الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique publique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université –Ain – Temouchent –Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'hydraulique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Filière : hydraulique

Spécialité : hydraulique urbaine

Thème

Etude comparative des stations de dessalement d'eau de mer dans l'ouest algérien

Présenté Par :

- Hammoudi Abla

Devant le jury composé de :

président : Mme Derrar .k

Examinateur : Dr . Bentahar .k

Encadreur: Dr. Nehari.A

Co encadrante :Mostefaoui .l

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à l'ensemble du personnel de la Direction de l'Hydraulique, pour leur accueil, leur disponibilité, leur bienveillance et leur collaboration durant toute la période de mon stage.

J'exprime également mes vifs remerciements à mes encadreurs, M. NEHARI ABDRAHMANE et Mme MOSTEFOUI LEILA, pour leur accompagnement, leurs orientations, leurs conseils et leurs remarques constructives, qui ont largement contribué à l'enrichissement de mes connaissances et à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique, pour la qualité de la formation dispensée, ainsi que pour leurs conseils et leurs encouragements tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leur aide, leur soutien et leurs encouragements.

À toutes et à tous, je vous adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mon cher mari **Mouad Hachem**, pour son amour, sa patience, son soutien et ses encouragements tout au long de mon parcours.

À ma chère fille **Zahrat Anfel**, ma source de bonheur, de motivation et de fierté.

À mes chers parents, mon **père Saïd** et ma **mère Djamila**, pour leur amour, leurs sacrifices, leurs prières et leur soutien inconditionnel.

À mes chères sœurs Asma et **Amria**, pour leur affection, leur soutien et leur présence à mes côtés.

À mon cher frère **Badji**, pour son soutien et son affection.

À mes chers neveux et nièces **Raïd**, **Djwed**, **Miral** et **Kanzi**, pour les moments de joie et de bonheur qu'ils apportent à ma vie.

À ma chère belle-famille, pour leur affection, leur soutien, leur bienveillance et leurs encouragements.

À mon encadreur **Dr. Nehari Abderrahmane**, pour ses conseils, son accompagnement et ses orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire.

À ma co-encadreuse **Mme Mastfoui Leila**, pour son aide, sa disponibilité et ses précieux conseils.

Résumé

Le dessalement de l'eau de mer constitue une solution importante face à l'augmentation des besoins en eau potable et aux contraintes liées à la disponibilité des ressources hydriques en Algérie. Cette étude porte sur une analyse comparative de trois stations de dessalement situées dans l'Ouest algérien : **Cap Blanc, Béni Saf et Honaïne**. Elle présente d'abord les principales caractéristiques de l'eau de mer et les principes généraux du dessalement, ainsi que les différents procédés utilisés, notamment la **distillation thermique**, l'**électrodialyse** et l'**osmose inverse**.

L'étude s'intéresse ensuite aux caractéristiques techniques et fonctionnelles des trois stations sélectionnées, en considérant leur **localisation, leur capacité de production, leur technologie de dessalement, leur fonctionnement et leurs performances**. La station de Béni Saf et la station de Honaïne disposent notamment d'une capacité de production de 200 000 m³/jour, tandis que la station de Cap Blanc présente une capacité supérieure. L'analyse comparative permet de mettre en évidence les principales différences entre ces infrastructures et leur contribution à la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable dans l'Ouest algérien.

Le dernier chapitre est consacré au **rapport de stage réalisé au niveau de la station de dessalement de Honaïne**. Il présente l'organisme et le lieu d'accueil, les objectifs du stage ainsi que le déroulement des activités. Une attention particulière est accordée au procédé de dessalement, depuis le **captage de l'eau de mer**, le **prétraitement et la filtration**, jusqu'à l'**osmose inverse**, puis aux étapes de **post-traitement, stockage et distribution**. Le fonctionnement des principaux équipements, notamment les filtres, les pompes, les membranes et les systèmes de nettoyage, est également présenté. Cette étude permet ainsi de mieux comprendre le fonctionnement des stations de dessalement et leur rôle dans le renforcement de la sécurité hydrique en Algérie.

Mots-clés : dessalement de l'eau de mer ; osmose inverse ; stations de dessalement ; Cap Blanc ; Béni Saf ; Honaïne ; prétraitement ; filtration ; membranes ; eau potable ; sécurité hydrique ; rapport de stage.

Abstract

Seawater desalination represents an important solution to meet the increasing demand for drinking water and to address the constraints related to the availability of water resources in Algeria. This study focuses on a comparative analysis of three desalination plants located in western Algeria: **Cap Blanc, Beni Saf and Honaïne**. It first presents the main characteristics of seawater and the general principles of desalination, as well as the different technologies used, particularly **thermal distillation, electrodialysis and reverse osmosis**.

The study then examines the technical and operational characteristics of the three selected plants, considering their **location, production capacity, desalination technology, operating processes and performance**. The Beni Saf and Honaïne plants have a production capacity of 200,000 m^3/day, while the Cap Blanc plant has a higher production capacity. The comparative analysis highlights the main differences between these infrastructures and their contribution to securing the drinking water supply in western Algeria.

The final chapter is devoted to the **internship report carried out at the Honaïne seawater desalination plant**. It presents the host organization and the internship site, the objectives of the training and its progress. Particular attention is given to the desalination process, from **seawater intake**, **pretreatment and filtration**, to **reverse osmosis**, followed by **post-treatment, storage and distribution**. The operation of the main equipment, including filters, pumps, membranes and cleaning systems, is also presented. This study therefore provides a better understanding of the operation of desalination plants and their role in strengthening **water security in Algeria**.

Keywords: seawater desalination; reverse osmosis; desalination plants; Cap Blanc; Beni Saf; Honaïne; pretreatment; filtration; membranes; drinking water; water security; internship report.

الملخص

يمثل تحلية مياه البحر حلًا مهماً لتلبية الطلب المتزايد على مياه الشرب ومواجهة القيود المرتبطة بتوفر الموارد المائية في الجزائر. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء **دراسة مقارنة لثلاث محطات لتحلية مياه البحر تقع في غرب الجزائر، وهي: محطة كاب بلان، بني صاف وحناين** .وتتناول الدراسة أولًا الخصائص الأساسية لمياه البحر والمبادئ العامة لتحلية المياه، إضافة إلى أهم التقنيات المستخدمة، ولا سيما **التقطير الحراري، والتحليل الكهربائي الغشائي، والتناضح العكسي**.

كما تتطرق الدراسة إلى الخصائص التقنية والتشغيلية للمحطات الثلاث، من حيث **الموقع، وطاقة الإنتاج، وتقنية التحلية، ومراحل التشغيل والأداء** .وتبلغ الطاقة الإنتاجية لمحطتي بني صاف وحناين **200,000 م3/اليوم** لكل منهما، في حين تتميز محطة كاب بلان بطاقة إنتاجية أكبر. وقد سمحت المقارنة بإبراز أهم الاختلافات بين هذه المنشآت ودورها في تعزيز تأمين التزويد بمياه الشرب في غرب الجزائر.

ويخصص الفصل الأخير لـ **تقرير التربص المنجز بمحطة تحلية مياه البحر بحناين،** حيث تم عرض المؤسسة المستقبلة وموقع التربص، وأهداف التكوين ومراحل إنجازه. كما تم التركيز على مراحل عملية التحلية، انطلاقاً من **سحب مياه البحر، والمعالجة الأولية والترشيح، ثم التناضح العكسي، يليه ما بعد المعالجة والتخزين والتوزيع** .كما تم تقديم أهم التجهيزات المستعملة، بما في ذلك المرشحات والمضخات والأغشية وأنظمة التنظيف.

وتساهم هذه الدراسة في تعزيز فهم طريقة عمل محطات تحلية مياه البحر ودورها في دعم **الأمن المائي في الجزائر**.

الكلمات المفتاحية :تحلية مياه البحر؛ التناضح العكسي؛ محطات تحلية المياه؛ كاب بلان؛ بني صاف؛ حناين؛ المعالجة الأولية؛ الترشيح؛ الأغشية؛ مياه الشرب؛ الأمن المائي؛ تقرير التربص.

Liste des tableaux

Chapitre I : généralités sur le dessalement de l'eau de mer	
Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients du procédé de dessalement thermique de l'eau de mer	17
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients du procédé de dessalement par membranes	17
Chapitre II : Présentation des stations étudiées	
Tableau II.1 : Principales caractéristiques de la station de Chatt El Hilal.	27
Tableau II.2 : Principales caractéristiques de la station de Cap Blanc	36
Tableau II.3 : Principales caractéristiques de la station de Honaïne	40
chapitre III : méthodologie, résultats et discussions	
Tableau III.1 : Stations retenues pour l'étude comparative	48
Tableau III.2 : Caractéristiques générales des stations étudiées	53
Tableau III.3 : Conception, réalisation et exploitation des stations	54
Tableau III.4 : Production documentée	55
Tableau III.5 : Taux de conversion	55
Tableau III.6 : Consommation énergétique documentée	55
Tableau III.7 : Application de la méthode TOPSIS avec le logiciel « TOPSIS Evaluator – Integrated Desalination Plant Decision Support System	
Tableau III.8 : Critères d'évaluation, types conceptuels et poids attribués pour l'analyse multicritère des stations de dessalement	61
Tableau III.9 : Classement des stations de dessalement selon les coefficients de proximité et les écarts entre les rangs obtenus par l'analyse multicritère	62
Tableau III.10: Comparaison quantitative des écarts	62
Tableau III.11: Synthèse comparative des performances techniques, économiques et énergétiques des stations de dessalement de Cap Blanc, Béni Saf et Honaïne	64

Liste des figures

Chapitre I : généralités sur le dessalement de l'eau de mer	
Figure I.1 : Schéma général d'une installation de dessalement	07
Figure I.2 : Les procédés de dessalement	08
Figure I.3 : principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse	09
Figure I.4 : Schéma de principe d'une unité de distillation à effets multiples (MED)	10
Figure I.5 : Schéma de principe d'une unité de distillation flash multi-étages (MSF)	11
Figure I.6: principe du dessalement par électrodialyse	12
Figure I.7 : Schéma d'une membrane tubulaire	14
Figure I.8 : Structure d'une membrane spiralée	15
Figure I.9 : Représentation d'un module à fibres creuses	16
Chapitre II : Présentation des stations étudiées	
Figure II.1 : site géographique de la SDEM de Béni Saf	25
Figure II.2: les différents collaborateurs de la station BWC	26
Figure II.3 : Vues extérieure et intérieure de la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf, wilaya d'Aïn Témouchent.	27
Figure II.4 : Système de captage de l'eau de mer	28
Figure II.5 : la conduite de captage en période de la construction	28
Figure II.6 : filtres rotatifs	29
Figure II.7 : 11 pompes centrifuges horizontales (Sulzer);	30
Figure II.8 : pompes de pompage et bassin de stockage	30
Figure II.9 : Zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf	32
Figure II.10 : Filtres à cartouches de la SDEM de Béni Saf	33
Figure II.11 : la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf, wilaya d'Aïn	35
Figure II.12 : la station de dessalement de Honaïne – Tlemcen	38
Figure II.13 : Schéma générale de la station de Honaine	39
Figure II.14 : Le captage de l'eau de mer	41
Figure II.15 : Les filtres à sable	42
Figure II.16 : Les filtres à cartouche	44
Figure II.17: L'osmose inverse	44
chapitre III : méthodologie, résultats et discussions	
Figure III.1 : Interface de TOPSIS Evaluator montrant les critères, les poids, les stations et le classement.	60
Figure III.2 : Graphique des coefficients de proximité produit par TOPSIS Evaluator.	63
Figure III.3 : Module cartographique de TOPSIS Evaluator et localisation des stations enregistrées.	65

Liste d’abréviation

ADE : Algérienne des Eaux

AEC : Algerian Energy Company

BWC : Brackish Water Conversion

C : Concentration molaire du soluté (mol/m³)

ED : Électrodialyse

GEIDA : Grupo de Empresas Internacionales de Desalación y Agua

H^+ : Ion hydrogène

I : Nombre d’espèces d’ions constituant le soluté

I_0 : Force ionique de la solution

MENA : Middle East and North Africa (Moyen-Orient et Afrique du Nord)

MED : Multiple Effect Distillation (distillation multi-effet)

MF : Microfiltration

MSF : Multi-Stage Flash (distillation flash multi-étagée)

R : Constante des gaz parfaits (0,082 $L \cdot bar \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)

SDEM : Station de dessalement d’eau de mer

SDI : Silt Density Index (indice de densité des sédiments)

T : Température (K)

UF : Ultrafiltration

Sommaire	
Remercîment	
Dédicace	
Résumé Abstract الملخص	
Tableau de matière	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste d'abréviation	
Introduction	I – iii
Chapitre I : généralités sur le dessalement de l'eau de mer	
Introduction	04
1. Le dessalement en Algérie	04
1.2 Étapes du dessalement de l'eau de mer	05
2. Les principales techniques de dessalement	07
2.1. L'osmose inverse	08
2.2. La distillation thermique	09
2.3. L'électrodialyse	12
3. Le principe de la pression osmotique	13
3.1. Les différents types de membranes d'osmose inverse	13
4. Avantages et inconvénients des techniques de dessalement	16
5. Historique du dessalement en Algérie	18
6. Les stations de dessalement de l'eau de mer existant dans l'Ouest algérien	19
7. Applications du dessalement	20
8. Coûts énergétiques et environnementaux du dessalement	21
9. Cadre réglementaire national du dessalement	22
Conclusion	23
Chapitre II : Présentation des stations étudiées	
Introduction	24
1. Présentation des stations de dessalement de l'Ouest algérien	24
2. Présentation de la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf	25
3. Présentation de la station de dessalement de Cap Blanc – Oran	35
4. Présentation de la station de dessalement de Honaïne – Tlemcen	38
Conclusion	46
chapitre III : méthodologie , résultats et discussions	
Introduction	47
1. Matériels et méthodes	47
1.1. Présentation de la zone d'étude	48
1.2. Méthode de collecte des données	51

1.3. Paramètres retenus pour la comparaison	52
1.4. Méthode de traitement des données	52
2. Résultats	53
2.1. Caractéristiques générales des stations	53
2.2. Paramètre de conception et constructeurs	53
2.3. Résultats relatifs à la capacité de production	54
2.4. Résultats relatifs à la production réelle	55
2.5. Résultats relatifs au taux de conversion	55
2.6. Résultats relatifs à la consommation énergétique	55
3. Discussion	56
3.1. Discussion sur la conception des stations	56
3.2. Discussion sur les constructeurs et les modèles de réalisation	56
3.3. Discussion sur les performances énergétiques	57
3.4. Discussion sur la production	57
4. Limites de l'étude	58
5.RAPPORT D'ANALYSE	58
5.1. Fonctionnement général du programme	59
5.2. Méthode TOPSIS intégrée au logiciel	61
5.3. Résultats obtenus avec TOPSIS Evaluator	62
5.4. Analyse comparative détaillée des trois stations	64
5.5. Composante cartographique et intérêt pour l'aide à la décision	65
5.6. Discussion, limites et conclusions	66
Conclusion	68
Conclusion général	70
Référence bibliographique	71

Introduction

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable au maintien de la vie et au développement des sociétés. Elle intervient dans les besoins domestiques, agricoles, industriels et dans plusieurs autres activités économiques. Cependant, la disponibilité des ressources en eau douce reste limitée et inégalement répartie à l'échelle mondiale. Cette situation devient plus préoccupante sous l'effet de la croissance démographique, de l'urbanisation, du développement des activités économiques et des périodes de sécheresse qui affectent de nombreuses régions.

L'Algérie fait partie des pays confrontés à une pression croissante sur les ressources hydriques. La faiblesse et l'irrégularité des précipitations, associées à l'augmentation des besoins en eau potable, rendent nécessaire la recherche de ressources alternatives. Dans ce contexte, la mobilisation des ressources en eau non conventionnelles constitue une solution importante pour renforcer l'approvisionnement en eau et améliorer la sécurité hydrique du pays [1–4].

Parmi les solutions adoptées par l'Algérie, le dessalement de l'eau de mer occupe une place importante. Cette technologie permet de transformer l'eau de mer en une eau destinée principalement à la consommation humaine, grâce à différents procédés de séparation des sels et des substances dissoutes. Parmi ces procédés, l'osmose inverse est largement utilisée dans les grandes stations de dessalement en raison de son efficacité dans la réduction de la salinité de l'eau [1].

Le dessalement présente toutefois plusieurs enjeux techniques, énergétiques, économiques et environnementaux. En effet, le fonctionnement des stations nécessite une consommation importante d'énergie, notamment pour les opérations de pompage à haute pression. Il nécessite également un prétraitement efficace afin de protéger les membranes contre le colmatage et l'encrassement [13]. De plus, la production d'eau dessalée entraîne la formation d'un concentrât ou d'une saumure qui doit être géré de manière appropriée afin de limiter ses effets potentiels sur le milieu marin. La qualité de l'eau produite constitue également un élément essentiel, notamment en ce qui concerne certains paramètres physico-chimiques tels que la salinité, la conductivité, le pH, les chlorures, les sulfates et le bore [13, 18].

Grâce à son importante façade maritime sur la mer Méditerranée, l'Algérie dispose de conditions favorables au développement du dessalement de l'eau de mer. Plusieurs stations ont ainsi été réalisées le long du littoral afin d'augmenter les capacités de production d'eau potable et de répondre aux besoins croissants des populations. Cette politique a pris une

Importance particulière dans les régions de l'Ouest algérien, où plusieurs infrastructures de dessalement contribuent à l'alimentation en eau potable [6, 8–12].

Dans cette région, les stations de dessalement de Béni Saf (Chatt El Hilal), de Honaïne et de Cap Blanc constituent trois infrastructures importantes. La station de Béni Saf, située dans la wilaya d'Aïn Témouchent, participe depuis plusieurs années au renforcement des ressources en eau de la région. La station de Honaïne, située dans la wilaya de Tlemcen, contribue également à l'approvisionnement en eau potable de la région [14]. Plus récemment, la station de Cap Blanc, située dans la wilaya d'Oran, est venue renforcer les capacités de production d'eau dessalée dans l'Ouest algérien [9–12].

Bien que ces trois stations reposent principalement sur le procédé d'osmose inverse, elles présentent des caractéristiques différentes en matière de capacité de production, de consommation énergétique, de récupération de l'énergie, de taux de récupération, de qualité de l'eau produite et de conditions d'exploitation. La comparaison de ces paramètres permet donc de mieux comprendre les performances techniques des installations et d'identifier les principaux facteurs pouvant influencer leur efficacité et leur durabilité.

Ainsi, l'étude comparative des stations de Béni Saf, Honaïne et Cap Blanc présente un intérêt particulier dans le contexte actuel de renforcement des ressources en eau non conventionnelles en Algérie. Elle permet d'examiner les caractéristiques techniques de ces installations, leurs performances énergétiques et productives, ainsi que certains aspects économiques et environnementaux liés à leur fonctionnement.

Problématique

À partir de ce contexte, la présente étude cherche à répondre à la problématique suivante :

Quelles sont les différences de performances techniques, énergétiques, économiques et environnementales entre les stations de dessalement de Béni Saf, Honaïne et Cap Blanc dans l'Ouest algérien ?

Cette problématique conduit également à s'intéresser aux principaux facteurs qui expliquent les différences observées entre ces stations, notamment la capacité de production, la consommation énergétique, le taux de récupération, les technologies utilisées et les conditions d'exploitation.

Objectifs de l'étude

L'objectif général de cette étude est de réaliser une analyse comparative des stations de dessalement de Béni Saf, Honaïne et Cap Blanc, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques et leurs performances.

Plus précisément, cette étude vise à :

- présenter les principales caractéristiques des trois stations étudiées ;

- comparer leurs capacités de production et leurs procédés de dessalement ;
- analyser leur consommation énergétique et les systèmes de récupération d'énergie utilisés ;
- examiner les principaux indicateurs techniques de performance ;
- comparer certains aspects économiques liés au fonctionnement des stations ;
- identifier les principaux enjeux environnementaux liés au dessalement, notamment la gestion de la saumure et la consommation énergétique ;
- mettre en évidence les principales différences entre les trois installations ;
- proposer des recommandations susceptibles de contribuer à l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité des stations étudiées.

Organisation du travail

Pour répondre à ces objectifs, le présent travail est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le dessalement de l'eau de mer. Il présente la définition du dessalement, les principales technologies utilisées, le principe de fonctionnement de l'osmose inverse ainsi que les principaux avantages et limites de cette technologie

Le deuxième chapitre présente les stations de dessalement étudiées, à savoir Béni Saf, Honaïne et Cap Blanc. Il décrit leur localisation, leur historique, leurs principales caractéristiques techniques, leur capacité de production ainsi que les procédés et équipements utilisés.

Le troisième chapitre porte sur l'analyse comparative et technique des trois stations. Il s'intéresse notamment à la capacité de production, à la consommation énergétique, au taux de récupération, aux performances du procédé et aux principaux paramètres permettant d'évaluer l'efficacité technique des installations.

Cette organisation permet ainsi de présenter progressivement le contexte général du dessalement, les caractéristiques des stations étudiées, leur comparaison technique, puis leurs principaux enjeux économiques et environnementaux

Chapitre I :

généralités sur le dessalement de l’eau de mer

Introduction

Face à l'accroissement continu des besoins en eau douce et à la répartition géographique inégale des ressources hydriques, le recours à des ressources alternatives constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour de nombreux pays. Parmi les solutions développées pour faire face au stress hydrique, le dessalement de l'eau de mer occupe une place importante, notamment dans les régions côtières caractérisées par une disponibilité limitée des ressources en eau conventionnelles.

Le dessalement consiste à extraire les sels dissous et les différentes substances minérales présentes dans l'eau de mer ou dans les eaux saumâtres afin d'obtenir une eau répondant aux exigences de qualité nécessaires à différents usages, notamment l'alimentation en eau potable. L'évolution des technologies a permis le développement de plusieurs procédés, parmi lesquels la distillation thermique et l'osmose inverse.

En Algérie, le dessalement constitue progressivement un élément important de la politique nationale de sécurisation de l'approvisionnement en eau potable. Le développement des stations de dessalement s'inscrit dans un contexte marqué par la variabilité des précipitations, la croissance démographique, l'augmentation de la demande en eau et la nécessité de renforcer les ressources hydriques disponibles.

Ce chapitre présente l'évolution historique du dessalement, particulièrement en Algérie, les principales techniques utilisées, leurs avantages et leurs limites, ainsi que leurs applications, leurs coûts énergétiques et environnementaux et, enfin, le cadre réglementaire national relatif à cette activité.

1. Le dessalement en Algérie

L'expérience algérienne dans le domaine du dessalement est historiquement liée au développement des activités industrielles, notamment dans les secteurs pétrolier, gazier et sidérurgique. Durant les premières phases de son développement, le dessalement et la déminéralisation étaient principalement destinés à fournir de l'eau de qualité adaptée aux besoins industriels, notamment pour l'alimentation des chaudières, le refroidissement et certains procédés de traitement [19] [38].

En 1964, trois petites unités d'une capacité de 8 m^3/h chacune ont été installées au niveau du complexe de gaz liquéfié d'Arzew, situé dans la wilaya d'Oran. Le procédé utilisé reposait alors sur un système à tubes submergés fonctionnant à basse pression [19].

En 1969, une autre installation a été mise en service à Arzew avec une capacité d'environ 4 560 m^3/j. Cette installation fonctionnait selon le procédé de distillation flash multi-étages, connu sous l'appellation anglaise **Multi-Stage Flash (MSF)** [38].

À partir de cette période, plusieurs installations de dessalement et de déminéralisation ont été progressivement mises en place parallèlement au développement des complexes industriels. Certaines installations ont notamment été destinées à la production d'eau de haute pureté

nécessaire au fonctionnement des centrales électriques et des complexes industriels de liquéfaction situés notamment à Arzew et à Skikda.

D'autres unités ont également été installées dans les régions sahariennes afin de fournir une eau adaptée à la consommation humaine dans certaines bases et installations pétrolières [38].

Au fil du temps, le dessalement a progressivement dépassé le cadre strictement industriel pour devenir un élément important de la stratégie nationale d'alimentation en eau potable. Le développement des grandes stations de dessalement implantées le long du littoral algérien s'inscrit ainsi dans une politique visant à diversifier les ressources hydriques et à renforcer la sécurité de l'approvisionnement en eau potable.

1.2 Étapes du dessalement de l'eau de mer

Le dessalement consiste à séparer l'eau des sels et des différentes substances dissoutes présentes dans une eau brute. Celle-ci peut être constituée d'eau de mer ou d'eau saumâtre d'origine continentale [11].

Dans le cas de l'eau de mer, le processus de production d'eau dessalée destinée à la consommation humaine comprend généralement plusieurs étapes successives.

1.2.1. Captage de l'eau de mer

La première étape consiste à prélever l'eau directement dans le milieu marin à travers un système de prise d'eau. Cette opération doit permettre d'assurer une alimentation régulière de l'installation tout en limitant l'introduction de matières indésirables [11].

1.2.2. Prétraitement

L'eau captée subit ensuite différentes opérations de prétraitement destinées à éliminer les matières en suspension, les algues, les microorganismes et autres impuretés susceptibles d'altérer les performances du procédé de dessalement [11][15].

Cette étape revêt une importance particulière dans les installations d'osmose inverse, car elle permet de limiter le colmatage et l'encrassement des membranes [15].

1.2.3. Dessalement

Le dessalement constitue l'étape principale du procédé. Il permet de séparer l'eau des sels dissous. Les principales technologies utilisées sont les procédés thermiques, fondés sur

l'évaporation et la condensation, et les procédés membranaires, notamment l'osmose inverse [15].

1.2.4. Post-traitement et reminéralisation

Après le dessalement, l'eau obtenue fait généralement l'objet d'un post-traitement. Cette étape comprend notamment la reminéralisation et l'ajustement du pH afin d'obtenir une eau présentant des caractéristiques physico-chimiques adaptées à la consommation humaine et à son transport dans les réseaux de distribution [15].

1.2.5. Désinfection

Une opération de désinfection peut ensuite être réalisée afin de réduire ou d'éliminer les microorganismes susceptibles d'être présents dans l'eau après les différentes étapes de traitement [15].

1.2.6. Stockage et distribution

L'eau traitée est ensuite stockée dans des réservoirs avant d'être acheminée vers les réseaux de distribution destinés à l'alimentation des populations [15].

1.2.7. Gestion de la saumure

Le processus de dessalement produit parallèlement une saumure, caractérisée par une concentration élevée en sels dissous. Son évacuation doit être réalisée dans des conditions permettant de limiter ses éventuels impacts sur le milieu marin [11].

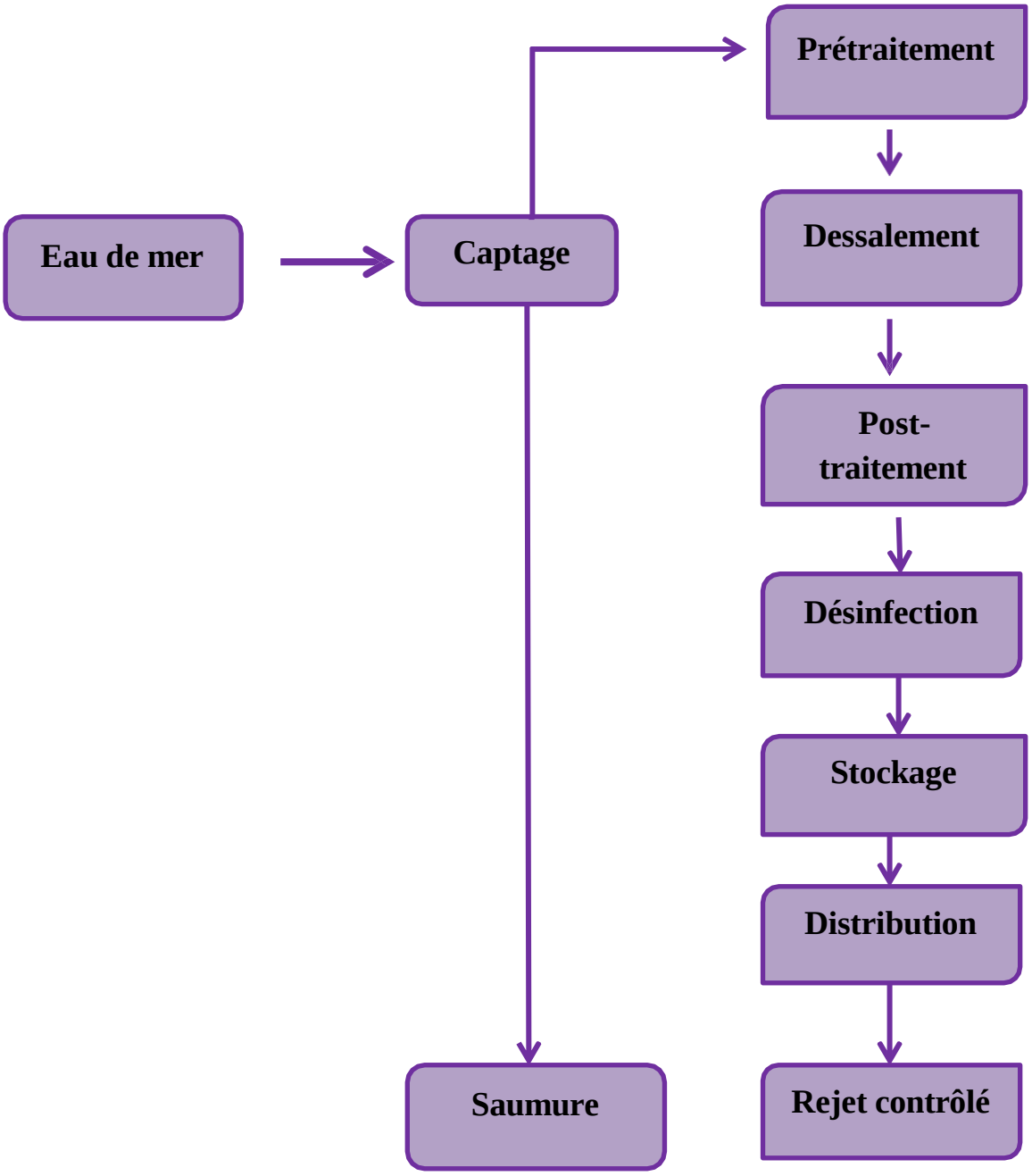


Figure I.1 : Schéma général d'une installation de dessalement

2. Les principales techniques de dessalement

Le dessalement constitue une technologie permettant de transformer une eau salée ou saumâtre en une eau présentant une faible concentration en sels dissous. Les procédés utilisés peuvent être classés principalement en deux grandes catégories : les procédés thermiques et les procédés membranaires [11].

Le choix de la technologie dépend notamment de la nature de l'eau à traiter, de la capacité de production recherchée, des ressources énergétiques disponibles et des contraintes économiques et environnementales [15].

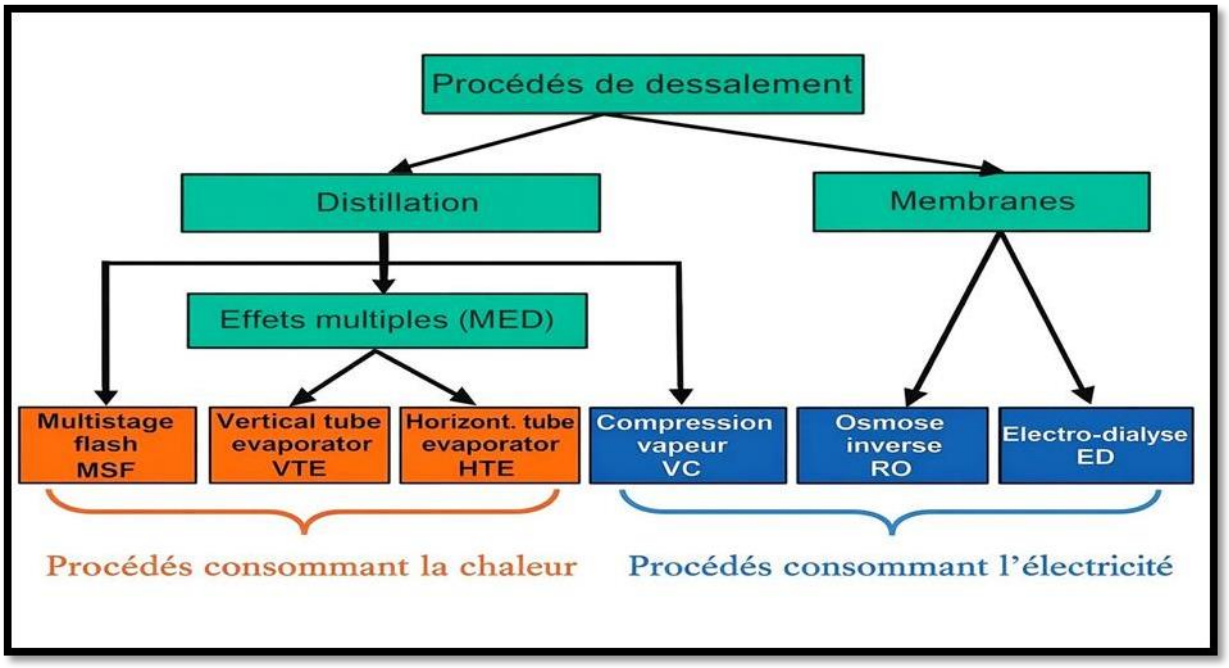


Figure I.2 : Les procédés de dessalement [37]

Les principales techniques sont les suivantes :

2.1. L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé membranaire dans lequel l'eau de mer est soumise à une pression élevée afin de la faire traverser une membrane semi-perméable. Cette membrane permet le passage de l'eau tout en retenant une grande partie des sels dissous et des autres substances indésirables [15].

L'osmose inverse permet d'éliminer 95 à 100 % des sels minéraux et des composés organiques chargés. Ce procédé est compact et offre une efficacité d'élimination élevée. Cependant, la dégradation et l'encrassement des membranes constituent les principaux inconvénients des systèmes d'osmose inverse [40].

L'osmose inverse est aujourd'hui largement utilisée dans les installations modernes de dessalement en raison notamment de sa consommation énergétique généralement inférieure à

celle des procédés thermiques. Les installations de Hamma, par exemple, utilisent des modules d'osmose inverse et des échangeurs d'énergie [15].

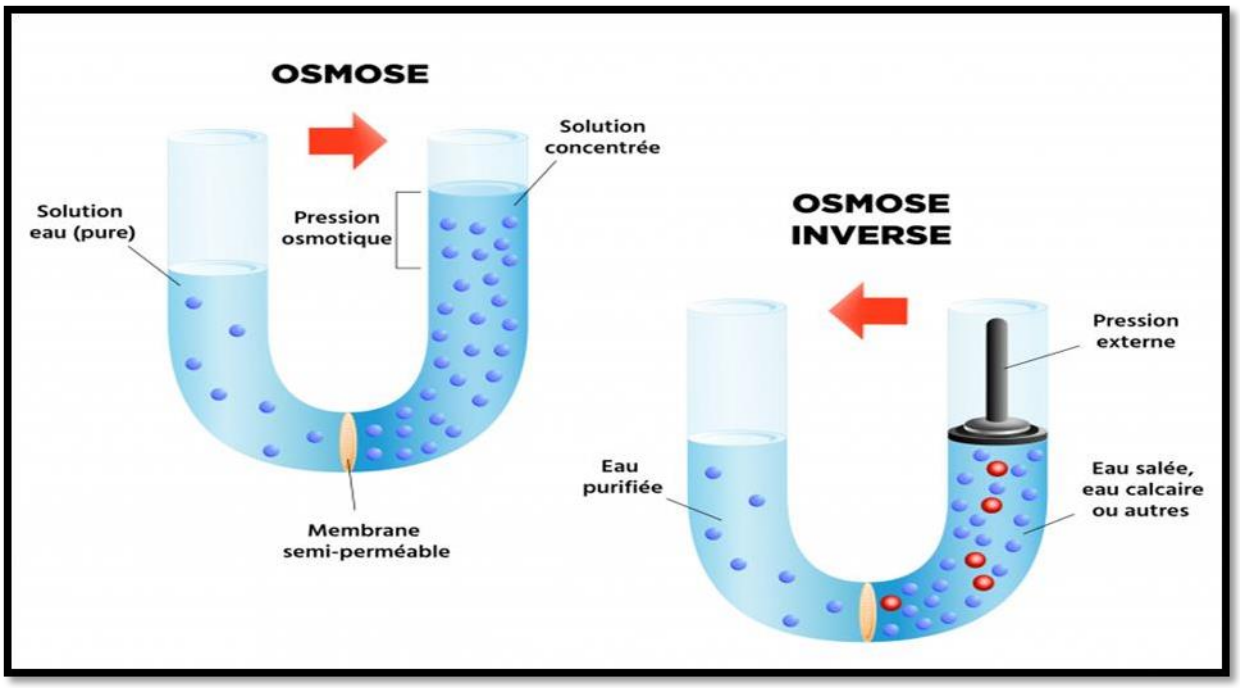


Figure I.3 : principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse [18]

2.2. La distillation thermique

La distillation thermique constitue l'une des plus anciennes méthodes utilisées pour produire de l'eau douce à partir d'une eau salée. Elle repose sur un principe relativement simple : l'eau salée est chauffée afin de provoquer son évaporation, puis la vapeur produite est condensée pour obtenir de l'eau douce [9].

Les principales technologies de cette catégorie Sont la distillation multi-effet (MED) et la distillation flash multi-étagée (MSF). Dans les régions d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (MENA), les procédés thermiques tels que la MED et la MSF dominent le marché du dessalement, représentant environ 85 % de la capacité totale de production d'eau. Cette prédominance s'explique par la forte salinité de l'eau de mer dans le Golfe, la fréquence élevée des proliférations d'algues qui peuvent gravement endommager les membranes d'osmose inverse (OI), ainsi que par la présence de nombreuses grandes centrales électriques, facilitant une intégration rentable entre la production d'énergie et le dessalement [36]

Deux procédés thermiques sont particulièrement importants : la distillation à effets multiples (MED) et la distillation flash multi-étages (MSF) [9].

- **La distillation à effets multiples (MED)**

La distillation à effets multiples, désignée par l'abréviation MED (Multi-Effect Distillation), est une technique de dessalement qui utilise l'énergie thermique pour produire de l'eau douce à partir de l'eau de mer [9].

Ce procédé repose sur une succession de compartiments appelés « effets », dans lesquels l'évaporation de l'eau salée est réalisée à des pressions progressivement décroissantes. L'eau d'alimentation est répartie sur les faisceaux de tubes des évaporateurs, où elle est pulvérisée sous forme de fines gouttelettes. La vapeur externe est généralement introduite dans le premier effet afin de fournir la chaleur nécessaire à l'évaporation initiale.

La vapeur produite dans le premier effet est ensuite utilisée comme source thermique dans le deuxième effet, puis dans les effets suivants. La diminution progressive de la pression permet à l'eau de s'évaporer à des températures de plus en plus faibles. Ce mécanisme favorise la récupération et la réutilisation de la chaleur, réduisant ainsi les besoins en énergie thermique du procédé. La vapeur produite est finalement condensée afin d'obtenir de l'eau douce, tandis que les sels restent principalement dans la saumure résiduelle [22]

La distillation à effets multiples présente ainsi l'avantage de valoriser la chaleur au cours des différentes étapes du processus, ce qui améliore son efficacité énergétique par rapport à une évaporation réalisée en une seule étape [9].

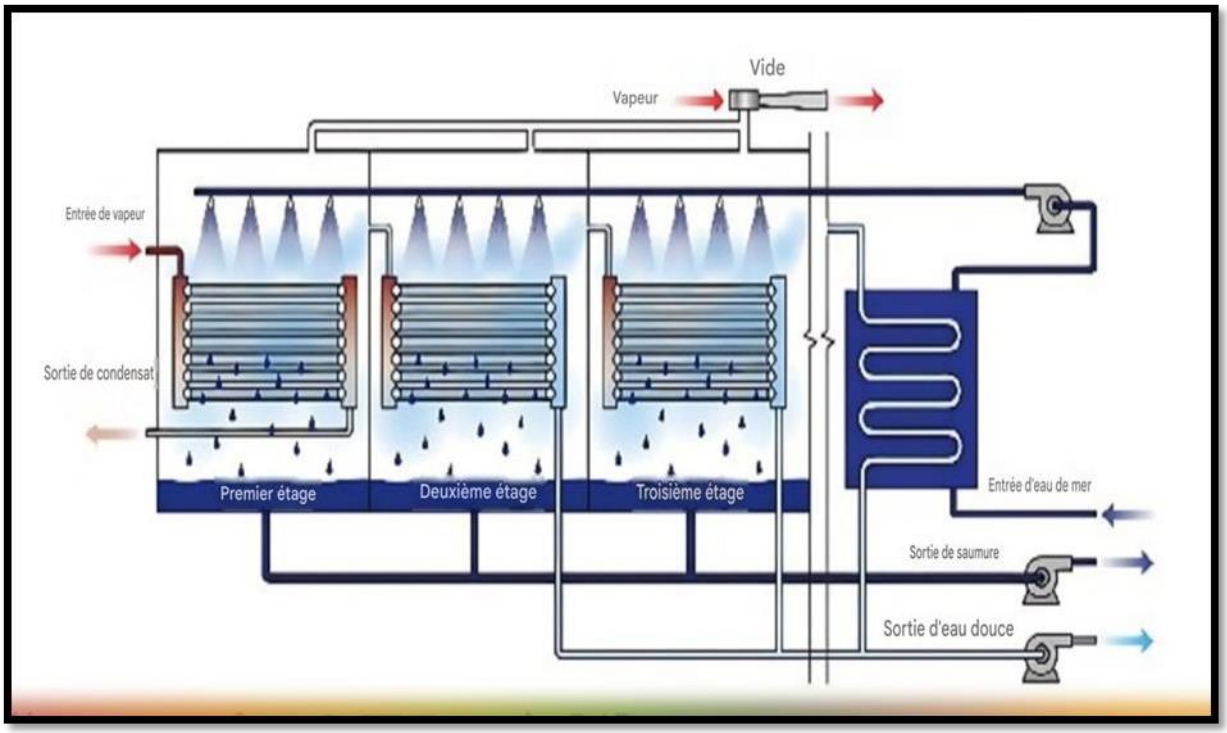


Figure I.4 : Schéma de principe d'une unité de distillation à effets multiples (MED) [22]

Le principe général peut être représenté comme suit :



➢ La distillation flash multi-étages (MSF)

La distillation flash multi-étages, désignée par l'abréviation MSF (Multi-Stage Flash), est un procédé thermique fondé sur le principe de l'évaporation instantanée d'une partie de l'eau lorsque celle-ci est soumise à une diminution de pression [9].

Dans ce procédé, l'eau de mer est d'abord préchauffée, puis portée à une température plus élevée dans un réchauffeur. Elle est ensuite introduite successivement dans plusieurs chambres appelées étages, dans lesquelles la pression est progressivement réduite. Cette diminution de pression provoque l'évaporation instantanée d'une partie de l'eau, tandis que les sels dissous restent principalement dans la saumure.

La vapeur produite dans chaque étage est ensuite condensée sur des tubes d'échange thermique, permettant de récupérer l'eau douce. La chaleur latente libérée lors de la condensation est transférée à l'eau d'alimentation circulant dans les échangeurs, contribuant ainsi à son préchauffage et à la réduction des besoins énergétiques du procédé. Chaque étage fonctionne à une pression et à une température inférieures à celles de l'étage précédent, ce qui permet de poursuivre l'évaporation de manière successive [9]

Le procédé MSF repose donc sur la combinaison de l'évaporation instantanée, de la condensation et de la récupération de chaleur. Il permet de produire de grandes quantités d'eau douce, notamment dans les installations industrielles de grande capacité [9].

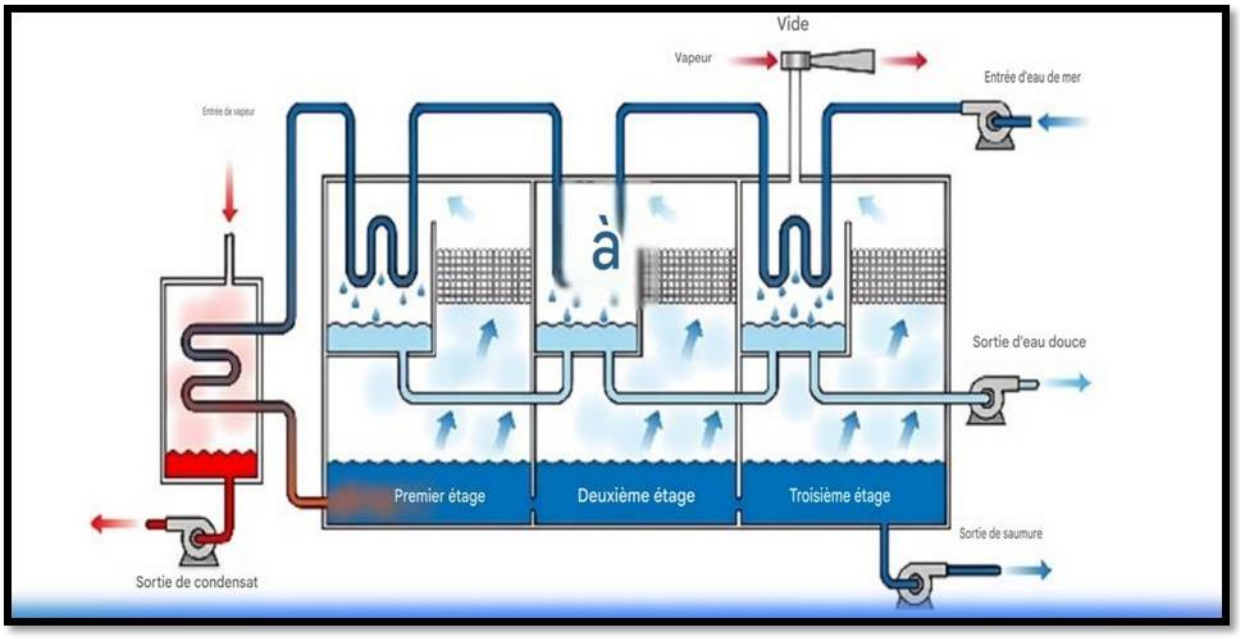
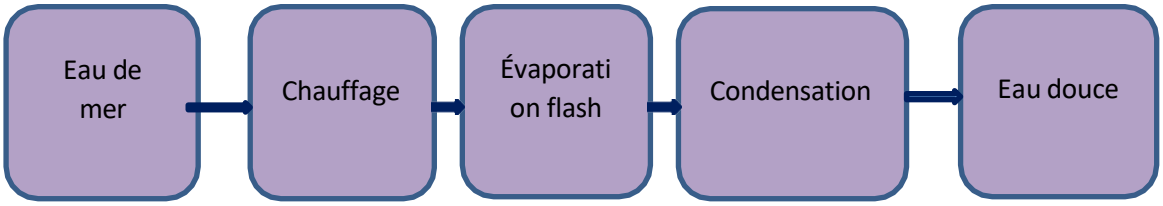


Figure I.5 : Schéma de principe d'une unité de distillation flash multi-étages (MSF) [22]

.Le principe peut être schématisé comme suit :



2.3. L'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé membranaire utilisant un champ électrique afin de déplacer les ions dissous à travers des membranes sélectives. Cette technologie est particulièrement adaptée au traitement des eaux saumâtres et à certaines applications spécifiques [11].

C'était un moyen rentable de dessaler l'eau saumâtre et elle a suscité un intérêt considérable pour les technologies de dessalement afin de produire de l'eau potable à usage municipal .Elle à également de nombreuses autres applications dans les industries environnementales et biochimiques, ainsi que dans la production de sel. L'ED est un procédé de séparation électrochimique qui utilise des membranes échangeuses d'ions chargées électriquement avec une différence de potentiel comme force motrice. En effet, la plupart des sels dissous dans l'eau sont ioniques, c'est-à-dire qu'ils sont chargés positivement (cationiques) ou négativement (anioniques) et migrent vers les électrodes. Les membranes peuvent être construites pour permettre le passage sélectif des cations ou des anions **[1]**

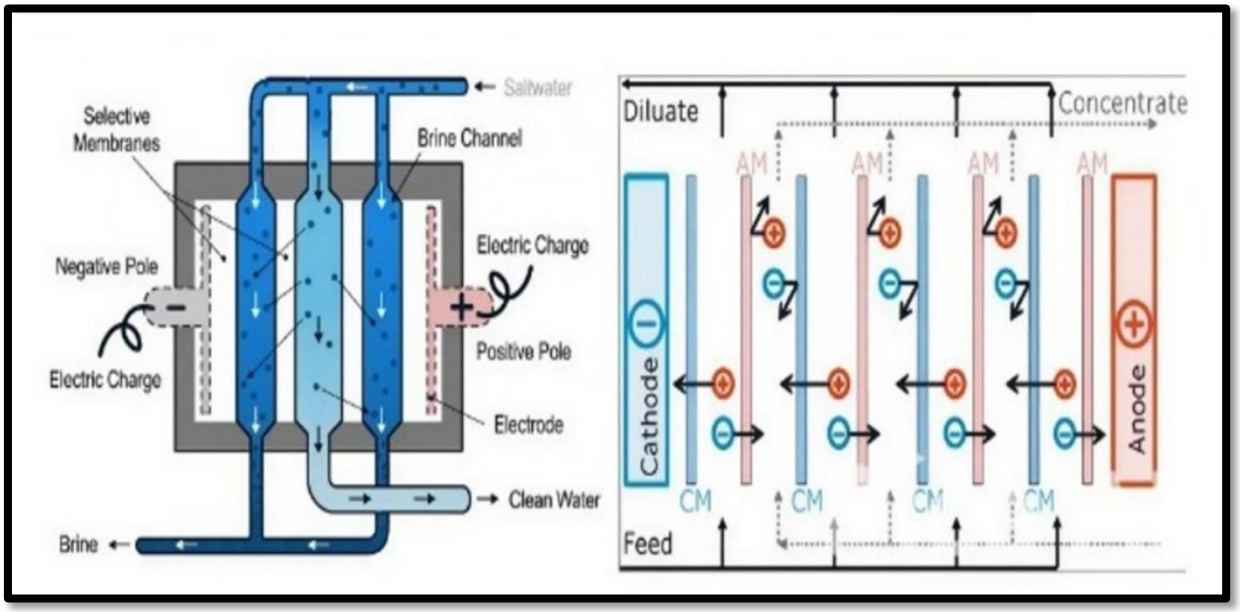


Figure I.6: principe du dessalement par électrodialyse [1]

3. Le principe de la pression osmotique

La pression osmotique absolue posm peut être définie selon l'équation de van't Hoff (En chimie, la quantité ι[c] est appelée « normalité », indiquant le nombre d'équivalents dans un volume unitaire. L'équivalent représente la quantité d'une substance spécifique capable de réagir avec (ou de fournir) une mole d'hydrogène (H+) dans une réaction acido-basique, ou de réagir avec (ou de fournir) une mole d'électrons dans une réaction d'oxydoréduction) :

$$\Pi = i.\ C\ .R.\ T$$

En supposant la notation suivante :

I : est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté

C : la concentration molaire du soluté (mol/m3).

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

T : Température (Kelvin) **[18]**

3.1. Les différents types de membranes d'osmose inverse

Les membranes constituent un élément essentiel des systèmes d'osmose inverse. Leur configuration influence les performances de séparation, la consommation énergétique, la

résistance à l'encrassement et les opérations de maintenance. Plusieurs configurations de modules membranaires sont utilisées dans les procédés de filtration et de dessalement.

➢ Les membranes tubulaires

Les modules tubulaires sont principalement utilisés pour le traitement des eaux présentant une forte teneur en matières en suspension, notamment dans les industries alimentaire et biologique. Leur diamètre varie généralement entre 1,3 et 2,6 cm. L'eau d'alimentation circule à l'intérieur des tubes, tandis que le perméat est recueilli à l'extérieur de la membrane.

Ces modules se caractérisent par une faible densité d'emballage et un coût relativement élevé. Ils présentent toutefois l'avantage d'être faciles à nettoyer et de pouvoir traiter des eaux chargées en matières en suspension. Cependant, ils nécessitent des débits d'alimentation importants et des opérations de nettoyage fréquentes afin de limiter l'encrassement. Ils sont principalement utilisés en microfiltration (MF) et en ultrafiltration (UF), plutôt qu'en osmose inverse [20]

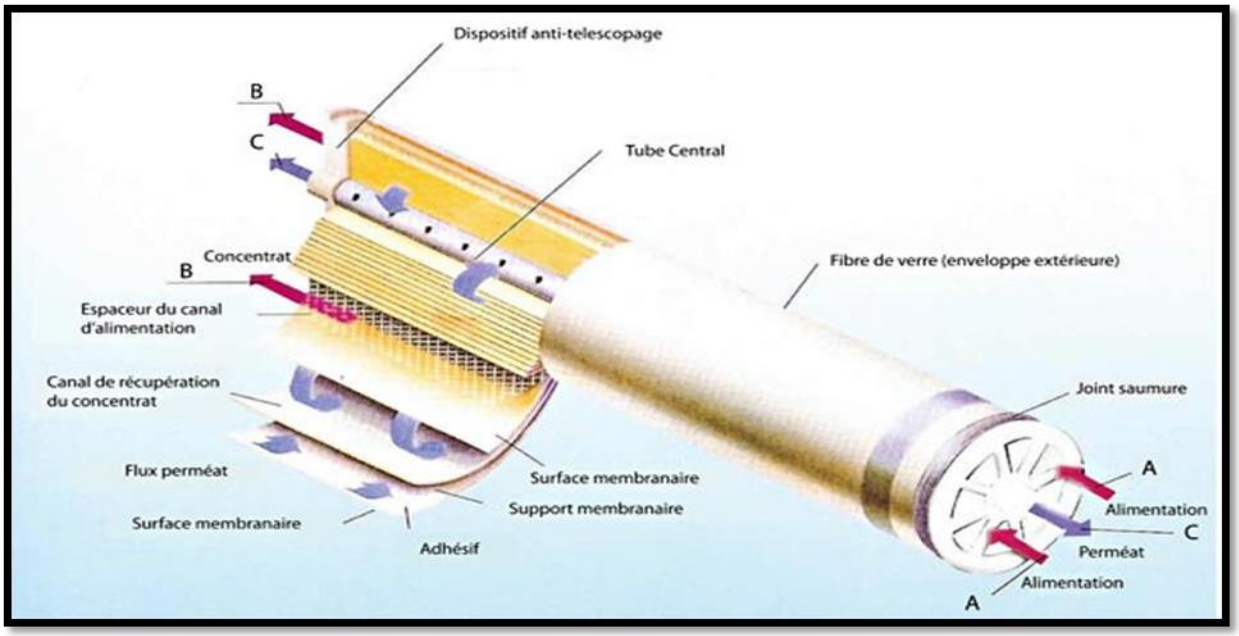


Figure I.7 : Schéma d'une membrane tubulaire [20]

➢ Les membranes spiralées

Les modules à membranes spiralées sont les plus couramment utilisés dans les systèmes d'osmose inverse en raison de leur forte densité d'emballage et de leur compacité. Ils sont constitués de feuilles de membranes planes, séparées par des espaceurs permettant la circulation de l'eau d'alimentation et la collecte du perméat. Ces feuilles sont enroulées autour d'un tube central perforé.

L'eau d'alimentation circule parallèlement à la surface de la membrane, tandis qu'une partie traverse celle-ci perpendiculairement pour former le perméat, qui est acheminé vers le tube central. Le concentrat, contenant une proportion plus élevée de sels dissous, est évacué à l'extrémité du module.

L'épaisseur des espaceurs d'alimentation peut être adaptée en fonction de la qualité de l'eau traitée afin de favoriser la circulation et de limiter les phénomènes d'encrassement. Cette configuration permet d'obtenir une surface membranaire importante dans un volume réduit, ce qui explique son utilisation répandue dans les installations industrielles de dessalement [20]

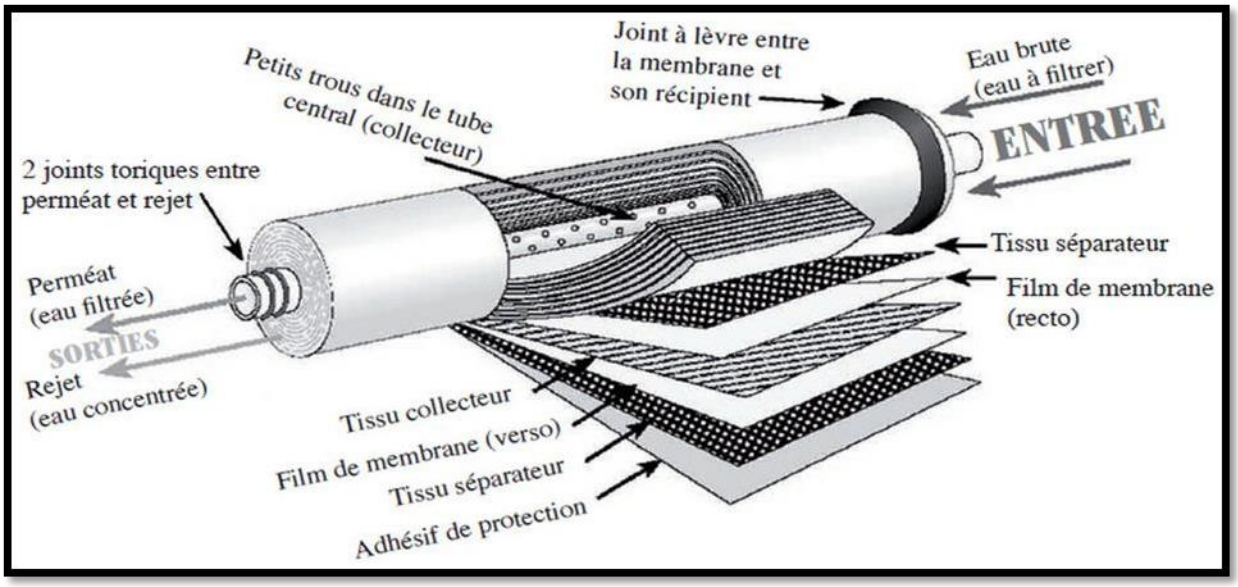


Figure I.8 : Structure d'une membrane spiralée [20]

➢ Les membranes à plaques et cadres

Les modules à plaques et cadres sont constitués de membranes planes disposées dans des cadres, avec des espaces permettant la circulation de l'eau d'alimentation et la collecte du perméat. Ils sont utilisés dans certaines applications de séparation membranaire nécessitant une configuration facilitant l'accès aux surfaces filtrantes.

Ces modules présentent l'avantage d'être relativement faciles à démonter, à inspecter et à nettoyer. Ils peuvent être adaptés à certaines eaux contenant des matières en suspension. Toutefois, leur densité d'emballage est généralement plus faible que celle des modules spiralés, et leur coût peut être élevé. De plus, des zones de stagnation peuvent favoriser l'accumulation de dépôts et l'encrassement des membranes [20]

➢ Les membranes à fibres creuses

Les modules à fibres creuses sont constitués d'un grand nombre de fibres membranaires de très faible diamètre, regroupées dans une enveloppe. Selon leur conception, l'eau d'alimentation peut circuler à l'intérieur ou à l'extérieur des fibres, tandis que le perméat traverse la membrane et est collecté dans un circuit spécifique.

Les performances de ces modules dépendent notamment du diamètre des fibres, de la configuration de l'écoulement et des conditions de fonctionnement. Les modules à alimentation intérieure peuvent favoriser une distribution régulière de l'écoulement, tandis que les configurations à alimentation extérieure permettent d'adapter la circulation en fonction des caractéristiques de l'eau à traiter.

Les membranes à fibres creuses offrent une forte densité de surface membranaire et sont largement utilisées dans les procédés de microfiltration et d'ultrafiltration. Leur utilisation en osmose inverse reste plus spécifique et dépend des caractéristiques techniques du système. L'optimisation des conditions d'écoulement et de nettoyage contribue à limiter les phénomènes d'encrassement et à améliorer leur fonctionnement [8]

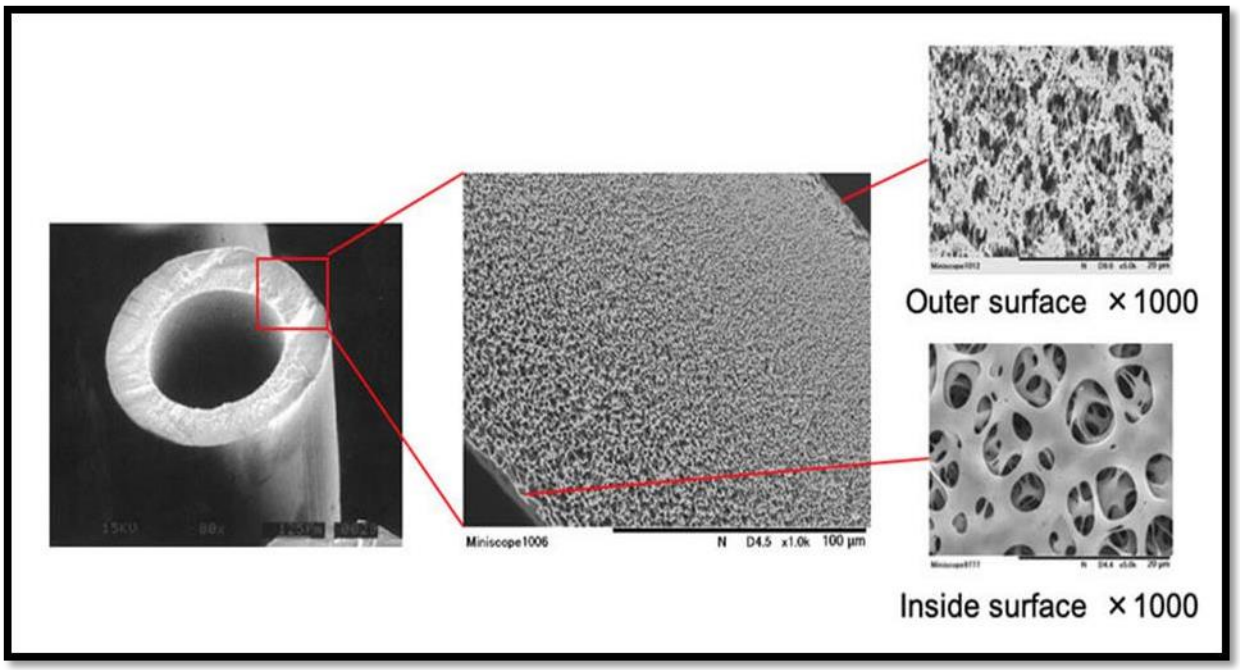


Figure I.9 : Représentation d'un module à fibres creuses [8]

4. Avantages et inconvénients des techniques de dessalement

Chaque technologie de dessalement présente des caractéristiques particulières. Le choix d'un procédé doit ainsi tenir compte de ses performances techniques, de sa consommation énergétique, de ses coûts d'exploitation et de ses impacts environnementaux [15][9].

4.1. Distillation thermique

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients du procédé de dessalement thermique de l'eau de mer [9]

Avantages	Inconvénients
Produit une eau douce de très bonne qualité.	Consommation importante d'énergie thermique.
Procédé fiable et robuste.	Coûts d'exploitation relativement élevés.
Adaptée au traitement de grandes quantités d'eau de mer.	Nécessite des équipements résistants à la corrosion.
Moins sensible à certaines variations de la qualité de l'eau d'alimentation que les procédés membranaires.	Risque de formation de dépôts et d'entartrage.
Possibilité de valoriser une chaleur résiduelle provenant d'une centrale ou d'une installation industrielle.	Installations généralement volumineuses et complexes.
Adaptée au fonctionnement continu.	Production d'une saumure concentrée nécessitant une gestion appropriée.

4.2. Osmose inverse

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients du procédé de dessalement par membranes [15].

Avantages	Inconvénients
Consommation énergétique généralement inférieure à celle des procédés thermiques.	Sensibilité des membranes à l'encrassement et au colmatage.
Production d'une eau de bonne qualité.	Nécessité d'un prétraitement efficace.
Installations relativement compactes.	Nettoyage et remplacement périodique des membranes.
Bonne efficacité dans l'élimination des sels dissous.	Fonctionnement sous haute pression nécessitant des équipements adaptés.
Démarrage et arrêt relativement rapides.	Production d'une saumure concentrée.
Coûts d'exploitation généralement plus faibles que ceux des procédés thermiques.	Vieillissement progressif des membranes pouvant affecter les performances.

En définitive, l'osmose inverse occupe une place importante dans les installations modernes de dessalement, notamment en raison de son efficacité et de sa consommation énergétique relativement faible par rapport aux procédés thermiques. Toutefois, ses performances dépendent fortement de la qualité du prétraitement et de l'entretien des membranes [15].

5. Historique du dessalement en Algérie

Le dessalement de l'eau connaît depuis plusieurs décennies un développement important à l'échelle mondiale. Cette évolution s'explique principalement par l'augmentation des besoins en eau potable et par les difficultés croissantes liées à la disponibilité des ressources hydriques conventionnelles. La répartition inégale de l'eau douce entre les différentes régions du monde constitue également un facteur déterminant dans le développement des technologies de dessalement [19].

Le recours au dessalement n'est toutefois pas un phénomène récent. Les premières expériences remontent à l'Antiquité, notamment à l'époque grecque, où des procédés rudimentaires étaient utilisés pour séparer l'eau du sel. Au XVIe siècle, plusieurs essais ont également été réalisés afin d'obtenir de l'eau douce à partir d'eau salée [19].

C'est cependant au XIXe siècle que les premières installations présentant un caractère industriel commencent à apparaître. Au Chili, une installation fonctionnant selon le principe de la distillation solaire a notamment permis de produire environ 20 m³ d'eau par jour afin d'approvisionner un village minier situé dans une région aride [19].

Au cours de la première moitié du XXe siècle, les procédés thermiques fondés sur l'évaporation et la condensation se sont progressivement développés. Toutefois, leur forte consommation énergétique a encouragé les chercheurs à rechercher des solutions alternatives. Cette évolution a conduit au développement des procédés membranaires, notamment l'osmose inverse, dont les recherches ont connu des avancées importantes aux États-Unis au cours des années 1960 [19][11].

Le développement des matériaux membranaires a également contribué à améliorer les performances du dessalement. Les premières membranes à base d'acétate de cellulose ont progressivement été remplacées par des membranes plus performantes, notamment celles à base de polyamide aromatique, permettant d'atteindre des taux élevés de rétention des sels. Parallèlement, les recherches se sont orientées vers la réduction de la pression nécessaire au fonctionnement des installations d'osmose inverse afin de diminuer leur consommation énergétique [11].

Dans les années 1970, la capacité mondiale de dessalement demeurait relativement limitée et reposait principalement sur les procédés thermiques. La crise pétrolière de 1973 a cependant favorisé le développement des installations de dessalement dans les pays producteurs de pétrole, notamment dans les régions du Golfe Persique. Ces installations étaient souvent associées à des centrales de production d'électricité, permettant ainsi de valoriser la chaleur disponible [19].

À partir des années 1980, les installations utilisant l'osmose inverse ont commencé à se développer davantage, notamment dans les régions du Golfe Persique. Durant les années 1990, les procédés thermiques sont restés largement utilisés au Moyen-Orient, tandis que l'osmose inverse s'est progressivement imposée dans une grande partie du marché mondial [19][11].

À l'échelle internationale, le développement du dessalement s'est poursuivi au cours des dernières décennies. Les pays disposant de ressources hydriques limitées, notamment dans les

régions arides et semi-arides, ont accordé une importance croissante à cette technologie afin de renforcer leur sécurité hydrique [19].

La région méditerranéenne occupe également une place importante dans le développement du dessalement. Plusieurs pays méditerranéens, notamment l'Espagne, le Maroc, la Tunisie, l'Algérie et la Libye, ont développé des installations de différentes capacités afin de répondre à leurs besoins croissants en eau [19].

Au Maroc, des installations de dessalement ont été développées dans plusieurs régions côtières, notamment dans le cadre de projets destinés à renforcer l'alimentation en eau potable et à répondre aux besoins agricoles [19].

En Tunisie, le dessalement constitue également une solution utilisée pour renforcer l'approvisionnement en eau, notamment dans les régions caractérisées par une disponibilité limitée des ressources conventionnelles [19].

En Libye, le recours au dessalement s'est développé essentiellement en raison de la rareté des ressources en eau douce et de la forte concentration de la population dans les zones côtières [19].

En Égypte, plusieurs projets ont également été développés, particulièrement dans les régions côtières de la mer Rouge [19].

À Malte, compte tenu des ressources hydriques naturelles limitées de l'île, le dessalement représente une composante importante de l'approvisionnement en eau potable. Chypre dispose également de plusieurs installations destinées à renforcer ses ressources en eau [19].

6. Les stations de dessalement de l'eau de mer existant dans l'Ouest algérien

Afin de renforcer l'approvisionnement en eau potable et de faire face aux périodes de stress hydrique, l'Algérie a développé un important programme de réalisation de stations de dessalement le long de son littoral. L'Ouest algérien constitue l'une des régions concernées par cette stratégie en raison de l'importance de ses besoins en eau et de sa proximité avec la mer Méditerranée [24][39].

Parmi les principales installations citées dans cette région figurent :

6.1. Wilaya de Tlemcen

- **Station de dessalement de Honaine :** capacité de production de 200 000 m³/j d'eau potable [24].

6.2. Wilaya d'Aïn Témouchent

- **Station de dessalement de Béni Saf :** capacité de production de 200 000 m³/j d'eau potable [34].
- **Station de dessalement de Chatt El Hilal :** capacité de production de 200 000 m³/j d'eau potable [34].

La station de Chatt El Hilal, située à Béni Saf dans la wilaya d'Aïn Témouchent, a été mise en service en 2009 et dispose d'une capacité de production de 200 000 m³/jour. Elle contribue notamment à l'approvisionnement en eau dessalée des wilayas d'Oran et d'Aïn Témouchent [34].

6.3. Wilaya d'Oran

La wilaya d'Oran dispose également de plusieurs installations de dessalement, notamment :

- **Station de dessalement d'Arzew :** 90 000 m³/j ;
- **Station de dessalement de Cap Blanc :** 190 000 m³/j ;
- **Station de dessalement de Bousfer :** 5 500 m³/j ;
- **Station de dessalement d'Aïn El-Turck :** 5 000 m³/j ;
- **Station de dessalement de Mactaâ :** 500 000 m³/j [7].

Attention : pour **Cap Blanc**, la donnée actuelle officielle est de **300 000 m³/jour**, et non 190 000 m³/j. La station a été inaugurée le 20 février 2025 et sa capacité officielle est de 300 000 m³/jour [3][10].

Ces installations contribuent à renforcer les capacités de production d'eau potable dans l'Ouest algérien et à réduire la dépendance à l'égard des ressources hydriques conventionnelles [25][39].

7. Applications du dessalement

Le dessalement peut être utilisé dans plusieurs secteurs en fonction des caractéristiques de l'eau produite et des besoins des utilisateurs [24].

7.1. Alimentation en eau potable

L'une des principales applications du dessalement consiste à produire de l'eau destinée à la consommation humaine. Cette utilisation est particulièrement importante dans les régions côtières et les zones caractérisées par un stress hydrique important [24][11].

7.2. Applications industrielles

L'eau dessalée peut également être utilisée dans différents secteurs industriels. Certaines activités nécessitent notamment une eau présentant un faible niveau de minéralisation ou répondant à des exigences spécifiques de qualité [25].

7.3. Applications agricoles

Dans certaines régions caractérisées par une disponibilité limitée des ressources hydriques, l'eau dessalée peut être destinée à l'irrigation. Toutefois, cette application dépend notamment du coût de production de l'eau, de la qualité recherchée et des conditions économiques et énergétiques locales [11].

8. Coûts énergétiques et environnementaux du dessalement

Le fonctionnement d'une station de dessalement implique non seulement des coûts économiques, mais également une consommation d'énergie et différents impacts potentiels sur l'environnement. L'analyse de ces deux dimensions constitue donc un élément important dans l'évaluation globale des technologies de dessalement [19][24].

8.1. Les coûts énergétiques

Les coûts énergétiques correspondent aux dépenses liées à l'énergie nécessaire au fonctionnement de la station de dessalement. Ils comprennent notamment l'électricité consommée par les pompes, les équipements de traitement et les différents systèmes auxiliaires [19].

Dans le cas de l'osmose inverse, une part importante de la consommation énergétique est liée à la mise sous pression de l'eau de mer afin de permettre son passage à travers les membranes. Dans les procédés thermiques, l'énergie est principalement utilisée pour chauffer l'eau et assurer les différentes opérations d'évaporation et de condensation [24].

Ainsi, plus la consommation énergétique d'une installation est importante, plus le coût de production de l'eau peut augmenter. L'amélioration de l'efficacité énergétique constitue par conséquent un enjeu essentiel pour réduire les coûts d'exploitation des stations [24].

8.2. Les impacts environnementaux

Les impacts environnementaux du dessalement sont principalement liés à la consommation énergétique, aux émissions associées à la production de cette énergie et à la gestion des rejets issus du processus de dessalement [19].

Parmi les principaux impacts potentiels figurent :

- le rejet de saumure concentrée dans le milieu marin ;
- la consommation importante d'énergie ;
- les émissions de gaz à effet de serre lorsque l'énergie utilisée provient de sources fossiles ;
- les éventuels effets sur les écosystèmes marins ;
- les impacts liés aux produits chimiques utilisés lors du prétraitement et du nettoyage des installations [19].

Le rejet de saumure constitue notamment une question importante. En raison de sa concentration élevée en sels et de ses caractéristiques physico-chimiques, son rejet doit être réalisé selon des conditions permettant de limiter les effets potentiels sur le milieu marin [19].

Dans le contexte algérien, ces questions concernent notamment les grandes stations de dessalement implantées sur le littoral, telles que les stations de Cap Blanc et de Honaine. La maîtrise des impacts environnementaux constitue ainsi un élément essentiel de la gestion durable des installations de dessalement [11][24].

9. Cadre réglementaire national du dessalement

Le développement du dessalement en Algérie s'inscrit dans un cadre réglementaire et institutionnel visant à organiser l'utilisation des ressources en eau, à encadrer la réalisation et l'exploitation des infrastructures hydrauliques et à assurer la protection de l'environnement.

Le cadre réglementaire applicable au dessalement concerne notamment :

- la législation relative aux ressources en eau ;
- les dispositions relatives à la protection de l'environnement ;
- les procédures d'autorisation et de réalisation des infrastructures hydrauliques ;
- les conditions d'exploitation des stations de dessalement ;
- les règles relatives à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine ;
- les dispositions relatives à la gestion et au contrôle des rejets ;
- les organismes publics chargés de la gestion et du développement des ressources en eau.

En Algérie, le développement des stations de dessalement s'inscrit ainsi dans la politique nationale visant à renforcer la sécurité hydrique et à diversifier les sources d'approvisionnement en eau potable [11].

L'encadrement institutionnel de ce secteur implique plusieurs acteurs publics intervenant dans la planification, la réalisation, l'exploitation, le contrôle et le suivi des installations de dessalement. Cette organisation vise notamment à garantir la continuité du service public de l'eau, la qualité de l'eau produite et la protection des ressources naturelles.

Conclusion

Le dessalement de l'eau de mer représente aujourd'hui une solution technologique importante face aux contraintes liées à la disponibilité des ressources hydriques conventionnelles. Son développement historique montre une évolution progressive des procédés thermiques vers des technologies membranaires plus performantes sur le plan énergétique, notamment l'osmose inverse [15].

En Algérie, le dessalement est passé progressivement d'une utilisation essentiellement industrielle à un rôle stratégique dans l'approvisionnement en eau potable. La multiplication des stations implantées le long du littoral, notamment dans l'Ouest algérien, témoigne de l'importance accordée à cette ressource dans le cadre de la sécurisation de l'alimentation en eau [24].

Toutefois, malgré ses avantages, le dessalement demeure confronté à plusieurs contraintes, notamment la consommation énergétique, les coûts d'exploitation, l'entretien des équipements et la gestion de la saumure. Le développement durable de cette technologie nécessite donc de concilier les objectifs de sécurité hydrique, d'efficacité énergétique et de protection de l'environnement [24].

Chapitre II :

Présentation des stations étudiées

Introduction

Dans le cadre de l'étude du dessalement de l'eau de mer en Algérie, l'analyse de stations concrètes permet de mieux comprendre les caractéristiques techniques et fonctionnelles des infrastructures mises en place pour répondre aux besoins croissants en eau potable. Le choix de plusieurs stations implantées dans l'Ouest algérien permet également de mettre en évidence les différentes dimensions liées à leur localisation, leur capacité de production, leur technologie et leur contribution à la sécurité hydrique de la région.

L'Ouest algérien dispose de plusieurs stations de dessalement implantées le long du littoral méditerranéen. Ces infrastructures constituent une composante importante de la stratégie nationale visant à diversifier les ressources hydriques et à renforcer l'approvisionnement en eau potable.

Le présent chapitre est consacré à la présentation de trois stations étudiées dans l'Ouest algérien, à savoir la station de dessalement de Chatt El Hilal à Béni Saf, dans la wilaya d'Aïn Témouchent, la station de Cap Blanc dans la wilaya d'Oran et la station de Honaïne dans la wilaya de Tlemcen. Une analyse comparative sera ensuite proposée afin de faire ressortir leurs principales caractéristiques et leurs similitudes et différences.

1. Présentation des stations de dessalement de l'Ouest algérien.

L'Ouest algérien connaît une pression importante sur les ressources en eau, en raison notamment de l'évolution des besoins des populations, des activités économiques et des variations des ressources hydriques conventionnelles. Dans ce contexte, le développement des stations de dessalement d'eau de mer constitue l'une des solutions adoptées pour renforcer les capacités de production d'eau potable. [3]

La situation géographique de l'Ouest algérien, caractérisée par une façade maritime importante, favorise le recours à l'eau de mer comme ressource alternative. Les stations implantées dans cette région permettent ainsi de mobiliser une ressource abondante et de la transformer en eau destinée principalement à la consommation humaine. [3]

Parmi les principales stations de dessalement de l'Ouest algérien figurent notamment :

- la station de dessalement de Chatt El Hilal, située à Béni Saf dans la wilaya d'Aïn Témouchent ;
- la station de dessalement de Cap Blanc, située dans la wilaya d'Oran ;
- la station de dessalement de Honaïne, située dans la wilaya de Tlemcen. [3][31]

Ces infrastructures utilisent principalement la technologie de l'osmose inverse. Elles participent au renforcement de l'alimentation en eau potable et permettent de réduire la

pression exercée sur certaines ressources conventionnelles, notamment les barrages et les eaux souterraines. [31]

L'utilisation de l'eau dessalée contribue également à mieux faire face aux périodes de sécheresse et aux fluctuations de la disponibilité des ressources hydriques. De ce fait, les stations de dessalement occupent une place croissante dans la politique de sécurisation de l'approvisionnement en eau dans l'Ouest algérien. [3]

2. Présentation de la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf

2.1. Présentation générale

La station de dessalement d'eau de mer de Chatt El Hilal est située dans la commune de Béni Saf, dans la wilaya d'Aïn Témouchent. Elle constitue l'une des infrastructures importantes de production d'eau dessalée dans l'Ouest algérien. [34]



Figure II.1 : site géographique de la SDEM de Béni Saf

Mise en service en 2009, la station dispose d'une capacité de production de 200 000 m³ d'eau dessalée par jour. Elle utilise le procédé de dessalement par osmose inverse, permettant de séparer les sels dissous de l'eau de mer à travers des membranes semi-perméables soumises à une pression élevée. [34]

La production de la station contribue à l'alimentation en eau potable des wilayas d'Aïn Témouchent et d'Oran. Cette contribution lui confère une importance particulière dans le renforcement de l'approvisionnement en eau potable dans l'Ouest algérien. [34]

L'usine a été réalisée par une société de projet « Beni saf Water Company Spa » constituée à partir du consortium GEIDA, de l'ADE et de l'AEC.



Figure II.2: les différents collaborateurs de la station BWC

2.2. Présentation du groupe GEIDA et de l'AEC

Le groupe **GEIDA** est un consortium espagnol constitué au début de l'année 2003 à l'initiative de quatre importantes entreprises spécialisées dans les études, la construction et l'expertise dans le domaine des infrastructures énergétiques et hydrauliques. Il regroupe les sociétés suivantes :

- **COBRA**
- **BEFESA**
- **CODESA**
- **SADYT**

Dans le cadre du développement des projets liés à la production d'eau dessalée en Algérie, le groupe GEIDA s'est inscrit dans un partenariat avec les acteurs algériens du secteur de l'énergie. À cet effet, **Sonatrach**, société nationale chargée des activités pétrolières et gazières, et **Sonelgaz**, entreprise nationale active dans la production et la distribution de l'électricité et du gaz, ont participé à la création de l'**Algerian Energy Company (AEC)**. Les deux sociétés détiennent chacune **50 % du capital social de l'AEC**.

L'AEC a ainsi constitué un acteur important dans le développement et la réalisation de projets liés au dessalement de l'eau de mer en Algérie, notamment à travers des partenariats avec des entreprises et consortiums internationaux spécialisés dans ce domaine.

Tableau II.1 : Principales caractéristiques de la station de Chatt El Hilal. [34]

Élément	**Information**
Localisation	Chatt El Hilal, commune de Béni Saf, wilaya d'Aïn Témouchent
Date de mise en service	2009
Capacité de production	200 000 m³/jour
Technologie	Osmose inverse
Destination de l'eau	Alimentation en eau potable
Zone principalement alimentée	Wilayas d'Aïn Témouchent et d'Oran



Figure II.3 : Vues extérieure et intérieure de la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf, wilaya d'Aïn Témouchent.[32]

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

2.3.1. Captage d'eau de mer

Le système de captage (figure II.4) est ouvert, 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.[32]



Figure II.4 : Système de captage de l'eau de mer

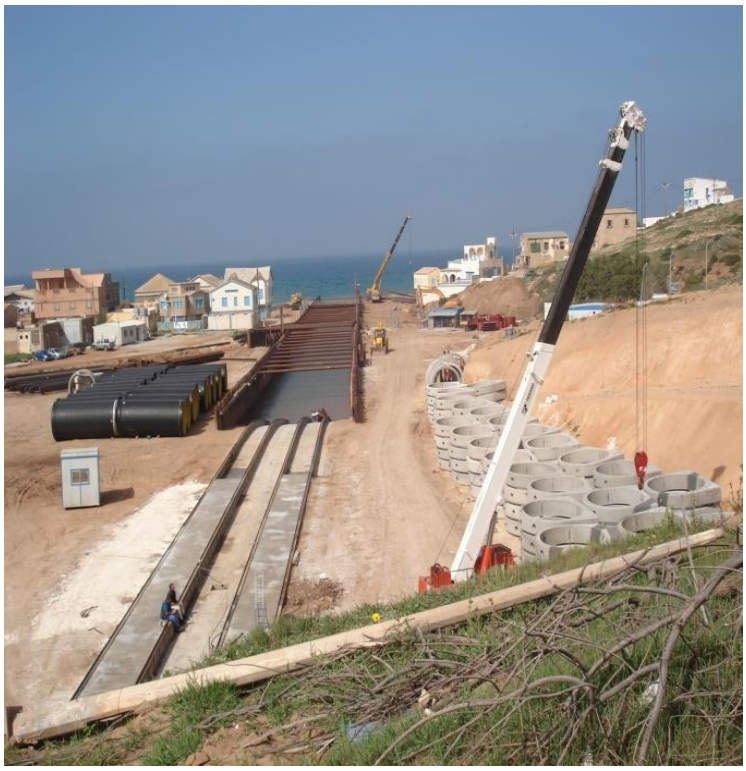


Figure II.5 : la conduite de captage en période de la construction

Après une première filtration brute, l'eau de mer est tamisée à l'aide de filtres rotatifs (figure II.6) avant d'être pompée à partir du bassin de captage vers le prétraitement, sur une distance de 900 mètres.

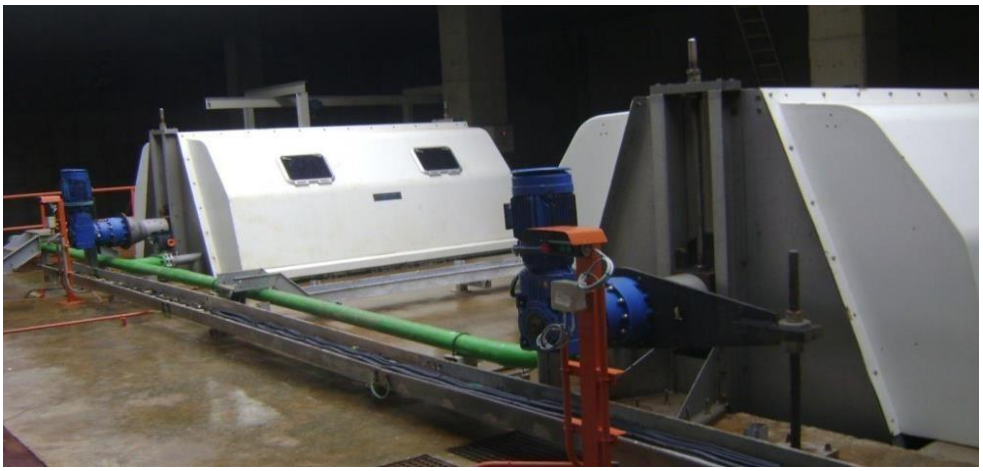


Figure II.6 : filtres rotatifs

2.3.2. La station de pompage

La station de pompage d'eau de mer située dans la zone de captage représente l'épine dorsale de la SDEM. Elle est composée de :[34]

- ✓ 11 pompes centrifuges horizontales (Sulzer);
- ✓ 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 II.7 : 11 pompes centrifuges horizontales (Sulzer)

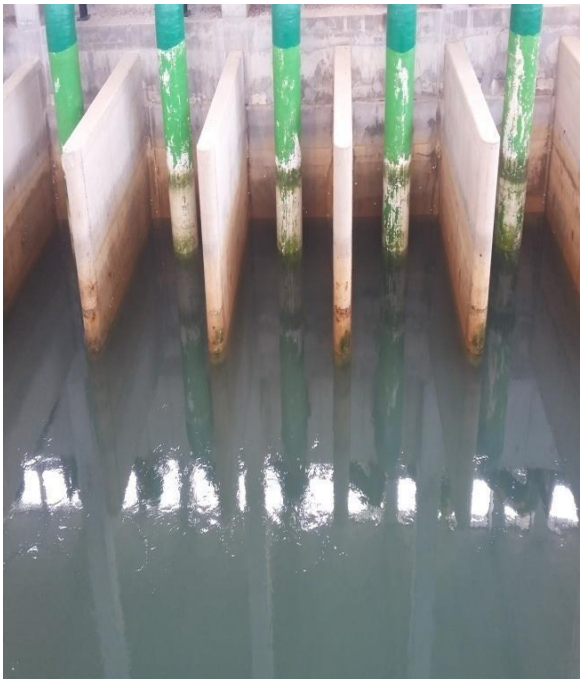


Figure II.8 : pompes de pompage et bassin de stockage

2.4. Prétraitement de l'eau de mer

Avant son admission dans les modules d'osmose inverse, l'eau de mer subit plusieurs étapes de prétraitement destinées à éliminer les matières en suspension, les particules fines ainsi que certains composés susceptibles d'affecter le fonctionnement des membranes d'osmose inverse. Le prétraitement constitue ainsi une étape essentielle pour assurer la qualité de l'eau d'alimentation et protéger les équipements situés en aval.

2.4.1. Filtration sur sable

La filtration sur sable constitue l'une des principales étapes du prétraitement de l'eau de mer. Elle a pour objectif de retenir les matières solides en suspension ainsi que les flocs formés lors de l'étape de coagulation.

1) Organisation du système de filtration sur sable

Le système de filtration est constitué de deux trains de filtration identiques, chacun étant conçu pour traiter environ 50 % du débit d'eau nécessaire au fonctionnement de l'installation. Chaque train comprend 24 filtres regroupés en 12 modules, chaque module étant constitué de deux filtres identiques fonctionnant comme une unité de filtration.

Les deux filtres constituant un même module disposent de collecteurs et de vannes communes, ce qui permet d'assurer leur fonctionnement coordonné et de faciliter les opérations d'exploitation et de maintenance.

2) Principe de fonctionnement de la filtration sur sable

La filtration sur sable repose sur le passage de l'eau à travers un milieu filtrant poreux permettant de retenir mécaniquement les particules solides en suspension. Dans l'installation étudiée, le milieu filtrant est constitué de sable de silice organisé en deux couches.

La couche inférieure est constituée de sable relativement grossier et joue le rôle de couche support. Elle est recouverte par une couche de sable plus fin, qui assure principalement la rétention des particules de plus petite taille. L'eau traverse ainsi le lit filtrant avant d'être collectée dans la partie inférieure du filtre.

En amont des filtres à sable, au niveau du système de captage et de pompage, un mélangeur statique est installé afin de favoriser le mélange homogène de l'eau de mer avec les produits chimiques préalablement dosés. Cette opération contribue à la formation des flocs et facilite leur rétention lors de la filtration.

3) Contrôle de la qualité et du fonctionnement des filtres

Le système de contrôle comprend un dispositif de prélèvement d'échantillons associé à l'analyseur de turbidité de chaque train de filtration. Il permet notamment de contrôler la qualité de l'eau filtrée et de mesurer le **SDI (Silt Density Index)**, qui constitue un indicateur important de la qualité de l'eau destinée à l'étape d'osmose inverse.

La mesure du SDI permet également d'évaluer l'efficacité du système de filtration et de détecter d'éventuelles anomalies dans son fonctionnement.

Des manomètres sont également installés à l'entrée et à la sortie de chaque train de filtration. Ils permettent de suivre les variations de pression entre les collecteurs d'entrée et de sortie. L'évolution de cette différence de pression constitue un indicateur utile pour surveiller l'état de colmatage des filtres et déterminer la nécessité d'une opération de nettoyage.

4) Caractéristiques des filtres à sable

L'installation comprend **48 filtres à pression horizontale à fond bombé**, disposés en parallèle afin d'assurer une répartition homogène du débit d'eau dans les conditions normales de fonctionnement.

Les filtres sont répartis en deux trains de filtration, chacun composé de 12 modules comprenant deux filtres. Sur le plan fonctionnel, chaque module constitue l'unité minimale de filtration.

Le collecteur supérieur assure l'entrée de l'eau de mer dans les filtres, tandis que le collecteur inférieur permet l'évacuation de l'eau filtrée. L'eau pénètre dans le filtre, traverse le lit de sable où les matières en suspension sont retenues, puis est recueillie dans la partie inférieure avant d'être dirigée vers l'étape suivante du prétraitement.

2.4.2. Filtration sur anthracite

La filtration sur anthracite constitue une étape complémentaire du prétraitement de l'eau de mer. Elle vise principalement à retenir certaines matières organiques et les composés résiduels susceptibles d'altérer la qualité de l'eau ou de provoquer des problèmes liés aux mauvaises odeurs et au mauvais goût.

Cette étape contribue ainsi à améliorer la qualité de l'eau avant son passage à travers les filtres à cartouches et son admission dans les unités d'osmose inverse.



Figure II.9 : Zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf

2.4.3. Filtration par cartouches

La filtration par cartouches constitue la dernière étape du prétraitement avant l'entrée de l'eau dans les unités d'osmose inverse. Elle est destinée à retenir les particules de très petite taille qui n'ont pas été éliminées lors des étapes précédentes de filtration.

Le système est conçu pour retenir des particules pouvant atteindre environ **5 µm**, afin de protéger les équipements situés en aval, notamment les groupes hauts pression et les membranes d'osmose inverse.

1) Organisation du système de filtration par cartouches

Le système de filtration par cartouches est installé à l'intérieur du bâtiment de production. Il comprend deux lignes de filtration, chacune équipée de 10 filtres, soit un total de **20 filtres**.

Les filtres sont destinés à recevoir les cartouches filtrantes qui constituent le véritable milieu de filtration. Leur rôle est de retenir les particules solides de très petite taille encore présentes dans l'eau après les étapes de filtration sur sable et sur anthracite.



Figure II.10 : Filtres à cartouches de la SDEM de Béni Saf

2) Principe et rôle de la filtration par cartouches

Le principe de la filtration par cartouches repose sur le passage de l'eau à travers un matériau filtrant poreux permettant de retenir mécaniquement les particules solides résiduelles. Les cartouches filtrantes sont installées à l'intérieur des corps des filtres, qui assurent leur maintien et leur fonctionnement dans les conditions de pression requises.

Cette filtration constitue une **filtration de sécurité**, destinée à protéger à la fois les groupes haute pression et les membranes d'osmose inverse contre les particules susceptibles de provoquer leur détérioration ou leur colmatage.

Compte tenu des exigences élevées en matière de qualité de l'eau d'alimentation des unités d'osmose inverse, la filtration par cartouches permet d'assurer une protection supplémentaire

des membranes. En règle générale, l'eau destinée à l'osmose inverse ne doit pas contenir de particules solides supérieures à environ **5 µm**, afin de limiter les risques d'endommagement et de colmatage des équipements.

2.5. Principales installations de la station

Le fonctionnement de la station repose sur plusieurs unités et équipements assurant les différentes étapes du processus de dessalement. [34]

a. Les unités d'osmose inverse

Les unités d'osmose inverse constituent le cœur du procédé de dessalement. Elles comprennent les membranes semi-perméables à travers lesquelles l'eau de mer prétraitée est envoyée sous haute pression. [34]

La station comprend plusieurs unités de production permettant d'assurer une capacité globale d'environ 200 000 m³/jour. [30]

b. Les pompes haute pression

Les pompes haute pression fournissent la pression nécessaire au passage de l'eau prétraitée à travers les membranes d'osmose inverse. Elles constituent donc des équipements essentiels au fonctionnement du procédé. [30]

c. Les canalisations et les vannes

Les réseaux de canalisations et les différents systèmes de vannes permettent d'assurer la circulation de l'eau entre les différentes étapes du traitement, depuis le prétraitement jusqu'au post-traitement. [30]

d. La salle de contrôle

La salle de contrôle permet de surveiller et de gérer les différents paramètres de fonctionnement de la station. Elle contribue au suivi des équipements et à la conduite des opérations de production. [30]

e. Le laboratoire

Le laboratoire est destiné au contrôle de la qualité de l'eau produite. Il permet notamment de suivre différents paramètres physico-chimiques nécessaires à l'évaluation de la qualité de l'eau dessalée. [30]

f. Le post-traitement

Après le passage à travers les membranes d'osmose inverse, l'eau subit des opérations complémentaires, notamment la reminéralisation et la désinfection, afin de l'adapter aux exigences relatives à l'eau destinée à la consommation humaine. [30]



Figure II.11 : la station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf, wilaya d'Aïn Témouchent.

3. Présentation de la station de dessalement de Cap Blanc – Oran

3.1. Présentation générale

La station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc constitue une infrastructure majeure destinée à renforcer l'approvisionnement en eau potable dans la wilaya d'Oran et, plus largement, dans l'Ouest algérien. [35]

La station est implantée dans la commune d'Aïn El Kerma, dans la wilaya d'Oran, à proximité du littoral méditerranéen. Sa localisation permet d'assurer le prélèvement de l'eau de mer nécessaire au fonctionnement de l'installation. [35]

La construction de la station s'inscrit dans le cadre du programme national visant à renforcer la sécurité hydrique du pays. La station a été officiellement inaugurée le 20 février 2025. [35]

La capacité de production de la station est de 300 000 m³/jour. La technologie utilisée est celle de l'osmose inverse, qui permet de transformer l'eau de mer en eau dessalée grâce à un système de membranes semi-perméables. [32]

Tableau II.2 : Principales caractéristiques de la station de Cap Blanc [5][6]

Élément	**Information**
Nom	Station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc
Localisation	Commune d'Aïn El Kerma, wilaya d'Oran
Première pierre	Juin 2022
Mise en service progressive	Février 2025
Inauguration	20 février 2025
Capacité de production	300 000 m³/jour
Technologie	Osmose inverse
Réseau de distribution	Environ 48 km
Principale zone desservie	Wilaya d'Oran
Autres zones concernées	Plusieurs wilayas de l'Ouest algérien

3.2. Localisation et importance de la station

La station de Cap Blanc est implantée dans la partie occidentale de la wilaya d'Oran, sur le littoral méditerranéen. Sa proximité avec la mer constitue un facteur essentiel pour son fonctionnement, puisqu'elle permet le captage direct de l'eau de mer. [35]

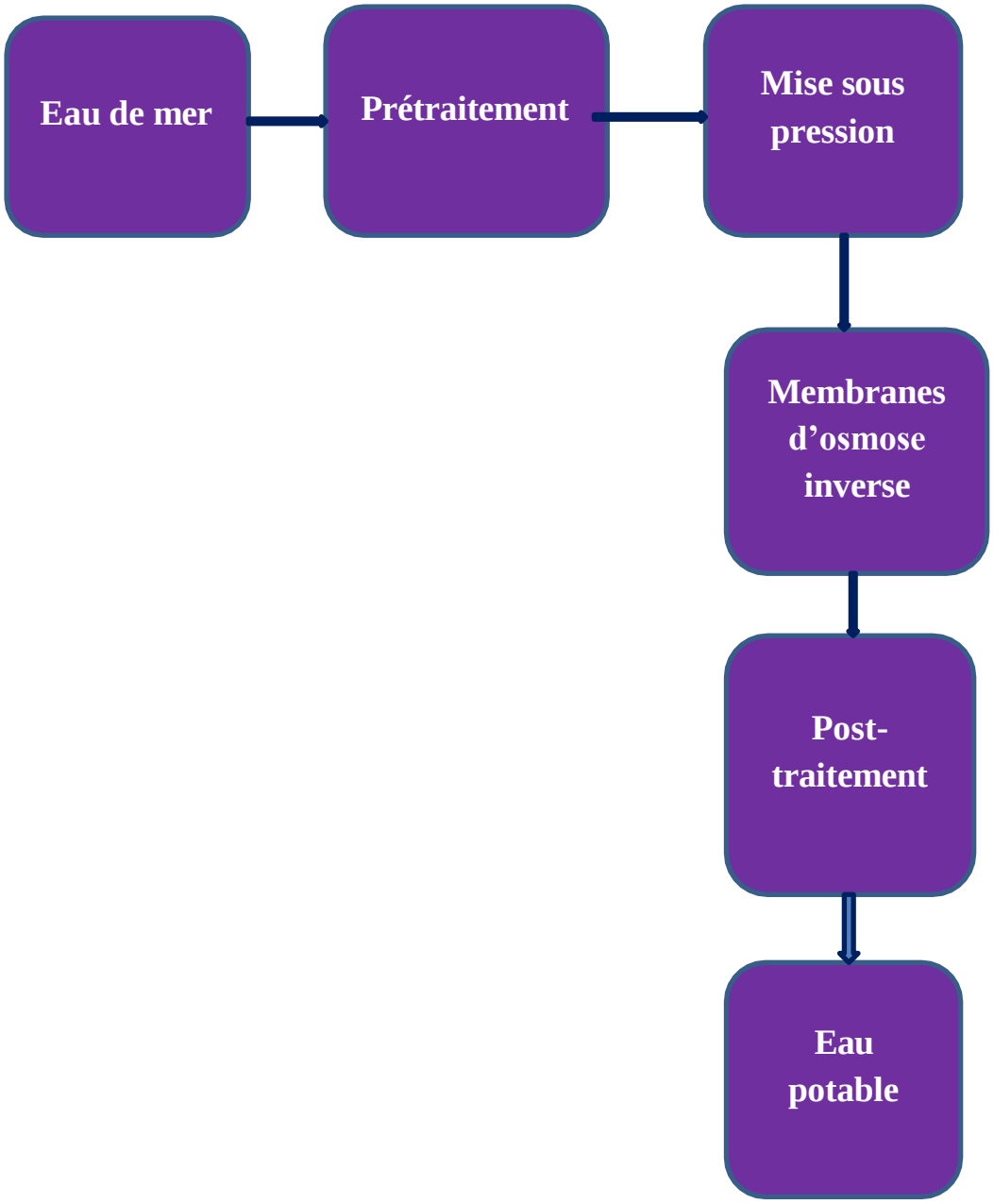
L'installation est associée à plusieurs ouvrages destinés au traitement, au stockage et à l'acheminement de l'eau produite. Le projet comprend notamment un réseau de distribution d'environ 48 km ainsi que des réservoirs de stockage et de régulation. [36]

La station joue un rôle particulièrement important dans le renforcement de l'alimentation en eau potable de la wilaya d'Oran. Sa capacité de production lui permet également de contribuer

à la sécurisation de l'approvisionnement en eau dans plusieurs régions de l'Ouest algérien. [35][36]

3.3. Technologie utilisée

La station utilise la technologie de l'osmose inverse. Le fonctionnement général du procédé peut être présenté comme suit : [34]



Au cours de ce processus, l'eau de mer est soumise à une pression élevée avant de traverser les membranes semi-perméables. Les membranes retiennent la majorité des sels dissous et permettent le passage de l'eau. [32]

Le procédé produit ainsi deux flux principaux :

- une eau dessalée destinée à l'alimentation en eau potable ;
- une saumure concentrée issue du rejet des sels et des substances retenues. [32]

3.4. Réseau de distribution

La station de Cap Blanc est associée à un réseau de distribution d'environ 48 km ainsi qu'à différents ouvrages de stockage et de régulation. [3]

Parmi les infrastructures associées figurent notamment des réservoirs destinés à assurer le stockage de l'eau produite avant son acheminement vers les zones de consommation. Le projet comprend notamment un réservoir de 50 000 m³ à Aïn Tassa et un réservoir de 30 000 m³ à Bousfer. [3]

La production de la station est principalement destinée à renforcer l'approvisionnement en eau potable de la wilaya d'Oran. La station peut également être raccordée au réseau de distribution desservant plusieurs wilayas de l'Ouest algérien. [32]

4. Présentation de la station de dessalement de Honaïne – Tlemcen

4.1. Présentation générale

La station de dessalement de Honaïne est implantée dans la commune de Honaïne, sur la plage de Tafsout, dans la wilaya de Tlemcen. Elle constitue une infrastructure importante pour la production d'eau potable dans le nord-ouest de l'Algérie. [23]



Figure II.12 : la station de dessalement de Honaïne – Tlemcen

La station est entrée en production en 2012 et dispose d'une capacité nominale de **200 000 m³/jour**. Elle utilise la technologie de l'osmose inverse pour traiter l'eau de mer et produire une eau destinée à la consommation humaine. [23]

L'UTE Desaladora Honaine, située à la plage de Tafsout, CW 104, au kilomètre 45, dans la commune de Honaïne, wilaya de Tlemcen, est gérée par **GEIDA IDAM HONAINE**.

La station de dessalement d'eau de mer de Honaïne s'étend sur une superficie de 78 ha et dispose d'une capacité de production de 200 000 m³/jour. Cette production est destinée au couloir Est de la ville et permettra d'alimenter une population estimée à 500 000 habitants. L'infrastructure a été réalisée par une entreprise espagnole, pour un coût global de 260 millions de dollars.

La mise en service de cette station, en juillet 2012, a contribué au renforcement de la sécurité hydrique de la wilaya de Tlemcen, en améliorant l'approvisionnement en eau potable et en permettant de constituer des réserves pour faire face aux périodes de sécheresse. Le taux de conversion de la station est de 47 %.

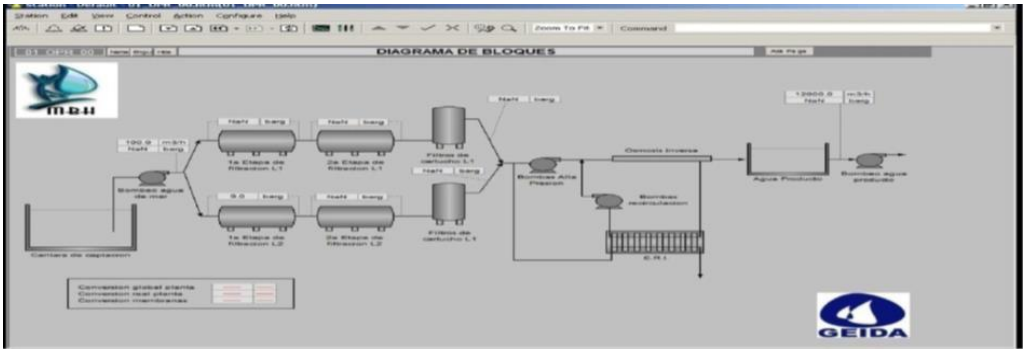


Figure II.13 : Schéma générale de la station de Honaine

Tableau II.3 : Principales caractéristiques de la station de Honaïne [23]

Élément	**Information**
Localisation	Honaïne, plage de Tafsout, wilaya de Tlemcen
Date de mise en service	12 juillet 2012
Capacité de production	200 000 m³/jour

Technologie	Osmose inverse
Type d'eau traitée	Eau de mer
Destination	Alimentation en eau potable
Zone desservie	Plusieurs communes de la wilaya de Tlemcen

4.2. Les principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaïne

Voici la retranscription exacte du tableau présent sur l'image :

Désignation	**Unités**	**Valeurs**
Production Continue Prévue	m^3/j	203.000
Nombre total d'unité installée	U	10
Température de travail minimum prévue	°C	18
Température de travail maximum prévue	°C	24
Type de membrane		A enroulement en spirale
Matériau de la couche active		Polyamide aromatique
Rejet minimum en sel	%	99.45
Nombre de membrane par cuve sous pression	U	07
Nombre d'étages	U	01
Débit spécifique maximum	$l/m^2/h$	13.96
Pression d'entrée dans les membranes	Bars	62
Pression de sortie des membranes	Bars	64.5
Pas N°1		
Nombre de membrane dans le premier étage /unité	U	1820
Nombre de Cuve sous pression dans le premier étage /unité	U	260
Modèle de membrane		SWC5
Châssis		
Nombre de tubes de pression /Colonne	U	12
Nombre de colonne	U	24
Nombre de vides pour tube de pression en réserve	U	28
Tuyaux de distribution dans le châssis		
Nombre de collecteurs verticaux de distribution	U	2

4.2.1 Le prétraitement

1) Dosage d'hypochlorite de sodium

Cette opération s'effectue au niveau de la tour de captage de l'eau de mer ou dans l'aspiration des pompes à eau de mer ou dans l'impulsion de ces dernières, au moyen de deux citernes d'hypochlorite de **140 m3** de capacité chacun. L'injection d'hypochlorite s'effectue à l'aide de **4+1** pompes de dosage, l'une d'elle étant en réserve. Pour le remplissage des réservoirs on installera une pompe de transvasement de **33 m3/h** de débit. L'ajout du produit s'effectuera dans la cuve de captage ou dans l'aspiration des pompes à eau de mer ou dans l'impulsion des pompes à eau de mer.

2) Dosage de chlorure ferrique

Deux autres citernes de **FeCl3** munies de **« 4 +1 »** pompes sont utilisées. Ce dosage a été utilisé dans la phase de mise en marche de l'installation.



Figure II.14 : Le captage de l'eau de mer

4.2.2. Système de filtration

1) Filtres presse :

48 filtres presse sont installés dans la première étape, et 32 filtres dans la seconde étape de filtration pour l'élimination d'autres particules présentes dans l'eau brute. Chaque filtre héberge à l'intérieur une plaque support équipée des buses correspondantes sur lesquelles on situe le lit filtrant. Ils ont installé un total de 50 buses par mètre carré de surface du filtre.

Les buses sont en plastique résistant à l'eau de mer. La disposition des filtres est cylindrique horizontale avec des fonds de type korboggen.

Les filtres sont de 3,7 m de diamètre et 11 m de longueur cylindrique, ce qui équivaut à une surface efficace d'environ 40,31 m2. La vitesse de filtration en opération normale dans la première étape est de 9,4 m/h et dans la deuxième étape de 14 m/h. les filtres seront munis des buses de visite nécessaire pour leur inspection et entretien. Ils ont aussi des drainages, des aérations et l'instrumentation correspondante, ainsi qu'un jeu de vannes automatiques nécessaires pour effectuer l'opération de nettoyage et de mise en service d'une manière totalement automatique. En outre, on pourra modifier les temps de chacune des phases.

Dans les deux étapes on va utiliser deux couches de sable et l'anthracite de différente granulométrie pour réaliser deux coupes.

Dans la première étape de filtration on va employer :

- Dans la couche supérieure : 600 mm de hauteur de lit d'anthracite de 0,4-1,6 mm de taille effective.
- Dans la couche intermédiaire : 400 mm de hauteur de lit de sable de 0,4-0,8 mm de taille effective.
- Dans la couche inférieure : 100 mm de hauteur de lit de gravier 1,4-2,5 et 100 mm de hauteur de lit 4,0-8,0 de taille effective.

Dans la seconde étape de filtration on va employer

- Dans la couche supérieure : 700 mm de hauteur de lit de sable de 0 ,4-0 ,8 mm de taille.
- Dans la couche intermédiaire : 200 mm de hauteur de lit de granuler de 0,55 mm de taille effective et 1,4 de coefficient d'uniformité
- Dans la couche inférieure : 100 mm de hauteur de lit de gravier 2 mm de taille effective et 1,4 de coefficient d'uniformité [27].



Figure II.15 : Les filtres à sable

2) Nettoyage des filtres

L'objectif de ce système est de nettoyer les filtres de la saleté qu'ils ont retirée de l'eau de mer et qui provoque que la perte de charge augmente dans le filtre. Comme tous les filtres de chacune des étapes, ils sont connectés à un collecteur commun de sortie, la pression différentielle pour tous les filtres d'une même étape est identique, c'est pour cela que cette valeur n'est pas, en principe, celle que l'on doit prendre comme critère de nettoyage d'un filtre.

Pour cette raison, un plus grand encrassement d'un filtre se traduit par un plus petit passage de débit d'eau de mer à travers le filtre, c'est le paramètre qui nous indiquera l'état d'encrassement d'un filtre. Les critères de nettoyage sont les suivants **:**

Si la pression différentielle entre l'entrée et la sortie est supérieure ou égale à **0,7 bars**, on doit nettoyer tous les filtres, en commençant par celui où passe le plus petit débit et en continuant avec tous les autres dans le sens du plus petit au plus grand débit. Après le nettoyage la perte de charge sera inférieure à **0,25 bars**. Il faut contrôler que la pression dans l'aspiration des turbopompes pendant le procédé n'est pas inférieure à **2 bars** car dans ce cas, un déclenchement se produira dans l'usine.

Si la pression différentielle est inférieure à **0,7 bars** mais le débit dans un filtre est de **80 %** du débit qui passe par le filtre de plus grand débit, il faut effectuer un nettoyage du filtre où passe le moins d'eau.
Le nettoyage des filtres sera effectué avec de la saumure provenant de l'usine de dessalement par trois pompes centrifuges, l'une d'elle étant en service. Le débit des pompes est suffisant pour que la vitesse de nettoyage soit de **46 m/h**, ce qui est approprié pour offrir un nettoyage efficace. En plus de l'eau de nettoyage grâce aux pompes décrites, nous disposerons de deux souffleuses de **2,109 Nm 3/h** chacune, une opérationnelle et autre en réserve. L'intégration du groupe soufflant permet d'assurer un nettoyage efficace. Le groupe soufflant dispose de son propre filtre à air, d'un silencieux, de vannes de sécurité et d'isolement, ainsi que des sections de canalisation avec manomètres et accessoires correspondants.

Pour abriter le matériel de nettoyage des filtres, nous projetons un bâtiment où se trouvent :

- **3** pompes de nettoyage
- **3** soufflantes
- Une salle de tableaux électriques [27].

3) Filtres cartouche

L'eau filtrée des filtres presseurs est envoyée au procédé de microfiltration par des filtres à cartouche avec un dosage de métabisulfite de sodium (deux citernes) et deux citernes d'anticristant pour empêcher la formation de calcaire avant l'entrée de l'eau filtrée dans les filtres à cartouche.
Les filtres à cartouche sont équipés de cartouche de polypropylène de filtrage en profondeur avec un pouvoir de coupure de **15** microns absolus, avec un efficacité dans le remuage de particules de **99,6 %,** avant et après les filtres à cartouche on installera des prises d'échantillon de SDI de l'eau, afin de déterminer l'efficacité du filtrage et la qualité de l'eau avant d'entrer dans les membranes. Le changement des cartouches des filtres est une opération manuelle.[28]



Figure II.16 : Les filtres à cartouche

4.2.3. L'osmose inverse

Les membranes doivent accomplir une série de conditions :

- Résister aux pressions auxquelles on va soumettre la solution pour invertir le processus.
- Suffisamment perméable à l'eau pour fournir un flux élevé.
- Rejeter un pourcentage élevé de sels pour obtenir un produit de qualité.

1) Châssis à membrane, pompe à haute pression, pompe de recirculation et système d'échange de pression.

La conception réalisée de l'usine de désalinisation correspond à un pas d'une étape, en installant pour chaque châssis **222** module de **7** éléments de type **SWC5** max de hydranautics. L'usine est constituée de dix lignes, la capacité de production nominale de chacune étant de **20 300 m3/jour**. Le facteur de conversion de l'usine est de **47 %**.[28]



Figure II.17: L'osmose inverse

Le système d'osmose inverse a été conçu pour pouvoir travailler avec une pression et un débit constant, c'est pourquoi on a incorporé un variateur de vitesse dans les pompes de recirculation et une vanne de contrôle à la sortie du produit de membranes. De cette manière, on optimise énergétiquement le fonctionnement du groupe pompe à haute pression, des systèmes d'échange de pression et de la pompe de recirculation. Le fonctionnement s'adapte aux variations de température de l'eau de mer et ou aux variations d'encrassement des membranes.

Les opérations de déplacement et de nettoyage chimique des châssis à membranes sont des opérations manuelles. Les pompes de déplacement et de nettoyage chimique sont identiques, de manière à pouvoir être utilisées indifféremment **(2+1)**. Le matériel de nettoyage chimique est employé lorsque l'on atteint un encrassement visible dans les membranes, ou bien lorsqu'un nettoyage est nécessaire pour un type de contamination spécifique. Il est constitué de deux réservoirs d'accumulation de **100+100 m3** dans lesquelles est dissous le réactif approprie pour éliminer l'encrassement des membranes.

A cause du volume nécessaire au nettoyage, l'agitation se fait grâce à deux pompes qui font circuler le réactif plusieurs fois à l'intérieur de la membrane. Il y a en outre des résistances électriques de chauffage dans la recirculation, un thermomètre, un **pH** mètre et dans la citerne une mesure visuelle du niveau et une alarme de niveau maximal et minimal.

4.3. Zone alimentée

La station de Honaïne contribue à l'approvisionnement en eau potable de plusieurs communes de la wilaya de Tlemcen. Sa production participe notamment à la couverture des besoins en eau des principales agglomérations du Grand-Tlemcen, notamment Tlemcen, Mansourah et Chetouane. [16]

La station constitue ainsi un élément important du système d'alimentation en eau potable de la wilaya de Tlemcen, particulièrement dans un contexte caractérisé par la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement. [16]

4.4. Technologie et fonctionnement

Comme les stations de Chatt El Hilal et de Cap Blanc, la station de Honaïne utilise l'osmose inverse. [23][16]

Le procédé comprend plusieurs étapes successives : le captage de l'eau de mer, le prétraitement, la mise sous pression, le passage à travers les membranes d'osmose inverse, puis le post-traitement de l'eau produite. [16]

L'utilisation de cette technologie permet d'obtenir une eau dessalée répondant aux exigences nécessaires à son utilisation pour l'alimentation en eau potable, sous réserve du respect des opérations de traitement et de contrôle de qualité. [34]

Conclusion

L'étude des stations de Chatt El Hilal, Cap Blanc et Honaïne permet de mettre en évidence l'importance du dessalement de l'eau de mer dans la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable dans l'Ouest algérien. [3]

Les trois stations présentent une caractéristique technique commune, à savoir l'utilisation de l'osmose inverse. Elles se distinguent cependant par leur localisation, leur période de mise en service et leur capacité de production. La station de Cap Blanc se caractérise notamment par une capacité de production de 300 000 m^3/jour, tandis que les stations de Chatt El Hilal et de Honaïne disposent chacune d'une capacité de 200 000 m^3/jour. [16]

Ces infrastructures contribuent à diversifier les ressources hydriques et à répondre aux besoins croissants des populations. Leur fonctionnement nécessite néanmoins un suivi technique permanent, une maîtrise de la consommation énergétique, un contrôle régulier de la qualité de l'eau ainsi qu'une gestion appropriée des rejets issus du processus de dessalement. [32]

Ainsi, l'analyse comparative réalisée dans ce chapitre constitue une base permettant d'aborder, dans la suite de l'étude, les aspects techniques, énergétiques, environnementaux et économiques liés au fonctionnement des stations de dessalement étudiées.

Chapitre III :

Méthodologie, résultats et discussions

Introduction

Dans le cadre de cette étude, une analyse comparative de trois stations de dessalement d'eau de mer implantées dans l'Ouest algérien a été réalisée. Les stations retenues sont la station de Béni Saf Chatt El Hilal (BWC), située dans la wilaya d'Aïn Témouchent, la station de Cap Blanc, située dans la wilaya d'Oran, et la station de Honaïne, située dans la wilaya de Tlemcen.

Le choix de ces trois installations permet de comparer des stations appartenant à différentes générations du programme algérien de dessalement, tout en présentant une caractéristique technologique commune : le recours au procédé d'osmose inverse.

L'étude comparative porte sur plusieurs paramètres techniques et opérationnels, notamment la capacité nominale, la production d'eau dessalée, la technologie utilisée, le taux de récupération ou de conversion, la consommation énergétique, la disponibilité, la maintenance ainsi que les caractéristiques de conception et les acteurs impliqués dans la réalisation des installations.

1. Matériels et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

L'étude porte sur trois stations de dessalement implantées dans l'Ouest algérien :

- La station de Béni Saf – Chatt El Hilal, dans la wilaya d'Aïn Témouchent ;
- La station de Cap Blanc, dans la wilaya d'Oran ;
- La station de Honaïne, dans la wilaya de Tlemcen.

Ces trois stations participent à la production d'eau potable destinée à renforcer l'alimentation en eau des populations de l'Ouest algérien.

La station de Chatt El Hilal dispose d'une capacité de production de **200 000 m³/jour** et est exploitée depuis les années 2010. SONATRACH indique qu'elle a franchi le seuil d'un milliard de mètres cubes d'eau dessalée cumulés en juillet 2025. **[34]**

La station de Honaïne possède également une capacité de **200 000 m³/jour**. Elle comprend notamment dix racks d'osmose inverse et 15 540 membranes, avec un taux de conversion annoncé de 45 %. Sacyr

La station de Cap Blanc représente une infrastructure de génération plus récente, avec une capacité nominale de **300 000 m³/jour**. Elle a été inaugurée en février 2025. **[34]**

Tableau III.1 : Stations retenues pour l'étude comparative

Station	Wilaya	Capacité nominale	Technologie
Béni Saf – Chatt El Hilal	Aïn Témouchent	200 000 m³/j	Osmose inverse
Honaïne	Tlemcen	200 000 m³/j	Osmose inverse
Cap Blanc	Oran	300 000 m³/j	Osmose inverse

1.2. Méthode de collecte des données

La collecte des données constitue une étape essentielle de la présente étude. Elle a été réalisée à partir de plusieurs sources complémentaires afin de disposer d'informations suffisamment diversifiées pour effectuer l'analyse comparative. Les informations recueillies proviennent de sources diverses : documents institutionnels, rapports techniques, articles scientifiques, mémoires universitaires, rapports de stage et informations collectées lors du stage effectué auprès de la Direction des Ressources en Eau de la wilaya. Cette diversité des sources nécessite la vérification et la classification des données avant leur utilisation dans l'analyse comparative.

1.2.1. Collecte des données au cours du stage

Une partie importante des informations utilisées dans ce travail a été recueillie au cours d'un stage effectué au niveau de la Direction des Ressources en Eau de la wilaya.

Ce stage a permis de recueillir des informations générales concernant :

- Les stations de dessalement de la région ;
- Leurs capacités de production ;
- Leur rôle dans l'alimentation en eau potable ;
- Les zones desservies ;
- Les caractéristiques générales des installations ;

- Les données disponibles relatives à l'exploitation ;
- Les informations relatives au fonctionnement du système d'alimentation en eau potable ;
- Les documents techniques et administratifs accessibles au niveau de la direction.

1.2.2. Exploitation des mémoires et rapports de stage

Une deuxième source d'information a été constituée par l'exploitation de mémoires universitaires, rapports de stage et travaux de recherche portant sur les stations de dessalement de l'Ouest algérien.

Ces documents ont permis de compléter les informations relatives notamment :

- À la conception des stations ;
- Aux différentes étapes du procédé de dessalement ;
- Aux équipements ;
- Aux membranes d'osmose inverse ;
- Aux taux de conversion ;
- À la consommation énergétique ;
- Au prétraitement ;
- À la reminéralisation ;
- Aux rejets de saumure ;
- Au fonctionnement des pompes hautes pression.

Par exemple, plusieurs travaux universitaires consacrés à Honaïne permettent de documenter la capacité de 200 000 m^3/jour et différents aspects du fonctionnement de cette station. **[4]**

1.2.3. Exploitation des publications scientifiques

Les données relatives aux performances énergétiques ont également été recherchées dans la littérature scientifique.

Une référence particulièrement utile est l'étude d'Adda, Naceur et Abbas (2016) consacrée à la modélisation et à l'optimisation de la consommation énergétique des stations d'osmose inverse en Algérie. Cette étude fournit notamment, pour Béni Saf, une consommation de **4,77 kWh/m³** dans une configuration d'exécution et une valeur de **2,27 kWh/m³** avec échangeur de pression dans le cadre étudié. **[4]**

Ces valeurs doivent cependant être considérées comme des données issues d'une étude scientifique et non comme des mesures actuelles de consommation électrique totale des stations.

1.2.4. Exploitation des documents institutionnels

Les informations ont également été vérifiées à partir des publications des organismes institutionnels et des exploitants.

Les principales sources utilisées sont notamment :

1.2.3. Exploitation des publications scientifiques

Une référence particulièrement utile est l'étude de **Adda, Naceur et Abbas (2016)** consacrée à la modélisation et à l'optimisation de la consommation énergétique des stations d'osmose inverse en Algérie. Cette étude fournit notamment, pour Béni Saf, une consommation de **4,77 kWh/m³** dans une configuration d'exécution et une valeur de **2,27 kWh/m³** avec échangeur de pression dans le cadre étudié. **[4]**

Cette catégorie de sources a été privilégiée pour les données relatives à la capacité nominale, à la mise en service et aux informations officielles concernant les stations.

- SONATRACH ;
- Algerian Energy Company (AEC) ;
- Ministère de l'Hydraulique ;
- Ministère de l'Énergie ;
- Direction des Ressources en Eau ;
- Documents techniques disponibles auprès des structures concernées.

Par exemple, SONATRACH confirme officiellement la capacité de 200 000 m³/j de Chatt El Hilal ainsi que son exploitation depuis 2009. Sonatrach

1.3. Paramètres retenus pour la comparaison

Afin d'éviter une comparaison limitée à la seule capacité de production, plusieurs paramètres ont été retenus.

Paramètres de conception

- Localisation ;
- Année de conception et de réalisation lorsque disponible ;
- Capacité nominale ;
- Nombre de lignes ou racks d'osmose inverse ;
- Nombre de membranes ;
- Système de captage ;
- Système de prétraitement ;
- Système de récupération d'énergie ;
- Post-traitement et reminéralisation ;
- Réservoirs de stockage.

Paramètres relatifs aux constructeurs et exploitants

- Maître d'ouvrage ;
- Maître d'œuvre lorsqu'il est identifié ;
- Constructeur ou groupement constructeur ;
- Partenaires industriels ;
- Exploitant ;
- Modèle contractuel lorsqu'il est documenté.

Paramètres de fonctionnement

- Production nominale ;
- Production réelle disponible ;
- Taux de réalisation ;
- Taux de récupération ou de conversion ;
- Disponibilité ;
- Consommation énergétique spécifique ;
- Maintenance.

Paramètres environnementaux

- Production de saumure ;
- Gestion des rejets ;
- Prétraitement ;
- Qualité de l'eau produite ;
- Reminéralisation.

1.4. Méthode de traitement des données

Les données collectées ont été regroupées dans des tableaux comparatifs.

Lorsque la production réelle et la capacité nominale sont disponibles pour une même période, le taux de réalisation peut être calculé selon la relation :

$$\boldsymbol{T_r = \frac{P_r}{P_n} \times 100}$$

avec :

- $\boldsymbol{T_r}$**:** taux de réalisation (%) ;
- $\boldsymbol{P_r}$**:** production réelle (m^3/j) ;
- $\boldsymbol{P_n}$**:** production nominale (m^3/j).

Pour Béni Saf, par exemple :

$$T_r = \frac{178\,667}{200\,000} \times 100$$

$$T_r \approx 89,3\%$$

Cependant, ce résultat correspond à la période associée à la donnée de production et ne doit pas être présenté comme le taux actuel de fonctionnement de la station.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques générales des stations

Tableau III.2 : Caractéristiques générales des stations étudiées

Paramètre	Béni Saf – Chatt El Hilal	Honaïne	Cap Blanc
Wilaya	Aïn Témouchent	Tlemcen	Oran
Technologie	Osmose inverse	Osmose inverse	Osmose inverse
Capacité	200 000 m³/j	200 000 m³/j	300 000 m³/j
Mise en service	2009/2010 selon les sources	2011/2012 selon la référence considérée	2025
Nombre de racks	10 unités	10 racks	/
Nombre de membranes	À compléter	15 540	/
Taux de conversion	Donnée d'étude	45 %	Non publié
Disponibilité annuelle	Non publiée	Non publiée	Non publiée

2.2. Paramètre de conception et constructeurs

Cette partie est particulièrement intéressante, car elle permet de comparer non seulement la capacité des stations, mais également leur mode de conception et de réalisation.

Tableau III.3 : Conception, réalisation et exploitation des stations

Paramètre	**Béni Saf – Chatt El Hilal**	**Honaïne**	**Cap Blanc**
Maître d'ouvrage / partenaire public	AEC / SONATRACH	SONATRACH / AEC	SONATRACH / AEC
Technologie	Osmose inverse	Osmose inverse	Osmose inverse
Capacité	200 000 m³/j	200 000 m³/j	300 000 m³/j
Conception / réalisation	Groupement GEIDA / Cobra / Tedagua	Groupement GEIDA	GCB
Exploitation	Beni Saf Water Company / groupe SONATRACH	Sacyr Agua / concession	Structure d'exploitation du projet

2.3. Résultats relatifs à la capacité de production

Les trois stations présentent des capacités importantes, mais deux niveaux de capacité sont observés.

Béni Saf et Honaïne disposent chacune d'une capacité nominale de **200 000 m³/jour**, tandis que Cap Blanc est conçue pour une capacité supérieure à **300 000 m³/jour**. **[32]**

La capacité nominale ne doit toutefois pas être assimilée systématiquement à la production réelle. Elle correspond à la capacité pour laquelle l'installation a été conçue.

2.4. Résultats relatifs à la production réelle

Tableau III.4 : Production documentée

Station	Capacité nominale	Production documentée	Période	Taux calculé
Béni Saf	200 000 m³/j	178 667 m³/j	2015	89,3 %
Honaïne	200 000 m³/j	/	—	—
Cap Blanc	300 000 m³/j	/	2025/2026	—

2.5. Résultats relatifs au taux de conversion

Tableau III.5 : Taux de conversion

Station	Taux de conversion/récupération	Source
Béni Saf	≈ 47 % dans l'étude considérée	Étude scientifique
Honaïne	45 %	Donnée technique Sacyr
Cap Blanc	Non publié dans les sources retenues	—

2.6. Résultats relatifs à la consommation énergétique

Tableau III.6 : Consommation énergétique documentée

Station	Consommation	Avec récupération d'énergie	Nature de la donnée
Béni Saf	4,77 kWh/m³	2,27 kWh/m³	Étude scientifique
Honaïne	≈ 2 kWh/m³	À préciser	Étude
Cap Blanc	Non publiée	Non publiée	—

L'étude d'Adda et al. montre notamment, pour Béni Saf, une valeur d'exécution de 4,77 kWh/m³ sans récupération d'énergie et de 2,27 kWh/m³ avec échangeur de pression dans le cadre de l'étude.

3. Discussion

3.1. Discussion sur la conception des stations

La comparaison des trois installations montre une évolution dans la conception des stations de dessalement en Algérie.

Béni Saf et Honaïne appartiennent à une génération antérieure du programme national de dessalement et présentent une capacité de 200 000 m³/jour. Cap Blanc appartient à une génération plus récente d'installations de grande capacité, avec une capacité de 300 000 m³/jour.

Cette évolution traduit une augmentation de la taille unitaire des projets de dessalement. Elle s'accompagne également d'une évolution des systèmes de commande, des équipements de récupération d'énergie, des membranes et des dispositifs de traitement.

Il convient toutefois de ne pas conclure automatiquement qu'une station plus récente est techniquement plus performante.

3.2. Discussion sur les constructeurs et les modèles de réalisation

Les stations étudiées ne correspondent pas nécessairement au même modèle contractuel. Certaines installations ont été développées dans le cadre de partenariats avec des groupes industriels internationaux, alors que les projets récents accordent une place importante aux entreprises algériennes et aux filiales du groupe SONATRACH.

Pour Cap Blanc, les documents de projet disponibles montrent notamment l'implication de GCB dans la réalisation du projet et l'existence de plusieurs intervenants techniques.

Pour Honaïne, la concession et l'exploitation sont documentées par Sacyr, qui fournit également des informations détaillées sur la configuration technique de la station.

Cette comparaison permet donc de distinguer trois notions qu'il faudra conserver dans votre mémoire :

Conception → réalisation/constructeur → exploitation.

3.3. Discussion sur les performances énergétiques

La consommation énergétique apparaît comme l'un des paramètres déterminants du fonctionnement des stations d'osmose inverse.

Les données disponibles montrent que la récupération d'énergie peut réduire sensiblement la consommation spécifique. Pour Béni Saf, l'étude d'Adda et al. présente une diminution de 4,77 à 2,27 kWh/m³ dans la configuration étudiée.

Cette différence souligne l'importance des systèmes de récupération de l'énergie contenue dans le concentrat à haute pression.

Toutefois, la comparaison entre Béni Saf et Honaïne doit rester prudente, car les valeurs disponibles ne sont pas nécessairement obtenues avec les mêmes méthodes de mesure.

3.4. Discussion sur la production

La comparaison de la production montre également l'importance de distinguer :

- La capacité nominale ;
- La production réelle ;
- La production moyenne ;
- La production cumulée ;
- Le taux de réalisation.

Cette distinction est essentielle dans le cas de Cap Blanc, car la capacité nominale de 300 000 m³/jour ne signifie pas que cette quantité a été produite chaque jour depuis l'inauguration.

De même, le milliard de mètres cubes produit par Chatt El Hilal constitue une production cumulée sur une longue période et ne peut pas être comparé directement à une production cumulée d'une station récemment mise en service. SONATRACH indique que Chatt El Hilal a franchi ce seuil le 30 juillet 2025 depuis sa mise en service.

4. Limites de l'étude

L'une des principales limites de cette étude concerne l'hétérogénéité des données disponibles.

Les trois stations ne disposent pas du même niveau de documentation publique. Certaines données sont issues de mesures d'exploitation, d'autres d'études scientifiques ou universitaires, tandis que certaines informations ont été recueillies lors du stage.

Les périodes de référence sont également différentes. Il n'est donc pas possible de considérer toutes les valeurs comme directement comparables.

Une autre limite concerne les informations économiques. Les coûts détaillés de maintenance, les coûts énergétiques annuels, les coûts de renouvellement des membranes et les coûts complets d'exploitation ne sont pas publiés de manière homogène pour les trois stations.

Enfin, certaines informations relatives aux constructeurs et aux contrats de réalisation nécessitent l'accès aux dossiers techniques et contractuels des projets. Il est donc préférable de présenter uniquement les intervenants pouvant être vérifiés par une source documentaire.

5. RAPPORT D'ANALYSE

Comparaison multicritère des trois stations de dessalement d'eau de mer :

Application de la méthode TOPSIS avec le logiciel
« TOPSIS Evaluator – Integrated Desalination Plant Decision Support System »

Élément	**Description**
Alternatives étudiées	Station de dessalement de Beni Saf ; Station de dessalement de Cap Blanc ; Station de dessalement de Honaïne
Méthode	TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)
Nombre de critères	5
Pondération utilisée	0,20 pour chacun des cinq critères
Résultat principal	Cap Blanc classée 1re avec un coefficient de proximité de 0,556282

Résumé :
Ce rapport présente l'exploitation d'un outil informatique développé pour l'évaluation multicritère de stations de dessalement. Le logiciel, dénommé **TOPSIS Evaluator**, permet d'intégrer plusieurs critères techniques et économiques, de leur attribuer des poids, de traiter simultanément plusieurs stations et de produire un classement fondé sur la méthode TOPSIS. L'application présentée ici porte sur trois stations : Beni Saf, Cap Blanc et Honaïne.

Avec la configuration visible dans l'interface, les cinq critères reçoivent chacun un poids de 20 %. Le calcul aboutit aux coefficients de proximité suivants : 0,556282 pour Cap Blanc, 0,451116 pour Beni Saf et 0,443718 pour Honaïne. Cap Blanc constitue donc l'alternative la plus proche de la solution idéale selon les données et la pondération utilisées.

Il faut toutefois distinguer clairement un classement multicritère d'un jugement absolu sur la performance réelle des installations : le résultat dépend de la qualité des données introduites, de la définition bénéfice/coût de chaque critère et des poids retenus.

5.1. Fonctionnement général du programme

Le programme a été conçu comme un système d'aide à la décision destiné à transformer des données hétérogènes relatives aux stations de dessalement en un résultat synthétique et interprétable. L'idée centrale est de ne pas juger une station à partir d'un seul indicateur, mais de combiner simultanément plusieurs dimensions de sa performance.

5.1.1. Architecture fonctionnelle observée

- Gestion des projets : création, ouverture et sauvegarde d'un projet d'évaluation.
- Gestion des stations : ajout, modification et suppression des alternatives étudiées.
- Importation des données : récupération de données provenant de la base de données.
- Définition des poids : réglage de l'importance relative des critères avant normalisation.
- Calcul TOPSIS : génération des coefficients de proximité et du classement.
- Visualisation : présentation des résultats sous forme de tableau et de graphique.
- Composante cartographique : localisation des stations sur une carte et export GeoJSON.

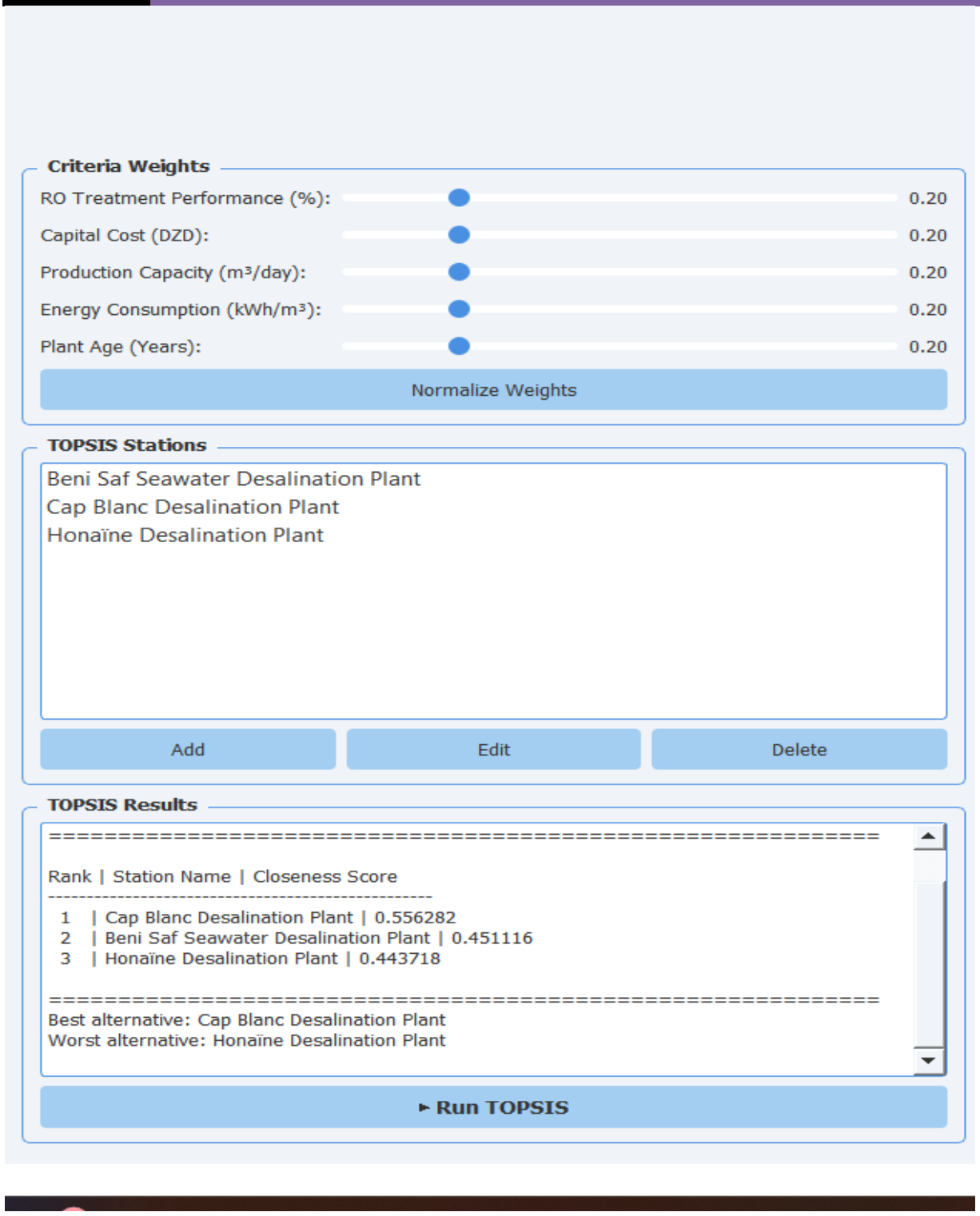


Figure III.1 : Interface de TOPSIS Evaluator montrant les critères, les poids, les stations et le classement.

L'interface visible montre cinq critères : performance du traitement par osmose inverse (RO Treatment Performance), coût d'investissement (Capital Cost), capacité de production (Production Capacity), consommation énergétique (Energy Consumption) et âge de la station (Plant Age). Chaque critère est associé à un curseur de pondération et la configuration affichée attribue 0,20 à chacun.

5.2. Méthode TOPSIS intégrée au logiciel

TOPSIS est une méthode d'analyse multicritère fondée sur un principe simple : la meilleure alternative est celle qui se trouve simultanément la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale. Cette approche est particulièrement adaptée aux stations de dessalement, car une installation peut être excellente sur un critère et moins favorable sur un autre.

5.2.1. Étape 1 — Construction de la matrice de décision

Le programme commence par organiser les valeurs des stations dans une matrice de décision. Chaque ligne correspond à une station et chaque colonne à un critère. Pour l'étude présentée, les cinq colonnes sont les suivantes :

Tableau III.8 : Critères d'évaluation, types conceptuels et poids attribués pour l'analyse multicritère des stations de dessalement

Critère	Type conceptuel	Poids affiché
Performance RO (%)	Bénéfice	0,20
Coût d'investissement (DZD)	Coût	0,20
Capacité de production (m^3/j)	Bénéfice	0,20
Consommation énergétique (kWh/m^3)	Coût	0,20
Âge de la station (années)	Coût	0,20

5.2.2. Étape 2 — Normalisation

Les critères sont exprimés dans des unités différentes : pourcentage, dinar algérien, m^3/j, kWh/m^3 et années. Une comparaison directe serait donc mathématiquement incorrecte. TOPSIS normalise les valeurs afin de les rendre comparables. Une forme classique de normalisation vectorielle est :

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{(\Sigma_i\, x_{ij}^2)}$$

Cette opération supprime l'effet des unités de mesure. Une fois la matrice normalisée, les poids sont appliqués pour obtenir la matrice pondérée.

5.2.3. Étape 3 — Solutions idéale et anti-idéale

Pour les critères de bénéfice, une valeur élevée est favorable ; pour les critères de coût, une valeur faible est favorable. Le programme identifie alors une solution idéale A^+ et une solution anti-idéale A^-. Ces deux références permettent de mesurer la position relative de chaque station.

5.2.4. Étape 4 — Distances et coefficient de proximité

Pour chaque station, le logiciel calcule sa distance à la solution idéale et sa distance à la solution anti-idéale. Le coefficient de proximité est ensuite calculé selon le principe :

$$C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$$

Un coefficient proche de 1 indique une station plus proche de la solution idéale, tandis qu'un coefficient proche de 0 indique une proximité plus importante avec la solution anti-idéale.

5.3. Résultats obtenus avec TOPSIS Evaluator

Le calcul réalisé dans le logiciel fournit directement le classement suivant. Les valeurs ci-dessous sont celles visibles dans l'interface de résultats.

Tableau III.9 : Classement des stations de dessalement selon les coefficients de proximité et les écarts entre les rangs obtenus par l'analyse multicritère

Rang	Station	Coefficient de proximité	Écart au rang précédent
1	Cap Blanc	0,556282	—
2	Beni Saf	0,451116	0,105166
3	Honaïne	0,443718	0,007398

5.3.1. Lecture directe du classement

Cap Blanc arrive en première position avec un coefficient de 0,556282. Dans la configuration étudiée, elle représente donc l'alternative la plus proche de la solution idéale.

Beni Saf occupe la deuxième position avec 0,451116. Son score est inférieur à celui de Cap Blanc de 0,105166 point.

Honaïne est troisième avec 0,443718. La différence avec Beni Saf n'est que de 0,007398 point, ce qui traduit une compétition très serrée entre les deux dernières alternatives.

5.3.2. Comparaison quantitative des écarts

Tableau III.10: Comparaison quantitative des écarts

Comparaison	Écart absolu	Lecture
Cap Blanc – Beni Saf	0,105166	Écart important dans le classement
Cap Blanc – Honaïne	0,112564	Plus grand écart observé
Beni Saf – Honaïne	0,007398	Écart très faible

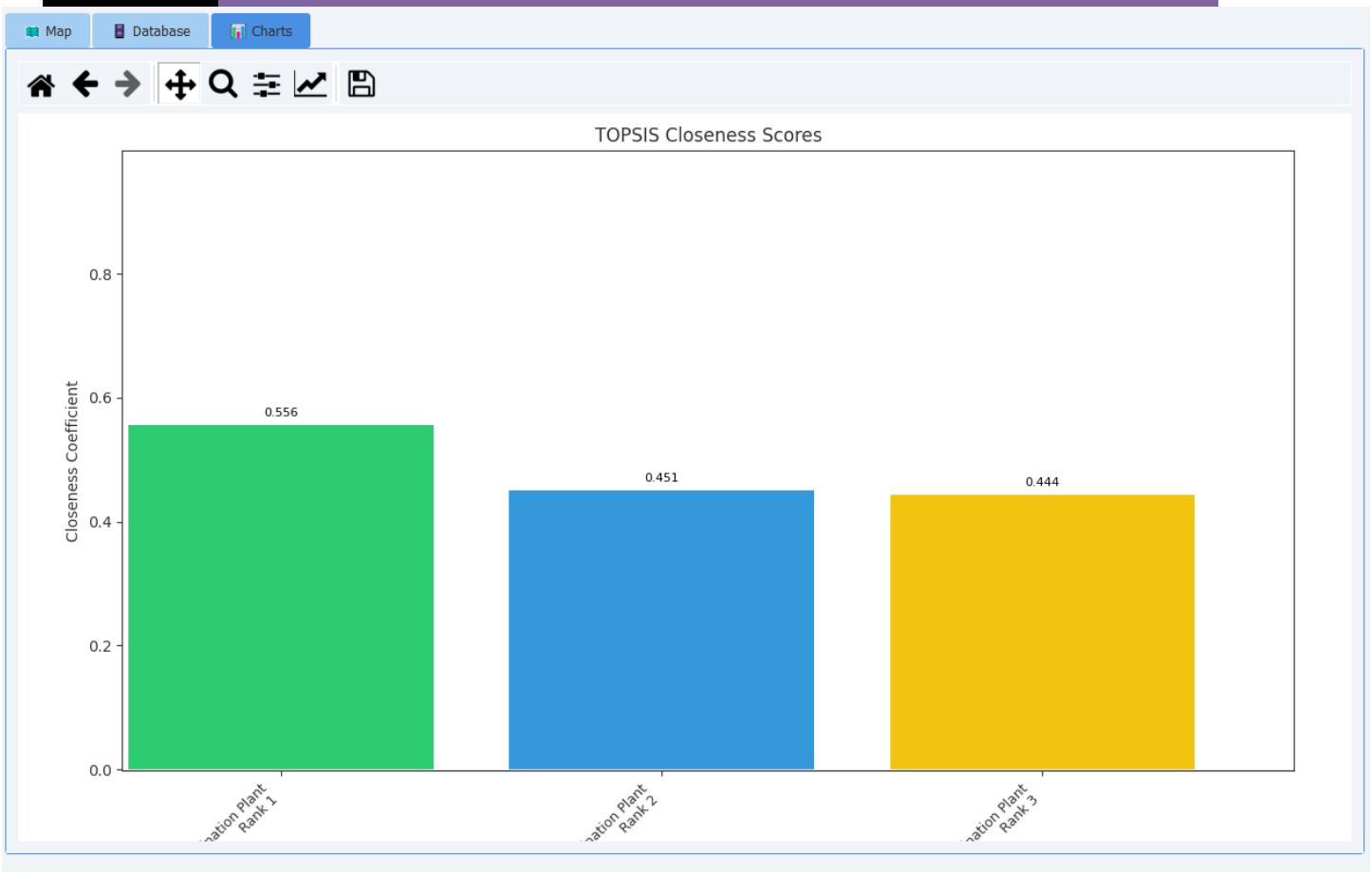


Figure III.2 : Graphique des coefficients de proximité produit par TOPSIS Evaluator.

Le graphique confirme visuellement le résultat numérique : la barre de Cap Blanc est nettement plus élevée, alors que Beni Saf et Honaïne présentent des hauteurs très proches.

5.4. Analyse comparative détaillée des trois stations

5.4.1. Cap Blanc : alternative classée première

Le coefficient 0,556282 place Cap Blanc au-dessus des deux autres stations. Ce résultat ne signifie pas que Cap Blanc possède nécessairement la meilleure valeur pour chacun des cinq critères. TOPSIS produit un compromis global : certaines performances peuvent être favorables alors que d'autres peuvent être moins favorables, mais la combinaison pondérée de l'ensemble conduit à la meilleure proximité avec la solution idéale.

L'écart de 0,105166 avec Beni Saf est suffisamment visible pour considérer que, dans la configuration actuelle, la première position n'est pas une simple égalité numérique. Toutefois, il serait excessif de transformer ce classement en affirmation absolue de supériorité sans examiner la matrice de données originale et réaliser une analyse de sensibilité.

5.4.2. Beni Saf : deuxième position

Beni Saf obtient 0,451116. La station reste relativement proche de la performance globale obtenue par Cap Blanc, mais son coefficient est inférieur de 0,105166. Le résultat indique donc un compromis moins favorable entre les critères considérés. Le logiciel permet d'identifier le classement, mais le seul coefficient final ne permet pas de déterminer lequel des cinq critères est responsable de l'écart : cette conclusion nécessite l'examen de la matrice de décision et des étapes intermédiaires du calcul.

5.4.3. Honaïne : troisième position, mais très proche de Beni Saf

Honaïne obtient 0,443718, soit seulement 0,007398 de moins que Beni Saf. Cette différence est faible par rapport à l'écart observé entre Cap Blanc et les deux autres stations. Il faut donc éviter de surinterpréter la différence entre les rangs 2 et 3. Une petite modification des données, des poids ou de la définition des critères pourrait potentiellement modifier leur ordre.

5.4.4. Synthèse comparative

Tableau III.11: Synthèse comparative des performances techniques, économiques et énergétiques des stations de dessalement de Cap Blanc, Béni Saf et Honaïne

Dimension d'analyse	**Cap Blanc**	**Beni Saf**	**Honaïne**
Rang TOPSIS	1	2	3
Coefficient	0,556282	0,451116	0,443718
Position relative	Meilleure	Intermédiaire	La plus faible
Distance de Cap Blanc	—	−0,105166	−0,112564
Différence avec Beni Saf	—	—	−0,007398

La conclusion la plus robuste à partir des captures est donc double : (1) Cap Blanc domine le classement multicritère dans la configuration utilisée ; (2) Beni Saf et Honaïne sont très proches, ce qui appelle une interprétation prudente de leur ordre.

5.5. Composante cartographique et intérêt pour l'aide à la décision

Le logiciel ne se limite pas au calcul TOPSIS. L'interface comporte également un module cartographique permettant de visualiser les stations de dessalement sous forme de marqueurs. La carte facilite le passage d'une analyse purement numérique à une lecture spatiale du système.

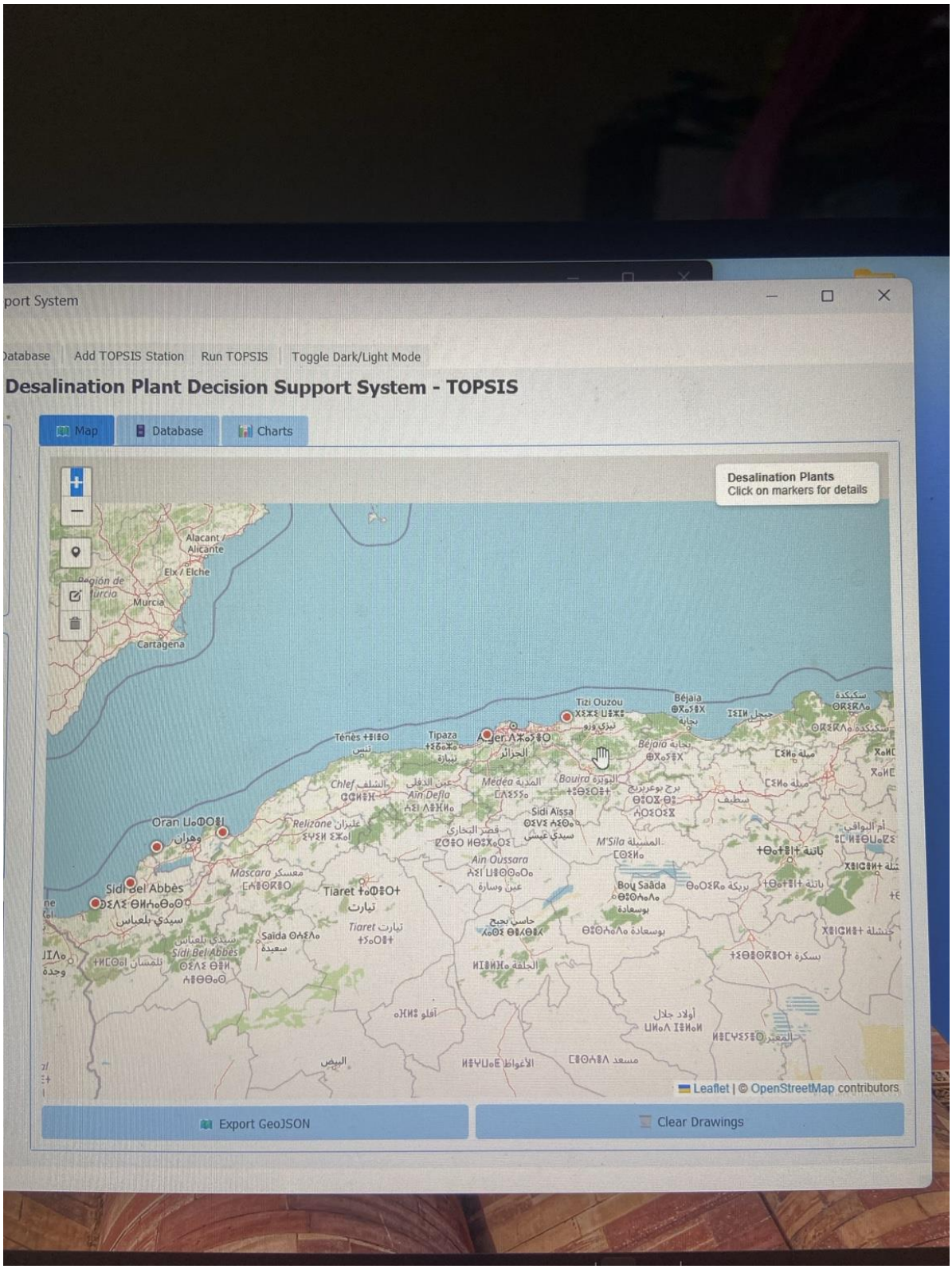
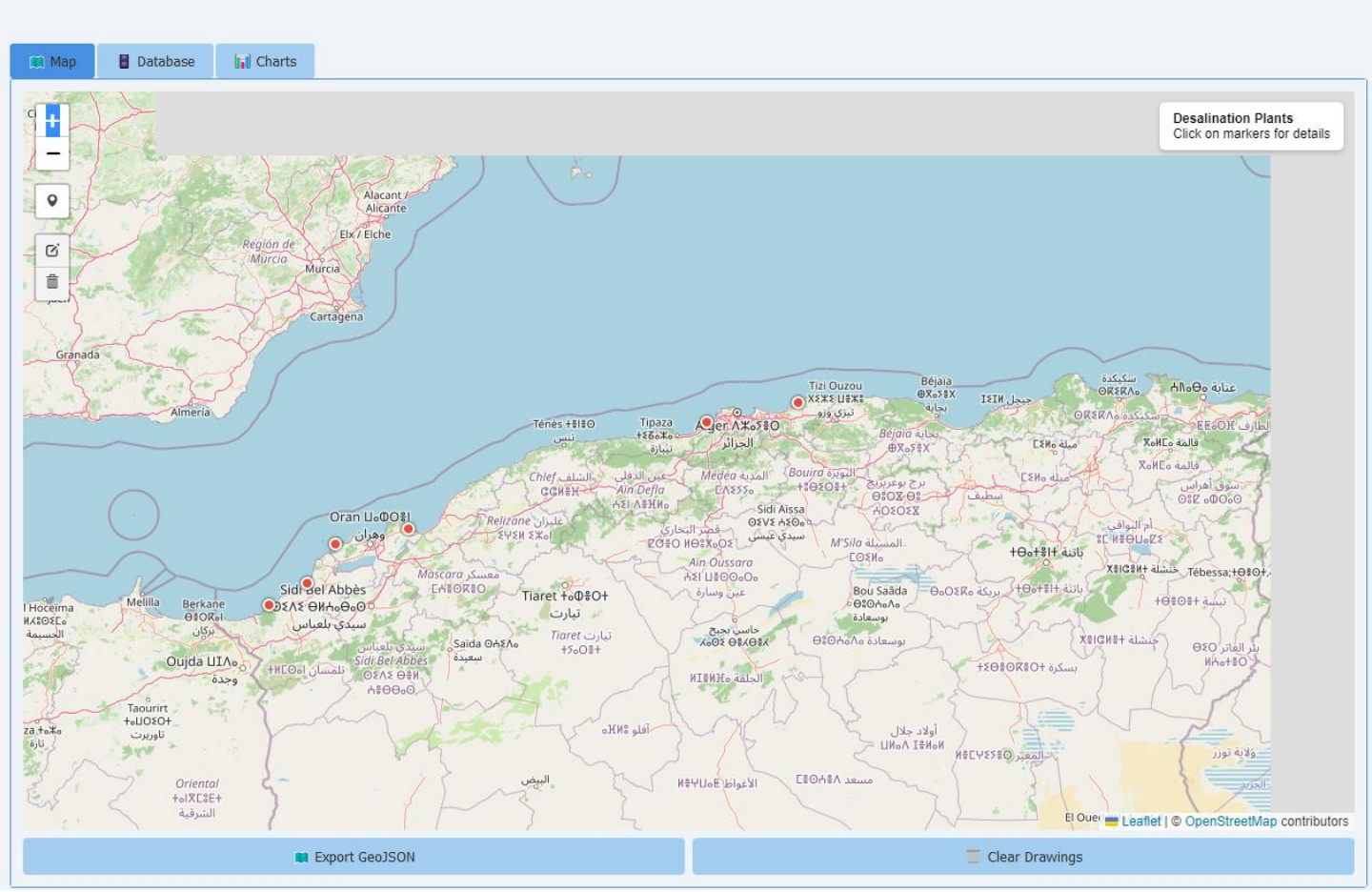


Figure III.3 : Module cartographique de TOPSIS Evaluator et localisation des stations enregistrées.



5.5.1. Apport de la carte

Elle permet de relier les résultats multicritères à la localisation géographique des installations.

Elle peut faciliter l'exploration de relations entre les stations, les territoires desservis et d'autres données spatiales disponibles dans une base SIG.

La présence d'une fonction d'export GeoJSON ouvre la possibilité d'intégrer les résultats dans d'autres environnements SIG ou plateformes de cartographie.

5.5.2. Complémentarité entre SIG et TOPSIS

La combinaison de la cartographie et de l'analyse multicritère constitue un point fort du système. Le SIG répond principalement à la question « où se trouve l'installation ? », tandis que TOPSIS répond à une question de préférence multicritère : « quelle alternative est la plus favorable selon les critères retenus ? ». L'intégration des deux permet donc une analyse plus riche qu'un simple tableau de classement.

5.5.3. Lecture prudente des résultats spatiaux

La carte ne modifie pas à elle seule le classement TOPSIS. Elle apporte un contexte géographique. Pour aller plus loin, il serait possible d'intégrer des critères spatiaux supplémentaires — distance aux zones de demande, disponibilité foncière, proximité des réseaux, contraintes environnementales ou distance aux infrastructures électriques — à condition de disposer de données fiables et de définir leur sens bénéfice/coût.

5.6. Discussion, limites et conclusions

5.6.1. Ce que le résultat permet réellement d'affirmer

Le résultat permet d'affirmer qu'avec les données introduites dans le programme et avec une pondération uniforme de 20 % pour chacun des cinq critères, Cap Blanc est l'alternative classée première par TOPSIS. Beni Saf est deuxième et Honaïne troisième. Cette conclusion est directement cohérente avec les coefficients calculés et affichés dans le logiciel.

5.6.2. Ce que le résultat ne permet pas d'affirmer

Le classement ne doit pas être présenté comme une preuve que Cap Blanc est « la meilleure station » dans tous les sens possibles. TOPSIS répond uniquement à la question définie par les critères, leurs poids, leurs orientations et les données utilisées. Si ces hypothèses changent, le classement peut changer.

- Les cinq poids sont égaux. Cette hypothèse est simple et transparente, mais elle n'est pas forcément la plus pertinente pour une décision réelle.
- Les captures fournies montrent les critères, les poids et les scores finaux, mais pas la matrice complète des valeurs brutes de chaque station. Une analyse scientifique complète doit conserver cette matrice comme donnée d'entrée traçable.
- Les critères doivent être correctement classés en bénéfice ou en coût. Une inversion de cette logique peut modifier fortement le résultat.
- Le classement devrait idéalement être accompagné d'une analyse de sensibilité des poids afin de vérifier si la première position de Cap Blanc est robuste.

5.6.3. Analyse de sensibilité recommandée

Pour renforcer la valeur scientifique du logiciel, une étape supplémentaire est recommandée : faire varier les poids autour de la configuration 20/20/20/20/20. Par exemple, plusieurs scénarios peuvent être testés : priorité à la performance RO, priorité à la consommation énergétique, priorité au coût, ou combinaison orientée vers la capacité de production. Si Cap Blanc reste première dans la majorité des scénarios raisonnables, la robustesse de la conclusion sera nettement plus forte.

5.7. Conclusion

L'application développée, TOPSIS Evaluator, constitue un outil d'aide à la décision pertinent pour structurer et automatiser la comparaison de stations de dessalement. Son intérêt réside dans la combinaison de plusieurs fonctions : gestion des alternatives, pondération des critères, calcul TOPSIS, classement, visualisation graphique et représentation cartographique.

L'étude des trois stations montre un classement clair : Cap Blanc obtient 0,556282 et occupe la première position, suivie de Beni Saf avec 0,451116 et de Honaïne avec 0,443718. L'écart entre Cap Blanc et les deux autres stations est significatif dans le cadre de cette configuration, tandis que la différence entre Beni Saf et Honaïne est très faible. Le résultat met donc en évidence une première alternative relativement distincte et un second groupe beaucoup plus serré.

La prochaine amélioration méthodologique la plus importante consiste à intégrer dans le rapport la matrice complète des données brutes, les valeurs normalisées, la matrice pondérée, les solutions idéale et anti-idéale ainsi que les distances S^+ et S^-. Cela rendrait le calcul entièrement traçable et permettrait de défendre le résultat devant un jury ou dans une publication scientifique.

Classement final : 1. Cap Blanc | 2. Beni Saf | 3. Honaïne

Conclusion

L'étude comparative des stations de Béni Saf–Chatt El Hilal, Honaïne et Cap Blanc montre que ces trois infrastructures reposent sur le procédé d'osmose inverse et participent au renforcement de l'approvisionnement en eau potable dans l'Ouest algérien.

La comparaison met en évidence des différences importantes en matière de capacité nominale, de conception, de période de réalisation, d'organisation des équipements et de modèle de réalisation. Béni Saf et Honaïne présentent une capacité de 200 000 m^3/jour, alors que Cap Blanc atteint 300 000 m^3/jour. Sonatrach+2

L'intégration des paramètres relatifs à la conception et aux constructeurs permet d'élargir l'analyse au-delà de la seule capacité de production. Elle permet notamment de distinguer les choix technologiques, les modes de réalisation des projets et les modalités d'exploitation.

Les résultats montrent également l'importance de la récupération d'énergie dans l'amélioration des performances énergétiques des stations d'osmose inverse. Cependant, l'hétérogénéité des périodes, des méthodes de mesure et des sources disponibles limite les comparaisons quantitatives directes.

Ainsi, les résultats obtenus doivent être interprétés comme une comparaison des données disponibles et vérifiables, et non comme un classement absolu des trois stations. L'étude met également en évidence la nécessité de disposer de données homogènes sur plusieurs années concernant la production, la consommation énergétique, la disponibilité, la maintenance et les coûts d'exploitation.

Conclusion

Le dessalement de l'eau de mer constitue aujourd'hui une solution importante pour répondre aux besoins croissants en eau potable, particulièrement dans les régions caractérisées par une disponibilité limitée des ressources en eau conventionnelles. Dans ce contexte, l'Algérie a accordé une importance particulière au développement des stations de dessalement afin de renforcer la sécurité hydrique et d'assurer un approvisionnement régulier en eau potable.

Ce travail de mémoire de Master 2 a porté sur une **étude comparative du dessalement de l'eau de mer au niveau de trois stations : Cap Blanc, Béni Saf et Honaine**.

L'objectif principal était de mieux comprendre le fonctionnement de ces installations, d'identifier les principales étapes du procédé de dessalement et de comparer leurs caractéristiques et performances.

L'étude réalisée a permis de constater que les trois stations reposent principalement sur le procédé de **l'osmose inverse**, une technologie largement utilisée dans le domaine du dessalement grâce à son efficacité dans l'élimination des sels dissous et à sa capacité à produire une eau adaptée à la consommation humaine après les différentes étapes de traitement et de reminéralisation.

La comparaison entre les stations de **Cap Blanc, Béni Saf et Honaine** montre que, malgré des principes de fonctionnement similaires, certaines différences peuvent être observées au niveau de la capacité de production, des équipements, de la consommation énergétique et des conditions d'exploitation. Ces différences sont liées notamment à la conception des installations, aux besoins en eau de la région desservie et aux caractéristiques de l'eau de mer utilisée comme ressource.

Le dessalement présente ainsi plusieurs avantages, notamment la disponibilité pratiquement permanente de la ressource marine, la réduction de la pression exercée sur les eaux souterraines et les eaux de surface, ainsi que la contribution à la lutte contre les périodes de sécheresse. Il représente donc un complément important aux ressources conventionnelles et participe à l'amélioration de la sécurité de l'alimentation en eau potable.

Cependant, cette technologie présente également certaines contraintes, notamment la **consommation énergétique élevée**, les coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que la gestion des rejets de saumure. Une exploitation rationnelle des stations, accompagnée d'un suivi régulier des équipements et d'une amélioration continue de leur efficacité énergétique, demeure donc nécessaire pour réduire les impacts économiques et environnementaux.

En conclusion, l'étude comparative des stations de dessalement de **Cap Blanc, Béni Saf et Honaine** montre que le dessalement de l'eau de mer constitue une solution stratégique pour répondre aux besoins actuels et futurs en eau potable dans l'ouest algérien. L'amélioration des performances de ces stations, l'optimisation de la consommation énergétique et l'intégration progressive des énergies renouvelables pourraient contribuer à rendre cette technologie encore plus durable et efficace.

Enfin, le développement de nouvelles recherches portant sur l'optimisation des procédés, la réduction de la consommation énergétique, la valorisation ou la meilleure gestion des saumures et l'utilisation des énergies renouvelables représente une perspective importante pour assurer un **dessalement plus économique, plus performant et plus respectueux de l'environnement**.

Référence bibliographique

[1] ADDA, A., NACEUR, W. M. et ABBAS, M. (2016). « Modélisation et optimisation de la consommation d'énergie d'une station de dessalement par procédé d'osmose inverse en Algérie ». *Journal of Renewable Energies*, vol. 19, n° 2, pp. 157–164. DOI : 10.54966/jreen.v19i2.557.

[2] ABDALLA, S., ABU KHALLA, S. & SUSS, M. E. (2023). « Desalination Fuel Cell Stacks: Scaling up the Co-Production of Electricity and Clean Water ». *ECS Meeting Abstracts*, MA2023-02(25), pp. 1347–1347.

[3] ALGERIAN DESALINATION COMPANY (ADC). (2026). « Communiqué relatif à l'atteinte de la pleine capacité de production de la station de dessalement de Cap Blanc ». Août 2026.

[4] ALGERIAN DESALINATION COMPANY (ADC). (2026). « Communiqué relatif à la production cumulée de 100 millions de m³ à la station de Cap Blanc ». Septembre 2026.

[5] ALGERIAN ENERGY COMPANY (AEC). (2023). « Visite Cap Blanc ». 15 mars 2023.

[6] ALGERIAN ENERGY COMPANY (AEC). « Dessalement d'eau de mer ». Document institutionnel relatif au programme national de dessalement et à la contribution du dessalement à la sécurité hydrique en Algérie.

[7] ALGERIAN PRESS SERVICE (APS). « Oran : lancement de la production d'eau à la station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc ». Informations relatives à la capacité de production, au réseau de distribution et aux réservoirs associés.

[8] BAKER, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications*. 3rd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 592 p.

[9] CDER. « Procédés de dessalement / distillation thermique ». *Revue des Énergies Renouvelables*. Centre de Développement des Énergies Renouvelables.

[10] COSIDER GROUPE. (2025). « Inauguration de la station de dessalement de Cap Blanc ». 20 février 2025.

[11] ENSSMAL. « Chapitre 01 ». Dépôt institutionnel de l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

[12] GCB – DIRECTION WATER TREATMENT. (2023–2024). « Avis d'appel d'offres relatif à la réalisation des travaux maritimes (off-shore) du projet de station de dessalement de Cap Blanc, Oran, 300 000 m³/jour ».

[13] GCB – SONATRACH. « Documents techniques du projet de réalisation de la station de dessalement de Cap Blanc, wilaya d'Oran, capacité 300 000 m³/jour ». Documents de projet et procédures de mise en service.

[14] GS YUASA CORPORATION. (2026). « GS Yuasa to Establish a Manufacturing Plant in Ibaraki Prefecture for Next-Generation, Domestically Produced Stationary Energy Storage Systems ». 31 août 2026.

[15] HACH. « Water Desalination Solutions ». Solutions de traitement et de dessalement de l'eau par osmose inverse.

[16] HALDJOUM, K. « État des lieux du dessalement en Algérie ». Document de recherche consacré notamment à la station de dessalement de Honaïne et à son rôle dans l'alimentation en eau potable du Grand-Tlemcen.

[17] HAMMA WATER DESALINATION. « Historique ». Hamma Water Desalination Spa.

[18] HELFER, F., LEMCKERT, C. & ANISSIMOV, Y. G. (2014). « Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review ». *Journal of Membrane Science*, 453, pp. 337–358.

[19] KEHAL, M. (2001). « Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie ». *Desalination*, ScienceDirect.

[20] KUCERA, J. (2015). *Reverse Osmosis: Industrial Processes and Applications*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 472 p. ISBN 978-1-119-14577-6. DOI : 10.1002/9781119145776.

[21] LECOMTE, V. (2012). « Les effets des perturbateurs endocriniens sur l'environnement ». *Ecotoxicologie.fr*, 3 janvier 2012.

[22] LOIRDIGHI, F. & ASSIR, A. (2025). « Comparative Analysis of Desalination Technologies: Energy Performance and Renewable Energy Integration with Focus on Reverse Osmosis Systems ». *E3S Web of Conferences*, 680, 00031.

[23] MEHTOUGUI, S. (2020). *Étude de la qualité et impacts du dessalement d'eau de mer sur les écosystèmes : cas de la station de Honaine, Wilaya de Tlemcen*. Mémoire universitaire, Université Djillali Liabes.

[24] MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES. (2012). *Bilan des réalisations du secteur de l'énergie et des mines – 2012*. Données relatives à l'entrée en production de la station de dessalement de Honaïne.

[25] MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES. (2015). *Bilan des réalisations du secteur de l'énergie*. Données relatives à la production des stations de dessalement.

[26] MINISTÈRE DES HYDROCARBURES ET DES MINES. « Projet de dessalement de l'eau de mer ». Ministère des Hydrocarbures et des Mines, Algérie.

[27] POLYMEM. (2026). « UF & MF : membranes et modules d'ultrafiltration et de microfiltration ». Polymem, France.

[28] RADIO ALGÉRIENNE. « Informations sur le projet de Cap Blanc et le réseau de distribution ».

[29] SACYR AGUA. « Honaine Desalination Plant ». Fiche technique de la station de dessalement de Honaïne. Données relatives à la capacité de 200 000 m³/jour, au taux de conversion de 45 %, aux 10 racks d'osmose inverse et aux 15 540 membranes.

[30] SACYR CONCESIONES. « Desaladora de Honaine ». Données techniques et contractuelles relatives à la station de dessalement de Honaïne.

[31] SONATRACH. « Dessalement d'eau de mer ». Informations institutionnelles relatives aux stations de dessalement et au développement du dessalement en Algérie.

[32] SONATRACH. « Techniques de dessalement d'eau de mer ». Document institutionnel présentant notamment les procédés de dessalement et le principe de l'osmose inverse.

[33] SONATRACH. (2025). « Inauguration de la station de dessalement de Cap Blanc ». *SONATRACH News.*

[34] SONATRACH. (2025). « La station de dessalement de Chatt El Hilal franchit le cap du milliard de m³ ». *SONATRACH News*.

[35] SONATRACH. (2025). « Station de dessalement de Chatt El Hilal ». 30 juillet 2025.

[36] THU, K., CHAKRABORTY, A., KIM, Y.-D., MYAT, A., SAHA, B. B. & NG, K. C. (2013). « Numerical simulation and performance investigation of an advanced adsorption desalination cycle ». *Desalination*, 308, pp. 209–218.

[37] UNION DES INDUSTRIES ET ENTREPRISES DE L'EAU (UIE). (2026). *Annuaire UIE 2026 : Union des Industries et Entreprises de l'Eau*. Paris, France.

[38] UNIVERSITÉ DE BLIDA, Institut de Mathématiques et d'Informatique. « Historique du dessalement en Algérie ». Document disponible sur le dépôt institutionnel de l'Université de Blida.

[39] Qasem et al., 2021) : Qasem, N. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. Npj Clean Water, 4(1), 36.

[40] WIKIPÉDIA. « Liste des stations de dessalement en Algérie ».