

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et
Environnement

Thème du mémoire :

**Optimisation et Redimensionnement de la Filière de Microfiltration
de la Station de Dessalement d'Eau de Mer de Cap Djinet 2 et
impacts environnementaux**

Réalisé par : MOKEDDEM Aya

Et présenté publiquement le 30 juin 2026 devant le jury composé de :

Président :	Pr. KERCHICH Yacine	ENP
Examinatrice :	Dr. CHEIKH Assira	ENSTA
Promoteur :	Mr. SKENDRAOUI Houcine	Ingénieur-GTP
Co-Promotrice :	Dr. DJELLOULI Naima	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et
Environnement

Thème du mémoire :

**Optimisation et Redimensionnement de la Filière de Microfiltration
de la Station de Dessalement d'Eau de Mer de Cap Djinet 2 et
impacts environnementaux**

Réalisé par : MOKEDDEM Aya

Et présenté publiquement le 30 juin 2026 devant le jury composé de :

Président :	Pr. KERCHICH Yacine	ENP
Examinatrice :	Dr. CHEIKH Assira	ENSTA
Promoteur :	Mr. SKENDRAOUI Houcine	Ingénieur-GTP
Co-Promotrice :	Dr. DJELLOULI Naima	ENP

ملخص

يهدف مشروع التخرج هذا إلى دراسة وإعادة تصميم منظومة الترشيح الدقيق بمحطة تحلية مياه البحر كاب جنات 2. وتهدف هذه الدراسة إلى تقييم مدى ملائمة التصميم الحالي لنظام المرشحات الخرطوشية لظروف التشغيل الفعلية، من أجل تحديد أسباب الانسداد المبكر. وقد أظهرت النتائج وجود نقص في سعة تصميم النظام. وللتغلب على ذلك، تم اعتماد إضافة مرشحين (2) من المرشحات الخرطوشية كحل أمثل، مع تطبيق عملية الكلورة في حوض سحب مياه البحر، مما يوفر أفضل توازن تقني-اقتصادي، ويساهم في تحسين أداء النظام وإطالة العمر التشغيلي للخرطوش، مع تقييم الآثار البيئية المرتبطة بذلك.

كلمات مفتاحية: تحلية مياه البحر، الترشيح الدقيق، المرشحات الخرطوشية، الانسداد المبكر، نقص السعة التصميمية، التحسين، الكلورة، أداء الترشيح، التأثير البيئي.

Abstract:

The aim of this graduation project is to study and redesign the microfiltration system of the Cap Djinet 2 seawater desalination plant. The study seeks to assess the suitability of the current cartridge filtration system design under real operating conditions in order to identify the causes of premature fouling. The results highlighted an under-sizing of the system. To address this, the addition of two cartridge filters was adopted as the optimal solution, along with the implementation of chlorination at the seawater intake basin, providing the best techno-economic compromise. This helps improve system performance and extend cartridge service life, while also assessing the associated environmental impacts.

Keyword : Seawater desalination, Microfiltration, Cartridge filters, Premature fouling, Under-sizing, Optimization, Chlorination, Filtration performance, Environmental impact.

Résumé

Le but de ce projet de fin d'études est d'étudier et de redimensionner la filière de microfiltration de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2. Cette étude vise à évaluer l'adéquation du dimensionnement actuel du système des filtres à cartouches aux conditions réelles d'exploitation afin d'identifier les causes du colmatage prématuré. Les résultats ont mis en évidence un sous-dimensionnement du système. Pour y remédier, l'ajout de deux filtres à cartouches a été retenu comme solution optimale, accompagné de la mise en place d'une chloration au niveau du bassin de captage de l'eau de mer, offrant le meilleur compromis technico-économique, permettant d'améliorer les performances du système et de prolonger la durée de vie des cartouches, tout en évaluant les impacts environnementaux associés.

Mots-clés : Dessalement d'eau de mer, Microfiltration, Filtres à cartouches, Colmatage prématuré, Sous-dimensionnement, Optimisation, Chloration, Performance de filtration, Impact environnemental.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents, ma mère Zakia et mon père Smail, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur amour, leur soutien et leurs sacrifices tout au long de mon parcours, qu'ils ont consentis pour me permettre d'atteindre mes objectifs.

À mes frères Harroun et Bilal, ainsi qu'à mes sœurs Maria et Israa, pour leur affection et leur encouragement constant.

Je le dédie aussi à mes ami(e)s de polytechnique, pour leur soutien, leur entraide et tous les moments inoubliables que nous avons partagés ensemble durant ces années d'études.

Aux anciens environnementalistes qui m'ont servi d'exemple.

Je leur adresse à tous ma plus profonde reconnaissance et mon affection.

Remerciements

Il apparaît opportun de commencer ce mémoire en adressant mes remerciements à Dieu, à mes parents ainsi qu'à ma famille, qui m'ont offert les meilleures conditions pour poursuivre mes études et m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à :

- Mme. **DJELLOULI Naïma**, mon encadrante, pour m'avoir guidée, encouragée et conseillée pendant toute la période du stage.
- Mr. **SKENDRAOUI Houcine**, mon parrain, qui m'a assuré de bonnes conditions pour le déroulement de mon stage et m'a fourni les informations nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Monsieur **CHITOUR Mehdi**, directeur du service Exploitation de la SDEM de Cap Djinet 2, pour son accueil chaleureux et pour m'avoir ouvert les portes de son service, m'offrant ainsi un accès précieux aux informations nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail par leurs précieux conseils, leurs orientations, leurs suggestions et leur soutien tout au long de ce projet, et particulièrement à l'ingénieur M. Fadi et au technicien M. Mehdi.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel du laboratoire, notamment M. Saïd et M. Hamza, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et le partage de leur expérience.

Mes remerciements et ma gratitude vont également à l'ensemble des membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner mon travail.

J'adresse également mes sincères remerciements et ma reconnaissance à tous les enseignants du département pour la qualité de la formation qu'ils m'ont dispensée durant les trois années de spécialité.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 12

Chapitre I : Cadre théorique et généralités sur le dessalement d'eau de mer 15

I.1. Introduction 16

I.2. Contexte et problématique de la ressource en eau 16

I.2.1. Rareté de l'eau douce dans le monde 16

I.2.2. Stress hydrique en Afrique du Nord 17

I.2.3. Le dessalement une solution stratégique 20

I.3. Fondements du dessalement de l'eau 20

I.3.1. Définition et objectifs 20

I.3.2. Classification des eaux selon leur salinité 21

I.3.3. Historique et évolution des technologies de dessalement 21

I.3.4. Situation de dessalement dans le monde 22

I.3.5. Développement du dessalement en Algérie..... 23

I.4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer 25

I.4.1. Composition chimique et sels dissous 25

I.4.2. Paramètres physiques 26

I.4.3. Paramètres chimiques 26

I.4.4. Présence de matières organiques 27

I.5. Technologies de dessalement 27

I.5.1. Les procédés thermiques 28

I.5.2. Les procédés membranaires..... 32

I.5.3. Autres techniques alternatives 34

I.6. L'osmose inverse : principe et fonctionnement 36

I.6.1. Principe de l'osmose inverse 36

I.6.2. Description d'une installation type d'osmose inverse 37

I.6.3. Paramètres influençant la performance des membranes..... 37

I.7. Contraintes techniques et défis industriels 38

I.7.1. Entartrage..... 38

I.7.2. Le Colmatage..... 39

I.7.3. La Corrosion	39
I.8. Impacts environnementaux du dessalement	40
I.8.1. Rejets de saumure	40
I.8.2. Consommation énergétique et émissions de CO ₂	41
I.8.3. Mesures de réduction des impacts	41
I.9. Conclusion.....	42
Chapitre II : Présentation de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2...	43
II.1. Introduction.....	44
II.2. Situation géographique	44
II.3. Présentation générale de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2	44
II.4. Processus du dessalement dans la station de Cap Djinet 2	45
II.4.1. Zone de captage d'eau de mer.....	45
II.4.1.1. Tour de captage d'eau de mer	45
II.4.1.2. Canaux de dégrillage : Dégrilleurs et Tamis rotatifs.....	46
II.4.1.3. Système de pompage d'eau de mer	47
II.4.2. Système de prétraitement	48
II.4.2.1. Coagulation et Floculation	48
II.4.2.2. Décanteurs lamellaires	49
II.4.2.3. Réservoir et pompage intermédiaire	49
II.4.2.4. Système de filtres à sable pressurisé	50
II.4.2.5. Système de filtres à cartouches	51
II.4.3. L'osmose inverse.....	52
II.4.3.1. Filières d'osmose inverse	52
II.4.3.2. Le système de récupération d'énergie	53
II.4.3.3. Système de nettoyage et de rinçage chimique.....	54
II.4.4. Système de post-traitement et d'eau potable	54
II.4.4.1. Stockage et dosage du CO ₂	54
II.4.4.2. Lits de calcite.....	54
II.4.4.3. Désinfection finale	54
II.4.5. Réservoirs et station de pompage de l'eau produite.....	54
II.5. Laboratoire	55
II.6. Salle de contrôle.....	55
II.7. Conclusion	56

Chapitre III : Évaluation du dimensionnement des filtres à cartouches	57
III.1. Introduction	58
III.2 Matériels et Méthodes	58
III.2.1 Description du système étudié	58
III.2.2. Données du constructeur des filtres à cartouches	59
III.2.3 Données d'exploitation	60
III.3. Partie expérimentale	65
III.3.1. Évolution du débit des filtres à cartouches en exploitation	65
III.3.2. Évolution de la turbidité au niveau du captage et à la sortie des filtres à cartouches	70
III.3.3. Évolution de la perte de charge des filtres à cartouches	72
III.4. Résultats et interprétation des résultats	73
III.4.1. Interprétation des résultats du tableau III.2.....	73
III.4.2. Interprétation des résultats du tableau III.3.....	73
III.4.3. Interprétation des résultats des six filtres à cartouches	74
III.4.4. Interprétation des résultats des turbidités.....	75
III.4.5. Interprétation des résultats de la perte de charge	75
III.5. Diagnostic opérationnel des filtres à cartouches	75
III.6. Impact opérationnel du fonctionnement des filtres à cartouches	76
III.7. Conclusion.....	77
 Chapitre IV : Optimisation des filtres à cartouches et impacts environnementaux	 78
IV.1. Introduction	79
IV.2. Critères d'optimisation	79
IV.3. Solutions techniques proposées.....	79
IV.3.1. Augmentation du nombre de filtres à cartouches	80
IV.3.2. Augmentation du nombre de cartouches	83
IV.3.3. Augmentation de la surface de filtration	84
IV. 3.4. Solution chimique : chloration.....	86
IV.4. Étude technico-économique	88
IV.4.1. Étude technico-économique de l'augmentation du nombre de filtres	88
IV.4.2. Étude technico-économique de l'augmentation de la surface de filtration.....	89
IV.4. Comparaison des solutions proposées.....	89
IV.5. Solution optimale retenue.....	90
IV.6. Impacts environnementaux et économiques	91

IV.6.1. Impacts environnementaux	91
IV.6.2. Impacts économiques.....	92
IV.7. Conclusion.....	93
Conclusion générale	94
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Indicateurs de stress hydrique en Afrique du Nord	19
Tableau I.2 : Classification des eaux selon leur salinité	21
Tableau I.3 : Les principales unités de dessalement en Algérie	24
Tableau I.4 : Les nouvelles stations de dessalement mise en service en Algérie	24
Tableau I.5 : Composition minérale de l'eau de mer.....	25
Tableau I.6 : la salinité des différentes mers	25
Tableau I.7 : comparaison de différents procédés de dessalement	34
Tableau III.1 : Caractéristiques techniques des filtres à cartouches	59
Tableau III.2 : Évolution des débits des filtres à cartouches et des paramètres de qualité de l'eau durant la période du 01/08/2025 au 20/09/2025.....	61
Tableau III.3 : Évolution des débits des filtres à cartouches et de la perte de charge durant la période du 01/08/2025 au 20/09/2025.....	63
Tableau III.4 : Synthèse des performances des filtres à cartouches.....	74
Tableau IV.1 : Optimisation du nombre de filtres à cartouches.....	80
Tableau IV.2 : Données expérimentales du filtre à cartouches FC 14 relatives au débit et à la perte de charge.	81
Tableau IV.3 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 15 filtres en service.	82
Tableau IV.4 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 16 filtres en service.	82
Tableau IV.5 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 17 filtres en service.	82
Tableau IV.6 : Optimisation du nombre de cartouches filtrantes.....	83
Tableau IV.7 : Les caractéristiques techniques des cartouches filtrantes Veolia SWRO.Zs 05-70 et Pullner bobinée.....	85
Tableau IV.8 : Comparaison technico-économique selon le nombre de filtres à cartouches.....	88
Tableau IV.9 : Comparaison technico-économique des cartouches filtrantes veolia et pullner en fonction de leur coût d'exploitation.	89
Tableau IV.10 : Comparaison des différentes solutions proposées.....	90

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition mondiale de l'eau sur terre	17
Figure I.2 : État du stress hydrique à l'horizon 2030 dans la Méditerranée	18
Figure I.3 : Répartition mondiale des installations de dessalement.....	20
Figure I.4 : La capacité de dessalement à l'échelle mondiale.....	23
Figure I.5 : Les procédés de dessalement	28
Figure I.6 : Le principe de la distillation à simple effet.....	29
Figure I.7 : Le principe de la distillation à effet multiple	30
Figure I.8 : Le principe de la distillation flash multi-étagée.....	31
Figure I.9 : Le principe de la distillation à compression de vapeur.....	32
Figure I.10 : Le principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse	33
Figure I.11 : Procédé de distillation solaire de l'eau de mer	35
Figure I.12 : Principe de l'osmose inverse.....	36
Figure I.13 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	37
Figure II.1 : La station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2.....	44
Figure II.2 : La tour de captage	45
Figure II.3 : Dégrilleur grossier	46
Figure II.4 : Tamis rotatifs.....	47
Figure II.5 : Station de relevage	47
Figure II.6 : Bassin de coagulation-floculation	48
Figure II.7 : Décanteurs Lamellaires	49
Figure II.8 : Filtres à sable.....	50
Figure II.9 : Filtres à cartouches	52
Figure II.10 : L'unité d'osmose inverse	53
Figure II.11 : Système de récupération d'énergie	53
Figure II.12 : Salle de contrôle	55
Figure III.1 : Filtre à cartouches	60
Figure III.2 : Évolution des débits FC 01 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	65
Figure III.3 : Évolution des débits FC 03 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	66
Figure III.4 : Évolution des débits FC 06 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	67
Figure III.5 : Évolution des débits FC 10 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	68
Figure III.6 : Évolution des débits FC 12 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	69
Figure III.7 : Évolution des débits FC 14 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	70
Figure III.8 : Évolution de la turbidité au niveau du captage (du 01/08/25 au 20/09/25).	71
Figure III.9 : Évolution de la turbidité à la sortie des filtres à cartouches (du 01/08/25 au 20/09/25).	71
Figure III.10 : Évolution de la perte de charge des filtres à cartouches sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.....	72
Figure III.11 : Phénomène d'arrachement des cartouches du filtre FC 06.....	75
Figure IV. 1: Le plan de masse de la station de dessalement de Cap Djinet 2	87

Liste des abréviations

ADC : Algerian Desalination Company
AEC : Algerian Energy Company
CIP : Clean-In-Place (Nettoyage en place)
CO₂ : Dioxyde de carbone
Coût OPEX : Operating Expenditures (Coûts d'exploitation opérationnels)
ENGTP : Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers
FC : Filtre à cartouches
FeCl₃ : Chlorure ferrique
FS : Filtre à sable
H₂SO₄ : Acide sulfurique
HCO₃⁻ : Bicarbonates
HP : Haute pression
LSI : Langelier Saturation Index (Indice de saturation de Langelier)
MEC : Membrane Échangeuse de Cations
MED : Multiple Effect Distillation (Distillation à effets multiples)
MEA : Membrane Échangeuse d'Anions
MES : Matières en suspension
Mg(OH)₂ : Hydroxyde de magnésium
MSF : Multi Stage Flash (Distillation flash multi-étagée)
NaClO : Hypochlorite de sodium
NDP : Net Driving Pressure (Pression nette motrice)
NTU : Nephelometric Turbidity Unit (Unité néphélométrique de turbidité)
OI / RO : Osmose inverse / Reverse Osmosis (Osmose inverse)
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
pH : Potentiel hydrogène
ppm : Parties par million
SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition (Système de supervision et d'acquisition de données)
SDI : Silt Density Index (Indice de densité de colmatage)
SDEM : Station de dessalement de l'eau de mer
SONATRACH : Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures
SONELGAZ : Société Nationale de l'Électricité et du Gaz
TDS : Total Dissolved Solids (Solides dissous totaux)
TH : Titre hydrotimétrique
VC : Vapour Compression (Compression de vapeur)
μS/cm : Microsiemens par centimètre



Introduction générale



<< L'eau n'est pas nécessaire à la vie, l'eau est la vie >> [1].

L'eau constitue une ressource indispensable à la vie, au développement économique et à l'équilibre des écosystèmes. Cependant, cette ressource précieuse est aujourd'hui menacée par des pressions croissantes telles que le changement climatique, la pollution et la surexploitation. Tandis que certains pays bénéficient d'un accès abondant à l'eau, d'autres font face à des sécheresses sévères et à des conflits liés aux ressources hydriques. Pourtant, l'eau couvre environ 70 % de la surface terrestre. La majeure partie de ces réserves (97 %) est constituée d'eaux salines ou saumâtres, et parmi les 3 % d'eau douce, 68,3 % se trouvent sous forme de glace. Seuls 32,1 % de l'eau douce sont disponibles et accessibles.

Face à cette pénurie croissante d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable doivent être mises en œuvre afin de répondre aux besoins de la population croissante. Parmi les solutions envisagées, le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres apparaît comme une alternative prometteuse pour de nombreux pays.

Dans ce contexte, l'Algérie s'est engagée, depuis 2005, dans une stratégie à moyen terme basée sur la réalisation de stations de dessalement. Classée parmi les zones semi-arides, elle a choisi le dessalement de l'eau de mer comme alternative afin de faire face à la demande croissante en eau potable [2].

La station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, située dans la wilaya de Boumerdès, a été récemment mise en service. Afin d'évaluer les performances de la station, nous proposons d'étudier les performances des filtres à cartouches.

Les mesures de turbidité réalisées au niveau des différentes étapes du prétraitement indiquent une bonne qualité de l'eau. Cependant, un colmatage prématuré des filtres à cartouches a été observé, entraînant une diminution rapide du débit ainsi qu'une augmentation de la perte de charge au-delà de 1,2 bar. Cette situation nécessite le remplacement fréquent des cartouches filtrantes dans des délais relativement courts. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'identifier les causes de ce phénomène et d'évaluer l'adéquation du dimensionnement actuel de cette étape de traitement.

Pour mener à bien ce travail, nous avons structuré le présent mémoire de fin d'études selon le plan suivant :

Nous avons présenté dans le premier chapitre les notions générales et les définitions liées au dessalement de l'eau de mer. Il aborde l'évolution historique du dessalement, son développement à l'échelle mondiale et nationale, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer, les principales technologies de dessalement, les contraintes techniques et les défis industriels, ainsi que les principaux impacts environnementaux associés.

Introduction générale

Le deuxième chapitre portera sur la présentation de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2. Il mettra en évidence ses principales caractéristiques techniques, sa capacité de production ainsi que les procédés mis en œuvre et son rôle dans l'approvisionnement en eau potable. Ce chapitre permettra également de situer le contexte de l'étude et de mieux comprendre les particularités de cette installation.

Concernant le troisième chapitre, notre étude portera sur l'évaluation du dimensionnement et des performances de la filière de microfiltration, qui constitue une étape essentielle dans le fonctionnement de la station de dessalement de Cap Djinet 2.

Enfin, le quatrième chapitre sera consacré à l'optimisation de la filière de microfiltration ainsi qu'à l'étude de son impact environnemental au sein de la station de dessalement de Cap Djinet 2.



Chapitre I

*Cadre théorique et généralités sur le
dessalement d'eau de mer*



I.1. Introduction

Notre pays fait face à une pénurie d'eau de plus en plus préoccupante, résultant à la fois de la rareté et de l'irrégularité des ressources hydriques, ainsi que de la croissance rapide de la population, qui entraîne une demande accrue. Afin de garantir la sécurité hydrique nationale, la stratégie nationale s'oriente vers des solutions non conventionnelles, parmi lesquelles le dessalement de l'eau de mer occupe une place centrale. Plusieurs stations ont ainsi été mises en service le long du littoral depuis 2005 [3].

Ce chapitre a pour objectif de présenter les notions générales et les définitions liées au dessalement de l'eau de mer pour la production d'eau potable. Il aborde l'évolution historique du dessalement, son développement à l'échelle mondiale et nationale, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer, les principales technologies de dessalement, les contraintes techniques et les défis industriels, ainsi que les principaux impacts environnementaux associés.

I.2. Contexte et problématique de la ressource en eau

I.2.1. Rareté de l'eau douce dans le monde

L'eau couvre environ 70 % de la surface terrestre, seule une faible proportion est exploitable par l'être humain. L'eau douce ne représente qu'environ 3 % des ressources hydriques mondiales, dont près des deux tiers sont stockés dans les glaciers ou restent difficilement accessibles (voir Figure I.1). Les quantités disponibles pour la consommation, l'agriculture et les usages domestiques sont donc limitées, ce qui entraîne une crise mondiale : plus d'un milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et près de trois milliards subissent des pénuries régulières [4].

- Pression croissante due à :
 - La croissance démographique mondiale.
 - L'urbanisation rapide.
 - L'industrialisation.
 - Le changement climatique [5].
- Conséquences :
 - Compétition accrue pour l'eau et épuisement des sources naturelles.
 - Perte de biodiversité et fragilisation des écosystèmes.
 - Risques sanitaires liés au manque d'eau potable et à la propagation de maladies [6].

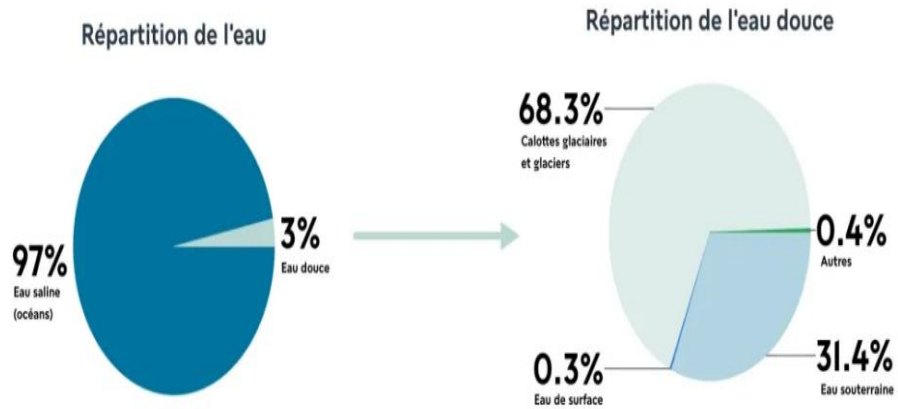


Figure I.1 : Répartition mondiale de l'eau sur terre [7].

I.2.2. Stress hydrique en Afrique du Nord

Le stress hydrique désigne une situation dans laquelle la demande en eau dépasse la disponibilité naturelle, ou lorsque la qualité de l'eau disponible ne permet pas de satisfaire les besoins humains, agricoles ou industriels. En raison de sa géographie et de son climat aride, l'Afrique du Nord est l'une des régions les plus affectées par ce phénomène [8] (voir Figure I.2).

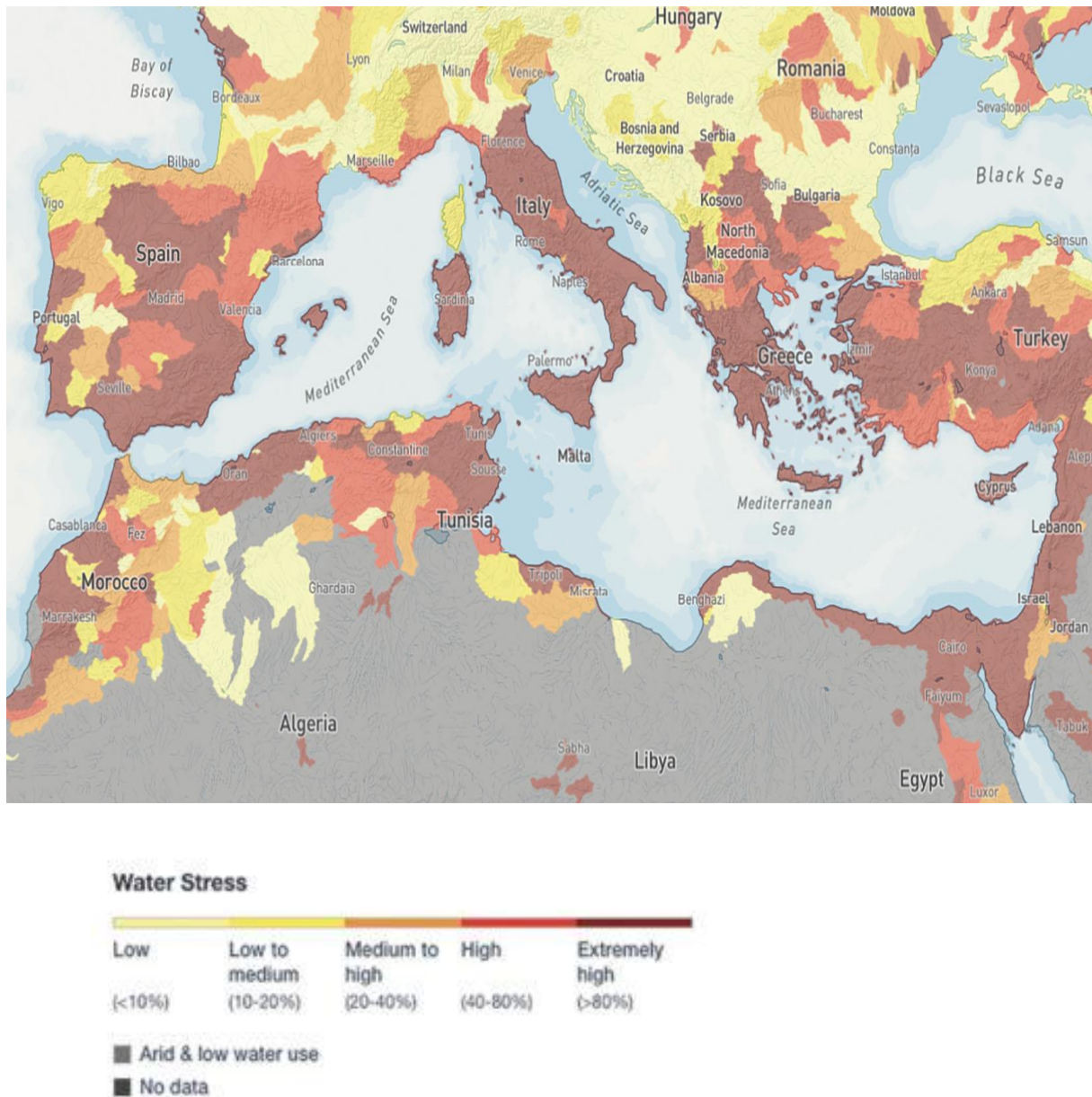


Figure I.2 : État du stress hydrique à l’horizon 2030 dans la Méditerranée [9].

1. Zones fortement touchées

Les pays les plus concernés sont :

Algérie : Les régions du Sud et de l’Ouest souffrent d’un déficit chronique en eau. Les nappes phréatiques sont surexploitées, et certaines villes comme Alger connaissent des coupures périodiques[10].

Maroc : Les bassins hydrauliques du Souss-Massa et de l’Oriental présentent une disponibilité en eau très limitée, accentuée par l’urbanisation rapide et la croissance agricole [11].

Tunisie : Le pays est caractérisé par un climat méditerranéen aride à semi-aride, avec des précipitations irrégulières et une dépendance élevée aux barrages et nappes souterraines [12]. Ces données sont résumées dans le Tableau I.1.

Tableau I.1 : Indicateurs de stress hydrique en Afrique du Nord [13].

Pays	Disponibilité en eau douce (m ³ /hab/an)	Niveau de stress hydrique
Algérie	450	Très élevé
Maroc	700	Élevé
Tunisie	500	Très élevé

2. Facteurs naturels aggravants

- **Climat aride :** Les températures élevées entraînent une évaporation rapide, réduisant la quantité d'eau disponible dans les réservoirs naturels et les sols.
- **Précipitations faibles et irrégulières :** La moyenne annuelle varie de 100 à 600 mm selon les régions, ce qui est insuffisant pour recharger durablement les nappes souterraines et les barrages.
- **Variabilité climatique :** Les sécheresses périodiques accentuent les tensions sur les ressources et compliquent la planification de la distribution d'eau [14].

3. Facteurs humains et socio-économiques

- **Croissance démographique :** La population croît rapidement, augmentant la demande en eau potable [15].
- **Urbanisation et industrie :** Les villes consomment davantage d'eau que ce que les sources locales peuvent fournir, et les activités industrielles aggravent la pression sur les nappes et rivières [15].
- **Agriculture intensive :** L'irrigation consomme jusqu'à 70 % de l'eau douce disponible dans certains pays, laissant peu pour les usages domestiques [16].

4. Conséquences et stratégies de mitigation

- **Conséquences :** pénuries récurrentes, baisse de la qualité de l'eau (intrusion saline et concentration des polluants), surexploitation des nappes profondes, conflits potentiels autour de l'accès à l'eau [16].
- **Stratégies mises en place :**
 - Développement des installations de dessalement pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer [16].
 - Exploitation des nappes profondes, parfois anciennes, comme sources de secours [17].
 - Optimisation de la gestion des barrages et réservoirs existants, amélioration du traitement des eaux usées et promotion de la réutilisation pour l'agriculture [18].

I.2.3. Le dessalement une solution stratégique

Le dessalement représente une solution stratégique face au stress hydrique, car il permet d'exploiter une source inépuisable : l'eau de mer. Cette technique connaît un développement rapide en Afrique du Nord et au Moyen-Orient (voir Figure I.3). Elle est utilisée pour produire de l'eau potable et pour satisfaire les besoins de l'agriculture et de l'industrie. Elle constitue ainsi une alternative essentielle face à la rareté des ressources naturelles et permet de diversifier l'approvisionnement en eau [19].



Figure I.3 : Répartition mondiale des installations de dessalement [20].

I.3. Fondements du dessalement de l'eau

I.3.1. Définition et objectifs

Dessalement repose sur l'élimination des sels et des substances dissoutes présentes dans l'eau de mer ou saumâtre, afin de produire une eau potable adaptée à la consommation, à l'irrigation ou aux usages industriels [21].

Objectifs :

- **Assurer une source d'eau durable pour les régions déficitaires** : le dessalement permet de garantir un approvisionnement continu en eau, indépendamment des conditions climatiques (sécheresse, variabilité des précipitations), ce qui est particulièrement crucial dans les zones arides et semi-arides.
- **Réduire la surexploitation des nappes souterraines** : en limitant le recours excessif aux ressources souterraines, il contribue à préserver les aquifères, à éviter leur épuisement et à limiter les phénomènes de salinisation.
- **Compléter et sécuriser les ressources en eau existantes** : le dessalement constitue une ressource alternative qui vient renforcer les systèmes d'alimentation en eau, notamment en période de stress hydrique ou de forte demande [21].

I.3.2. Classification des eaux selon leur salinité

La salinité correspond à la concentration totale des sels dissous dans l'eau, généralement exprimée en grammes par kilogramme (g/kg) ou en parties par million (ppm) [22]. La classification des eaux selon leur salinité est présentée dans le Tableau I.2.

Tableau I.2 : Classification des eaux selon leur salinité [23].

Type d'eau	Salinité (g/kg)	Usage principal
Eau douce	< 1	Boisson, agriculture
Eau saumâtre	1 – 10	Usage industriel modéré
Eau de mer	≈ 35	Dessalement nécessaire

I.3.3. Historique et évolution des technologies de dessalement

Depuis l'Antiquité, le dessalement d'eau de mer a été pratiqué, notamment pour la navigation maritime en utilisant la distillation pour obtenir de l'eau potable. Dès le 17^{ème} siècle, de nombreux brevets concernant la distillation ont été enregistrés en Europe, marquant le début d'un développement scientifique du procédé.

Au 19^{ème} siècle, l'arrivée de la machine à vapeur a favorisé l'industrialisation du dessalement, notamment sur les navires et dans les régions coloniales. Après la Seconde Guerre mondiale, l'essor pétrolier au Moyen-Orient a accéléré la construction d'unités thermiques à grande échelle [24].

Les années 1950-1960 ont été marquées par l'apparition de nouvelles technologies comme l'électrodialyse (1954), la distillation flash multi-étages MSF (1957) et l'osmose inverse (1960). Depuis les années 1980, l'osmose inverse connaît un développement rapide grâce aux progrès des membranes et à la réduction des coûts énergétiques.

Aujourd'hui, le dessalement est très répandu dans plus de 150 pays, avec une forte concentration au Moyen-Orient où il couvre une grande partie des besoins en eau potable [25].

I.3.4. Situation de dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est de plus en plus en croissance dans le monde entier. Parallèlement aux risques de pollution (maladies, de matières en suspension ou de pathogènes) qui subsistent à chaque étape du parcours aquatique, l'approvisionnement en eau potable, tant en quantité qu'en qualité, devient de plus en plus nécessaire. L'eau douce est distribuée de manière inégale sur toute la planète.

En raison de cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est devenu nécessaire pour surmonter le déséquilibre de répartition. Chaque année, la capacité de dessalement installée augmente de plus de 10 % en moyenne. Plus de 15000 usines de dessalement dans 120 pays produisent aujourd'hui plus de 40 millions de m³/j d'eau, dont les trois quarts (3/4) proviennent d'eau salée et un quart (1/4) d'eau saumâtre. Soixante-quinze pour cent (75 %) de ces 40 millions sont destinés à la consommation humaine, et 25 % à l'utilisation industrielle ou agricole. La capacité de production mondiale d'eau potable est d'environ 500 millions de m³/j.

En 2010, la Chine a déclaré qu'elle produira 1 million de m³/j d'eau de mer traitée, avec un objectif de 3 millions de m³/j d'ici 2020. Le dessalement de l'eau de mer répond à 60% des besoins en eau douce des pays du golfe arabe. Le dessalement de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre souterraine pour la production d'eau douce artificielle a commencé en Méditerranée en Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades, puis en Libye et en Algérie, et maintenant rapidement dans toute la Méditerranée. L'Algérie et l'Espagne ont évidemment choisi cette approche pour pallier la pénurie d'approvisionnement en eau. La Méditerranée représente actuellement environ un quart (1/4) du dessalement mondial. D'ici 2030, la capacité de dessalement de la région pourrait être comparable à celle du reste du monde (environ 30 à 40 millions de m³/j) [26].

La figure ci-dessous illustre la capacité de dessalement à l'échelle mondiale.

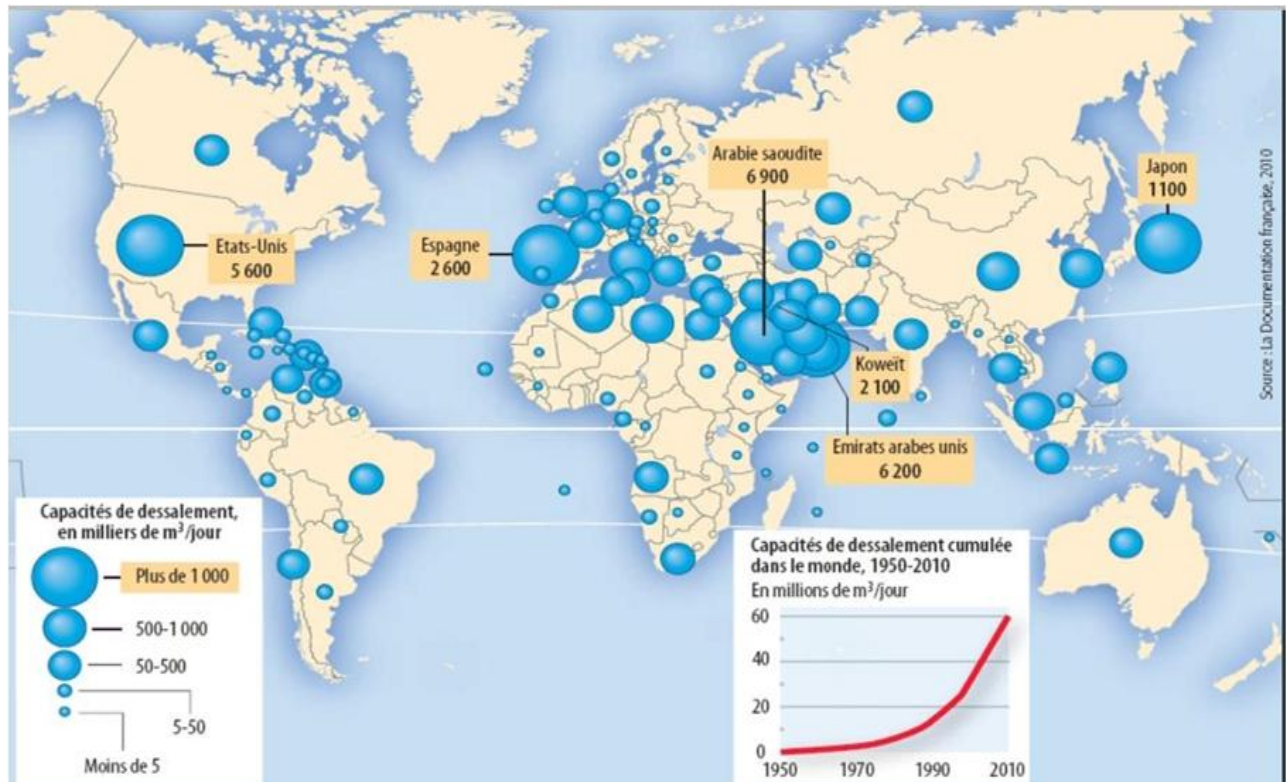


Figure I.4 : La capacité de dessalement à l'échelle mondiale [27].

I.3.5. Développement du dessalement en Algérie

Le dessalement de l'eau de mer en Algérie joue un rôle essentiel dans la stratégie nationale visant à sécuriser l'approvisionnement en eau. Face aux défis liés au changement climatique, à la diminution des ressources en eau douce et à la croissance démographique, le pays a fortement investi dans le développement de ces technologies. Aujourd'hui, plusieurs stations de dessalement sont implantées le long du littoral algérien, et de nouveaux projets sont en cours afin d'augmenter les capacités nationales de production.

Technologies :

Les usines de dessalement utilisent principalement la technologie de l'osmose inverse, ces installations ont été réalisées sous la supervision de la Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures (Sonatrach), à travers sa filiale Algerian Energy Company (AEC), chargée de la réalisation et de l'exploitation des nouvelles stations [28].

Les principales unités de dessalement :

Les grandes unités de dessalement sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Les principales unités de dessalement en Algérie [29].

Nom	Wilaya	Année de mise en service	Capacité m ³ /j
Kahrama Arzew	Oran	2005	90 000
El-Hamma	Alger	2008	200 000
Skikda	Skikda	2009	100 000
Beni Saf	Ain Timouchent	2009	200 000
Mostaganem	Mostaganem	2010	200 000
Honaine	Tlemcen	2010	200 000
Souk Tlata	Tlemcen	2010	200 000
Douaouda	Tipaza	2010	120 000
Cap Djinet	Boumerdès	2010	100 000
Mactaa	Oran	2010	500 000
Oued Sebt	Tipaza	2010	100 000
Ténès	Chlef	2010	200 000
Echatt	El Taref	2011	500 000
El Marsa	Alger	2022	60 000
Corso	Boumerdès	2023	80 000

Il existe également en Algérie plusieurs stations de dessalement monobloc. Une station monobloc de dessalement constitue une installation compacte, préassemblée et autonome, qui regroupe dans un seul module toutes les étapes de traitement de l'eau de mer (prétraitement, filtration et osmose inverse). Elle permet ainsi une mise en service rapide et une exploitation simplifiée. Les stations sont réparties le long du littoral, avec des capacités variant de 5000 à 10 000 m³/jour, certaines étant déjà en service et d'autres encore en construction [30].

Les nouvelles stations mise en service :

Les nouvelles stations de dessalement mises en service en 2025 sont exploitées par la société Algerian Energy Company (AEC), filiale du groupe Sonatrach (voir Tableau I.4).

Tableau I.4 : Les nouvelles stations de dessalement mise en service en Algérie [31].

Nom	Wilaya	Année de mise en service	Capacité m ³ /j
Cap Djinet 2	Boumerdès	2025	300 000
Fouka 2	Tipaza	2025	300 000
Koudiat Eddraouch	El Taref	2025	300 000
Tighremt	Bejaïa	2025	300 000
Cap Blanc	Oran	2025	300 000

I.4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer

I.4.1. Composition chimique et sels dissous

La composition ionique des océans ouverts est remarquablement constante, avec une forte dominance des ions chlorure et sodium qui représentent environ 85 % de la masse totale des sels dissous. Les mers fermées et les grands lacs salés affichent une variabilité plus importante dans leur composition chimique. Cette différence s'explique principalement par les phénomènes d'évaporation intense qui entraînent la concentration progressive des eaux de surface, initialement moins salées, et favorisent des modifications dans les proportions relatives des ions par rapport à celles observées dans l'eau de mer classique [32].

La composition minérale de l'eau de mer est présentée dans le Tableau I.5.

Tableau I.5 : Composition minérale de l'eau de mer méditerranéenne [33].

Cations	Quantité (mg/l)	Anions	Quantité (mg/l)
Sodium (Na^+)	11 035	Chlorures (Cl^-)	19 841
Magnésium (Mg^{2+})	1 330	Sulfates (SO_4^{2-})	2 769
Calcium (Ca^{2+})	418	Bicarbonates (HCO_3^-)	146
Potassium (K^+)	397	Bromures (Br^-)	68
Strontium (Sr^{2+})	14	Fluorures (F^-)	1,4
Salinité totale : 36 047 mg/L			

Sels dissous :

La quantité de sels dissous dans l'eau de mer varie selon que la mer soit ouverte ou fermée (Voir Tableau I.6). Cependant, dans les mers ouvertes, la proportion des différents sels présents reste relativement constante. Par exemple, les ions sodium et chlorure représentent environ 85 % de la masse totale des sels dissous [34].

Tableau I.6 : la salinité des différentes mers [32].

Mer	Teneurs en sels (g/l)
Mer Méditerranée	35 à 40
Mer Rouge	40 à 41
Mer Morte	270
Mer Caspienne	13
Mer Baltique	17
Golfe Arabo-Persique	39 à 43
Mer Noire	20

I.4.2. Paramètres physiques

Les paramètres physiques de l'eau de mer influencent directement les procédés de dessalement et les performances des unités de traitement. Parmi les principaux paramètres physiques, on distingue la température, la densité et la turbidité.

1. Température

La température de l'eau de mer peut varier sur les côtes de quelques degrés centigrades sous l'influence des courants polaires jusqu'à 35 °C autour de la péninsule arabique [33]. Cette température peut être bénéfique à certains procédés de dessalement tout en étant nuisible à d'autres.

2. Densité

Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1,035 à 1,036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression. La densité est mesurée par le densimètre ou hydromètre à flotteur [35].

3. Turbidité

La turbidité de l'eau de mer reflète la quantité de particules en suspension, telles que les sédiments, le plancton et la matière organique. Elle influence la pénétration de la lumière dans l'eau, la photosynthèse marine et peut affecter les procédés de traitement ou d'analyse chimique. Les valeurs varient fortement selon la proximité des côtes, les apports fluviaux et l'agitation des fonds marins [36].

I.4.3. Paramètres chimiques

Les paramètres chimiques de l'eau de mer ont une influence importante sur les procédés de dessalement et sur la qualité de l'eau traitée. Parmi les principaux paramètres chimiques, on distingue le pH, la conductivité, la dureté ainsi que la présence des métaux lourds.

1. pH

Le pH de l'eau de mer varie habituellement entre 7,6 et 8,4, avec une moyenne proche de 8,1. Cependant, cette valeur moyenne connaît une diminution progressive liée à l'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. En se dissolvant dans l'eau de mer, le CO₂ accroît l'acidité du milieu, ce qui entraîne une réduction graduelle du pH océanique [37].

2. Conductivité

La conductivité de l'eau de mer varie généralement entre 44 000 et 58 000 µS/cm, avec une moyenne proche de 50 000 µS/cm. Elle est fortement liée à la salinité, et celle-ci peut être estimée en multipliant la conductivité par un facteur d'environ 0,69 [37].

3. Dureté

La dureté d'une eau correspondant à la présence des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Elle est notée TH Dureté Total. On peut citer deux duretés :

a. Dureté temporaire : indique la concentration en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui précipitent après ébullition d'eau.

b. Dureté permanente : correspondant à la concentration en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui restent en solution après ébullition d'eau. la dureté d'une eau de mer est moyenne de 705°F [34].

4. Métaux lourds

L'eau de mer peut contenir des métaux lourds qui sont classés selon leur degré de toxicité décroissant : Mercure, Cadmium, Plomb, Argent, Zinc, Nickel, Cobalt... Leur toxicité est déterminée par la forme chimique dans laquelle ils se présentent. Les métaux lourds constituent un problème de santé publique réel. En raison de leur composition chimique, ils ne peuvent pas être dégradés par les bactéries [38].

I.4.4. Présence de matières organiques

Les matières organiques présentes dans l'eau de mer peuvent avoir différentes origines, telles que les rejets de l'industrie agroalimentaire, les eaux usées domestiques et les activités agricoles. Les matières organiques peuvent être décomposées par certaines bactéries et ainsi se dissoudre dans l'eau de mer, ce qui représente un enjeu économique. La matière organique présente dans les eaux naturelles constitue un milieu très diversifié, mais relativement stable dans le contexte aquatique. La majorité de cette matière organique est constituée de composés humiques, contenant de 30 à 50% de carbone organique dissous et pouvant atteindre jusqu'à 90% dans des eaux plus colorées [38].

I.5. Technologies de dessalement

Il existe plusieurs procédés de dessalement qui peuvent être classés en deux grandes familles, comme le montre la Figure I.5.

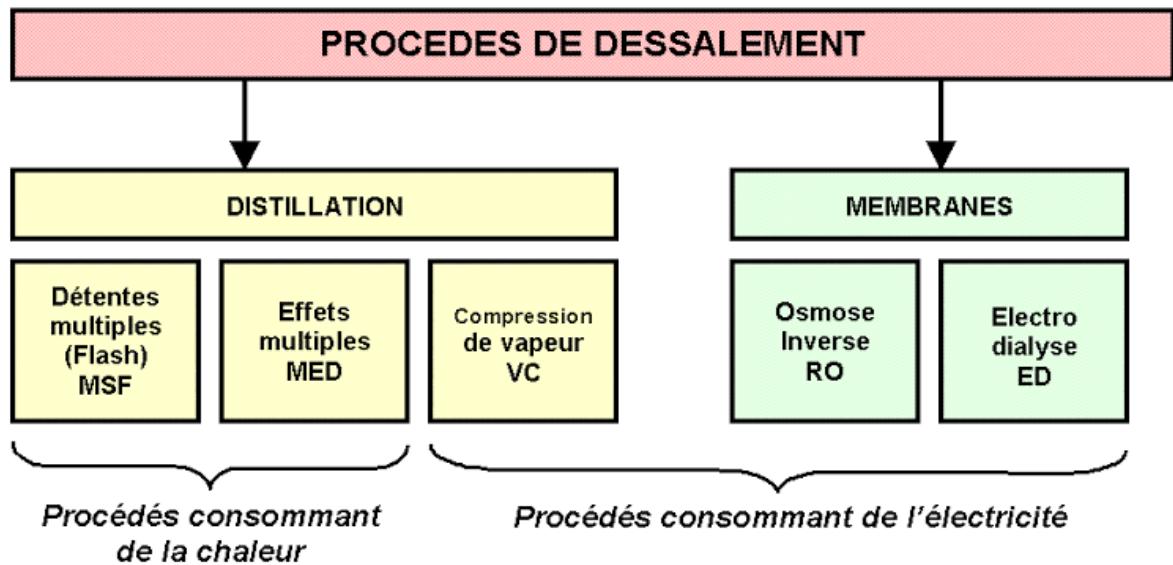


Figure I.5 : Les procédés de dessalement [39].

I.5.1. Les procédés thermiques

Les procédés thermiques reposent sur le changement de phase de l'eau (évaporation–condensation) afin de séparer l'eau des sels dissous.

a. Distillation à simple-effets :

Le procédé repose sur les phénomènes d'évaporation et de condensation. L'eau de mer est introduite dans une chambre fermée, appelée évaporateur, où elle est chauffée par un échangeur thermique alimenté par une source de chaleur. Sous l'effet de cette élévation de température, l'eau atteint son point d'ébullition et se transforme en vapeur, tandis que les sels dissous et les impuretés demeurent dans la solution restante. La vapeur générée est ensuite dirigée vers une surface froide ou un condenseur, généralement refroidi par de l'eau de mer, où elle se liquéfie pour produire de l'eau douce. Enfin, un système de pompage assure la récupération de l'eau condensée ainsi que l'évacuation de la solution résiduelle concentrée en sels, appelée saumure [40] (voir Figure I.6).

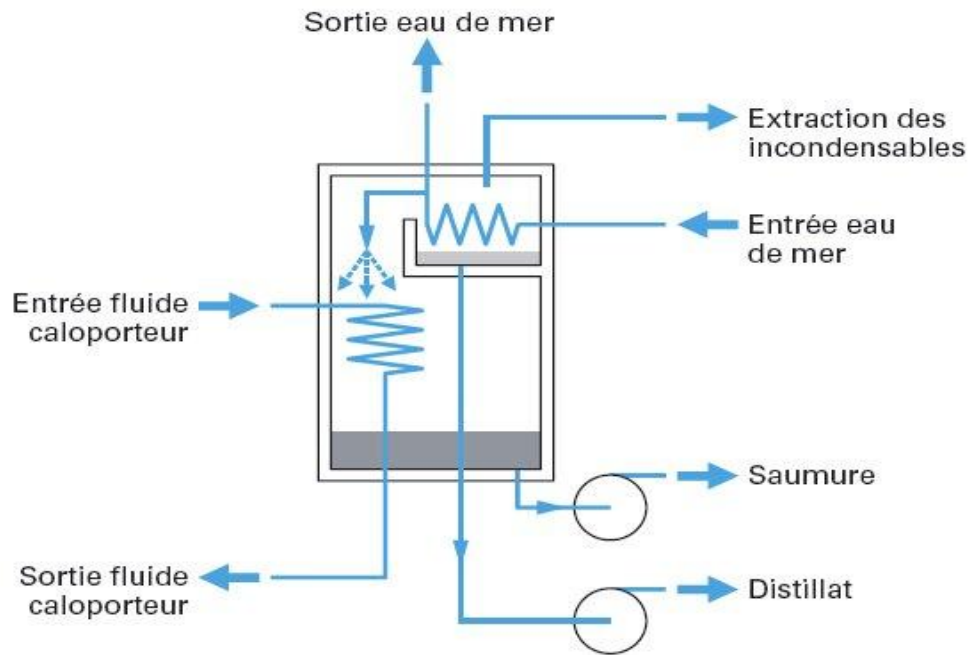


Figure I.6 : Le principe de la distillation à simple effet [41].

b. Multiple effet distillation (MED) :

La distillation à multiples effets vise à améliorer le rendement énergétique du procédé d'évaporation–condensation en réutilisant la chaleur libérée lors de la condensation de la vapeur. La vapeur produite dans un premier évaporateur fournit l'énergie nécessaire au chauffage d'un second effet fonctionnant à une pression et une température plus faible, et ainsi de suite.

Dans le premier effet, l'eau de mer est chauffée et une partie s'évapore. Une fraction de la vapeur se condense au contact d'un échangeur parcouru par de l'eau plus froide, tandis que le reste est dirigé vers l'effet suivant pour provoquer une nouvelle évaporation. La saumure chaude contribue également au transfert de chaleur vers l'étage suivant. L'eau distillée produite à chaque effet est récupérée dans un collecteur, tandis que la saumure se concentre progressivement en sels [41] (voir Figure I.7).

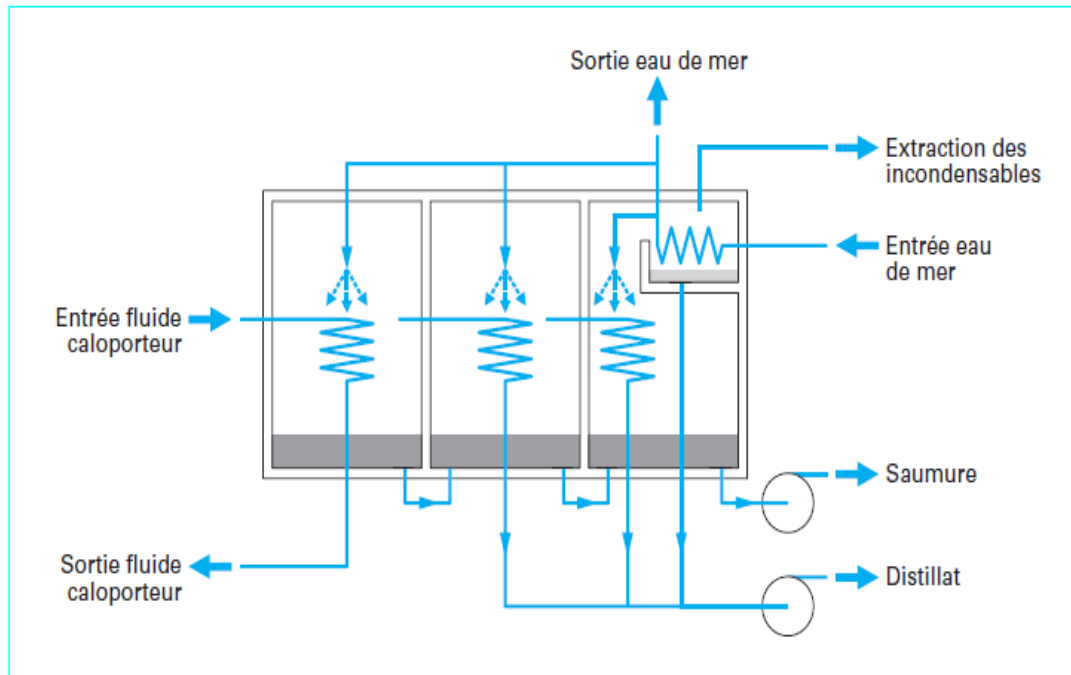


Figure I.7 : Le principe de la distillation à effet multiple [41].

c. Distillation par détente successives

Le procédé flash fonctionne en maintenant l'eau sous pression pendant le chauffage. Une fois que l'eau atteint une température d'environ 120 °C, elle est introduite dans un compartiment où la pression est réduite de manière significative. Cette baisse de pression entraîne une vaporisation rapide de l'eau, appelée « flash ». Une partie de la vapeur se condense ensuite sur des tubes réfrigérés situés dans la partie supérieure du compartiment, et l'eau condensée est recueillie dans des réservoirs placés en dessous. Tandis que le liquide restant poursuit son écoulement, il est dirigé vers l'étage suivant du système, où une pression encore plus faible provoque une nouvelle vaporisation, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'eau soit traitée ou que la saumure concentrée soit évacuée [42] (voir Figure I.8).

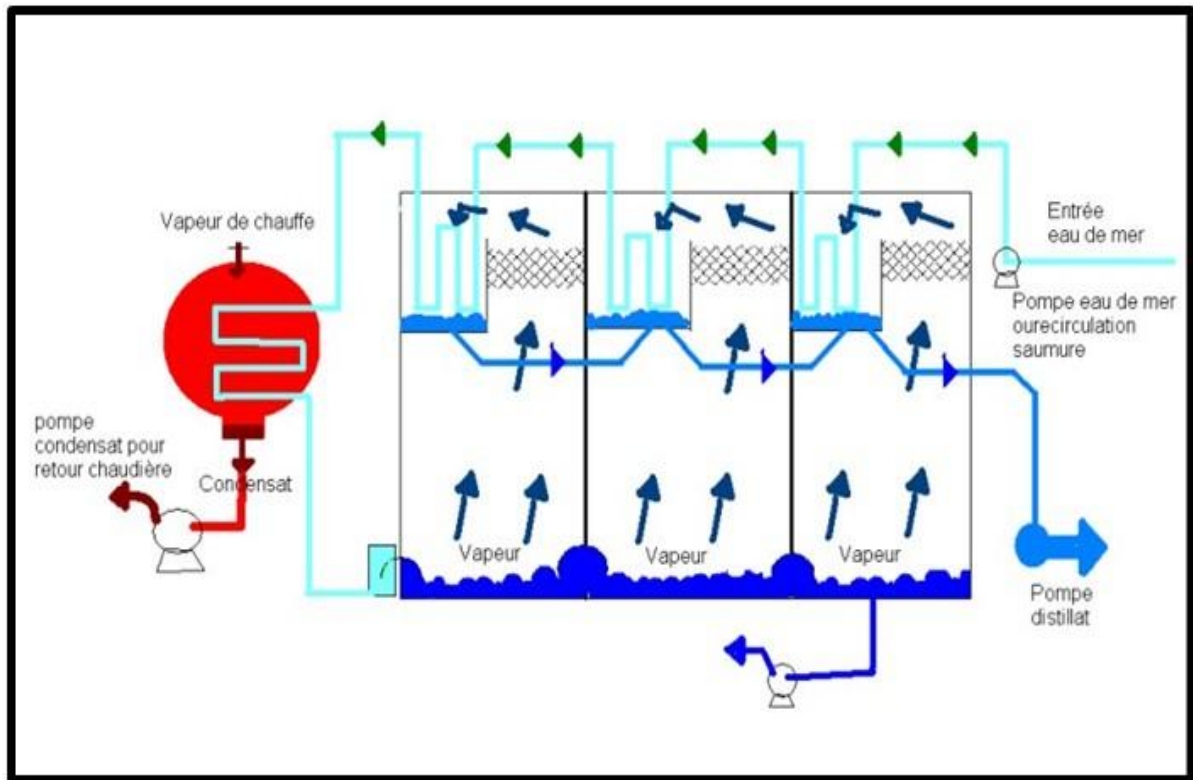


Figure I.8 : Le principe de la distillation flash multi-étagée [43].

d. Distillation par compression de vapeur

L'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermique isolée. La vapeur produite est aspirée par le compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée [44].

La vapeur comprimée est réutilisée pour chauffer l'eau dans un nouveau cycle, produisant ainsi de l'eau distillée. Ce procédé nécessite de l'énergie électrique et consomme en moyenne entre 7 et 14 kWh/m³, ce qui le rend moins écologique. Il est surtout utilisé dans les régions disposant d'une énergie abondante, comme les pays du Golfe [45] (voir Figure I.9).

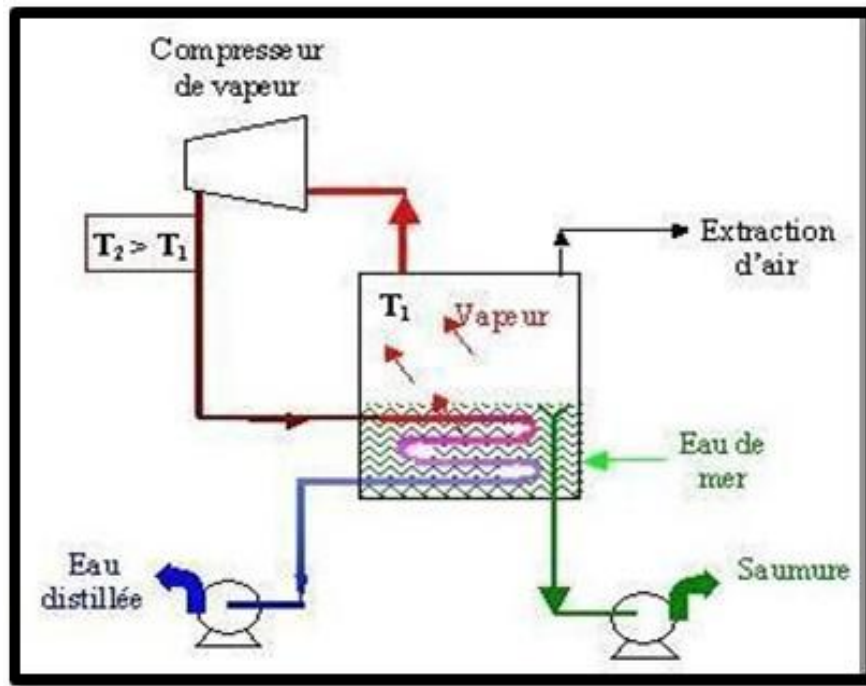


Figure I.9 : Le principe de la distillation à compression de vapeur [45].

I.5.2. Les procédés membranaires

Les membranes possèdent une propriété sélective leur permettant de différencier les ions dissous de l'eau et ainsi d'assurer leur séparation. À partir de ce principe, deux principales technologies de dessalement membranaire ont été développées et sont aujourd'hui largement exploitées : l'électrodialyse et l'osmose inverse, qui reposent chacune sur des mécanismes distincts pour effectuer cette séparation [46].

a. L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille.

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ [47].

b. L'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique de séparation qui repose sur la migration des ions à travers des membranes sous l'effet d'un champ électrique. Elle utilise des membranes échangeuses de cations (MEC) et d'anions (MEA), disposées en alternance, permettant d'orienter sélectivement le déplacement des ions (voir Figure I.10).

Sous l'action du courant électrique, les ions se déplacent vers les électrodes opposées, ce qui entraîne la formation de compartiments appauvris en sels (diluât) et d'autres enrichis en sels (concentrat). L'ensemble est regroupé dans un empilement de cellules maintenues sous pression, constituant ainsi le module d'électrodialyse.

L'électrodialyse est idéale pour les eaux saumâtres dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer. Les membranes d'électrodialyse permettent aux ions de circuler tout en restant étanches. L'inverse est vrai pour les membranes utilisées en osmose inverse [48].

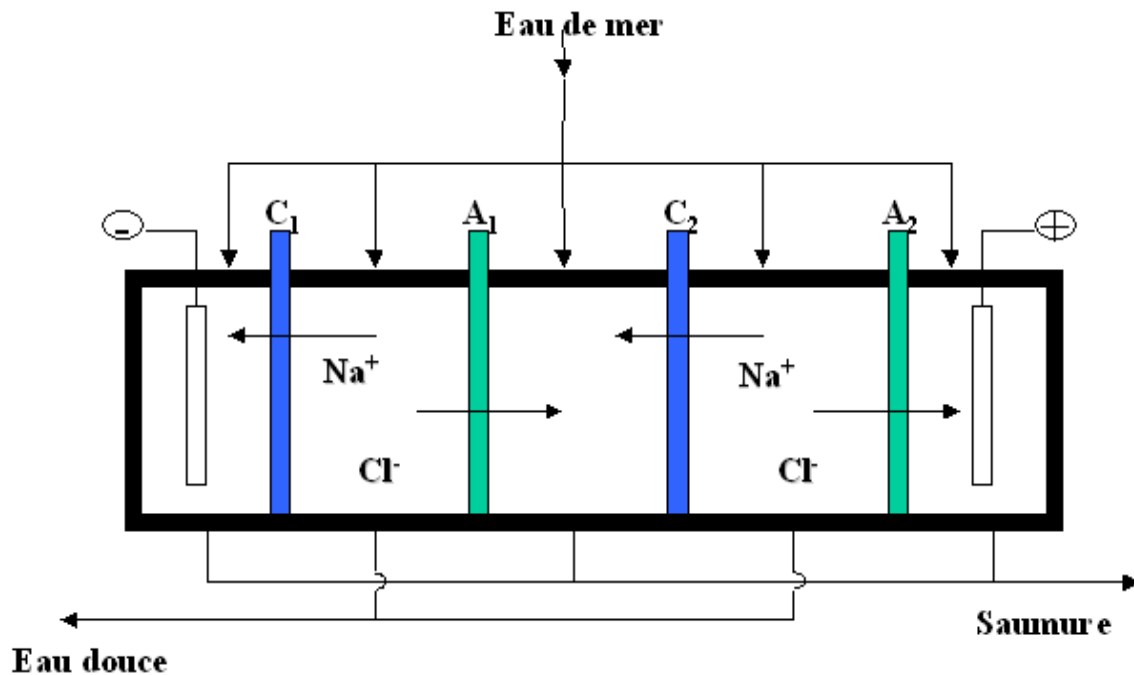


Figure I.10 : Le principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse [49].

c. Comparaison des procédés

Dans le tableau suivant nous présentons une comparaison entre les différents procédés de dessalement selon différents critères comprenant le coût, la consommation de l'énergie, l'impact environnemental...etc.

Tableau I.7 : comparaison de différents procédés de dessalement [[50],[51],[52],[53]].

Critères	Distillation simple	MED	MSF	Osmose inverse	Électrodialyse
Coût d'installation	Faible	Élevé	Très élevé	Modéré	Modéré
Energie (kWh/m ³)	≥1000	3,5-7	8-16	3-6	1-5
Impact environnemental	Rejet thermique	Rejet thermique modéré	Rejet thermique élevé	Saumure concentrée	Déchets chimiques
Rendement	<30%	30-40%	20-35%	40-50%	50-90%
Adaptabilité	Zones isolées	Cogénération	Grandes installation (usines)	Polyvalente (toute échelles)	Eaux saumâtres
Avantage clé	Simplicité technologique	Efficacité thermique	Fiabilité	Flexibilité	Faible énergie
Inconvénient majeur	Consommation énergétique très élevée	Complexité	Encombrement	Encrassement membranaire	Limite de salinité

I.5.3. Autres techniques alternatives

En complément des principales techniques de dessalement, d'autres procédés peuvent être utilisés pour la production d'eau douce. Ces techniques, moins répandues, sont généralement destinées à des applications spécifiques ou à de faibles capacités de production. Parmi elles, on distingue l'échange d'ions, la congélation et la distillation solaire.

a. L'échange d'ions

La technologie de l'échange d'ions est idéale pour éliminer les contaminants spécifiques de l'eau potable. Comparé à d'autres procédés, l'échange d'ions est très sélectif et se trouve utilisé dans de nombreuses applications à grande échelle, pour l'élimination ciblée de la dureté de l'eau, des nitrates, du bore, des matières organiques naturelles, des perchlorates, des chromates, de l'uranium et d'autres métaux [54].

L'échange ionique est un processus réversible où les ions présents dans la structure d'un matériau appelé « échangeur ionique » sont remplacés par des ions provenant de la solution en contact avec cet échangeur [55].

b. La congélation

Le dessalement par congélation repose sur le phénomène où, en abaissant la température d'une solution saline sous 0 °C, seule l'eau pure se solidifie en glace, tandis que les sels se concentrent dans le liquide restant (saumure). La récupération de l'eau douce implique ensuite

la fusion de cette glace, une étape délicate en raison de la fine couche de saumure qui entoure souvent les cristaux, compliquant une séparation complète [56].

Le processus de dessalement par congélation se déroule en trois étapes principales :

- **Prétraitement de l'eau de mer** : élimination des solides en suspension et des gaz dissous.
- **Formation des cristaux de glace** : refroidissement de la solution saline pour cristalliser l'eau pure, en favorisant des cristaux de grande taille.
- **Lavage et ressuage des cristaux** : lavage des cristaux de glace pour éliminer la saumure résiduelle, utilisant environ 5 % de l'eau produite dans les procédés continus [57].

c. La distillation solaire

La distillation solaire, mise en œuvre pour la première fois en 1872 dans les mines de nitrate du nord du Chili, utilise l'effet de serre pour produire de l'eau douce à partir d'eau salée. Le dispositif se compose d'un bassin à fond noir rempli de l'eau à traiter et recouvert d'un vitrage, qui permet de capter et concentrer l'énergie solaire.

Ce procédé repose sur le chauffage direct de l'eau par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée. La vapeur ainsi générée se condense sur le vitrage, légèrement incliné et plus froid, et le condensat est recueilli dans des gouttières (voir Figure I.11). Ce principe est simple et fiable, mais son rendement reste limité à environ 4 à 5 litres par jour et par m² [58].

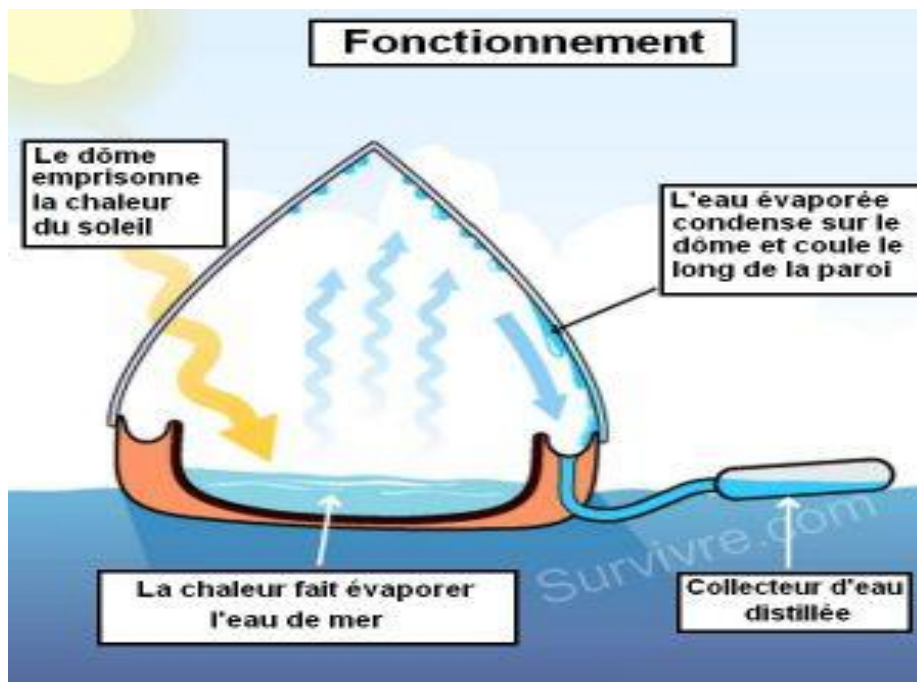


Figure I.11 : Procédé de distillation solaire de l'eau de mer [59].

I.6. L'osmose inverse : principe et fonctionnement

I.6.1. Principe de l'osmose inverse

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Considérons un dispositif à deux compartiments, séparées par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure I.12). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (voir Figure I.12), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse [47].

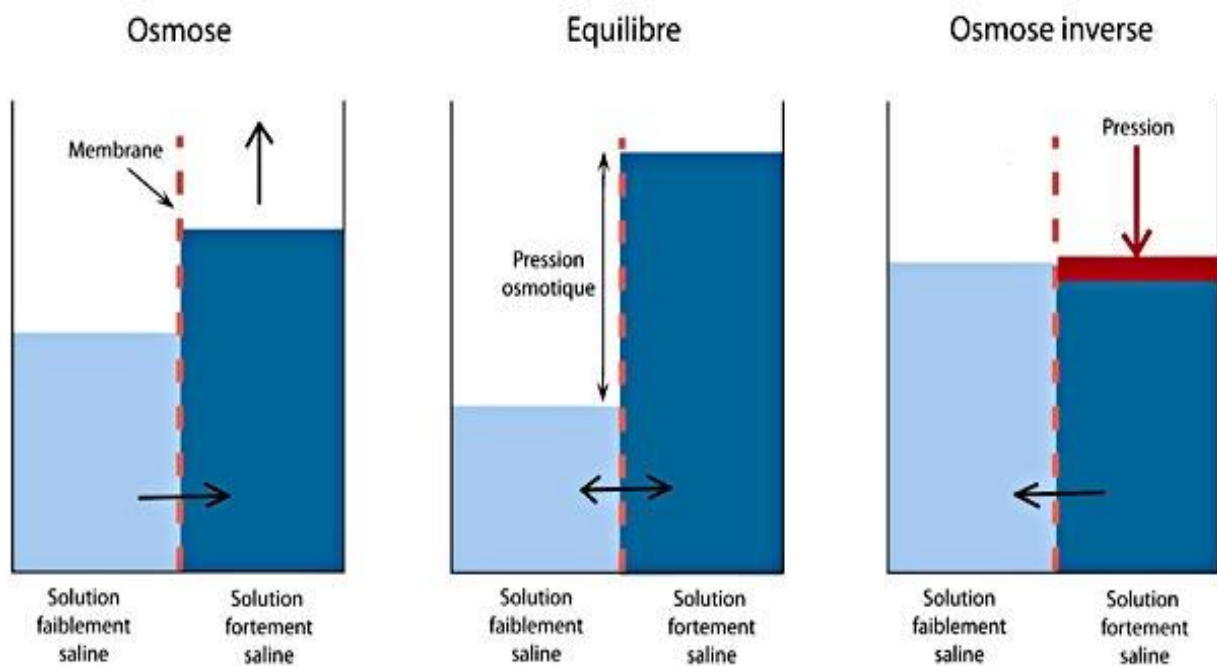


Figure I.12 : Principe de l'osmose inverse [60].

I.6.2. Description d'une installation type d'osmose inverse

Le système d'osmose inverse est composé principalement de :

- Membrane.
- Le module contenant la membrane
- La pompe haute pression.
- Éventuellement un système de récupération d'énergie.
- Le poste de traitement. Ci-dessous (Figure I.13) une représentation d'une filière de traitement par osmose inverse :

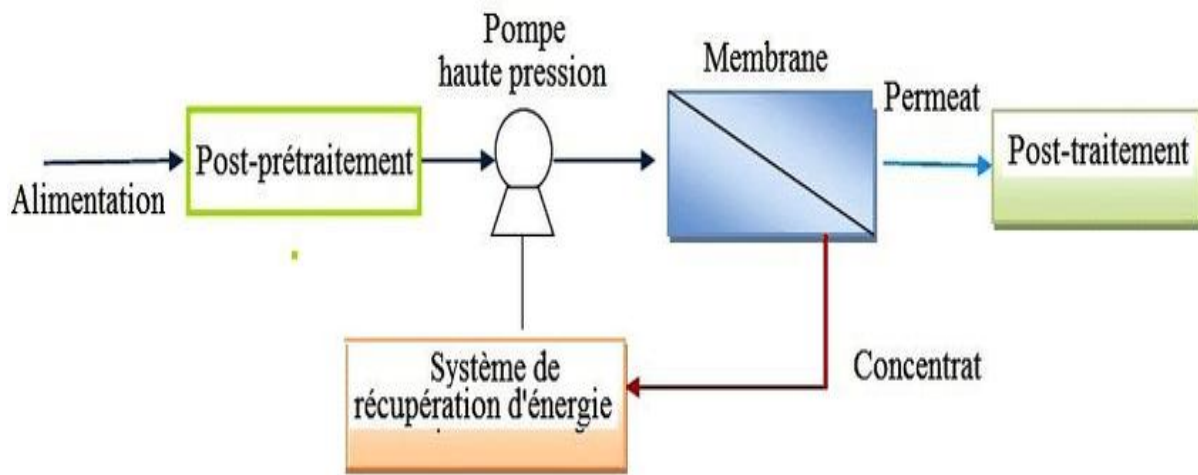


Figure I.13 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse [61].

I.6.3. Paramètres influençant la performance des membranes

Les performances des procédés membranaires, notamment l'osmose inverse, dépendent fortement des conditions d'exploitation et des caractéristiques de l'eau d'alimentation. Plusieurs paramètres opérationnels et physico-chimiques interagissent et influencent directement le flux de perméat ainsi que la qualité de l'eau produite. Parmi les principaux facteurs étudiés figurent la salinité, le taux de récupération, la température et la pression d'alimentation.

1. Effet de la salinité :

L'augmentation de la salinité de l'eau d'alimentation, exprimée par la concentration en solides dissous totaux (TDS), influence directement les performances d'un système d'osmose inverse. Lorsque la salinité augmente, la pression osmotique de l'eau d'alimentation s'élève également. Si la pression appliquée au système reste constante, cela entraîne une diminution de

la pression nette motrice, ce qui se traduit par une réduction du flux de perméat et donc par une baisse de la production d'eau douce.

Par ailleurs, une concentration plus élevée en sels accroît le gradient de concentration à travers la membrane. Cela favorise le passage des ions dissous à travers la membrane, entraînant une diminution du taux de rejet des sels et une détérioration de la qualité de l'eau produite [62].

2. Effet du taux de récupération sur la performance des membranes

Une augmentation du taux de récupération entraîne une diminution progressive du flux de perméat. Lorsque la pression osmotique devient supérieure à la pression appliquée, la pression nette motrice (NDP) n'est plus suffisante pour maintenir le passage de l'eau à travers la membrane, et la production d'eau douce cesse [62].

3. Effet de la température :

L'augmentation de la température réduit la viscosité de l'eau salée, ce qui améliore la perméabilité de la membrane et augmente le flux de perméat. En général, on observe une augmentation d'environ 3 % du flux pour chaque élévation de 1 °C. Toutefois, la hausse de température accroît également la pression osmotique et favorise le passage des sels à travers la membrane, ce qui peut altérer la qualité de l'eau produite.

L'augmentation du flux est généralement plus importante que la dégradation de la qualité, des températures élevées accélèrent l'encrassement biologique et peuvent provoquer une compaction irréversible de la membrane. Pour cette raison, il est recommandé de maintenir la température de fonctionnement en dessous de 45 °C afin d'éviter des dommages permanents [63].

4. Effet de la pression d'alimentation sur la performance des membranes

L'augmentation de la pression d'alimentation entraîne une hausse du flux de perméat pour une eau de même salinité et température, car la pression nette motrice à travers la membrane augmente proportionnellement. Même si le transport des sels ne soit pas directement affecté par la pression, la production d'un volume d'eau plus important avec la même quantité de sels entraîne une réduction apparente de la concentration en sels dans le perméat, donnant l'impression d'une amélioration du taux de rejet des sels [64].

I.7. Contraintes techniques et défis industriels

I.7.1. Entartrage

L'entartrage fait référence à l'accumulation progressive de dépôts minéraux sur les surfaces d'échange. La présence d'ions dissous tels que le calcium, le magnésium, les bicarbonates et les sulfates dans les eaux salines en est la cause principale. Ces ions sont susceptibles de réagir et de créer des composés peu solubles qui précipitent, notamment le carbonate de calcium (CaCO_3), l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et le sulfate de calcium (CaSO_4) etc...[65].

En raison de la diversité de leurs origines, les dépôts de tartre ont un impact significatif sur le fonctionnement des installations de dessalement. Ils peuvent :

- Réduire la section utile des conduites et des membranes, limitant le passage de l'eau ;
- Provoquer une dégradation progressive des surfaces de contact ;
- Entraîner des variations du débit, en raison de leur forte adhérence ;
- Accroître les pertes de charge pour un débit constant, augmentant ainsi la consommation énergétique ;
- Obstruer partiellement ou totalement les conduites, du fait de l'accumulation de dépôts minéraux et de la diminution du diamètre effectif [66].

I.7.2. Le Colmatage

Les eaux brutes peuvent contenir des substances organiques et des micro-organismes. Dans les systèmes d'osmose inverse, ces derniers, retenus par les membranes, peuvent :

- S'accumuler et créer des conditions favorables à leur prolifération ;
- Former un biofilm qui entraîne le colmatage des membranes ;
- Réduire la capacité de production des installations ;
- Augmenter les coûts d'exploitation liés au nettoyage et à la maintenance.

Pour limiter ce phénomène, un prétraitement adéquat est recommandé, pouvant inclure une étape de coagulation-floculation suivie d'une filtration afin de protéger les membranes [66].

I.7.3. La Corrosion

La corrosion désigne la détérioration chimique des substances, en particulier les métaux et alliages, résultant de leur interaction avec des fluides ou des gaz. Ce phénomène représente un enjeu crucial dans les installations de dessalement, notamment lorsqu'il est exposé à des agents corrosifs naturels tels que l'air ou l'eau de mer, ce qui peut entraîner des atteintes significatives sur les équipements [67].

Les principales conséquences de la corrosion dans les installations de dessalement sont :

- **Rupture des conduites** : la corrosion affaiblit les tuyaux et peut entraîner des fissures ou des ruptures, provoquant des interruptions de service.
- **Augmentation de la rugosité des surfaces** : les dépôts et piqûres créés par la corrosion rendent les surfaces rugueuses, ce qui favorise l'accumulation de biofilms et de tartre, réduisant l'efficacité des membranes.
- **Fuites d'eau** : les perforations ou fissures causées par la corrosion peuvent entraîner des pertes importantes d'eau, réduisant le rendement de l'installation.

- **Pollution de l'eau produite par des agents extérieurs** : la corrosion peut libérer des particules métalliques et d'autres contaminants dans l'eau traitée, affectant sa qualité.

Par conséquent, la corrosion représente un enjeu important pour les installations de dessalement, nécessitant la mise en place de stratégies de prévention et de contrôle strictes afin de garantir la durabilité et le bon fonctionnement des systèmes.

I.8. Impacts environnementaux du dessalement

Le dessalement de l'eau de mer est devenu comme une solution stratégique face à la rareté croissante des ressources en eau douce. Cependant, son développement soulève des questions environnementales importantes qu'il convient d'examiner [68]. Voici un aperçu des principaux enjeux :

I.8.1. Rejets de saumure

La saumure représente un sous-produit inévitable des procédés de dessalement et elle est généralement rejetée dans le milieu marin. Cette effluente se caractérise par une concentration élevée en sels dissous totaux (TDS), pouvant atteindre environ 70 000 ppm. Sa salinité moyenne peut s'élever à 63,8 g/L, comparativement à 38,95 g/L pour l'eau d'alimentation, ce qui traduit une augmentation significative de la charge saline après traitement [69].

Les impacts environnementaux associés aux rejets de saumure sont principalement liés à cette forte salinité. Cependant, la présence résiduelle de produits chimiques utilisés lors du prétraitement et du nettoyage des installations, ainsi qu'une température parfois plus élevée que celle du milieu récepteur, peuvent accentuer ces effets. Perturbant localement l'équilibre écologique [70].

Le rejet continu d'eaux hypersalines et à température élevée peut diminuer l'oxygène dissous au fond marin, provoquant des épisodes d'anoxie. Cette situation peut être fatale pour certaines espèces, réduire la biodiversité, affecter les récifs coralliens, diminuer les populations de plancton et de poissons à proximité des zones de rejet.

Les effets écologiques des rejets de saumure sur différents aspects de l'écosystème marin :

- Diminution de la diversité et de l'abondance du macrofaune benthique
- Diminution de la lumière d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales.
- Pour les autres espèces : Des recherches ont été élaborées sur les effets de rejets de saumure sur des espèces indicatrices comme les échinodermes (*paracentrus lividus*) et mysidacés (*leptomysis posidonie*) [71].

I.8.2. Consommation énergétique et émissions de CO₂

Les procédés de dessalement de l'eau sont généralement très gourmands en énergie, même si les besoins ont tendance à diminuer grâce aux progrès de l'osmose inverse et à l'émergence de nouvelles technologies plus performantes.

Cette énergie provient le plus souvent de combustibles fossiles, dont l'usage entraîne l'émission de polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que des particules fines. Par exemple, il a été estimé que le système de production d'eau dessalée en Espagne émettait environ 680 grammes de CO₂ par mètre cube d'eau produite. Pour des volumes de production de plusieurs millions de mètres cubes par jour, ces émissions peuvent atteindre plusieurs milliers de tonnes de CO₂ quotidiennes, contribuant de manière significative à l'effet de serre dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique [72].

I.8.3. Mesures de réduction des impacts

Pour limiter les impacts environnementaux du dessalement, plusieurs mesures peuvent être mises en œuvre :

- **Optimiser la consommation énergétique** : utiliser des technologies efficaces comme l'osmose inverse à haut rendement et recourir aux énergies renouvelables (solaire, éolienne) pour limiter les émissions de CO₂ [19].
- **Gérer les rejets de saumure** : diluer la saumure avant rejet, utiliser des diffuseurs ou rejeter en profondeur pour réduire l'effet sur la salinité locale ; valoriser la saumure pour produire du sel ou d'autres minéraux [73].
- **Limiter les produits chimiques** : privilégier des prétraitements mécaniques ou biologiques afin de réduire l'utilisation d'anti-incrustants et de désinfectants chimiques [74].
- **Protéger la biodiversité marine** : installer des écrans et pompes adaptées pour éviter l'aspiration de poissons et plancton, et surveiller régulièrement les zones de rejet pour limiter les impacts sur les écosystèmes [75].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les généralités sur le dessalement de l'eau de mer ainsi que les principales problématiques liées à la rareté des ressources hydriques dans le monde, particulièrement en Afrique du Nord et en Algérie. Nous avons également exposé les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer, les différentes technologies de dessalement existantes, ainsi que les contraintes techniques et les impacts environnementaux associés à ces procédés.

L'étude comparative des différentes techniques a montré que l'osmose inverse représente aujourd'hui la technologie la plus utilisée grâce à sa bonne efficacité, sa flexibilité d'exploitation et sa consommation énergétique relativement plus faible par rapport aux procédés thermiques. C'est d'ailleurs la technologie privilégiée dans la majorité des stations de dessalement en Algérie.

Malgré le coût élevé des installations, le dessalement de l'eau de mer reste l'une des solutions les plus efficaces pour faire face au manque d'eau potable dans le monde. En Algérie, il constitue un enjeu stratégique majeur pour garantir un approvisionnement durable en eau, répondre à la croissance des besoins de la population et renforcer la sécurité hydrique nationale.

Dans ce contexte, le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet 2, qui constitue le cadre de la présente étude.



Chapitre II

*Présentation de la station de dessalement
d'eau de mer de Cap Djinet 2*



II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de fournir un aperçu détaillé de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, un site d'étude stratégique situé dans la wilaya de Boumerdès. Cette installation répond à un besoin croissant en approvisionnement en eau douce dans la région de l'est d'Alger. Avec une capacité de production de 300 000 m³/jour, l'usine de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2 joue un rôle essentiel dans la satisfaction des besoins en eau des populations locales et le soutien des diverses activités industrielles.

II.2. Situation géographique

La station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2 est située sur le littoral, à proximité de la ville de Boumerdès. Cap Djinet est une petite ville côtière algérienne située dans la daïra de Bordj Ménéaïel, entourée par Sidi Daoud et Laghata. Cette station assure l'approvisionnement en eau potable des communes de l'est d'Alger.

II.3. Présentation générale de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2

- **Date de mise en service** : mars 2025.
- **Capacité de production** : Cette station est conçue pour produire 300 000 m³ d'eau potable par jour.
- **Objectif** : L'objectif principal est de fournir une eau de qualité conforme aux directives de l'OMS et aux normes algériennes, en respectant des valeurs spécifiques pour le pH, l'alcalinité, l'indice de saturation de Langelier, la dureté totale, la concentration de solides dissous et la concentration de bore [76] (**voir tableau 1.1, Annexe 1**).
- **Maître d'ouvrage et exploitant actuel** : Le maître d'ouvrage est Algerian Desalination Company (ADC), tandis que l'entrepreneur est l'Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers (ENGTP), chargé de l'exploitation et de la maintenance pour une durée de trois ans [76].



Figure II.1 : La station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2.

II.4. Processus du dessalement dans la station de Cap Djinet 2

Le processus de dessalement d'eau de mer de la station de Cap Djinet 2 comprend les étapes suivantes :

- Captage d'eau de mer ;
- Prétraitement ;
- Osmose inverse ;
- Post-traitement ;
- Le stockage et la distribution [76].

II.4.1. Zone de captage d'eau de mer

Le choix de la zone de captage constitue une étape importante dans une station de dessalement, car il influence directement la qualité de l'eau brute ainsi que les performances des étapes de traitement. La prise d'eau doit être implantée dans une zone présentant une faible turbulence et une faible concentration en matières en suspension, afin de limiter les problèmes de colmatage et de protéger les équipements de la station. Elle doit également être éloignée des zones de rejets, des ports, des activités industrielles et écosystèmes marins sensibles afin de réduire les risques de pollution et les impacts sur l'environnement marin [3].

II.4.1.1. Tour de captage d'eau de mer

Une tour de prise d'eau cylindrique est conçue avec un diamètre de 5,9 m au niveau du puits, un diamètre de 7,9 au niveau de la dalle et 7,15 m de hauteur totale. Six (6) grilles filtrantes sont prévues le long du périmètre d'une hauteur de 2 m (voir Figure II.2). Situées à 2 m du fond marin. L'eau est véhiculée à l'intérieur de la conduite par gravité, avec une vitesse d'écoulement inférieure à 1 m/s [76].



Figure II.2 : La tour de captage (photo originale).

II.4.1.2. Canaux de dégrillage : Dégrilleurs et Tamis rotatifs

Les canaux de dégrillage constituent une étape préliminaire essentielle du traitement de l'eau de mer dans les stations de dessalement. Ils protègent les équipements en aval contre les risques de colmatage et assurent la continuité du flux d'eau vers les étapes de traitement suivantes.

Les paramètres des canaux de dégrillage sont présentés dans le **Tableau 1.2.1 de l'Annexe 1**.

a. Dégrilleurs (filtration grossière)

- **Objectif :** Éliminer les ordures et débris volumineux (> 30 mm) afin de protéger les équipements en aval, notamment les pompes et les filtres (voir Figure II.3).

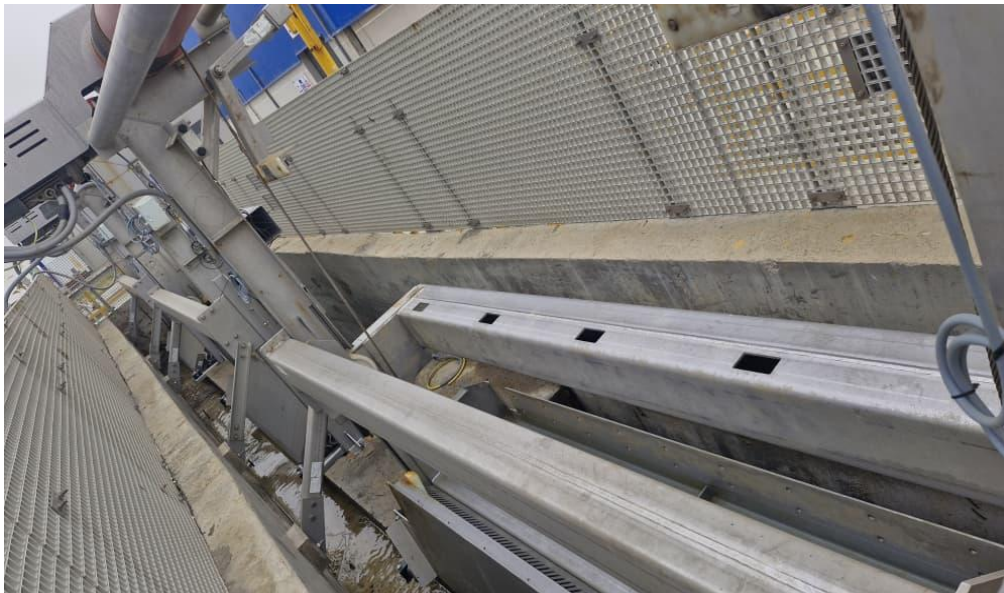


Figure II.3 : Dégrilleur grossier (photo originale).

b. Tamis rotatifs (filtration fine)

- **Objectif :** Éliminer les solides de taille > 4 mm afin de protéger les équipements en aval (voir Figure II.4).



Figure II.4 : Tamis rotatifs (photo originale).

II.4.1.3. Système de pompage d'eau de mer

- **Objectif** : Pomper l'eau de captage depuis la tour de prise d'eau vers les étapes de prétraitement (voir Figure II.5).

Les paramètres du système de pompage d'eau de mer sont présentés dans le **Tableau 1.2.2** de l'Annexe 1.



Figure II.5 : Station de relevage (photo originale).

II.4.2. Système de prétraitement

Le système de prétraitement constitue une étape décisive dans une station de dessalement car il détermine les performances globales du procédé. Un bon prétraitement permet de réduire la turbidité et la charge en matières en suspension, et surtout de protéger les membranes d'osmose inverse contre le colmatage et le biofouling, assurant ainsi leur efficacité et leur durée de vie.

II.4.2.1. Coagulation et Flocculation

1. Coagulation : Destabilisation des liaisons ioniques des espèces présentes dans l'eau de mer, augmentation de la vitesse des particules en suspension et intensification des collisions favorisant la formation de floccs initiaux.

Coagulant : Chlorure ferrique (FeCl_3) [76].

2. Flocculation : Agglomération des particules coagulées et formation de macro-floccs plus faciles à éliminer.

Floculant : Poly électrolyte [76].

3. Système d'agitation : La station est équipée d'agitateurs à hélice tripale. Le prétraitement est assuré par deux lignes, chacune traitant 50 % du débit et comportant deux agitateurs, garantissant un mélange efficace des réactifs et une homogénéisation optimale de l'eau lors des étapes de coagulation et de flocculation [76].

La figure II.6 illustre le bassin de coagulation-flocculation de la station.

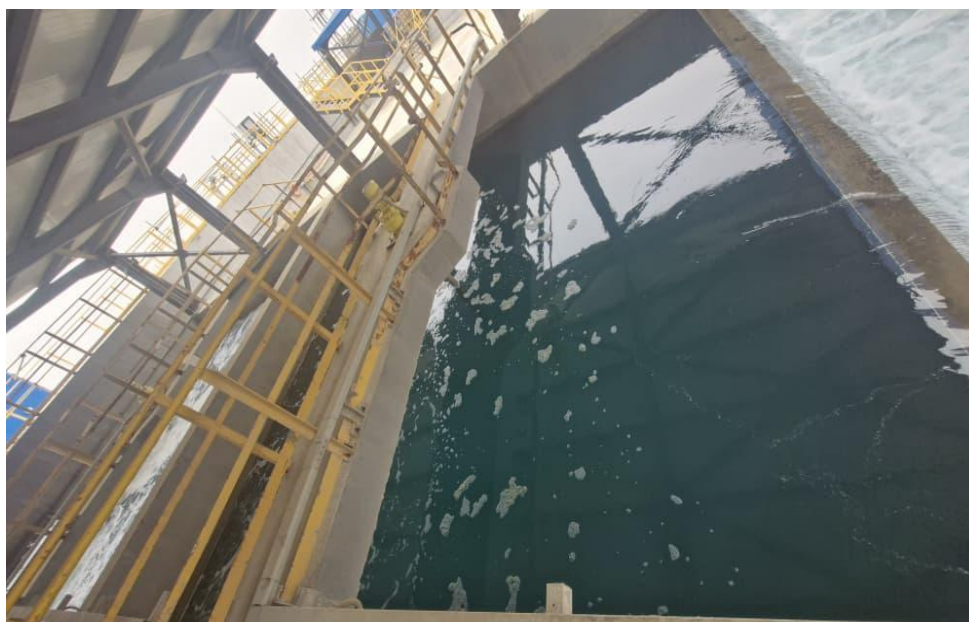


Figure II.6 : Bassin de coagulation-flocculation (photo originale).

II.4.2.2. Décanteurs lamellaires

Les décanteurs lamellaires assurent la clarification de l'eau en permettant la décantation des flocs formés lors de la coagulation-floculation. Ils comprennent deux lignes, chacune composée de 8 décanteurs. Leur structure interne en plaques inclinées augmente la surface de séparation et améliore l'élimination des matières en suspension, tout en optimisant l'espace occupé (voir Figure II.7).

Les principales caractéristiques des décanteurs lamellaires sont présentées dans le **Tableau 1.2.3 de l'Annexe 1**.



Figure II.7 : Décanteurs Lamellaires (photo originale).

II.4.2.3. Réservoir et pompage intermédiaire

Le réservoir intermédiaire d'aspiration, d'un volume de 2 500 m³, assure un temps de rétention suffisant pour maintenir l'alimentation en cas d'arrêt temporaire du pompage d'eau brute.

La station de pompage intermédiaire comprend 6 pompes (5 en service et 1 en réserve). Elle alimente les filtres à sable, les filtres à cartouches et atteint l'entrée du système haute pression avec les conditions nécessaires à son bon fonctionnement [76].

II.4.2.4. Système de filtres à sable pressurisé

Le système de filtres à sable pressurisés comprend 2 lignes de 16 filtres chacune, comme illustré sur la Figure II.8, adaptées à la capacité de production de l'installation.

Chaque filtre présente une surface de 74 m² et assure une performance de filtration d'environ 95 %, garantissant un SDI ≤ 5.

Le média filtrant est constitué de trois couches (anthracite, sable et gravier support), permettant une rétention efficace des matières en suspension [76].

Les principales données de conception du système de filtres à sable pressurisé sont présentées dans le **Tableau 1.2.4 de l'Annexe 1**.

L'indice de densité de colmatage (SDI) est défini par la relation suivante :

$$SDI = \frac{1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)}{15} \times 100$$

Avec :

- t_1 : temps de remplissage de 500 ml d'eau à $t = 0$, en secondes.
- t_2 : temps de remplissage de 500 ml d'eau après 15 minutes, en secondes.



Figure II.8 : Filtres à sable (photo originale).

Système de lavage du filtre

- Le lavage des filtres est nécessaire pour éliminer les matières en suspension accumulées durant la phase de filtration.
- Il permet de réduire les pertes de charge et de rétablir l'efficacité du média filtrant.

Le cycle de lavage des filtres comprend plusieurs phases successives assurant le nettoyage et la régénération du système : injection d'air, injection d'air + saumure, lavage à la saumure seule, temps de transition et phase de maturation.

Les paramètres du système de lavage des filtres à sable sont présentés dans le **Tableau 1.2.5 de l'Annexe 1**.

II.4.2.5. Système de filtres à cartouches

La filtration sur cartouches constitue la dernière étape de prétraitement avant l'osmose inverse. Elle est installée pour protéger les membranes des particules fines et éviter leur colmatage. Les principales caractéristiques du système sont les suivantes :

Caractéristiques générales du système

- Débit nominal traité : 27 778 m³/h
- Débit maximal : 30 556 m³/h
- Nombre total de filtres installés : 14 unités
- Nombre de filtres en veille (stand-by) : 1 unité
- Position des filtres : verticale

Caractéristiques des cartouches filtrantes

- Matériau : polypropylène
- Longueur : 70 pouces (1 778 mm)
- Nombre de cartouches par filtre : 474

Performance de filtration

- Capacité de coupure absolue : 5 microns
- Élimination des particules $\geq 5 \mu\text{m}$
- Vitesse de filtration nominale (14 filtres en service) : 11,9 m/h [76] (voir Figure II.9).



Figure II.9 : Filtres à cartouches (photo originale).

II.4.3. L'osmose inverse

II.4.3.1. Filières d'osmose inverse

Après le prétraitement, l'eau prétraitée est dirigée vers l'étape principale du processus, l'osmose inverse. Avant d'entrer dans les membranes, elle est alimentée par le système de pompage à haute pression.

Le système de pompage à haute pression comprend 6 pompes (5 en fonctionnement et 1 en réserve), fournissant une pression d'alimentation de 53 à 78 bar.

Dans la station de dessalement de Cap Djinet 2, le bloc d'osmose inverse est constitué de 10 châssis, chacun équipé de plusieurs récipients sous pression contenant 7 membranes en spirale. Les récipients sous pression sont configurés pour atteindre un taux de récupération de 45 %, tandis que les 55 % restants sont rejetés sous forme de saumure [76].

Les principales données du système d'osmose inverse sont présentées dans le **Tableau 1.3.1 de l'Annexe 1**.



Figure II.10 : L'unité d'osmose inverse (photo originale).

II.4.3.2. Le système de récupération d'énergie

Dans un système d'osmose inverse, la saumure est rejetée sous haute pression, il est donc essentiel de récupérer l'énergie qu'il contient afin d'optimiser la consommation énergétique de l'installation, ce qui se fait généralement à l'aide d'échangeurs de pression (voir Figure II.11). Pour que cette eau de mer atteigne la pression nécessaire au passage à travers les membranes d'osmose inverse, elle est ensuite propulsée par une pompe booster. Cette pompe augmente la pression de l'eau à un niveau adéquat, garantissant un débit stable et le bon fonctionnement des membranes. Combinées, l'utilisation des échangeurs de pression et de la pompe booster permet d'optimiser l'efficacité énergétique de l'ensemble du système [76].



Figure II.11 : Système de récupération d'énergie (photo originale).

II.4.3.3. Système de nettoyage et de rinçage chimique

Un système commun de rinçage et de nettoyage chimique est mis en place pour l'entretien des membranes d'osmose inverse. Ce procédé est réalisé en circuit fermé après isolement des modules. Les membranes doivent être nettoyées régulièrement afin d'assurer leur bon fonctionnement et de maintenir les performances du système.

Les principales caractéristiques du système de nettoyage chimique (CIP) sont présentées dans le **Tableau 1.3.2 de l'Annexe 1**.

II.4.4. Système de post-traitement et d'eau potable

Le post-traitement est essentiel pour rendre le perméat d'osmose inverse (OI) apte à la consommation humaine et pour assurer sa stabilité lors du transport et de la distribution. Il comprend principalement la reminéralisation et la désinfection finale.

II.4.4.1. Stockage et dosage du CO₂

Le système de stockage et de dosage du CO₂ est prévu pour ajuster la qualité de l'eau potable en injectant le dioxyde de carbone dans la conduite de perméat, avant son passage à travers les lits de calcite. Le CO₂ est d'abord introduit dans un courant sous pression, puis mélangé au débit total à traiter. La dose appliquée est d'environ 68 mg/L [76].

II.4.4.2. Lits de calcite

Les lits de calcite assurent la reminéralisation du perméat issu de l'osmose inverse. Ce procédé permet d'augmenter la dureté, l'alcalinité et le pH de l'eau, afin de la stabiliser chimiquement et de limiter les phénomènes de corrosion dans le réseau de distribution. Un ajustement final du pH est réalisé par injection de soude caustique [76].

II.4.4.3. Désinfection finale

Une désinfection est réalisée avant distribution, un chlore résiduel de 0,5 mg/l est prévu au point de livraison [76].

II.4.5. Réservoirs et station de pompage de l'eau produite

- Le système de stockage de l'eau produite est constitué d'un réservoir comportant deux compartiments, d'une capacité de 15 000 m³.
- La station de pompage permet de refouler l'eau produite vers les conduites de distribution et les points de livraison.
- La station comprend 6 pompes en service et 1 pompe de réserve (6 + 1R), fonctionnant à débit fixe ou variable pour s'adapter aux fluctuations de débit et de pression [76].

II.5. Laboratoire

Les équipements de laboratoire permettent la mesure des paramètres suivants :

- Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium, Ammonium, Barium, Strontium, Aluminium, Fer et Manganèse;
- Chlorures, Sulfates, Phosphate, Nitrates, Bicarbonate, Carbonate, Fluor, Silice, Bore et CO₂ libre ;
- pH et l'alcalinité ;
- Dureté totale, dureté calcique ;
- Solides totaux dissous, Turbidité ;
- Conductivité et l'indice de colmatage SDI (automatique et manuel) ;
- Indice de Langelier (eau corrosive ou incrustante) [76].

II.6. Salle de contrôle

La salle de contrôle est équipée de trois ordinateurs permettant la supervision de l'usine via un système **SCADA**. L'opérateur peut consulter en temps réel l'état des équipements (marche, arrêt ou défaillance) ainsi que les valeurs analogiques des différents paramètres de l'usine. Il dispose également de la possibilité d'arrêter les pompes directement depuis les ordinateurs (voir Figure II.12).

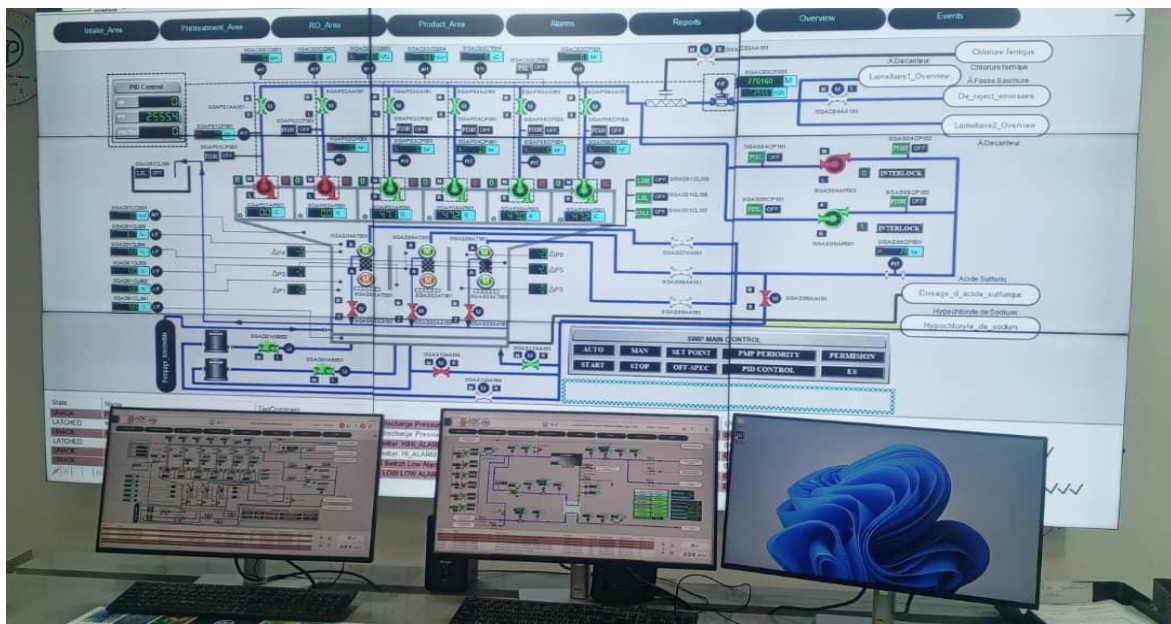


Figure II.12 : Salle de contrôle (photo originale).

II.7. Conclusion

En conclusion, la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2 illustre l'efficacité de la technologie de l'osmose inverse pour répondre aux besoins croissants en eau potable. Son fonctionnement repose sur un enchaînement d'opérations de traitement : L'eau de mer est d'abord soumise à une préfiltration mécanique (dégrillage grossier et tamis rotatif) afin d'éliminer les particules de grande taille, suivie des étapes de coagulation floculation et de décantation lamellaire afin de clarifier l'eau. Elle passe ensuite par une filtration sur sable, puis une filtration à cartouches avant d'être envoyée vers les membranes d'osmose inverse, où l'élimination des sels est réalisée sous haute pression. Enfin, une étape de reminéralisation assure que l'eau produite respecte les normes de potabilité en vigueur et peut être distribuée aux consommateurs via un système de pompage.

La SDEM de Cap Djinet 2 représente donc un exemple concret d'ingénierie avancée, combinant performance et fiabilité dans la production d'eau potable de qualité.

La compréhension du fonctionnement de ces différentes unités est essentielle pour identifier les contraintes d'exploitation et les facteurs susceptibles d'affecter les performances du système, notamment au niveau des filtres à cartouches, qui constituent l'objet de la présente étude.



Chapitre III

*Évaluation du dimensionnement des
filtres à cartouches*



III.1. Introduction

La station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, a été récemment mise en service, Afin d'évaluer les performances de la station, nous proposons d'étudier les performances des filtres à cartouches. Pour ce faire, des relevés de mesures ont été effectués sur une période de deux mois.

Les mesures de turbidité réalisées au niveau des différentes étapes du prétraitement indiquent une bonne qualité de l'eau. Cependant, un colmatage prématuré des filtres à cartouches a été observé, entraînant une diminution rapide du débit ainsi qu'une augmentation de la perte de charge au-delà de 1,2 bar. Cette situation nécessite le remplacement fréquent des cartouches filtrantes dans des délais relativement courts. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'identifier les causes de ce phénomène et d'évaluer l'adéquation du dimensionnement actuel de cette étape de traitement.

Dans ce chapitre, nous avons évalué l'adéquation du dimensionnement actuel des filtres à cartouches aux contraintes opérationnelles de la station et mis en évidence les facteurs responsables du colmatage prématuré des cartouches.

III.2 Matériels et Méthodes

Notre travail repose sur l'exploitation des données relatives à la SDEM de Cap Djinet 2. Les données étudiées représentent les débits de six filtres à cartouches choisis aléatoirement, ainsi que les valeurs de turbidité au niveau du captage, du réservoir intermédiaire, de la sortie des filtres à sable et de la sortie des filtres à cartouches. L'étude porte également sur le SDI¹⁵ et la perte de charge des filtres à cartouches durant la période allant du 1er août 2025 au 20 septembre 2025.

III.2.1 Description du système étudié

Dans le processus de dessalement de l'eau de mer, la filtration à cartouche représente une étape essentielle pour protéger les équipements en aval, notamment les membranes d'osmose inverse. Actuellement, la station de dessalement dispose de 14 filtres à cartouches dimensionnés pour assurer un débit nominal de 27778 m³/h (équivalent à un débit de 666 672 m³/j), cependant, au fur et à mesure de leur utilisation, le débit de chaque filtre diminue en raison du colmatage progressif des cartouches.

En pratique, les cartouches doivent être remplacées lorsqu'elles atteignent un débit résiduel par filtre faible (<650 m³/h) ou une $\Delta P \geq 1,2\text{bar}$, seuil considéré comme colmaté, Cette limitation entraîne une incapacité à maintenir le débit nominal requis de 27778 m³/h, mettant ainsi en évidence un sous-dimensionnement des filtres à cartouches en ce qui concerne les conditions réelles de fonctionnement et la charge particulière de l'eau de mer.

III.2.2. Données du constructeur des filtres à cartouches

Les principales caractéristiques techniques des filtres à cartouches de la SDEM de Cap Djinet 2, fournies par le constructeur, sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Caractéristiques techniques des filtres à cartouches [76].

Paramètres	Unité	Valeur/Nature
Débit nominal de l'eau de mer à être filtrée :	m ³ /h	27 778
Débit maximal de l'eau de mer à être filtrée :	m ³ /h	30 556
Type de filtres		Cartouches
Position des filtres:		Vertical
Longueur de la cartouche:	Pouces	70
Matériel de la cartouche:		Polypropylène
Nombre de filtres installée:	Unités	14
Nombre de filtres (standby)	Unités	1
Nombre de cartouches par filtre :	Unités	474
Débit nominal par filtre (14 unités) :	m ³ /h	1984
Débit nominal par filtre (13 unités) :	m ³ /h	2137
Capacité de coupe de la cartouche :	microns	5
Débit réel par cartouche (14 unités) :	m ³ /h	4,19
Débit maximum par cartouche (13 unités) :	m ³ /h	4,51
Débit réel par cartouche tous les dix pouces (14 unités) :	m ³ /h	0,60
Débit réel par cartouche tous dix pouces (13 unités) :	m ³ /h	0,65
Diamètre de la cartouche OD :	mm.	63
Diamètre de la cartouche ID :	mm.	28
Longueur de la cartouche:	mm	1.778
Surface filtrante de la cartouche :	m ²	0,352
Vitesse de filtration à l'opération nominal par filtre (14 unités) :	m/h	11,90
La perte de charge	bar	0.2 à 1.2 (Changement recommandé)

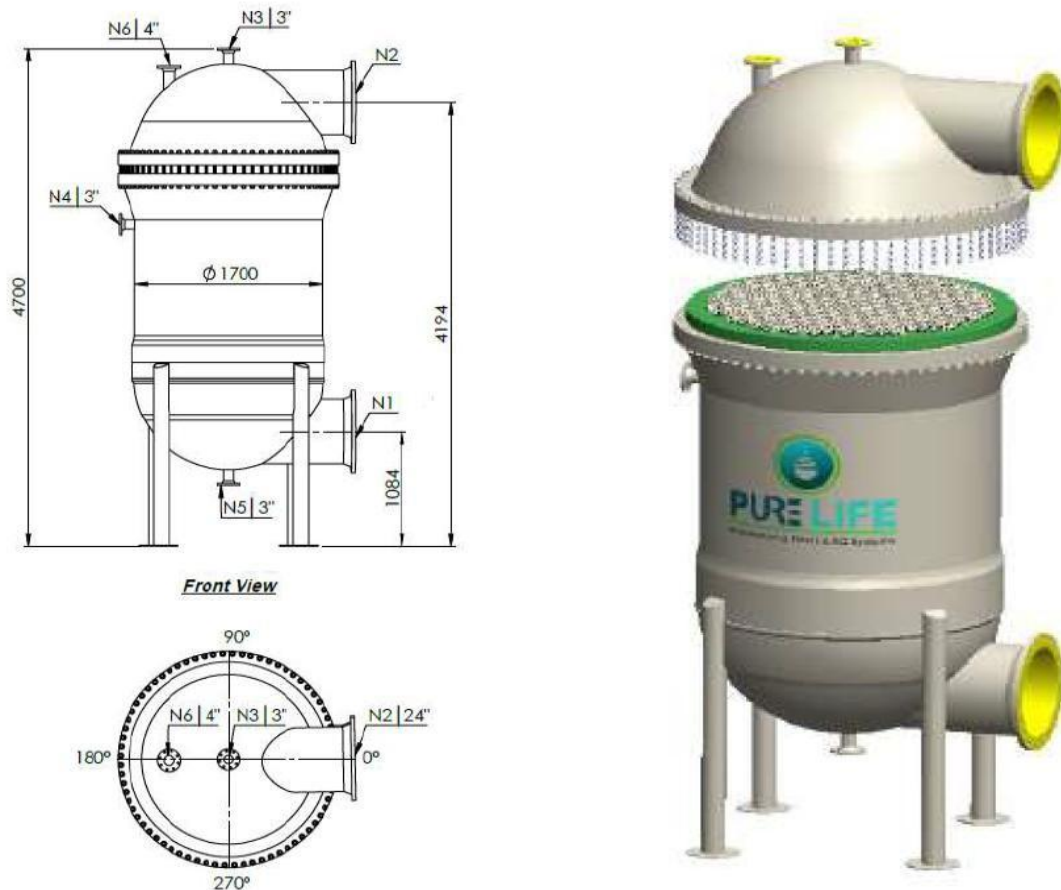


Figure III.1 : Filtre à cartouches (document interne de la SDEM).

III.2.3 Données d'exploitation

Les données d'exploitation présentées dans cette étude correspondent aux relevés de quatre paramètres représentatifs du fonctionnement des filtres à cartouches au sein de la SDEM de Cap Djinet 2.

- ❖ Les tableaux ci-dessus (Tableaux III.2 et III.3) présentent l'évolution des débits des filtres à cartouches étudiés (FC 01, FC 03, FC 06, FC 10, FC 12 et FC 14), sélectionnés aléatoirement, ainsi que les paramètres de qualité de l'eau mesurés aux différentes étapes du prétraitement (captage, réservoir intermédiaire, filtres à sable (FS) et filtres à cartouches (FC)) et le SDI¹⁵. Ils présentent également l'évolution de la pression d'entrée, de la pression de sortie et de la perte de charge durant la période allant du 01/08/2025 au 20/09/2025.

CHAPITRE III : Évaluation du dimensionnement des filtres à cartouches

Tableau III.2 : Évolution des débits des filtres à cartouches et des paramètres de qualité de l'eau durant la période du 01/08/2025 au 20/09/2025.

Date	Débit FC 01 (m ³ /h)	Débit FC 03 (m ³ /h)	Débit FC 06 (m ³ /h)	Débit FC 10 (m ³ /h)	Débit FC 12 (m ³ /h)	Débit FC 14 (m ³ /h)	Analyse turbidité Captage	Analyse turbidité Réservoir intermédiaire	Analyse turbidité sortie FS	Analyse turbidité sortie FC	SDI ¹⁵ sortie FC
01/08/25	2227,8	974,4	1281,3	2302,8	2307,3	987,9	1,810	1,160	0,150	0,098	3,05
02/08/25	2285,0	982,5	1278,6	2308,8	2297,7	988,5	2,440	1,420	0,113	0,103	2,30
03/08/25	2293,7	990,3	1268,1	2315,1	2259,3	985,8	2,600	1,290	0,156	0,147	2,53
04/08/25	2026,5	883,2	1196,7	2182,2	1935,6	872,1	2,800	1,170	0,144	0,109	2,22
05/08/25	1973,2	838,5	1152,0	2157,9	1758,9	900,0	3,790	2,370	0,125	0,111	2,83
06/08/25	2124,9	833,7	1152,0	2247,6	1743,6	831,9	32,400	18,800	0,180	0,149	1,99
07/08/25	2305,6	868,5	1194,9	2385,0	1648,8	865,5	2,720	1,020	0,190	0,120	1,99
08/08/25	2364,9	903,3	1214,1	2407,2	1710,3	879,9	1,280	1,160	0,115	0,880	2,85
09/08/25	2305,3	936,3	1281,9	2445,9	1653,0	901,5	1,550	1,420	0,130	0,100	2,60
10/08/25	2168,3	899,1	1267,2	2316,6	1604,1	863,1	2,640	1,950	0,130	0,110	2,33
11/08/25	1915,5	810,6	1171,8	2221,5	1350,6	802,2	1,070	0,720	0,130	0,100	2,47
12/08/25	1835,6	782,4	1172,4	2261,4	1274,4	804,0	1,420	1,050	0,150	0,110	3,12
13/08/25	1935,8	2,4	1201,2	2249,7	1347,0	811,8	1,640	1,290	0,137	0,130	2,33
14/08/25	1924,5	2247,3	1231,2	2272,2	1378,8	831,0	1,480	0,930	0,130	0,110	2,40
15/08/25	1234,5	2379,6	1126,8	2285,7	1148,7	630,0	1,120	0,760	0,136	0,088	1,86
16/08/25	1364,1	2272,2	1095,6	2382,3	1016,4	704,4	1,620	1,080	0,183	0,091	1,93
17/08/25	1353,0	2244,0	1098,3	2298,0	1033,8	703,5	1,320	1,120	0,220	0,119	3,13
18/08/25	1214,5	2178,3	1047,9	2283,6	855,8	678,6	1,410	0,450	0,233	0,159	2,85
19/08/25	1415,2	2283,3	1180,2	2252,4	995,1	734,1	1,120	1,030	0,270	0,140	2,85
20/08/25	1318,6	2283,6	1200,0	2224,8	993,0	737,1	1,550	0,800	0,151	0,143	1,93
21/08/25	1210,3	2322,0	1203,6	2227,5	898,8	649,5	6,530	5,050	0,112	0,119	2,47
22/08/25	902,1	2603,1	1127,1	2295,3	700,5	2375,7	2,360	1,790	0,120	0,100	3,00
23/08/25	817,4	2255,1	1050,0	2288,7	553,5	2228,4	1,440	0,640	0,140	0,130	3,17

CHAPITRE III : Évaluation du dimensionnement des filtres à cartouches

24/08/25	661,8	2224,5	1035,3	2140,8	529,2	2214,0	1,630	0,790	0,168	0,129	3,58
25/08/25	389,6	2253,9	1082,7	2248,8	664,2	2273,7	1,270	0,615	0,168	0,121	3,25
26/08/25	2007,6	2288,1	1079,7	2274,3	642,3	2313,0	1,940	0,923	0,150	0,130	3,24
27/08/25	2131,8	2287,8	1077,0	2193,9	575,7	2317,5	2,110	0,790	0,190	0,145	3,08
28/08/25	2132,7	2209,2	1071,9	2088,0	550,8	2244,6	2,110	0,790	0,190	0,145	2,96
29/08/25	2166,8	2234,7	1172,1	2040,0	636,9	2257,5	21,400	11,900	0,200	0,098	2,98
30/08/25	2306,2	2260,8	1193,7	2208,0	1376,7	2295,6	5,010	2,640	0,195	0,141	3,56
31/08/25	2262,6	2202,3	1143,0	2183,4	2205,9	2271,9	2,280	0,947	0,140	0,124	2,83
01/09/25	2222,2	2138,7	1049,7	1982,1	2225,7	2246,1	2,550	0,983	0,190	0,106	3,08
02/09/25	2228,4	2253,3	1069,2	1967,1	2379,9	2321,7	4,320	2,040	0,110	0,150	2,70
03/09/25	2240,7	2272,8	1079,4	1830,6	2423,4	2287,8	2,660	1,450	0,140	0,107	2,80
04/09/25	2335,9	2335,5	1155,0	1915,8	2420,7	2310,0	3,270	1,160	0,176	0,123	2,77
05/09/25	2386,7	2351,1	1188,6	1918,8	2469,9	2386,8	2,880	0,600	0,090	0,080	2,40
06/09/25	2223,7	2138,7	1127,7	1681,2	2306,1	2200,8	1,780	0,730	0,100	0,082	2,16
07/09/25	2239,8	2184,9	1148,4	1669,2	2751,3	2387,1	2,900	0,875	0,200	0,130	3,03
08/09/25	2187,2	2141,7	1209,6	1743,3	2237,7	2063,1	1,410	0,723	0,188	0,173	3,09
09/09/25	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	1,000	0,919	0,110	0,140	1,77
10/09/25	2246,4	2110,8	1057,2	1237,2	2255,1	2456,7	7,330	4,630	0,148	0,121	2,96
11/09/25	2337,4	2281,5	1180,5	1377,6	2469,9	2410,5	12,800	11,000	0,130	0,109	2,66
12/09/25	2177,6	2168,7	1200,6	1359,0	2276,7	2225,1	4,890	2,530	0,134	0,091	1,90
13/09/25	2202,4	2124,3	1195,2	1355,1	2218,5	2254,8	1,380	1,420	0,168	0,086	2,75
14/09/25	2222,5	1644,3	1228,2	1384,8	2242,8	2091,3	1,390	0,606	0,132	0,125	2,81
15/09/25	2237,1	1537,5	1151,4	1169,1	2239,5	2120,4	1,390	0,606	0,132	0,125	3,54
16/09/25	2214,1	1466,7	1154,7	1155,3	2231,7	1420,8	1,510	0,890	0,090	0,100	2,59
17/09/25	2345,1	1698,0	1261,5	1290,3	2299,5	1560,9	0,964	0,631	0,113	0,089	2,67
18/09/25	2310,4	1639,8	1267,8	1324,2	2253,0	1428,3	1,820	0,710	0,100	0,090	2,70
19/09/25	2350,2	1375,2	1243,5	1193,1	2205,0	1092,3	1,120	0,680	0,100	0,090	2,35
20/09/25	2203,0	1420,8	1310,1	1278,6	2264,7	1089,6	0,630	0,400	0,080	0,080	2,96

CHAPITRE III : Évaluation du dimensionnement des filtres à cartouches

Tableau III.3 : Évolution des débits des filtres à cartouches et de la perte de charge durant la période du 01/08/2025 au 20/09/2025.

Date	Débit FC 01 (m³/h)	Débit FC 03 (m³/h)	Débit FC 06 (m³/h)	Débit FC 10 (m³/h)	Débit FC 12 (m³/h)	Débit FC 14 (m³/h)	Pression d'entrée FC (bar)	Pression de sortie FC (bar)	ΔP (bar)
01/08/25	2227,8	974,4	1281,3	2302,8	2307,3	987,9	4,207	2,821	1,386
02/08/25	2285,0	982,5	1278,6	2308,8	2297,7	988,5	4,264	2,850	1,414
03/08/25	229,7	990,3	1268,1	2315,1	2259,3	985,8	4,346	3,156	1,190
04/08/25	2026,5	883,2	1196,7	2182,2	1935,6	872,1	4,206	2,923	1,283
05/08/25	1973,2	838,5	1152,0	2157,9	1758,9	900,0	4,195	2,903	1,292
06/08/25	2124,9	833,7	1152,0	2247,6	1743,6	831,9	4,204	2,926	1,278
07/08/25	2305,6	868,5	1194,9	2385,0	1648,8	865,5	4,444	2,869	1,575
08/08/25	2364,9	903,3	1214,1	2407,2	1710,3	879,9	4,490	3,215	1,275
09/08/25	2305,3	936,3	1281,9	2445,9	1653,0	901,5	4,426	3,224	1,202
10/08/25	2168,3	899,1	1267,2	2316,6	1604,1	863,1	4,248	2,840	1,408
11/08/25	1915,5	810,6	1171,8	2221,5	1350,6	802,2	4,512	3,273	1,239
12/08/25	1835,6	782,4	1172,4	2261,4	1274,4	804,0	4,493	3,206	1,287
13/08/25	1935,8	2,4	1201,2	2249,7	1347,0	811,8	4,338	2,980	1,358
14/08/25	1924,5	2247,3	1231,2	2272,2	1378,8	831,0	4,455	2,962	1,493
15/08/25	1234,5	2379,6	1126,8	2285,7	1148,7	630,0	4,365	2,235	2,130
16/08/25	1364,1	2272,2	1095,6	2382,3	1016,4	704,4	4,184	3,095	1,089
17/08/25	1353,0	2244,0	1098,3	2298,0	1033,8	703,5	4,359	3,146	1,213
18/08/25	1214,5	2178,3	1047,9	2283,6	855,8	678,6	4,256	3,338	0,918
19/08/25	1415,2	2283,3	1180,2	2252,4	995,1	734,1	4,587	3,326	1,261
20/08/25	1318,6	2283,6	1200,0	2224,8	993,0	737,1	4,209	2,893	1,316
21/08/25	1210,3	2322,0	1203,6	2227,5	898,8	649,5	4,062	2,825	1,237
22/08/25	902,1	2603,1	1127,1	2295,3	700,5	2375,7	4,104	2,909	1,195
23/08/25	817,4	2255,1	1050,0	2288,7	553,5	2228,4	4,169	2,964	1,205
24/08/25	661,8	2224,5	1035,3	2140,8	529,2	2214,0	4,292	3,065	1,227

CHAPITRE III : Évaluation du dimensionnement des filtres à cartouches

25/08/25	389,6	2253,9	1082,7	2248,8	664,2	2273,7	4,262	3,114	1,148
26/08/25	2007,6	2288,1	1079,7	2274,3	642,3	2313,0	5,100	4,174	0,926
27/08/25	2131,8	2287,8	1077,0	2193,9	575,7	2317,5	4,175	2,998	1,177
28/08/25	2132,7	2209,2	1071,9	2088,0	550,8	2244,6	5,426	4,556	0,870
29/08/25	2166,8	2234,7	1172,1	2040,0	636,9	2257,5	4,267	2,919	1,348
30/08/25	2306,2	2260,8	1193,7	2208,0	1376,7	2295,6	5,310	3,893	1,417
31/08/25	2262,6	2202,3	1143,0	2183,4	2205,9	2271,9	4,476	3,374	1,102
01/09/25	2222,2	2138,7	1049,7	1982,1	2225,7	2246,1	4,082	2,882	1,200
02/09/25	2228,4	2253,3	1069,2	1967,1	2379,9	2321,7	4,370	3,234	1,136
03/09/25	2240,7	2272,8	1079,4	1830,6	2423,4	2287,8	4,368	3,133	1,235
04/09/25	2335,9	2335,5	1155,0	1915,8	2420,7	2310,0	4,246	2,933	1,313
05/09/25	2386,7	2351,1	1188,6	1918,8	2469,9	2386,8	4,228	2,891	1,337
06/09/25	2223,7	2138,7	1127,7	1681,2	2306,1	2200,8	4,216	2,915	1,301
07/09/25	2239,8	2184,9	1148,4	1669,2	2751,3	2387,1	4,307	2,946	1,361
08/09/25	2187,2	2141,7	1209,6	1743,3	2237,7	2063,1	4,557	3,281	1,276
09/09/25	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	4,264	2,948	1,316
10/09/25	2246,4	2110,8	1057,2	1237,2	2255,1	2456,7	4,142	2,952	1,190
11/09/25	2337,4	2281,5	1180,5	1377,6	2469,9	2410,5	4,306	2,889	1,417
12/09/25	2177,6	2168,7	1200,6	1359,0	2276,7	2225,1	4,257	2,792	1,465
13/09/25	2202,4	2124,3	1195,2	1355,1	2218,5	2254,8	4,326	2,943	1,383
14/09/25	2222,5	1644,3	1228,2	1384,8	2242,8	2091,3	4,319	2,858	1,461
15/09/25	2237,1	1537,5	1151,4	1169,1	2239,5	2120,4	4,297	0,379	3,918
16/09/25	2214,1	1466,7	1154,7	1155,3	2231,7	1420,8	4,257	2,435	1,822
17/09/25	2345,1	1698,0	1261,5	1290,3	2299,5	1560,9	4,473	2,998	1,475
18/09/25	2310,4	1639,8	1267,8	1324,2	2253,0	1428,3	4,471	3,591	0,880
19/09/25	2350,2	1375,2	1243,5	1193,1	2205,0	1092,3	4,320	2,860	1,460
20/09/25	2203,0	1420,8	1310,1	1278,6	2264,7	1089,6	4,366	2,857	1,509

III.3. Partie expérimentale

Cette partie présente le travail expérimental réalisé au niveau de la SDEM de Cap Djinet 2. Elle porte sur l'évolution du débit des six filtres à cartouches étudiés et le suivi de la turbidité dans les différentes étapes du prétraitement (Captage, filtres à cartouches) ainsi que l'évolution de la perte de charge durant la période du 01/08/25 au 20/09/25, en conditions réelles d'exploitation.

III.3.1. Évolution du débit des filtres à cartouches en exploitation

L'évolution du débit des filtres à cartouches étudiés (FC 01, FC 03, FC 06, FC 10, FC 12 et FC 14), en conditions réelles d'exploitation, est représentée par des graphes. Les débits de chaque filtre ont été mesurés à l'aide d'un débitmètre durant la période du 01/08/25 au 20/09/25.

III.3.1.1. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 01

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 01 pendant deux mois.

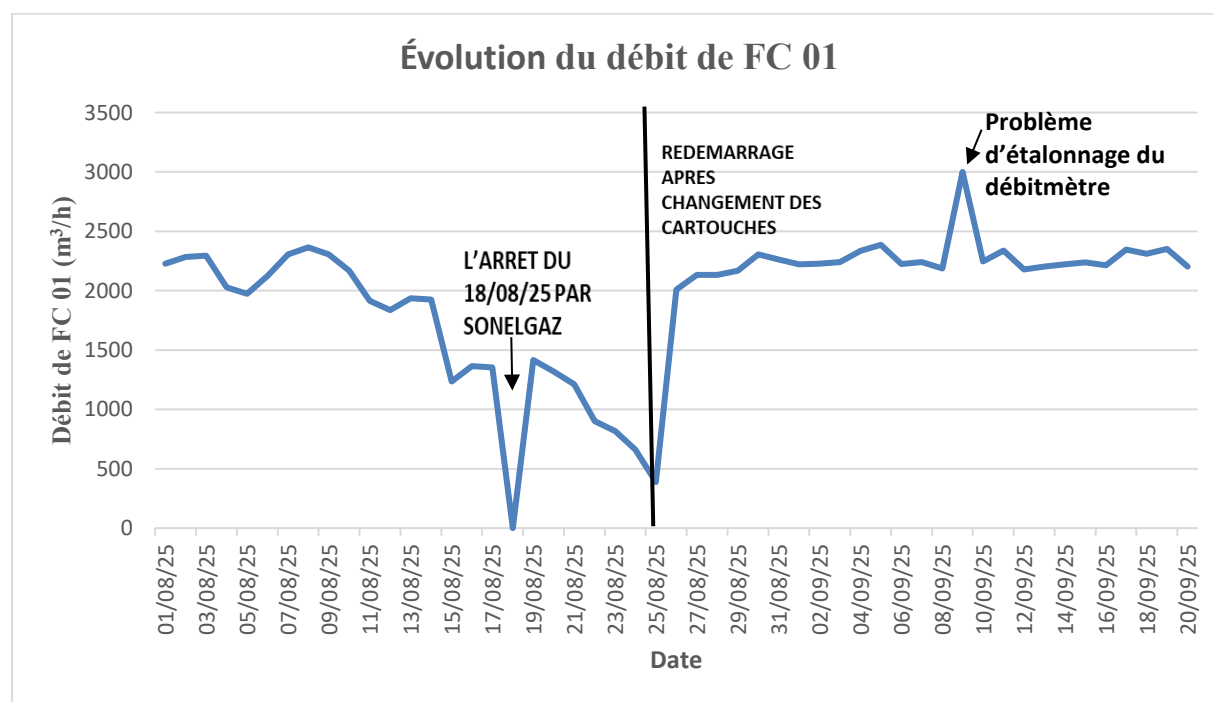


Figure III.2 : Évolution du débit de FC 01 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

Cette courbe met en évidence une diminution progressive du débit du filtre FC 01 au cours de la période allant du 01/08/25 au 17/08/25, passant d'environ 2300 m³/h à près de 1300 m³/h. Le 18/08/25, un arrêt de l'alimentation électrique signalé par Sonelgaz a entraîné une interruption momentanée du débit, qui a chuté à 0 m³/h. La courbe reprend ensuite des valeurs normales avec de légères fluctuations après le changement des cartouches du filtre FC 01 le 25/08/25. Par la suite, une forte augmentation du débit, atteignant 3000 m³/h, a été enregistrée. Cette fluctuation provient d'un problème d'étalonnage du débitmètre.

III.3.1.2. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 03

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 03 pendant deux mois.

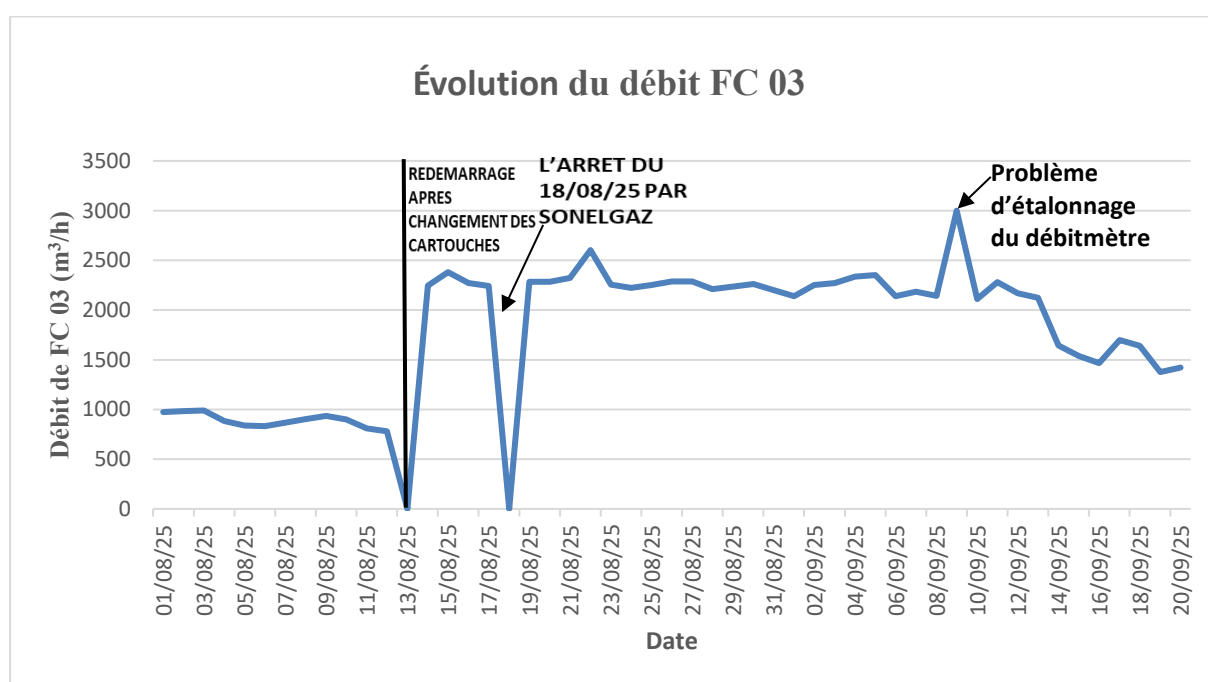


Figure III.3 : Évolution du débit de FC 03 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

Cette courbe met en évidence une diminution progressive du débit du filtre FC 03, passant de 1000 m³/h à près de 800 m³/h. Après le changement des cartouches du filtre FC 03, le 13/08/25, une augmentation significative du débit a été observée, atteignant environ 2300 m³/h. Le 18/08/25, une coupure de l'alimentation électrique signalée par Sonelgaz a entraîné un arrêt momentané du débit, qui a atteint 0 m³/h. Par la suite, une forte augmentation du débit a été enregistrée, atteignant 3000 m³/h. Cette fluctuation est due à un problème d'étalonnage du débitmètre.

III.3.1.3. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 06

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 06 pendant deux mois.

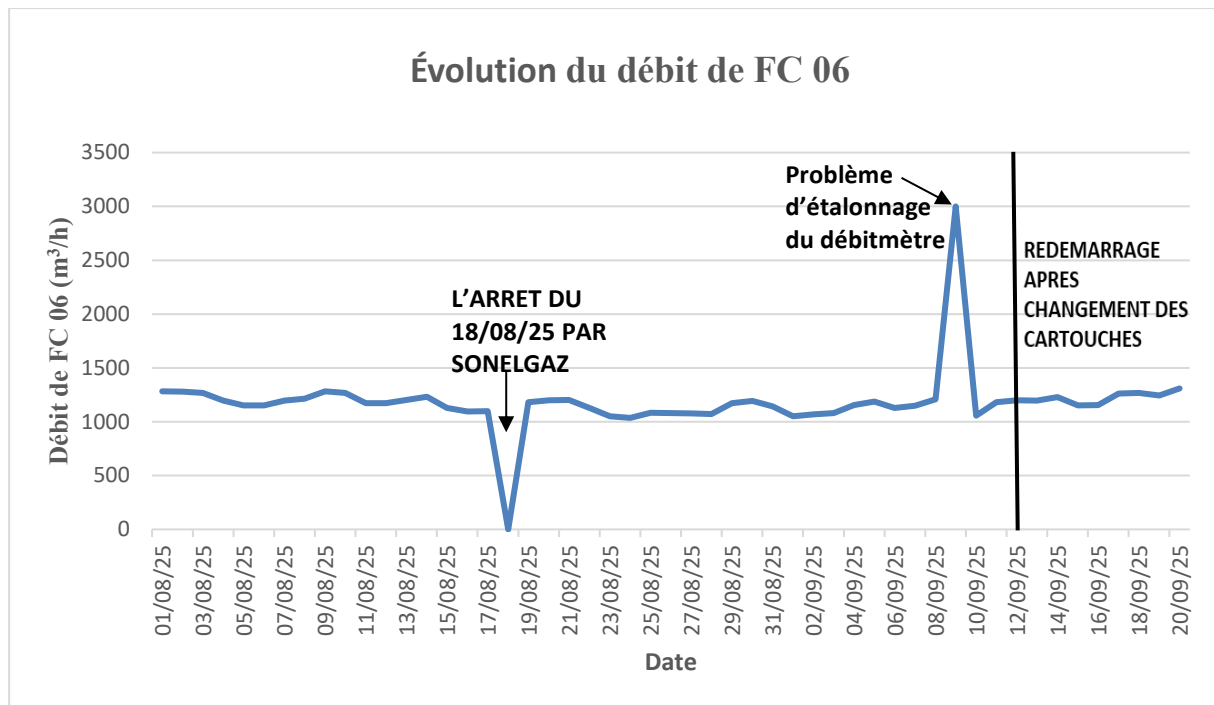


Figure III.4 : Évolution du débit de FC 06 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

Cette courbe montre qu'au début de la période étudiée, le débit du filtre FC 06 reste relativement stable autour de 1200 à 1300 m³/h. Le 18/08/2025, une interruption soudaine de la mesure est observée : le débit passe temporairement de 1281 m³/h à 0 m³/h à la suite d'une coupure de l'alimentation électrique. La courbe reprend ensuite ses valeurs initiales avec de légères fluctuations, puis enregistre un pic de débit atteignant 3000 m³/h. Cette fluctuation est due à un problème d'étalonnage du débitmètre. Par la suite, on observe une augmentation du débit après le changement des cartouches du filtre FC 06, effectué le 12/09/2025.

III.3.1.4. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 10

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 10 pendant deux mois.

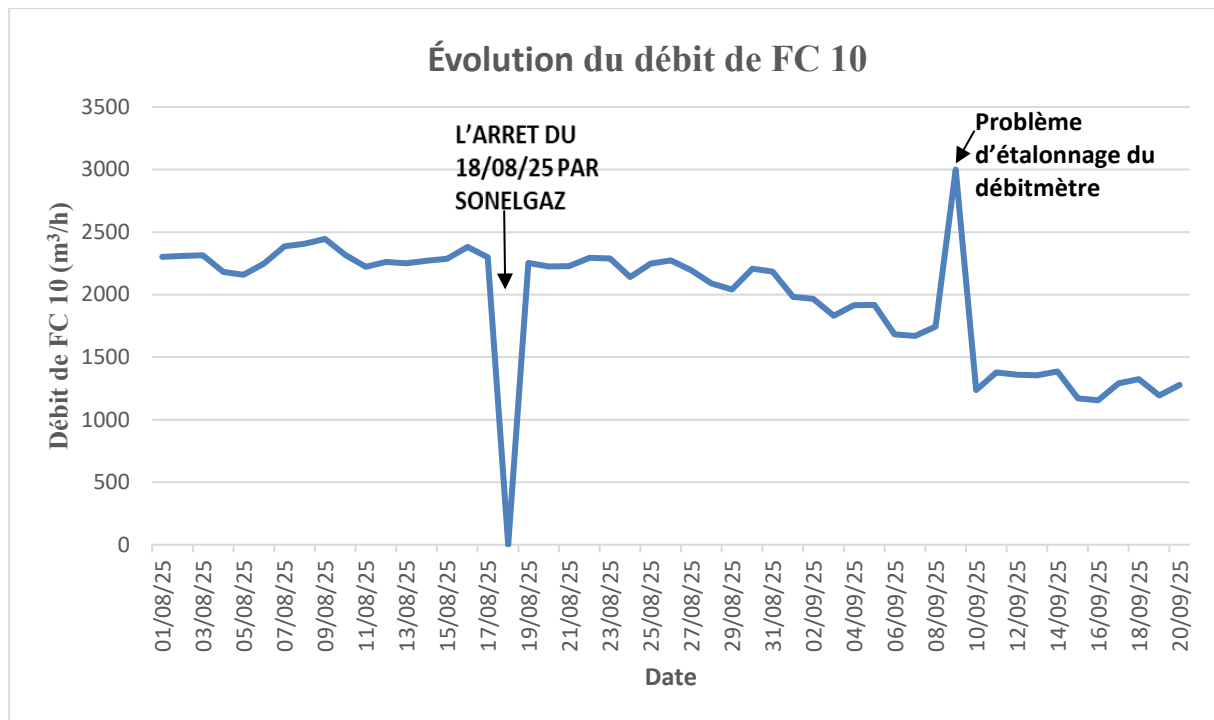


Figure III.5 : Évolution du débit de FC 10 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

La courbe d'évolution du débit du filtre FC 10 montre un débit relativement stable entre le 01/08/2025 et le 17/08/2025, oscillant autour de 2200 m³/h. Le 18/08/2025, une coupure de l'alimentation électrique signalée par Sonelgaz a entraîné un arrêt momentané du débit, qui a chuté à 0 m³/h. La courbe reprend ensuite des valeurs normales, puis présente une diminution progressive du débit. Elle enregistre ensuite un pic de débit atteignant 3000 m³/h. Cette fluctuation est due à un problème d'étalonnage du débitmètre. Par la suite, une diminution progressive du débit est de nouveau observée.

III.3.1.5. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 12

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 12 pendant deux mois.

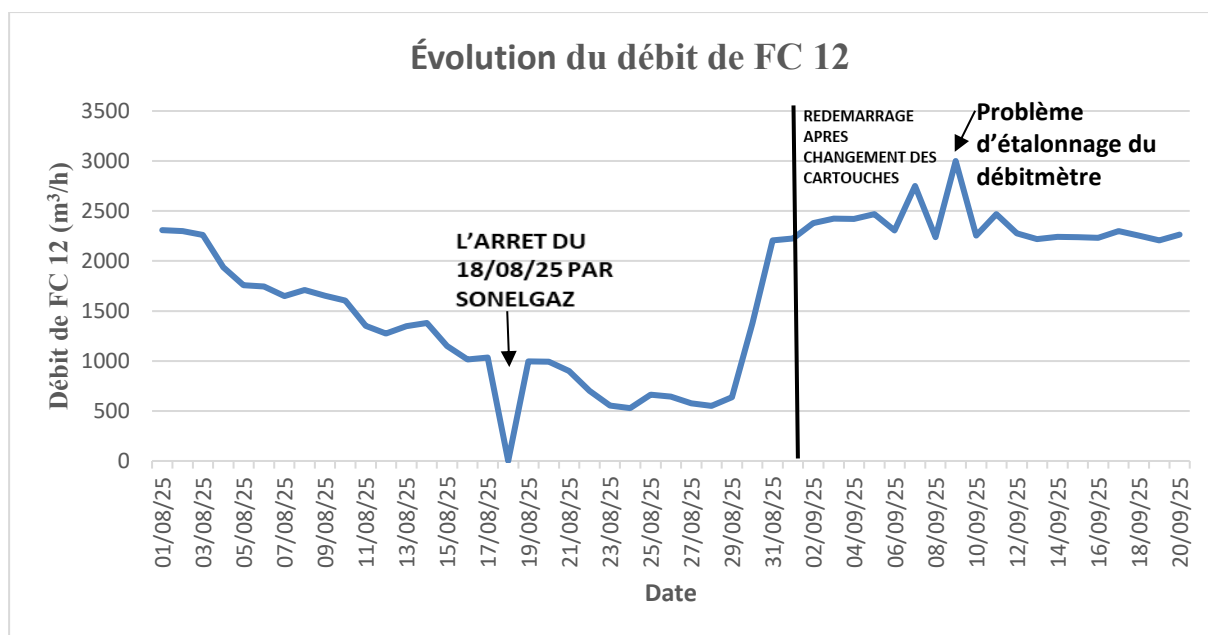


Figure III.6 : Évolution du débit de FC 12 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

Cette courbe met en évidence une diminution progressive du débit du filtre FC 12 au cours de la période allant du 01/08/25 au 17/08/25, passant d'environ 2300 m³/h à près de 1000 m³/h. Le 18/08/25, un arrêt de l'alimentation électrique signalé par Sonelgaz a entraîné une interruption momentanée du débit, qui a chuté à 0 m³/h. La courbe reprend ensuite des valeurs normales avec des légères fluctuations après le changement des cartouches du filtre FC 12 le 01/09/25. Par la suite, une forte augmentation du débit, atteignant 3000 m³/h, a été enregistrée. Cette fluctuation provient d'un problème d'étalonnage du débitmètre.

III.3.1.6. Évolution du débit du filtre à cartouches FC 14

Nous avons exploité les données relatives au filtre à cartouches FC 14 pendant deux mois.

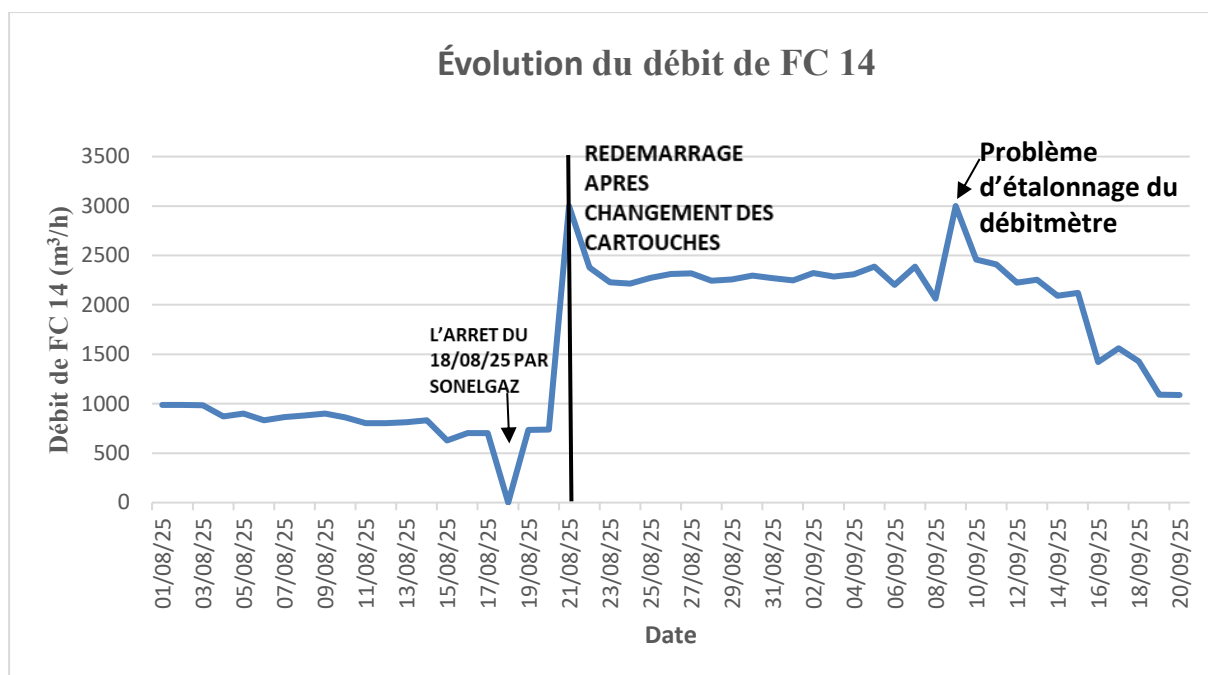


Figure III.7 : Évolution du débit de FC 14 sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

La courbe d'évolution du débit de FC 14 met en évidence une diminution progressive du débit entre le 01/08/25 et le 18/08/25, passant d'environ 987 m³/h à près de 500 m³/h. Le 18/08/25, une coupure de l'alimentation électrique signalée par Sonelgaz a entraîné un arrêt momentané du débit, qui a atteint 0 m³/h. Après le changement des cartouches du filtre FC 14 le 21/08/25, une augmentation significative du débit a été observée, celui-ci se stabilisant autour de 2300 m³/h. Par la suite, une forte augmentation du débit, atteignant 3000 m³/h, a été enregistrée. Cette fluctuation provient d'un problème d'étalonnage du débitmètre.

III.3.2. Évolution de la turbidité au niveau du captage d'eau de mer et à la sortie des filtres à cartouches

L'évolution de la turbidité de l'eau de mer, mesurée au niveau du laboratoire à l'aide d'un turbidimètre de paillasse, au niveau du captage d'eau de mer et à la sortie du filtre à cartouche, est représentée par des graphes. Le suivi de ce paramètre permet d'évaluer la qualité de l'eau à différentes étapes du prétraitement et de vérifier l'efficacité du système de filtration en conditions réelles d'exploitation durant la période du 01/08/25 au 20/09/25.

III.3.2.1. Évolution de la turbidité au niveau du captage

Nous avons exploité les données relatives à la turbidité au niveau du captage d'eau de mer pendant deux mois.

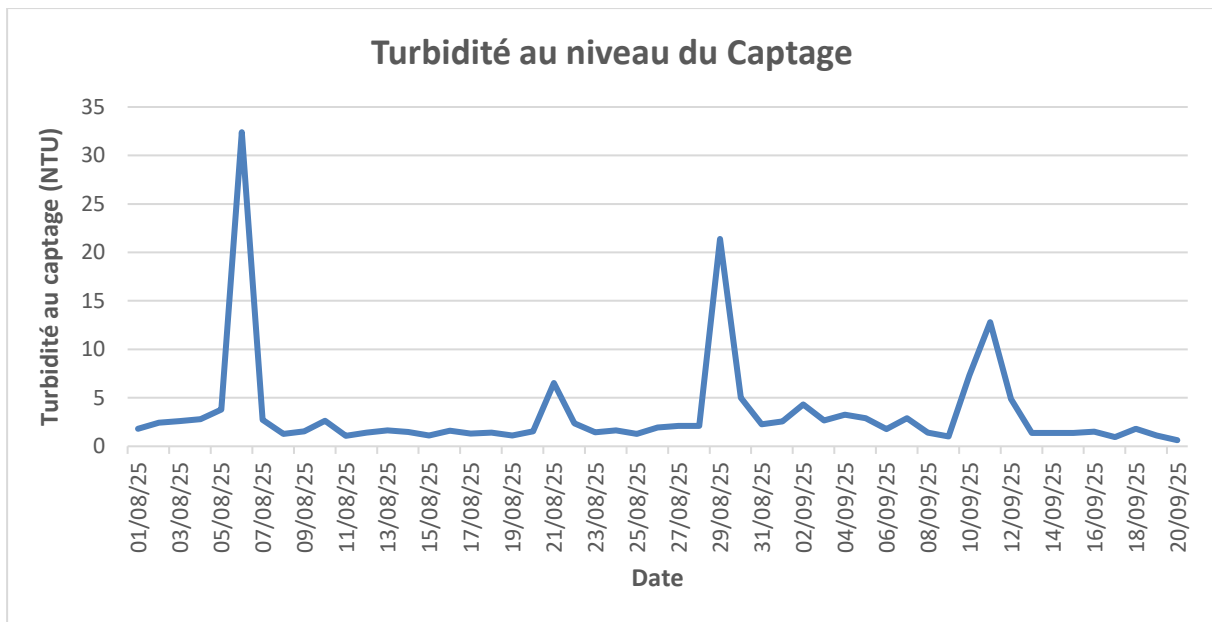


Figure III.8 : Évolution de la turbidité au niveau du captage (du 01/08/25 au 20/09/25).

III.3.2.2. Évolution de la turbidité à la sortie des filtres à cartouches

Nous avons exploité les données relatives à la turbidité à la sortie des filtres à cartouches pendant deux mois.

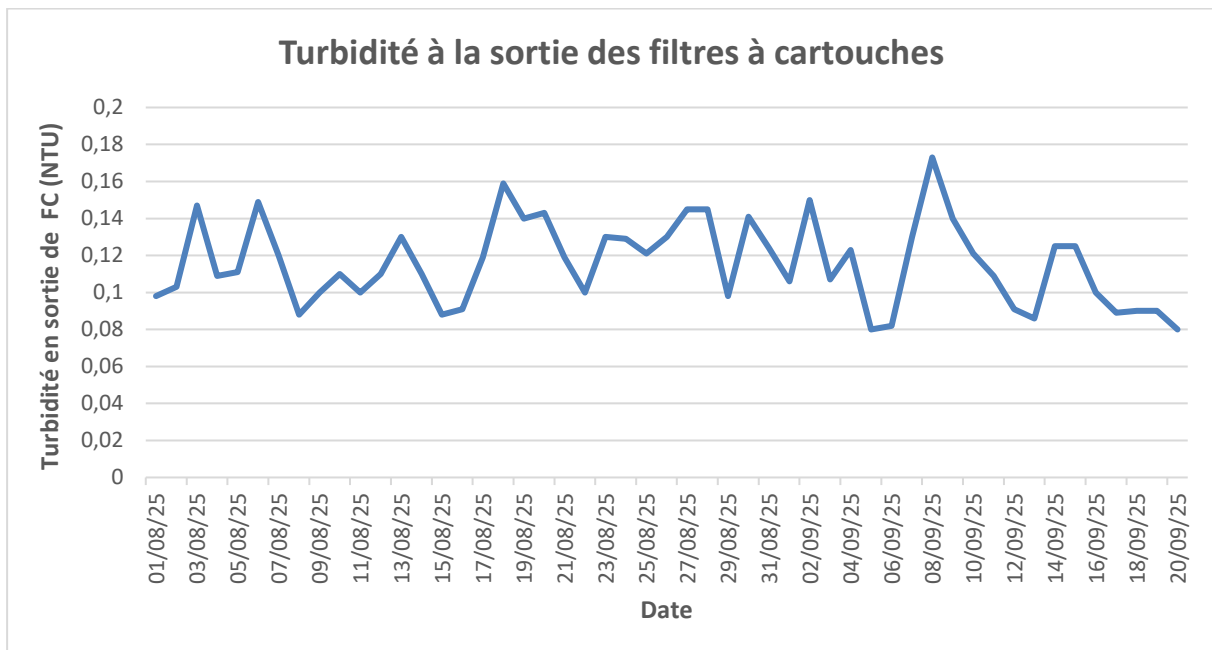


Figure III.9 : Évolution de la turbidité à la sortie des filtres à cartouches (du 01/08/25 au 20/09/25).

III.3.3. Évolution de la perte de charge des filtres à cartouches

L'évolution de la perte de charge, déterminée à partir des pressions mesurées à l'entrée et à la sortie des filtres à cartouches, est représentée par des graphes durant la période du 01/08/25 au 20/09/2025. Le suivi de ce paramètre permet d'apprécier l'état de fonctionnement des filtres et de suivre les variations enregistrées en conditions réelles d'exploitation.

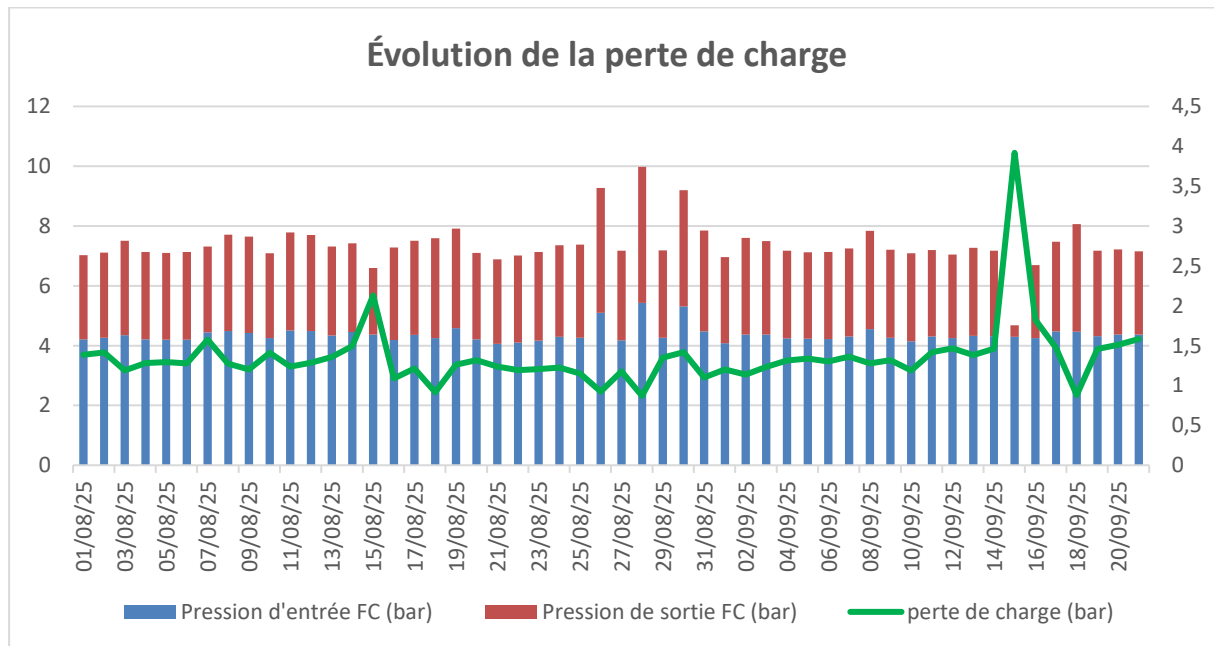


Figure III.10 : Évolution de la perte de charge des filtres à cartouches sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

Cette figure présente l'évolution des pressions d'entrée et de sortie des filtres à cartouches, représentées par des histogrammes, ainsi que l'évolution de la perte de charge représentée par une courbe. Les résultats montrent que la pression d'entrée reste globalement stable entre 4 et 5 bar, tandis que la pression de sortie est plus faible, ce qui entraîne une augmentation de la perte de charge. Une forte augmentation de la perte de charge a été enregistrée le 15/09/25, atteignant 4 bar.

III.4. Résultats et interprétation des résultats

III.4.1. Interprétation des résultats du tableau III.2

Au début de l'exploitation (le 01/08/25), les débits unitaires des filtres sont encore élevés, avec des valeurs comprises entre 2227 et 2307 m³/h pour les filtres FC 01, FC 10 et FC 12, tandis que des débits compris entre 974 et 1281 m³/h sont observés pour les filtres FC 03, FC 06 et FC 14.

Cette différence entre les débits des six filtres à cartouches est expliquée par la différence de leur état d'encrassement, liée à leur période de remplacement, certains filtres étant plus récents que d'autres.

À partir du 05/08/25, une diminution progressive des débits unitaires est observée. Cette diminution s'explique par le colmatage des cartouches, dû à l'accumulation des particules présentes dans l'eau de mer, ce qui rend l'écoulement plus difficile.

En prenant le filtre à cartouches FC01, on remarque que du 01/08/25 au 25/08/25, une diminution importante du débit de 2227,8 à 389,6 m³/h, soit une baisse de 1838,2 m³/h sur cette période. Cette évolution traduit un colmatage prématuré des cartouches du filtre. À titre de comparaison, dans des conditions normales de fonctionnement, la diminution du débit est généralement comprise entre 100 et 500 m³/h sur une période équivalente.

Les analyses de qualité de filtration montrent des performances stables du prétraitement :

- Turbidité en sortie des filtres à sable (FS) : **< 0,5 NTU.**
 - Turbidité en sortie des filtres à cartouches (FC) : **< 0,3 NTU.**
 - SDI¹⁵ en sortie des filtres à cartouches : **SDI¹⁵ < 5.**
- Ces résultats confirment que la qualité de la filtration est assurée, mais au prix d'un colmatage prématuré des cartouches.

III.4.2. Interprétation des résultats du tableau III.3

La pression d'entrée des filtres reste stable (4 à 5 bar), tandis que la pression de sortie varie entre 0,4 et 4 bar, ce qui entraîne une augmentation progressive de la perte de charge due au colmatage prématuré des cartouches filtrantes.

À partir du 05/08/25, cette évolution s'accompagne d'une baisse des débits unitaires. Dans environ 76 % des cas, la perte de charge dépasse 1,2 bar, indiquant un fonctionnement fréquent au-delà du seuil recommandé.

III.4.3. Interprétation des résultats des six filtres à cartouches

Les figures III.2 à III.7 montrent l'évolution des débits de six filtres à cartouches sur la période du 01/08/25 au 20/09/25.

L'analyse des courbes montre une diminution continue des débits au cours du temps, liée à l'encrassement progressif des cartouches filtrantes.

Le colmatage sévère est atteint lorsque le débit résiduel devient inférieur à 650 m³/h (seuil de colmatage). L'atteinte de ce seuil entraîne une surcharge des autres filtres et une augmentation des contraintes hydrauliques dans le système (voir Tableau III.4).

Tableau III.4 : Synthèse des performances des filtres à cartouches.

Filtre à cartouches	Durée de fonctionnement	Temps pour atteindre 650 m³/h (seuil de colmatage)	Comportement
FC 01	~2 mois et 15 jours	Rapide	Colmatage prématuré
FC 03	~2 mois et 15 jours	Rapide	Colmatage prématuré
FC 06	~3 mois	Lent + anomalies	Arrachement des cartouches du filtre
FC 10	~2 mois et 20 jours	Moyen	Stable puis une diminution rapide du débit
FC 12	~2 mois et 10 jours	Rapide	Colmatage prématuré
FC 14	~2 mois et 8 jours	Rapide	Colmatage prématuré

III.4.3.1. Interprétation des résultats du tableau III.4

Les résultats montrent un comportement globalement similaire des filtres, caractérisé par un colmatage prématuré. Le seuil de 650 m³/h est atteint entre 2 mois et 3 mois selon les filtres.

Le filtre FC 06 présente un comportement particulier, avec une stabilisation temporaire du débit, expliquée par un phénomène d'arrachement des cartouches lié à des conditions hydrauliques défavorables (vitesses élevées et pertes de charge importantes) (voir Figure III.11).



Figure III.11 : Phénomène d'arrachement des cartouches du filtre FC 06 (photo originale).

III.4.4. Interprétation des résultats des turbidités

Les figures III.8 et III.9, relatives à la turbidité au niveau du captage d'eau de mer et à la sortie des filtres à cartouches, montrent que la turbidité de l'eau brute au captage est élevée et variable. En revanche, la turbidité en sortie des filtres à cartouches reste faible et stable, ce qui indique une bonne efficacité de filtration.

III.4.5. Interprétation des résultats de la perte de charge

La figure III.10 montre une augmentation progressive de la perte de charge au cours du temps. Cette évolution traduit l'encrassement des cartouches filtrantes et est liée à la diminution de la pression en sortie des filtres, malgré une pression d'entrée relativement stable.

III.5. Diagnostic opérationnel des filtres à cartouches

- Les filtres à cartouches remplissent leur rôle de clarification (bonne turbidité en sortie).
- Cependant, leur durée de vie utile est raccourcie (≈ 2 mois), au lieu de 4 à 6 mois données par le constructeur.
- Le phénomène observé est typique d'un **sous-dimensionnement structurel** :
 - Le débit traité par filtre dépasse fréquemment le débit maximal admissible de conception ($2\,137\text{ m}^3/\text{h}$).
 - Le nombre de filtres à cartouches totale installée est insuffisant pour maintenir un débit de $27\,778\text{ m}^3/\text{h}$ sur une période raisonnable.

III.6. Impact opérationnel du fonctionnement des filtres à cartouches

- Le débit disponible diminue régulièrement, tandis que la perte de charge dépasse 1,2 bar, obligeant à réduire la production.
- Le colmatage progressif des cartouches entraîne une augmentation des fréquences de maintenance, ce qui réduit l'efficacité globale du système de prétraitement.
- L'augmentation de la perte de charge provoque une sollicitation accrue des pompes en amont, entraînant une augmentation de la consommation énergétique.
- Les arrêts fréquents pour le remplacement des cartouches entraînent une augmentation significative des coûts d'exploitation (OPEX).
- Le remplacement fréquent des cartouches génère une production importante de déchets, posant un problème de gestion environnementale.
- La durée de vie limitée des cartouches (2 mois) rend le fonctionnement incompatible avec une exploitation industrielle stable, compromettant la continuité de la production.
- La qualité des filtres disponible sur le marché algérien.

III.7. Conclusion

L'analyse des performances des filtres à cartouches en conditions réelles met en évidence une diminution rapide des débits, accompagnée d'une augmentation de la perte de charge, qui dépasse fréquemment le seuil critique de 1,2 bar en raison du colmatage prématuré des cartouches filtrantes. Cette situation entraîne une incapacité à maintenir le débit nominal requis de 27 778 m³/h.

Par ailleurs, le colmatage prématuré des cartouches nécessite des interventions de maintenance fréquentes et une réduction de l'efficacité globale du système de prétraitement. L'augmentation de la perte de charge provoque également une sollicitation accrue des pompes en amont, entraînant une hausse de la consommation énergétique.

En conséquence, les arrêts fréquents pour le remplacement des cartouches engendrent une augmentation significative des coûts d'exploitation (OPEX), ainsi qu'une production importante de déchets filtrants, posant un problème de gestion environnementale.

Malgré une qualité de filtration satisfaisante en sortie des filtres à cartouches (faible turbidité), les performances hydrauliques restent instables. Ces résultats démontrent que le dimensionnement actuel des filtres à cartouches est insuffisant pour assurer un fonctionnement optimal et continu, ce qui confirme l'existence d'un sous-dimensionnement de cette étape de prétraitement.

Ces constats nous amènent à proposer, dans le chapitre suivant, des solutions adaptées pour améliorer les performances du système (nombre de cartouches, surface de filtration par cartouche, nombres de filtres à cartouches, etc.).



Chapitre IV

*Optimisation des filtres à cartouches et
impacts environnementaux*



IV.1. Introduction

Les résultats présentés dans le chapitre précédent montrent qu'il y a un sous-dimensionnement du système de filtres à cartouches de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2.

Face à cette situation, un redimensionnement du système de filtration à cartouches est devenu nécessaire afin d'assurer le traitement du débit maximal de la station et d'améliorer les performances globales de l'installation dans des conditions réelles d'exploitation.

L'objectif de ce chapitre est de proposer et d'étudier différentes solutions techniques pour améliorer le fonctionnement des filtres à cartouches tout en tenant compte des contraintes techniques et économiques de la station. Plusieurs solutions sont étudiées, telles que l'augmentation du nombre de filtres, l'augmentation du nombre de cartouches, l'amélioration de la surface de filtration ainsi que l'application d'un traitement chimique par chloration.

Enfin, une étude technico-économique comparative est réalisée afin d'évaluer les différentes solutions proposées en tenant compte de leur efficacité, de leur coût d'exploitation ainsi que des impacts environnementaux et économiques associés à l'optimisation des filtres à cartouches.

IV.2. Critères d'optimisation

Afin d'évaluer l'efficacité des solutions proposées, plusieurs critères ont été retenus :

- Maintien du débit maximal requis 330 000 (m³/j).
- Limitation de la perte de charge : $\Delta P \leq 1,2$ bar.
- Favoriser la prolongation de la durée de vie des cartouches.
- Réduction des coûts d'exploitation (OPEX).

Ces critères serviront de base pour comparer les différentes solutions proposées.

IV.3. Solutions techniques proposées

Il est important de noter que la station a été initialement dimensionnée pour un débit nominal de 27 778 m³/h. Cependant, selon les données du constructeur, le débit maximal que la station doit pouvoir atteindre est de 30 556 m³/h.

Dans cette étude, les calculs ont été réalisés sur la base de ce débit maximal afin de vérifier la capacité réelle des filtres à cartouches à fonctionner dans les conditions les plus contraignantes.

Les solutions techniques proposées sont présentées ci-après :

IV.3.1. Augmentation du nombre de filtres à cartouches

Afin d'améliorer les performances des filtres à cartouches et de réduire la perte de charge, une analyse a été réalisée pour optimiser le nombre de filtres à cartouches, en considérant l'ajout de 1, 2 ou 3 filtres supplémentaires. Cette méthode permet d'évaluer l'impact de cette augmentation sur le débit unitaire ainsi que sur la vitesse de filtration. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1 : Optimisation du nombre de filtres à cartouches.

Nombre de filtres à cartouches	Nombre de filtres = 14	Nombre de filtres = 15	Nombre de filtres = 16	Nombre de filtres = 17
	Données du constructeur	Travail de dimensionnement actuel		
Débit d'eau de mer à filtrer (m ³ /h)	27778	30556	30556	30556
Paramètres : . Nombre de cartouches par filtre : 474 unités. . Capacité de coupe de la cartouche : 5 microns. . Diamètre de la cartouche OD : 63 (mm). . Diamètre de la cartouche ID : 28 (mm) . Longueur de la cartouche : 1.778 (mm). . Surface filtrante de la cartouche : 0,352 (m ²).	Débit nominal par filtre (m ³ /h)			
	1984	2037	1910	1797
	Débit réel par cartouche (m ³ /h).			
	4,19	4,30	4,03	3,79
	Vitesse de filtration à l'opération nominal par filtre (m/h)			
	11,90	12,21	11,45	10,77

IV.3.1.1. Analyse des résultats du tableau IV.1 :

D'après les résultats obtenus, l'augmentation du nombre de filtres à 15, dans le cadre d'un fonctionnement au débit maximal de production de 30 556 m³/h, a entraîné une augmentation du débit traité par filtre à 2037 m³/h ainsi qu'une augmentation de la vitesse de filtration à 12,21 m/h. Ces résultats sont supérieurs aux valeurs recommandées par le constructeur, ce qui rend cette solution inefficace pour limiter le colmatage des filtres.

L'augmentation du nombre de filtres à 16 ou 17 permet cependant de répartir le débit total entre les filtres et ainsi de diminuer le débit unitaire par filtre ainsi que la vitesse de filtration, ce qui aide à retarder le colmatage et à allonger la durée de vie des cartouches.

IV.3.1.2. Simulation de la perte de charge

Dans cette étude, l'analyse a été réalisée en prenant comme référence un seul filtre à cartouches, à savoir le filtre FC 14, choisi aléatoirement. Des échantillons représentatifs ont été considérés aux dates du 01, 05, 15, 22 et 25 août 2025, en se basant sur les valeurs expérimentales du débit et de la perte de charge.

À partir de ces données, une simulation de la perte de charge a été effectuée pour différents cas d'étude correspondant à l'ajout de 1, 2 et 3 filtres à cartouches supplémentaires (FC 15, FC 16 et FC 17). Cette simulation repose sur une relation de proportionnalité entre la perte de charge et le débit, exprimée par la formule suivante :

$$DP_{estimée} = DP_{actuelle} \times \frac{Q_{nouveau}}{Q_{actuel}}$$

- $Q_{nouveau}$: débit correspondant aux filtres supplémentaires (FC 15, FC 16 et FC 17) dans les cas simulés.
- Q_{actuel} : débit mesuré au niveau du filtre de référence FC 14.

Dans cette approche, le débit du filtre et la perte de charge FC 14 est considéré comme variable selon les conditions réelles, tandis que le débit des filtres supplémentaires (FC 15, FC 16 et FC 17) est supposé constant pour chaque scénario.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de tableaux pour les différents cas d'ajout de filtres à cartouches FC 15, FC 16 et FC 17.

Tableau IV.2 : Données expérimentales du filtre à cartouches FC 14 relatives au débit et à la perte de charge.

Date	Débit FC 14 (m³/h)	ΔP actuelle (bar)
01/08/25	987,9	1,386
05/08/25	900,0	1,292
15/08/25	630,0	2,13
22/08/25	2375,7	1,195
25/08/25	2273,7	1,148

Tableau IV.3 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 15 filtres en service.

Date	Débit FC 15 (m ³ /h)	Δp estimée (bar)
01/08/25	2037	2,857
05/08/25	2037	2,924
15/08/25	2037	6,887
22/08/25	2037	1,024
25/08/25	2037	1,028

Tableau IV.4 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 16 filtres en service.

Date	Débit FC 16 (m ³ /h)	Δp estimée (bar)
01/08/25	1910	2,679
05/08/25	1910	2,741
15/08/25	1910	6,457
22/08/25	1910	0,96
25/08/25	1910	0,964

Tableau IV.5 : Estimation de la perte de charge dans le cas de 17 filtres en service.

Date	Débit FC 17 (m ³ /h)	Δp estimée (bar)
01/08/25	1797	2,521
05/08/25	1797	2,579
15/08/25	1797	6,075
22/08/25	1797	0,903
25/08/25	1797	0,907

Discussion :

D'après les résultats des tableaux, on a observé une légère diminution de la perte de charge estimée lors de l'ajout de 15, 16 et 17 filtres à cartouches, malgré le fait que l'étude initiale ait été réalisée sur la base d'un débit horaire nominal de 27 778 m³/h, alors que l'étude actuelle est réalisée sur un débit maximal de 30 556 m³/h.

En effet, une perte de charge de 2,13 bar a été enregistrée au niveau du filtre FC 14 pour un débit minimal de 630 m³/h. Cependant, dans le cas de 16 filtres dimensionnés pour un débit maximal de 30 556 m³/h, la perte de charge estimée atteint 6,457 bar.

Les valeurs de perte de charge estimées restent donc très élevées en raison du sous-dimensionnement des filtres, ce qui limite la représentativité des résultats dans les conditions réelles de fonctionnement.

IV.3.2. Augmentation du nombre de cartouches

Afin d'améliorer les performances du système de filtration, de limiter la variation du débit et de réduire la perte de charge, une étude a été réalisée sur l'augmentation du nombre de cartouches filtrantes.

Plusieurs scénarios ont été considérés, à savoir l'ajout de 1, 3 ou 6 cartouches supplémentaires.

Cette analyse permet d'évaluer l'impact de cette augmentation sur le débit unitaire ainsi que sur la vitesse de filtration. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.6 : Optimisation du nombre de cartouches filtrantes.

Nombre de cartouches	Nombre de cartouches = 474	Nombre de cartouches = 475	Nombre de cartouches = 477	Nombre de cartouches = 480
	Données du constructeur	Travail de dimensionnement actuel		
Débit d'eau de mer à filtrer (m³/h)	27778	30556	30556	30556
<u>Paramètres :</u> . Nombre de filtres : 14 . Capacité de coupe de la cartouche : 5 microns. . Diamètre de la cartouche OD : 63 (mm). . Diamètre de la cartouche ID : 28 (mm) . Longueur de la cartouche : 1.778 (mm). . Surface filtrante de la cartouche : 0,352 (m ²)	Débit nominal par filtre (m³/h)			
	1984	2183	2183	2183
	Débit réel par cartouche (m³/h)			
	4,19	4,59	4,57	4,54
	Vitesse de filtration à l'opération nominal par filtre (m/h)			
	11,90	13,05	12,99	12,91

IV.3.2. Analyse des résultats du tableau IV.6

L'augmentation du nombre de cartouches par filtre, dans le cadre d'un fonctionnement au débit maximal de production de 30 556 m³/h, entraîne une augmentation du débit traité par filtre (2183 m³/h), ce qui conduit à une augmentation de la vitesse de filtration. Cette solution n'est donc pas optimale pour réduire le colmatage prématuré des cartouches.

IV.3.3. Augmentation de la surface de filtration

L'augmentation de la surface de filtration constitue une solution envisagée pour limiter le colmatage prématuré cartouches filtrantes. Elle permet de réduire la vitesse de filtration et d'améliorer la capacité de rétention des particules et de retarder l'accumulation des matières en suspension, prolongeant ainsi la durée de vie des cartouches. Les différentes marques de cartouches filtrantes proposées sont les suivantes :

Tableau IV.7 : Les caractéristiques techniques des cartouches filtrantes Veolia SWRO.Zs 05-70 et Pullner bobinée [[77],[78]].

Cartouche filtrante Veolia – série SWRO.Zs, modèle 05-70	Cartouche filtrante bobinée (string wound) Pullner
➤ Caractéristiques générales - Type : filtre à cartouche en profondeur - Application : prétraitement des systèmes d'osmose inverse eau de mer (SWRO) - Technologie : Z.Plex (densité progressive). ➤ Caractéristiques dimensionnelles - Longueur : 70 pouces (≈ 177,8 cm) - Diamètre externe : ≈ 2,46 pouces (6,2 cm). - Diamètre interne : ≈ 1,10 pouce (≈ 2,8 cm). ➤ Caractéristiques de filtration - Seuil de filtration : 5 microns (nominal). - Sens de filtration : de l'extérieur vers l'intérieur. ➤ Matériaux - Média filtrant : 100 % polypropylène - Structure : multicouche à densité graduée (grosses particules à l'extérieur, fines à l'intérieur) ➤ Performances hydrauliques - Perte de charge maximale : ≈ 2,4 bar - ΔP recommandé pour remplacement : ≈ 1,4 bar - Faible résistance à l'écoulement ➤ Performances opérationnelles - Capacité de rétention élevée - Durée de vie plus longue que les filtres classiques - Réduction efficace du SDI - Jusqu'à 50 % de perte de charge en moins par rapport aux filtres standards ➤ Certifications et qualité - Conforme : FDA (contact alimentaire) - Conforme : NSF 61 - Fabrication certifiée : ISO 9001	➤ Caractéristiques techniques principales - Marque : Pullner (Shanghai Pullner Filtration Technology Co., Ltd.) - Type : Cartouche bobinée (String Wound). - Matériau filtrant : 100 % Polypropylène (PP) (support pour profondeur de filtration). - Finesse de filtration : 5 microns. - Longueur : 70 inch (≈ 1778 mm), adaptée aux grandes installations industrielles ou systèmes marins RO). - Diamètre extérieur (OD) : environ 63 mm (standard pour housings RO). - Diamètre intérieur (ID) : 28 mm ou 30 mm (adaptable à la plupart des boîtiers Standard). - Perte de charge maximale : ≈ 3 bar - ΔP recommandé pour remplacement : ≈ 1,4 bar - Certification & qualité : ISO9001 / ISO45001 (certifications de qualité rapportées pour ce produit).

IV.3.3.1. Analyse des résultats du tableau III.7

La cartouche Veolia SWRO.Zs (05-70) de type à densité graduée (Z.Plex) offre une filtration en profondeur plus efficace que la cartouche bobinée Pullner. Sa structure multicouche permet une meilleure répartition des particules, ce qui limite le colmatage prématuré des cartouches et entraîne une diminution progressive de la perte de charge ainsi qu'une durée de vie plus longue.

En revanche, la cartouche bobinée Pullner présente une structure plus simple, avec une efficacité de filtration correcte mais une saturation plus rapide, ce qui provoque une augmentation plus rapide de la perte de charge et des remplacements plus fréquents.

Ainsi, la cartouche Veolia assure de meilleures performances hydrauliques et une exploitation plus stable, mais avec un coût unitaire plus élevé que la cartouche bobinée classique.

IV. 3.4. Solution chimique : chloration

La chloration au niveau du captage d'eau de mer assure la désinfection par l'élimination des micro-organismes et contribue à l'oxydation des composés organiques et inorganiques (Fe, Mn, H₂S), favorisant ainsi leur transformation en formes éliminables par les procédés en aval.

Par ailleurs, l'injection d'acide sulfurique au niveau du captage permet d'ajuster le pH, renforçant ainsi l'efficacité de la désinfection. Elle contribue également à limiter le phénomène d'entartrage au niveau des membranes d'osmose inverse.

Cette solution permet de réduire la charge biologique dans les différentes étapes du prétraitement, limitant ainsi le colmatage biologique des cartouches filtrantes et le risque de biofouling au niveau des membranes d'osmose inverse [79].

La figure suivante présente le plan de masse de la station de Cap Djinet 2 illustrant l'ajout des points d'injection (chlore et acide sulfurique) au niveau du bassin de captage.

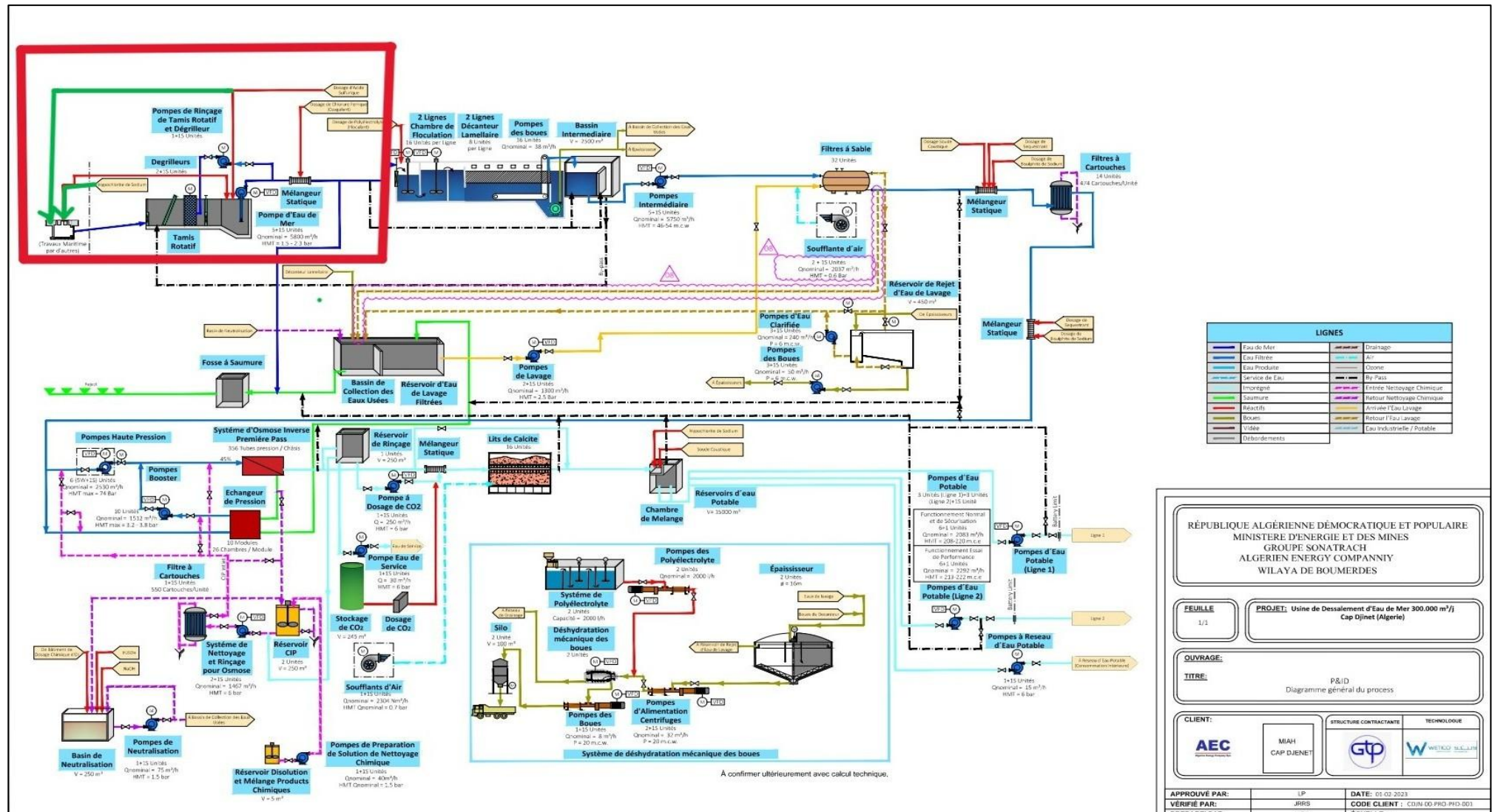


Figure IV. 1: Le plan de masse de la station de dessalement de Cap Djinet 2 (document interne de la SDEM).

IV.4. Étude technico-économique

IV.4.1. Étude technico-économique de l'augmentation du nombre de filtres

L'étude technico-économique vise à analyser l'impact de l'augmentation du nombre de filtres sur les performances hydrauliques (débit, vitesse de filtration) ainsi que sur les coûts annuels d'exploitation. L'objectif est de proposer une configuration optimale assurant un compromis entre efficacité de filtration et maîtrise des coûts.

- **Coût d'achat** : le prix unitaire d'une cartouche filtrante est estimé à **700 DA**
- **Fréquence de remplacement** : 4 mois (condition actuelle d'exploitation retenue pour l'estimation du coût annuel).

Tableau IV.8 : Comparaison technico-économique selon le nombre de filtres à cartouches.

Nombre de filtres		Nombre de cartouches par filtre	Coût annuel (DA)	Débit nominal par filtre (m ³ /h)	Vitesse de filtration par filtre (m/h)
Données du constructeur	14	474	13935600	1984	11,90
Travail de dimensionnement actuel	15	474	14931000	2037	12,21
	16	474	15926400	1910	11,45
	17	474	16921800	1797	10,77

Comparaison technico-économique

Par rapport à la configuration du constructeur basée sur 14 filtres, les différentes configurations étudiées présentent des performances hydrauliques et des coûts variables. L'ajout d'un 15-ème filtre entraîne une légère augmentation de la vitesse de filtration à 12,21 m/h et le débit nominal par filtre à 2037 m³/h. Cependant, cette solution augmente aussi le coût annuel à 1493000 DA sans amélioration significative des conditions de filtration.

En revanche, les configurations à 16 et 17 filtres permettent de réduire progressivement le débit nominal et la vitesse de filtration par filtre. Pour 16 filtres, la vitesse de filtration diminue à 11,45 m/h pour un coût annuel de 15 926 400 DA. Pour 17 filtres, elle atteint 10,77 m/h, offrant ainsi les meilleures conditions hydrauliques parmi les configurations étudiées, mais avec un coût annuel plus élevé de 16 921 800 DA.

Ainsi, la configuration à 16 filtres représente un compromis technico-économique intéressant, car elle permet de réduire la vitesse de filtration et le débit nominal par filtre tout en présentant un coût inférieur à celui de la configuration à 17 filtres.

IV.4.2. Étude technico-économique de l'augmentation de la surface de filtration

L'étude technico-économique a été menée afin de comparer deux types de cartouches filtrantes, Veolia et Pullner, disposant d'une surface de filtration plus importante. Cette étude vise à évaluer l'impact de ce choix sur le Coût annuel d'exploitation, tout en tenant compte de leur influence sur les performances de filtration et la durée de vie des cartouches.

Tableau IV.9 : Comparaison technico-économique des cartouches filtrantes veolia et pullner en fonction de leur coût d'exploitation.

Marque	Prix unitaire (DA)	Coût pour 474 cartouches (DA)	Coût pour 14 filtres (DA)	Coût annuel (DA)
Cartouche filtrante Veolia	4500	2133000	29862000	89586000
Cartouche filtrante Pullner	800	379200	5308800	15926400

Comparaison technico-économique

Le coût d'utilisation des cartouches filtrantes Veolia est très élevé, atteignant 89586000 DA par an, en considérant une fréquence de remplacement tous les quatre mois. Cependant, l'utilisation des cartouches filtrantes Pullner présente un coût annuel plus faible, estimé à 15926400 DA, ce qui la rend économiquement plus acceptable.

IV.4. Comparaison des solutions proposées

Une comparaison des différentes solutions proposées a été menée sur la base des critères précédemment définis (débit, vitesse de filtration, ΔP et coût) afin d'identifier la solution la plus adaptée pour limiter le colmatage des filtres à cartouches (voir Tableau VI.10).

Tableau IV.10 : Comparaison des différentes solutions proposées.

Solution	Variante	Effet sur débit	Effet sur ΔP	Vitesse de filtration	Impact sur colmatage	Coût	Conclusion
Augmentation du nombre de filtres	15 filtres	↑ débit unitaire	↑ ΔP	↑	Prématuré	Moyen	Solution non optimale
	16 filtres	↓ débit unitaire	↓ ΔP	↓	Diminué	Moyen	Meilleur compromis technico-économique
	17 filtres	↓↓ débit unitaire	↓ ΔP	↓↓	Fortement diminué	Élevé	Bonne efficacité mais coût élevé
Augmentation du nombre de cartouches	475 cartouches	↑ débit	↑ ΔP	↑	Prématuré	Moyen	Solution non adaptée
	477 cartouches						
	480 cartouches						
Surface filtrante (type de cartouche)	Pullner	—	↓ modérée	↓	Amélioration limitée	Faible	Solution économique
	Veolia (SWRO.Zs)	—	↓ importante	↓↓	Fortement diminué	Très élevé	Solution efficace mais coûteuse
Solution chimique	Chloration	—	Effet indirect	—	Réduction du biofouling	Moyen	Solution complémentaire

IV.5. Solution optimale retenue

Après analyse comparative, les solutions optimales retenues consistent à ajouter deux filtres à cartouches (soit un total de 16 filtres), combinées à une chloration au niveau du bassin de captage d'eau de mer.

L'augmentation du nombre de filtres permet une meilleure répartition du débit, réduisant ainsi le débit unitaire, la vitesse de filtration et la perte de charge, ce qui limite le colmatage et prolonge la durée de vie des cartouches.

La chloration agit en complément en diminuant la charge biologique dans les étapes de prétraitement, limitant ainsi le biofouling des membranes d'osmose inverse.

Ainsi, cette combinaison assure un bon compromis entre performance, durabilité et coût.

IV.6. Impacts environnementaux et économiques

L'optimisation des filtres à cartouches ne se limite pas à l'amélioration des performances techniques. Elle a également des effets importants sur l'environnement et sur les coûts d'exploitation. Cette partie présente les principaux impacts liés à cette optimisation.

IV.6.1. Impacts environnementaux

1. Impacts environnementaux directs

- **Réduction de la production de déchets solides :** L'amélioration des conditions de filtration permet d'augmenter la durée de vie des cartouches filtrantes et de réduire leur fréquence de remplacement. Cette optimisation diminue ainsi la quantité de déchets solides générés par la station, notamment les cartouches usagées en polypropylène.
- **Espacement des rejets de saumures et des eaux de lavage :** Une meilleure efficacité du prétraitement permet d'espacer les opérations de nettoyage et de rinçage des installations, ce qui contribue à limiter les volumes de saumures et d'eaux chargées rejetés dans le milieu marin.
- **Réduction des risques de pollution marine :** La diminution des rejets contenant des produits chimiques issus des opérations de nettoyage contribue à limiter les perturbations physico-chimiques du milieu récepteur et à préserver les écosystèmes marins situés à proximité des zones de rejet.

2. Impacts environnementaux indirects

- **Prolongation de la durée de vie des membranes d'osmose inverse :** Une filtration plus performante en amont réduit le colmatage des membranes d'osmose inverse, ce qui diminue leur fréquence de remplacement ainsi que la quantité de déchets industriels associés.
- **Réduction de la consommation de produits chimiques :** La limitation du colmatage entraîne une diminution des opérations de nettoyage chimique (CIP), réduisant ainsi l'utilisation de réactifs tels que les acides, les désinfectants et les agents de nettoyage.
- **Réduction de la consommation énergétique :** La diminution des pertes de charge à travers les filtres améliore les conditions hydrauliques de fonctionnement et réduit l'énergie nécessaire au pompage, contribuant indirectement à la réduction des émissions de CO₂ liées à la consommation électrique.

IV.6.2. Impacts économiques

1. Impacts économiques directs

- **Réduction des coûts de remplacement des filtres à cartouches** : L'augmentation de la durée de vie des cartouches permet de réduire la fréquence des remplacements et donc les coûts d'achat des consommables.
- **Réduction des coûts de maintenance** : La diminution du colmatage réduit les interventions de maintenance corrective et les arrêts fréquents liés au remplacement des cartouches.
- **Réduction des coûts de gestion des déchets** : La baisse du nombre de cartouches usagées permet de limiter les dépenses liées à la collecte, au transport et au traitement des déchets industriels.

2. Impacts économiques indirects

- **Réduction des coûts de remplacement des membranes d'osmose inverse** : La protection des membranes contre le colmatage et l'encrassement prolonge leur durée de vie et retarde les investissements liés à leur renouvellement.
- **Diminution des coûts liés aux produits chimiques** : La réduction des opérations de nettoyage chimique permet de limiter la consommation de réactifs et les dépenses associées.
- **Réduction de la consommation énergétique** : L'amélioration des conditions hydrauliques et la diminution des pertes de charge contribuent à réduire la consommation électrique des pompes et donc les coûts énergétiques de l'installation.
- **Amélioration de la continuité de service** : Un fonctionnement plus stable des filtres limite les arrêts imprévus et améliore la disponibilité globale de la station, ce qui favorise une meilleure rentabilité de l'exploitation.
- **Optimisation du coût global d'exploitation** : L'ensemble des améliorations apportées permet de réduire progressivement les coûts OPEX de la station tout en maintenant de bonnes performances de production et de qualité d'eau.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et à l'évaluation de différentes solutions visant à optimiser le système de filtration à cartouches de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, afin de limiter le colmatage prématuré observé.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre de cartouches ne constitue pas une solution efficace, puisqu'elle entraîne une augmentation de la vitesse de filtration et favorise ainsi le colmatage. En revanche, l'augmentation du nombre de filtres permet de réduire le débit traité par filtre ainsi que la vitesse de filtration, améliorant les conditions de fonctionnement du système.

L'augmentation de la surface filtrante par l'utilisation de cartouches Veolia permet d'améliorer les performances de filtration et de réduire davantage la perte de charge. Cependant, cette solution nécessite un coût d'investissement nettement plus élevé que les cartouches Pullner.

Par ailleurs, l'introduction d'un traitement chimique par chloration au niveau du bassin de captage d'eau de mer constitue une solution complémentaire permettant de limiter le développement biologique responsable du bio-colmatage et d'améliorer l'efficacité du prétraitement.

Parmi les configurations étudiées, la mise en place de 16 filtres apparaît comme le meilleur compromis technico-économique. Cette solution permet de diminuer la perte de charge et de limiter le risque de colmatage tout en maintenant un coût d'investissement plus raisonnable que la configuration à 17 filtres.

Ainsi, la combinaison de la configuration à 16 filtres et de la chloration au niveau du captage représente la solution d'optimisation la plus adaptée pour améliorer les performances du système de prétraitement. Elle contribue à assurer un fonctionnement plus stable de l'installation, à prolonger la durée de vie des cartouches filtrantes et des membranes d'osmose inverse, ainsi qu'à réduire les coûts d'exploitation liés au remplacement des cartouches filtrantes.

Cette optimisation permet également de réduire les impacts environnementaux associés à l'exploitation de la station, notamment par la diminution de la consommation de cartouches filtrantes et de la quantité de déchets solides générés par leur remplacement.



Conclusion générale



Conclusion générale

La pénurie mondiale en eau potable a conduit au développement du dessalement de l'eau de mer, considéré aujourd'hui comme l'une des solutions les plus efficaces pour répondre à la demande croissante en eau potable et industrielle. Dans ce contexte, l'usine de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, basée sur le procédé d'osmose inverse, a été conçue afin d'assurer une production quotidienne d'eau potable pour la région de l'Est d'Alger.

Notre mémoire de fin d'études s'inscrit dans le cadre du redimensionnement de la filière de microfiltration de la station de dessalement d'eau de mer de Cap Djinet 2, ainsi que de l'évaluation de son impact environnemental. La problématique à laquelle nous avons tenté de répondre concerne le colmatage prématuré des filtres à cartouches. En effet, la station dispose de 14 filtres contenant un total de 474 cartouches filtrantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons tout d'abord vérifié le dimensionnement de la filière de microfiltration de la SDEM de Cap Djinet 2 afin d'identifier les anomalies rencontrées dans cette étape. Une fois cette partie réalisée, une optimisation du système a été proposée, accompagnée d'une évaluation de son impact environnemental.

Les résultats obtenus ont permis de proposer les améliorations suivantes :

- Les calculs réalisés ont conduit à proposer l'augmentation du nombre de filtres à cartouches de 14 à 16 filtres afin de réduire la charge hydraulique appliquée à chaque filtre.
- L'introduction d'un traitement chimique par chloration au niveau du bassin de captage d'eau de mer constitue une solution complémentaire pertinente pour limiter le bio-colmatage et améliorer les performances de filtration.

Les résultats obtenus montrent que le redimensionnement proposé assure une meilleure répartition de la charge appliquée sur les filtres, avec un débit de 1910 m³/h par filtre. Cette optimisation permet de réduire la perte de charge ainsi que la vitesse de filtration (11,45 m/h), ce qui limite le colmatage prématuré des cartouches filtrantes, améliore les performances de filtration et prolonge leur durée de vie. Elle contribue également à la réduction des coûts d'exploitation et des impacts environnementaux, notamment grâce à la diminution de la consommation de cartouches filtrantes et des déchets solides générés par leur remplacement.

Le nouveau dimensionnement permet également d'assurer le fonctionnement de la filière de microfiltration pour un débit maximal de production de 330 000 m³/j, contre 300 000 m³/j initialement.

Notre mémoire de fin d'étude nous a permis de découvrir le monde du dessalement de l'eau de mer d'une part et, d'autre part, d'apprendre les techniques nécessaires à la conception et à la réalisation d'un système de filtres à cartouches dans une station de dessalement. C'est le bénéfice que nous avons acquis grâce à notre redimensionnement.

Ce travail constitue ainsi une expérience enrichissante, alliant aspects théoriques et pratiques du traitement des eaux.



Références bibliographiques



- [1] : Saint-Exupéry, A. D. (1939). *Terre des hommes*. Рипол Классик.
- [2] : SOUAK, F. (2003). La politique de l'eau en Algérie valorisation et développement durable. *International journal of economics & strategic management of business process* (ESMB). Pôle universitaire Koléa Tipaza Algérie, 67-72.
- [3] : Rovel, J. M. (2017). *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, dossier W5700.<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/procedes-de-traitement-des-eaux-potables-industrielles-et-urbaines-42318210/dessalement-de-l-eau-de-mer-w5700>.
- [4] : World Wildlife Fund (WWF), Water Scarcity
<https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>
- [5] : Oki, T., & Kanae, S. (2006). *Global hydrological cycles and world water resources*. Science.
- [6]: Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., et al. (2010). *Global threats to human water security and river biodiversity*.
- [7]: De Wever, P. (2025, mars). Répartition de l'eau sur terre et de l'eau douce. Museum National d'Histoire Naturelle. Données: Académie de Poitiers © MNHN – V. Briand.
- [8]: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). AQUASTAT – Global water resources database. Rome, Italy: FAO.
- [9]: Triki, I., & Aytac, K. (2024, octobre). La Méditerranée a soif. La Jaune et la Rouge.
- [10] : Rhissa Ag Billal. (2018). Étude de changement climatique au Nord-Est algérien (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [11] : Ait El Mekki, A., et al. (2022). *A critical review of studies on water resources in the Souss-Massa Basin, Morocco: Envisioning a water research agenda for local sustainable development*. *Water*, 14(9), 1355.
- [12]: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *AQUASTAT country profile – Tunisia*. FAO.
- [13]: World Bank. (2020). *Water scarcity in the Middle East and North Africa (MENA)*. Washington, DC: World Bank.
- [14]: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *AQUASTAT main country and regional trends in water resources: North Africa*. FAO.
- [15]: United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2022). *World urbanization prospects: The 2022 revision*. United Nations.
- [16]: World Bank. (2021). *Water in agriculture and food security in the Middle East and North Africa*. World Bank Group.
- [17]: Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- [18]: United Nations World Water Assessment Programme. (2023). *The United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNESCO.
<https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en>.
- [19]: Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability.
- [20] : Simon, A., & Basbous, M. (2024, 15 avril). Une cartographie de la course au dessalement dans le monde arabe. CAREP Paris.

- [21]: Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., & Wie, J.-M. (2008). Advances in seawater desalination technologies.
- [22]: Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography* (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4665-0729-9.
- [23]: Alloprof. Salinity. <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/salinity>.
- [24]: BIRKETT, JAMES D. (2012). « *The History of Desalination Before Large-Scale Use* », in *Desalination and Water Resources - History, Development and Management of Water Resources, Vol. I. Paris: UNESCO*.
- [25]: RO AGUA. (2022). Historique du dessalement, situation actuelle et perspectives de développement futur.
- [26] : BOYE, H. (2008). Eau, énergie dessalement et changement climatique en Méditerranée. Plan Bleu centre d'activité régional, Conseil général de l'environnement et du développement durable.
- [27] : La Documentation française. (2010). Capacités de dessalement dans le monde, 1950-2010
- [28] : BLANCHON, D. (2010). « Les capacités de dessalement dans le monde ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/cartes/eau-ressourcesetinfrastructures/c001259-les-capacites-de-dessalement-dans-le-monde>.
- [29] : ALGÉRIENNE DES EAUX (ADE) (2007). Rapport.
- [30] : Fédération de l'Énergie. (2024, 13 septembre). *Souss-Massa : les stations monoblocs de dessalement d'eau, une solution innovante face au stress hydrique*.
- [31] : Algerie-Eco. (19 février 2026). L'Algérie lance trois stations de dessalement pour un investissement d'un milliard de dollars.
- [32] : École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications. (2012). *Projet BEI 2012 – Groupe 4 : Traitement de l'eau*, à l'adresse : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g04/>.
- [33] : Vial, C. (2010). Dessalement de l'eau de mer – Principes généraux (J2700). Techniques de l'Ingénieur.
- [34] : HENRY ET MONIQUE 2002. Étude générale sur dessalement de l'eau de mer.
- [35] : Habet, L. (2012). Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement (Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 153 p.).
- [36] : National Oceanic and Atmospheric Administration. Turbidity in the marine environment. NOAA.
- [37]: Boyd, C. E. (2020). Typical chemical characteristics of full-strength seawater. Global Seafood Advocate.
- [38] : ALGÉRIENNE DES EAUX (2005). Dessalement d'eau de mer, Algérie.
- [39] : BOUTRIAA ABDELOUAHAB (2009) : « Effet des paramètres de fonctionnement sur les performances d'un distillateur solaire ».
- [40] : Programme des Nations Unies pour l'environnement – Plan d'action pour la Méditerranée (PAM). (2001, mai 28–31). Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : Évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure. Réunion des points focaux du PAM, Athènes, Grèce ; Réunion des coordonnateurs nationaux pour le MED POL, Venise, Italie.

- [41] : Rovel, J.-M. (2003). Dessalement de l'eau de mer (Mise à jour du dossier J 2 700 rédigé par P. Danis). Techniques de l'Ingénieur, Base documentaire Génie des procédés.
- [42] : Maurel, A. (2006). Dessalement d'eau de mer et d'eau saumâtre (1^{re} éd.).
- [43] : L'influence de la force ionique sur le dessalement des eaux faiblement saumâtres. <https://www.mcours.net/fra6/bilafra6rapp416.pdf>.
- [44] : Nisan, S. (2007). Dessalement de l'eau de mer par les réacteurs nucléaires.
- [45] : TPE dessalement Maroc. Distillation par compression de vapeur.
- [46] : TSIOURTIS. NICOS X. (2005). « desalination and the environment ». Desalination, vol 141.
- [47] : Renaudin, V. (2003, 18 novembre). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Culture Sciences-Chimie.
- [48] : Lutin, Florence. "L'électrodialyse et ses nombreuses applications Électrodes.
- [49] : www.emse.fr « brodahg » fiche9_2.
- [50] : Curto, D., Franzitta, V. & Guercio, A. (2021) 'A Review of the Water Desalination Technologies', Applied Sciences, 11(2), p. 670. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app11020670>.
- [51] : Do Thi, H.T., Pasztor, T., Fozer, D., Manenti, F. & Toth, A.J. (2021) 'Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses', Water, 13(21), p. 3023. Available at: <https://doi.org/doi.org/10.3390/w13213023>.
- [52] : Ahmed, F.E., Khalil, A. & Hilal, N. (2021) 'Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends', Desalination, 517, p. 115183. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>.
- [53] : Abdelkareem, M.A., El Haj Assad, M., Sayed, E.T. & Soudan, B. (2018) 'Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants', Desalination, 435, pp.97–113. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>.
- [54] : A.M. Helal; 2004. Optimal design of hybrid RO, MSF desalination plants, Desalination.
- [55] : I.C. Karagiannis, P.G. Soldatos, 2008. Water desalination cost literature: review and assessment, Desalination.
- [56] : DUPONT, A. (1981). Hydraulique urbaine. Tome 1. Édition EYROLLES.
- [57] : JOHNSON, W. E. (1976). State of the art of freezing processes.
- [58] : SADI, A. (2000). « Le dessalement solaire : considérations techniques ». Centre de développement des Énergies Renouvelables, Bouzareah, Alger.
- [59] : Survivre.com. Dessalinisateur solaire Aquadome pour distiller et purifier de l'eau de mer. Survivre.com.
- [60] : MAUREL, A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. 2^{ème} Ed. Tec&Doc Lavoisier.
- [61] : Adda, A., Naceur, W. M., & Abbas, M. (2016). Modélisation et optimisation de la consommation d'énergie d'une station de dessalement par procédé d'osmose inverse en Algérie. Revue des Énergies Renouvelables.
- [62] : Mistry, K. H. (2012). Desalination engineering: Planning and design. McGraw-Hill.
- [63] : Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). *Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges*. Water Research, 43(9), 2317–2348.

- [64]: Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications* (3rd ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118359686>
- [65]: Rawn, A.M., Bowerman, F.R. and Brooks, N.H., (1961), «Diffusers for disposal of sewage in sea water», Trans. ASCE.
- [66]: Boixadera, D. (2001). Le dessalement d'eau de mer. BRL Ingénierie.
- [67] : Dégremont. (2005). *Mémento technique de l'eau* (Tome 1). Paris, France : Lavoisier-Lexique technique de l'eau.
- [68]: Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. Science.
- [69] : Einav, R., & Lokiec, F. (2003). Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. Desalination.
- [70] : Lounnas, S. Étude des impacts environnementaux des rejets de saumure des installations de dessalement.
- [71] : SPA Alger. (2009, janvier). Étude de l'impact des rejets de saumure des stations de dessalement sur le milieu marin. Rapport technique.
- [72] : Lecomte, V. (2014, octobre). Le dessalement de l'eau de mer : quels impacts sur l'environnement ? Ecotoxicologie.fr.
- [73]: Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.
- [74]: World Bank Group. (2019). Water desalination: Technology and environmental impacts.
- [75]: Shemer, H., & Semiat, R. (2010). Environmental issues in desalination. Desalination.
- [76]: Fond documentaire de la station de dessalement de Cap Djinet 2.
- [77]: Veolia Water Technologies. *SWRO.Zs cartridge filters (5 µm, 70 inches)*.
<https://complete-water.com/product/veolia-cartridge-filter-swro-zs05-70>.
- [78]: Pullner. *70" String Wound Filter Cartridge, 5 µm, Polypropylene, OD 63 mm / ID 28 mm*. Shanghai Pullner Filtration Technology. <https://www.highflowfiltercartridge.com/sale-13554214-70-condensed-water-treatment-string-wound-filter-cartridge-5-micron.html>.
- [79]: Lenntech. *Seawater chlorination*.
<https://www.lenntech.com.tr/processes/desalination/pretreatment/pretreatment/seawater-chlorination.htm>.

Annexe 1 : Données techniques et paramètres de fonctionnement de la station

1.1. Paramètres de qualité de l'eau produite

Tableau 1.1 : Paramètres de qualité de l'eau produite

Paramètres	Valeurs
Dureté totale	65 ppm en CaCO ₃
Alcalinité	50 à 65 ppm en CaCO ₃
pH	8 à 8,5
Indice de Langelier	0 à 0,4
Bore	Valeur annuelle moyenne ≤ 1,3 mg/l
Concentration du total des solides dissous (TDS)	< 500 mg/l

1.2. Système de prétraitement

Tableau 1.2.1 : Paramètres des Canaux de dégrillage

Équipements / Paramètres	Valeurs
Nombre de canaux	Trois canaux (2 en Opération + 1 en Réserve)
Dimensions des batardeaux d'entrée	3,50 × 3,00 m
Dégrilleurs	
Dimensions du paravent	3,50 × 3,00 m
Espacement des barres de tamisage	30 mm
Perte de charge au démarrage de la procédure de nettoyage	0,15 m
Alarme de perte de charge du dégrilleur	0,5 m
Tamis rotatifs	
Taille de l'ouverture du tamis	4×4 mm
Perte de charge minimale de la bande	0,10 m
Perte de charge au démarrage de la procédure de nettoyage	0,20 m
Perte de charge de l'alarme	0,35 m
Bûche d'arrêt de sortie	3,50 × 3,00 m
Batardeaux de sortie	3,50 × 3,00 m

Tableau 1.2.2 : Système de pompage d'eau de mer

Paramètres	Valeurs / Nature
Matériaux	Acier inoxydable, résistant à l'eau de mer, aux produits chimiques et au milieu marin agressif
Disposition	Verticale ou autre disposition assurant de meilleures performances et une meilleure fiabilité
Installation	En charge
Nombre	5+1 unités
Unité de réserve	1 unité
Rendement	> 80 %
Mode de fonctionnement	Automatique
Variateur de vitesse	Oui

Tableau 1.2.3 : Principales caractéristiques des décanteurs lamellaires

Paramètres		Valeur
Nombre de clarificateurs installés		16
Débit nominal d'eau à clarifier		29 008 m ³ /h
Débit maximal		31 820 m ³ /h
Dimensions des clarificateurs	Longueur	8 m
	Largeur de surface lamellaire	26 m
	Hauteur	4,15 m
Surface utile unitaire		203,4 m ²
Temps de rétention		28 min
Charge hydraulique nominale		8,91 m ³ /h.m ²
Nombre de chambres de floculation		32
Valeur G (gradient de vitesse)		70 s ⁻¹
Efficacité de clarification		75–93 %
Concentration des MES en sortie		4,4 – 14,8 mg/l
Débit des boues produites		37 – 544 m ³ /h
Produit chimique utilisé		Chlorure ferrique
Dosage FeCl ₃		2,25 – 10 ppm

Tableau 1.2.4 : Principales données de conception du système de filtres à sable pressurisé

Paramètres	Valeurs
Débit total nominal	27 778 m ³ /h
Débit maximal	30 556 m ³ /h
Nombre de lignes	2
Nombre total de filtres installés	32
Nombre de filtres en fonctionnement	32
Nombre de filtres en fonctionnement (N-1)	31
Longueur cylindrique du filtre	19 m
Largeur de filtration	3,6 m
Surface totale de filtration par filtre	74,08 m ²
Débit nominal par filtre (32 unités)	868 m ³ /h
Débit nominal par filtre (31 unités)	896 m ³ /h
Débit maximal par filtre	954 m ³ /h
Vitesse de filtration nominale	11,72 m ³ /h.m ²
Vitesse de filtration maximale	12,89 m ³ /h.m ²
Performance estimée de filtration	95 %
SDI estimé dans l'eau filtrée	≤ 5
Durée moyenne du cycle de filtration	56 h
Durée minimale du cycle de filtration	17 h
Temps par cycle de lavage	50 min
Épaisseur totale du lit filtrant	1,15 m
Première couche filtrante anthracite	
Épaisseur couche anthracite	600 mm
Deuxième couche filtrante sable	
Épaisseur couche sable	400 mm
Couche de support gravier	
Épaisseur couche gravier	150 mm

Tableau 1.2.5 : Paramètres du système de lavage des filtres à sable

Phase principale	Sous-phase	Description	Durée (min)	Conditions de fonctionnement
1. Air	A	Réduction du niveau d'eau	5	Niveau d'eau abaissé à 10 cm au-dessus du lit filtrant
	B	Lavage à contre-courant à l'air	3	Air : 55 m ³ /h/m ² ; Débit total : 4 074 Nm ³ /h
2. Air + saumure	—	Lavage combiné air/saumure	10	Air : 55 m ³ /h/m ² ; Saumure : 12 m ³ /h/m ²
3. Transition	—	Temps de transition entre les étapes	2	—
4. Saumure	—	Lavage à la saumure	10	Saumure : 35 m ³ /h/m ² ; Débit total : 2 593 m ³ /h
5. Maturation	—	Rinçage à l'eau de mer	2	Débit moyen : 955 m ³ /h

Tableau 1.2.6 : Caractéristiques des pompes de lavage à contre-courant

Paramètres	Valeurs
Nombre total de pompes installées	3
Pompes en fonctionnement	2
Pompe en réserve	1
Débit spécifique de saumure	35 m ³ /h/m ²
Surface de filtration	74,08 m ²
Débit unitaire requis	1 296 m ³ /h

1.3 Système d'osmose inverse

Tableau 1.3.1 : Principales données du système d'osmose inverse

Paramètres	Valeurs
Nombre de racks d'osmose inverse	10
Nombre de groupes haute pression	5 + 1
Nombre de systèmes de récupération d'énergie	10
Type de membranes	Membranes spiralées
Nombre de membranes par récipient	7
Nombre total de membranes	24 920
Nombre total de récipients sous pression	3 560
Conversion du système	45 %
Flux membranaire	12,27 LMH
Modèle de membrane	7XTM820M440
TDS de l'eau d'alimentation	36 000 – 40 000 ppm
Température de fonctionnement	28 °C
Débit nominal à traiter	27 778 m ³ /h
Débit maximal	30 556 m ³ /h
Pression d'alimentation des membranes	53 – 78 bars
Système de récupération d'énergie	ERI PX-Q300

Tableau 1.3.2 : Les principales caractéristiques du système de nettoyage chimique (CIP)

Étape du CIP	Produit chimique	Objectif	Conditions / rôle
Rinçage initial	Eau de perméat	Élimination des résidus	Préparation du circuit
Nettoyage acide	Acide citrique	Dissolution des dépôts minéraux	Colmatage inorganique
Nettoyage basique	Hydroxyde de sodium	Élimination des matières organiques et biofilm	Colmatage organique
Chélation (si nécessaire)	EDTA sodique	Complexation des métaux	Renforcement du nettoyage
Rinçage final	Eau de perméat	Élimination des produits chimiques	Retour en service

Tableau 1.4 : Principaux produits chimiques utilisés dans le procédé de dessalement

Produit chimique	Objectif	Zone de l'usine
Chlorure ferrique	Coagulation	Prétraitement
Polyélectrolyte	Floculation	Prétraitement
Métabisulfite de sodium	Élimination du chlore libre	Système de membrane d'OI
Anti-scalant	Inhibiteur d'entartrage	Système de membrane d'OI
Hydroxyde de sodium	Ajustement du pH	Système de membrane d'OI
Acide citrique	Nettoyage chimique	Système de membrane d'OI
EDTA sodique	Nettoyage chimique	Système de membrane d'OI
Hydroxyde de sodium	Nettoyage chimique	Système de membrane d'OI
Calcite	Reminéralisation	Post-traitement
Dosage du CO ₂	Reminéralisation	Post-traitement
Hydroxyde de sodium	Ajustement du pH	Post-traitement
Hypochlorite de sodium	Désinfection	Post-traitement
Polyélectrolyte	Déshydratation	Traitement des boues
Acide sulfurique	Neutralisation de solution chimique	Système de neutralisation
Hydroxyde de sodium	Neutralisation de solution chimique	Système de neutralisation