avant le traitement par osmose inverse. La filtration gravitaire utilise la gravité pour faire passer l'eau à travers un médium filtrant, tandis que la filtration sous pression utilise une pompe pour forcer l'eau à travers le filtre. Les deux méthodes sont capables de réduire la turbidité et les matières en suspension, conformément aux normes d'eau potable. Cependant, le TDS (Total Dissolved Solids) n'est pas complètement éliminé par ces prétraitements, nécessitant une étape d'osmose inverse pour finaliser la purification de l'eau.

V.3.2 Efficacité de surface

Dans le domaine du traitement de l'eau, la comparaison entre les filtres gravitaires et les filtres sous pression révèle des différences significatives en termes d'efficacité de surface, qui influencent directement l'implantation des systèmes de filtration.

V.3.3 Filtres Gravitaires :

Les filtres gravitaires fonctionnent à une vitesse de filtration plus lente, nécessitant ainsi une surface beaucoup plus étendue pour traiter des volumes d'eau importants. Cette exigence en matière de surface se traduit par des dimensions d'ouvrage plus grandes, adaptées aux installations où l'espace disponible est suffisant. Leur principal avantage réside dans leur coût d'exploitation relativement faible, ce qui les rend économiquement avantageux pour des installations à grande échelle, particulièrement lorsque l'espace n'est pas une contrainte majeure.

V.3.4 Filtres Sous Pression :

À l'inverse, les filtres sous pression se caractérisent par une vitesse de filtration plus rapide, permettant une utilisation plus efficace de l'espace. Grâce à cette efficacité, les filtres sous pression peuvent être installés dans des espaces plus restreints tout en maintenant un débit de traitement élevé. Cette compacité en fait une solution adaptée aux environnements où l'espace est limité, bien que cela puisse entraîner des coûts d'installation et d'exploitation plus élevés.

En résumé, l'efficacité de surface des filtres gravitaires et sous pression varie en fonction de leur vitesse de filtration, influençant directement la taille des installations nécessaires. Les filtres gravitaires, bien que nécessitant plus d'espace, offrent une solution économique pour les grandes installations, tandis que les filtres sous pression optimisent l'utilisation de l'espace dans des contextes plus contraints.

V.3.5 Le Coût De Construction :

Le coût de construction des filtres gravitaires est généralement plus élevé que celui des filtres sous pression en raison de la nécessité de structures plus grandes et robustes pour soutenir le flux gravitaire. Ces filtres exigent des réservoirs volumineux et des fondations renforcées, entraînant des coûts pouvant être supérieurs de 20 % à 50 % par rapport aux filtres sous pression, avec un budget pouvant atteindre plusieurs millions d'euros pour des installations de grande taille. En revanche, les filtres sous pression, plus compacts et moins exigeants en matériaux, offrent une alternative plus économique, avec des économies potentielles de 20 % à 30 % sur les coûts de construction. De plus, leur installation rapide permet de réduire les frais liés au temps de construction, faisant des filtres sous pression une option avantageuse lorsque l'espace est limité et le budget contraint.

Pour illustrer la différence de coût de construction entre les filtres sous pression et les filtres gravitaires, prenons l'exemple de deux stations de traitement d'eau produisant le même débit de 200 000 m³/s

Station de Beni Saf Water Company SPA: Utilisant des filtres sous pression, cette station a un coût de construction de 15 000 000 dollars US. Grâce à l'efficacité et la compacité de ces filtres, la station a été construite avec des dépenses réduites en infrastructure et en matériaux.

Station de Hamma : Employant des filtres gravitaires, cette station a un coût de construction de 30 000 000 dollars US, soit le double de Beni Saf. Les coûts plus élevés sont dus aux structures plus grandes et robustes requises pour soutenir le flux gravitaire, y compris des réservoirs volumineux et des fondations renforcées.

V.3.6 Le Coût De La Consommation énergétique :

Station de Beni Saf Water Company SPA : Utilisant des filtres sous pression, cette station nécessite des pompes haute pression, entraînant une consommation énergétique continue plus élevée. Pour produire un mètre cube d'eau, la consommation est de 4,29 kilowattheures (kWh). Ce coût énergétique additionnel doit être pris en compte dans la gestion des coûts opérationnels pour garantir une exploitation durable.

Station de Hamma : Employant des filtres gravitaires, cette station est plus efficace en termes de consommation d'énergie. Une fois le pompage initial effectué, les filtres gravitaires nécessitent peu d'énergie supplémentaire pour maintenir le traitement de l'eau, ce qui se traduit par des coûts énergétiques significativement plus bas comparés aux filtres sous pression.

V.4 Conclusion :

En conclusion, l'étude comparative des systèmes de prétraitement par filtration gravitaire et sous pression montre que les deux méthodes sont efficaces pour améliorer la qualité de l'eau avant l'osmose inverse, mais présentent des différences notables. Les filtres gravitaires, bien que nécessitant plus d'espace et des coûts de construction plus élevés, offrent une solution économique pour les grandes installations grâce à leur faible coût d'exploitation. En revanche, les filtres sous pression, plus compacts et rapides, sont avantageux dans des environnements où l'espace est limité, malgré des coûts énergétiques plus élevés. Par exemple, la station de Beni Saf Water Company SPA, utilisant des filtres sous pression, a un coût de construction de 15 millions de dollars US et une consommation énergétique de 4,29 kWh par mètre cube d'eau, tandis que la station de Hamma, avec des filtres gravitaires, a un coût de construction de 30 millions de dollars US mais des coûts énergétiques plus bas. Cette analyse permet de choisir le système de prétraitement le plus adapté en fonction des contraintes spécifiques de chaque projet de dessalement.

Chapitre VI :
**Alimentation de la station
par l'énergie renouvelable**

VI.1 Introduction :

Ce chapitre examine les opportunités d'intégrer des sources d'énergie renouvelables dans l'alimentation en énergie de la station de dessalement des eaux de mer de Beni Saf, après une étude détaillée de sa consommation énergétique. Face au défi de l'efficacité énergétique et de la durabilité environnementale, cette approche propose d'utiliser l'énergie solaire, éolienne et marémotrice pour réduire l'empreinte carbone de l'installation. Après avoir analysé les besoins énergétiques de la station et les avantages de chaque source d'énergie renouvelable, une comparaison est effectuée pour recommander des stratégies d'alimentation en énergie optimales, tenant compte des aspects techniques, économiques et environnementaux.

VI.2 Implémentation des Énergies Renouvelables :

La consommation de cette station s'élève à environ 45 MWh, une valeur calculée en prenant en compte la somme des consommations pour chaque mètre cube, ainsi que les pertes de charge et la consommation intrinsèque de la station. Dans cette optique, plusieurs technologies ont été retenues pour exploiter les énergies disponibles :

- ♣ Les pelâmes

- ♣ Les panneaux photovoltaïques

- ♣ Les éoliennes terrestres

- ♣ Les éoliennes offshores

Chacune de ces technologies offre des avantages spécifiques en termes d'efficacité énergétique et de capacité à répondre aux besoins de la station, permettant ainsi une utilisation optimale des ressources renouvelables disponibles.

VI.2.1 Les Pelâmes :**VI.2.1.1 Présentation Globale de la Technologie :**

Les pelâmes sont une innovation remarquable dans le domaine de l'énergie marine. Imaginez ces structures tubulaires flottantes, mesurant 180 mètres de long et 4 mètres de diamètre, flexibles et articulées. Elles sont constituées de plusieurs modules qui leur permettent de se mouvoir aussi bien verticalement qu'horizontalement, s'adaptant ainsi parfaitement aux mouvements de la mer (**Figure VI-1**).

Une fois déployées en mer, les vagues les font osciller, et c'est là que réside leur génie. Grâce à ce mouvement, des alternateurs intégrés peut capter et convertir l'énergie des vagues en électricité, offrant ainsi une source d'énergie renouvelable efficace et écologique.

Cette technologie promet une nouvelle ère dans la production d'énergie marine, offrant une solution innovante pour exploiter le potentiel infini de la mer.

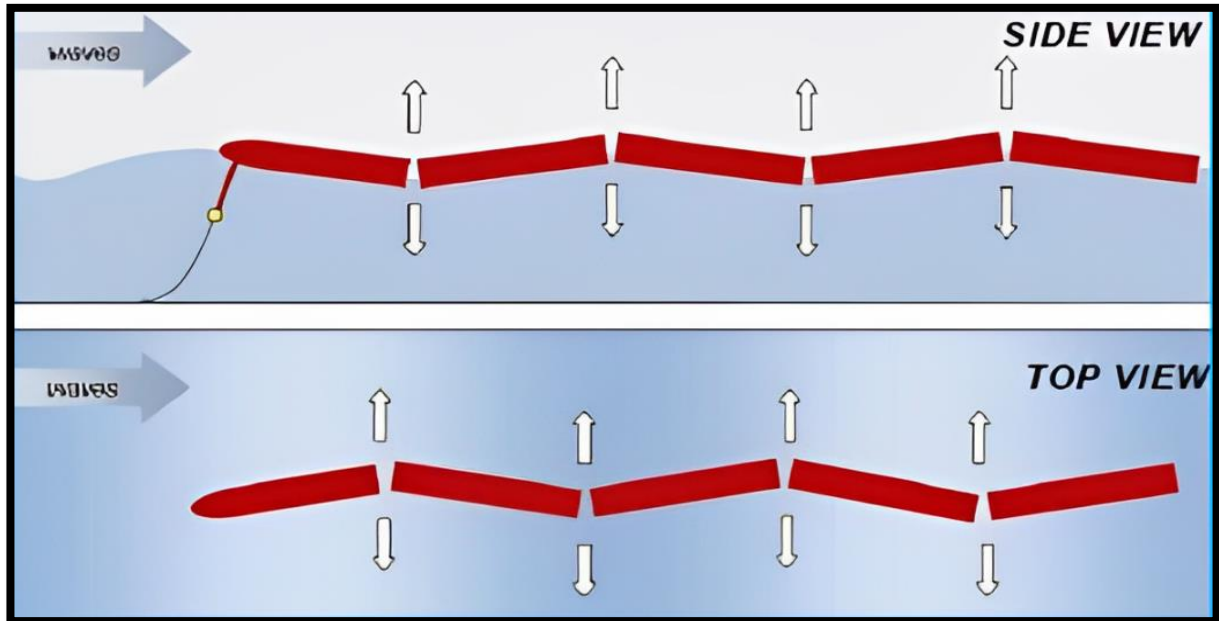


Figure VI.1 : Les articulations des pelâmes. Côtes [34]

Les pelâmes, ancrés aux fonds marins par des câbles d'amarrage, captent l'énergie marine qui est ensuite convertie en électricité. Cette électricité est transportée à terre via des câbles sous-marins jusqu'à un transformateur sur la côte, où elle est adaptée au réseau électrique local et distribuée aux consommateurs.



Figure VI.1 : Pelâmes Installer le Long des Côtes [34]

Le Tableau VII-1 résume les principales spécifications techniques des pelâmes développés par la société Pelâmes Wave Power.

Tableau VI-1 : Caractéristiques d'un Pelâme (Wave Power) [34]

Constructeur	Pelâmes Wave Power
Puissance	750 kW
Rendement de conversion	70 %
Profondeur d'eau requise	50 m

Ce genre d'installation ne nécessite pas beaucoup d'espace ; une superficie d'un kilomètre carré peut produire jusqu'à 10 MW.

La figure ci-dessous montre comment une ferme de pelâmes est disposée et ancrée sur les fonds marins.

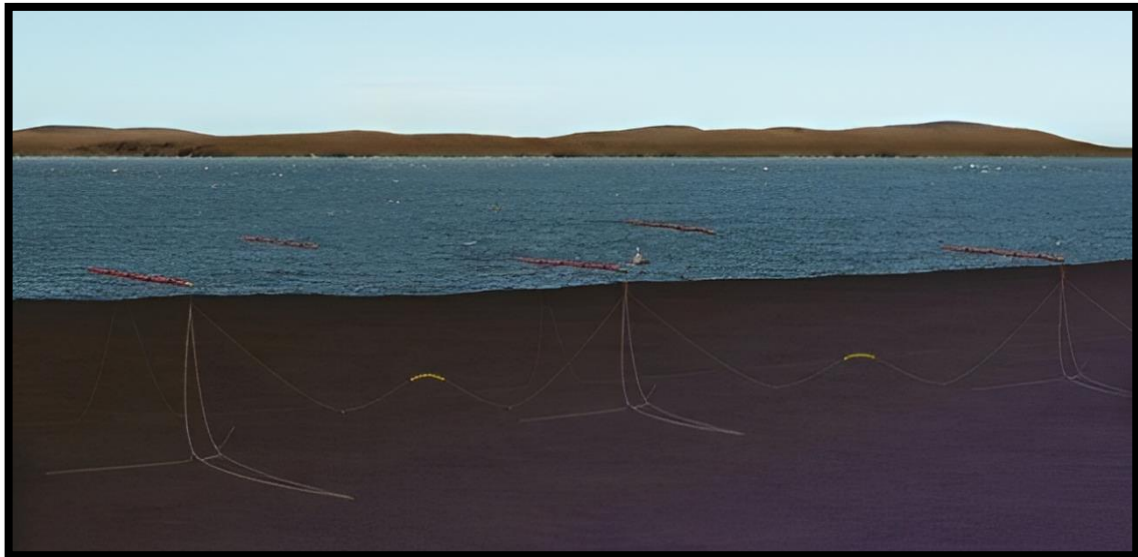


Figure VI-3 : Schéma d'Implantation d'une Ferme de Pelâmes. (Pelâmes Wave Power) [34]

VI-1-1-2. Calcul de la Production Énergétique :

L'objectif de cette section est d'évaluer la production énergétique nécessaire pour dimensionner l'installation d'une ferme de Pelâmes afin de répondre aux besoins totaux de l'usine de dessalement, évalués à Consommation = 45 MW.

- Calcule le nombre des pelâmes :

$$N = \frac{C}{P} \quad \text{(VI-1)}$$

$$N = (45 \cdot 1000) / 750$$

$$N = 60 \text{ pelâmes}$$

Avec un rendement de conversion de 75 %

Le nombre corrigé de pelâmes est alors calculé comme suit :

$$N_{\text{corrigé}} = \frac{N \cdot 100}{75} \quad (\text{VI-2})$$

$$N_{\text{corrigé}} = \frac{60 \cdot 100}{75}$$

$$N_{\text{corrigé}} = 80 \text{ Pelâmes}$$

En multipliant cette valeur par la production d'un Pelâme, on obtient la production énergétique réelle, notée Pcor.

$$P_{\text{cor}} = N_{\text{cor}} \times p \quad (\text{VI-3})$$

$$P_{\text{cor}} = 80 \times 750 \text{ KW/jour}$$

$$P_{\text{cor}} = 60 \text{ M Watt}$$

VI-1-1-3 Calcul de l'Espace Requis :

La production réelle serait donc de 66 MW/jour.

Le fabricant Pelâmes Wave Power estime qu'une superficie de 1 km² est requise pour construire une ferme d'une capacité de 10 MW

Selon le modèle sélectionné, le "Pelâmes PII", ayant une puissance nominale de 750 kW (Pelâmes Wave Power) la puissance de la ferme nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques de l'usine serait de 45 MW. Par conséquent,

La surface nécessaire (S) peut être calculée comme suit :

$$S = P/10 \quad (\text{VI-4})$$

$$S = 45/10 \text{ Km}^2$$

$$S = 450 \text{ ha}$$

La superficie requise pour construire une ferme de cette envergure est de 450 hectares

VI-1-1-4 Electromagnétisme :

Dans le domaine de l'électromagnétisme, lorsqu'on relie les pelâmes au transformateur via un câble électrique, cela induit inévitablement une activité électromagnétique.

Bien que les effets de ces champs électromagnétiques sur les différentes espèces soient encore peu connus, leur intensité dépend principalement du voltage transporté, du type de câble utilisé, et du courant électrique (alternatif ou continu).

La figure suivante (Figure VI-4) illustre l'intensité du champ magnétique, exprimée en micro teslas (μT), en fonction de la distance par rapport au câble d'alimentation.

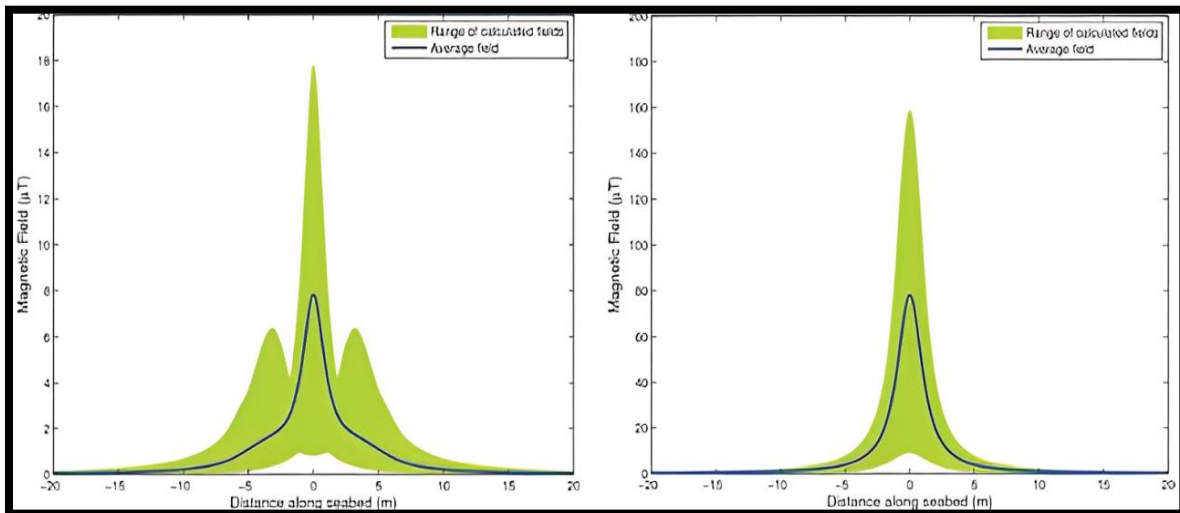


Figure VI-4 : Analyse Comparative de l'Intensité du Champ Magnétique selon la Distance par Rapport au Câble Électrique pour des Courants Alternatif (à droite) et Continu (à gauche) [34]

VI-1-2 Les Panneaux Photovoltaïques :

VI-1-2-1 Aperçu de la technologie :

La technologie photovoltaïque est largement adoptée en France et en Europe comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable.

Les panneaux solaires photovoltaïques, illustrés dans la (Figure VI-5), peuvent être déployés aussi bien par des particuliers sur les toits que par des entreprises dans des centrales solaires.



Figure VI-5 : Photographie d'un Champ des Panneaux Photovoltaïque [34]

Les fabricants utilisent une variété de compositions pour leurs panneaux, mais le matériau le plus communément utilisé est le silicium cristallin. On distingue généralement deux catégories de panneaux : les monocristallins et les polys cristallins. Les monocristallins offrent un rendement plus élevé, mais leur fabrication est plus complexe et donc plus coûteuse que celle des polys cristallins. Ces derniers offrent un bon rapport qualité-prix, ce qui les rend les plus populaires.

VI-1-2-2 Évaluation Complète :

L'objectif de cette section est d'évaluer la capacité énergétique nécessaire pour générer une production quotidienne de $C = 45$ MWh grâce à des panneaux photovoltaïques.

La centrale solaire associée à cette production aurait une puissance nominale de

$$P = 45 \times 10^6 \text{ watts,}$$

Ce qui équivaut à une centrale ayant une puissance de 45 MW.

On présente le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaires et la surface requise dans Tableau VI-2

Tableau VI-2 : Comparaison du Dimensionnement entre Différents Modèles de Panneaux Photovoltaïques (Ministère de l'énergie et du développement durable en France, 2012) [34]

Modèle	Conergy PX 305P	Sillia 60 P	SW	E19
Puissance nominale (W)	305 W	250 W	270 W	425 W
Dimension du module (mm)	1956*922*50	1665*1001*42	1675*1001*31	2067*1046*30
Surface du module (m²)	1.94	1.67	1.88	2.16
Nombre des panneaux nécessaires	-	-	-	105 890

Il est envisagé de recouvrir un hectare de toits de l'usine avec des panneaux photovoltaïques.

Tout surplus devra être installé dans les champs.

VI-1-2-3 L'implantation :

Lors de la sélection d'un site pour une centrale photovoltaïque, deux contraintes principales doivent être considérées :

- ♣ La couverture du sol
- ♣ Les zones protégées

VI-1-2-4 sur la Couverture du Sol :

La première contrainte à considérer est celle de la couverture du sol. L'établissement d'une centrale solaire d'une superficie de plus de 30 ha ne peut être réalisé que sur les toits des bâtiments. Par conséquent, une implantation "en champs" est nécessaire.

VI-1-2-5 les Zones Protégées :

La deuxième contrainte à prendre en compte concerne la protection de nombreuses zones, y compris les zones bâties et le centre électrique.

VI-1-3 les Éoliennes Terrestres :**VI-1-3-1 Présentation Générale de la Technologie :**

Les éoliennes terrestres (Figure VI-6) permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent.



Figure VI-6 : Énergie Renouvelable : Les Champs d'Éoliennes en Photographie

La transformation de l'énergie se produit en plusieurs étapes :

- ♣ L'énergie cinétique du vent provoque la rotation du rotor à trois pales, convertissant ainsi l'énergie cinétique en énergie mécanique.
- ♣ Un multiplicateur, présent sur la majorité des éoliennes, accélère le mouvement du rotor pour produire une énergie mécanique adéquate pour le générateur.
- ♣ Le générateur convertit ensuite l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ♣ L'électricité générée est ensuite acheminée vers un transformateur qui augmente la tension avant de la distribuer sur le réseau.

La composition de la nacelle de l'éolienne est présentée en Figure VI-7.

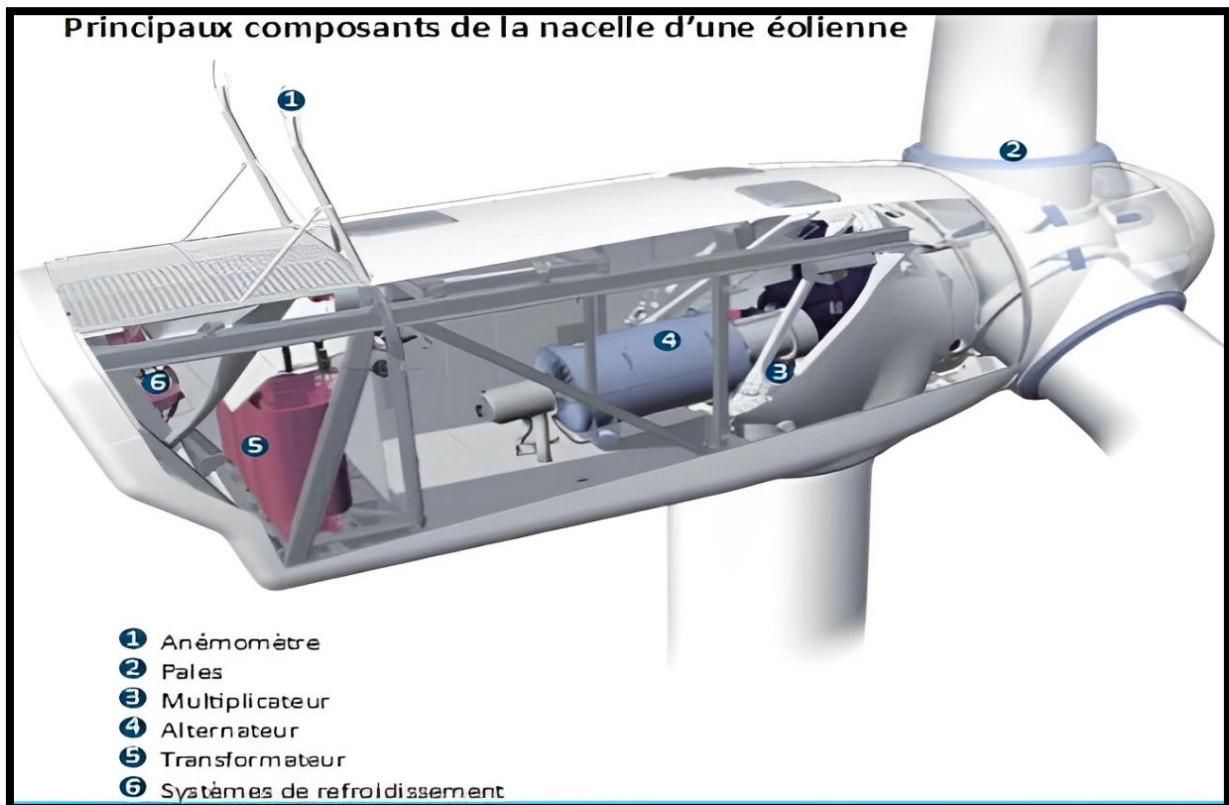


Figure VI-7 : Composition de la Nacelle d'une Eolienne (Syndicat des Energies Renouvelables de France, 2009) [35]

La production d'énergie d'une éolienne dépend de plusieurs facteurs, notamment la longueur des pales, la densité de l'air, et surtout la vitesse du vent. Chaque éolienne possède une puissance déterminée par la vitesse du vent (Figure VI-8). Pour des raisons de sécurité, les éoliennes sont mises à l'arrêt si la vitesse du vent est trop élevée et ne fonctionnent pas si elle est trop basse.

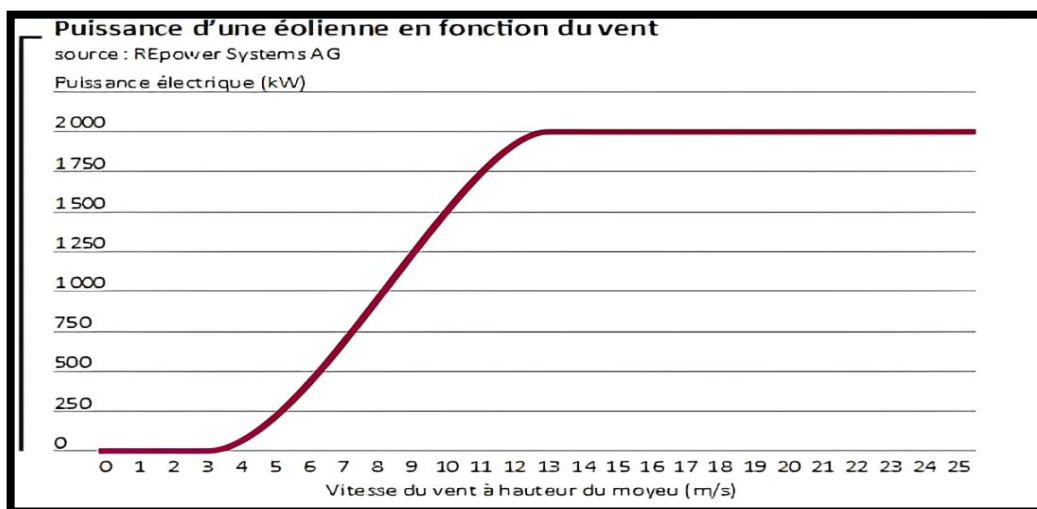


Figure VI-8 : La puissance d'une éolienne en fonction du vent

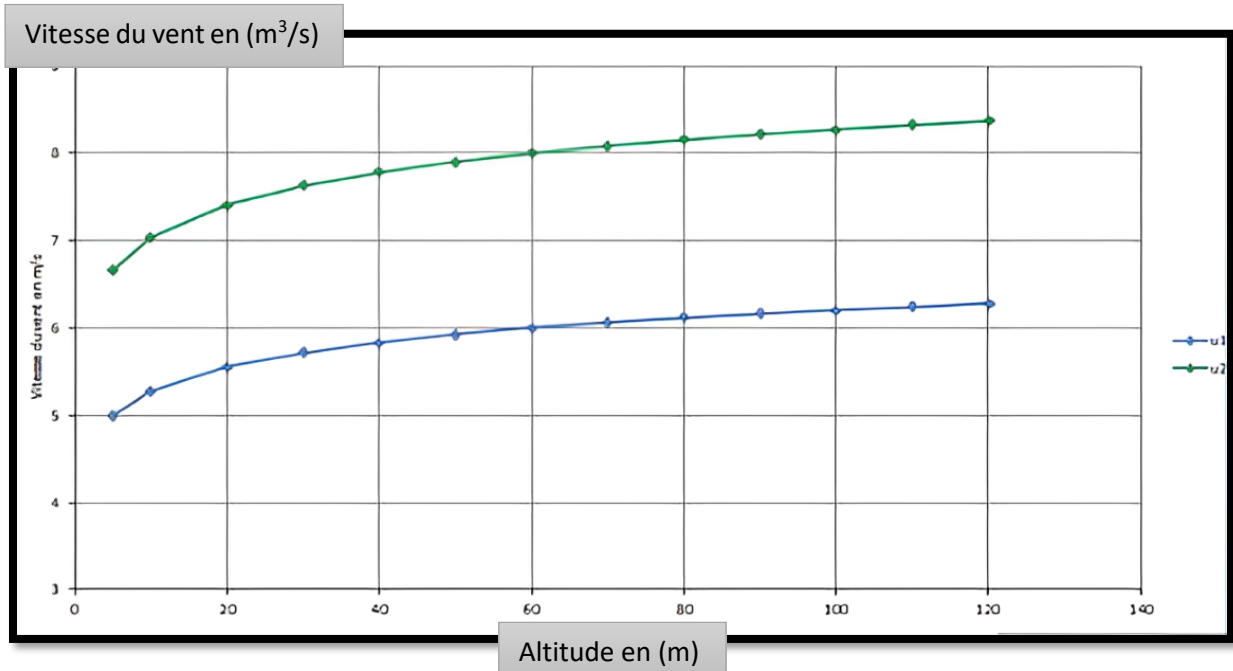


Figure VI-9 : Calcul de la Vitesse des Vents Moyens à Différentes Altitudes

Tableau VI-3 : Caractéristiques du Modèle VISTAS V126 [35]

Modèle	VESTAS V126
Classe	IEC III
Puissance	3 MW
Vitesse minimale et maximale de vents	3-22.5 (m/s)
Vitesse nominale du vent	12 (m/s)
Taille du mat	119 M
Densité de puissance	0.05 m ² /W
Diamètre du rotor	126 m
Surface balayées par les pales	12469 m ²
Maximum de bruit émis	107.5 dB

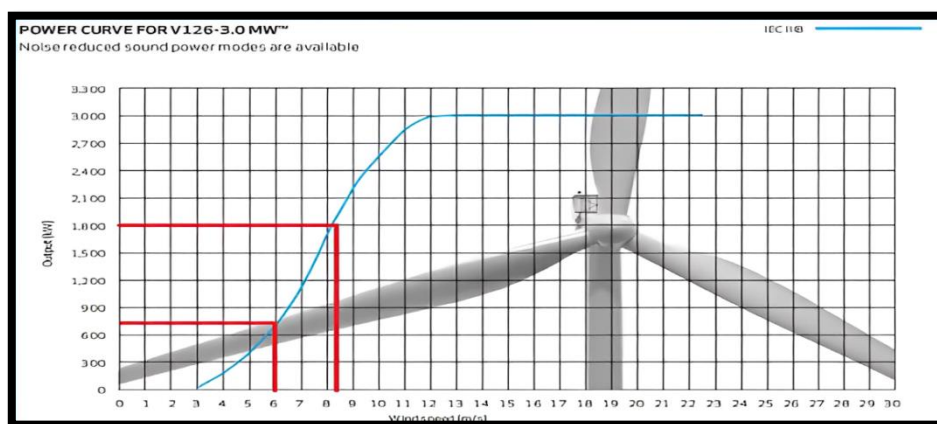


Figure VI-10 : Comparaison Données Constructeur et Vitesse Moyenne Annuelle à la région de Beni Saf [35] (Modèle VESTAS V126)

En comparant ces caractéristiques à la vitesse moyenne annuelle des vents sur les côtes de Ain Témouchent, on obtient une puissance réelle maximale d'environ 1,8 MW (Figure VI-10).

VI-1-3-2 Calcul de la Production Énergétique :

L'objectif de cette section est de dimensionner énergétiquement l'installation d'éoliennes terrestres pour produire une énergie de $C = 18,00$ GWh/an.

Pour déterminer le nombre d'éoliennes de 3 MW nécessaires pour atteindre cette production, nous devons diviser C par le nombre d'heures de fonctionnement annuel (estimé à 5000 heures), puis diviser par la puissance moyenne annuelle réelle d'une éolienne, soit 1,8 MW, calculée précédemment.

$$N = \frac{C}{5000 * P} \quad (\text{VI-4})$$

En appliquant cette formule, nous trouvons :

$$N = \frac{18 * 10^6}{5000 * 1.8 * 10^3}$$

$$N = 2$$

Il faudrait donc installer un parc de 2 éoliennes, ayant une puissance nominale totale de 6 MW et une puissance totale réelle P' de 3,6 MW, pour satisfaire les besoins énergétiques de l'usine. La production énergétique réelle p est donnée par :

$$P = 5000 * P' \quad (\text{VI-4})$$

$$P = 18,00 \text{ GWh}$$

Ainsi, nous obtenons une production énergétique 18,00 GWh/an.

VI-1-4 Les Eoliennes Offshores :

VI-1-4-1. Présentation Générale de la Technologie :

Les éoliennes offshore (situées en mer) fonctionnent selon un principe similaire à celui des éoliennes terrestres. Elles exploitent l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité [36].

L'un de leurs avantages est qu'elles suscitent moins de controverses que leurs homologues terrestres, car elles ne sont pas soumises aux mêmes contraintes de superficie, paysagères et sonores. De plus, la vitesse du vent en mer est plus élevée et plus constante qu'à terre, ce qui permet une production électrique plus importante.



Figure VI-11 : Parc d'éoliennes offshore au Danemark [36]

Cependant, en raison de la complexité de leur installation en mer, le coût des éoliennes offshore est plus élevé. La Figure VI-12 illustre les trois modes d'ancrage différents utilisés pour ces éoliennes.

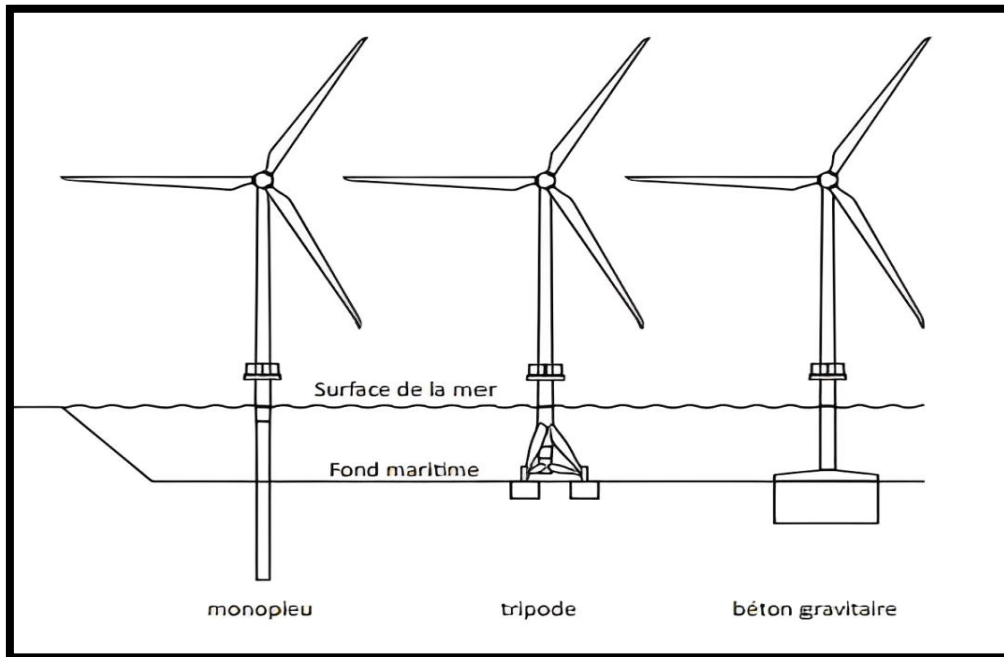


Figure VI-12 : Différents Types d'Ancre des Eoliennes Offshores [36]

En outre, ces éoliennes doivent être conçues pour résister à la corrosion et à la puissance des courants marins. L'installation du réseau de raccordement représente également une contrainte majeure, nécessitant la pose de câbles électriques sous-marins sur une distance d'une dizaine de kilomètres.

Quant à la disposition des éoliennes, deux configurations sont généralement utilisées : en arc de cercle pour des raisons esthétiques, ou en quadrillage. (Figure VI-13) La disposition joue un rôle important tant d'un point de vue esthétique, afin d'éviter la perception d'un "mur" d'éoliennes depuis la côte, que d'un point de vue énergétique, car des éoliennes trop proches les unes des autres génèrent des turbulences et réduisent leur rendement.



Figure VI-13 : Disposition de Parcs Eoliens Offshores en Arc de Cercle et en Quadrillage [36]

VI-1-4-2 Calcul de la Production Énergétique :

Le parc éolien est dimensionné pour couvrir la consommation annuelle de l'usine de dessalement, qui doit atteindre 18,00 GWh/an. De manière similaire aux calculs effectués pour les éoliennes terrestres, cette production est divisée par le nombre d'heures de fonctionnement des éoliennes, puis par la puissance annuelle moyenne réelle de chaque éolienne.

$$N = \frac{C}{5000 \cdot P} \quad \text{(VI-5)}$$

En appliquant cette formule, nous trouvons :

$$N = \frac{18 \cdot 10^6}{5000 \cdot 1.8 \cdot 10^3}$$

$$N = 2$$

2 éoliennes seraient donc requises pour une puissance totale nominale et réelle de 6 MW pour couvrir les besoins énergétiques de l'usine. Cela correspond à une production énergétique réelle P de :

$$P = 5000 \times P' \quad \text{(VI-6)}$$

$$P = 18,00 \text{ GW}$$

On obtient une production énergétique de 18,00 GWh/an

Conclusion Générale

Dans un monde en perpétuelle évolution, la demande en eau ne cesse de croître, exacerbant ainsi la pénurie des ressources naturelles. Face à ce défi, le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution viable et indispensable pour répondre aux besoins croissants en eau potable. Cette technologie permet de transformer l'eau salée en une ressource précieuse, contribuant ainsi à pallier le manque d'eau douce dans de nombreuses régions du globe.

Pour améliorer la qualité de l'eau et optimiser le dimensionnement de la chaîne de prétraitement de la station de dessalement, nous avons mis en œuvre plusieurs solutions innovantes. Notamment, nous avons remplacé la filtration à sable par une filtration à lite, une méthode plus efficace pour éliminer les impuretés. De plus, nous avons ajouté des réservoirs de filtration à anthracite, ce qui permet de prévenir les chutes de pression en cas de panne et la proposition d'un décanteur lamellaire en amont des filtres à sables pour le réglage de problème de la turbidité très élevée d'assurer une continuité du processus de traitement de l'eau.

Ces améliorations ont permis non seulement d'optimiser le fonctionnement de la station de dessalement, mais aussi d'améliorer la qualité de l'eau produite. En intégrant ces technologies avancées, nous avons pu répondre aux exigences croissantes en matière de qualité et de quantité d'eau, tout en garantissant une exploitation plus fiable et durable de la station.

En outre, nous avons tenté de réaliser une étude comparative entre notre station, qui utilise un prétraitement sous pression, et celle de Hamma, qui fonctionne avec un prétraitement gravitaire. Nous avons constaté qu'il est difficile de comparer la qualité de l'eau après le prétraitement, en raison des différences significatives entre l'eau de mer de la côte est et celle du milieu. Ces variations influencent les résultats du traitement et rendent toute comparaison directe peu fiable.

Par conséquent, notre étude s'est concentrée sur d'autres aspects cruciaux tels que le coût de construction, le coût par mètre cube d'eau produite, et la consommation énergétique. Nous avons analysé ces paramètres pour évaluer l'efficacité et la viabilité économique de chaque type de prétraitement. Il est apparu que chaque méthode présente ses propres avantages et inconvénients. Par exemple, le prétraitement sous pression peut offrir une meilleure efficacité de filtration, mais à un coût énergétique plus élevé. En revanche, le prétraitement gravitaire peut être plus économique en termes de consommation d'énergie, mais nécessite des infrastructures plus coûteuses à construire.

Malgré ces différences, il est important de noter que les deux systèmes respectent les normes de filtration en vigueur, garantissant ainsi une eau de qualité. Cette étude comparative nous a permis de mieux comprendre les dynamiques et les compromis associés à chaque type de prétraitement, et de souligner l'importance de choisir la méthode la plus adaptée en fonction des spécificités locales et des objectifs de chaque projet.

Enfin, en raison de la consommation élevée en électricité de notre station de dessalement, estimée à environ 45 MWh, nous avons exploré la possibilité de l'alimenter avec des énergies renouvelables. Nous avons étudié divers systèmes avancés tels que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes terrestres, les éoliennes offshore, et les pelâmes. Après avoir calculé les besoins énergétiques et évalué chaque option, nous avons constaté que, bien que les panneaux photovoltaïques présentent un coût initial élevé, ils offrent des avantages significatifs en termes de facilité d'entretien par rapport aux autres systèmes. Cette solution s'est avérée la

plus adaptée pour notre station, permettant de réduire notre empreinte carbone tout en assurant une alimentation énergétique fiable et durable.

LISTE DES Références :

- [1] Farid TATA-DUCRU (2009) : « Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes ». Agence Française de Développement. 5, rue Roland Barthes, PARIS. FRANCE.
http://www.vacuumguide.com/process_vacuum/seawater_desalination/download/dessalement-eau-de-mer.pdf
- [2] BUSHNAK Adil: « Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le Dessalement en zones rurales/locales ». version 2, Projet financé par l'Union européenne.
<http://www.swim->
- [3] Dessalement de l'eau de mer par Patrick DANIS
- [4] sm.eu/files/BAT_on_Desalination_Final_FR.pdf
- [5] http://www.degremont.fr/cms/degremont_7_refonte/upload/savoirfaire/fr/Osmose_inverse_principe.png
- [6] ALAIN Maurel (2001) : « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ». 1^{ème} édition 11, rue Lavoisier, Paris. France.
- [7] Le Dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël.
http://moodle.utc.fr/file.php/767/Dessalement_de_l_eau_de_mer_en_Israel_et_a_Malte_Presentation_orale.pdf
- [8] Henri Boyé (2008): « Eau, énergie, Dessalement et changement climatique en Méditerranée ». Conseil général de l'Environnement et du Développement Durable Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, France. http://www.planbleu.org/publications/Etude_regionale_dessalement_FR.pdf
- [9] Le Dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël.
- [10] Séminaire International (2009) : « Le Dessalement des eaux: une opportunité pour les régions en pénurie d'eau? » Tanger 8-10 mai 2009
http://aem.portailgref.org/upload/documents/2009145101101_RecueildescommunicationsduSeminaireDessalementTangermai2009AIGR.pdf
- [11] <http://www.encyclo-ecolo.com/Image:Eausaum2.jpg> .
- [12] <http://www.e-monsite.com/contact/signalement-de-contenu-illicite.html?url=dessalementtunisie.emonsite.com&page=http://dessalementtunisie.emonsite.com/pages/sous-partie/2-l-impact-sur-l-environnement.html>
- [13] François de Dardel, directeur technique, Rohm and Haas : « Les résines échangeuses d'ions en traitement d'eau potable ». http://dardel.info/IX/processes/Article_EIN.pdf
- [14] Mr SAOUDI Abdenour (2010) : « l'influence de la filtration sur sable sur la qualité des eaux potable ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen

- [15] Dossier thématique - La Cité de la Mer - Technopole Cherbourg-Normandie / Avril (2012) : « La mer à boire ». La cité de la mer Cherbourg.
<http://mediatheque.citedelamer.com/fr/dossiers-thematiques/recherche-et-technologie/la-mera-boire/la-desalinisation/default.asp>
- [16] http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf consulté le 19/03/2013.
- [17] 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) ». Département du Tronc Commun Technologie, université Hassiba Benbouali Chlef, ALGER.
http://www.univchlef.dz/uhbc/seminaires_2010/communication_tahraouidoumanaima_2010.pdf
- [18] http://www.otv.fr/vwst/ressources/files/1/1939,15275,osmoseinverse_FRA.pdf
- [19] <http://www.encyclo-ecolo.com/Image:Eausaum2.jpg> consulté le 25/02/2013
- [20] <http://www.luisid.com/Brochure/WaterTreatment/Engineering/Memotec37Dessalementdeleau.pdf> consulté le 19/06/2013.
- [21] Jean-Pierre Méricq (2009) : « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT de l'université de TOULOUSE France
- [22] 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>
- [23] Chatkaew TANSAKUL (2009): « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT, université de TOULOUSE France. <http://eprint.insa-toulouse.fr/archive/00000305/01/Tansakul.pdf>
- [24] Axel ETTORI (2011) : « Vieillesse chimique de membranes d'osmose inverse ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT université de Toulouse III - Paul Sabatier FRANCE. <http://thesesups.ups-tlse.fr/1409/1/2011TOU30214.pdf>
- [25] 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-.
- [26] Alfa Arzate, Ph.D (2008) : « Procédés de séparation membrane et leur application dans l'industrie alimentaire ». 142, Rang Lainesse Saint-Norbert d'Arthabaska Québec.

- [27] Séminaire International (2009) : « Le dessalement des eaux: une opportunité pour les régions en pénurie d'eau? » Tanger 8-10 mai 2009
- [28] [http://aem.portailgref.org/upload/documents/2009145101101_RecueilDescommunications duS minaireDessalementTangermai2009AIGR.pdf](http://aem.portailgref.org/upload/documents/2009145101101_RecueilDescommunicationsDuS%20minaireDessalementTangermai2009AIGR.pdf)
- [29] <http://www.veolia.com/veolia/ressources/documents/1/1396,desselement-mer.pdf>
- [30] ZAHAF Benyounes (2003) : « L'osmose inverse pour les faibles concentration en sels ». Mémoire de Fin d'Etude pour l'Obtention du Diplôme DEUA en Hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen
- [31] <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/22074/ch02.html#d0e2079>
- [32] Le dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël.
http://moodle.utc.fr/file.php/767/Dessalement_de_l_eau_de_mer_en_Israel_et_a_Malte_Presentation_orale.pdf
- [33] Patrick DANIS : « dessalement de l'eau de mer » Ingénieur ENSIA Ancien Chef de projet chez Degrémont. Doc J270
- [34] <http://desselement.wordpress.com/>
- [35] Bureaux d'Etudes SAFEGE Ingénieurs Conseils (2004) - Etude générale sur le dessalement de l'eau de mer en Algérie, Ministère des Ressources en Eau
- [36] Mr Djamel BECHKI Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes Thèse de Doctorat Université de BATNA 2011.
- [37] Hurwitz G., Guillen G.R., Hoek EMV., Probing polyamide membrane surface charge, zeta potential, wettability, and hydrophilicity with contact angle measurements, Journal of Membrane Science, 349, 2010 349-357 Hydranautics: <http://www.membranes.com>
- [38] <https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2024/06/Traitement-et-desselement-des-eaux-Hyd-M1-Hadbi-Taieb.pdf>
- [39] Alain. Maurel. « Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtre technique et des autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce 1ère édition » Lavoisier TEC et DOC paris, 226P. (2001)
- [40] Saji, V. S. (2020). Advanced Corrosion Prevention Approaches: Smart Coating and Photoelectrochemical Cathodic Protection. In Corrosion and Fouling Control in Desalination Industry (pp. 225-247).
- [41] Corrosion Control and Prevention in Seawater Desalination Plants.
- [42] Maurel, A, Technique séparatives à membranes, Technique de l'ingénieur, J2, J279 (Tome 1) 1993

[43] Aimar, P, P. Aptel, Membrane preparation, fouling emerging process, fouling and process design, Récents progrès en genie des procédés, European Society of Membrane Science and Technology, (J, A, Howell, membrane application, Centre University of Bath).