



République Algérienne Démocratique et Populaire
ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydraulique

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de master en :

Hydraulique

Spécialité : hydraulique urbaine

**Analyse des répercussions des crues sur le régime
de fonctionnement et l'efficacité du procédé de
dessalement au niveau de la station BWC**

Réalisé par

Ammar Amina

Aouabdi Chifa

Devant les jurys composés de

Président : Mme BENTAHHER MCB

Examineur : Mme MOSTEFAOUI.L

Encadreur : Mr NEHARIA MCB

Co-encadreur: Mr GUEMOU.B MCA

Année universitaire 2025 -2026

Remerciements

{وَمَنْ يَشْكُرْ فَإِنَّمَا يَشْكُرُ لِنَفْسِهِ} [لقمان: 12]

اول شكر لله سبحانه وتعالى على ما أسبغه علينا من نعم وعلى تيسير السبيل، فله الحمد والشكر في كل وقت وحين

كما نتقدم بخالص عبارات الشكر والتقدير إلى الأستاذين المشرفين "نهاري عبد الرحمان " و " فمو بو عبدالله"، على ما قدماه لنا من توجيهات قيمة ونصائح سديدة ومتابعة مستمرة، وعلى جهودهما ولا يفوتنا أن نشكر كل من ساهم المبذولة في الإشراف على هذا العمل حتى ظهر في صورته الحالية في مسيرتنا الدراسية، وترك أثراً طيباً في تكويننا العلمي والمعرفي، من المرحلة الابتدائية إلى المرحلة الجامعية، سواء بالتعليم أو التوجيه أو النصيحة.

"شكرا "

 Chifaa & Amina

Dedicaces

"شيء جميل ان يسعى الانسان الى النجاح ويحصل عليه، والاجمل ان يذكر من كان السبب في ذلك"

بكل حب وفخر نهدي ثمرة نجاحنا الى

من قال فيهما الله سبحانه وتعالى: {وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا} [الإسراء: ٢٣]

الى العزيز الذي حملت اسمه فخرا واعتزازا والى معلمي الأول ومن أكرمني الله به وجعله بين صفوف الرجال أبا لي وزادني شرفا وعلوا "ابي سندي وداعمي".

الى من جعل الله الجنة تحت قدميهما، الى من يعجز اللسان عن الثناء عليهما، الى من أفضلها عن نفسي، الى من بها اعلوا وارتكز، الى القلب المعطاء "والدتي الحبيبة"

"اطال الله في عمرهما واعانني على رد جميلهما"

الى من الهمني بدعائهما جدي وجدتي اطال الله في عمرهما والى روح من افقدنا الذين أرادوا لنا هذا النجاح "رحمهم الله"

وإلى تلك النجوم التي تنير طريقي، وإلى من شددت عضدي بهم فكانوا لي عوناً وسنداً، "صناع قوتي وصفوة أيامي": عبد الإله، إبراهيم الخليل، معمر، مروة، عبد القادر، لقمان

وإلى كل صغير وكبير في عائلتنا كل باسمه، من ساهموا بكلمة طيبة أو نصيحة صادقة أو تشجيع في وقت الحاجة . فكان لهم الفضل في أن أوصل الطريق بثقة وثبات

إلى الأصدقاء الذين لم يكونوا مجرد رفاق طريق، بل كانوا سنداً حقيقياً في أصعب اللحظات، شاركوني التعب قبل الفرح، وكان وجودهم طاقة تُعينني على الاستمرار ومعنى صادق للوفاء

إلى صاحب الفضل في أول وآخر خطواتنا الى من كان سنداً لنا في اشرافه علميا ومعنويا استاذنا الفاضل "نهاري عبد الرحمان"

عظم المراد فهان الطريق

فجاء لذة الوصول ... لتمحي مشقة السنين

ثم بفضل الله تخرجنا والحمد لله الذي ما تيقنا به خيرا واملا الا واغرقنا سرورا

﴿وآخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين﴾

Chifaa & Amina

Résumé

Cette étude examine l'impact des inondations sur le fonctionnement de l'usine de dessalement d'eau de mer (BWC) en surveillant les effets des forts débits de l'Oued El-Hallouf sur la qualité de l'eau qui l'alimente. La recherche s'attache à analyser les indicateurs de précipitations, les niveaux de turbidité et les arrêts de production afin d'identifier et de déterminer le moment des perturbations hydrologiques.

L'étude vise à comprendre les données influençant les caractéristiques de l'eau brute lors de ces fluctuations et à identifier les phases clés au sein de l'usine. Elle souligne également l'importance de prendre en compte ces données et propose des solutions et recommandations générales qui, au-delà de la simple réaction aux aléas climatiques, contribuent à améliorer la performance globale de l'usine face à l'évolution du climat.

L'intérêt de ce travail réside dans la nouvelle compréhension qu'il apporte de la relation entre les événements météorologiques extrêmes et la performance des usines de dessalement. Il offre une base scientifique et une perspective de supervision permettant de contribuer au développement de solutions qui atténuent l'imprécision de ces interactions essentielles par rapport aux interactions directes avec les berges.

mots clés : dessalement d'eau de mer, osmose inverse, crue, turbidité, arrêts de production, station BWC

الملخص

تتناول هذه الدراسة تحليل انعكاسات الفيضانات على الكفاءة التشغيلية ونظام المعالجة في محطة تحلية مياه البحر (BWC)، وذلك عبر رصد تأثير تدفقات "وادي الحلو" خلال فترات الأمطار الغزيرة على جودة المياه الخام المغذية للمحطة. وقد ركّز البحث على تحليل العلاقة الديناميكية بين معدلات التساقط المطري، ارتفاع مستويات العكارة، والتوقفات التشغيلية المسجلة، باعتبارها مؤشرات رئيسية لتقييم مدى حساسية المحطة للاضطرابات الهيدرولوجية.

اعتمدت المنهجية على استغلال وتحليل البيانات المناخية والتشغيلية المتوفرة، بهدف فهم التغيرات التي تطرأ على خصائص المياه الخام أثناء الفيضانات، وتحديد تداعياتها على كفاءة مختلف مراحل المعالجة داخل المحطة. كما سمحت النتائج المتحصل عليها بإبراز أهمية أخذ هذه المعطيات بعين الاعتبار، واقتراح بعض الحلول والتوصيات العامة التي من شأنها تحسين أداء المحطة وتعزيز استمرارية عملها ورفع موثوقيتها في مواجهة الظروف المناخية المتغيرة.

وتبرز أهمية هذا العمل في تقديم فهم أعمق للروابط بين الظواهر المناخية المتطرفة وأداء منشآت التحلية، مما يوفر قاعدة علمية ورؤية استشرافية للمساهمة في تطوير حلول تضمن استمرارية تشغيل وموثوقية هذه البنية التحتية الحيوية في مواجهة التقلبات البيئية الاستثنائية.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، الفيضانات، العكارة، توقف الإنتاج، محطة

BWC

Abstract

This study examines the impact of flooding on the operation of the seawater desalination plant (BWC) by monitoring the effects of heavy flows from Wadi El-Hallouf on the quality of the water supplied to the plant. The research focuses on analyzing rainfall indicators, turbidity levels, and operational shutdowns to identify and determine the timing of hydrological disturbances.

The study aims to understand the data affecting raw water characteristics during these fluctuations and to identify key phases within the main plant. It also highlights the importance of considering this data and proposes general solutions and recommendations that are not merely reactive but also address the plant's overall performance in the face of changing climatic conditions.

The significance of this work lies in providing a different understanding of the relationship between extreme weather events and the performance of desalination plants. It offers a scientific basis and supervisory perspective to contribute to the development of solutions that mitigate the inaccuracy of these vital interactions in relation to direct banking interactions.

keywords: Seawater desalination, reverse osmosis, flooding, turbidity, production shutdowns, BWC station

Liste des figures

Figure 1: Distribution des stations de dessalement en Algérie (Rizou, 2019)	6
Figure 2: Les procédés les plus utilisés pour obtenir de l'eau douce.....	10
Figure 3: Osmose et osmose inverse	11
Figure 4: le fonctionnement de membrane d'osmose inverse	12
Figure 5: Distillation à simple effet [12]	13
Figure 6: Distillation à multiple effet [12]	14
Figure 7: Distillation par détente successives [12]	14
Figure 8 : Distillation par compression de vapeur[12]	15
Figure 9: Les étapes de dessalement (©Corinne Cabassud, Fourni par l'auteur).....	17
Figure 10: Puits côtiers [16]	19
Figure 11: Tranchée drainante. a) parallèle à la côte. b) normale à la côte[16]	21
Figure 12: Prise d'eau. a) en surface. b) au fond[16]	22
Figure 13: image de dessalement de Beni Saf (BWC).....	27
Figure 14 : Situation géographique de la BWC	28
Figure 15 : Les entreprises exploitant le SDEM (BWC).....	29
Figure 16: Plan de masse.....	31
Figure 17: Tour de captage.....	31
Figure 18: filtre rotatif.....	31
Figure 19 : Zone de captage	32
Figure 20 : zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf	34
Figure 21 : les filtres à cartouches.....	36
Figure 22 : Zone des filtres	37
Figure 23 : Zone de production	38
Figure 24 : Principe de l'osmose directe et de l'osmose inverse	38
Figure 25: Fonctionnement des membranes.....	39
Figure 26 : Récupérateur d'énergie PX (the pressure Exchanger).	40
Figure 27 : le réservoir de traitement de l'eau dessalée	40
Figure 28 : Eau de Lavage à la saumure (Backwash)	42
Figure 29 : Bâtiment de saumure	43

Figure 30 : Salle de contrôle	45
Figure 31 : le réseau électrique de la SDEM de Béni Saf	45
Figure 32 : :Schéma de fonctionnement de la SDEM de Beni Saf	Erreur ! Signet non défini.
Figure 33: Carte de distribution d'eau dessalée de la station de Chatt EL-Hillel.....	47
Figure 34: Histogramme représente Répartition annuelle des jours d'arrêt par cause	49
Figure 35: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel 2024.	50
Figure 36: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel.2025	52
Figure 37: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel 2026.	54
Figure 38: Bassin versant d'Oued El-Hallouf	59
Figure 39: Exutoire de Oued El Hallouf	60
Figure 40: Histogramme représente la différence de précipitations entre les cinq dernières années	61
Figure 41: Graphique de l'évolution conjointe des précipitations et de la turbidité de l'eau brute à la station de BWC EN 2024	63
Figure 42:Graphique de l'évolution conjointe des précipitations et de la turbidité de l'eau brute à la station de BWC EN 2025	64
Figure 43: La végétation (ripisylve) protège contre l'érosion.	68
Figure 44: La banquette antiérosive	69
Figure 45: Succession de seuils en pierres sèches (irma).....	69
Figure 46: Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêter de crue	70
Figure 47: Positionnement du brise-lame sur la plage de El Hillel.....	72
Figure 49:Schéma présenté les plusieurs points d'aspiration	73
Figure 48: Schéma d'augmentation de la longueur de la conduite d'aspiration	73
Figure 50: Bassin de décantation	73
Figure 51: Fonctionnement d'un puit côtier.....	74
Figure 52: Protocole de lavage chimique CIP	76

Liste des tableaux

Tableau 1:Inventaire des stations de dessalement en Algérie (Ministère de l'Hydraulique, 2025	7
Tableau 2: les avantages et les inconvénients d'osmose inverse[8].....	12
Tableau 3:Les avantages et les inconvénients de distillation [7].....	15
Tableau 4:Comparaison des différents procédés de dessalement d'eau de mer [12].....	16
Tableau 5: Les types de prise d'eau en Algérie et dans le monde.....	24
Tableau6 :les données techniques de BWC.....	30
Tableau 7 : Caractéristiques de filtrage à anthracite.....	34
Tableau 8 : les analyse de laboratoire (contrôle de qualité de l'eau commercialisée)	43
Tableau 9 : récapitulatif global – Analyse et traitement de l'eau.....	44
Tableau 10: Répartition annuelle des jours d'arrêt par cause.....	48
Tableau 11 : Tableau comparatif des seuils de turbidité entraînant l'arrêt des stations de dessalement	56

Tableau des matières

<i>Remerciements</i>	
<i>Dedicates</i>	
Résumé.....	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Tableau des matières.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction générale.....	1
Chapitre I	Erreur ! Signet non défini.
Le dessalement et les systèmes de prise d'eau	2
1 Introduction	4
2 Définition du dessalement.....	5
3 Historique de dessalement en Algérie.....	5
4 L'inventaire des stations de dessalement.....	6
5 Caractéristiques des eaux marines et saumâtres	8
5.1 Les eaux marines	8
5.2 Les eaux saumâtres.....	9
6 Les principales technologies de dessalement des eaux	9
6.1 L'osmose inverse.....	10
6.2 Distillation	13
7 Comparaison entre l'Osmose inverse et distillation	15
8 Les étapes de dessalement.....	17
9 Performance et gestion.....	18
10 Coûts du dessalement.....	18
11 Système de prise d'eau de mer	19
11.1 Prises d'eau par des puits côtiers	19
11.2 Captage par infiltration sous les plages ou sous le fond marin	20
11.3 Prises d'eau de mer directes	21
12 Conception et localisation des ouvrages de prise d'eau en mer.....	23
13 Justification du Choix de l'Emplacement.....	23
14 Les méthodes de prise d'eau utilisée en Algérie et le monde	24
15 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre II	26
La performance de la station de Chatt El Hillel (BWC)	26

1.	Introduction :	27
2.	Présentation de la station de dessalement Chatt El-Hillel Beni Saf (BWC) :	27
3.	Situation géographique de l'usine de dessalement :	28
4.	Présentation du promoteur du projet – Beni Saf Water Company	28
A.	Partenaires techniques	29
B.	Partenaires financiers	30
5.	Principales données techniques de l'usine :	30
6.	Description du fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer	30
6.1	Captage d'eau de mer :	31
6.2	La station de pompage	32
6.3	Prétraitement de l'eau de mer	32
6.4	Prétraitement physico-chimique	36
6.5	Poste d'osmose inverse	37
❖	Membranes :	38
6.5	Description du récupérateur d'énergie :	39
6.6	Post traitement :	40
6.7	Le stockage et le refoulement d'eau au le client	40
6.8	EQUIPEMENT DE NETTOYAGE	41
6.9	Bâtiment de saumure	42
6.10	Le laboratoire	43
6.11	Salle de contrôle	44
6.12	Autres composants de la station	45
7	Analyse critique du fonctionnement de la station	45
7.1	Distribution d'eau depuis la station de Chatt El Hilal	45
7.2	Les principaux arrêts survenus à la station	47
7.3	Répartition des jours d'arrêts par cause 2024 à 2026	48
7.4	Évaluation de l'impact des variations de la turbidité (NTU) sur la continuité de service de la prise d'eau de Chatt El Hilal" au cours des trois dernières années(2024-2025-2026)	50
8	Conclusion	56
Chapitre III		Erreur ! Signet non défini.
Etude hydrologie de la région de Chatt El-Hillel		Erreur ! Signet non défini.
1.	Introduction	57
2.	Le réseau hydrographique de la wilaya d'Aïn Témouchent :	58
❖	Courants marins	58
3.	Réseau hydrographique de la région de Chott El-Hilal	59

4. Climat de la région de Chatt El-Hilal	60
4.1 Saisonnalité et régime climatique.....	60
4.2 Régime pluviométrique	60
Températures.....	61
Humidité Atmosphérique	61
5. Précipitations des cinq dernières années.....	61
6. La relation entre la précipitation et la turbidité.....	63
7. Résultat générale	65
8. Conclusion.....	66
Chapitre V	67
Solutions et recommandations	67
Introduction	68
1. Protection et aménagement au niveau du sous-bassin de Oued El Hallouf	68
1.1 Restauration de la végétation et reforestation	68
1.2 Réalisation de petites structures hydrauliques (seuils et banquettes).....	69
1.3 Aménagement des lits d'oueds.....	70
1.4 Création de bassins de rétention pour les eaux de pluie.	70
1.5 Barrage écrêter	70
1.6 Contrôle de l'urbanisation	71
1.7 Création d'une digue de protection ou brise-lames spécifique.....	71
1.8 Système d'alerte précoce	72
2. Au niveau du point de prise d'eau.....	72
2.1 modification sur la conduite d'aspiration	72
2.2 Installation de bassins de décantation	73
2.3 Adoption d'un système de prise d'eau indirect par puits côtier.....	74
3. Au niveau de la station / prétraitement : Stratégie de "Protection opérationnelle "	74
3.1 Gestion des lavages des filtres (Backwashing)	74
3.2 Réduction de la pression opérationnelle.....	75
3.3 Intensification du protocole de lavage chimique CIP pour les membranes	75
3.4 Placer les dispositifs de mesure les paramètre de l'eau brute au point de captage ...	76
3.5 Programmation intelligente des arrêts de maintenance	76
Conclusion générale.....	78
Bibliothèque	80

Liste des abréviations

BWC = Beni Saf Water Company

DRH = direction des ressources hydrauliques

ANRH = Agence Nationale des Ressources Hydriques

MES = matières en suspension

MED = multi-effect distillation

MSF: Multi- Stage – Flash

TDS: Total –Dissolved- Solide

RO: Reverse Osmosis

ADE : Algérienne des eaux

AEC : Algerian energy company

SDEM=station de dessalement d'eau de mer

TDS = total dissolved solids

SDI= silt density index

CIP = cleaning in place

NTU = nephelometric turbidity unit

PH = potentiel hydrogène

Introduction générale

L'eau représente une ressource incontournable pour la vie et est au cœur de divers développements économiques, sociaux et environnementaux. Toutefois, l'évolution rapide du climat et les sécheresses répétées, combinées à une démographie en hausse, mettent une pression notable sur les sources d'eau traditionnelles, qu'elles soient de surface ou souterraines, surtout dans les zones semi-arides d'Algérie. Dans ce contexte, l'exploitation des ressources en eau alternatives apparaît comme une solution primordiale pour garantir un approvisionnement en eau sécurisé.

Dans ce cadre, la province d'Aïn Témouchent s'est distinguée en tant que pionnière parmi les provinces côtières, ayant décidé de tirer parti de ses côtes et atouts géographiques en se tournant vers le dessalement de l'eau de mer comme stratégie. Cette démarche a pour but de compenser le manque d'eau et de fournir un accès régulier à de l'eau potable pour les habitants.

La station de dessalement de Chott El Hilal à Beni Saf (BWC) est reconnue parmi les infrastructures les plus vitales, illustrant l'utilisation efficace des ressources côtières. Avec sa grande capacité de production, elle joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable des régions d'Aïn Témouchent et d'Oran. Néanmoins, le fonctionnement de cette installation est influencé par des conditions hydrologiques et climatiques, particulièrement lors des inondations ou des crues brusques, qui provoquent une montée de la turbidité et des particules en suspension dans l'eau brute. Ce phénomène impacte négativement le système de pompage d'eau de mer ainsi que les différentes phases du traitement initial, entraînant ainsi une baisse de l'efficacité globale du processus de dessalement.

Les crues sont parmi les facteurs les plus significatifs qui menacent la stabilité et la continuité du fonctionnement des unités de dessalement. Elles occasionnent fréquemment des interruptions ou des arrêts partiels ou totaux, engendrant une hausse des coûts opérationnels et de maintenance et diminuant l'efficacité du système de traitement. Il devient donc crucial d'examiner l'incidence de ces événements hydrologiques sur le rendement des usines de dessalement et de saisir les implications techniques et opérationnelles pour pouvoir élaborer des solutions adaptées qui garantissent une continuité de service et optimisent l'efficacité opérationnelle.

Dans cette optique, notre recherche intitulée :

« Analyse de l'impact des inondations sur le système opérationnel et l'efficacité du processus de dessalement de l'usine de Chatt El Hillel Beni Saf (BWC) » s'intègre dans cette démarche.

Le principal problème opérationnel découle des effets directs, et souvent dévastateurs, des crues de l'Oued El-Hallouf. Lors de ces événements, les inondations transportent d'énormes volumes de boues et de sédiments, entraînant une augmentation soudaine du taux de turbidité et des matières en suspension dans l'eau brute. Ce phénomène dépasse de loin les seuils que le système de pompage et de prétraitement a été conçu pour gérer.

Cette arrivée massive de particules en suspension oblige à des arrêts fréquents, partiels ou totaux, et imprévus des unités de production afin de protéger l'intégrité des membranes et des appareils délicats. Ces interruptions répétées n'engendrent pas seulement une hausse des coûts opérationnels et de maintenance ; elles provoquent également une crise sérieuse dans l'approvisionnement en eau potable de la wilaya d'Aïn Témouchent.

À partir de cette analyse, le problème central de notre étude se concentre sur les questions essentielles suivantes :

1. Quel est l'effet des crues et de l'augmentation de la turbidité qui en résulte sur la capacité technique de la station ?
2. Comment assurer le bon fonctionnement de la station de dessalement en période de crues ?

Objectifs de l'étude :

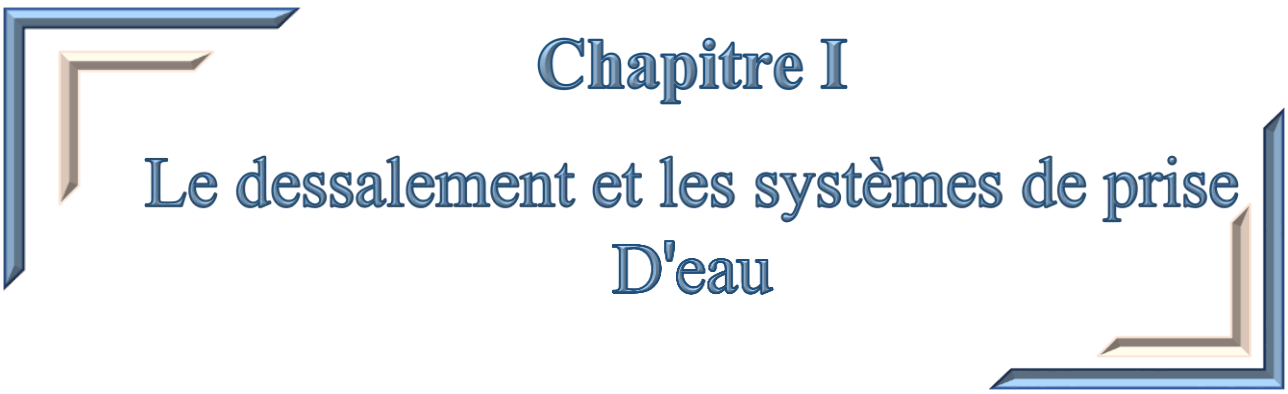
Analyser l'effet des crues sur les performances de l'installation en scrutant les fluctuations des indicateurs de turbidité.

Examiner les impacts techniques notés sur l'opérationnel et l'efficacité des diverses étapes du dessalement (prétraitement et traitement final).

Concevoir des solutions techniques et opérationnelles durables, capables de renforcer la résilience de la station face aux risques hydro-climatiques et de garantir la continuité de la production d'eau potable.

Pour répondre à cette problématique et atteindre les objectifs fixés, notre travail est structuré en quatre chapitres principaux :

- ❖ Chapitre I : Le dessalement et les systèmes de prise d'eau
- ❖ Chapitre II : La performance de la station de Chatt El Hillel (BWC)
- ❖ Chapitre III : Etude hydrologie de la région de Chatt El Hillel
- ❖ Chapitre IV : Solutions et recommandations



Chapitre I

Le dessalement et les systèmes de prise D'eau

1 Introduction

La demande croissante de dessalement de l'eau de mer et de l'eau légèrement salée devient une priorité urgente dans de nombreux pays. En Méditerranée, les besoins en eau augmentent de manière significative. En Algérie, une longue décennie de sécheresse a mis en évidence l'insuffisance des ressources en eau conventionnelles pour couvrir les besoins de la population. Face à cette situation, les autorités algériennes ont été poussées à explorer d'autres solutions pour assurer un accès durable à l'eau potable.

Pour répondre aux besoins domestiques à l'échelle nationale, deux types d'eau sont traités par dessalement :

- L'eau de mer
- L'eau saumâtre

2 Définition du dessalement

Le dessalement consiste à retirer les substances dissoutes présentes dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre afin d'obtenir de l'eau potable. La teneur en sel de l'eau est généralement mesurée par la concentration totale des solides dissous (TDS). Ce terme désigne l'ensemble des minéraux, métaux, cations et anions présents dans l'eau, lesquels déterminent son niveau de salinité. [1]

3 Historique de dessalement en Algérie

Depuis qu'elle est devenue indépendante, l'Algérie a mis en place des initiatives significatives pour améliorer ses ressources en eau et garantir un approvisionnement suffisant pour ses secteurs économiques. Dans les premières années suivant l'indépendance, les actions de l'Algérie se sont concentrées sur la modernisation du réseau de distribution auparavant établi, sur la création de barrages et l'exploitation des eaux souterraines, à une époque où le dessalement n'en était qu'à ses débuts.

L'expérience de l'Algérie dans le domaine du dessalement est principalement limitée à la construction d'unités de déminéralisation adaptées aux eaux souterraines hautement salées, utilisées principalement pour les besoins de l'industrie pétrolière et de la sidérurgie (comme l'exemple de l'unité de déminéralisation à Oulad Djallal dans la Wilaya de Biskra).

En 1964, trois petites unités d'une capacité de 8 m³/j chacune a été mises en place dans le complexe de gaz liquéfié d'Arzew. Le procédé utilisé est basé sur des tubes immergés fonctionnant à faible pression.

En 1969, une unité monobloc d'une capacité de 4 560 m³/j a été établie à Arzew. La méthode utilisée est celle du multi-étage flash – MSF. D'autres équipements ont ensuite été mis en service pour fournir de l'eau ultrapure, destinée à des installations de production électrique (Cap Djinet à l'est d'Alger) et à l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

En 1980, l'inauguration de l'unité de dessalement par osmose inverse à Mostaganem, avec une capacité de 57 600 m³/j, a eu lieu, la qualifiant à l'époque de la plus grande au monde. [2]

4 L'inventaire des stations de dessalement

Avec l'augmentation du stress lié à l'eau en Algérie, surtout dans les régions côtières avec beaucoup de population, le pays a fait de grands investissements dans les stations de dessalement. Actuellement, il y a 23 installations en fonction, dont 11 grandes unités qui génèrent un total de 2,11 millions de m³ par jour, et 12 petites stations qui ajoutent 80 500 m³ par jour.

En février 2025, l'ajout de cinq nouvelles stations augmentera la capacité totale à 3,69 millions de m³ par jour, ce qui représente un accroissement de 1,5 million de m³ par jour. Ces nouvelles stations sont principalement administrées par la Société algérienne d'énergie et l'Agence Nationale de Dessalement de l'Eau. Elles ont pour but de fournir de l'eau aux grandes villes côtières comme Alger, Oran, et Skikda, ce qui diminue la dépendance du pays envers les sources d'eau traditionnelles comme les barrages et les nappes phréatiques.

D'ici 2030, sept autres stations sont planifiées dans les wilayas de Tlemcen, Mostaganem, Chlef, Tizi Ouzou, Jijel et Skikda, qui ajouteront 2,1 millions de m³ par jour à la capacité totale. [3]

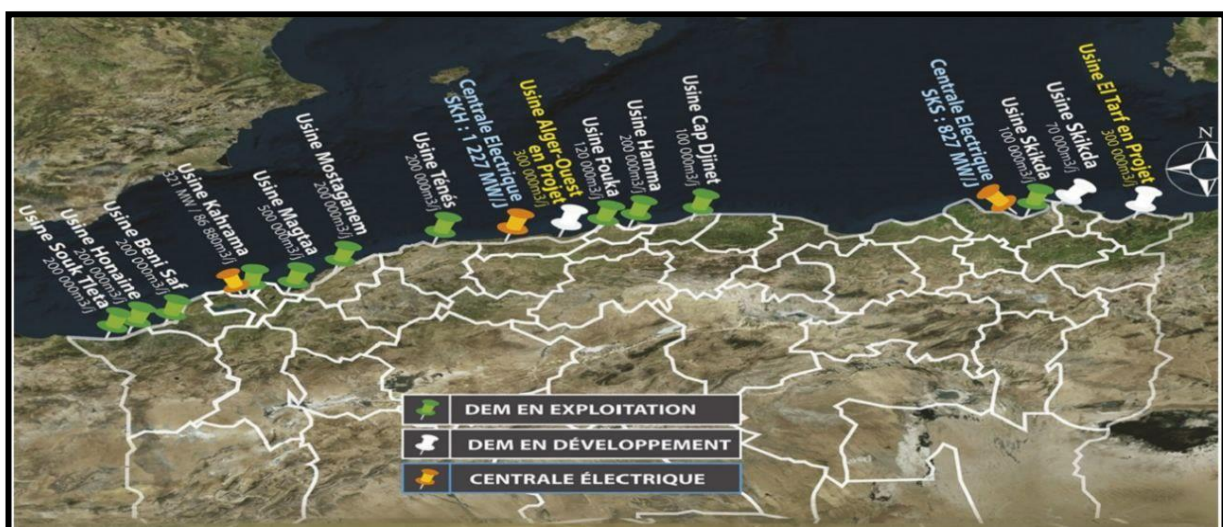


Figure 1: Distribution des stations de dessalement en Algérie (Rizou, 2019)

Tableau 1: Inventaire des stations de dessalement en Algérie (Ministère de l'Hydraulique, 2025).

Régions/Nom de SDM	Localisation	Capacité (m3 /j)	Date de mise en service	Technologie utilisée
Grandes unités				
Ouest	Arzew (Oran)	90 000	Août 2005	MSF
	Souk Telata (Tlemcen)	200 000	Mai 2011	Osmose Inverse
	Honaine (Tlemcen)	200 000	Juillet 2012	Osmose Inverse
	Moustaganem	200 000	Septembre 2011	Osmose Inverse
	Beni Saf (Ain Timouchent)	200 000	Décembre 2009	Osmose Inverse
	Mactaa (Oran)	500 000	Juillet 2016	Osmose Inverse
	Centre	Hamma (Alger)	200 000	Février 2008
Cap Djinet (Boumerdes)		100 000	Août 2012	Osmose Inverse
Fouka (Tipaza)		120 000	Juillet 2011	Osmose Inverse
Ténés (Chlef)		200 000	Juin 2015	Osmose Inverse
Est		Skikda	100 000	Mars 2009
	Capacité Totale		2110,000 (m³/j)	
Petites stations (Monoblocs)				
Ghazaouet	Tlemcen	5000	2004	Osmose Inverse
Tigzirt	Tizi_Ouzou	2500	2004	Osmose Inverse
Béni Haoua	Chlef	5000	2004 (2016)	Osmose Inverse

Mainis	Chlef	5000	2007	Osmose Inverse
Bouzedjar	Ain Témouchent	5000	2006	Osmose Inverse
Bousfer	Oran	5500	2005	Osmose Inverse
Les Dunes		5000	2006	Osmose Inverse
Skikda	Skikda	10 000	2002 (2022)	Osmose Inverse
Zéralda		10 000	2003 (2021)	Osmose Inverse
	Alger			
Ain Benian		10 000	2003 (2021)	Osmose Inverse
Palm Beach		7500	2003(2021)	Osmose Inverse
Boumail	Tipaza	10 000	2005 (2022)	Osmose Inverse
Capacité total (m³/j)			80500	
Nouvelles stations lancées en février 2025				
Cap-Blanc	Oran	300 000	février 2025	Osmose inverse
Fouka 2	Tipaza	300 000	février 2025	Osmose inverse
Cap Djinet 2	Boumerdes	300 000	février 2025	Osmose inverse
Koudiet Edraouech,	El Tarf	300 000	février 2025	Osmose inverse
Tighremt	Bejaia	300 000	février 2025	Osmose inverse
Capacité totale (m³/j)			1500 000	

5 Caractéristiques des eaux marines et saumâtres

5.1 Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité

moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g/l (27,2 g/l de NaCl, 3,8 g/l de MgCl_2 , 1,7 g/l MgSO_4 , 1,26 g/l CaSO_4 , 0,86 g/l K_2SO_4). Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g/l,
- Mer Rouge : environ 40 g/l,
- Mer Caspienne : 13 g/l,
- Mer Morte : 270 g/l,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g/l.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique. [4]

5.2 Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl. [4]

6 Les principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

1. Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.
2. Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. [5]

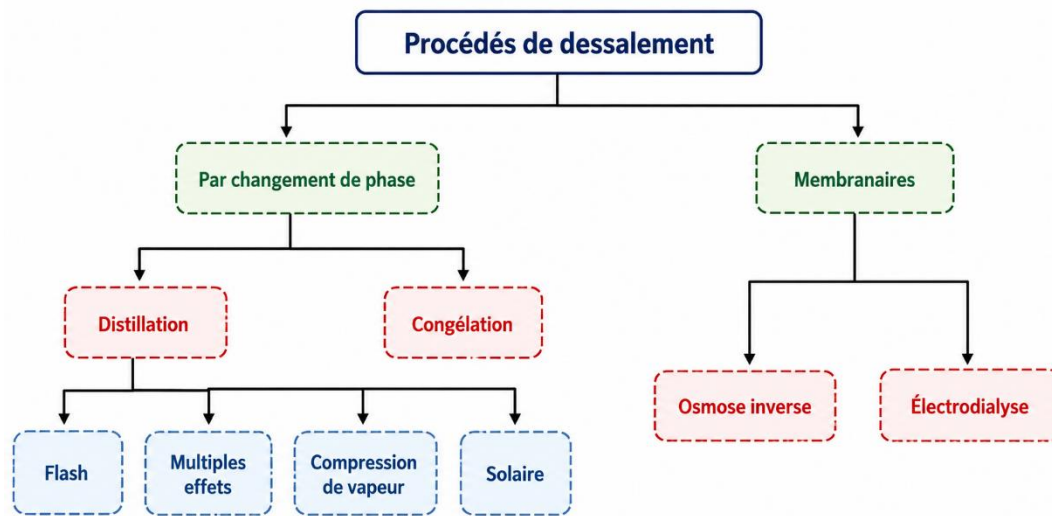


Figure 2: Les procédés les plus utilisés pour obtenir de l'eau douce[23]

6.1 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.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure 3). 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, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse. [6]

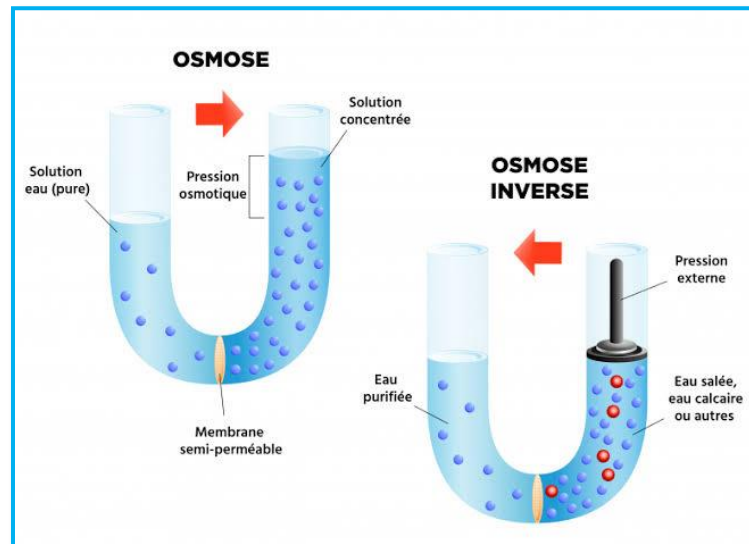


Figure 3: Osmose et osmose inverse[24]

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée π peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff : $\pi = i \times C \times R \times T$ Où :

- i : le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,
- C : la concentration en sels en mol.m⁻³
- R : la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T : la température absolue de la solution en Kelvin. [6]

❖ Membranes d'osmose inverse

Les membranes d'osmose inverse constituent des structures poreuses créées par l'homme. Les substances utilisées pour leur conception relèvent de la catégorie organique (deux sortes de polymères, notamment les acétates de cellulose et les polyamides) ou inorganique. En règle générale, ces membranes sont formées d'une couche ténue, souvent désignée comme couche active ou peau, d'une épaisseur variante entre 0,1 et 1,5 μm , comportant des micropores : il s'agit de l'élément sélectif de la membrane. Cette couche active repose sur une ou plusieurs couches additionnelles, qui sont à la fois plus poreuses et présentant une plus grande résistance mécanique.

En raison de leur composition organique, les membranes doivent fonctionner dans des conditions assez limitées (pH compris entre 2 et 11, température maximale de 50°C). En pratique, ces membranes sont intégrées sous forme de modules, qui rassemblent généralement un certain nombre d'entre elles. Dans le cadre de l'osmose inverse, les membranes sont mises en œuvre sous forme de modules, en particulier les modules en spirale et les modules à fibres tubulaires. [7]

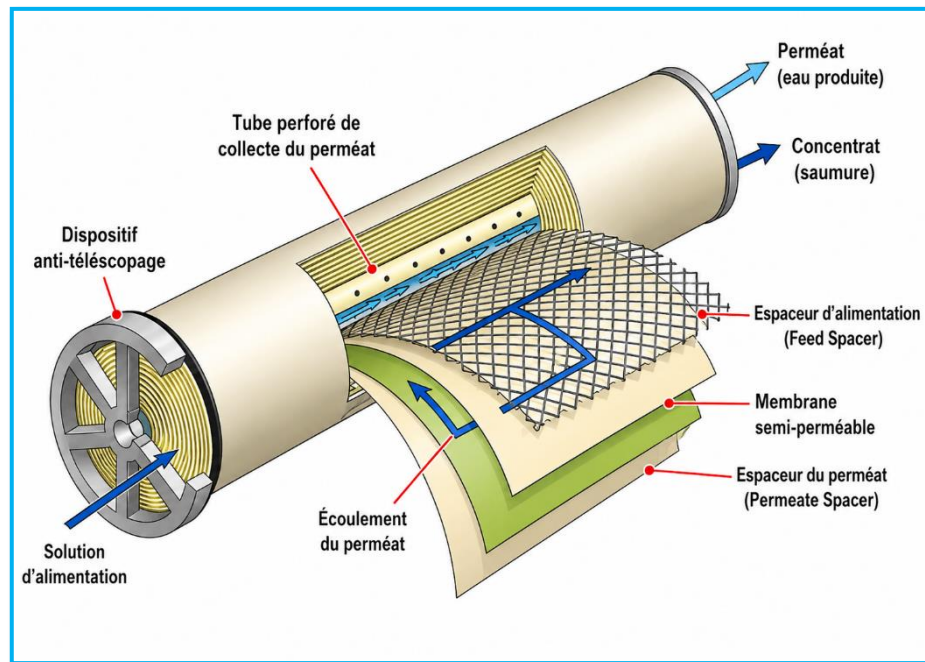


Figure 4: le fonctionnement de membrane d'osmose inverse[22]

Tableau 2: les avantages et les inconvénients d'osmose inverse[8]

Les avantages

- **Systèmes modulaires.**
- **Consommation énergétique réduite par rapport aux méthodes de distillation.**
- **Fonctionnement entièrement automatisé possible.**
- **Basse température de fonctionnement.**
- **Le faible coût d'investissement.**

Les inconvénients

- Risque de colmatage, et d'encrassement.
- L'eau produite par ce procédé contient trop peu d'ions.
- Les pertes en eau sont très importantes.
- Pressions élevées requises.
- Flux de perméat faibles

6.2 Distillation

Dans les procédés de distillation il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis des temps forts anciens.

Ce procédé présente des points forts. Les procédés de distillation ne nécessitent pas un prétraitement sophistiqué de l'eau de mer. [8]

Les performances et les coûts pratiquement indépendants de la salinité de l'eau de mer à traiter l'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur. Les procédés de distillation qui peuvent être utilisés sont les suivants :

6.2.1 Distillation à simple effet : processus d'évaporation, basés sur le cycle de la chaleur latente en produisant un ruisseau d'eau, habituellement utilisé en combinaison avec les centrales électriques. [9]

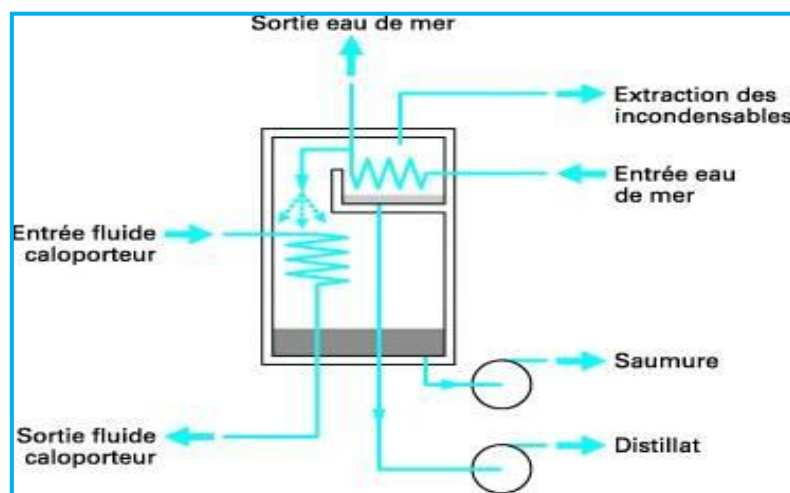


Figure 5: Distillation à simple effet [12]

6.2.2 Distillation à multiples effets (MED) : est constitué de plusieurs cellules (effets) fonctionnant selon le principe de l'évaporation successive. Dans le premier effet, un fluide chauffant provoque l'évaporation de l'eau de mer à une température comprise généralement entre 70 et 80 °C. La vapeur produite est ensuite dirigée vers l'effet suivant, maintenu à une pression plus faible. Cette diminution de pression permet à

l'eau de s'évaporer à une température inférieure, générant ainsi un nouvel effet de distillation. Le processus se répète de cellule en cellule, ce qui permet de réutiliser l'énergie thermique et d'améliorer le rendement du système. Le nombre d'effets est

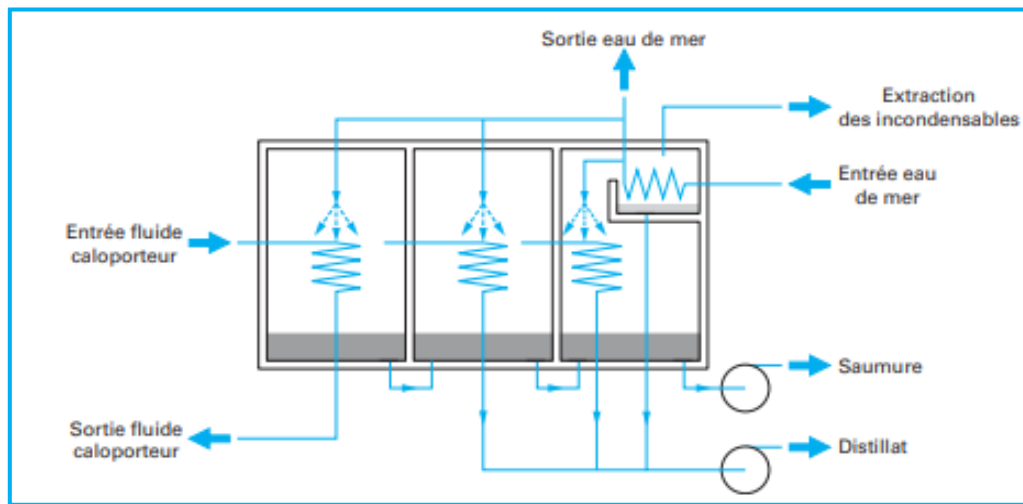


Figure 6: Distillation à multiple effet [12]

limité par la température minimale à laquelle l'eau peut encore s'évaporer efficacement.

6.2.3 Distillation par détente successives appelée aussi multi flash ou flash : processus d'évaporation, en combinaison avec des centrales électriques. Le système inclut une série de compartiments. L'écoulement d'eau chaude dans un compartiment avec une basse pression résulte l'évaporation d'une partie de l'eau. [10]

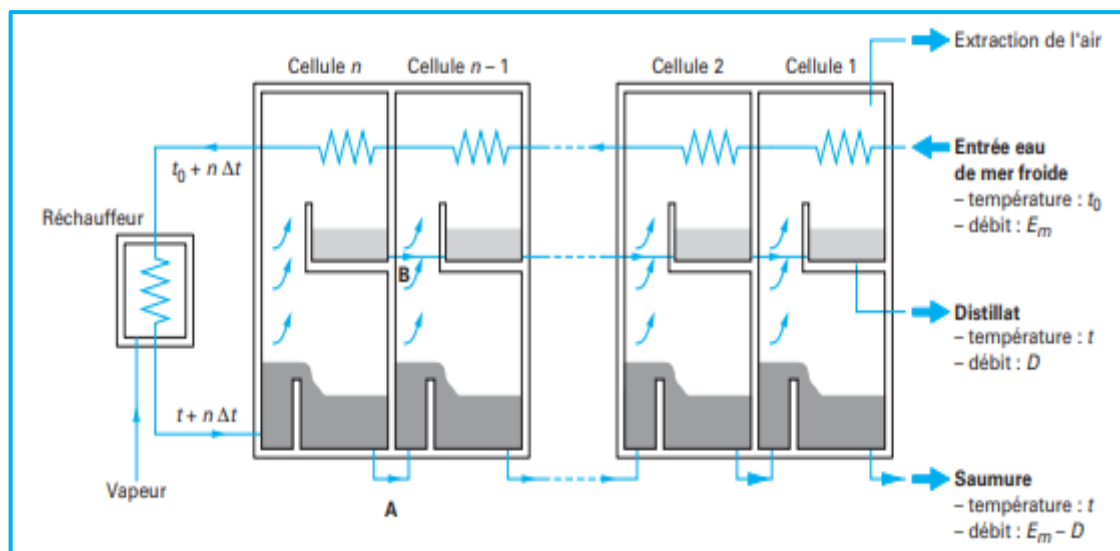


Figure 7: Distillation par détente successives [12]

6.2.4 Distillation par compression de vapeur : processus d'évaporation, basé selon le principe d'une pompe à chaleur. Cycle répété de condensation et d'évaporation. [11]

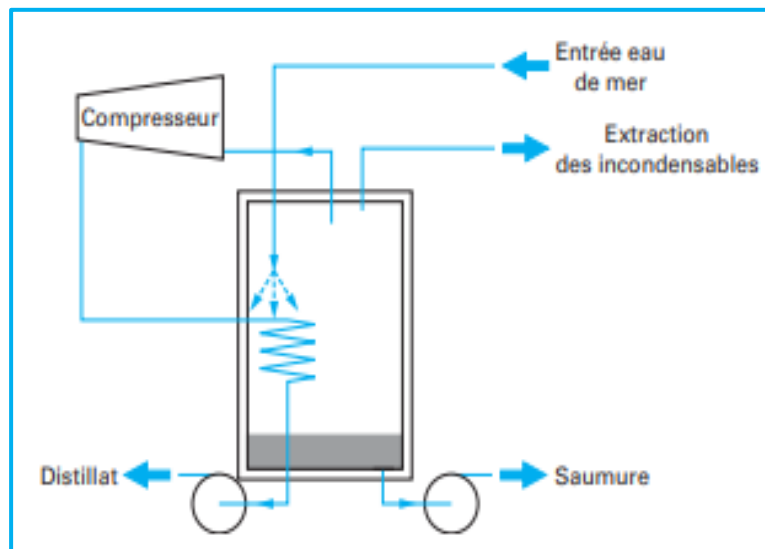


Figure 8 : Distillation par compression de vapeur[12]

Tableau 3:Les avantages et les inconvénients de distillation [7]

<i>Les avantages</i>	<i>Les inconvénients</i>
• Indépendance à la variation de la qualité d'eau brute. • Utilisation pour des grandes capacités de production d'eau. • Exploitation plutôt facile. • Une eau produite avec un TDS bas requis particulièrement pour les besoins Industriels	• Distillation est une méthode lente qui nécessite le stockage de l'eau produite • Nécessite d'adaptation de stockage pour éviter toute contamination (air, matériaux non inertes). • Les bactéries prolifèrent bien dans une eau qui a reposé quelque temps. Pour maintenir la stérilité. • Il y a formation de tartre en eau dure, ce qui nécessite un nettoyage fréquent ou un prétraitement

7 Comparaison entre l'Osmose inverse et distillation

Tableau 4: Comparaison des différents procédés de dessalement d'eau de mer [12]

Procédé	Distillation par compression mécanique de la vapeur	Distillation par thermocompression	Distillation par détentes successives	Osmose inverse
Débit d'eau de mer/Débit production	2 à 3 avec recyclage	3 à 4	3 à 4 si recyclage saumure, sinon 7 à 9	2 à 2,5 selon salinité
Prétraitement :	Requise sauf recours à des puits côtiers	Requise	Requise	Requise sauf recours à des puits côtiers (Petites installations)
– chloration				
– filtration	Tamissage à 0,5 mm	Tamissage à 0,5 mm	Tamissage à 1,5 mm	Filtration(s) fine(s) voire microfiltration
–antitartre	Injection d'un inhibiteur	Injection d'un inhibiteur	Injection d'un inhibiteur et/ou acidification + dégazage du CO ₂	Objectif : SDI _{moy} 3
déchloration	Non requise	Non requise	Non requise	Acidification et/ou injection d'un inhibiteur Requise "Objectif : chlore 0,1mg /L"
Température maximale de fonctionnement	60 à 70 °C	60 à 70 °C	Entre 80 et 120 °C	Température de l'eau de mer Optimum ≈ 25 °C
Salinité eau produite	1 à 30 mg/L	1 à 30 mg/L	50 à 100 mg/L	200 à 500 mg/L
Énergie électrique (unité de dessalement seulement)	12 à 17 kWh/m ³ si un effet 7 à 9 kWh/m ³ si deux effets...	1 à 2 kWh/m ³	2 à 3 kWh/m ³	2,8 à 3,5 kWh/m ³ avec récupération d'énergie
Énergie vapeur	Aucune	8 < GOR * < 16 selon le nombre d'effets	6 < GOR * < 12	Aucune
Échelle de capacité (unitaire par bloc)	< 2 000 m ³ /j	500 à 12 500 m ³ /j	5 000 à 50 000 m ³ /j	Technologie modulaire qui s'adapte à toutes les capacités 10 à 20 000 m ³ /j par bloc
Avantages	Pas de vapeur Simplicité du fonctionnement	Coût ≈ 15 % inférieur à distillation par détentes successives	Technique la plus éprouvée	Minimum d'énergie et de temps de construction

* GOR : (Gain Operating Ratio) masse d'eau produite par kilogramme de vapeur consommée.

8 Les étapes de dessalement

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 5 étapes :

- 1) Prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière.
- 2) Prétraitement :
 - Filtration : L'eau de mer est d'abord filtrée pour éliminer les solides en suspension, les sédiments et d'autres particules.
 - Conditionnement : Ajustement du pH, ajout d'agents coagulants et d'anti scalants pour prévenir la formation de tartre et de dépôts sur les membranes de dessalement.
- 3) Procédé de dessalement lui-même (Osmose inverse, Distillation).
- 4) Post-traitement :
 - Stabilisation : Ajustement du pH et ajout de minéraux pour stabiliser l'eau dessalinisée et la rendre non corrosive.
 - Désinfection : Utilisation de procédés tels que la chloration, l'ultraviolet (UV) ou l'ozone pour éliminer les micro-organismes pathogènes.
- 5) Distribution : L'eau dessalinisée est pompée vers des réservoirs de stockage ou directement dans le réseau de distribution d'eau. [13]

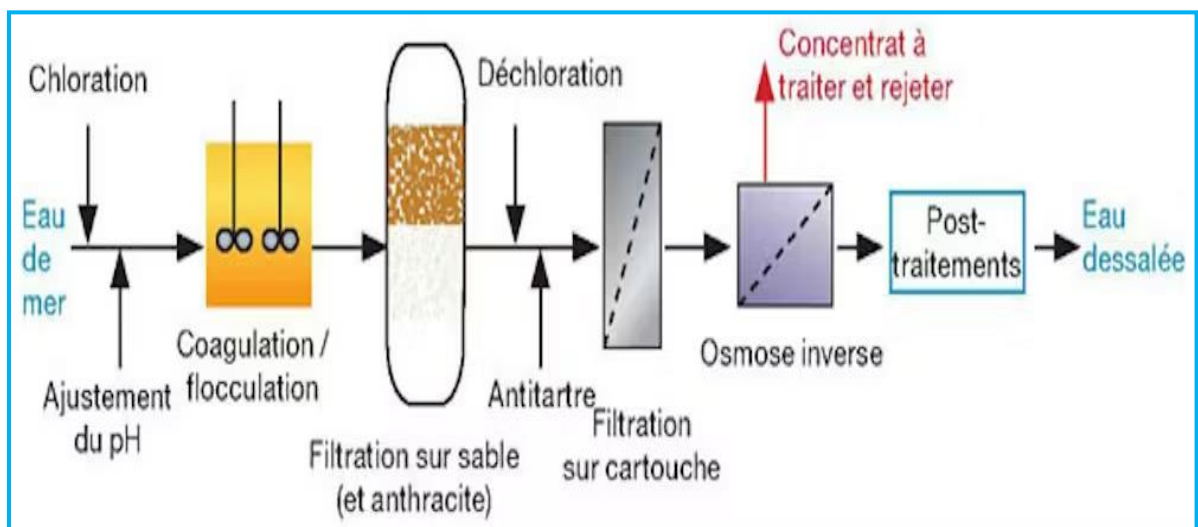


Figure 9: Les étapes de dessalement (©Corinne Cabassud, Fourni par l'auteur)

9 Performance et gestion

En 2022, 18 % de l'eau potable en Algérie provenait des usines de dessalement, principalement destinée à la population côtière. L'objectif est d'atteindre 42 % d'ici 2025 et 60 % d'ici 2030 grâce à un investissement de 5,4 milliards de dollars. L'Agence nationale de dessalement de l'eau (ANDE) est essentielle pour la planification stratégique et la supervision des projets, en facilitant les partenariats public-privé. La Société algérienne de l'énergie (AEC) gère l'administration technique, tandis que Sonatrach finance certaines initiatives, notamment par l'approvisionnement en gaz pour les opérations énergétiques.

Les opérations rencontrent plusieurs obstacles : les coûts élevés de maintenance, surtout pour les membranes d'osmose inverse sujettes à l'encrassement, qui représentent jusqu'à 50 % des coûts totaux, et les équipements de distillation flash à plusieurs étages (MSF) nécessitant des réparations fréquentes. Les dépenses opérationnelles, incluant les produits chimiques comme les substances antisalissure et la main-d'œuvre, sont également des défis majeurs. Cette situation est exacerbée par la dépendance aux équipements importés, malgré des progrès dans la production locale de membranes d'osmose inverse.

Pour surmonter ces défis, l'Algérie investit dans la formation de techniciens locaux et le développement d'une industrie nationale, visant à réduire les coûts et à améliorer la durabilité économique du secteur. [14]

10 Coûts du dessalement

Les coûts du dessalement exprimés en USD/m³ d'eau douce produite dépendent de la technologie, de la taille de l'installation et de la teneur en sel de l'eau traitée. Les technologies membranaires peuvent produire de l'eau de bonne qualité à partir d'eau saumâtre avec un coût de 0,50 USD/m³. Les coûts, toutefois, sont plus élevés pour traiter l'eau de mer, le mètre cube produit a un coût estimé entre 0,5 et 1,1 USD pour l'osmose inverse et entre 0,65 et 1,8 USD pour la distillation. Les technologies thermiques tendent à être plus onéreuses que les technologies membranaires.

Actuellement, les coûts des deux technologies affichent une tendance à la baisse. Elles peuvent bénéficier toutes les deux des économies d'échelle mais les coûts des technologies membranaires diminuent aussi en raison de leur développement incessant qui conduit à des gains d'efficacité aussi en raison de leur développement incessant qui conduit à des gains d'efficacité. [15]

11 Système de prise d'eau de mer

Il existe trois méthodes pour prélever de l'eau de mer brute :

- Prises d'eau par des puits de captage côtiers
- Prises d'eau par infiltration sous les plages ou sous le fond marin
- Prises d'eau directes en mer ouverte, en surface ou au fond.

11.1 Prises d'eau par des puits côtiers

Les puits de captage côtiers sont semblables aux puits de captage terrestres dans les nappes phréatiques, mais sont forés sur la frange littorale à des profondeurs suffisantes pour permettre une venue d'eau de mer ou saumâtre par infiltrations à travers le sol. [16]

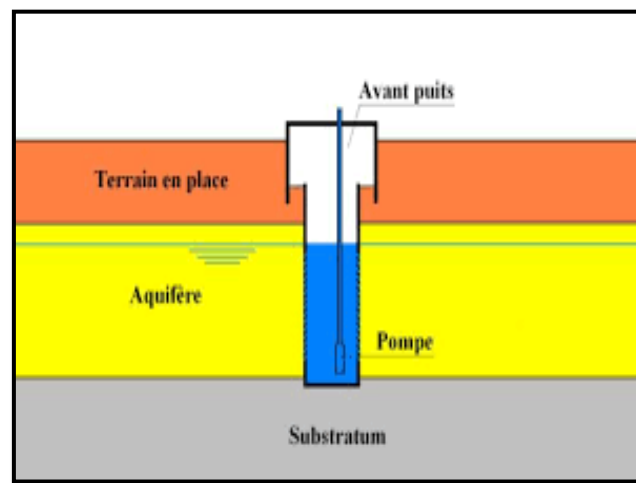


Figure 10: Puits côtiers [16]

- **Les avantages et les inconvénients de se types**

- Il fournit une eau très bien adaptée au dessalement par osmose inverse : pas de matières en suspension ni d'algues, faible indice de colmatage (IC~2), faible concentration en matières organiques (COT<1 mg/l).
- Il permet de limiter et de simplifier les prétraitements.
- Il peut être utilisé dans les zones côtières inhospitalières constituées de falaises ou de platiers rocheux battus par une agitation importante et permanente.
- Il est insensible au transit sédimentaire.

Il présente toutefois des inconvénients :

- Il ne fournit que de faibles débits (risques de colmatage du sol et de dénoyage du puits si la vitesse de filtration est trop importante), de l'ordre de 10 à 50 l/s, par puits qui

doivent être séparés de plusieurs centaines de mètres pour éviter les interférences entre leurs rabattements de la nappe salée.

- Possibilité d'interactions entre la nappe salée et la nappe d'eau douce qui coule vers la mer (constance de la salinité nécessaire au bon rendement de l'installation).
- Nécessité d'investigations géologiques et hydrogéologiques poussées.
- Nécessité du suivi des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau.

11.2 Captage par infiltration sous les plages ou sous le fond marin

L'eau de mer peut être captée sous une plage ou une avant plage par des puits maritimes, des tranchées drainantes, des drains foncés ou forés ou des champs drainants.

11.2.1 Puits maritimes

Les puits maritimes sont semblables à des puits côtiers, mais ils sont directement forés dans l'aquifère d'eau de mer ou dans le biseau salé, en haut de plage, sur la plage, sur le bas estran ou dans les petits fonds. Leur drainage peut être amélioré avec des drains horizontaux rayonnants dont la longueur est généralement de l'ordre de quelques diamètres (5 à 20) du puits (puits Ranney). [16]

11.2.2 Tranchées drainantes

Le captage se fait par une conduite perforée ensouillée au-dessous du niveau des plus basses mers, dans une tranchée au milieu d'un lit de graviers ou de ballast entouré d'un filtre géotextile. La conduite perforée est reliée par une conduite étanche à un puits qui se remplit d'eau de mer sous l'effet de la gravité. Le drain peut être protégé contre les affouillements (zone de déferlement) en l'enfouissant plus profondément. Les graviers sont alors recouverts d'une couche de sable filtrant et d'une protection perméable de type « rip-rap »

- Tranchée parallèle au trait de côte sous la plage (figure 11. a) : L'eau de mer s'infiltré dans le drain par le côté et partiellement par-dessus et par-dessous. La section du lit de graviers peut être plus haute que large.
- Tranchée normale au trait de côte sous l'avant plage (figure 11. b) : L'eau de mer s'infiltré dans le drain essentiellement par le dessus. La tranchée est donc recouverte, soit avec les matériaux d'origine si leurs qualités filtrantes sont satisfaisantes, soit avec des matériaux d'apport de plus grande perméabilité. [16]

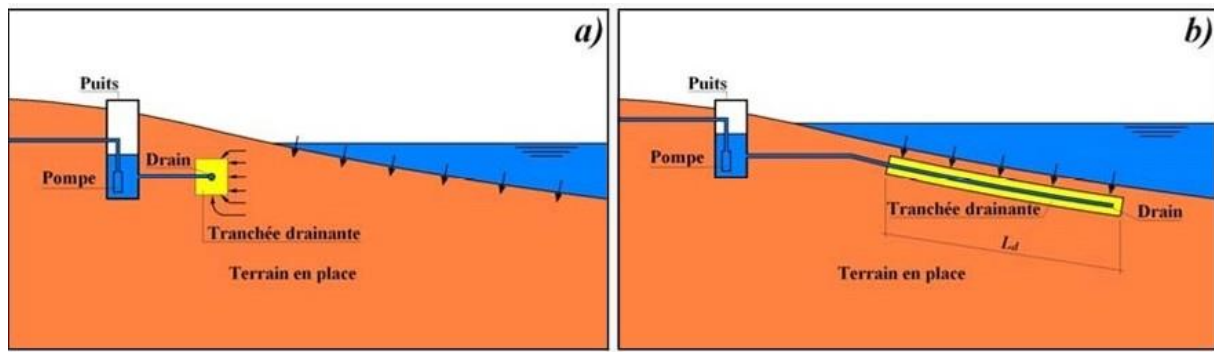


Figure 11: Tranchée drainante. a) parallèle à la côte. b) normale à la côte [16]

11.2.3 Drains forcés ou forés subhorizontaux

Une variante de la tranchée normale au trait de côte consiste à foncer (terrains meubles) ou à forer (terrains durs fracturés) un drain sous la mer. La longueur du drain permet d'ajuster le débit en fonction des caractéristiques du sol. Cette technique, de type forage dirigé, permet d'aller loin sous la mer sans altérer l'intégrité des fonds marins. [16]

11.3 Prises d'eau de mer directes

11.3.1 Prise d'eau par canal d'amenée

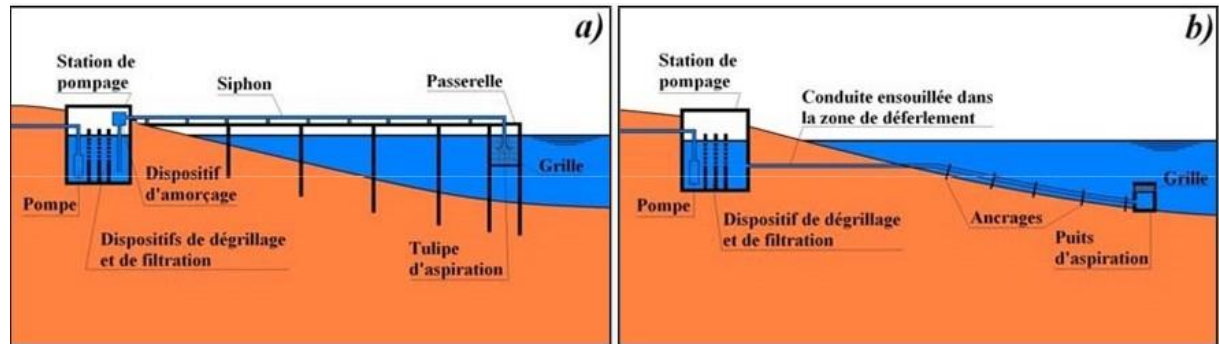
Plus le débit de la prise d'eau de mer est important et moins les pertes de charge sont acceptables. Une prise d'eau par un canal à la côte s'impose donc pour les très gros débits. Les centrales électronucléaires ont été conçues sur ce schéma ($\sim 45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{tranche}$). [16]

11.3.2 Prise d'eau par des puits immergés

La filtration en bassin consiste à capter l'eau à travers une grille grossière (10 à 20 cm) pour retenir les corps solides pouvant obstruer ou endommager la conduite. Il n'est pas possible d'installer une pompe sur la conduite et l'eau doit être amenée par un siphon (gravitaire ou à dépression) dans un bassin de pompage où elle est filtrée. Ce procédé est généralement adopté pour les gros débits (quelques m^3/s à quelques dizaines de m^3/s), par exemple pour le refroidissement des centrales électriques moyennes. On distingue deux types de prises d'eau par des puits immergés :

- Prise d'eau en surface par des conduites : La conduite est supportée par un ouvrage (passerelle dédiée (wharf), corps de digue ou de jetée, épi, ...). Munie d'un dispositif d'amorçage sous vide, elle plonge sous la surface libre et aspire l'eau à travers une tulipe conçue pour éviter les vortex et, dans le cas de prises peu immergées, la dépression de la surface libre (voir figure 12a). La tulipe est protégée par des grilles.

- b. Prise d'eau profonde par des galeries ou des conduites : L'eau est amenée au moyen d'une galerie forcée ou d'une conduite, ensouillée dans la zone de déferlement, puis posée au fond et lestée ou ancrée au-delà. L'eau est aspirée à travers une tulipe ou un puits muni de grilles (voir figure 12b). [16]



11.3.3 Prise d'eau à crépines

La filtration à la prise consiste à prendre l'eau à travers une crépine dont le diamètre des mailles va de quelques dizaines de μm à quelques mm. Cette filtration permet l'installation d'une pompe directement sur la conduite d'aspiration sans l'exposer (détérioration par les corps solides et les poissons, abrasion par les particules fines ...). Ce procédé est généralement réservé aux faibles débits et aux débits moyens (de quelques m^3/h à quelques centaines de m^3/h). Un nettoyage périodique de la crépine est nécessaire (soufflage d'eau ou d'air comprimé, intervention en mer). [16]

❖ Critères de choix du procédé de prise d'eau de mer

Les différents procédés de prise d'eau sont analysés en fonction du débit demandé, du procédé de dessalement retenu et des caractéristiques du site ; les prises indirectes étant privilégiées pour la qualité de leurs eaux. Un compromis doit ensuite être trouvé entre les critères techniques (qualité de l'eau, topographie, etc.), économiques (investissement et fonctionnement) et environnementaux.

Pour des débits d'eau de mer inférieurs à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, les coûts d'investissements sont généralement à l'avantage des procédés de prises indirectes. Au-delà les procédés de prises directes deviennent moins coûteux. Le coût des ouvrages de prise d'eau de mer et de rejet des saumures représente couramment 5 à 15% de l'investissement global, voire plus pour les unités de faible capacité. Les eaux des prises indirectes nécessitant moins de prétraitements, induisent des coûts de fonctionnement de 10 à 20% plus faibles. [16]

12 Conception et localisation des ouvrages de prise d'eau en mer

La conception des ouvrages de prise d'eau est dictée par la nécessité de capter une eau de mer de la meilleure qualité possible, minimisant l'incorporation de sédiments, de débris flottants et d'organismes marins. La localisation joue un rôle crucial dans l'atteinte de ces objectifs.

Les têtes de prises d'eau sont les points d'entrée du système de captage. Leur localisation et leur conception est le fruit d'études approfondies visant à concilier les impératifs techniques et les contraintes environnementales du site.

- **Profondeur de la Prise** : Les ouvrages de prise sont conçus pour capter l'eau de mer à une profondeur minimale de -10,0 m sous le niveau moyen de la mer.
- **Structures de Prélèvement** : Une structure de prise d'eau est prévue, conçue avec des grilles à faibles vitesses d'approche pour minimiser l'aspiration des organismes marins et des sédiments. L'objectif est de garantir un prélèvement d'eau brute de qualité supérieure et de minimiser les impacts sur la faune marine.
- **Localisation du Rejet** : La conduite de rejet est conçue pour se décharger à une altitude d'au moins -10,0 m sous le niveau de la mer et à environ 20 m du côté sud-est de la station de pompage, afin d'assurer une dispersion efficace loin de la structure de dessalement. [17]

13 Justification du Choix de l'Emplacement

Le choix de l'emplacement est guidé par plusieurs raisons stratégiques, à savoir :

- **Qualité de l'eau brute** : Une profondeur de -10m assure que la qualité de l'eau n'est pas affectée significativement par les vagues de surface, qui peuvent entraîner la remise en suspension de sédiments ou l'incorporation de flottants, protège également contre les apports d'eaux douces (et leurs sédiments et polluants) transportées par les oueds, particulièrement importants après des épisodes pluvieux.
- **Protection de la faune marine** : La profondeur aide à réduire l'impact sur les écosystèmes côtiers sensibles.
- **Stabilité du fond marin** : Le fond marin à cet emplacement est stable, ne nécessitant aucune fondation particulière selon les études de réfraction sismique.
- **Mise à l'air et aspiration de particules du fond** : La conception permet d'éviter l'entraînement de particules du fond marin remises en suspension par l'action des courants et une mise à l'air lors des houles extrêmes.

- **Installation des grilles** : La profondeur permet d'installer les grilles d'entrée de la prise d'eau à 5 mètres au-dessus du fond marin, un critère typiquement prévu dans les installations similaires pour éviter l'aspiration des sédiments benthiques. [17]

14 Les méthodes de prise d'eau utilisée en Algérie et le monde

La méthode de prise d'eau la plus utilisée en Algérien et prises d'eau directes en mer ouverte, en surface ou au fond. Elle est utilisée presque dans tous les stations de dessalement comme la station de Chatt El-Hillel de Beni Saf et station de L'Hamma en Alger. Dans le monde, les méthodes de prise varient d'un pays à l'autre et d'une station à l'autre en fonction des besoins et des capacités de chaque pays.

Tableau 5: Les types de prise d'eau en Algérie et dans le monde

Station de dessalement	Pays	Capacité (m3/jour)	Type de prise d'eau	Description
Beni Saf	Algérie	200 000	Prise directe	Captage direct par conduites marines avec pompage.
Cap Djinet	Algérie	100 000	Prise directe	Ouvrage côtier avec grilles et station de pompage.
Cap Blanc	Algérie	300 000	Prise directe	Projet récent (en construction/extension) pour l'Oranie.
Ras Al-Khair	Arabie Saoudite	1 025 000	Prise directe	L'une des plus grandes au monde (hybride MSF/RO).
Shuaibah	Arabie Saoudite	600 000+	Prise directe	Captage marin direct avec conduites côtières.
Jubail	Arabie Saoudite	800 000+	Prise directe	Prétraitements renforcés (gestion des blooms d'algues).
Torre Vieja	Espagne	240 000	Prise directe	Système offshore pour très grands débits.
Carboneras	Espagne	120 000	Prise directe	Captage direct avec traitement de la turbidité.
Fukuoka	Japon	50 000	Prise indirecte	Puits côtiers assurant une filtration naturelle.
Perth	Australie	144 000	Galeries d'infiltration	Captage sous le sable pour une eau plus propre.
Tampa Bay	États-Unis	95 000	Système hybride	Mixte pour optimiser la qualité selon la saison.

15 Conclusion

Au terme de ce chapitre, les principes fondamentaux du dessalement de l'eau de mer ainsi que les principales technologies de dessalement ont été présentés. Une attention particulière a été accordée aux systèmes de prise d'eau, qui constituent une étape essentielle du procédé et jouent un rôle déterminant dans la qualité de l'eau brute ainsi que dans la performance globale de l'installation.

L'étude a montré que le choix du système de prise d'eau dépend des caractéristiques hydrologiques, géologiques et environnementales du site. Une conception appropriée permet de limiter l'entrée des matières en suspension, des sédiments et des organismes marins, contribuant ainsi à réduire les risques de colmatage et à améliorer la durée de vie des équipements et des membranes.

En définitive, la maîtrise des systèmes de prise d'eau constitue un facteur essentiel pour garantir la continuité du fonctionnement des stations de dessalement et optimiser leur rendement. Les connaissances développées dans ce chapitre serviront de base pour l'étude de la station de dessalement de Chatt El Hilal (BWC), qui fera l'objet du chapitre suivant, en mettant l'accent sur son fonctionnement, ses performances et les facteurs influençant son efficacité.



Chapitre II

La performance de la station de Chatt El Hillel (BWC)



1. Introduction :

À l'ouest du pays, les incertitudes climatiques, jointes à la pression démographique et aux perturbations prévisibles liées au réchauffement climatique, contribuent à restreindre la disponibilité en eau. Face à cette réalité, l'action étatique s'est appuyée sur les ressources scientifiques en adoptant la technologie du dessalement de l'eau de mer, laquelle se présente aujourd'hui comme une alternative plausible. Le gouvernement a lancé une série de projets de dessalement, intégrant des installations de capacités variables le long des littoraux algériens. Dans la région nord-ouest, la Wilaya d'Aïn-Temouchent a été investie d'une station de dessalement d'une capacité de production de 200 000 m³/j, garantissant l'approvisionnement en eau potable des Wilayas d'Aïn-Temouchent et d'Oran.

Les informations évoquées dans ce chapitre proviennent de notre stage réalisé au sein de la station BWC.

2. Présentation de la station de dessalement Chatt El-Hillel Beni Saf (BWC) :

La station de dessalement d'eau de mer SDEM de Beni Saf est l'une des plus grandes stations de dessalement d'eau de mer d'Algérie et d'Afrique, considérée comme le Fournisseur officiel d'eau de l'Ouest algérien. Cette station est exploitée, en dépit d'un contrat signé le 10 septembre 2005, par l'UTE Desaladora Beni Saf d'Operacion & Matenimiento, une société espagnole soit un établissement permanent. La société d'exploitation fait partie de la société TEDAGUA, entreprise leader du secteur de traitement de l'eau, construction et exploitation des stations de dessalement d'eau de mer, avec des contrats sur les cinq continents.



Figure 13: image de dessalement de Beni Saf (BWC)

3. Situation géographique de l'usine de dessalement :

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer de Chaat El Hillal est localisé sur la côte méditerranéenne d'Algérie dans la wilaya de Ain Témouchent daïra d'El Malleh commune de Ouled El Kihel au niveau de la ZET Chatt El Hillal sur une superficie de 65 700 m², avec une capacité de production de 200 000m³/j (avec 10 modules de dessalement).



Figure 14 : Situation géographique de la BWC (Google Earth)

4. Présentation du promoteur du projet – Beni Saf Water Company

Le projet de la station de dessalement d'eau de mer de Beni Saf fait partie d'un large programme de construction d'usines de dessalement entrepris par le gouvernement algérien pour fournir à l'Algérie une ressource stable en eau potable et permettre à la nappe phréatique de se renouveler.

Le 26 mai 2004, un groupement d'entreprise espagnole GEIDA a remporté l'Appel d'Offre International N°05/AEC/2003 relatif à la conception, la construction, le financement, la possession et l'exploitation de l'usine de dessalement de Beni Saf, d'une capacité de production d'eau de 200.000 m³/jour.

BENI SAF WATER COMPANY SPA, société par actions de droit algérien est créé le 14 novembre 2004, pour réaliser et exploiter la station de dessalement d'eau de mer.

BENI SAF WATER COMPANY SPA, est une jointe venture créée dans le cadre des Investissements directs Étrangers, détenue à 51% par GEIDA Beni Saf.SL, constituée de Cobra Installations & service et Technique De Agua (TEDAGUA) et 49% par Algerian Energy Company (AEC). Spa, le propriétaire de ce projet.

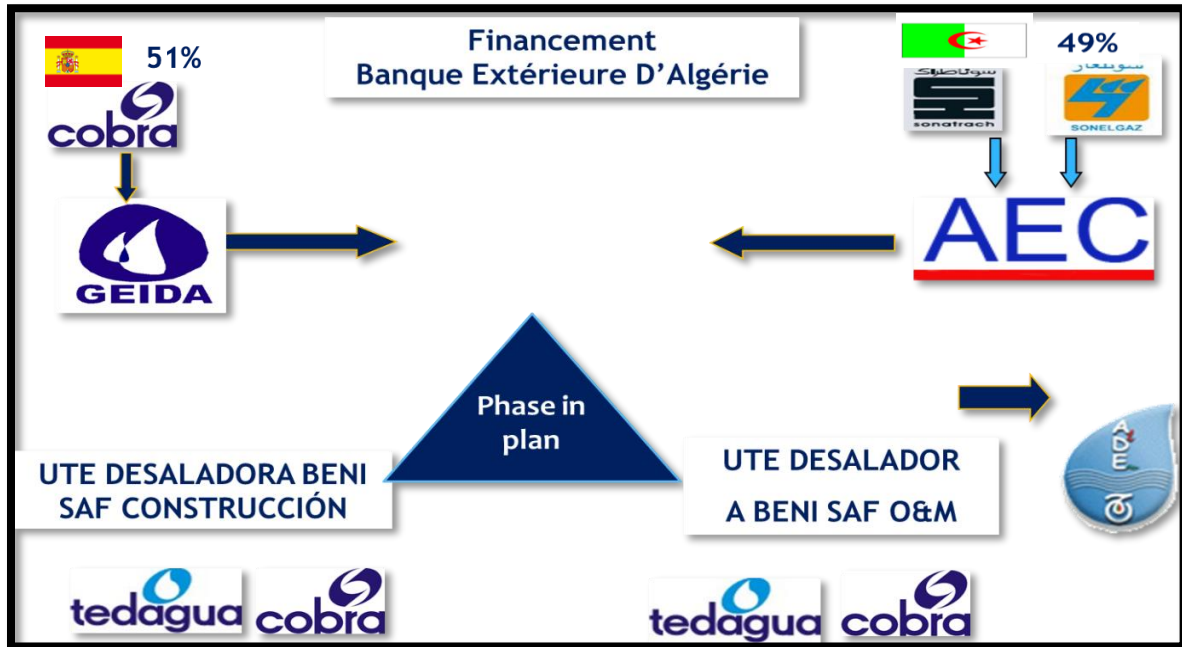


Figure 15 : Les entreprises exploitant le SDEM (BWC)

➤ GEIDA

GEIDA société de droit espagnol 51% (Grupo cobra)

GEIDA est un groupement d'investisseurs dans les projets de construction et d'exploitation d'usines de dessalement d'eau de mer en Algérie. Elle est composée à part égale par Cobra et tedagua.

➤ AEC

AEC société de droit algérien 49%

AEC est composé des deux plus grandes compagnies algériennes du secteur de l'énergie (Sonatrach et Sonelgaz)

A. Partenaires techniques

Les partenaires techniques assurent la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance de la station :

GEIDA Beni Saf (via Cobra et TEDAGUA)

TEDAGUA – expertise en dessalement et osmose inverse.

B. Partenaires financiers

Le financement du projet est assuré par un pool bancaire algérien :

Banque Extérieure d'Algérie (BEA) – 50%

Crédit Populaire d'Algérie (CPA) – 33%

Banque Nationale d'Algérie (BNA) – 11%

Banque de Développement Local (BDL) – 6%

5. Principales données techniques de l'usine :

Tableau6 :les données techniques de BWC

Lieu d'implantation	Chatt El Hillal, Béni Saf, Wilaya d'Ain-Temouchent, Algérie
Superficie du terrain	700 65m ² (concession sur 25 ans)
Capacité de production d'eau dessalée	200.000m ³ /jour
Nombre de modules	10unités de 20.000 M ³ /j chacune
Technologie de dessalement	Osmose Inverse
Consommation électrique	≤ 4,15 kWh/m ³
Type de prise d'eau de mer et rejet	Émissaire sous-marin DN 2400 mm /1800mm
Prétraitements	Pré filtration, Filtres à sable et anthracite, Filtres à cartouche
Prétraitements chimiques	Hypochlorite sodique, Chlorure ferrique, Acide sulfurique, Méta Bisulfite Sodique, Dispersant
Système de récupération d'énergie	Chambres isobariques (ERI) 95%
Poste traitement du produit	Carbonate de calcium - Hypochlorite sodique
Montant de l'investissement	240 M\$
Prix de l'eau	0.6994 \$
Début Exploitation	Mars 2010

6. Description du fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer

6.1 Captage d'eau de mer :

Le système de prise d'eau est direct ouvert a mer au fond, l'eau de mer est captée à partir d'un (1km) de la côte grâce à un émissaire en PEHD DN 2400 mm A l'extrémité de l'émissaire, une tour de 10m de hauteur est érigée sur un fond à 18m pour capter une eau plus ou moins propre. L'eau est véhiculée à l'intérieur de la conduite par gravité avec une vitesse d'écoulement inférieure à 1m/s



Figure 17: Tour de captage



Figure 16: Plan de masse

- Après une première filtration brute, l'eau de mer est tamisée à l'aide de filtres rotatifs (figure 06) avant d'être pompée à partir du bassin de captage Vers le prétraitement, sur une distance de 900 mètres.



Figure 18: filtre rotatif (BWC)

6.2 La station de pompage

Lors de nos visites sur le terrain, nous avons pu observer la station de pompage qui est composée de :

- 11 pompes centrifuges horizontales (Sulzer), (figure 07) ;
- 10 pompes en marche, 01 pompe en stand-by ;
- 01 système d'amorçage des pompes à vide composé de 02 compresseurs d'air ;
- Le système d'amortisseurs de chocs hydrauliques (anti-bélier) composé de 2 réservoirs identiques.



Figure 19 : Zone de captage (BWC)

6.3 Prétraitement de l'eau de mer

Avant de faire passer l'eau de mer dans les modules d'osmose inverse, elle passe par des unités prétraitement :

6.3.1 La filtration sur sable :

Le filtrage à sable consiste à retenir les solides en suspension présents dans l'eau de mer et les floccs formés à l'étape de coagulation.

Le système de filtrage (figure 08) est constitué de deux trains de filtrage identiques, ayant chacun la capacité de filtrer 50% de l'eau nécessaire.

Chaque train de filtrage est constitué de 24 filtres regroupés en 12 modules ou paires de filtres.

Chaque module est constitué de 2 filtres identiques fonctionnant comme une unité filtrante, avec collecteurs et vannes communes.

Le filtrage est un processus suffisamment connu, au cours duquel l'eau traverse un milieu filtrant poreux, qui retient mécaniquement les solides en suspension. Dans ce cas, le milieu filtrant utilisé est le sable de silice de deux grosseurs (bicouche).

Une couche de sable grossier (couche support) est située en bas des filtres et une couche de sable plus fin (couche filtrante) la recouvre et retient les particules les plus fines.

En amont des filtres à sable (système de captage et pompage), on trouve un mélangeur statique prévu pour faciliter le mélange de l'eau et des produits chimiques dosés au préalable et favoriser la floculation de MES.

Le pupitre de l'analyseur de turbidité de chaque train comprend un dispositif de prélèvement d'échantillon destiné à mesurer le taux de matières SDI. Cette mesure est importante pour le contrôle de la qualité de l'eau qui passe à l'étape suivante. Il s'agit d'un bon indicateur du fonctionnement du filtre.

A l'entrée et à la sortie de chaque train de filtrage, est monté un manomètre destiné à vérifier les variations de pression entre les collecteurs d'entrée et de sortie, appartenant au système de captage et de pompage.

❖ Caractéristiques des filtres

48 filtres à pression horizontale et à fond bombé sont installés en parallèle, afin que le volume d'eau soit uniformément réparti entre tous ces filtres en fonctionnement normal.

Les filtres sont disposés en deux trains, constitué chacun de 12 modules de 2 filtres. Au niveau fonctionnel, un module constitue l'unité minimale de filtrage.

Le collecteur supérieur est celui d'entrée d'eau de mer et le collecteur inférieur, celui de sortie de l'eau filtrée. L'eau tombe sur le lit sableux, est filtrée puis passe à la cavité inférieure.

6.3.2 Filtrage à anthracite :

Le système de filtrage à anthracite (figure 08) a pour fonction de retenir les agents résiduels et cancérigènes, la matière organique et, en général, les composés causant des problèmes de

mauvaises odeurs et de mauvais gout dans l'eau. L'eau est ainsi prête à passer par les filtres à cartouches, d'où elle est envoyée aux appareils d'OI.

- Après que l'anthracite ait éliminé les matières organiques et les odeurs, l'eau passe par une ultime étape de sécurité avant l'osmose inverse : la filtration sur cartouche.



Figure 20 : zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf (BWC)

Tableau 7 : Caractéristiques de filtrage à anthracite

Taux de charbon	> 90%
Taille effective (mm)	1.2
Coefficient d'uniformité	1.4
Densité réelle (kg /m3)	1400
Densité apparente (kg/m3)	1050
Grosseur du pas de grain (microns)	186

6.3.3 Filtration par cartouche :

Le système de filtration par cartouches est conçu pour retenir les particules de plus petite taille (jusqu'à 5 microns absolus) qui n'ont pas été retenues par les filtres à sable et à anthracite et qui pourraient endommager les installations des modules d'OI.

- **Description :**

Le système de filtration par cartouches (figure 09) se situe à l'intérieur du bâtiment de production, il est constitué de 2 lignes de filtration formées de 10 filtres chacune. Par conséquent, le système dispose en tout de 20 filtres.

La filtration est un procédé suffisamment connu. On fait passer l'eau à travers un milieu filtrant poreux où sont retenus les solides en suspension, par le biais d'une action mécanique.

Le milieu filtrant utilisé ici consiste en des cartouches logées à l'intérieur des corps des filtres. Leur seule mission est d'accueillir les cartouches filtrantes.

Pour protéger aussi bien le groupe haute pression que les membranes d'OI, une filtration de sécurité est installée dans le but de retenir les particules de plus petite taille pouvant endommager les appareils du système. La filtration par cartouches est la technique de filtration la plus conseillée pour les applications dont les exigences quant à la qualité et à la sécurité sont très élevées.

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

Les cartouches ont une capacité limitée de rétention et, une fois que celle-ci a été atteinte, les cartouches doivent être remplacées.

- ❖ **Caractéristiques des filtres :**

20 filtres verticaux à cartouche sont installés en parallèle, de façon à ce que le débit d'eau soit réparti entre tous les filtres pendant le processus normal de fonctionnement. Les filtres sont disposés dans deux lignes, chacune comprenant 10 filtres.

- ❖ **Caractéristiques des cartouches :**

Une cartouche est un élément filtrant aux dimensions standards, habituellement fongible, avec une forme cylindrique. Les cartouches sont généralement composées d'un tube ou âme support intérieur recouvert de l'élément filtrant.



Figure 21 : les filtres à cartouches (BWC)

- **Fonctionnement :**

Dans des conditions normales, les filtres fonctionnent en opération normale de filtration. Au moment où les cartouches sont colmatées, ce qui est détecté par le faible débit d'entrée, le processus de filtration s'arrête et l'on procède au remplacement des cartouches à l'aide du palan.

6.4 Prétraitement physico-chimique

6.4.1 Bâtiment de dosage chimique :

- 02 réservoirs en PRFV de chlorure ferrique (comme coagulant).
- 02 réservoirs en PRFV de méta bisulfite de sodium (pour diminuer le taux de chlore et qui n'est plus utilisé dans l'usine).
- 02 réservoirs en PRFV de l'anti tartre (pour éviter l'entartrage des membranes).
- 02 réservoirs d'acide sulfurique en acier de 100 m³ chacun ; Sont mis pour diminuer le PH de l'eau de mer et le rendre de basique a acide dans le but de protéger les membranes d'osmose inverse.

Le prétraitement chimique repose principalement sur l'utilisation de quatre produits :

- Pour la coagulation ———> chlorure ferrique
- Pour la neutralisation du PH ———> l'acide sulfurique
- Pour la neutralisation du chlore libre ———> méta bisulfite
- Pour la prévention des membranes ———> l'anti scalant

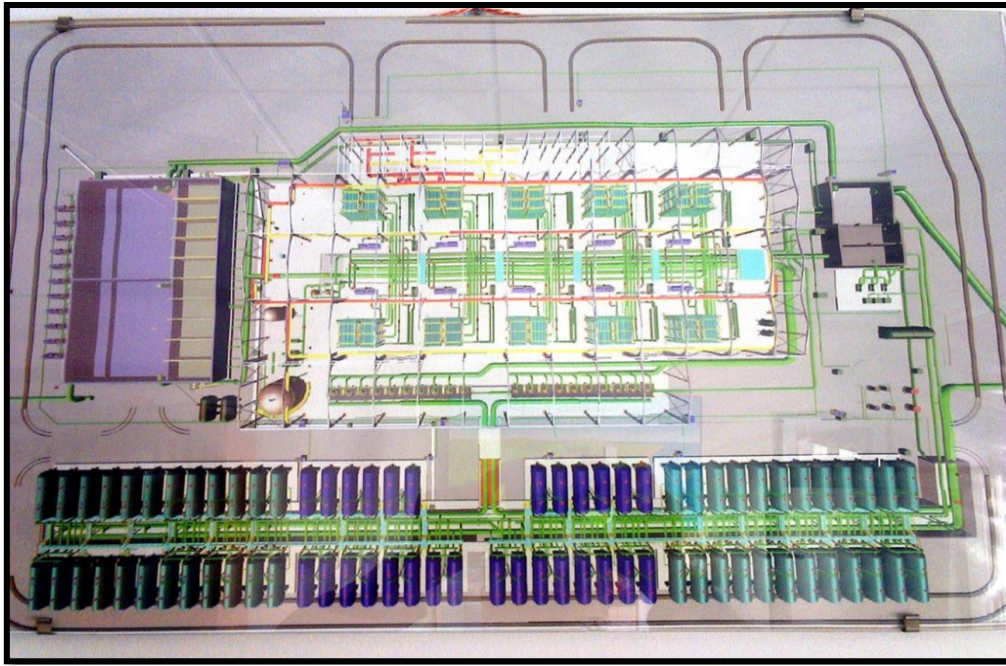


Figure 22 : Zone des filtres (BWC)

6.5 Poste d'osmose inverse

Le système d'osmose inverse est composé de :

- 10 unités de production de 20 000 m³/j chacune ;
- 256 tubes à pression par unité ;
- 1792 membranes dans chaque unité, soit 7 membranes dans chaque tube à pression ;
- 01 pompe centrifuge de haute pression par unité ;
- 01 pompe de recirculation par unité ;
- 22 récupérateurs d'énergie par unité. Ce système a pour fonctions :
- Dessaler l'eau de mer pour produire de l'eau potable ;
- Evacuer la saumure de rejet à pression au système de récupération d'énergie

Le processus de dessalement s'effectue par le passage de l'eau de mer d'alimentation à travers des modules de membranes semi-perméables disposés en série à l'intérieur de chaque tuyau de pression et en parallèle dans chaque module. Pour que le courant d'entrée au châssis d'osmose inverse traverse la membrane, il est nécessaire que la pression exercée sur celle-ci soit supérieure à sa pression osmotique. De cette manière, à partir du courant d'eau de mer qui a une plus grande concentration saline, il se produit un courant d'eau produit ayant une concentration plus faible, le perméat, et un autre courant de rejet, la saumure, avec une teneur en sels bien supérieure à celle que possédait initialement le courant d'eau d'alimentation.

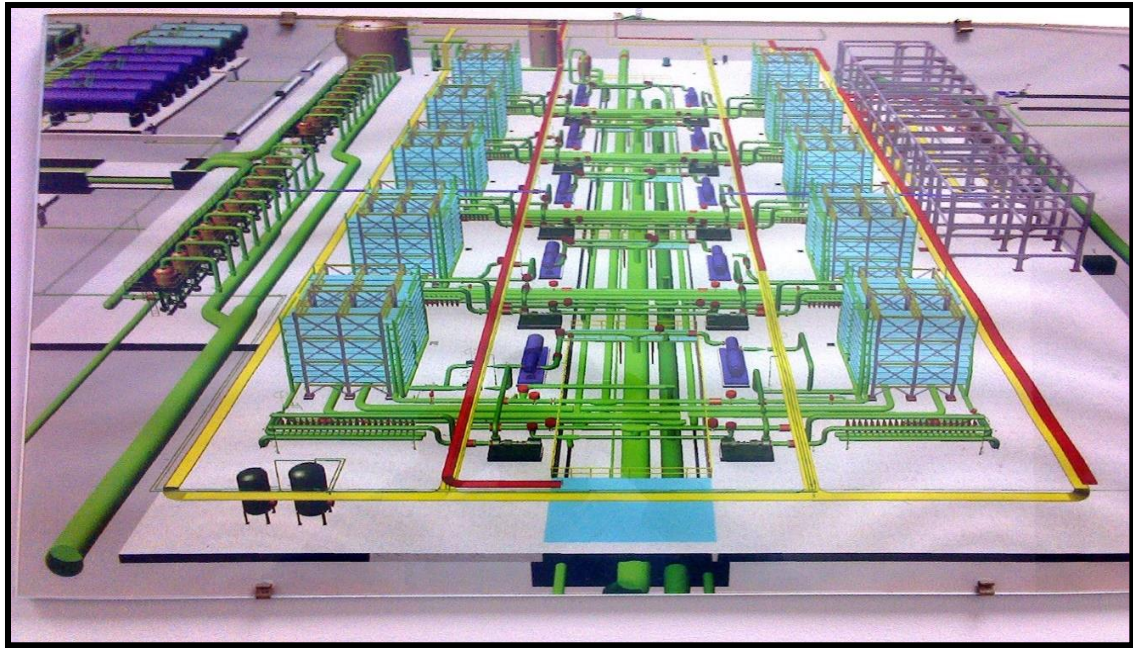


Figure 23 : Zone de production (BWC)

Le système d'OI se trouve à l'intérieur du bâtiment de production et est organisé en trois sous-systèmes différenciés essentiellement par la nature du fluide qu'ils acheminent. Chaque sous-système dispose de ses propres collecteurs principaux, de ses instruments et de ses vannes associées.

Il y a les sous-systèmes suivants :

Sous-système d'eau d'alimentation : le fluide circulant est l'eau de mer d'entrée au traitement d'OI. L'eau de mer d'alimentation aux membranes doit être préalablement conditionnée dans les conditions requises par celles-ci. Ce conditionnement est essentiellement basé sur un contrôle de la matière en suspension et sur un dosage chimique pour éviter la croissance biologique et la précipitation d'incrustations dans les membranes.

Sous-système d'eau dessalée : le fluide de circulation est l'eau qui a traversé les éléments de la membrane (7 membranes par tube de pression). Ce courant est caractérisé par le fait qu'il possède une plus faible concentration saline que celle de l'eau de mer. Sous-système d'eau de rejet : le courant de saumure circule dans ce sous-système. Il ne traverse pas les éléments de membrane et c'est le courant ayant la concentration saline la plus élevée.

❖ Membranes :

Les membranes utilisées dans la SDEM de beni saf sont de chez Hydranautics. Les membranes d'OI sont constituées de films de polyamide à enroulement en spirale avec une

feuille de séparation entre deux membranes. Cette feuille se comporte comme un canal dans lequel circule l'eau d'alimentation/saumure qui alimente l'élément suivant de membrane à l'intérieur du tube de pression. Le modèle des membranes sélectionné est le SWC5 qui est approprié lorsque le courant d'eau d'alimentation est de l'eau de mer. Son pourcentage de rejet des sels est supérieur à 99,7%

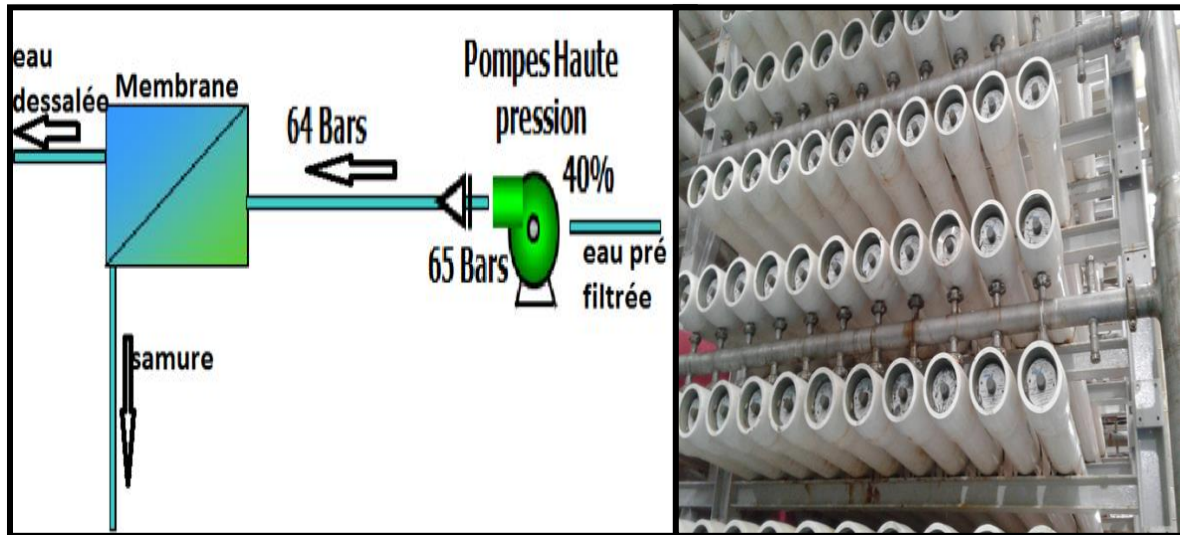


Figure 25: Fonctionnement des membranes (BWC)

6.5 Description du récupérateur d'énergie :

Le rejet des membranes est dirigé vers le PX (the pressure Exchanger), qui transfère la pression du rejet à l'eau d'alimentation, et la renvoie vers les membranes. Le PX fournit donc en eau de mer prétraitée, la quantité de concentrât qu'il recroît. Le travail du rotor peut être vu comme deux longueurs de tuyaux en rotation. L'eau d'alimentation à basse pression entre dans un tuyau, puis est transférée sur le côté haute pression du PX, grâce à la rotation du rotor. En même temps, le rejet de la membrane à haute pression entre dans l'autre tuyau puis est transférée vers le côté basse pression. Du fait que la totalité du rotor soit composé de ces tuyaux, il existe en permanence un débit entre les côtés basse pression et haute pression du PX.

Le système de récupération d'énergie est composé comme suit :

- Type ERI model PX-220
- Nombre ERI 22/unité
- Débit d'entrée 9369M³/H
- Débit maximum par ERI 50M³/H

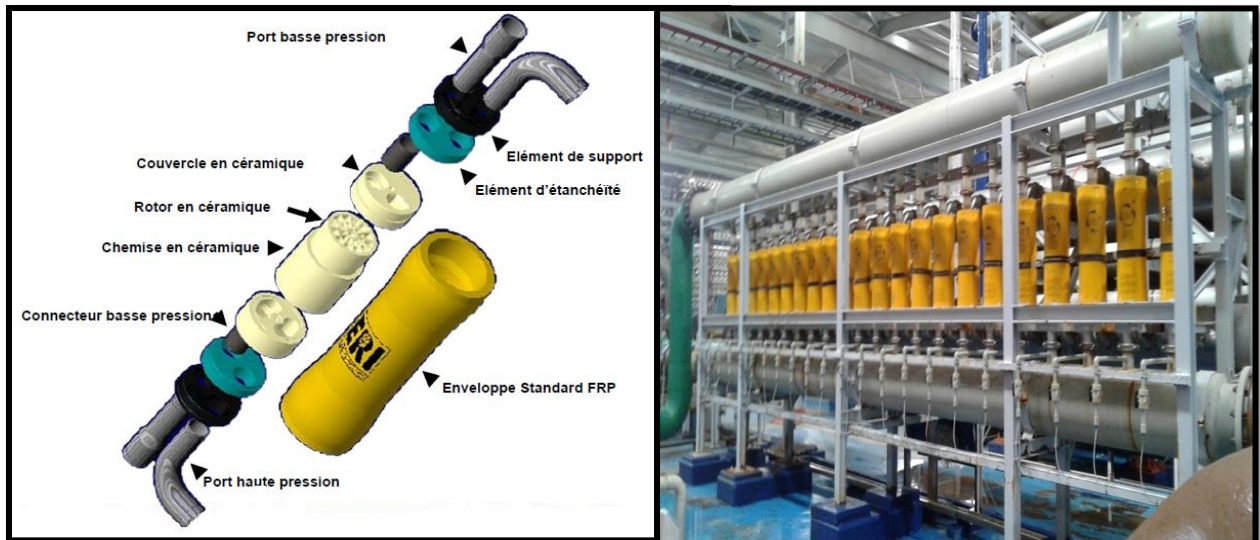


Figure 26 : Récupérateur d'énergie PX (the pressure Exchanger). (BWC)

6.6 Post traitement :

L'eau produite est stockée dans deux (02) réservoirs de capacité de 2500m³ chacun et est traitée avec de la calcite afin de la reminéralisée, suivi d'une injection d'hypochlorite de

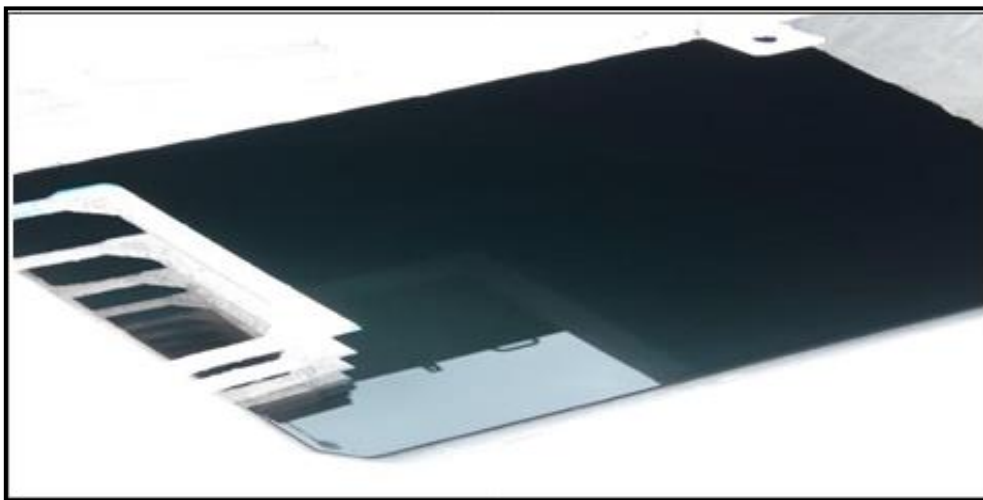


Figure 27 : le réservoir de traitement de l'eau dessalée (BWC)

Sodium pour la stérilisation.

6.7 Le stockage et le refoulement d'eau au le client

Le système de refoulement d'eau est composé comme suit :

- 10 pompes en service.
- 01 pompe en stand-by.

Après le post traitement, l'eau sera conservée dans un réservoir d'une capacité de 5000m³ qui sert de réservoir d'attente pour prévoir un temps de contact nécessaire à la désinfection avant le pompage de l'eau vers le réseau de distribution.

6.8 EQUIPEMENT DE NETTOYAGE

6.8.1 Etape de Lavage des filtres

Les filtres doivent être lavés quand la perte de charge atteint une valeur limite due au colmatage des interstices du lit filtrant par les particules retenues, et ceci par les étapes suivantes :

➤ Drainage :

Constitue la première étape de lavage avec l'ouverture des vannes

Durée : 2min

➤ Lavage à l'air :

On introduit l'air ascendant qui provoquera un frottement entre les grains avec détachement des solides pour faciliter leur élimination dans l'étape suivante.

L'air est fourni par 3 (2 en opération et une en réserve) soufflantes d'air de lavage qui se trouve dans le bâtiment de lavage a filtré.

Durée : 10min

➤ Eau de Lavage à la saumure (Backwash) :

Consiste à faire passer la saumure (venant du bassin de saumure) à contrecourant par le lit filtrant, dans le sens ascendant qui permettra d'éliminer les solides retenus au cours du filtrage, aérer le lit filtrant et prévenir la formation de voies préférentielles.

Durée : 20min



Figure 28 : Eau de Lavage à la saumure (Backwash) (BWC)

➤ Rinçage :

Avant que le filtre ne reprenne son fonctionnement normal, il faut procéder à un lavage à l'eau de mer, pour éliminer les restes de sels laissés par la saumure lors de l'étape précédente.

Durée : 1min.

6.8.2 Nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes est un processus nécessaire dans le cas d'encrassement appréciable des membranes, détecté par le manomètre. Le nettoyage s'effectue par une solution de réactif avec de l'eau produite qui est préparée dans un réservoir. Cette solution aspirée par deux pompes à travers la ligne d'alimentation, traversera les filtres à cartouches à travers les tubes de pression puis sortira vers le réservoir de nettoyage pour la neutralisation par la soude avant son déversement dans la mer. Enfin, les modules sont rincés à l'eau dessalée. L'eau de rejet sortira par la tuyauterie de saumure vers le drainage générale de l'installation.

6.9 Bâtiment de saumure

L'eau de rejet de saumure et les eaux usées provenant des nettoyages sont collectées avant d'être déversées à la mer par le biais d'une canalisation DN 1800 mm à 500 mètres de la côte, ce lieu de déversement a été déterminé par les résultats de l'étude marine afin d'atténuer les impacts.



Figure 29 : Bâtiment de saumure (BWC)

6.10 Le laboratoire

Dans ce laboratoire, nous avons réalisé nos propres procédures d'échantillonnage et d'analyse durant notre stage. Nous avons mesuré le MES et appris à mesurer le SDI. Nous avons également découvert les principales tâches effectuées par le personnel du laboratoire.

Tableau 8 : les analyse de laboratoire (contrôle de qualité de l'eau commercialisée)

Analyse effectuée	Unité	Qualité garantie
PH		8 à 8.5
Alcalinité	Ppm CaCO3	65
Dureté	Ppm CaCO3	50 à 65
Indice de Langelier		0 à 0.4
Chlore résiduel	PPM	0.5

Tableau 9 : récapitulatif global – Analyse et traitement de l'eau

Paramètre / Concept	Essentiel
Carbonates & équilibre	Équilibre $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-} / \text{CO}_2$ dépendant du pH et de la température, pouvant entraîner des précipitations de Ca et Mg.
Alcalinité	Capacité de l'eau à neutraliser les acides, liée aux carbonates, bicarbonates et hydroxydes.
Calcium (EDTA)	Dosage du Ca^{2+} par complexation avec EDTA et indicateur murexide (rose → pourpre).
Matières en suspension (MES)	Particules solides fines maintenues en suspension par le mouvement de l'eau.
Turbidité	Propriété optique liée à la diffusion de la lumière par les particules et micro-organismes.
Dureté de l'eau	Concentration en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} provenant des formations rocheuses.
Dureté temporaire	Due aux carbonates et bicarbonates de calcium et magnésium.
Dureté permanente	Due aux sulfates, chlorures, nitrates et silicates de Ca et Mg.
Indice de Langelier (IL)	Indicateur de stabilité de l'eau : IL = 0 équilibre, IL < 0 corrosif, IL > 0 incrustant.
Reminéralisation	Ajout de CaCO_3 pour augmenter l'alcalinité et réduire la corrosivité.
SDI	Indice évaluant le potentiel d'encrassement des membranes de filtration. 0 à 3 acceptable
Instruments principaux	pH-mètre, conductimètre, turbidimètre, spectrophotomètre, burette, EDTA.
Objectif global	Contrôle et optimisation de la qualité de l'eau potable et dessalée.

6.11 Salle de contrôle

Avec un système de contrôle digital (DCS) YOKOGAWA, tous les équipements de la station sont contrôlables à partir de la salle de commande.



Figure 30 : Salle de contrôle (BWC)

6.12 Autres composants de la station

- Les salles électriques ;
- Les salles des automates ;
- SNCC : système numérique de contrôle et de commande ;
- Station électrique conçue pour le fonctionnement de la totalité de la SDEM. (Deux lignes électrique de 220000KV) ;
- Deux bâtiments administratifs de R+1 ;
- Un poste d'entrée à la station ;
- Un poste de sécurité ;
- Un post contre incendies ;



Figure 31 : le réseau électrique de la SDEM de Béni Saf (BWC)

7 Analyse critique du fonctionnement de la station

7.1 Distribution d'eau depuis la station de Chatt El Hilal

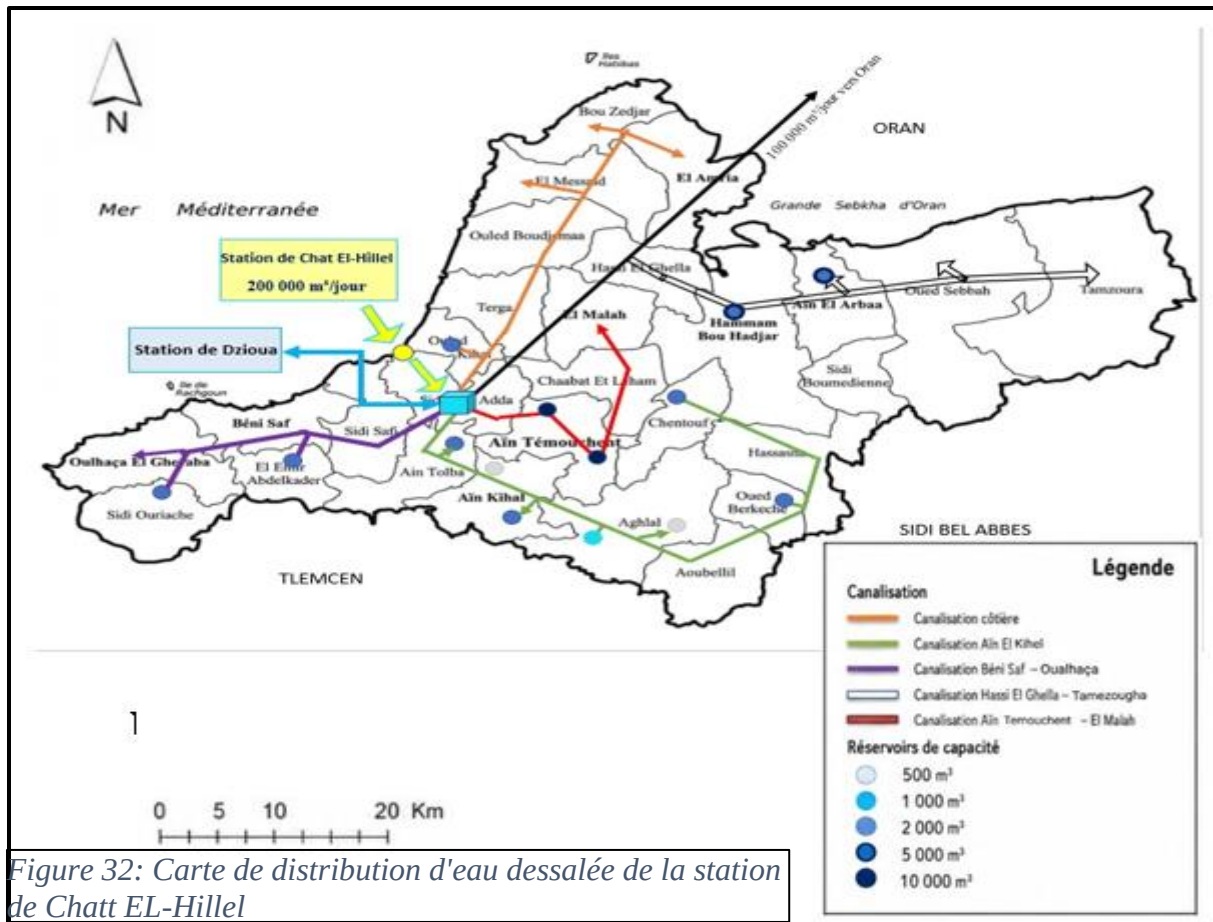
Les besoins en eau de la Wilaya d'Aïn Témouchent sont estimés à environ 104 000 m³/jour, soit 250 litres/jour par habitant, pour couvrir les besoins de 415 796 habitants. (Source :).

L'usine de dessalement de Chatt El Hilal assure une production de 200 000 m³/jour, transférée directement vers la station de Dziuou. Ensuite, 100 000 m³/jour est distribuée à Oran et l'autre 100 000 m³/jour à Aïn Témouchent, puis à toutes les communes et daïras de la wilaya (voire le figure 33) via cinq canalisations :

- Canalisation côtière
 - Canalisation d'Aïn El Kihel
 - Canalisation Beni Saf-Oulhassa
 - Canalisation Hassi El Galla-Tamzougha
 - Canalisation du sel d'Aïn Temouchent).
- Programme de distribution : 24 h/24 (distribution quotidienne pour les zones dispersées).

Cependant, la station est rapidement confrontée à des arrêts pour diverses raisons, entraînant plusieurs effets négatifs, parmi lesquels on note :

- **Une incapacité à respecter les quotas régionaux** : Le manque des cinq conduites des quantités d'eau prévues (qui dépassent les 165 000 m³/jour).
- **Des interruptions d'eau fréquentes** : La détresse des habitants dans les différentes daïras et communes de la wilaya, qui se voient privés d'eau potable pendant de longues périodes.
- **L'épuisement des réservoirs de stockage** : L'incapacité à remplir les installations de stockage (comme les réservoirs de 10 000 m³ à Aïn Temouchent ou de 5 000 m³ à Aïn ElArbaa), ce qui empêche le réseau de jouer son rôle de « réserve de sécurité » et l'empêche de compenser le manque.
- **Un déséquilibre hydraulique** : Une baisse de pression dans les conduites principales (dépassant 40 et 70 km), ce qui facilite l'infiltration d'air ou de contaminants dans le réseau et altère la qualité de l'eau fournie.
- **Les dommages mécaniques et fonctionnels** : La sollicitation excessive des stations de pompage situées le long des conduites lors de redémarrages brusques, ce qui augmente les frais de maintenance et diminue la longévité des équipements.



7.2 Les principaux arrêts survenus à la station

Le déficit de production observé depuis le début de l'exploitation de la station est attribuable aux causes suivantes :

- **Les Incidents d'urgence** : résultent principalement de ruptures sur les conduites et de pannes des automates.
- **Les conditions météorologiques** : Les conditions climatiques ont conduit à des arrêts totaux ou partiels de la SDEM à plusieurs reprises, que ce soit en raison d'une forte humidité ayant entraîné le déclenchement de la sous-station électrique, ou en raison d'une forte houle en mer, provoquant une augmentation des matières en suspension (MES) dans l'eau brute.
- **Demande de coupure d'électricité de Sonelgaz** : En raison du retard dans le raccordement de la deuxième ligne électrique, qui était prévu, le fournisseur d'électricité (Sonelgaz) a sollicité à plusieurs reprises BWC pour obtenir l'autorisation de couper l'électricité afin de réaliser des travaux de maintenance sur la ligne Haute Tension.

- **Demande du Client** : Le Client a sollicité un arrêt pour adresser les problèmes rencontrés dans son réseau comme le seor
- **Autres (grève du fournisseur de l'acide sulfurique)** : En mars 2011, la SDEM a dû réduire sa production en raison d'un manque d'acide sulfurique en stock. Cette pénurie est attribuée à une grève du personnel du fournisseur d'acide en Algérie, ALZINC. Les pertes sont évaluées à 1 240 880 M3.

7.3 Répartition des jours d'arrêts par cause 2024 à 2026

Tableau 10: Répartition annuelle des jours d'arrêt par cause

Année	Période d'arrêt	Durée (Jours) + cause	Année	Période d'arrêt	Durée (Jours) + cause	Année	Période d'arrêt	Durée (Jours) + cause
2024	01/03 -05/03	5jours MES	2025	01/02- 04/02	4 jours MES	2025	15/03- 16/03	2jours MES
	12/03- 14/03	3 jours MES		23/02- 25/02	3 jours MES		23/03- 25/03	3 jours MES
	17/07-18/07	2 jours MES		26/02- 28/02	3 jours MES		16/04- 18/04	3 jours MES
	02/10- 06/10	5 jours M.P		08/03- 09/03	2jour MES		21/05- 25/05	5 jours M.P
	21/12- 22/12	2 jours P.T		09/03- 10/03	2 jours MES		04/11- 04/11	1 jour P.T
2025	06/12- 06/12	1 jour P.T	2026	08/01- 11/01	4 jours MES	2026	23/02- 24/02	2 jours C.E
				20/01- 25/01	6jours MES		15/03- 16/03	2 jours MES
				25/01- 27/01	3 jours MES		04/04- 05/04	2 jours P.T
	24/12- 24/12	1 jour P.T		01/02- 03/02	3 jours MES		06/05- 09/05	4 jours M.P
				16/02- 18/02	3 jours MES			
MES :Matière en suspension élavée. M.P : Maintenance programmé. P.T : Pane technique. C.E : Coupure d’électricité								

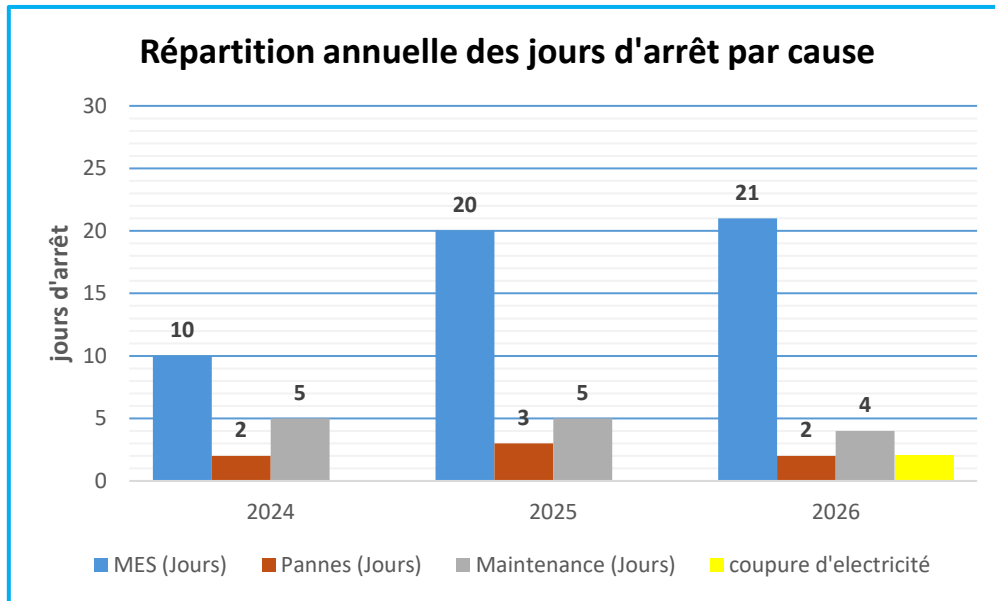


Figure 33: Histogramme représente Répartition annuelle des jours d'arrêt par cause

Analyse graphique :

L'histogramme représente "Répartition annuelle des jours d'arrêt par cause" où :

- La Maintenance (M.P) :** La station prévoit un arrêt périodique pour maintenance une fois par an qui dure quatre jours ou plus, et nous constatons sur le graphique qu'elle continue à suivre ce programme tous ces trois années (2024-2025-2026).
- Les Pannes techniques :** Nous avons observé une diminution des pannes en 2026, directement attribuable à une maintenance soignée et régulier ; les équipements essentiels (pompes haute pression, unités de récupération d'énergie) sont en bon état mécanique.
- Les Coupures d'électricité :** Apparition en 2026. Malgré sa courte durée, la panne représente une menace pour la station. Une coupure brutale provoque un "coup de bélier" et une inversion du flux dans les membranes, ce qui peut les détruire instantanément si le système d'arrêt d'urgence ne fonctionne pas.
- Les Matières En Suspension (MES) :** C'est le point noir , d'après le graphique nous observons : 10jours (2024) → 20 jours (2025) → 21 jours (2026).

C'est la cause majeure d'indisponibilité, Cela traduit une dégradation de la qualité de l'eau de mer brute (phénomènes de turbidité, les algues ou houle soulevant les sédiments). Cela indique que le système de prétraitement est incapable de gérer ces pics de pollution, ce qui oblige l'usine à s'arrêter pour éviter un colmatage irréversible des membranes.

- Par conséquent, nous allons mener une étude analytique de la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel.

7.4 Évaluation de l'impact des variations de la turbidité (NTU) sur la continuité de service de la prise d'eau de Chatt El Hilal" au cours des trois dernières années(2024-2025-2026)

Analyse graphique

Ces graphes sont des Histogrammes qui représente la variation journalière de la turbidité et sa relation avec les arrêts de la station de Chatt el Hillel (BWC) pendant les trois dernières années (2024-2025-2026).

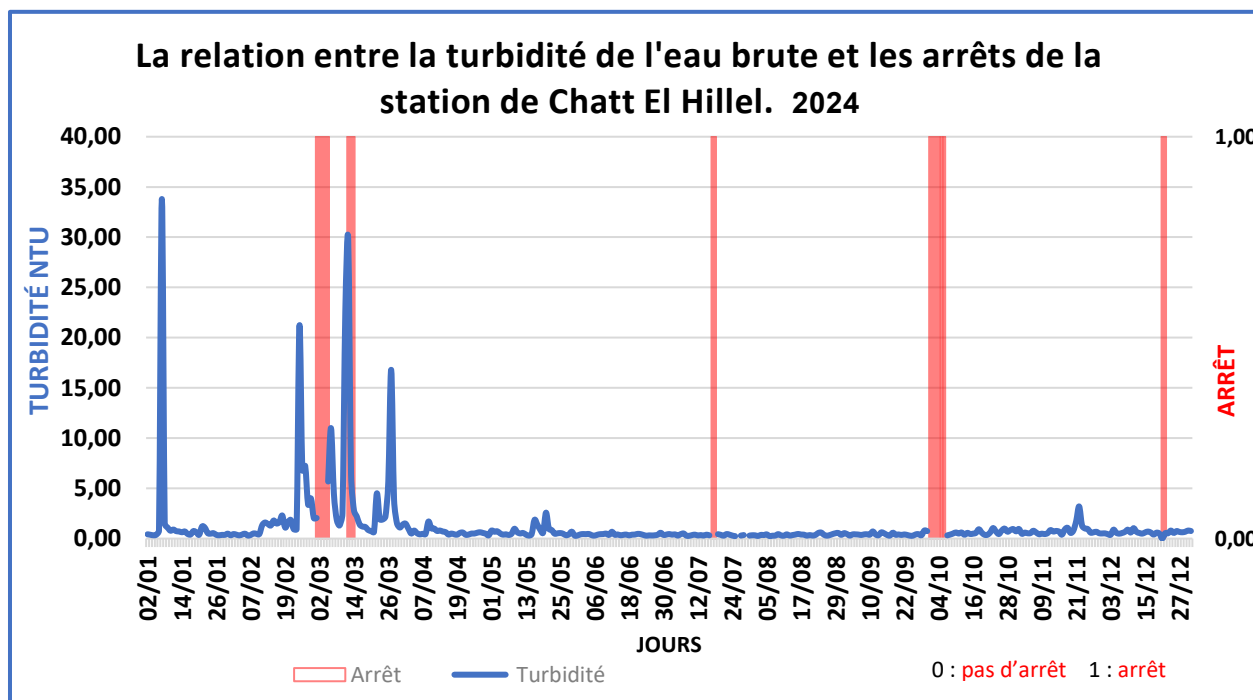


Figure 34: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel 2024.

En 2024 :

Période des perturbations hydrologiques majeures

Cette période est marquée par une corrélation directe entre les pics de turbidité et les arrêts de la station, généralement liés aux conditions météorologiques hivernales et printanières (averses, crues d'oueds, houle marine) :

- **(02-01 au 10-01) :** On enregistre une hausse brutale et immédiate de la turbidité qui atteint le pic annuel maximal de la station (environ 34 NTU). Malgré l'intensité du pic, l'arrêt n'est pas représenté par une bande large. Cela s'explique par un "pic de turbidité éphémère" (choc de courte durée) qui a pu être géré hydrauliquement, ou par une décantabilité rapide des matières en suspension grossières.
- **(27-02 au 14-03) :** La hausse progressive de la turbidité a engendré l'enregistrement de deux pics successifs (le premier dépassant 21 NTU et le second atteignant plus de 30 NTU), franchissant ainsi le seuil opérationnel toléré par la station. Cette augmentation critique explique parfaitement la concomitance avec l'apparition des bandes d'arrêt rouges larges et prolongées, la station ayant été contrainte à un arrêt total de production dû à l'incapacité du système à traiter un tel niveau de turbidité avant la stabilisation de la qualité de l'eau brute ; cette anomalie étant causée principalement par l'apport massif de matières en suspension (MES) lié aux perturbations hydrologiques.

La période de stabilité estivale

- **(Avril à septembre) :** La courbe de turbidité s'aplatit complètement pour se stabiliser à des valeurs minimales, souvent inférieures à 2 NTU et frôlant le zéro.

A cause de l'absence de précipitations et la stabilité des courants marins minimisent la remise en suspension des sédiments. C'est la période optimale pour l'exploitation de la station à sa capacité nominale.

Les arrêts indépendants

Le graphique met en évidence une rupture de corrélation durant la seconde moitié de l'année. On observe quatre arrêts distincts alors que la qualité de l'eau est excellente (turbidité proche de zéro) : A cause de

- Maintenance préventive programmée
- Instabilité du réseau électrique
- Pannes sur le process aval

En conclusion, il ressort qu'il existe une relation étroite entre les niveaux de turbidité et l'indisponibilité de la station. Cet arrêt d'exploitation est dicté par deux facteurs principaux : soit un arrêt forcé dû à la hausse critique de la turbidité causée par les matières en suspension (MES), soit un arrêt technique indépendant lié aux travaux de maintenance périodique et curative des installations .

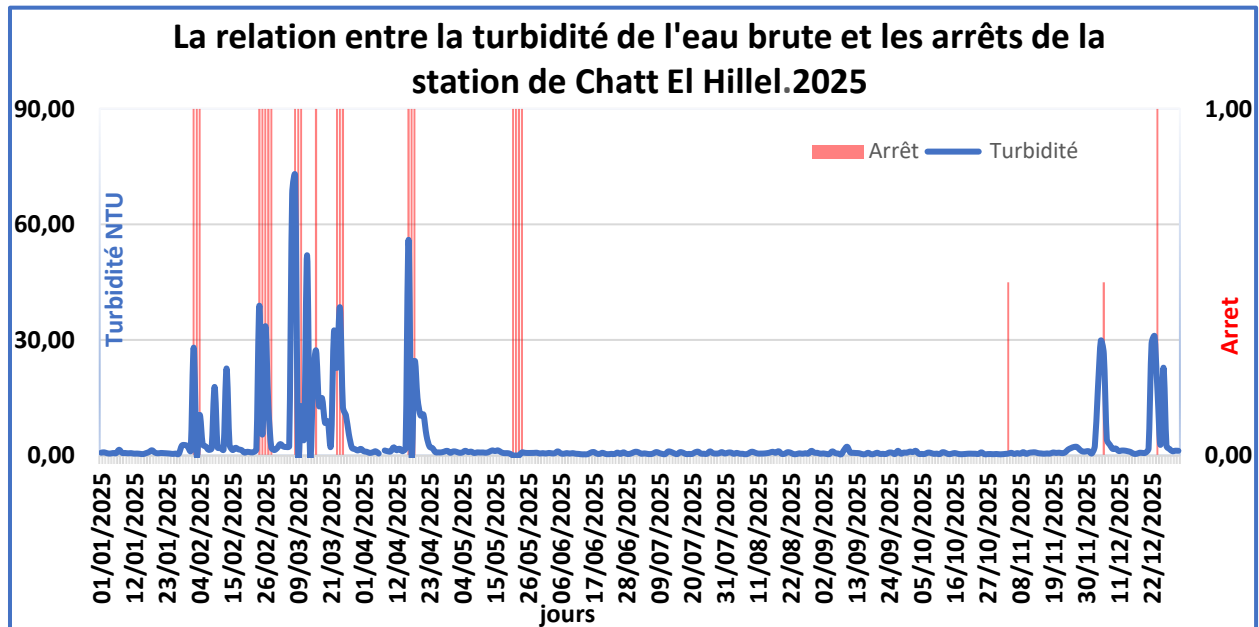


Figure 35: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel.2025

En 2025 :

Instabilité Hydrodynamique Majeure

- **Février 2025** : Une première hausse de la turbidité frôlant les 30 NTU est enregistrée
- **Mars 2025 (Pic absolu de l'année)** : Aux alentours du 13 mars, la valeur maximale de turbidité de l'année a été enregistrée, dépassant le seuil de 70 NTU. Cette élévation aiguë est directement liée au flux important de matières en suspension (MES) charriées par les eaux de ruissellement au niveau de la prise d'eau, ce pic ayant coïncidé avec une série d'arrêts critiques et prolongés de l'installation. Par la suite, une seconde impulsion aiguë, également chargée en MES, a dépassé les 50 NTU durant la seconde moitié du même mois, entraînant à son tour un arrêt opérationnel temporaire du système de pompage.
- **Avril et mai 2025** : Mi-avril a été marquée par une recrudescence soudaine de la turbidité dépassant les 55 NTU, provoquant un arrêt immédiat du pompage à la suite de l'influx de matières en suspension (MES). Par la suite, un arrêt prolongé est observé

à la fin du mois de mai ; malgré la baisse notable de la courbe de turbidité et son retour à la normale, cette interruption de l'exploitation s'explique techniquement soit par une opération de maintenance programmée de l'installation, soit par l'apparition d'une panne technique imprévue sur les équipements.

Stabilité Hydrologique Estivale

- **Juin – Octobre** : Sur le plan opérationnel, on observe une absence totale d'arrêts techniques (aucune barre rouge). La qualité de l'eau de mer étant optimale, le taux de disponibilité de la prise d'eau atteint 100%, confirmant que la stabilité du milieu marin garantit la continuité de service.

Recrudescence Automnale et Hivernale

- **Novembre et décembre 2025** : Au début du mois de novembre (aux alentours du 4 novembre) ainsi qu'au 6 décembre, un arrêt partiel a été enregistré, entraînant à chaque fois une réduction de débit illustrée par des barres rouges isolées. Durant ces deux épisodes, la courbe de turbidité (NTU) restait stable et proche de zéro au moment précis de l'impact, montrant une absence totale de corrélation synchrone. Cela prouve que cette réduction de charge n'est pas liée aux matières en suspension (MES), mais s'explique techniquement par une opération de maintenance programmée ou par l'apparition d'une panne technique sur les équipements, bien que la suite du mois de décembre ait été marquée par des pics de turbidité tardifs
- **24 décembre 2025** : On observe une baisse de la turbidité qui se stabilise à des valeurs minimales ; malgré cela, un arrêt total de la station est enregistré (illustré par la barre rouge verticale). Cette interruption opérationnelle s'explique techniquement par l'exécution d'une maintenance programmée.

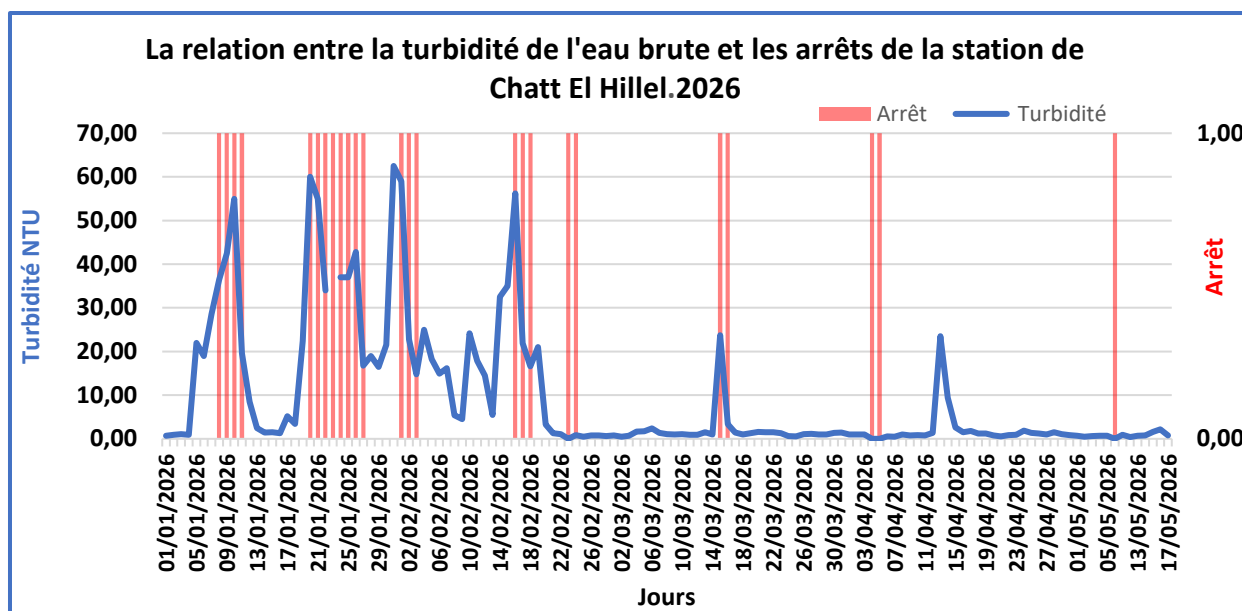


Figure 36: Graphique représente la relation entre la turbidité de l'eau brute et les arrêts de la station de Chatt El Hillel 2026.

En 2026 :

Période de Crises Successives et d'Instabilité Critique

- **06 au 11 janvier** : Nous avons observé une augmentation rapide de la turbidité, atteignant 55 NTU, ce qui a entraîné 5 arrêts de production. Ceci est dû à un afflux de matières en suspension.
- **20 au 27 janvier** : Nous observons des fluctuations dans les valeurs de turbidité, atteignant un pic de -60 NTU puis se stabilisant, provoquant des arrêts successifs au niveau de la station en raison du flux de matières en suspension.
- **a première vague (fin janvier - début février)** : Une hausse brutale de la turbidité a de nouveau dépassé le seuil des 60 NTU, entraînant 3 jours d'arrêt consécutifs de la station.
- **La seconde vague (mi-février)** : Après une stabilisation temporaire où la turbidité a oscillé entre 10 et 20 NTU, une nouvelle hausse importante est survenue aux alentours du 15 février, atteignant environ 55 NTU. Cela a provoqué l'apparition d'une nouvelle série de barres rouges (arrêts successifs) entre le 14 et le 17 février.
- **La situation au 18 février** : Le graphique montre une chute amorcée, rapide et marquée de la turbidité, s'orientant vers une stabilisation du système.
- **23 au 24 février** : Malgré la diminution de la turbidité, un arrêt s'est produit en raison d'un problème électrique.
- **Le mois de mars** : représente une période de reprise pour la station, marquée par une baisse significative du flux de matières en suspension qui avait caractérisé la période

hivernale. Cette stabilisation prouve que le système de pompage de Chatt El Hilal fonctionne de manière continue et sans interruption tant que la turbidité (induite par ces matières) reste inférieure au seuil de 20 NTU. L'arrêt de deux jours observés au milieu du mois n'était qu'une mesure préventive temporaire pour protéger les équipements contre un pic soudain de la charge en matières en suspension.

- **04 au 05 avril** : Contrairement aux arrêts précédents, l'arrêt total enregistré les 4 et 5 avril n'est pas lié à la charge en matières en suspension, la turbidité étant restée minimale et stable (proche de 0 NTU). Il s'agit d'un arrêt technique planifié pour des travaux de réhabilitation/réparation sur la conduite principale de transport d'eau de diamètre 1400 mm (DN 1400). Cet événement montre que l'indisponibilité de la prise d'eau peut aussi être induite par des opérations de maintenance de la grande infrastructure.
- **06 au 10 mai** : Malgré la baisse significative de la turbidité, des arrêts successifs de la station ont été enregistrés en raison de travaux de maintenance programmés.

Conclusion Générale de l'Analyse Pluriannuelle (2024-2026) :

En conclusion de l'analyse des données sur trois années consécutives, nous constatons une corrélation directe et étroite entre les fluctuations de la turbidité et l'indisponibilité de la station. Les arrêts successifs enregistrés au niveau de la prise d'eau de Chatt El Hilal se manifestent sous deux formes distinctes :

Arrêts forcés (liés à la qualité de l'eau) : Provoqués par des flux massifs et soudains de matières en suspension. Ces pics de turbidité dépassent les seuils critiques admissibles, imposant des arrêts d'urgence pour préserver l'intégrité des équipements hydrauliques contre le colmatage et l'abrasion mécanique.

Arrêts programmés (liés à la maintenance) : Dus à des opérations de maintenance et de réhabilitation planifiées sur les infrastructures clés (telles que la conduite principale DN 1400). Ces arrêts, bien qu'indépendants de la turbidité, sont indispensables pour assurer la pérennité et la performance à long terme de la station de dessalement.

Tableau 11 : Tableau comparatif des seuils de turbidité entraînant l'arrêt des stations de dessalement

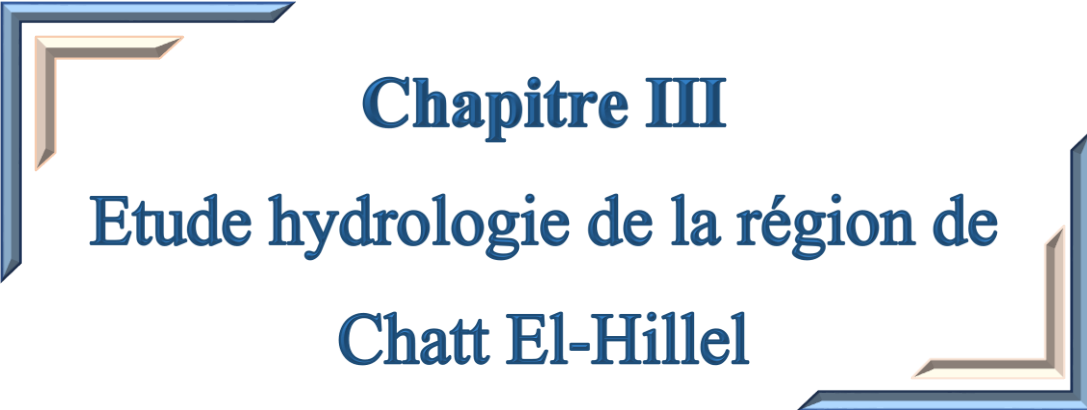
La Station	L'Hamma (Alger)	Magtaa (Oran)	Cap Djinet (Boumerdès)	Chatt El Hillel (BWC)
Seuil d'arrêt (Turbidité)	> 25 - 30 NTU	> 30 NTU	> 20 NTU	> 25 NTU

Ce tableau présente les seuils de turbidité (NTU) des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie, indiquant que les seuils de turbidité auxquels les usines s'arrêtent varient d'une usine à l'autre, en fonction de la capacité de chaque usine à supporter cette augmentation de turbidité.

8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert l'usine de dessalement de Chatt El Hillel (BWC) et ses différents procédés. Nous avons ensuite examiné les arrêts de production de la station, révélant que celle-ci est confrontée à plusieurs problèmes, les plus importants étant liés à l'évolution de la qualité de l'eau brute due à une turbidité accrue.

Par conséquent, le chapitre suivant sera consacré à une étude hydrologique de la région de Oued El Hallouf afin d'analyser les facteurs naturels et climatiques influençant les caractéristiques de l'eau brute.



Chapitre III

Etude hydrologie de la région de Chatt El-Hillel

1. Introduction

Le bassin versant de l'Oued El Halouf est fortement influencé par les précipitations, qui conditionnent le ruissellement, l'érosion des sols et le transport des matières en suspension. Lors des épisodes pluvieux, ces phénomènes entraînent une augmentation de la turbidité et une dégradation temporaire de la qualité des eaux.

Ce chapitre est consacré à l'étude hydrologique du bassin versant de l'Oued El Halouf à travers l'analyse des principales données hydrométéorologiques disponibles. Une attention particulière est portée à la relation entre les précipitations et la turbidité, afin de mettre en évidence la réponse du bassin aux événements pluvieux et de comprendre les mécanismes responsables de l'augmentation des matières en suspension lors des périodes de crue. Cette analyse permettra d'évaluer l'impact des apports solides sur la qualité des eaux et de mieux appréhender leurs répercussions sur les infrastructures hydrauliques et les installations de dessalement alimentées par cette ressource.

2. Le réseau hydrographique de la wilaya d'Aïn Témouchent :

La wilaya d'Aïn Témouchent fait partie du bassin hydrographique du littoral oranais oriental, qui s'étend sur 12 wilayas de l'ouest du pays.

Le réseau hydrographique de la wilaya est constitué de plusieurs bassins versants, notamment : Oued El Hallouf, Oued Sidi Djeloul, Oued Sassel, Oued El Maleh, Oued Sidi Besbess, Oued sennane, Oued Aouzeret, Oued Sidi Baroudi et Oued Tafna.

Ce dernier est le plus important de la wilaya en termes de débit. Il prend sa source au Maroc (Oued Mouilah) et se jette dans la mer Méditerranée à Rachgoun.

❖ Courants marins

Les zones côtières se caractérisent par ce qui suit :

En hiver : les courants proviennent principalement des secteurs sud-ouest (25,43 %). Une forte agitation a été enregistrée depuis l'ouest (19,74 %) et le nord-est (18,04 %), ainsi que des secteurs ouest, ouest-nord-ouest et nord, avec des hauteurs supérieures à 4 mètres dans la zone d'étude.

Le courant du nord-est n'a aucun effet sur le site.

En été : les courants dont la hauteur dépasse 4 mètres proviennent du nord-est (30,42 %), du sud-ouest (14,72 %) et de l'ouest (11,05 %)

3. Réseau hydrographique de la région de Chott El-Hilal

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est constitué de l'Oued El-Hallouf, situé à environ 39 m au nord des limites de la station et à environ 12 m à l'ouest du bâtiment de collecte des eaux, et qui se jette dans la mer.

La superficie du bassin versant de l'Oued El-Hallouf est estimée à 100 km², avec un débit moyen de ruissellement de 4,24 hm³.

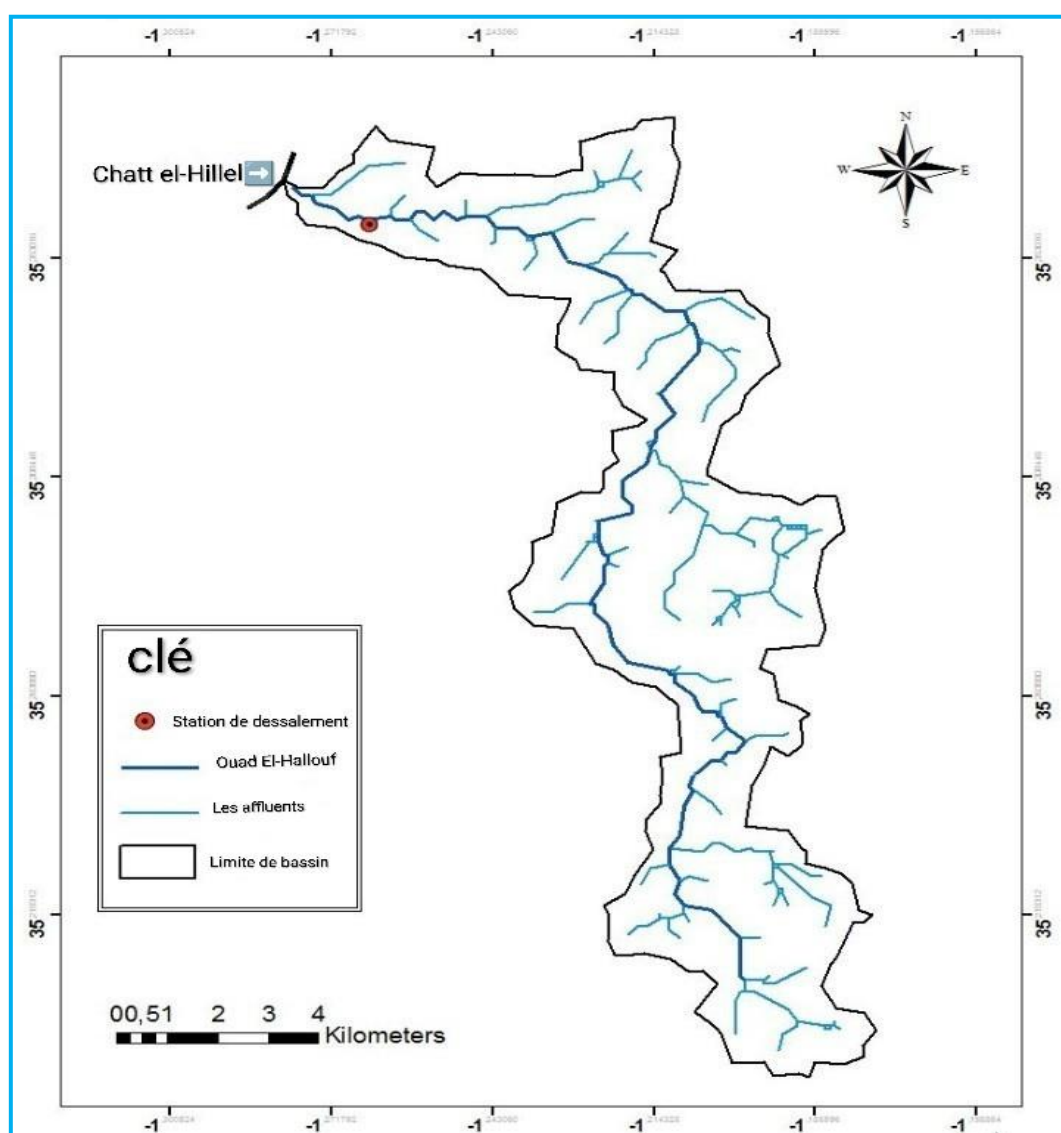


Figure 37: Bassin versant d'Oued El-Hallouf



Figure 38: Exutoire de Oued El Hallouf

4. Climat de la région de Chatt El-Hilal

4.1 Saisonnalité et régime climatique

- *La saison pluvieuse* : Elle est relativement longue et s'étale sur **7 mois** (d'octobre à avril).
- *La saison sèche* : Elle dure **5 mois** (de mai à septembre), caractérisée par un manque crucial de précipitations.

4.2 Régime pluviométrique

- *Cumul annuel moyen* : Il est de **300 mm**, ce qui classe cette zone côtière dans un climat semi-aride.
- *Le mois le plus arrosé* : C'est le mois de **janvier** avec un pic de **49 mm**
- *Le mois le plus sec* : C'est le mois de **juillet** où les précipitations sont quasi nulles, atteignant à peine **1 mm**

4.3 Températures

- *Variabilité thermique* : La température moyenne mensuelle fluctue dans une fourchette modérée allant de 13 °C (durant la période la plus fraîche) jusqu'à 25 °C au mois d'**août** (le mois le plus chaud).

4.4 Humidité Atmosphérique

- *Taux d'humidité* : L'atmosphère est **très humide tout au long de l'année** en raison de l'influence maritime (zone côtière).
- *Fluctuation et moyenne* : Le taux varie entre 72 % et 76 %, avec une moyenne annuelle stable de 73,4 %.

5. Précipitations des cinq dernières années

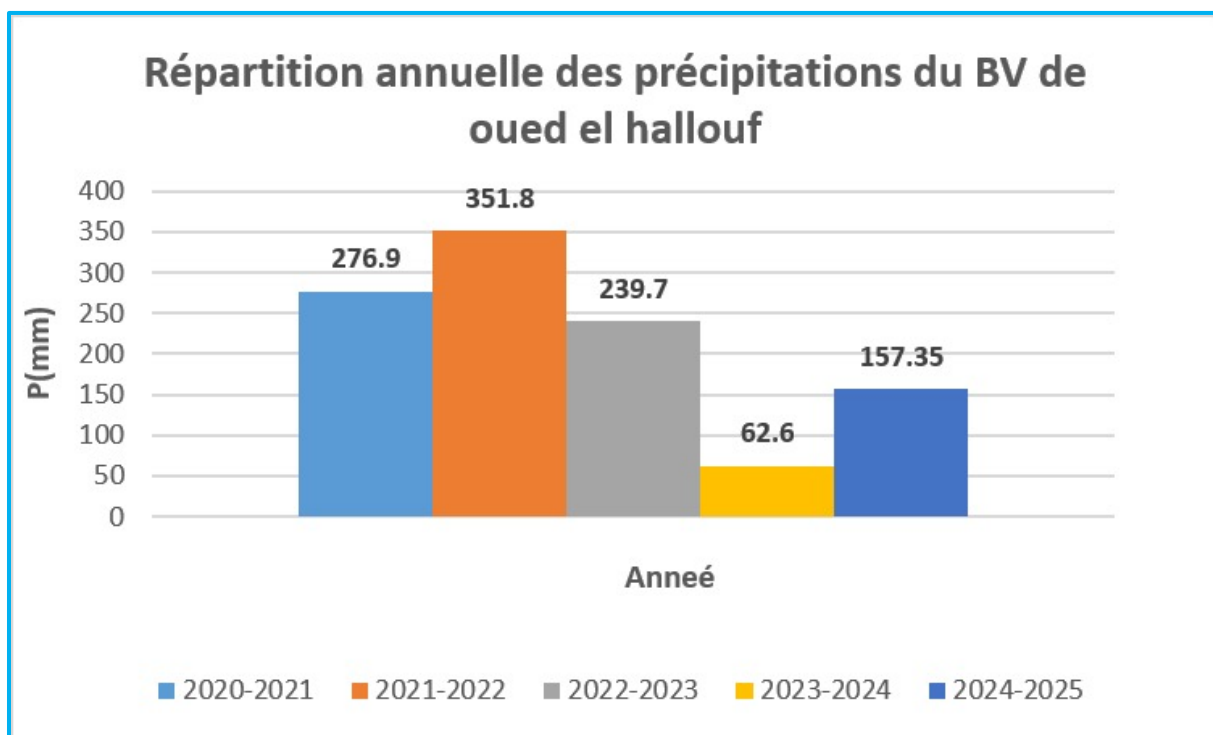


Figure 39: Histogramme représente la différence de précipitations entre les cinq dernières années

➤ Analyse et interprétation du graphique

Le graphique présenté illustre la répartition annuelle des précipitations, exprimées en millimètres (P(mm)), au niveau du bassin versant de l'Oued El Halouf durant la période d'étude allant de l'année hydrologique 2020-2021 à 2024-2025.

L'analyse des données met en évidence une forte variabilité interannuelle des précipitations, caractéristique du climat semi-aride qui domine la région d'étude.

- **Saison 2021-2022 (année humide)** : Cette saison enregistre la pluviométrie la plus élevée de toute la période d'étude avec un total de 351,8 mm. Cette abondance de précipitations favorise l'augmentation du ruissellement de surface et peut engendrer des crues importantes au sein du bassin versant.
- **Saison 2022-2023** : Les précipitations diminuent sensiblement pour atteindre 239,7 mm, traduisant une baisse des apports hydriques par rapport à l'année précédente.
- **Saison 2023-2024 (année sèche)** : Cette période correspond à l'année la plus déficitaire de la série, avec seulement 62,6 mm de précipitations annuelles, témoignant d'un épisode de sécheresse particulièrement marqué.
- **Saison 2024-2025** : Une légère reprise pluviométrique est observée avec un cumul annuel de 157,35 mm. Toutefois, cette valeur demeure inférieure à celles enregistrées durant les années les plus humides de la période étudiée.

❖ Conclusion hydrologique

Les résultats obtenus révèlent une alternance marquée entre des années humides et des années sèches, traduisant l'irrégularité du régime hydrologique du bassin versant de l'Oued El Halouf.

Lors des années fortement arrosées, les précipitations importantes entraînent une augmentation du ruissellement superficiel ainsi qu'un transport accru des matières en suspension et des sédiments vers l'aval. En revanche, les périodes de sécheresse favorisent la dégradation et la fragilisation des sols. Ces derniers deviennent alors plus vulnérables à l'érosion dès les premières pluies de la saison suivante, ce qui peut provoquer une augmentation significative de la turbidité des eaux et du transport solide au sein du bassin versant.

6. La relation entre la précipitation et la turbidité

Année 2024

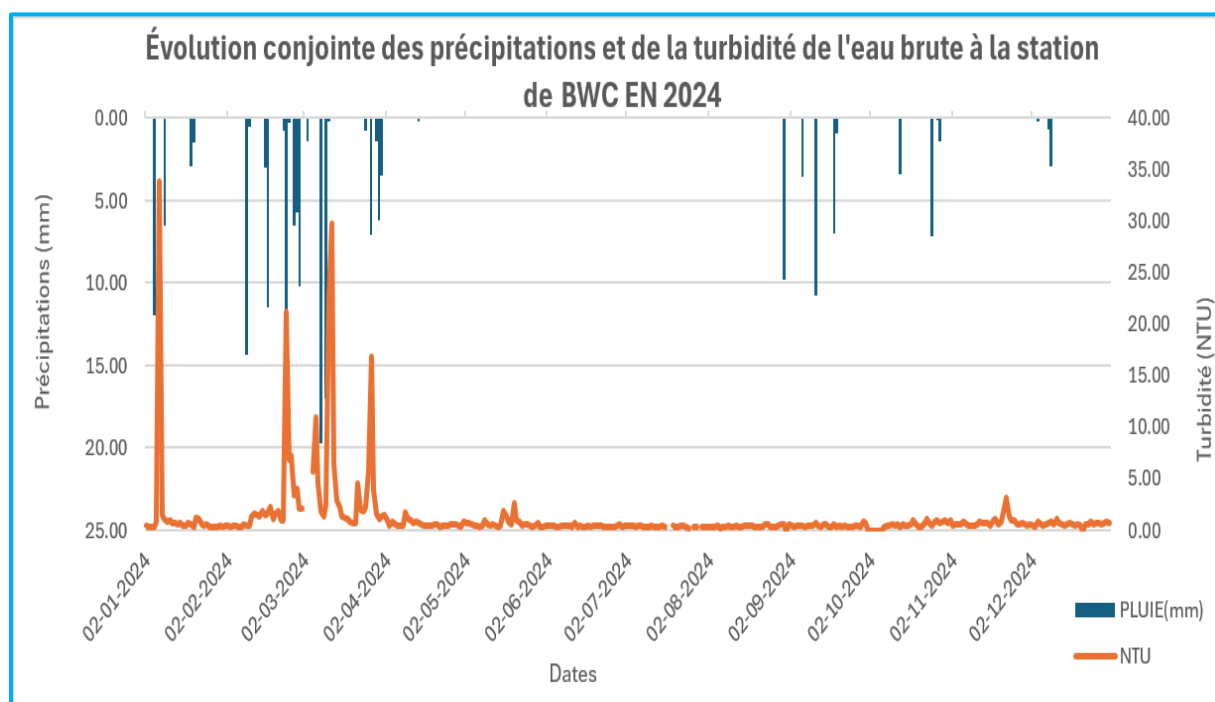


Figure 40: Graphique de l'évolution conjointe des précipitations et de la turbidité de l'eau brute à la station de BWC EN 2024

➤ Analyse

Le graphique représente une étude transversale biaxiale reliant les changements temporels des précipitations, estimés en millimètres, et leur impact direct sur l'indice de turbidité de l'eau de mer brute (estimé en NTU) au niveau de la prise d'eau de Chott El Hilal, appartenant à la Beni Saf Water Company (BWC), au cours de l'année 2024.

- Phase 1 (janvier à avril) :

La région a connu une importante instabilité hydrologique, avec des précipitations abondantes, comme l'illustre l'axe inversé en haut du graphique. Ces précipitations ont entraîné des hausses immédiates et marquées de la courbe de turbidité. La turbidité a atteint son pic annuel (pic absolu) début janvier, approchant les 37 NTU de turbidité (NTU), suite à des précipitations estimées à 12 MM. Après ce pic initial, des hausses successives ont été observées en mars et avril, avec des valeurs comprises entre 10 et 23 NTU, correspondant à des cumuls de précipitations de 15 à 20 MM.

- Phase 2 (mai à décembre) :

Cette phase est caractérisée par la stabilité et l'équilibre complet du système hydrologique, avec des niveaux de turbidité atteignant leurs limites minimales acceptables et se stabilisant en dessous du seuil de 2 NTU de turbidité. Ce calme remarquable dans l'eau non traitée est directement lié à la quasi-absence de précipitations durant l'été et l'automne. Il est à noter que les faibles précipitations observées en fin d'année ont eu un impact négligeable sur la clarté de l'eau.

Année 2025

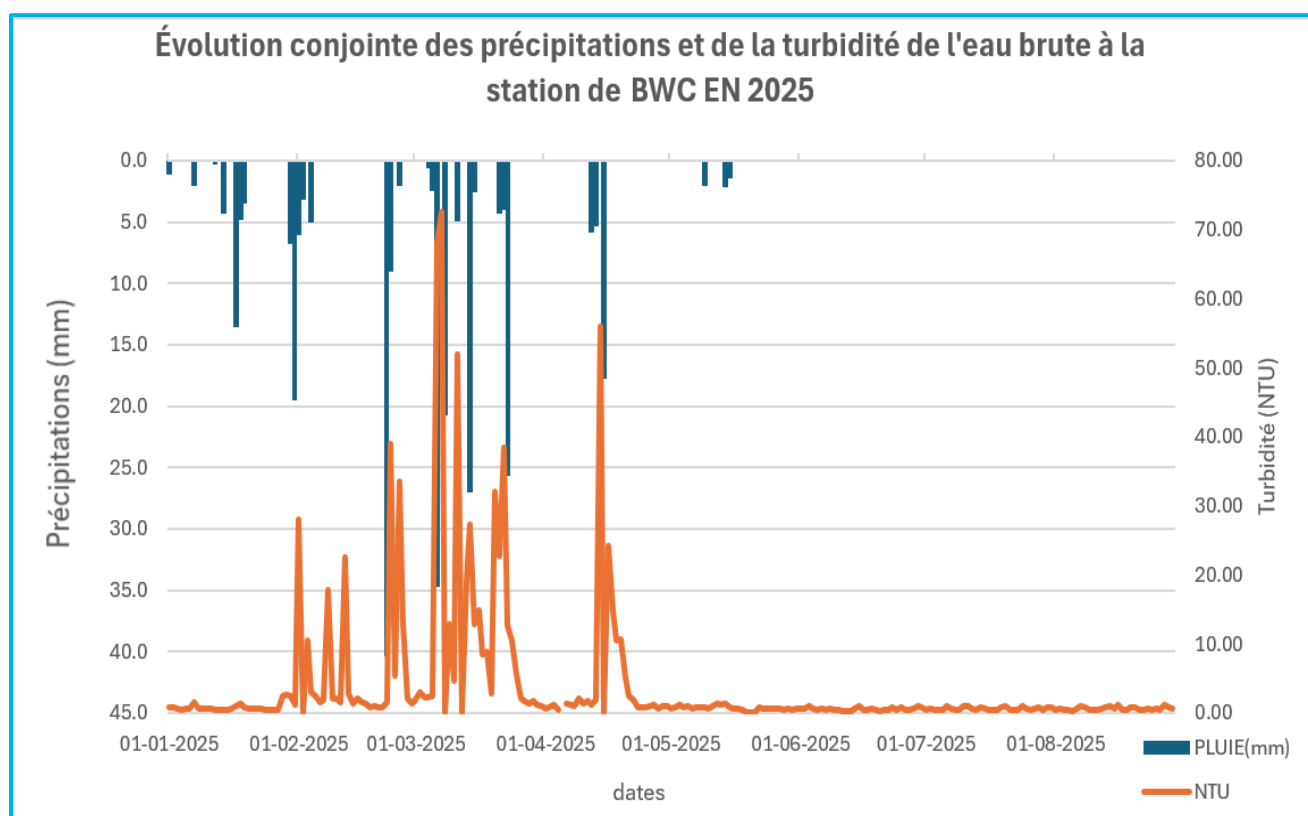


Figure 41: Graphique de l'évolution conjointe des précipitations et de la turbidité de l'eau brute à la station de BWC EN 2025

➤ Analyse

Le graphique représente une étude transversale biaxiale reliant les changements temporels des précipitations, estimés en millimètres, et leur impact direct sur l'indice de turbidité de l'eau de mer brute (estimé en NTU) au niveau de la prise d'eau de Chott El Hilal, appartenant à la Beni Saf Water Company (BWC), au cours de l'année 2025.

- Phase 1 (janvier à avril)

Durant les quatre premiers mois de l'année, on a noté plusieurs séries de précipitations, une intensification se faisant particulièrement sentir en février, mars et avril. Au cours de cette période, la turbidité de l'eau non traitée subit d'importantes variations et dépasse les 70 NTU en mars.

L'accroissement de la turbidité est fondamentalement attribué au ruissellement des eaux pluviales, qui transporte des sédiments, des substances suspendues et divers minéraux fins vers les zones marines. Les hausses de turbidité observées sont souvent en corrélation avec les épisodes de pluies les plus intenses, soulignant par conséquent l'impact direct des précipitations sur la qualité de l'eau brute recueillie.

- Phase 2 (mai à août)

Dès mai, les précipitations tendent à devenir minimales, voire nulles. Ainsi, la turbidité baisse progressivement avant de se stabiliser à des niveaux extrêmement bas et quasi nuls durant l'ensemble de la période estivale.

Cette constance est due à l'absence de ruissellement conséquent et donc à une diminution des apports de particules en suspension vers la zone de collecte. Des conditions marines plus paisibles favorisent aussi la décantation naturelle des particules, améliorant ainsi la qualité de l'eau brute à dessaler.

7. Résultat générale

Les résultats mettent en évidence une relation directe entre les précipitations et la turbidité de l'eau brute à la station de dessalement BWC. Les épisodes pluvieux entraînent une augmentation significative de la turbidité en raison du ruissellement des eaux de pluie qui transportent vers la mer d'importantes quantités de sédiments, de particules fines et de matières en suspension provenant principalement du bassin versant de l'Oued El Halouf.

Les pics de turbidité observés coïncident généralement avec les périodes de fortes précipitations, ce qui confirme l'influence des crues sur la qualité de l'eau brute captée par la station. En revanche, durant les périodes sèches, l'absence de ruissellement se traduit par une turbidité faible et relativement stable.

Cette dégradation temporaire de la qualité de l'eau brute peut affecter le fonctionnement de la station de dessalement en augmentant la charge sur les unités de prétraitement, le risque de colmatage des filtres et des membranes, ainsi que la fréquence des opérations de nettoyage.

Lors des épisodes de crues les plus intenses, lorsque la turbidité atteint des valeurs très élevées, la station peut être contrainte de réduire sa capacité de production ou même d'interrompre temporairement son fonctionnement afin de protéger les équipements et de préserver les performances du procédé de dessalement. Ainsi, les événements pluvieux extrêmes constituent un facteur majeur de perturbation du régime de fonctionnement de la station BWC.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude hydrologique du bassin de l'oued El Halouf a été présentée à travers l'analyse des caractéristiques de l'oued et du climat dominant dans la région, ainsi que l'étude de la répartition annuelle des précipitations. Cette analyse a permis une meilleure compréhension du comportement du bassin et de sa réponse aux variations climatiques, notamment durant les périodes pluvieuses.

Par ailleurs, l'étude a mis en évidence l'existence d'une relation claire entre les précipitations et la turbidité, où l'augmentation des quantités de pluie entraîne une intensification du ruissellement de surface et l'entraînement des sédiments vers le lit de l'oued, ce qui provoque une hausse des valeurs de turbidité au niveau du point de prélèvement d'eau de l'usine de dessalement de Béni Saf. Cette augmentation se répercute directement sur le fonctionnement de la station, en entraînant des difficultés au niveau du traitement primaire et pouvant conduire à des arrêts temporaires durant les périodes pluvieuses.

Ainsi, afin d'améliorer la performance de l'usine de dessalement et de garantir la continuité de son fonctionnement, un ensemble de solutions et de recommandations sera proposé dans le chapitre suivant, visant à réduire l'impact de la forte turbidité et à améliorer la gestion des ressources en eau brute.



Chapitre V

Solutions et recommandations

Introduction

S'appuyant sur les indicateurs et les données analysés dans les chapitres précédents, qui ont révélé des perturbations et des arrêts de production au niveau des stations en raison de niveaux élevés de turbidité et de ruissellement, ce chapitre présente des solutions approuvées, réparties en trois niveaux :

- Niveau du bassin versant
- Niveau de la prise d'eau
- Niveau du prétraitement.

Ces propositions visent à améliorer la continuité d'exploitation, à réduire les temps d'arrêt et à optimiser l'efficacité du système face à l'évolution des conditions hydrologiques.

1. Protection et aménagement au niveau du sous-bassin de Oued El Hallouf

1.1 Restauration de la végétation et reforestation

Le couvert végétal est l'une des solutions naturelles les plus performantes pour maîtriser les inondations, car il permet de :

- Encourager l'infiltration des eaux de pluie dans le sol
- Ralentir l'écoulement superficiel
- Fixer les sols et protection des berges contre l'érosion
- Réduire le volume de sédiments transportés vers les oueds et les barrages.

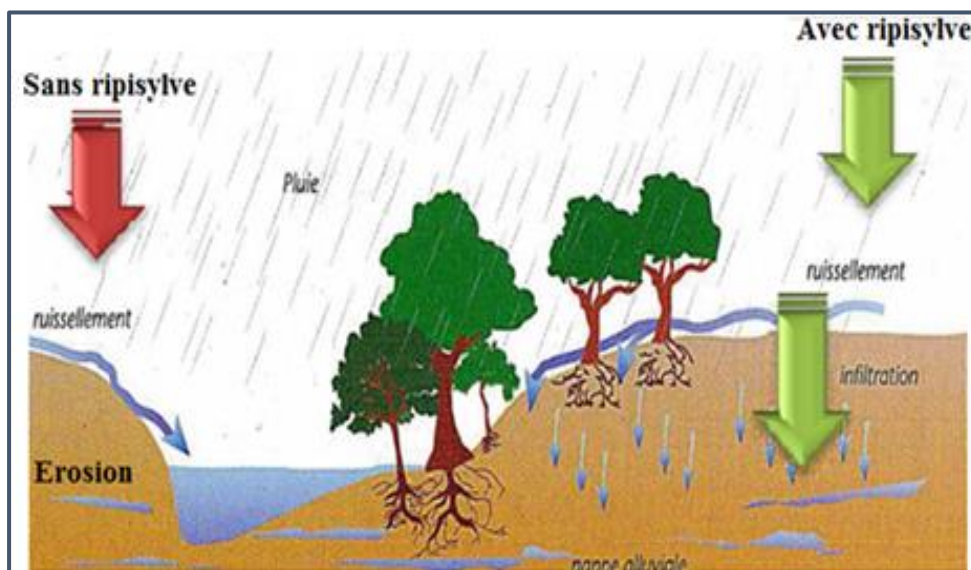


Figure 42: La végétation (ripisylve) protège contre l'érosion. [18]

Cette action inclut :

- La mise en place d'arbres appropriés au climat de la région
- La restauration des zones dégradées
- La sauvegarde des forêts face aux incendies et au surpâturage.

1.2 Réalisation de petites structures hydrauliques (seuils et banquettes)

Les petites infrastructures hydrauliques mises en place dans les talwegs et les pentes permettent de :

- Ralentir le flux des eaux de crue
- Retenir les dépôts et les matières solides
- Diminuer l'érosion hydraulique.

Parmi ces ouvrages :

- les seuils en pierre
- les digues en terre
- les banquettes agricoles.



Figure 44: Succession de seuils en pierres sèches (irma)

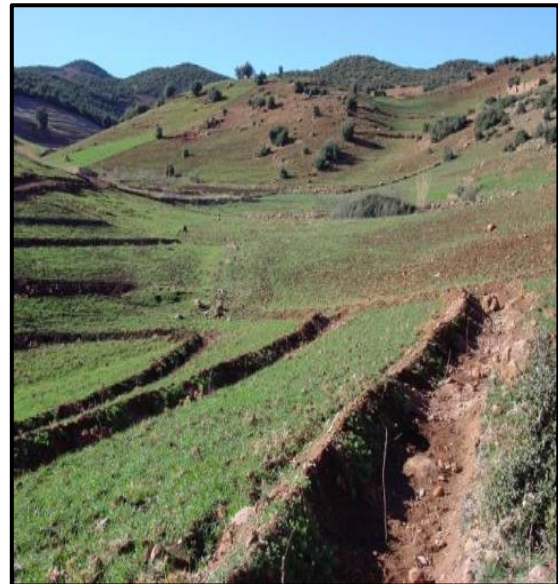


Figure 43: La banquette antiérosive[19]

1.3 Aménagement des lits d'oueds

Cette disposition implique :

- Nettoyer les oueds de leurs détritits et accumulations
- Eliminer les entraves perturbant l'écoulement naturel
- Renforcer les berges en utilisant des protections en pierre ou en béton pour prévenir leur dégradation

Ces actions favorisent l'élimination des eaux de crue et réduisent les débordements.

1.4 Création de bassins de rétention pour les eaux de pluie.

Les bassins de retenue sont utilisés pour :

- Conserver temporairement une partie des eaux de crue
- Minimiser le débit maximal (pic des crues)
- Préserver les structures situées en aval.

Ils protègent aussi la possibilité de réutiliser l'eau pour l'irrigation ou pour la recharge des nappes phréatiques.

1.5 Barrage écrêter

Les barrages écrêter sont implantés en travers du thalweg et ont pour objet de stocker temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau, de façon à diminuer le débit de pointe de la crue en aval.

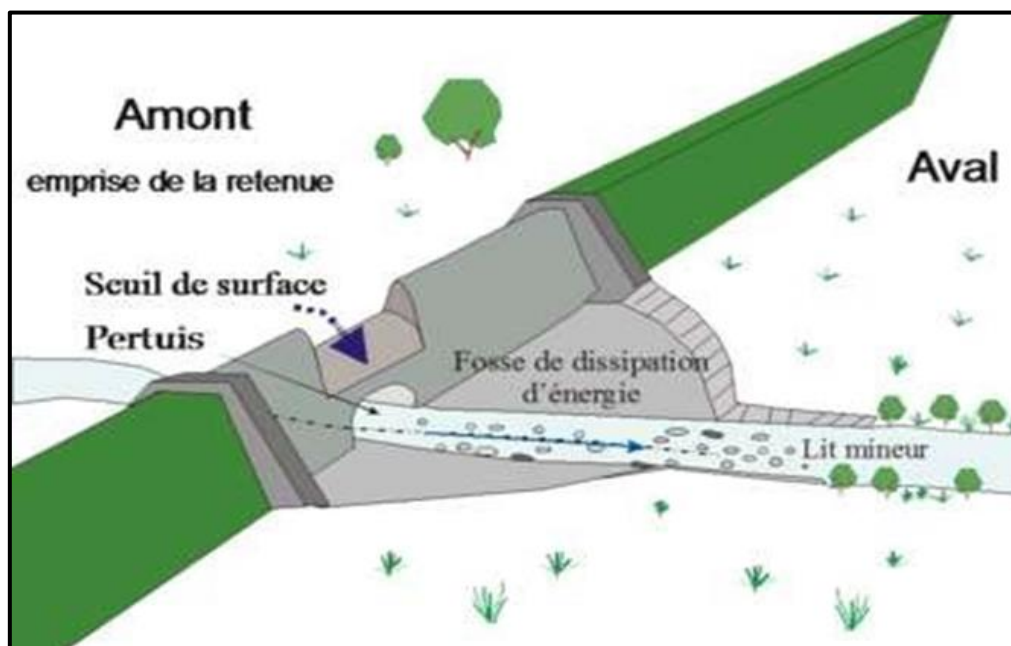


Figure 45: Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêter de crue[20]

Lorsque la capacité du pertuis est saturée, la retenue se remplit progressivement, ce qui permet de stocker temporairement une partie du volume de la crue ; le débit en aval augmente peu en fonction de la montée du niveau dans le réservoir (écoulement en charge) ; en fin de crue, le volume temporairement stocké dans la retenue se vide naturellement par le pertuis ; l'ouvrage écrête fortement les crues moyennes à rares.

En cas de très forte crue, lorsque la retenue est pleine, le déversoir de sécurité entre en fonction pour évacuer la différence entre le débit entrant dans la retenue et le débit transitant dans le pertuis (avec un effet complémentaire de laminage dans la tranche supérieure de la retenue) ; l'ouvrage perd de son efficacité pour les crues rares à exceptionnelles.

1.6 Contrôle de l'urbanisation

Il est essentiel d'interdire les constructions en zones inondables, car une urbanisation incontrôlée conduit à :

- Une augmentation du ruissellement superficiel
- Une réduction de l'infiltration des eaux
- Une intensification des risques humains et matériels.

1.7 Création d'une digue de protection ou brise-lames spécifique

Étudier la possibilité de placer une digue déflectrice autour de l'exutoire de l'Oued El Halouf, afin que cette barrière modifie le cours des courants d'eau chargés de boue apportés par la vallée loin de la prise d'eau.

- Localisation : Construction d'une digue rocheuse (jetée de déviation) partant du rivage à proximité de l'exutoire de l'Oued El Halouf et s'étendant vers le large.
- Orientation : La digue doit être implantée selon un angle permettant de dévier les courants chargés en sédiments et en matières en suspension loin du tracé des conduites reliant la prise d'eau au Tour de captage, afin de limiter l'ensablement et l'augmentation de la turbidité au niveau du système de captage.



Figure 46: Positionnement du brise-lame sur la plage de El Hillel

1.8 Système d'alerte précoce

L'installation de dispositifs de surveillance intelligents au niveau de l'oued El Halouf ou d'oueds voisins, comme l'oued Sidi Djelloul, alimente un système d'alerte précoce. Ce système permet à la station de gestion des eaux (BWC) d'être informée de l'approche d'une crue plusieurs heures à l'avance, lui laissant ainsi le temps de prendre les mesures et précautions nécessaires.

2. Au niveau du point de prise d'eau

2.1 modification sur la conduite d'aspiration

- *Augmentation de la longueur de la conduite d'aspiration* : À la station de Chatt El Hillel , le point de captage d'eau se situe à 1 kilomètre. Si l'on allonge la conduite de captage de 1 300 mètres par exemple, on peut contourner la zone dangereuse (zone à forte turbidité et à forte concentration de boues). Schéma présenté les plusieurs points d'aspiration
- *Installez plusieurs points d'aspiration* : par exemple trois conduites d'aspiration. Si l'un des conduites se bouche, il se fermera automatiquement et l'un des autres prendra le relais.



Figure 48: Schéma d'augmentation de la longueur de la conduite d'aspiration



Figure 47: Schéma présenté les plusieurs points d'aspiration

2.2 Installation de bassins de décantation

Les bassins de décantation ont pour fonction de : Schéma d'augmentation de la longueur de la conduite d'aspiration Schéma présenté les plusieurs points d'aspiration

- Réduire la vitesse de l'eau avant son entrée dans la station
- La facilité de la sédimentation des particules plus lourdes
- Diminuer la charge en matières en suspension.

Cette approche améliore la qualité de l'eau brute et réduit les risques de colmatage.

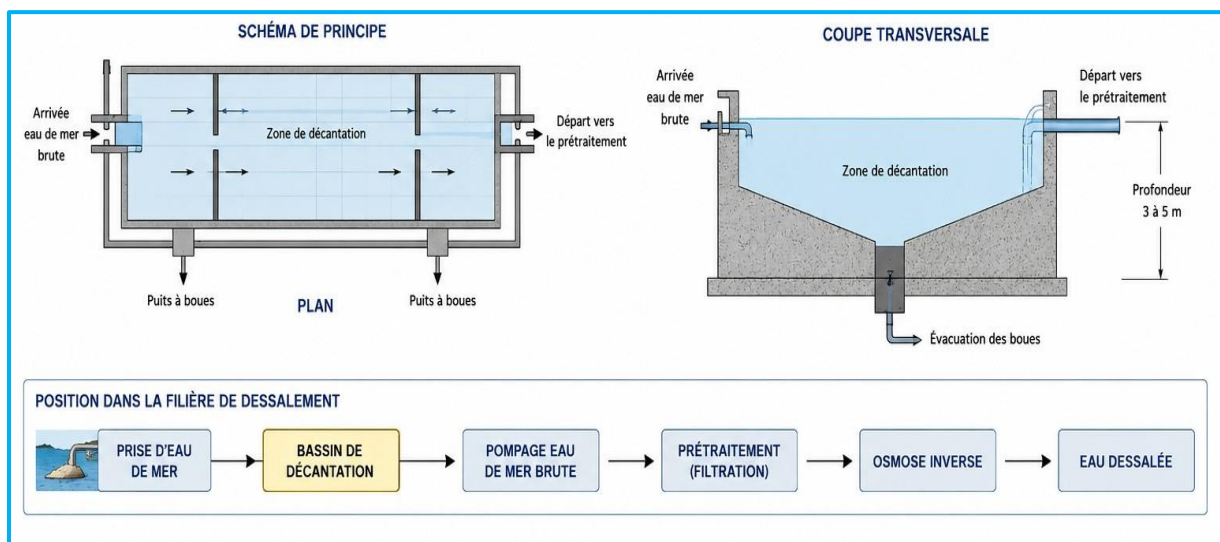


Figure 49: Bassin de décantation

2.3 Adoption d'un système de prise d'eau indirect par puits côtier

Elle est considérée comme l'une des solutions mondiales courantes aux problèmes de turbidité causés par les inondations dans les usines de dessalement.

Le puits est creusé sur le rivage ou à proximité de la terre ferme afin que l'eau pénètre dans le puits par infiltration naturelle de l'eau de mer à travers les couches de sable et de roches poreuses situées sous le fond marin.

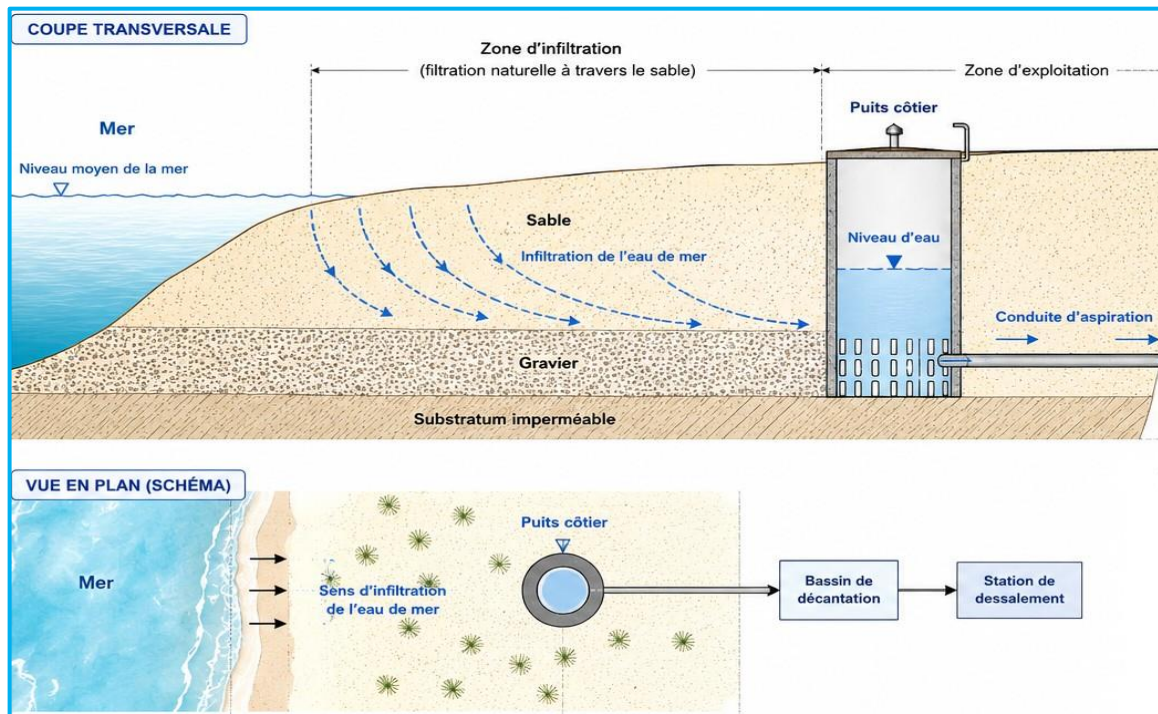


Figure 50: Fonctionnement d'un puits côtier

3. Au niveau de la station / prétraitement : Stratégie de "Protection opérationnelle "

Si la turbidité atteint le système de prétraitement, elle atteint la dernière ligne de défense protégeant les membranes d'osmose inverse ; par conséquent, le système de prétraitement doit être amélioré par :

3.1 Gestion des lavages des filtres (Backwashing)

Réduisez les temps de fonctionnement entre les laveurs de filtres à sable pendant les crues et optimisez-les avec une étape de lavage à l'air pour décomposer plus rapidement les boues accumulées.

3.2 Réduction de la pression opérationnelle

En raison de la diminution de la salinité de l'eau de mer pendant les périodes de crue (et donc de la diminution de la pression osmotique requise), la pression des pompes haute pression doit être réduite par des variateurs de vitesse afin d'éviter une pression excessive qui pourrait déchirer les membranes ou provoquer une condensation excessive.

3.3 Intensification du protocole de lavage chimique CIP pour les membranes

Il en résulte une durée de vie plus longue de la membrane et des coûts de remplacement réduits. L'intensification du CIP ne se limite pas à augmenter la concentration chimique, mais repose sur une optimisation intelligente :

- **Le contrôle dynamique de la température :** Augmenter la température de la solution de lavage au maximum toléré (40-50 °C) pour accélérer les réactions chimiques et éliminer rapidement le colmatage (*Fouling*).
- **L'équilibre entre acides et bases :** Utiliser d'abord une base exemple: NaOH pour éliminer les matières organiques et les protéines, puis un acide comme l'acide nitrique ou citrique pour éliminer les dépôts minéraux et les sels.
- **L'optimisation du débit et de la pression (*Hydrodynamique*) :** Augmenter le débit pour créer des forces de cisaillement qui décollent les impuretés.

- **L'introduction d'enzymes ou d'adjuvants :** Utiliser des détergents enzymatiques qui dégradent les liaisons biologiques complexes (*Biofilms*) que les produits chimiques ordinaires ne parviennent pas à éliminer.

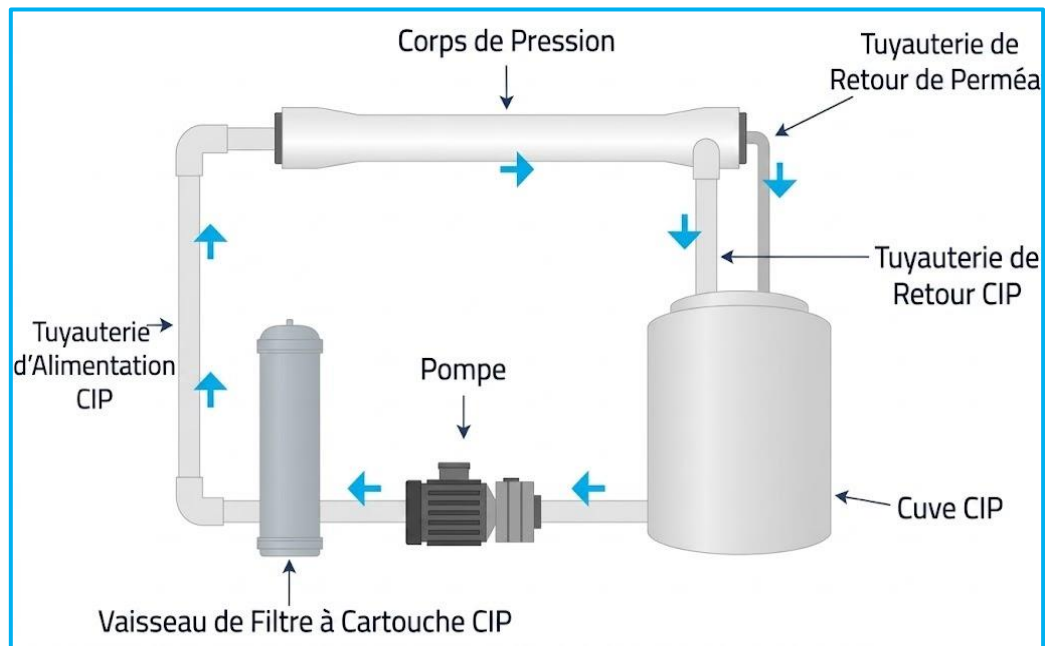


Figure 51: Protocole de lavage chimique CIP [21]

3.4 Placer les dispositifs de mesure les paramètre de l'eau brute au point de captage

- Un appareil automatique qui mesure le degré de turbidité, relié à des ordinateurs pour ajuster immédiatement les doses de coagulant (tel que FeCl_3) et de polymère en fonction du degré de turbidité.
- Un appareil mesurant la salinité est également relié à des ordinateurs pour ajuster la pression, de sorte que lorsque la salinité augmente, la pression osmotique augmente et vice versa.

3.5 Programmation intelligente des arrêts de maintenance

Il est recommandé de mettre en place une stratégie de maintenance préventive en coordination avec la Direction de la Distribution et l'Algérienne des Eaux (ADE), afin d'optimiser les périodes d'arrêt programmées. En cas d'émission d'un Bulletin Météorologique Spécial (BMS) annonçant de fortes précipitations et un risque élevé de crue, les opérations de maintenance prévues peuvent être avancées ou reprogrammées pour coïncider avec ces épisodes. Cette approche permet de réaliser les interventions de maintenance durant une

période où la qualité de l'eau brute est déjà fortement dégradée par l'augmentation de la turbidité, tout en évitant les arrêts imprévus et en améliorant la continuité ainsi que l'efficacité de l'exploitation de la station.

Conclusion générale

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau conventionnelles et à l'augmentation continue des besoins en eau potable, le dessalement de l'eau de mer s'impose aujourd'hui comme une solution stratégique pour garantir la sécurité hydrique, en particulier dans les régions côtières. Toutefois, l'efficacité et la pérennité des installations de dessalement demeurent fortement tributaires de la qualité de l'eau brute ainsi que des conditions hydrologiques du milieu récepteur.

Le présent travail a porté sur l'analyse des répercussions des crues sur le régime de fonctionnement et l'efficacité du procédé de dessalement au niveau de la station de Chatt El Hillel (BWC). L'étude bibliographique réalisée a permis de présenter les principales techniques de dessalement ainsi que les différents systèmes de prise d'eau, tout en soulignant l'importance des étapes de prétraitement dans la protection des installations et l'optimisation des performances du procédé.

L'évaluation des performances de la station a mis en évidence le rôle déterminant de la qualité de l'eau brute dans le bon fonctionnement des unités de traitement. Les fortes variations de turbidité observées lors des épisodes pluvieux influencent directement l'efficacité du prétraitement et favorisent le colmatage des filtres et des membranes d'osmose inverse, entraînant ainsi une augmentation des besoins en maintenance et des coûts d'exploitation.

L'étude hydrologique de la région de Chatt El Hillel et du bassin versant de l'Oued El Halouf a permis de démontrer l'existence d'une relation étroite entre les précipitations, les crues et l'augmentation de la turbidité des eaux captées. Les épisodes de fortes pluies génèrent un ruissellement important qui transporte vers le littoral des quantités considérables de sédiments et de matières en suspension, provoquant une dégradation temporaire de la qualité de l'eau brute.

Les résultats obtenus montrent que les périodes de crue coïncident généralement avec les valeurs les plus élevées de turbidité. Cette situation représente une contrainte majeure pour l'exploitation de la station, puisque les systèmes de prétraitement peuvent atteindre leurs limites de fonctionnement. Dans les cas les plus critiques, lorsque la turbidité dépasse les seuils admissibles, la station peut être amenée à réduire sa capacité de production ou à interrompre temporairement son fonctionnement afin de préserver les équipements et de garantir la sécurité du procédé de dessalement.

Conclusion générale

Afin d'atténuer les impacts des crues sur la station, plusieurs solutions techniques ont été proposées, notamment la mise en place d'ouvrages de protection à proximité de l'embouchure de l'Oued El Halouf, l'installation de bassins de décantation pour limiter l'apport des matières en suspension vers la prise d'eau ainsi que l'amélioration des systèmes de prétraitement. Ces mesures contribueraient à renforcer la résilience de la station face aux événements hydrologiques extrêmes et à assurer une meilleure continuité de la production.

En définitive, cette étude met en évidence l'importance de la prise en compte des facteurs hydrologiques dans la gestion et l'exploitation des stations de dessalement. Elle montre que la compréhension des mécanismes de transport des sédiments et de leur impact sur la qualité de l'eau brute constitue un élément essentiel pour améliorer les performances des installations, réduire les risques d'arrêt et garantir une production durable, fiable et sécurisée de l'eau potable.

Bibliothèque

- [1] C. Le Guern, P. Lacassagne, Y. Noel, F. Persin et L. De Buysscher. «Dessalement et recharge artificielle : synthèse techno-économique ». Rapport BRGM/RP-52262-FR.2003. p. 10.
- [2] BOUKHALKHAL. Etude des systèmes de dessalement et de récupérations de l'énergie dessalement 2021.2022
- [3] BENMANSOURI. Les Stations De Dessalement En Algérie : État Des Lieux & Approche 2024-2025
- [4] Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes.TATA-DUCRU
- [5] Alain Maurel, « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et d'autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce », 2006,2ème édition.
- [6] Dr H. Betatache ENSH Dessalement des eaux usées et saumâtres
- [7] Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons
- [8] M^r. Dekali Abdelghani et M^r. Delhoum Ayoub. Etude de la performance d'une station de dessalement de l'eau de mer(cas de la station de Beni saf wilaya de Ain Temouchent) 2021
- [9] A.D. Khawajia, I.K. Kutub khanaha, J-M. Wieb,(2008) « Advances in sea water desalination technologies, Desalination » , 221 P47–69.
- [10] P. Danis.(2003) « Dessalement de l'eau de mer. » Techniques de l'Ingénieur, J 2700. Juin 2003.P2 P3, PDF consulté le 12/01/2016
- [11] HAMITI Omar (2010) : « L'influence des paramètres physico-chimique sur la performance de la station de dessalement de GHAZAOUET »
- [12] LIVRE Dessalement de l'eau de mer JM Rovel - 2010 - perso.ens-lyon.fr
- [13] DANIS P, « Dessalement de l'eau de mer», 2003, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés.
- [14] Drouiche, N., Ghaffour, N., & Lounici, H. (2022). Water scarcity and desalination in Algeria: Status and challenges. *Desalination and Water Treatment*, 262, 203–214.

- [15] MORSLI Mebarka Soumia ; « Impact des Arrêts Techniques de L'usine de Dessalement de L'eau de Mer sur L'entreprise et L'environnement»
- [16] Revue des aspects maritimes du dessalement d'eau de mer .Jean BOUGIS 1
- [17] BENSLIMANE. N et AMIROUCHE. M «Dimensionnement de la prise d'eau de mer de la station de dessalement d'El Marsa, wilaya d'Alger»
- [18] https://wiklimat.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:GEMAPI : Les fonctions_de_la_ripisylve
- [19] openedition journals La banquette antiérosive fruitière dans le moyen atlas marocain : le projet Khénifra
- [20] BERHAIL Sabri | Préservation et protection contre les crues et inondations | Centre Universitaire de Mila | 2021
- [21] <https://cm.com/fr/cip-process-for-ro-systems/#:~:text=BLOG-,Directives%20techniques%20de%20nettoyage%20chimique%20RO%20CIP%20pour%20les%20syst%C3%A8mes%20d%27osmose%20inverse,-26%20mars>
- [22] <https://www.simpec.it/fr/installations-a-membrane-osmose-inverse-ultrafiltration-mbr/>
- [23] https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/25766/1/GUENOUI%20Mostafa%26ZAOUI%20Aissa_compressed.pdf
- [24] <https://uae.fr/glossaire/osmose-inverse/>