

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

Présenté par : DJABALLAH Kawther

Thème : DIAGNOSTIC DE LA STATION DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE DE OULED DJELLAL

Sous la direction de : Pr. TOUMI Abdelouaheb

Co-encadreur : Pr. Metaiche Mahdi

Juin 2025

Remerciements

En premier lieu, je rends grâce à mon Seigneur ALLAH, qui, par Sa volonté, m'a accordé la force, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement les membres du jury pour leur disponibilité, le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour leur bienveillance et leurs remarques constructives.

Je remercie chaleureusement Monsieur TOUMI Abdelouaheb, mon encadreur, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de ce projet sans oublier mon encadreur le professeur Métaïche Mehdi de l'université de Bouira pour ses aides interrompus et ses orientations précieuses.

Je suis également reconnaissante envers tout le personnel administratif de l'université, ainsi qu'aux membres de l'Administration Algérienne des Eaux (ADE) de la wilaya d'Ouled Djellal et aux membres du laboratoire de la station de traitement de Hammam Debagh à Guelma, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur précieuse collaboration. J'adresse une mention particulière à Monsieur LAGOUNE Abdelghani, directeur de la station, pour son appui, sa patience et son engagement.



Dédicace



Toutes les lettres du monde ne suffiraient pas à exprimer ce que je ressens...
Tous les mots demeurent impuissants face à l'amour, la gratitude, le respect et la reconnaissance
que je porte dans mon cœur.
Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère,

Toi qui as tout sacrifié, tout donné, toi qui m'as accompagné pas à pas depuis ma venue au monde... Ton affection me protège, ta bienveillance me guide, et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour surmonter les épreuves de la vie.

À mon très cher père,

Tu as toujours été là pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail soit le reflet de ma reconnaissance et de mon amour pour toi. J'espère qu'il te rend fier, car j'ai fait de mon mieux pour que tu puisses garder la tête haute.

À mes frères Adel et Mouataz Billah,

Et à la petite fleur de notre vie, **Anfel**, lumière de mon quotidien... Sans vous, je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui. Merci pour votre amour, votre soutien et vos encouragements qui me poussent à toujours aller plus loin.

À mes chères amies,

Avec qui j'ai partagé les bons comme les mauvais moments au fil de ces années. Votre amitié a été précieuse.

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont soutenu ce travail,

Recevez toute ma reconnaissance.



Résumé

Ce mémoire porte sur le diagnostic technique et la réhabilitation de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal, située dans une région saharienne confrontée à une pression hydrique croissante, alimentée par les besoins agricoles, domestiques et industriels. Mise en service en 1976, cette station est aujourd'hui hors d'usage, principalement en raison de la vétusté des équipements et de défaillances techniques persistantes.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'état actuel de l'installation, de déterminer les causes de son dysfonctionnement et de proposer des solutions techniques et organisationnelles en vue de sa remise en service ou de sa modernisation durable.

Le travail est structuré en quatre chapitres complémentaires :

1. Présentation de la région et de ses ressources hydriques : Ce chapitre décrit le contexte géographique, climatique, hydrogéologique et agricole d'Ouled-Djellal, en soulignant les enjeux critiques liés à la gestion de l'eau dans un environnement saharien.

2. Les procédés de dessalement : Une revue approfondie des différentes technologies de dessalement est présentée, avec une attention particulière portée à l'osmose inverse, en mettant en évidence ses avantages, ses limites et sa pertinence dans le contexte local.

3. Diagnostic technique de la station : Ce chapitre dresse un état des lieux détaillé de l'unité de dessalement, en analysant les équipements existants, les anomalies constatées et les pistes de réhabilitation envisageables.

4. Étude expérimentale : Des analyses physico-chimiques rigoureuses ont été réalisées sur des échantillons d'eau prélevés à différentes étapes du traitement, permettant d'évaluer l'efficacité réelle du système et d'en dégager des conclusions techniques.

Les résultats montrent une minéralisation excessive de l'eau brute, efficacement réduite grâce à l'osmose inverse, tout en révélant des faiblesses critiques telles que le colmatage des membranes, l'absence d'automatisation du système, et le manque de formation du personnel.

Les recommandations proposées incluent le remplacement des membranes, l'intégration des énergies renouvelables pour une exploitation durable, ainsi que la mise en place de programmes de formation continue pour les opérateurs.

Abstract

This thesis addresses the diagnosis and rehabilitation of the reverse osmosis desalination plant in Ouled Djellal, a Saharan region facing increasing water stress due to agricultural, domestic, and industrial demands. The plant, initially commissioned in 1976, is currently out of service due to technical issues and outdated equipment. The study aims to assess the plant's current condition, identify the causes of its malfunction, and propose solutions for its recommissioning or modernization.

The document is structured into four chapters:

1. Description of the Region and Its Water Resources: A geographical, climatic, hydrogeological, and agricultural overview of the Ouled Djellal region, highlighting challenges related to water resource management.

2. Desalination Techniques: A detailed review of desalination methods, focusing on reverse osmosis, its advantages, limitations, and local applicability.

3. Technical Analysis and Plant Diagnosis: An assessment of the plant's condition, equipment description, identification of malfunctions, and rehabilitation proposals.

4. Experimental Study: Physicochemical analysis of water samples collected at different stages of the treatment process, evaluating the effectiveness of pre-treatment and desalination steps.

The results indicate high mineralization in the raw water, effectively reduced by reverse osmosis, but also reveal major technical issues such as membrane fouling and the lack of an automated control system. Recommendations include membrane replacement, integration of renewable energy, and staff training.

ملخص:

تتناول هذه المذكرة تشخيص وإعادة تأهيل محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي في منطقة أولاد جلال، وهي منطقة صحراوية تواجه ضغطاً مائياً متزايداً بسبب الاحتياجات الزراعية والمنزلية والصناعية. المحطة، التي دخلت حيز التشغيل لأول مرة عام 1976، متوقفة حالياً بسبب المشاكل التقنية وتقادم المعدات. تهدف الدراسة إلى تقييم الحالة الراهنة للمحطة، وتحديد أسباب تعطلها، واقتراح حلول لإعادة تشغيلها أو تحديثها.

يتكون المستند من أربعة فصول :

1. وصف المنطقة ومواردها المائية: عرض جغرافي، مناخي، هيدروجيولوجي، وزراعي لمنطقة أولاد جلال، مع تسليط الضوء على التحديات المتعلقة بإدارة الموارد المائية .

2. تقنيات التحلية: مراجعة مفصلة لطرق تحلية المياه، مع التركيز على التناضح العكسي، مزاياه، حدوده، وتطبيقه في السياق المحلي .

3. التحليل التقني وتشخيص الخطة: تقييم وضع المحطة، وصف المعدات، تحديد الأعطال، واقتراحات لإعادة التأهيل .

4. دراسة تجريبية: تحليل فيزيوكيميائي لعينات الماء المأخوذة من مراحل مختلفة من عملية المعالجة، لتقييم فعالية مراحل ما قبل المعالجة والتحلية .

أظهرت النتائج ارتفاع الملوحة في المياه الخام، والتي تم تقليلها بفعالية بواسطة التناضح العكسي، لكنها كشفت أيضاً عن مشاكل تقنية كبيرة مثل انسداد الأغشية وغياب نظام تحكم آلي. تتضمن التوصيات استبدال الأغشية، دمج الطاقات المتجددة، وتدريب الكوادر.

Table des matières

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I :Description de la zone d'étude et ses ressources en eau</i>	
1.1. Introduction	4
1.2. Présentation de la zone d'étude	4
1.2.1. Situation géographique de la wilaya d'Ouled-Djellal	4
1.2.2. Climat de la région d'Ouled-Djellal.....	6
1.2.3. L'agriculture dans la région d'Ouled-Djellal	6
1.2.4 Géologie de la région d'Ouled-Djellal	7
1.2.5 Hydrogéologie de la région d'Ouled-Djellal.....	8
1.2.5.1 La nappe phréatique de la région d'Ouled-Djellal	8
Ce tableau offre ainsi une vue d'ensemble sur la répartition, la profondeur et le potentiel d'exploitation de ces ouvrages hydrogéologiques.	12
1.3 Présentation de la Direction des Ressources en Eau : Instance stratégique au cœur de la gestion hydrique à Ouled-Djellal	13
1.3.1 La Direction des Ressources en Eau (DRE) de la wilaya d'Ouled-Djellal.....	13
1.3.2 Missions principales de la DRE	13
1.3.3 Organisation structurelle de la DRE.....	13
1.3.3.1 Service de l'administration des moyens.....	14
1.3.3.2 Service de l'alimentation en eau potable.....	14
1.3.3.3 Service de l'assainissement.....	15
1.3.3.4 Service de la mobilisation des ressources en eau	15
1.3.3.5 Service de l'hydraulique agricole.....	15
1.4. Les ressource en eau.....	16
1.4.1. Les eaux superficielles de Ouled-Djellal et de ses affluents	16

1.4.2. Les eaux souterraines de la région d'Ouled Djellal	17
1.4.2.1. Nappe phréatique.....	17
1.4.2.3. Nappe des calcaires de l'Éocène inférieur (nappe de Tolga)	18
1.4.2.4. Nappe profonde des grès du Continental Intercalaire (nappe albienne)	18
1.5. Conclusion.....	23

Chapitre II: Les Techniques de Dessalement

2.1 Introduction	26
2.2 Historique du dessalement dans le monde et en Algérie.....	26
2.3 Définition du dessalement.....	29
2.3.1 Les techniques de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres	29
2.3.1.1 La technique thermique	30
2.3.1.2. La Nano filtration (NF)	38
2.4 Conclusion.....	48

Chapitre III: Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

3.1 Introduction	51
3.2 Historique de la station.....	51
3.3 Présentation technique détaillée de la station de dessalement	52
3.3.1 Schéma hydraulique de la station de dessalement	52
3.3.2 Forage : Source stratégique de l'eau brute souterraine	53
3.3.3 Refroidisseur : Optimisation thermique pour un traitement efficace	54
3.4 Filière de traitement : Vers une eau potable de haute qualité	56
3.4.1 Prétraitement : Une étape essentielle de conditionnement.....	56
3.4.2 Osmose inverse : cœur technologique de la station de dessalement.....	60
3.4.3 Correction du pH : un ajustement indispensable pour la stabilité de l'eau	61
3.4.4 Post-chloration : une barrière sanitaire essentielle	61

3.4.5	Qualité et débit de l'eau traitée : performance et conformité.....	62
3.5	Équipements et spécifications techniques : robustesse et fiabilité du système	62
3.6	Diagnostic et perspectives de réhabilitation de la station de dessalement	63
3.6.1	Diagnostic technique : état actuel alarmant.....	63
3.6.2	Points critiques à traiter en priorité	63
3.6.3	Enjeux économiques : réhabiliter pour rentabiliser.....	63
3.6.4	Impacts sociaux : vers un développement durable local	64
3.6.5	Propositions concrètes de réhabilitation.....	64
	Conclusion.....	65

CHAPITRE IV: Étude expérimentale, analyse des échantillons et interprétation des résultats des prélèvements effectués à la station de dessalement d'Ouled Djellal

4.1	Introduction	67
4.2	Diagnostic de la station de dessalement d'Ouled Djellal	67
4.2.1	Prélèvement des échantillons d'eau	69
4.2.2	Normes algériennes de potabilité de l'eau et indice de balance.....	70
4.2.3	Analyse physico-chimiques des échantillons	73
4.2.3.1	Température	73
4.2.3.2	Le potentiel d'Hydrogène (pH)	74
4.2.3.3	Conductivité électrique	76
4.2.3.4	Turbidité.....	77
4.2.3.5	Salinité et TDS	79
4.2.3.6	Dureté Totale (TH).....	81
4.2.4	Mesure des paramètres ioniques des échantillons d'eau	83
4.2.4.1	Les cations.....	83
4.2.4.2	Les anions.....	90

4.3. Préparation des réactifs	95
4.4 Système de commande et d'automatisation	96
4.5 Stocks et ressources humaines	99
4.6 Conclusion.....	100
Recommandations	104
Références bibliographiques	108

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Récapitulatif de l'unité géologique et hydrogéologique de la région d'Ouled Djellal (Source : CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)	10
Tableau 1. 2: Localisation et principales caractéristiques techniques des forages de la région d'Ouled Djellal.	12
Tableau 1. 3: Nappes souterraines identifiées dans la région d'Ouled –djellal (ANRH, 2008)	18
Tableau 1. 4: Synthèse détaillée des forages exploitant la nappe albienne dans la région de Biskra (Source : ANRH Biskra)	21
Tableau 1. 5: Vue d'ensemble des réseaux D'AEP et D'assainissement de région d'Ouled-Djallal (Source : DRE – Ouled Djellal).	23
Tableau 2. 1: Paramètres essentiels à contrôler pour garantir une exploitation efficace, fiable et durable d'une unité d'osmose inverse	36
Tableau 4. 1: Paramètres physiques (Réf. : Arrêté interministériel du 5 juillet 1993, JORA n°52/1993 ; NA 174-106/1992).....	70
Tableau 4. 2: Paramètres chimiques majeurs (Réf. : JORA 1993 ; NA 174-106/1992 ; OMS 2017).....	71
Tableau 4. 3: Paramètres microbiologiques (Réf. : JORA 1993 ; NA 174-107/1992 ; OMS 2017) avec : JORA est le Journal Officiel de la République Algérienne.....	71
Tableau 4. 4: Paramètres liés à la salinité (Arrêté interministériel du 5 juillet 1993, publié au JORA n°52 du 13 octobre 1993, fixant les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine)	71
Tableau 4. 5: paramètres ioniques aux points de prélèvement des échantillon et indice de balance.....	72

Liste des figures

Figure 1. 1: Localisation géographique de la wilaya d'Ouled-Djellal à l'échelle nationale.....	5
Figure 1. 2: localisation administrative de la wilaya d'Ouled-Djellal avec les wilayas limitrophes.....	6
Figure 1. 3: vue d'ensemble de la zone agricole d'Ouled Djellal.....	7
Figure 1. 4: Carte géologique de la région d'Ouled-Djellal.....	8
Figure 1. 5: Localisation de la zone d'Ouled-Djellal au sein des limites de la nappe Albien ..	9
Figure 1. 6: Coupe hydrogéologique schématique NE-SW dans la région d'Ouled Djellal...	10
Figure 1. 7: Localisation géographique des forages sur la nappe albienne dans la région d'Ouled Djellal.....	11
Figure 1. 8: Répartition des aquifères identifiés dans la région de Biskra, tels qu'inventoriés par l'ANRH.....	20
Figure 2. 1 : Les principaux procédés de dessalement.....	30
Figure 2. 2: Schéma illustratif du procédé de distillation multi-effets (MED).....	31
Figure 2. 3: Représentation du procédé de distillation à compression de vapeur (VC ou MVC).....	32
Figure 2. 4: Fonctionnement du procédé de distillation à détente instantanée multi-étages (MSF).....	33
Figure 2. 5: Principe fondamental de l'osmose inverse.....	35
Figure 2. 6: Principe de fonctionnement de la nanofiltration (NF).....	39
Figure 2. 7: Principe de fonctionnement d'un système de dessalement par électrodialyse	41
Figure 2. 8: Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.....	45
Figure 3. 1: Schéma du système d'osmose inverse installé à la station de dessalement d'Ouled-Djellal.....	53
Figure 3. 2: Photos du forage de captage des eaux de la nappe albienne – Station de dessalement d'Ouled Djellal.....	54
Figure 3. 3: Photos du système de refroidissement des eaux de la nappe albienne – Station de dessalement d'Ouled-Djellal.....	55
Figure 3. 4: Photos des filtres à sable à la station de dessalement d'Ouled Djellal.....	57
Figure 3. 5: Photo de la bache d'eau brute stockée de la station de dessalement d'Ouled Djellal.....	58
Figure 3. 6: Photo du système de lavage à contre-courant des filtres à sable.....	58

Figure 3. 7: Photos du système de microfiltration à cartouches – Station de dessalement d'Ouled-Djellal)	59
Figure 3. 8: Vue réelle du système d'osmose inverse – Station de dessalement d'Ouled Djellal	61
Figure 4. 1: Schéma représentatif et approximatif des différents points de prélèvement des échantillons d'eau au sein de la station de dessalement par osmose inverse située à Ouled Djellal.	68
Figure 4. 2: Bouteilles contenant les échantillons d'eau prélevés aux différents points de la station de dessalement d'Ouled Djellal.	70
Figure 4. 3: Appareil pH-mètre utilisé pour la mesure du potentiel hydrogène.....	75
Figure 4. 4: Histogramme des valeurs de pH des échantillons d'eau analysés	75
Figure 4. 5: Conductimètre utilisé pour l'évaluation de la conductivité de l'eau.	76
Figure 4. 6: Variation de la conductivité des échantillons d'eau prélevés à la station de dessalement d'Ouled-Djellal	77
Figure 4. 7: Turbidimètre néphélométrique utilisé pour l'analyse de la turbidité de l'eau.....	78
Figure 4. 8: Variation des valeurs de turbidité des échantillons d'eau prélevés à la station de dessalement d'Ouled Djellal.	79
Figure 4. 9: Variation de la salinité aux différents points de prélèvement au cours du processus de dessalement à la station de Ouled Djellal	80
Figure 4. 10: Évolution du TDS (Total Dissolved Solids) aux différents points de prélèvement durant le processus de dessalement à la station de Ouled Djellal	81
Figure 4. 11: Évolution de la dureté totale (TH) des cinq échantillons d'eau prélevés au niveau de la station de dessalement d'Ouled Djellal	82
Figure 4. 12: Variation des concentrations en calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) durant le processus de purification à la station de dessalement de Ouled Djellal	84
Figure 4. 13: Spectromètre utilisé pour la mesure des cations Ca^{2+} , Na^{+} et K^{+}	85
Figure 4. 14: Évolution des concentrations en sodium (Na^{+}) et en potassium (K^{+}) aux différents points de prélèvement au sein de la station de dessalement d'Ouled Djellal.....	86
Figure 4. 15: Étapes de formation du complexe coloré bleu-vert pour la détection de l'ammonium (NH_4^{+})	88
Figure 4. 16: Variation de la concentration en ammonium (NH_4^{+}) durant le processus de dessalement à la station de Ouled Djellal.....	88
Figure 4. 17: Étapes de préparation des échantillons pour l'analyse du fer ferreux (Fe^{2+}) des eaux prélevées de la station de dessalement de Ouled-djellal.....	89

Figure 4. 18: Évolution des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) et en ions chlorure (Cl^-) dans les cinq échantillons d'eau prélevés	91
Figure 4. 19: Préparation de l'échantillon pour analyser Nitrate (NO_3^-).....	93
Figure 4. 20: Variation des concentrations en nitrates (NO_3^-) au cours du processus de dessalement dans la station de Ouled Djellal	93
Figure 4. 21: Variation des concentrations en nitrates (TAC) au cours du processus de dessalement dans la station de Ouled-Djellal.....	94
Figure 4. 22: Préparation des réactifs à la station de dessalement de Ouled Djellal.....	95
Figure 4. 23: Armoire de commande de la turbine d'aération (refroidissement) (station de Ouled Djellal).....	97
Figure 4. 24: Armoire de commande du système de prétraitement : eau brute + filtres à sable (station de Ouled Djellal) -armoire fermée-	97
Figure 4. 25: Armoire de commande du système d'osmose inverse (station de Ouled Djellal) -armoire ouverte-	98

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau représente une ressource vitale et un levier fondamental du développement des humaines. Dans un contexte mondial marqué par le changement climatique, la croissance démographique et une pression croissante sur les ressources hydriques, la gestion durable de l'eau s'impose aujourd'hui comme un enjeu stratégique majeur, en particulier dans les zones arides et semi-arides. L'Algérie, dont plus de 80 % du territoire est désertique, fait face à d'importants défis en matière de disponibilité, d'exploitation et de qualité des ressources en eau.

Face à la raréfaction des ressources conventionnelles (eaux de surface et eaux souterraines peu profondes), le recours à des solutions alternatives, telles que le dessalement des eaux saumâtres ou marines, s'impose de plus en plus comme une stratégie pertinente pour assurer la sécurité hydrique. Dans ce cadre, la technologie de l'osmose inverse s'est largement imposée pour ses performances de traitement et son adaptabilité aux contextes locaux.

La ville d'Ouled Djellal, située au cœur d'une région à climat aride, est confrontée à une pression hydrique croissante, exacerbée par les besoins en eau des secteurs agricole, domestique et industriel. Pour y faire face, une station de dessalement exploitant l'eau saumâtre a été mise en service en 1976. Toutefois, cette installation est actuellement à l'arrêt, en raison de la vétusté de ses équipements et de divers problèmes techniques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, qui vise à réaliser un diagnostic complet de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled Djellal, dans l'optique d'une remise en service future. Il s'agit d'évaluer l'état des installations, de repérer les dysfonctionnements techniques, d'analyser les performances de traitement de l'eau, et de proposer des solutions concrètes de réhabilitation ou de modernisation. Une campagne expérimentale a ainsi été conduite grâce à la remise en marche temporaire de la station, permettant la collecte et l'analyse d'échantillons d'eau à différents points du processus de traitement.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres complémentaires permettant une compréhension progressive et approfondie du sujet. Le premier chapitre dresse un portrait détaillé de la zone d'étude, Ouled Djellal, en mettant en évidence ses spécificités géographiques, climatiques, hydrogéologiques ainsi que les caractéristiques de ses ressources en eau. Le deuxième chapitre est consacré aux techniques de dessalement, avec une attention particulière portée à la technologie de l'osmose inverse, en abordant ses principes de

Introduction Générale

fonctionnement, ses avantages et ses limites, notamment dans le contexte des régions arides. Le troisième chapitre se focalise sur la station de dessalement d'Ouled Djellal elle-même, à travers une analyse technique approfondie, un état des lieux de son fonctionnement et une première évaluation diagnostique de ses défaillances. Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats issus de l'étude expérimentale menée sur le terrain, basés sur l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau prélevés à différentes étapes du processus, et propose des recommandations concrètes pour la réhabilitation et la modernisation de l'installation.

À travers cette démarche, ce mémoire entend apporter une contribution technique et stratégique à la problématique du dessalement dans les régions sahariennes, et proposer des pistes concrètes pour la valorisation et la pérennisation des infrastructures hydrauliques existantes, dans une logique de gestion intégrée et durable des ressources en eau.

Chapitre I
Description de la zone
d'étude et ses ressources
en eau

1.1. Introduction

Située au cœur d'un environnement aride, la région désertique des Ouled-Djellal fait face à une pression croissante sur ses ressources hydriques, alimentée par une forte croissance démographique, une agriculture en plein essor et une exploitation intensive des nappes souterraines. Ces eaux, véritable source de vie dans ce milieu contraignant, sont aujourd'hui menacées par une double problématique préoccupante : une diminution drastique du niveau des nappes phréatiques et une dégradation qualitative liée à la pollution.

L'un des signes les plus alarmants de cette situation est la transformation du cours d'eau Oued Djedi en un véritable canal d'évacuation des eaux usées domestiques, notamment celles issues des infrastructures sanitaires de Sidi Khaled et d'Ouled-Djellal. Ce phénomène, en plus d'altérer gravement la qualité de l'eau, représente un risque réel pour la santé publique et compromet durablement l'usage de l'eau à des fins agricoles.

Dans le cadre de notre stage de fin d'études réalisé dans la wilaya d'Ouled-Djellal, nous avons mené un travail de terrain approfondi nous permettant de collecter des données pertinentes sur l'état actuel des ressources en eau. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la qualité des eaux de surface et souterraines de la région, d'en analyser la potabilité et d'en déterminer l'aptitude à l'irrigation.

1.2. Présentation de la zone d'étude

1.2.1. Situation géographique de la wilaya d'Ouled-Djellal

La wilaya d'Ouled-Djellal, récemment érigée en wilaya à part entière en 2019 et officialisée en 2021, était auparavant une wilaya déléguée depuis 2015. Elle se situe dans le sud-est algérien, au cœur du Sahara, et représente la porte orientale du Grand Sud algérien. Stratégiquement positionnée, cette région joue un rôle charnière entre les Hautes Plaines et les vastes étendues sahariennes.

Classée 51e wilaya dans le cadre de la nouvelle réorganisation administrative de l'Algérie, la wilaya d'Ouled-Djellal se distingue par son importance géopolitique et son potentiel en ressources naturelles, notamment en eau souterraine. Sur le plan administratif, elle est subdivisée en six communes : Ouled-Djellal, Sidi Khaled, Doucen, Chaïba, Besbes et Ras El Miad, réparties entre deux daïras principales : Ouled-Djellal et Sidi Khaled.

Cette région se caractérise par un climat aride, un relief majoritairement plat et un paysage dominé par des formations désertiques, ce qui confère à la wilaya des défis majeurs en matière de gestion durable des ressources en eau. La **Figure 1.1** illustre la localisation géographique de la wilaya d'Ouled-Djellal à l'échelle nationale ainsi que la configuration de son territoire.

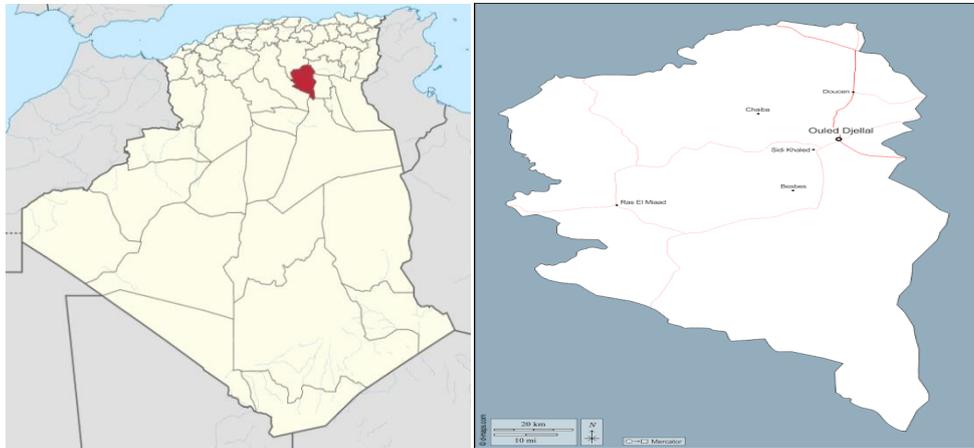


Figure 1. 1:Localisation géographique de la wilaya d'Ouled-Djellal à l'échelle nationale

La wilaya d'Ouled-Djellal compte une population estimée à environ 239 300 habitants, répartis sur un vaste territoire couvrant 11 410 km². Située à une altitude moyenne de 112 mètres au-dessus du niveau de la mer, elle figure parmi les zones les plus basses du territoire national, ce qui lui confère des caractéristiques géographiques et climatiques particulières (Source : DRE – Ouled-Djellal).

Sur le plan de la délimitation territoriale, la wilaya d'Ouled-Djellal est encadrée par plusieurs autres régions administratives :

- Au nord-est : la wilaya de Biskra,
- Au nord-ouest : la wilaya de M'Sila,
- À l'est : la wilaya de M'Ghair,
- À l'ouest et au sud-ouest : la wilaya de Djelfa,
- Au sud : la wilaya de Ouargla.

Grâce à sa position géographique stratégique, au carrefour entre les Hautes Plaines et le Grand Sud, la région constitue un point de transition important entre les zones steppiques du nord et les zones sahariennes du sud. Ce positionnement confère à Ouled Djellal un rôle charnière dans les dynamiques économiques, sociales et environnementales du sud-est algérien.

La figure (1.2) met en évidence la position stratégique de la wilaya d'Ouled Djellal, ainsi que ses frontières administratives avec les wilayas limitrophes, soulignant son rôle de carrefour entre les régions sahariennes et les hautes plaines du nord.



Figure (1. 2): localisation administrative de la wilaya d'Ouled Djellal avec les wilayas limitrophes

1.2.2. Climat de la région d'Ouled-Djellal

La région d'Ouled-Djellal est soumise à un climat saharien aride, caractérisé par une sécheresse persistante et des variations thermiques marquées entre le jour et la nuit. En été, les températures atteignent des niveaux élevés, oscillant entre 35 °C et 45 °C durant la journée, tandis qu'elles descendent entre 25 °C et 35 °C la nuit, générant une chaleur étouffante typique des zones désertiques. En hiver, le climat reste sec, mais les températures chutent considérablement, variant entre 10 °C et 20 °C le jour, et pouvant descendre jusqu'à -2 °C à 5 °C la nuit (source : <https://earthwise.bgs.ac.uk/images/3/3e/SASSmap.png>).

Ces conditions climatiques extrêmes représentent un défi majeur pour les activités humaines, en particulier l'agriculture et la gestion des ressources en eau, nécessitant des stratégies d'adaptation spécifiques.

1.2.3. L'agriculture dans la région d'Ouled-Djellal

La wilaya d'Ouled-Djellal se distingue par sa vocation agricole affirmée, faisant d'elle l'une des régions les plus dynamiques du sud algérien sur le plan agraire. Elle est notamment renommée pour ses oasis luxuriantes, ses palmeraies étendues et le développement intensif des cultures sous serre, qui constituent des piliers essentiels de son économie locale.

Le secteur agricole s'appuie sur une superficie d'environ 120 000 hectares de terres agricoles (source : **DRE d'Ouled-Djellal**), exploitée pour la culture de diverses espèces, notamment les dattes, les fourrages, les légumes et certaines cultures céréalières. L'usage des techniques modernes d'irrigation, combiné à la richesse des nappes phréatiques, permet de maintenir une production relativement stable malgré les conditions climatiques contraignantes.

Cette dynamique agricole confère à la région un rôle stratégique dans l'approvisionnement local et national, tout en contribuant à la sécurité alimentaire dans un environnement désertique. La figure 1.3 présente simultanément une vue représentative des oasis de la région ainsi que leur localisation géographique précise, illustrant la richesse agricole et le potentiel naturel de la zone.



Figure 1. 3: vue d'ensemble de la zone agricole d'Ouled-Djellal

1.2.4 Géologie de la région d'Ouled-Djellal

La région d'Ouled-Djellal occupe une zone de transition géologique majeure, à l'interface entre des structures montagneuses au nord et des zones effondrées au sud, qui s'inscrivent dans l'ensemble géologique du Sahara septentrional. Cette configuration lui confère une diversité géomorphologique significative, reflétant une histoire tectonique complexe.

La transition entre ces deux domaines géologiques distincts est marquée par un système de structures tectoniques orientées est-ouest, composé de flexures, de plis-failles et de failles, connu sous le nom d'Accident Sud-Atlasique. Ce grand accident structurel joue un rôle clé dans la géodynamique régionale, en assurant la jonction entre l'Atlas saharien au nord et les formations sahariennes plus anciennes au sud (source : ANRH – Biskra).

Cette complexité géologique influence non seulement le relief, mais également la nature des aquifères, la circulation des eaux souterraines et la répartition des ressources naturelles dans la région. La figure 1.4 présente une carte géologique de la région d'Ouled-Djellal, mettant en lumière la diversité des formations rocheuses et les principales structures tectoniques qui façonnent le paysage local.



Figure 1. 4: Carte géologique de la région d'OuledDjellal(
source : <https://support.google.com/legal/answer/3463239?hl=fr-DZ>)

1.2.5 Hydrogéologie de la région d'Ouled-Djellal

L'hydrogéologie constitue un pilier fondamental pour la région d'Ouled-Djellal, où les ressources en eaux souterraines représentent la principale source d'approvisionnement en eau, tant pour la consommation potable que pour l'irrigation agricole. En effet, en l'absence quasi totale de ressources en eaux de surface, les nappes phréatiques assurent la survie et le développement économique local (source : **DRE d'Ouled-Djellal**).

La wilaya dispose d'un réseau de 490 puits, dont 43 sont spécifiquement destinés à l'alimentation en eau potable, illustrant l'importance capitale de cette ressource pour les populations et les activités agricoles (source : **DRE d'Ouled-Djellal**).

1.2.5.1 La nappe phréatique de la région d'Ouled-Djellal

Ouled-Djellal fait partie intégrante des vastes zones du Grand Sud algérien abritant d'importantes réserves d'eau souterraine. Le système aquifère du nord du Sahara, qui s'étend sur plusieurs pays — notamment l'Algérie, la Tunisie et la Libye — constitue une ressource hydrique profonde et stratégique aux capacités considérables.

Cette nappe phréatique profonde représente un réservoir essentiel, tant pour les besoins domestiques que pour l'agriculture, dans une région où l'accès à l'eau est déterminant pour le développement durable. Sa gestion optimale est donc cruciale pour préserver cette richesse naturelle face aux pressions anthropiques et climatiques (source : ANRH – Biskra). La figure 1.5 illustre la localisation précise de la wilaya d'Ouled-Djellal au sein des limites de la nappe Albien, mettant en évidence son positionnement stratégique par rapport à cette importante ressource aquifère.

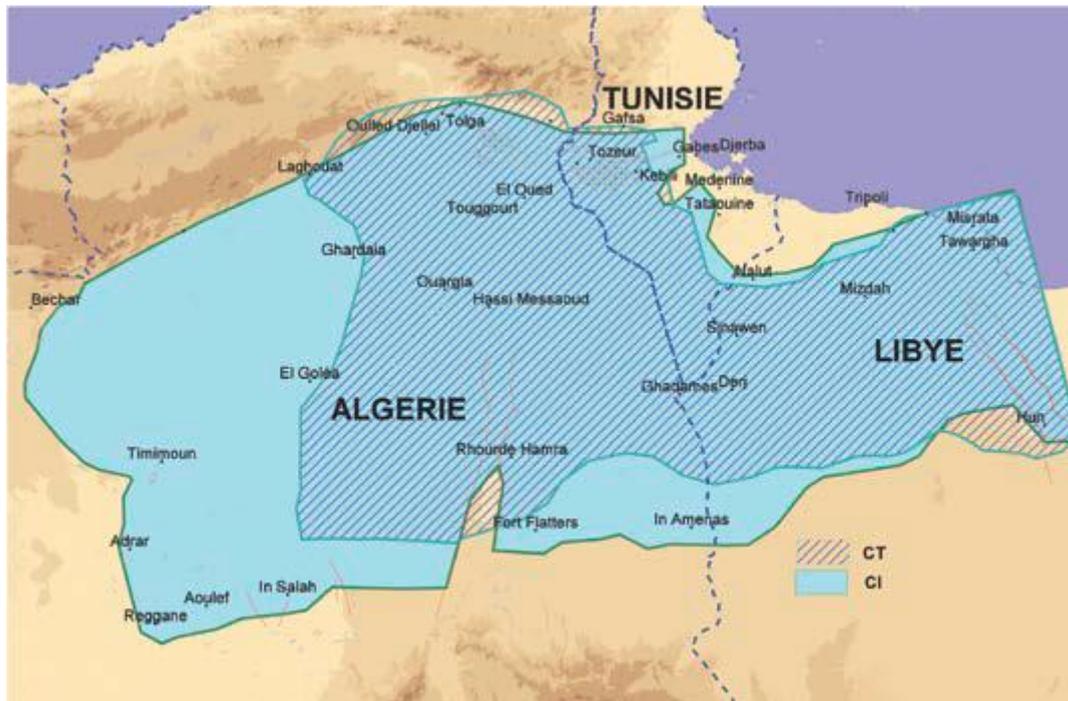


Figure 1. 5: Localisation de la zone d'Ouled Djellal au sein des limites de la nappe Albien (<https://earthwise.bgs.ac.uk/images/3/3e/SASSmap.png>)

La région d'Ouled-Djellal repose sur une stratigraphie sédimentaire bien développée, s'étendant du Quaternaire en surface jusqu'aux formations profondes de l'Albo-Barrémien à la base (source : ANRH Biskra). Cette configuration géologique confère à la zone un intérêt particulier, tant du point de vue structural qu'hydrogéologique.

Le tableau (1.1) présente un récapitulatif synthétique des principales unités géologiques et hydrogéologiques identifiées dans la région, en mettant en évidence leur nature, leur extension et leur rôle dans la dynamique des eaux souterraines.

Par ailleurs, la figure (1.6) illustre une coupe hydrogéologique schématisée de la région d'Ouled-Djellal, permettant de visualiser l'agencement vertical des différentes formations aquifères ainsi que leur connexion hydraulique.

Tableau 1. 1: Récapitulatif de l'unité géologique et hydrogéologique de la région d'Ouled Djellal (Source : CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)

Faciès et étage correspondant		Lithostratigraphie	Hydrogéologie
300	Mio-Plio-Quaternaire	Limons sableux, croutes calcaires, argiles, marnes rouges, avec des lentilles de grès et calcaires	Perméable
800-1000 m	Sénonien	Calcaires et marnes en alternance et des lentilles de gypses assez fréquentes vers la partie sommitale	Peu perméable
400 m	Turonien	Calcaires durs de couleur blanche claire ou grisâtre, très diaclasés et fissurés, aussi des marnes gris verdâtre, fossilifère avec des intercalations des niveaux de calcaires organiques	Type karstique très productif
300	Cénomaniens	Présence de calcaire vers la partie sommet et des marnes dans la partie basale	Perméable au sommet Imperméable à la base
600 m	Albien	Dans la partie sup des calcaires et marnes en alternances et dans la partie inf des grès massifs fins intercalé par des passées d'argiles grisâtres	Perméable
200	Aptien	Des marnes et calcaires (les marnes sont dominantes)	Imperméable
1500-2000 m	Barrémien	Alternance de grès et d'argiles gréseuses rouges avec une stratification entrecroisée fréquente dans les grès, les diaclases et les fissures sont nombreuses	Perméable
800 m	Néocomien	Présence des calcaires dolomitiques et calcaires gréseux vers la partie sommet, et des argiles gréseuses dans la partie basale	Perméable Imperméable
	Trias	gypse lamellaire, d'anhydrite, sel gemme, une série d'argile violines parfois bariolées à évaporites	

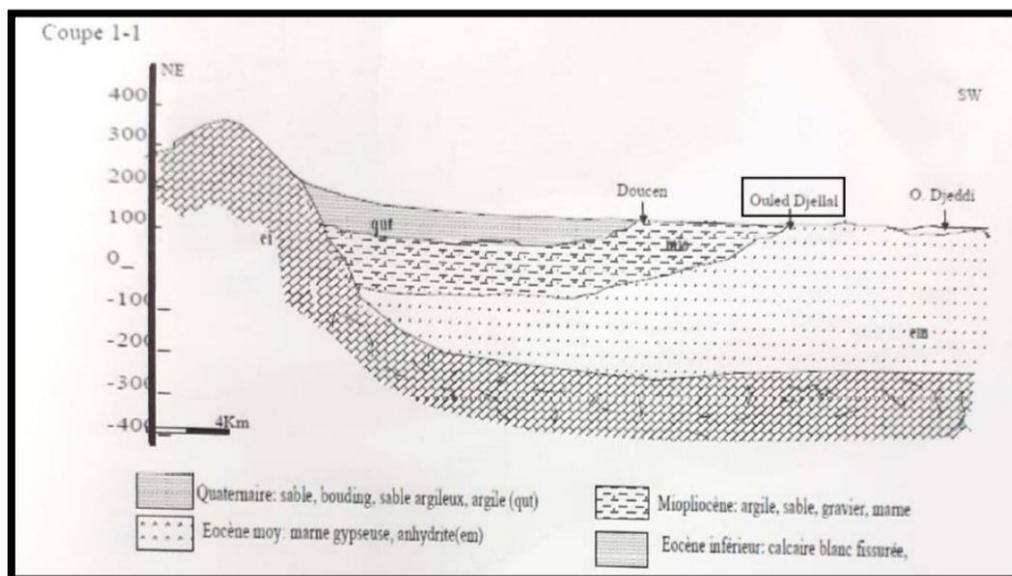


Figure (1. 6): Coupe hydrogéologique schématique NE-SW dans la région d'Ouled Djellal (Source : CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)

Le tableau (1.2) présente la localisation, les coordonnées géographiques ainsi que les principales caractéristiques techniques des forages réalisés dans la nappe albienne au niveau de la région d'Ouled-Djellal.

Tableau 1. 2: Localisation et principales caractéristiques techniques des forages de la région d'Ouled Djellal.

N°	Forage	Année de réalisation	Profondeur (m)	Débit (l/s)	T°	Coordonné	Observation
F01	L'assel	1983	2170	150	66	34° 24' 51.03" 05° 02' 00.73"	Mixte (Agricole Citoyens) 50/50 %
F02	Souareg	2018	2100	140	64	34°25'46.79" 5° 7'59.30"	Mixte (Agricole Citoyens d'elouahhes) 100/00 %
F03	Kef Trab	2018	2100	110	66	34°23'36.18 5° 3'52.60"	Mixte (Agricole Citoyens) 30/70 %
F04	Difel	1983	2170	100	55	34° 27' 29.70" 05° 05' 44.20'	Mixte (Agricole Citoyens Difel)
F05	Contre	1974	2138	100	55	34° 25' 51.60" 05° 03' 02.60'	Injection directe sur réseaux (100% Citoyens)

Ce tableau offre ainsi une vue d'ensemble sur la répartition, la profondeur et le potentiel d'exploitation de ces ouvrages hydrogéologiques.

1.3 Présentation de la Direction des Ressources en Eau : Instance stratégique au cœur de la gestion hydrique à Ouled-Djellal

1.3.1 La Direction des Ressources en Eau (DRE) de la wilaya d'Ouled-Djellal

Suite à la nouvelle réorganisation administrative de l'Algérie, la daïra d'Ouled-Djellal a été érigée en wilaya à part entière. Dans ce contexte, la Direction des Ressources en Eau (DRE) a été créée en 2020, relevant du Ministère des Ressources en Eau. Cette direction joue un rôle essentiel dans la gestion et la valorisation des ressources hydriques de la wilaya. Elle compte 23 employés, dont 9 ingénieurs spécialisés dans le domaine de l'hydraulique. **(DRE Ouled-Djellal, 2022).**

1.3.2 Missions principales de la DRE

- Assurer la sauvegarde, la préservation, la protection et la gestion rationnelle des ressources en eau.
- Collecter et analyser les données relatives à la recherche, l'exploitation, la production, le stockage et la distribution de l'eau à des fins domestiques, agricoles ou industrielles.
- Appliquer la réglementation en vigueur concernant les ressources hydriques.
- Instruire, en lien avec l'administration centrale, les demandes d'affectation, d'utilisation et de réutilisation des ressources en eau.
- Délivrer les autorisations liées au domaine public hydraulique.
- Superviser et veiller à l'application des normes en matière d'alimentation en eau potable, d'assainissement et d'irrigation.
- Tenir à jour la base de données des points d'eau de la wilaya.
- Réaliser les bilans des programmes hydrauliques.

Assurer la maîtrise d'ouvrage et le suivi des projets non délégués. **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)**

1.3.3 Organisation structurelle de la DRE

La Direction est structurée en cinq services principaux et deux subdivisions :

- Service de l'administration des moyens
- Service de l'alimentation en eau potable
- Service de l'assainissement
- Service de la mobilisation des ressources en eau
- Service de l'hydraulique agricole
- Subdivision d'Ouled-Djellal
- Subdivision de Sidi Khaled **(DRE Ouled-Djellal, 2022)**.

1.3.3.1 Service de l'administration des moyens

- Élaboration et exécution des budgets de fonctionnement et d'équipement.
- Gestion du patrimoine et des ressources humaines.
- Suivi des affaires contentieuses.
- Composé de trois bureaux :
 - Budget, comptabilité et patrimoine
 - Contentieux, réglementation et marchés publics
 - Ressources humaines et formation **(DRE Ouled-Djellal, 2022)**.

1.3.3.2 Service de l'alimentation en eau potable

- Participation aux études et à la programmation des projets AEP.
- Suivi de la réalisation des projets et respect des normes.
- Supervision du service public AEP.
- Systématisation de l'information relative à l'AEP.
- Composé de trois bureaux similaires à ceux du service administratif. **(DRE Ouled-Djellal, 2022)**.

1.3.3.3 Service de l'assainissement

- Programmation et suivi des projets d'assainissement et de protection contre les inondations.
- Choix des techniques d'assainissement et d'épuration.
- Surveillance du bon fonctionnement des infrastructures d'assainissement.
- Mise à jour des données environnementales.
- Composé de trois bureaux :
 - Études et programmation
 - Suivi de la réalisation
 - Gestion du service public d'assainissement (**DRE Ouled-Djellal, 2022**).

1.3.3.4 Service de la mobilisation des ressources en eau

- Élaboration de programmes pour mobiliser les ressources en eaux superficielles et souterraines.
- Suivi de la réalisation des ouvrages et contrôle de leur exploitation.
- Délivrance des autorisations de forage.
- Composé de trois bureaux :
 - Mobilisation des eaux superficielles
 - Mobilisation des eaux souterraines
 - Gestion et protection du domaine public hydraulique (**DRE Ouled-Djellal, 2022**).

1.3.3.5 Service de l'hydraulique agricole

- Élaboration et suivi des programmes de petite et moyenne hydraulique.
- Application des normes d'exploitation des infrastructures d'irrigation et de drainage.
- Composé de deux bureaux :

- Études et travaux
- Gestion et exploitation (Source : **DRE Ouled Djellal, 2022**).

1.4. Les ressource en eau

1.4.1. Les eaux superficielles de Ouled-Djellal et de ses affluents

La confluence des oueds M'Zi et Messad constitue la source de l'Oued Djedi, un cours d'eau important de la région. Tout au long de son parcours, il reçoit plusieurs affluents provenant du versant sud de l'Atlas saharien. Parmi les principaux affluents dans la partie occidentale, on peut citer :

- L'oued M'Zi, prenant sa source à une altitude de 1 593 mètres ;
- L'oued Messad, naissant à environ 1 000 mètres d'altitude ;
- L'oued Merguel et l'oued Moudjbara, qui émergent à une altitude d'environ 1 400 mètres et se rejoignent pour former l'oued Demme.

Le profil topographique de l'Oued Djedi révèle une forte pente entre la région d'Ouled Djellal et l'exutoire du Chott Melghir, ce qui entraîne une concentration rapide des eaux pluviales et accentue le caractère torrentiel de l'écoulement. **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022**)

Dans les zones arides et semi-arides, les précipitations sont rares, irrégulières et souvent violentes, entraînant des crues soudaines et destructrices. Bien que ces oueds soient généralement intermittents, ils jouent un rôle crucial dans l'alimentation des aquifères, notamment ceux de l'inféro-flux. Le régime des cours d'eau, essentiellement tributaire du régime pluviométrique, se caractérise par une dynamique torrentielle, avec des apports très variables selon les années.

Les débits souterrains estimés pour quelques oueds significatifs de la région sont les suivants (**ANAT, 2020**) :

- Oued El Abiodh : 40 l/s ;
- Oued Lasel : 29 l/s ;
- Oued Difel : 32 l/s ;
- Oued Traifia : 20 l/s.

1.4.2. Les eaux souterraines de la région d'Ouled Djellal

L'analyse hydrogéologique de la région d'Ouled Djellal permet d'identifier les zones de recharge des eaux souterraines à partir de la carte géologique. Ces zones, en particulier celles à forte perméabilité, peuvent constituer des sources potentielles de pollution des nappes **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)**

Le sous-sol de la région abrite un bassin hydrogéologique complexe constitué de quatre grands ensembles aquifères superposés :

1.4.2.1. Nappe phréatique

Ce sont des nappes superficielles, localisées dans les plaines et les lits d'oueds, et généralement captées par des puits peu profonds. Elles sont formées par des dépôts quaternaires et reçoivent leur alimentation par :

- Les précipitations ;
- Les crues ;
- Le drainage en provenance des nappes plus profondes et artésiennes ;
- Les fuites des systèmes de canalisation et de forage ;
- Le retour d'irrigation.

Le système aquifère d'inféro-flux le plus significatif est celui de la nappe en gouttière de l'Oued Djedi. Cette dernière est particulièrement vulnérable à la pollution, notamment en période sèche, où l'oued Djedi transporte des eaux d'assainissement. **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)**

1.4.2.2. Nappe des sables du Mio-Pliocène

Cet aquifère est composé d'une alternance de couches d'argiles, de sables, de graviers, de conglomérats et de passages gypseux. Il repose sur des formations imperméables du Miocène marin et de l'Éocène moyen, et il est recouvert de dépôts alluviaux peu épais, de croûtes gypseuses et de sables. Le Mio-Pliocène affleure au nord-est et au sud, le long de l'Oued Djedi. **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022)**

1.4.2.3. Nappe des calcaires de l'Éocène inférieur (nappe de Tolga)

Cette nappe repose sur des formations carbonatées du Sénonien inférieur. Elle est principalement alimentée par deux zones d'affleurement : l'une au nord de Tolga (sur environ 70 km) et l'autre à l'ouest de Doucen et Ouled Djellal. Dans les parties nord et nord-est de la wilaya, cette nappe est représentée par un aquifère majeur (Maastrichtien et Campanien), dont la profondeur varie entre 200 et 900 mètres, avec une excellente qualité chimique des eaux. (Source **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022**)

1.4.2.4. Nappe profonde des grès du Continental Intercalaire (nappe albienne)

En lien avec les eaux de surface, notamment l'Oued Djedi et ses affluents issus des versants est et sud de l'Atlas saharien, les écoulements convergent vers la cuvette du Chott Melghir. Ces apports reflètent l'importance de la lame d'eau reçue dans la région des Ziban et leur rôle majeur dans l'alimentation des réservoirs souterrains. (Source **CHENINI Mohamed Salah EL-dine 2021/2022**)

Le tableau (1.3) présente les différentes nappes souterraines identifiées dans la région d'Ouled Djellal, telles que recensées par l'ANRH en 2008.

Tableau 1. 3: Nappes souterraines identifiées dans la région d'Ouled –djellal (ANRH, 2008)

Wilaya	Nappe	Profondeur(m)
Ouled Djellal	Phréatique	20-60
	Moi-pliocène	90-250
	Eocène inferieur	90-500
	Albien	1700-2600

❖ Aquifère superficiel

L'aquifère superficiel désigne les nappes phréatiques exploitées par des puits peu profonds, ne dépassant généralement pas 90 mètres. Leur alimentation provient principalement des eaux de

ruissellement issues des vallées avoisinantes. Ces nappes sont relativement nombreuses dans la région d'Ouled Djellal, mais présentent des niveaux d'eau faibles.

Parmi elles, la nappe de l'Oued Djedi est la plus vulnérable à la pollution en surface. Elle est fortement exposée aux infiltrations d'eaux usées provenant des agglomérations d'Ouled-Djellal et de Sidi Khaled. Cette vulnérabilité est accentuée par la forte perméabilité du sol dans cette zone. Lors d'un entretien avec des agriculteurs locaux, il a été confirmé que l'eau utilisée pour l'irrigation des palmeraies et des cultures agricoles est contaminée par les rejets d'eaux usées se déversant dans l'Oued Djedi (Source : **ANRH Biskra**).

❖ Aquifère profond (La nappe Albien)

Dans la région étudiée, la nappe albienne constitue un aquifère profond d'une grande importance stratégique. Elle atteint une épaisseur d'environ 500 mètres dans le secteur d'Ouled-Djellal, avec une profondeur du toit avoisinant les 2 000 mètres à Ouled-Djellal et à Sidi Khaled.

L'exploitation de cette nappe est techniquement exigeante et financièrement coûteuse en raison de sa grande profondeur. De plus, la température de l'eau peut dépasser les **60 °C**, ce qui nécessite des équipements adaptés. Cependant, cette profondeur constitue également un avantage : elle rend la nappe peu exposée à la pollution, contrairement aux nappes superficielles.

La figure (1.8) illustre la répartition et la typologie des aquifères identifiés dans la région de Biskra, tels qu'inventoriés par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques – Biskra).

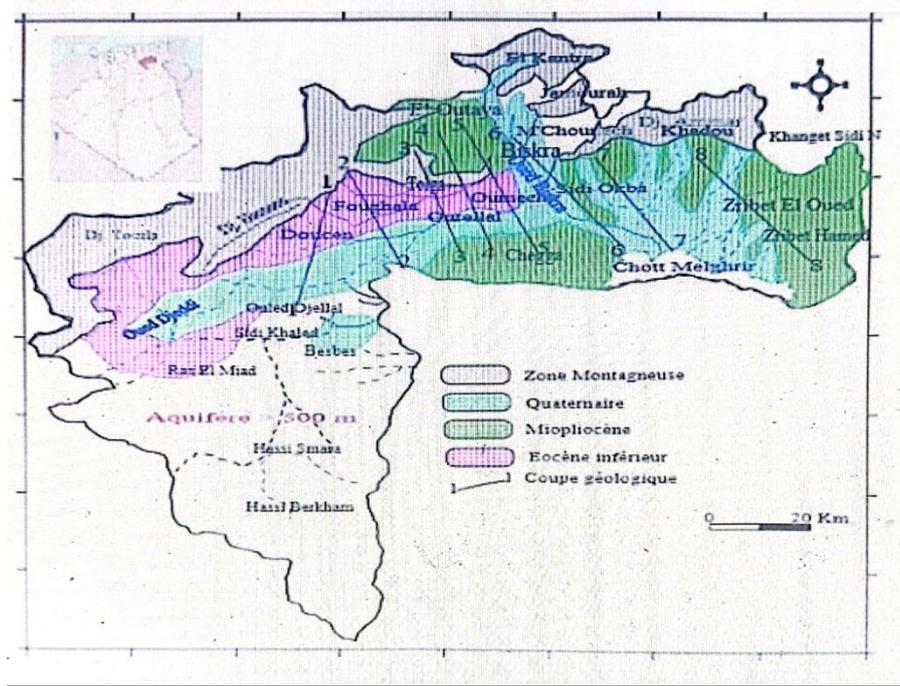


Figure 1. 8: Répartition des aquifères identifiés dans la région de Biskra, tels qu’inventoriés par l’ANRH (Source : **ANRH Biskra**)

Le tableau (1.4) présente une synthèse détaillée des forages exploitant la nappe albienne dans la région de Biskra, tels qu’enregistrés par l’ANRH (Biskra).

Tableau 1. 4: Synthèse détaillée des forages exploitant la nappe albienne dans la région de Biskra (Source : ANRH Biskra)

Commune	Lieu-dit	Année Réal	Prof(m)	Débit (l/s)	Propre	Pression Init.	Usage	Obs.
Ras Miad	Ras El Miad	1983	1741	60	APC	3.5 bar	-	Non exp
Ras Miad	Hassi Berkhr	1984	1641	60	APC	14 bar	AEP+IRR	Exploit
Ras Miad	Hassi smara	1983	1740	50	APC	14 bar	AEP+IRR	Exploit
Besbès	El hoube	1984	1912	60	APC	-	AEP	Exploit
Besbès	Besbès	1982	1933	50	APC	3.8 bar	AEP	Exploit
Besbès	Ras el djader	1981	2729	70	APC	14 bar	AEP	Exploit
Sidi khaled	Sidi khaled 1	1956	2500	100	APC	16 bar	AEP	Exploit
Sidi khaled	Sidi khaled 2	1982	2150	80	APC	11 bar	AEP	Exploit
Sidi khaled	Sidi khaled 3	1983	2040	80	APC	12 bar	AEP	Exploit
Ouled djellal	Ouled dejllal	1983	2170	80	APC	15 bar	AEP	Exploit
Ouled djellal	Ouled djellal	1974	2138	80	APC	14 bar	AEP	Exploit
Ouled djellal	Ouled djellal	1982	2200	80	APC	13 bar	AEP	Exploit
Doucen	Doucen	1979	2200	80	APC	15 bar	AEP	Exploit
El Ghrous	Apcelghrous	1981	2309	60	APC	14 bar	IRR	Exploit
Foughala	Apcfoughala	1989	2250	80	APC	-	IRR	Exploit
Tolga	Apctolga	1984	2081	120	APC	17 bar	IRR	Exploit
Bouchagroune	Apc (b...groune)	1988	2381	120	APC	-	IRR	Exploit
El Hadjeb	Apcelhadjeb	1986	2333	120	APC	-	AEP	Exploit

M'lili	ApcM'lili	1987	2413	35	APC	24 bar	IRR	Exploit
--------	-----------	------	------	----	-----	--------	-----	---------

Ce tableau met en évidence les caractéristiques clés des forages captant la nappe albienne, en précisant leur localisation, leur profondeur, le nom du propriétaire, les usages attribués, la pression initiale d'exploitation ainsi que le débit exploité. Il offre ainsi une vision stratégique et détaillée de la mobilisation de cette ressource souterraine précieuse, située à grande profondeur.

À la lecture du tableau, il ressort clairement que les forages, captant la nappe albienne, sont peu exposés au risque de pollution. Grâce à la qualité intrinsèque de cette ressource, ces eaux profondes sont jugées propres et adaptées tant à la consommation humaine qu'à l'abreuvement du bétail.

Plusieurs facteurs hydrogéologiques concourent à expliquer la charge chimique modérée des eaux de l'Albien, malgré leur profondeur :

- Un temps de séjour très long, permettant une interaction prolongée entre l'eau et les roches traversées, favorisant un certain équilibre chimique.
- Un écoulement à travers des formations géologiques riches en argiles, en intercalation avec les grès, les carbonates et les marnes, qui composent le toit de l'aquifère.
- Une large surface de contact entre l'eau et la roche réservoir, directement proportionnelle à la longueur du trajet souterrain et à l'épaisseur du réservoir, intensifiant les échanges minéralogiques.
- Une température naturellement élevée des eaux en profondeur, qui accélère la dissolution de certains sels tels que le sulfate de calcium (CaSO_4), le carbonate de calcium (CaCO_3) et les carbonates mixtes de magnésium et de calcium ($(\text{Mg,Ca})\text{CO}_3$).
- Une forte pression exercée par les formations géologiques sus-jacentes, contribuant à la mise en charge de la nappe et à la stabilité physico-chimique du système aquifère.

Le tableau (1.5) offre une vue d'ensemble claire et stratégique du secteur des ressources en eau dans la région d'Ouled Djellal, en mettant en lumière les principales données relatives aux

besoins en eau potable, à l'irrigation, à l'assainissement, ainsi qu'aux infrastructures de stockage disponibles.

Tableau 1. 5: Vue d'ensemble des réseaux D'AEP et D'assainissement de région d'Ouled-Djellal (Source : DRE – Ouled Djellal).

Commune	Population	Réseau d'eau potable jusqu'à (31/12/2020)									Réseau d'assainissement jusqu'à (31/12/2020)		
		Longueur du réseau (km)			Besoins m ³ /jour	Nombre de vertus		Quantité de production allouée à l'irrigation agricole (m ³ /jour)		Installations de stockage		Longueur du réseau (km)	La quantité d'eaux usées vers step m ³ /j
		Canal d'addition	Réseau de distribution	Total		Potable	Albien	Potable	Albien	Nombre	Volume de stockage (m ³)		
Ouled Djellal	82451 habitants	48.00	202.00	250.00	12367.65	11	5		18144	13	21350	160	18247.68
Sidi Khaled	55206 habitants	67.92	118.15	186.07	8280.90	11	4		8899.20	9	4900	92.48	9331.20
Total	137657 habitants	115.92	320.15	436.07	20648.55	22	9		27043.20	22	26250	252.48	27578.88

1.5. Conclusion

L'analyse approfondie des ressources en eau de la région d'Ouled-Djellal met en évidence une richesse hydrique structurée autour de deux grands axes : les eaux superficielles, principalement issues des oueds à régime torrentiel comme l'Oued Djedi, et les eaux souterraines, réparties entre nappes superficielles vulnérables à la pollution et aquifères profonds aux qualités physico-chimiques plus stables.

Les nappes superficielles, bien que facilement accessibles, sont fortement exposées aux contaminations, notamment par les rejets domestiques non traités. En revanche, les nappes profondes, telles que l'Albien, constituent une ressource stratégique, de haute valeur, du fait de leur qualité relativement stable, leur protection naturelle contre les polluants et leur potentiel d'exploitation durable – malgré les défis techniques et économiques liés à leur grande profondeur.

Les données techniques, hydrogéologiques et statistiques mises en lumière à travers les tableaux et figures analysés témoignent de la complexité et de la fragilité de ce système hydrique. Elles soulignent la nécessité d'une gestion intégrée, durable et concertée des ressources en eau, notamment par le biais d'un suivi rigoureux, de la modernisation des infrastructures de captage, de la valorisation des eaux usées traitées, et de l'instauration de politiques de préservation à long terme.

La compréhension fine de la dynamique hydrologique locale est donc une condition essentielle pour garantir l'accès à l'eau, assurer la sécurité hydrique et soutenir le développement socio-économique de cette région saharienne aux potentiels considérables mais vulnérables.

Chapitre II

Les Techniques de Dessalement

2.1 Introduction

Face à la pression croissante sur les ressources en eau douce, notamment dans les zones arides comme celle d'Ouled-Djellal, la période 2000–2025 a été marquée par une véritable alerte mondiale quant à la disponibilité de l'eau potable. Cette crise hydrique imminente a catalysé l'intérêt pour le développement et la mise en œuvre de techniques de dessalement innovantes, répondant à un double impératif : sécurité hydrique et durabilité environnementale.

Dans ce contexte, le dessalement s'impose comme une solution stratégique, permettant de valoriser les ressources en eau salée ou saumâtre, souvent abondantes mais sous-exploitées. L'enjeu est de rendre ces technologies plus accessibles, moins coûteuses, énergétiquement optimisées, tout en garantissant une fiabilité opérationnelle et un impact environnemental réduit.

La désalinisation repose sur plusieurs principes physiques majeurs, parmi lesquels :

- La distillation : fondée sur le changement d'état de l'eau (évaporation puis condensation), elle constitue une technique classique mais énergivore.
- Les procédés membranaires : tels que l'osmose inverse, qui utilise la pression pour forcer l'eau à travers une membrane semi-perméable, retenant les sels dissous, ou encore l'électrodialyse, exploitant un champ électrique pour séparer les ions salins de l'eau.

Ces différentes approches, en constante évolution technologique, représentent un levier fondamental pour garantir l'approvisionnement en eau dans les régions confrontées à un stress hydrique structurel. Le présent chapitre se penche ainsi sur les principales techniques de dessalement, leur principe de fonctionnement, leurs avantages, leurs contraintes, et leur potentiel d'application dans un contexte saharien comme celui d'Ouled Djellal.

2.2 Historique du dessalement dans le monde et en Algérie

a) Évolution du dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, aujourd'hui devenu une technologie industrielle stratégique, puise ses origines dans l'Antiquité. Depuis plusieurs siècles, l'humanité a cherché à convertir l'eau salée en eau douce, notamment dans les régions arides ou lors de longues traversées maritimes.

- Dès le IV^e siècle av. J.-C., Aristote décrivait le principe de la distillation et recommandait aux marins de produire de l'eau douce en chauffant l'eau de mer dans des chaudières.
- Au XII^e siècle, Adélarde de Bath, dans son ouvrage *Questions naturelles*, expliquait que l'évaporation de l'eau salée au soleil sur des rochers ou par chauffage produit une transformation physique où seule l'eau pure se condense, laissant derrière elle le sel.
- Les premières expérimentations industrielles du dessalement datent des années 1960, avec le développement de procédés thermiques, notamment dans les pays du Golfe confrontés à un stress hydrique extrême.
- En 1978, l'Arabie Saoudite inaugure à Djeddah la première station de dessalement utilisant le procédé d'osmose inverse, une avancée technologique majeure qui allait révolutionner le secteur.
- À la date du 1^{er} janvier 2000, plus de 13 600 usines de dessalement étaient opérationnelles dans plus de 120 pays, avec une capacité installée totale avoisinant les 26 millions de m³/jour.
- Actuellement, cette capacité mondiale a plus que doublé, atteignant environ 52 millions de m³/jour, dont 42 millions issus de l'eau de mer et 10 millions des eaux saumâtres, avec un taux de croissance annuel moyen d'environ 10 %.

Le dessalement connaît un essor significatif dans de nombreux pays confrontés à la rareté de l'eau douce : Australie, Libye, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Grèce, États-Unis, mais surtout dans les pays du Golfe, pionniers en la matière. Le Qatar, par exemple, couvre 95 % de ses besoins en eau potable grâce au dessalement. L'Espagne est, quant à elle, le premier producteur européen d'eau dessalée.

Cette montée en puissance reflète une tendance globale vers la sécurisation hydrique par l'innovation technologique. **(chebéli bachir ,juin 2022)**

b) Historique du dessalement en Algérie

En Algérie, l'aventure du dessalement de l'eau de mer débute dès les années 1960, dans un contexte marqué par la nécessité croissante de sécuriser l'approvisionnement en eau, notamment dans les régions arides et semi-arides.

- En 1964, une première station de déminéralisation fut implantée à Ouled Djellal (wilaya de Biskra), marquant un jalon pionnier dans le traitement des eaux souterraines salées.
- La même année, trois unités de 8 m³/heure furent installées dans le complexe gazier d'Arzew (Oran), dans le but de fournir de l'eau douce pour les besoins industriels.
- En 1969, une seconde station de dessalement fut mise en service, avec une capacité de 4 560 m³/jour, utilisant la technologie de distillation multi-effet.

Dans les années qui ont suivi, l'État algérien a progressivement structuré un ambitieux programme de dessalement pour faire face à la pression croissante sur les ressources hydriques:

- Dans le cadre du programme d'urgence, 23 stations monoblocs furent construites dans les wilayas de Tébessa, Oran, Tlemcen, Alger, Tizi-Ouzou, Skikda et Boumerdès, atteignant une capacité totale de 57 500 m³/jour.
- Entre 2003 et 2005, 14 grandes stations ont vu le jour avec une capacité combinée de 1,94 million de m³/jour, marquant un tournant vers l'industrialisation du dessalement en Algérie.
- D'autres stations majeures ont été mises en service entre 2009 et 2011, notamment :
 - Skikda : 100 000 m³/j
 - Beni Saf : 200 000 m³/j
 - Souk Tlata et Honaine (Tlemcen) : 200 000 m³/j chacune
 - Mostaganem : 200 000 m³/j
 - Fouka et Oued Sebt (Tipaza) : 120 000 et 100 000 m³/j respectivement
 - Cap Djinet (Boumerdès) : 100 000 m³/j
 - Chlef : 200 000 m³/j
 - El Tarf : 50 000 m³/j

Le fleuron de ces réalisations reste l'impressionnante station de Magtaa (Mostaganem), la plus grande d'Afrique, avec une capacité de production atteignant 500 000 m³/jour, exploitant la technologie de l'osmose inverse.

Grâce à ces investissements stratégiques, la capacité nationale de dessalement a connu une croissance spectaculaire :

- 500 000 m³/jour en 2008
- 1,1 million m³/jour en 2009
- 2,26 millions m³/jour en 2011
- 2,58 millions m³/jour en 2020
- Et une prévision de 3,8 millions m³/jour en 2024

Aujourd'hui, l'Algérie figure parmi les pays africains et méditerranéens les plus engagés dans le développement du dessalement, considérant cette technologie comme un levier stratégique de sécurité hydrique, notamment dans les zones côtières fortement urbanisées et dans les régions désertiques où les ressources conventionnelles ne suffisent plus. **(Ammari Abdessattar ,2023/2024)**

2.3 Définition du dessalement

Le dessalement est un processus physico-chimique visant à éliminer les sels dissous, notamment le chlorure de sodium (NaCl), ainsi que d'autres minéraux présents dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre, afin de la rendre apte à la consommation humaine, à l'irrigation agricole, ou à d'autres usages industriels.

Cette technique s'impose aujourd'hui comme une alternative stratégique face à la raréfaction des ressources en eau douce, notamment dans les régions arides, semi-arides et côtières. **(ZEGHIDI Abd Allah 2019/2020)**

2.3.1 Les techniques de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres

Face à l'accroissement alarmant de la demande en eau douce et à la diminution progressive des ressources naturelles renouvelables, le dessalement s'impose aujourd'hui comme une solution technologique incontournable pour assurer la sécurité hydrique, en particulier dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie.

Le dessalement des eaux salines, qu'il s'agisse d'eaux de mer ou d'eaux saumâtres, repose sur plusieurs technologies de pointe qui permettent de séparer les sels dissous et autres impuretés de l'eau brute, afin de produire une eau douce conforme aux normes de potabilité ou

d'irrigation. Bien que les eaux de mer contiennent une salinité moyenne de 35 000 mg/l, les eaux saumâtres, quant à elles, présentent des teneurs moins concentrées (généralement entre 1 000 et 10 000 mg/l), ce qui rend leur traitement souvent moins coûteux et moins énergivore. (AMMARI Abdessattar 2023/2024)

La figure (2.1) illustre de manière synthétique les **principaux procédés de Dessalement** utilisés à l'échelle industrielle pour convertir l'eau de mer ou l'eau saumâtre en eau douce.

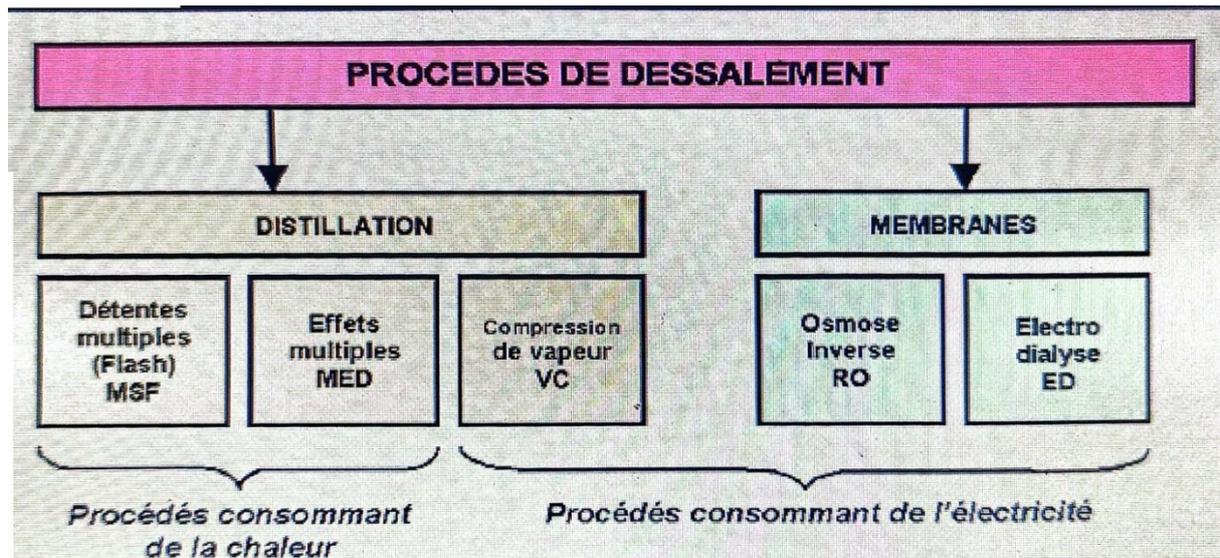


Figure 2. 1 : Les principaux procédés de Dessalement

Ces techniques sont classées en deux grandes familles selon l'énergie qu'elles consomment :

- Les procédés thermiques**, reposant sur la distillation, utilisent la **chaleur** pour évaporer l'eau et séparer les sels.
- Les procédés membranaires**, qui consomment principalement de **l'électricité**, utilisent des membranes semi-perméables pour filtrer l'eau.

2.3.1.1 La technique thermique

Le Dessalement thermique constitue l'un des procédés les plus anciens et les plus éprouvés pour transformer l'eau de mer ou saumâtre en eau douce. Inspiré du cycle naturel de l'eau, il repose sur l'évaporation de l'eau sous l'effet de la chaleur, suivie de sa condensation, en laissant les sels et impuretés dissous dans les résidus. Ce processus est particulièrement adapté aux régions où l'énergie thermique est disponible à bas coût, notamment à partir de sources résiduelles industrielles (vapeur d'une centrale électrique) ou d'énergies renouvelables comme le solaire thermique.

Les procédés thermiques se caractérisent par leur robustesse, leur capacité de traitement élevée et leur adaptabilité à de très fortes salinités, là où les techniques membranaires peuvent échouer. Trois variantes principales sont couramment utilisées à l'échelle industrielle : la distillation multi-effets (MED), la distillation à compression de vapeur (VC ou MVC), et la distillation à détente instantanée multi-étages (MSF). Ces techniques diffèrent par la manière dont elles récupèrent et réutilisent l'énergie thermique pour maximiser leur rendement. (Maafa aida septembre 2020)

a) Distillation multi-effets (MED)

Le procédé MED repose sur une série d'évaporateurs interconnectés appelés effets, dans lesquels l'eau de mer est chauffée à basse température (70 à 80 °C) et soumise à une pression décroissante à chaque étage. L'évaporation se produit successivement dans chaque effet grâce à la chaleur de condensation de la vapeur issue de l'étage précédent, ce qui permet un recyclage efficace de l'énergie thermique.

Chaque condensation libère de la chaleur utilisée dans l'effet suivant, ce qui réduit considérablement la consommation énergétique globale du système. Seule la chaleur du premier effet est fournie de l'extérieur, généralement par une chaudière, une source de chaleur industrielle ou une centrale thermique. Le nombre d'effets peut varier entre 4 et 12 selon la configuration, avec un rendement énergétique pouvant atteindre 70 % dans les installations modernes. La figure (2.2) illustre de manière simplifiée le fonctionnement du MED, démontrant son ingéniosité dans l'économie d'énergie thermique et sa capacité à produire de l'eau douce avec une consommation modérée. (Maafa aida septembre 2020)

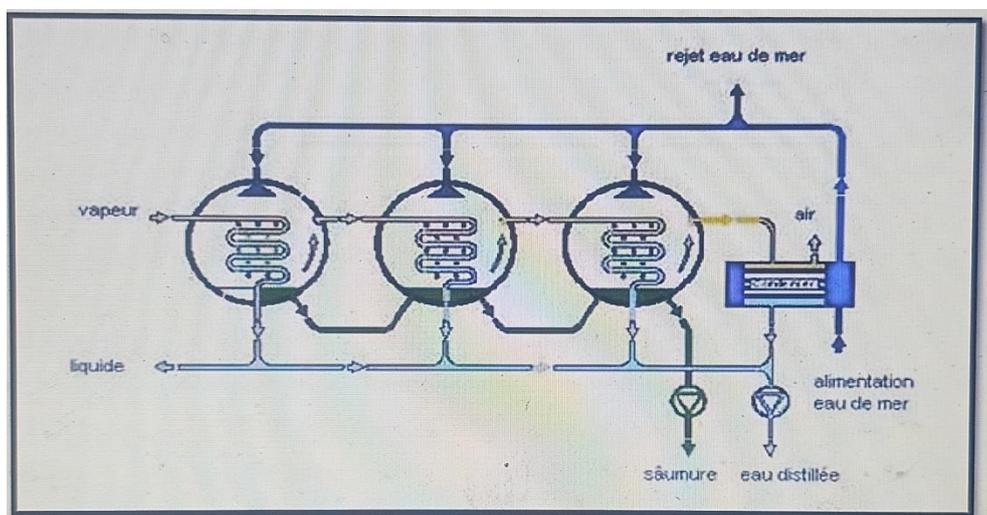


Figure 2. 2:Schéma illustratif du procédé de distillation multi-effets (MED)

Cette figure met en évidence le fonctionnement ingénieux du procédé MED, basé sur une série d'évaporations successives à pression décroissante, avec un recyclage optimisé de la chaleur entre les différents effets pour une meilleure efficacité énergétique.

b) Distillation à compression de vapeur (VC ou MVC)

Dans le procédé VC (Vapor Compression), l'eau salée est chauffée jusqu'à ébullition dans un évaporateur, générant une vapeur qui est ensuite **aspirée et comprimée** par un compresseur mécanique ou thermique. Cette compression **augmente la température et la pression** de la vapeur, qui est ensuite **condensée sur un faisceau d'échangeurs**, produisant de l'eau douce tout en libérant de la chaleur.

Ce procédé est très **compact**, avec des besoins réduits en eau de mer et en énergie thermique externe, car la chaleur est **largement recyclée** dans le système. Il est souvent utilisé pour de **petites à moyennes capacités** (jusqu'à 3 000 m³/jour) et convient bien aux zones isolées ou aux installations embarquées (navires, plateformes offshore). La figure (2.3) présente le principe de ce procédé ingénieux, qui combine simplicité, compacité et performance. (AMMARI Abdessattar 2023/2024)

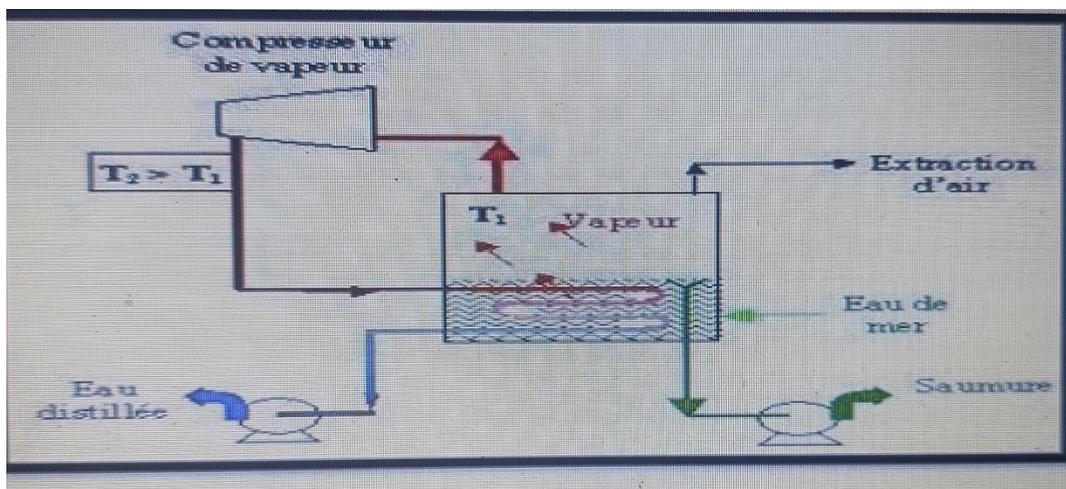


Figure 2. 3:Représentation du procédé de distillation à compression de vapeur (VC ou MVC)

La figure ci-dessus montre le principe de fonctionnement du procédé VC, où la vapeur produite est recyclée via un compresseur, permettant une condensation efficace et une réutilisation de la chaleur pour générer de l'eau douce dans un système compact et performant.

c) Distillation à détente instantanée multi-étages (MSF)

La technologie MSF (Multi-Stage Flash Distillation) est largement déployée dans les pays du Golfe pour ses capacités de production très élevées (jusqu'à 500 000 m³/jour). Le principe consiste à chauffer l'eau sous pression à environ 110–120 °C, puis à la relâcher brutalement dans une série d'enceintes (jusqu'à 40 étages) à pression décroissante. Cette détente instantanée provoque une vaporisation soudaine (ou flash) d'une partie de l'eau.

La vapeur générée est condensée sur des échangeurs thermiques, produisant de l'eau douce. L'efficacité du procédé repose sur le recyclage de la chaleur entre les étages, bien qu'il demeure plus énergivore que le MED. Cependant, il est souvent couplé à des centrales de cogénération, où la chaleur excédentaire est valorisée, réduisant ainsi les coûts d'exploitation. (Zeghidi abdallah 2019/2020)

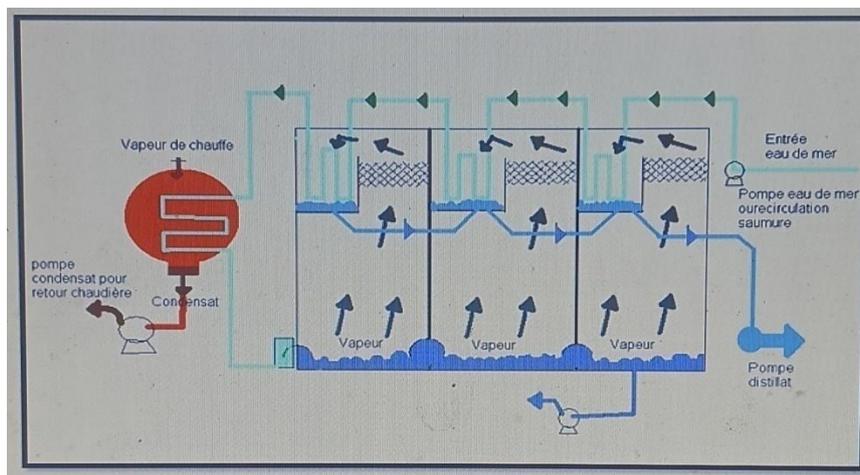


Figure 2. 4: Fonctionnement du procédé de distillation à détente instantanée multi-étages (MSF)

Cette figure illustre le procédé MSF, dans lequel l'eau chauffée sous pression est relâchée de manière contrôlée dans plusieurs chambres à pression décroissante, provoquant une vaporisation instantanée (flash) suivie de condensation pour produire de l'eau douce à grande échelle.

2.3.1.2 Les techniques membranaires

Contrairement aux procédés thermiques qui reproduisent le cycle naturel de l'eau via l'évaporation, les techniques membranaires permettent une séparation directe des sels et impuretés dissous dans l'eau à l'aide de membranes semi-perméables. Ces technologies, en plein essor à l'échelle mondiale, sont aujourd'hui largement utilisées pour le dessalement de

l'eau de mer et des eaux saumâtres, en raison de leur efficacité énergétique, leur compacité et leur modularité. Deux procédés membranaires sont principalement utilisés à des fins commerciales : l'osmose inverse (RO) et l'électrodialyse (ED). La nanofiltration, bien que similaire, est généralement réservée au traitement des eaux faiblement minéralisées ou pour des applications spécifiques comme le polissage d'eau ou la réduction des matières organiques.

2.3.1.2.1 Osmose inverse (RO – Reverse Osmosis)

L'osmose inverse est aujourd'hui la technologie de Dessalement la plus répandue dans le monde. Ce procédé consiste à forcer l'eau à travers une membrane semi-perméable sous une pression élevée, comprise généralement entre 54 et 80 bars selon la salinité de l'eau brute (Maurel, 2006). Cette membrane laisse passer les molécules d'eau, tout en retenant les sels dissous, les particules, les virus, les bactéries et une grande majorité des composés organiques dont la taille excède 0,0001 micron (10^{-7} mm). Contrairement aux techniques thermiques, aucun changement de phase n'est requis, ce qui permet de maintenir une consommation énergétique relativement maîtrisée, bien qu'importante au niveau des pompes haute pression. Ce procédé fonctionne à température ambiante, ce qui réduit les pertes thermiques et améliore l'efficacité globale du système. (AMMARI Abdessattar 2023/2024)

a) Principe de l'osmose inverse

Le phénomène d'**osmose** naturelle désigne le passage spontané de l'eau à travers une membrane semi-perméable depuis une solution diluée vers une solution plus concentrée, dans le but d'équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane. L'**osmose inverse**, quant à elle, inverse ce mécanisme naturel en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique sur le côté concentré de la solution. Cette pression contraint les molécules d'eau à traverser la membrane vers le compartiment contenant la solution la moins concentrée.

Le résultat de cette séparation est la production :

- D'un **perméat**, qui est une eau douce et désalinisée ;
- D'un **rétenant**, riche en sels et impuretés, qu'il convient de gérer (souvent rejeté ou concentré dans d'autres procédés).

L'efficacité de l'osmose inverse dépend fortement de la qualité de l'eau à traiter. Ainsi, un **prétraitement rigoureux** est indispensable pour éviter le colmatage des membranes par les

particules en suspension, les composés organiques, les micro-organismes (bactéries, virus) ou certains ions comme le calcium, le magnésium ou le fer.

Ce prétraitement peut inclure :

- Une **filtration fine** (de 5 à 25 μm) adaptée au type de membranes utilisées ;
- Une **coagulation-floculation**, pour agglomérer les particules fines et les matières colloïdales (Le Guern et al., 2003.) ;
- Et parfois une **désinfection chimique** ou un traitement antitartre (anti scalants).

La **figure (2.5)** illustre de manière claire et pédagogique le **principe fondamental de l'osmose inverse**, une technologie de séparation largement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

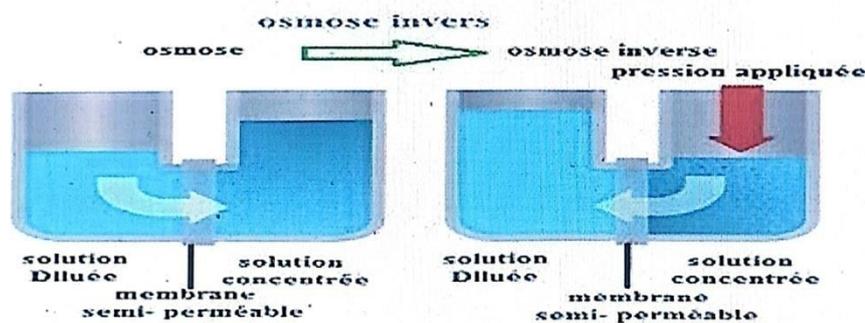


Figure 2. 5:Principe fondamental de l'osmose inverse

À gauche de la figure, le phénomène naturel d'**osmose** est représenté. Dans ce cas, l'eau migre **spontanément** d'une solution diluée (pauvre en sels) vers une solution concentrée (riche en sels) à travers une **membrane semi-perméable**. Ce transfert a pour but d'équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane.

À droite, on observe l'effet inverse grâce à l'application d'une **pression supérieure à la pression osmotique** sur le compartiment contenant la solution salée. C'est le principe de l'**osmose inverse** : l'eau est contrainte de traverser la membrane dans le sens opposé à l'osmose naturelle, permettant ainsi d'obtenir une **eau purifiée** (perméat) du côté dilué, tout en concentrant les sels et impuretés du côté opposé (rétentat).

b) Paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse (OI)

Le rendement et la durabilité d'une unité d'osmose inverse dépendent fortement du contrôle rigoureux de plusieurs paramètres clés. Ces paramètres influencent directement l'efficacité de séparation, la qualité du perméat (eau douce produite), ainsi que la longévité des membranes. Ils varient selon le type d'eau traitée (eau saumâtre, eau de mer, eaux industrielles) et les caractéristiques de conception de l'unité.

Le **tableau (2.1)** ci-dessous synthétise les **paramètres essentiels à contrôler** pour garantir une exploitation efficace, fiable et durable d'une unité d'osmose inverse. Une maîtrise rigoureuse de ces données permet non seulement d'**optimiser la production d'eau douce**, mais aussi de **prévenir l'usure prématurée** des membranes et de **réduire les coûts d'entretien**. Ces valeurs de référence sont indicatives et peuvent varier selon la technologie utilisée, la qualité de l'eau brute et les recommandations des fabricants de membranes

Tableau 2. 1: Paramètres essentiels à contrôler pour garantir une exploitation efficace, fiable et durable d'une unité d'osmose inverse

Paramètre	Valeurs de référence typiques	Remarques
Pression d'alimentation	4 – 7 bars (eau douce) 30 – 70 bars (eau de mer)	Plus la salinité est élevée, plus la pression nécessaire est importante.
Température de fonctionnement	20 – 30 °C (max : 45 °C selon membrane)	Des températures plus élevées augmentent le flux mais réduisent la durée de vie.
Taux de récupération	50 – 85 %	Dépend de la qualité de l'eau brute. Plus bas pour l'eau de mer (~35 %).
Rejet en sels (efficacité)	95 – 99,7 %	Selon le type de membrane et la qualité de l'eau.

PH de l'eau d'alimentation	3 – 10 (souvent 6 – 8 est optimal)	Peut varier selon les membranes (certaines tolèrent 2 à 11 temporairement).
Flux de perméat (débit filtré)	20 – 40 L/m ² /h (LMH)	Varie avec pression, température et qualité de l'eau.
Indice de colmatage (SDI)	< 3	L'eau doit être prétraitée pour éviter l'encrassement des membranes.
Conductivité de l'eau d'alim.	< 2 000 µS/cm (eau douce) > 30 000 µS/cm (eau de mer)	Mesure la salinité ; influe sur le choix des membranes.
Chlore libre	0 mg/L	Le chlore détruit les membranes polymères (polyamide).

c) Les avantages de l'osmose inverse : une technologie de pointe pour une eau ultrapure

L'osmose inverse s'impose aujourd'hui comme l'une des technologies de dessalement et de traitement de l'eau les plus performantes au monde. Grâce à ses membranes semi-perméables à haute sélectivité, elle permet de retenir jusqu'à 99,7 % des sels dissous, mais aussi une large gamme de contaminants : bactéries, virus, pesticides, métaux lourds, nitrates, microplastiques, et bien d'autres substances indésirables.

Parmi ses principaux atouts :

- Polyvalence : Elle peut être utilisée pour dessaler aussi bien l'eau de mer que l'eau saumâtre, ou encore purifier de l'eau polluée.
- Haute qualité du perméat : L'eau produite est d'une pureté exceptionnelle, répondant aux normes les plus strictes pour l'eau potable, les usages industriels ou médicaux (e.g. dialyse).
- Processus à température ambiante : Contrairement aux techniques thermiques, il n'y a pas de changement de phase, ce qui évite des pertes thermiques importantes.

- Modularité et évolutivité : Les systèmes d'osmose inverse peuvent être adaptés à différentes capacités, des petites unités domestiques aux grandes usines de dessalement.
- Intégration facile avec les énergies renouvelables : En particulier le solaire, ce qui en fait une solution attractive dans les régions isolées ou arides.

d) Les inconvénients de l'osmose inverse : des défis à relever pour une durabilité accrue

Malgré ses nombreux avantages, l'osmose inverse présente également certaines limites qu'il convient de prendre en compte, notamment dans une perspective de développement durable :

- Consommation énergétique élevée : Le processus nécessite des pressions élevées (jusqu'à 70 bars pour l'eau de mer), impliquant des pompes puissantes et donc une forte consommation d'électricité. Cela peut impacter le coût d'exploitation et poser des défis en l'absence d'infrastructures électriques robustes.
- Production de rejets salins : Pour chaque litre d'eau douce produite, 2 à 3 litres de saumures concentrées sont rejetés. Ce sous-produit peut affecter les écosystèmes marins s'il n'est pas correctement dilué ou traité avant rejet.
- Sensibilité des membranes : Les membranes doivent être protégées contre le colmatage (biofouling, tartre, matières en suspension), nécessitant un prétraitement rigoureux de l'eau brute et des cycles de nettoyage chimiques réguliers (CIP).
- Investissement initial : Les unités d'osmose inverse ont un coût d'acquisition relativement élevé, bien que celui-ci diminue avec l'évolution technologique et la production de masse.

En résumé, l'osmose inverse est une technologie hautement efficace et incontournable dans le contexte de la raréfaction des ressources en eau douce. Néanmoins, son **impact environnemental** son **coût énergétique** appellent à des solutions complémentaires : **énergies renouvelables, valorisation des saumures, et optimisation des procédés membranaires.**

2.3.1.2. La Nano filtration (NF)

La nano-filtration est une technologie membranaire de séparation à mi-chemin entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Ce procédé repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables qui permettent de filtrer des particules de très petite taille, généralement comprises entre 1 et 10 nanomètres, d'où son nom. Le principe de fonctionnement est basé sur l'application

d'une pression modérée (environ 4 à 30 bars) pour forcer l'eau à traverser la membrane, retenant ainsi certains composés dissous.

La nano-filtration est particulièrement efficace pour le traitement de l'eau dure, car elle retient les ions divalents, tels que le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), responsables de la dureté de l'eau. Elle est donc souvent utilisée comme solution d'adoucissement. Contrairement à l'osmose inverse, elle laisse généralement passer les ions monovalents (comme le sodium ou le chlorure), tout en retenant une large proportion des ions multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates, etc.), ce qui en fait une membrane sélective. .(chebėti bachir ,juin 2022)

La figure (2.6) illustre de manière claire et synthétique le principe de fonctionnement de la nano-filtration (NF).

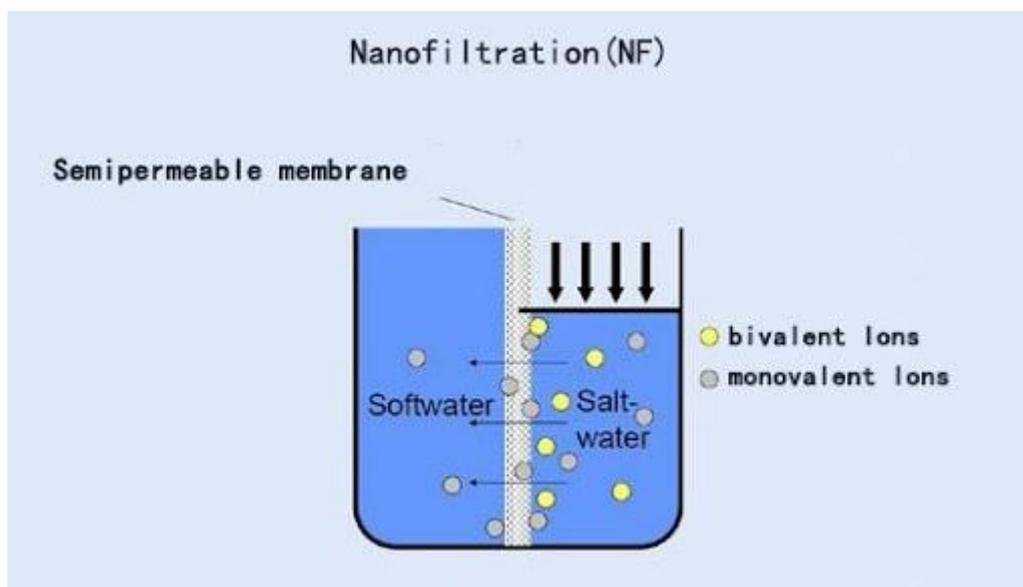


Figure 2. 6:Principe de fonctionnement de la nano-filtration (NF)

La nano-filtration est une technologie membranaire avancée utilisée pour le traitement de l'eau. La membrane semi-perméable représentée au centre du schéma agit comme une **barrière sélective**, permettant le passage de l'eau ainsi que des **ions monovalents** (comme Na^+ et Cl^-), tout en retenant efficacement les **ions bivalents** (tels que Ca^{2+} et Mg^{2+}) et d'autres **polluants de plus grande taille moléculaire**.

Cette illustration met en évidence la capacité unique de la nano-filtration à produire une eau douce (soft water) en éliminant les éléments responsables de la dureté de l'eau, tout en maintenant une pression modérée par rapport à l'osmose inverse. Elle témoigne de l'efficacité

de cette technique dans des applications telles que l'adoucissement de l'eau, la réduction des matières organiques, ou encore le traitement d'effluents industriels.

Grâce à cette performance ciblée, la nano-filtration constitue aujourd'hui une solution technologique durable et énergétiquement plus économique pour le prétraitement ou la purification sélective de l'eau dans divers secteurs.

2.3.1.2.3) Les techniques en développement ou marginales

Ce volet s'intéresse aux techniques de dessalement émergentes ou marginales, en mettant en lumière des procédés innovants tels que l'électrodialyse, le dessalement solaire et le dessalement par congélation. Ces approches, bien que moins répandues à l'échelle industrielle, présentent des principes de fonctionnement originaux et des avantages potentiels significatifs, notamment en matière de consommation énergétique, de respect de l'environnement ou d'adaptabilité aux ressources locales. Toutefois, leur développement reste limité en raison de contraintes technologiques, économiques ou environnementales qu'il convient d'analyser pour évaluer leur véritable potentiel dans les années à venir.

Dans ce qui suit, nous vous invitons à découvrir ces techniques prometteuses, chacune illustrant une voie alternative et ingénieuse vers l'accès à une eau douce durable.

a) Électrodialyse

L'électrodialyse (ED) est un procédé électrochimique de séparation ionique qui permet de déminéraliser une solution aqueuse en exploitant l'action d'un courant électrique continu. Ce procédé repose sur le transfert sélectif des ions à travers des membranes semi-perméables sous l'effet d'une différence de potentiel électrique. Il s'agit d'une technique particulièrement efficace pour le traitement des eaux faiblement ou modérément salées, comme les eaux saumâtres.

Concrètement, les membranes utilisées dans l'électrodialyse sont de deux types : les membranes échangeuses de cations, qui laissent passer uniquement les ions positifs (Na^+ , Ca^{2+} ...), et les membranes échangeuses d'anions, qui laissent passer les ions négatifs (Cl^- , SO_4^{2-} ...). Ces membranes sont disposées en alternance entre deux électrodes (anode et cathode), formant des compartiments qui concentrent ou diluent les ions.

Pour illustrer le principe, imaginons une cellule d'électrodialyse remplie d'une solution de chlorure de sodium (NaCl), avec une anode à une extrémité et une cathode à l'autre. Lorsque le courant est appliqué, les ions sodium (Na^+) migrent vers la cathode à travers les membranes

cationiques, tandis que les ions chlorure (Cl^-) se déplacent vers l'anode en traversant les membranes anioniques. Ce déplacement d'ions entraîne la formation de deux types de flux : un compartiment enrichi en sels (concentrat) et un autre appauvri (perméat).

L'électrodialyse est une solution moins énergivore que l'osmose inverse pour des eaux à faible salinité, car elle ne nécessite pas de haute pression. Elle est aussi modulaire, évolutive, et permet un contrôle précis de la minéralisation de l'eau produite. En revanche, elle est moins adaptée pour le traitement de l'eau de mer, dont la salinité élevée rend le procédé plus complexe et énergivore. La figure (2.7) illustre de manière schématique et pédagogique le principe de fonctionnement d'un système de dessalement par électrodialyse.

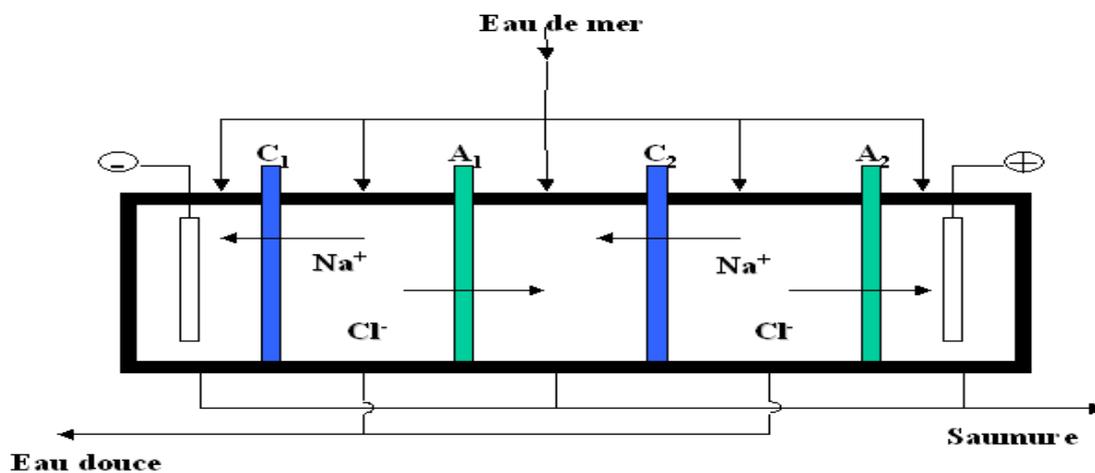


Figure 2. 7: Principe de fonctionnement d'un système de dessalement par électrodialyse

Ce schéma met en évidence l'agencement caractéristique du procédé, avec l'alternance des membranes échangeuses de cations et d'anions entre deux électrodes (anode et cathode). Sous l'effet d'un courant électrique continu, les ions positifs (Na^+ , Ca^{2+} ...) migrent vers la cathode, tandis que les ions négatifs (Cl^- , SO_4^{2-} ...) se dirigent vers l'anode. Ce déplacement ionique à travers les membranes entraîne la formation de compartiments successifs, dans lesquels l'eau s'appauvrit ou s'enrichit en sels dissous.

L'illustration met également en évidence le caractère modulaire du système, qui peut être facilement adapté aux besoins en capacité de traitement. Ce principe rend l'électrodialyse particulièrement flexible pour les applications à échelle variable, allant de petites unités décentralisées jusqu'à des installations industrielles. La figure permet ainsi de bien visualiser comment le procédé peut séparer efficacement les ions, tout en préservant une consommation énergétique relativement modérée.

✓ Principe de l'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de séparation électrochimique innovant, reposant sur le déplacement dirigé d'espèces ionisées (sels, acides ou bases) dissoutes dans l'eau, sous l'effet d'un champ électrique continu. Cette technologie met à profit des membranes échangeuses d'ions, sélectives respectivement aux cations et aux anions, pour extraire les ions dissous d'une solution.

Concrètement, lorsqu'une solution électrolytique traverse une cellule d'électrodialyse composée d'un empilement alterné de membranes cationiques (C) et anioniques (A), les ions réagissent à la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes :

- Les cations (Na^+ , Ca^{2+} ...) migrent vers la cathode (-) en traversant les membranes cationiques,
- Tandis que les anions (Cl^- , NO_3^- ...) se dirigent vers l'anode (+) en passant à travers les membranes anioniques.

Grâce à cette disposition alternée des membranes, les ions qui traversent une première membrane sont ensuite retenus par la suivante de type opposé, ce qui entraîne :

- Une accumulation d'ions dans certains compartiments (appelés concentrat),
- Et un appauvrissement progressif en sels dans les compartiments adjacents (appelés diluat), d'où est extraite l'eau dessalée (voir Figure 2.7).

La quantité de sel séparée est proportionnelle à l'intensité du courant appliqué. En effet, pour chaque Faraday (96 490 coulombs) de charge électrique transférée à travers le système, il est séparé $N/2$ équivalents-grammes de sel, où N représente le nombre total de compartiments (hors électrodes).

Cette technologie présente l'avantage d'une consommation énergétique plus faible que les procédés thermiques pour les eaux à faible ou moyenne salinité (comme les eaux saumâtres), et se distingue par une modularité et une automatisation facile, rendant son exploitation adaptée à des usages variés, notamment dans les zones isolées.

✓ Les avantages de l'électrodialyse : un procédé innovant et polyvalent

L'électrodialyse se distingue par une série d'avantages technico-économiques qui en font une technologie prometteuse, particulièrement adaptée au traitement des eaux à faible ou moyenne salinité :

• Excellente efficacité de séparation ionique

Grâce à l'utilisation d'un courant continu et de membranes échangeuses d'ions (cationiques et anioniques), l'électrodialyse permet de déplacer sélectivement les ions dissous, assurant une déminéralisation précise sans recours à des réactifs chimiques, ce qui simplifie la gestion des résidus et diminue les coûts de traitement.

• Large éventail d'applications

Elle est employée dans des domaines très diversifiés :

- Dessalement de l'eau saumâtre ou légèrement salée,
- Dénitratation de l'eau potable,
- Déminéralisation du lactosérum en industrie laitière,
- Stabilisation tartrique du vin en œnologie,
- Purification en pharmacie et agroalimentaire,
- Recyclage d'effluents industriels, grâce à sa capacité à extraire ou concentrer des ions spécifiques.

• Faible consommation énergétique

Comparée à des procédés comme l'osmose inverse, l'électrodialyse consomme moins d'énergie, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des eaux peu chargées en sels (eaux saumâtres, eaux souterraines), ce qui améliore son rendement énergétique global.

• Procédé durable à faible impact environnemental

Les membranes utilisées sont robustes, à longue durée de vie, et le besoin limité en produits chimiques réduit significativement les résidus de traitement. Cela rend l'électrodialyse écologiquement responsable, particulièrement dans les zones sensibles.

- **Flexibilité d'exploitation et précision de réglage**

L'électrodialyse permet un ajustement fin des concentrations ioniques en sortie, ce qui est précieux pour répondre aux exigences spécifiques de certains secteurs (par exemple, réduction sélective des nitrates sans toucher aux bicarbonates).

- **Double fonctionnalité et innovation technologique**

Dans certaines applications comme la dénitratisation, l'électrodialyse offre une double action bénéfique : réduction des nitrates et diminution de la dureté de l'eau. De plus, des variantes comme l'électrodialyse inversée (EDR) permettent d'automatiser le nettoyage des membranes, prolongeant leur durée de vie (Source : Société Chimique de France, 2019).

✓ **Les inconvénients de l'électrodialyse : limites et défis techniques à relever**

Malgré ses nombreux atouts, l'électrodialyse présente certaines contraintes qui freinent parfois son déploiement à grande échelle :

- **Incapacité à éliminer les contaminants non ioniques**

Ce procédé ne retient pas les micro-organismes (bactéries, virus) ni les polluants organiques non chargés électriquement. Un post-traitement (filtration, désinfection, etc.) est donc nécessaire pour garantir la potabilité complète de l'eau produite.

- **Perte d'efficacité à haute densité de courant**

Lorsque la densité du courant dépasse une certaine limite, le phénomène de dissociation de l'eau (formation de H^+ et OH^-) se produit, entraînant une chute de performance et une altération du pH. Il est donc essentiel de maintenir l'exploitation en dessous de cette limite critique pour garantir la stabilité du processus.

- **Encrassement des membranes par des particules en suspension**

Les particules colloïdales ou les précipités peuvent s'accumuler sur les membranes, augmentant leur résistance électrique et réduisant le débit. Toutefois, ce phénomène peut être limité grâce à l'inversion périodique de polarité (EDR), qui permet un auto-nettoyage partiel du système.

- **Encombrement et coût énergétique dans certaines configurations**

Pour des usages résidentiels ou dans les espaces restreints, l'électrodialyse peut paraître volumineuse et énergivore, surtout lorsqu'elle est appliquée à de grands débits ou à des eaux fortement chargées, nécessitant des systèmes plus complexes (Source : Lenntech).

b) Le dessalement solaire

Le dessalement solaire représente une méthode écologique et économique pour la production de petites quantités d'eau douce, en particulier dans les zones isolées ou arides, dépourvues d'accès à des réseaux d'énergie conventionnels. Ce procédé s'inspire du cycle naturel de l'eau (évaporation – condensation – précipitation), et repose sur une technologie simple mais ingénieuse. **La figure (2.8) donne une représentation claire et didactique du principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.**

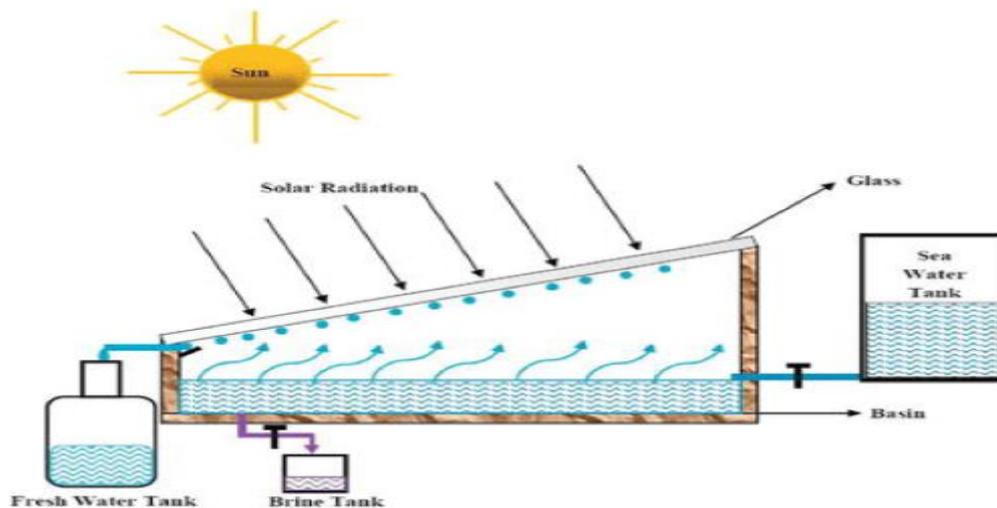


Figure 2. 8:Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

Ce système se compose généralement de :

- Un bac noir ou foncé contenant de l'eau salée ou saumâtre, conçu pour absorber efficacement l'énergie solaire ;
- Un couvercle transparent incliné, souvent en verre ou plastique, qui laisse passer le rayonnement solaire tout en jouant le rôle de surface de condensation ;
- Des canaux collecteurs où s'écoule l'eau douce obtenue après condensation de la vapeur.

Principe de fonctionnement de la distillation solaire passive

L'énergie solaire incidente traverse la couverture vitrée et réchauffe l'eau contenue dans le bac. Cette énergie, sous forme de rayonnement à courte longueur d'onde, est absorbée par l'eau, ce qui augmente progressivement sa température et provoque son évaporation.

Simultanément :

- La vapeur d'eau monte et entre en contact avec la paroi interne du couvercle, refroidie par le vent ou la circulation d'air extérieur.
- Cette paroi agit alors comme condenseur, permettant à la vapeur de se liquéfier en eau douce, qui ruisselle vers un collecteur.

Un phénomène important appelé effet de serre intervient ici : le rayonnement infrarouge (longue longueur d'onde) émis par l'eau chaude et le fond du bac ne peut pas s'échapper à travers la vitre. Cela permet une accumulation de chaleur dans l'enceinte, augmentant l'efficacité du procédé.

La température de l'eau dans le bac atteint rarement plus de 70 °C (Maurel, 2006), ce qui reste suffisant pour assurer une distillation efficace sans nécessiter de matériaux résistants à la haute température.

✓ **Avantages clés :**

- Énergie gratuite, renouvelable et inépuisable ;
- Technologie simple, rustique et facile à entretenir ;
- Aucune consommation d'énergie fossile ni rejet de polluants ;
- Idéal pour petites communautés rurales, abris d'urgence ou unités nomades.

✓ **Limites à considérer :**

- Production limitée (quelques litres/m²/jour selon l'ensoleillement) ;
- Dépendance au climat (efficacité réduite par temps nuageux ou en hiver) ;
- Surface importante requise pour produire des volumes significatifs.

c) Le dessalement par congélation

Le dessalement par congélation repose sur un principe thermodynamique naturel et surprenant : lorsque l'eau de mer gèle, la glace formée est presque exempte de sels. Cette technique utilise donc le changement d'état de l'eau (de liquide à solide) pour séparer les sels dissous.

En théorie, la cristallisation de l'eau lors de sa congélation exclut la majorité des impuretés et des ions dissous, produisant une glace relativement pure. Une fois formée, cette glace est séparée de la saumure résiduelle, puis fondue pour produire de l'eau douce.

Cependant, en pratique, ce procédé présente des défis :

- Des contaminations par les sels peuvent survenir pendant la formation de la glace, en raison de phénomènes cinétiques : les sels peuvent être piégés dans les cristaux si la congélation est trop rapide.
- La séparation de la glace de la saumure n'est pas parfaite, ce qui peut entraîner une légère recontamination lors de la manipulation.

Pour améliorer la qualité de l'eau obtenue, des techniques spécifiques de lavage de glace ou de régulation de la vitesse de congélation sont utilisées, permettant de minimiser ces contaminations (Mandri, 2011).

✓ Avantages prometteurs du dessalement par congélation :

- Faible consommation énergétique théorique par rapport aux méthodes thermiques, car le changement de phase liquide-solide consomme moins d'énergie que l'évaporation ;
- Absence de corrosion, car les basses températures limitent les réactions chimiques nuisibles aux équipements ;
- Préservation des membranes et matériaux, car aucun produit chimique agressif n'est nécessaire ;
- Technologie adaptée aux climats froids ou aux environnements polaires, voire à l'usage en mer grâce à l'énergie cryogénique.

✓ Limites et contraintes techniques :

- Technologie complexe à mettre en œuvre à grande échelle (contrôle précis de la température, manipulation de glace) ;

- Rendement énergétique faible en conditions réelles, notamment si la congélation doit être artificiellement provoquée ;
- Problèmes logistiques liés à la manipulation de la glace et à la séparation de la saumure
- Investissements initiaux élevés pour les installations industrielles.

Cette méthode, bien que marginale aujourd'hui, fait l'objet de recherches innovantes, notamment dans le cadre du dessalement durable et de l'utilisation des énergies cryogéniques ou résiduelles dans certaines industries.

2.4 Conclusion

Face à l'augmentation croissante des besoins en eau douce et à la raréfaction des ressources hydriques naturelles, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres s'impose aujourd'hui comme une solution stratégique incontournable. Les différentes techniques présentées dans cette étude — qu'elles soient matures, émergentes ou marginales — offrent une large palette de solutions adaptées à des contextes variés.

Les techniques thermiques telles que la distillation multi-effet (MED) ou la distillation flash (MSF) sont éprouvées dans les régions riches en énergie, tandis que les procédés membranaires comme l'osmose inverse ou la nano-filtration dominent actuellement le marché grâce à leur rendement élevé, leur compacité et leur performance en termes de rejet salin. L'électrodialyse, quant à elle, se distingue par sa faible consommation énergétique pour les eaux à faible salinité, avec des applications ciblées dans les domaines agroalimentaires et pharmaceutiques.

En parallèle, des technologies alternatives comme le dessalement solaire ou par congélation proposent des solutions écologiques, bien que leur rendement et leur coût restent des obstacles à leur déploiement massif. Toutefois, avec l'évolution constante des matériaux, l'intégration des énergies renouvelables, et l'optimisation énergétique, ces méthodes pourraient jouer un rôle plus important à l'avenir, notamment dans les zones rurales ou isolées.

Ainsi, le choix du procédé de dessalement ne repose pas uniquement sur la performance technique, mais doit être guidé par une analyse globale prenant en compte les ressources énergétiques disponibles, la qualité de l'eau à traiter, les exigences environnementales, les coûts d'exploitation, et les besoins spécifiques des usagers.

En somme, le dessalement n'est pas une solution unique, mais un éventail de technologies complémentaires, dont la synergie avec les énergies renouvelables, l'innovation et la durabilité conditionnera la capacité des sociétés futures à garantir un accès équitable et durable à l'eau potable.

Chapitre III

**Analyse technique et
diagnostic opérationnel
de la station de
dessalement par osmose
inverse d'Ouled-Djellal**

3.1 Introduction

La commune d'Ouled-Djellal, située dans une zone saharienne, dispose de ressources en eau souterraine riches mais fortement minéralisées. Afin de répondre aux besoins croissants en eau potable de la population, un système de traitement par osmose inverse a été mis en place. Ce chapitre présente une analyse approfondie de la station de dessalement d'Ouled-Djellal, en mettant en évidence son fonctionnement, son historique, ses équipements et les perspectives de réhabilitation.

3.2 Historique de la station

La station de dessalement d'Ouled-Djellal trouve ses origines dans une initiative menée par des experts américains, qui y ont introduit une technologie innovante pour l'époque : l'électrodialyse. Cette méthode, bien que prometteuse, n'a malheureusement pas pu être exploitée durablement. En effet, le fonctionnement de la station a été compromis par la défaillance d'une pièce maîtresse du système, appelée "Roshung", dont le remplacement s'est révélé impossible à l'époque.

Après plusieurs années d'inactivité, un nouvel élan a été insufflé en 2003 grâce à une collaboration fructueuse avec des partenaires français. Cette coopération a permis de moderniser l'installation par l'introduction du système ERODIA, marquant ainsi une étape décisive dans la relance du projet. Cette rénovation ne se limitait pas à une simple remise en service : elle incarnait une volonté renouvelée de sécuriser durablement l'approvisionnement en eau potable pour la population locale.

Entre 2006 et 2017, la station a franchi une nouvelle étape technologique en intégrant le procédé d'osmose inverse, une méthode de traitement des eaux parmi les plus efficaces au monde. Bien que cette technologie ait été développée dès 1976, sa mise en œuvre à Ouled-Djellal représente un tournant majeur dans la stratégie de gestion des ressources hydriques. Cette transition vers une technologie de pointe a permis d'améliorer considérablement la qualité de l'eau produite, en garantissant une salinité conforme aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Aujourd'hui, cette évolution historique illustre parfaitement la capacité d'adaptation et de modernisation du système hydraulique saharien face aux défis environnementaux et aux exigences croissantes en matière de sécurité hydrique. Elle symbolise également un modèle d'innovation technique et de coopération internationale au service du développement durable.

3.3 Présentation technique détaillée de la station de dessalement

Implantée sur un forage profond captant les eaux de la nappe albienne, cette station de dessalement constitue un ouvrage stratégique pour l'approvisionnement en eau potable dans les zones arides (Remini, 2010). Elle traite une eau saumâtre présentant une salinité moyenne de 1,7 g/L, afin de produire quotidiennement un volume de 1 200 m³ d'eau dessalée, répondant aux normes de potabilité (WHO, 2017). Grâce à une technologie de dessalement par osmose inverse, la station parvient à abaisser la salinité de l'eau traitée à moins de 0,5 g/L, assurant ainsi une qualité conforme aux exigences sanitaires (Greenlee et al., 2009).

Avec un rendement global de 55 %, cette installation témoigne d'une performance technologique adaptée aux conditions sahariennes exigeantes (Toumi et al., 2018). L'ouvrage a été conçu et réalisé par l'entreprise FOREMHYD, reconnue pour son expertise dans le domaine des forages et de la gestion des ressources en eau souterraine (Baba Ahmed, 2015). Les travaux ont démarré en mai 2017, et la station est depuis devenue un maillon essentiel dans le dispositif de sécurisation de l'alimentation en eau dans la région.

L'infrastructure comprend plusieurs unités techniques : un système de prétraitement (filtration, décoloration), des modules de dessalement par membranes, une unité de reminéralisations à base de calcaire naturel, ainsi qu'un réseau de distribution local. La conception a également intégré des solutions d'optimisation énergétique (récupération d'énergie, variateurs de fréquence) afin de réduire les coûts d'exploitation et de prolonger la durée de vie des équipements (Shannon et al., 2008).

3.3.1 Schéma hydraulique de la station de dessalement

Le schéma hydraulique de la station constitue un élément fondamental pour assurer la fiabilité et la performance du processus de traitement de l'eau. L'eau brute, captée directement du forage exploitant la nappe albienne, est tout d'abord dirigée vers une **bâche de stockage primaire**. Cette étape permet non seulement d'amortir les variations de débit, mais aussi de stabiliser certaines caractéristiques physico-chimiques avant l'entrée dans la chaîne de traitement (Remini, 2010).

À partir de cette bâche, l'eau est prélevée par un système de pompage et orientée vers les unités de prétraitement, qui comprennent généralement une filtration sur sable, une cartouche filtrante et une décoloration. Ces étapes sont essentielles pour protéger les membranes d'osmose inverse

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

contre l'encrassement et le colmatage, augmentant ainsi leur durée de vie et l'efficacité globale du système (Greenlee et al., 2009).

L'étape centrale du processus repose sur la technologie de l'osmose inverse, qui permet de séparer les sels dissous de l'eau grâce à des membranes semi-perméables sous haute pression. L'eau ainsi dessalée est ensuite acheminée vers une bêche de stockage secondaire, destinée à contenir l'eau traitée conforme aux normes de potabilité fixées par l'OMS (WHO, 2017). À partir de cette bêche, l'eau potable est distribuée via des points de puisage spécialement aménagés pour un accès localisé.

L'ensemble du dispositif est conçu pour **garantir une potabilisation optimale**, en assurant une séparation efficace des sels, une sécurisation sanitaire, et une distribution accessible, durable et hygiénique (Toumi et al., 2018).

La figure (3.1) ci-dessous illustre le schéma fonctionnel simplifié d'une station de dessalement par osmose inverse, présentant les principales étapes hydrauliques du traitement, depuis la captation de l'eau brute jusqu'à sa distribution finale.



Figure 3. 1:Schéma du système d'osmose inverse installé à la station de dessalement d'Ouled-Djellal

3.3.2 Forage : Source stratégique de l'eau brute souterraine

Le forage profond constitue la première étape essentielle du processus de dessalement, car il conditionne à la fois la disponibilité, la qualité et la constance de l'eau brute destinée au traitement. Dans le cas de la station de dessalement d'Ouled-Djellal, l'eau souterraine est extraite à partir d'un puits foré à une profondeur remarquable de 2 200 mètres, exploitant les ressources de la nappe albiennaise, un des plus vastes aquifères fossiles du Sahara septentrional (OSS, 2003 ; Remini, 2010).

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

Ce système aquifère, confiné, offre une eau relativement protégée des pollutions de surface, mais dont la composition physico-chimique nécessite un traitement poussé. En effet, l'eau captée peut contenir divers éléments indésirables, tels que des sels dissous, du fer, du manganèse, des gaz dissous (CO_2 , H_2S), ainsi que des matières en suspension susceptibles de perturber les étapes ultérieures de prétraitement et de dessalement (Toumi et al. 2018 ; Baba Ahmed, 2015).

Le forage est équipé d'un tubage en acier, d'une cimentation annulaire et d'un équipement de pompage immergé performant, permettant un captage régulier et durable de l'eau souterraine. Des essais de débit, de niveau statique et dynamique ainsi qu'une analyse complète de l'eau ont été réalisés pour garantir la compatibilité avec les unités de dessalement, notamment les membranes d'osmose inverse, très sensibles à la qualité de l'eau d'alimentation (Greenlee et al. 2009).

La figure (3.2) présente deux photos illustrant le forage de captage des eaux de la nappe albienne, tel qu'il est mis en œuvre au niveau de la station de dessalement d'OuledDjellal.



Figure 3. 2: Photos du forage de captage des eaux de la nappe albienne – Station de dessalement d'OuledDjellal

3.3.3 Refroidisseur : Optimisation thermique pour un traitement efficace

Dans les régions sahariennes, telles que celle d'OuledDjellal, les eaux souterraines issues de la nappe albienne sont naturellement chaudes, avec des températures pouvant dépasser $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en sortie de forage (Remini, 2010 ; Baba Ahmed, 2015). Cette température élevée constitue un obstacle majeur au bon fonctionnement des systèmes de traitement, en particulier les

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

membranes d'osmose inverse, dont les performances diminuent significativement au-delà de 30 °C (Greenlee et al. 2009).

Pour pallier ce problème, la station de dessalement est équipée d'un refroidisseur thermique, dispositif indispensable qui permet d'abaisser la température de l'eau brute à un seuil optimal, généralement autour de 25 à 30 °C, avant son entrée dans la chaîne de traitement. Ce refroidissement préalable améliore non seulement le rendement global de la station, mais prolonge également la durée de vie des composants sensibles, tout en assurant une stabilité des flux hydrauliques et des paramètres physico-chimiques.

Le système de refroidissement utilisé dans cette station repose sur un échangeur thermique à circuit ouvert, fonctionnant grâce à la ventilation naturelle et à l'aspersion contrôlée. Ce dispositif a été soigneusement dimensionné pour répondre aux conditions climatiques extrêmes et aux débits importants traités par la station.

La figure suivante (Figure 3.3) illustre trois vues représentatives du système de refroidissement mis en place pour les eaux captées par forage à Ouled-Djellal. Ce dispositif constitue une étape intermédiaire stratégique dans la chaîne de traitement, jouant un rôle essentiel dans l'optimisation énergétique et la performance membranaire.



Figure 3. 3: Photos du système de refroidissement des eaux de la nappe albiense – Station de dessalement d'Ouled-Djellal

3.4 Filière de traitement : Vers une eau potable de haute qualité

La station de dessalement d'Ouled-Djellal suit une filière de traitement rigoureusement structurée, composée de plusieurs étapes complémentaires, garantissant la production d'une eau potable conforme aux normes de qualité les plus strictes (OMS, 2017 ; Greenlee et al., 2009). Cette chaîne de traitement est conçue pour répondre aux exigences physico-chimiques de l'eau brute captée dans la nappe albienne, tout en assurant une sécurité sanitaire maximale pour les usagers.

3.4.1 Prétraitement : Une étape essentielle de conditionnement

Avant l'étape centrale de dessalement par osmose inverse, l'eau subit un prétraitement minutieux, destiné à protéger les membranes, à améliorer la qualité de l'eau d'alimentation et à réduire les phénomènes de colmatage et de biofouling (Toumi et al., 2018 ; Greenlee et al., 2009).

a) Pré chloration : désinfection et oxydation initiale

La préchloration consiste à injecter une faible dose de chlore actif en amont des filtres à sable. Cette étape permet de détruire les micro-organismes pathogènes, d'oxyder partiellement les matières dissoutes (comme le fer ou le manganèse) et d'inhiber la croissance bactérienne dans les conduites et équipements en aval (Baba Ahmed, 2015 ; OMS, 2017). Elle constitue un bouclier microbiologique essentiel dans les environnements chauds où la prolifération des germes est facilitée.

b) Filtres à sable : une barrière physique performante

Après préchloration, l'eau traverse des filtres à sable multicouches, conçus pour éliminer les particules solides en suspension, les matières colloïdales et certains agents organiques. Ces filtres, installés en série, utilisent une stratification spécifique de sable siliceux, de gravier et d'antracite, assurant une filtration en profondeur et une capacité de rétention élevée (Greenlee et al., 2009 ; Remini, 2010).

Ce système de filtration joue un rôle primordial dans la protection des membranes d'osmose inverse, en réduisant la turbidité et en prolongeant les cycles de nettoyage chimique.

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

La Figure (3.4) illustre deux photos prises sur site montrant les filtres à sable en service à la station de dessalement de Ouled Djellal, qui constitue une référence en matière de traitement des eaux souterraines sahariennes.



Figure 3. 4:Photos des filtres à sable à la station de dessalement d'Ouled Djellal

Le système de lavage et de rinçage : entretien et performance des filtres à sable

Le système de lavage et de rinçage constitue une composante essentielle de l'entretien régulier des filtres à sable, permettant de préserver leur efficacité de filtration et d'éviter le colmatage progressif du média filtrant (Greenlee et al., 2009 ; Remini, 2010). En effet, au fil du temps, les matières solides retenues s'accumulent dans les couches de sable, ce qui entraîne une perte de charge et une diminution du débit filtré. Un entretien efficace est donc indispensable pour garantir la durabilité et la performance du système.

Le lavage à contre-courant (backwash) est réalisé à l'aide de l'eau brute préalablement stockée dans une bache de stockage dédiée, qui joue un rôle stratégique dans la maintenance du système. Cette opération consiste à inverser le sens de circulation de l'eau à travers le filtre, ce qui permet de désagréger et d'évacuer les dépôts accumulés dans les différentes couches du filtre (Toumi et al. 2018 ; OMS, 2017).

Le bon fonctionnement du système de lavage conditionne directement la qualité de l'eau filtrée et la longévité des membranes d'osmose inverse qui suivent en aval. Une fréquence de lavage bien définie, couplée à une surveillance manométrique, permet d'optimiser les performances globales de la filière de traitement. Les Figures (3.5) et (3.6) présentent respectivement une vue réelle de la bache de stockage d'eau brute, utilisée pour alimenter le système de lavage, ainsi

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

qu'une photo illustrative du dispositif de contre-lavage des filtres à sable, installé dans la station de dessalement d'Ouled Djellal.



Figure 3. 5: Photo de la bâche d'eau brute stockée de la station de dessalement d'Ouled Djellal



Figure 3. 6: Photo du système de lavage à contre-courant des filtres à sable

c) Filtration sur charbon actif : purification organoleptique et déchloration

La filtration sur charbon actif constitue une étape essentielle du prétraitement visant à affiner la qualité de l'eau avant son passage sur les membranes d'osmose inverse. Ce procédé repose sur l'adsorption physique des matières organiques dissoutes, des pesticides, des composés organohalogénés et d'autres polluants traces susceptibles d'altérer le goût, l'odeur ou la couleur de l'eau (Greenlee et al. 2009 ; OMS, 2017).

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

Le charbon actif utilisé possède une surface spécifique élevée, facilitant une rétention efficace des contaminants. Il permet également d'éliminer le chlore résiduel libre injecté lors de la préchloration, protégeant ainsi les membranes d'osmose inverse, très sensibles à l'action oxydante du chlore (Baba Ahmed, 2015 ; Toumi et al. 2018). Cette étape garantit ainsi une meilleure qualité organoleptique et chimique de l'eau traitée.

d) Microfiltration : barrière de sécurité contre les particules fines

Avant le traitement membranaire, l'eau est soumise à une microfiltration de sécurité à l'aide de filtres à cartouches de porosité 5 microns, qui assurent l'élimination des particules fines, des résidus colloïdaux et des microflocs résiduels (Remini, 2010 ; Greenlee et al. 2009). Cette étape joue un rôle crucial dans la préservation des performances des membranes d'osmose inverse, en limitant les risques de colmatage prématuré.

Ces cartouches filtrantes sont généralement constituées de fibres synthétiques plissées, offrant une grande surface de filtration et une bonne résistance aux variations de débit. Le système est complété par une batterie d'instruments de mesure et de contrôle en continu, tels que des capteurs de pH, de potentiel redox (ORP) et de conductivité, qui permettent d'assurer la stabilité des paramètres de l'eau à l'entrée des membranes (OMS, 2017).

La Figure (3.7) illustre deux vues réelles du système de microfiltration installé dans la station de dessalement d'Ouled Djellal, témoignant de l'importance accordée à la fiabilité et à la performance du prétraitement.



Figure 3. 7: Photos du système de microfiltration à cartouches – Station de dessalement d'Ouled-Djellal

e) Déchloration : protection chimique des membranes d'osmose inverse

La déchloration constitue une étape cruciale dans la chaîne de prétraitement des stations de dessalement par osmose inverse, notamment dans les régions sahariennes où les conditions de

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

fonctionnement doivent être rigoureusement maîtrisées. Elle vise à éliminer le chlore libre résiduel injecté en amont lors de la préchloration, lequel peut altérer irrémédiablement la structure polymérique des membranes d'osmose inverse, en particulier celles en polyamide (Greenlee et al., 2009 ; OMS, 2017).

Pour ce faire, un dosage précis de bisulfite de sodium (NaHSO_3) est effectué. Ce réactif réducteur permet de neutraliser efficacement le chlore libre selon une réaction chimique rapide et complète, transformant le chlore en ions chlorures inoffensifs pour les membranes. Cette neutralisation est indispensable pour préserver l'intégrité, la durée de vie et les performances de séparation des membranes, qui constituent le cœur du procédé d'osmose inverse (Toumi et al., 2018 ; Baba Ahmed, 2015).

Le contrôle de cette étape repose sur la mesure en ligne du potentiel redox (ORP) ainsi que sur des tests colorimétriques de vérification de l'absence totale de chlore libre dans l'eau prétraitée. Une sous-déchloration peut conduire à la dégradation membranaire, tandis qu'un excès de bisulfite peut favoriser la prolifération bactérienne. L'équilibre du dosage est donc fondamental pour garantir une fiabilité opérationnelle optimale.

3.4.2 Osmose inverse : cœur technologique de la station de dessalement

L'osmose inverse (OI) représente le noyau central du procédé de dessalement, garantissant la séparation des sels dissous et la production d'une eau douce conforme aux normes de potabilité (Greenlee et al., 2009 ; OMS, 2017). Ce procédé repose sur l'application d'une pression élevée à une eau prétraitée, supérieure à la pression osmotique, afin de forcer le passage de l'eau à travers des membranes semi-perméables tout en retenant la quasi-totalité des sels, des ions, des micro-organismes et des composés organiques dissous.

La station de dessalement d'Ouled Djellal est équipée de deux lignes parallèles de modules membranaires, optimisant ainsi la capacité de traitement et assurant une redondance opérationnelle en cas de maintenance ou de défaillance d'une ligne. Cette configuration modulaire améliore la flexibilité du système et permet une adaptation dynamique au débit journalier requis, estimé à 1200 m³/j.

Des pompes haute pression, à haut rendement énergétique, sont utilisées pour atteindre les pressions nécessaires (entre 15 et 30 bars selon la salinité de l'eau). Ces pompes sont dimensionnées pour garantir un rendement optimal tout en minimisant les pertes d'énergie,

Chapitre III : Analyse technique et diagnostic opérationnel de la station de dessalement par osmose inverse d'Ouled-Djellal

conformément aux recommandations en matière d'efficacité énergétique dans les installations de dessalement (Toumi et al., 2018 ; Remini, 2010).

Le système comprend également une unité automatique de rinçage à l'eau douce pour éviter le colmatage des membranes après chaque cycle et une station de nettoyage chimique (CIP) permettant le détartrage, le décolmatage organique et l'élimination de biofilms, selon un protocole défini de maintenance préventive.

La Figure (3.8) présente une vue réelle du système d'osmose inverse installé dans la station de dessalement d'Ouled Djellal, illustrant l'organisation soignée des modules et l'environnement technique de cette technologie



Figure 3. 8: Vue réelle du système d'osmose inverse – Station de dessalement d'Ouled Djellal

3.4.3 Correction du pH : un ajustement indispensable pour la stabilité de l'eau

Après le passage à travers les membranes d'osmose inverse, l'eau produite est très faiblement minéralisée et présente généralement un pH légèrement acide, en raison de l'élimination des ions bicarbonates. Pour garantir une stabilité chimique et prévenir les phénomènes de corrosion dans les conduites de distribution, une solution de soude caustique (NaOH) est injectée en ligne. Cet ajustement permet de remonter le pH à une valeur optimale comprise entre 7,0 et 8,0, en conformité avec les recommandations de l'OMS (OMS, 2017 ; Greenlee et al., 2009).

3.4.4 Post-chloration : une barrière sanitaire essentielle

La post-chloration constitue l'étape finale de désinfection de l'eau traitée. Une faible dose de chlore (sous forme d'hypochlorite de sodium ou de chlore gazeux) est ajoutée afin de garantir une protection résiduelle contre toute recontamination microbienne lors du stockage et de la distribution. Cette mesure est indispensable en contexte saharien, où les températures élevées favorisent le développement bactérien dans les réseaux (Toumi et al., 2018). La concentration

finale en chlore libre est soigneusement contrôlée pour rester inférieure à 0,5 mg/L, conformément aux normes de l'OMS (2017).

3.4.5 Qualité et débit de l'eau traitée : performance et conformité

La station de dessalement d'Ouled Djellal assure une production d'eau douce avec une salinité résiduelle inférieure à 600 mg/L, répondant ainsi largement aux exigences des normes internationales de potabilité (OMS, 2017). Le débit nominal de traitement atteint 4,17 m³/h, ce qui correspond à une capacité journalière de 100 m³ à 1200 m³ selon le régime de fonctionnement adopté.

Le taux de conversion du système — défini comme le rapport entre le volume d'eau produite et le volume d'eau brute traitée — est estimé à 75 %, ce qui constitue une performance remarquable pour une eau saumâtre de salinité modérée (1,7 g/L). Ce rendement traduit une optimisation des paramètres de pression, de récupération et de nettoyage des membranes (Greenlee et al., 2009 ; Toumi et al., 2018).

3.5 Équipements et spécifications techniques : robustesse et fiabilité du système

Les équipements installés au sein de la station de dessalement sont sélectionnés avec rigueur pour répondre aux contraintes environnementales sévères de la région saharienne (chaleur, salinité, poussières). Cette section présente les caractéristiques techniques détaillées des principaux composants, notamment :

- Pompes haute pression : modèle Grundfos CRN 32, en acier inoxydable, capables de délivrer jusqu'à 30 bars ;
- Réservoirs de stockage : polyéthylène renforcé, capacité de 25 m³ pour l'eau brute et 10 m³ pour l'eau traitée ;
- Filtres à sable et à charbon actif : filtres sous pression, avec média filtrant multicouche (sable, gravier, anthracite, charbon activé) ;
- Vannes motorisées et instruments de contrôle (manomètres, capteurs de conductivité, pH-mètres) assurant une gestion automatisée du processus.

Ces équipements sont documentés à travers les fiches techniques fournies par l'entreprise FOREMHYD, responsable de la réalisation de la station

3.6 Diagnostic et perspectives de réhabilitation de la station de dessalement

3.6.1 Diagnostic technique : état actuel alarmant

La station de dessalement d'Ouled Djellal est à l'arrêt depuis plusieurs années, ce qui a engendré une dégradation notable de l'ensemble des équipements. Les membranes d'osmose inverse sont fortement colmatées, réduisant leur perméabilité et rendant le processus de séparation inopérant. De plus, plusieurs pompes de haute pression sont hors service, entraînant l'impossibilité de générer la pression nécessaire au fonctionnement du système. Les filtres à sable et à charbon actif sont encrassés, et ne remplissent plus leur rôle de prétraitement efficace. L'absence totale de système de contrôle automatisé (SCADA) accentue la vulnérabilité du système, rendant le pilotage manuel long, peu fiable et énergivore (Greenlee et al., 2009 ; Toumi et al., 2018).

3.6.2 Points critiques à traiter en priorité

Plusieurs dysfonctionnements majeurs constituent des points de blocage prioritaires :

- Fuites hydrauliques importantes dans les canalisations et les raccords, provoquant des pertes d'eau et une baisse du rendement global ;
- Consommation énergétique excessive, principalement liée à l'inefficacité des équipements vétustes et à l'absence de récupération d'énergie ;
- Absence de supervision et d'automatisation, qui empêche toute régulation dynamique et préventive des anomalies.

Ces points critiques compromettent à la fois la fiabilité du traitement, la qualité de l'eau produite et la durabilité de l'infrastructure (OMS, 2017).

3.6.3 Enjeux économiques : réhabiliter pour rentabiliser

La réhabilitation complète de la station représente un investissement significatif, mais constitue une étape incontournable pour préserver la ressource hydrique souterraine, assurer la sécurité sanitaire de l'eau et soutenir le développement socio-économique local.

Des opportunités de financement peuvent être mobilisées, notamment à travers des partenariats public-privé (PPP), des programmes de coopération internationale et des fonds de transition énergétique. Le retour sur investissement peut être renforcé par une optimisation des coûts

d'exploitation via l'intégration des énergies renouvelables et des technologies intelligentes (Ghaffour et al., 2013).

3.6.4 Impacts sociaux : vers un développement durable local

La remise en service de la station aurait des retombées sociales positives significatives :

- Alléger la pression sur les forages agricoles, en particulier en période de sécheresse prolongée ;
- Améliorer l'accès à une eau potable de qualité, dans une région saharienne où les ressources en eau douce sont limitées ;
- Créer des emplois locaux, à travers l'exploitation, la maintenance et le suivi de la station
- Renforcer la résilience des communautés rurales face aux changements climatiques et à la dégradation des nappes (Toumi et al., 2018).

3.6.5 Propositions concrètes de réhabilitation

Afin d'assurer une relance durable et performante de la station, les actions suivantes sont recommandées :

- Remplacement intégral des membranes d'osmose inverse par des modules modernes à haute performance énergétique ;
- Réhabilitation du système de prétraitement, incluant les filtres à sable, à charbon actif et la microfiltration ;
- Mise en place d'un système SCADA pour le pilotage automatisé, la détection des anomalies et l'optimisation en temps réel ;
- Intégration de panneaux solaires photovoltaïques, réduisant la dépendance au réseau électrique et abaissant les coûts de fonctionnement (Ghaffour et al., 2013) ;
- Formation continue du personnel local, axée sur l'exploitation, l'entretien et la sécurité sanitaire ;
- Mise en œuvre d'une surveillance environnementale, pour évaluer l'impact de la station sur la nappe albienne et garantir la durabilité de l'exploitation (OMS, 2017).

Conclusion

La station de dessalement d'Ouled Djellal, bien que confrontée à un état avancé de vétusté et à un arrêt prolongé de son exploitation, représente un potentiel stratégique majeur pour répondre aux besoins croissants en eau potable de la région. Son positionnement au cœur d'un territoire saharien riche en ressources saumâtres, combiné à un ensoleillement exceptionnel, constitue une opportunité unique pour intégrer des solutions durables telles que l'énergie solaire et l'automatisation intelligente. Une réhabilitation réussie, fondée sur une modernisation ciblée des équipements, une optimisation énergétique, et une gestion environnementale rigoureuse, permettrait non seulement de redonner vie à une infrastructure hydraulique essentielle, mais également de renforcer la sécurité hydrique, dynamiser l'économie locale, et améliorer significativement la qualité de vie des habitants. Ce projet peut ainsi devenir un modèle de transition hydrique et énergétique en milieu saharien, tout en s'inscrivant dans une logique de développement territorial équitable et résilient face aux changements climatiques. La mise en œuvre de ce plan exige l'engagement des parties prenantes, des financements adaptés et une vision à long terme ancrée dans l'innovation et la durabilité.

CHAPITRE IV

**Étude expérimentale, analyse
des échantillons et
interprétation des résultats
des prélèvements effectués à
la station de dessalement
d'Ouled Djellal**

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale et au suivi technique de la station de dessalement par osmose inverse d'**Ouled Djellal**, une infrastructure restée longtemps à l'arrêt. À cette occasion, et avec l'appui des services techniques concernés, la station a été exceptionnellement remise en marche de manière temporaire afin de permettre un diagnostic approfondi de son état de fonctionnement, en vue d'une éventuelle remise en service dans un futur proche. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances des différentes unités de traitement et d'identifier les éventuelles défaillances ou améliorations à envisager.

Pour ce faire, cinq points de prélèvement ont été sélectionnés le long de la chaîne de traitement, depuis le captage de l'eau brute jusqu'à la sortie du système membranaire, permettant une analyse progressive et comparative de la qualité de l'eau à chaque étape. L'analyse de ces échantillons en laboratoire a permis de mesurer des indicateurs clés tels que la température, le pH, la conductivité, la turbidité, la salinité, le TDS, la dureté totale, ainsi que les concentrations en cations et anions majeurs.

Ce chapitre présente les méthodes employées, les résultats obtenus et leur interprétation, dans le but de dresser un diagnostic fiable du système de traitement de l'eau et de proposer des pistes et des solutions techniques permettant une prévision de la future mise en service de la station.

4.2 Diagnostic de la station de dessalement d'Ouled Djellal

Dans le but de recueillir des informations précises sur le fonctionnement et l'état des différentes composantes de la station de dessalement d'Ouled-Djellal, une installation alors à l'arrêt, une campagne d'investigation a été menée suite à sa remise en service, dans le cadre de notre stage au sein de la station.

À cette occasion, cinq points de prélèvement stratégiques ont été soigneusement identifiés le long de la chaîne de traitement, afin de suivre l'évolution de la qualité de l'eau à chaque étape du processus, depuis le captage jusqu'à la sortie du système.

Le premier point est situé entre la sortie du forage captant l'eau de la nappe albienne et l'entrée du réservoir de refroidissement. Le deuxième point se trouve entre ce réservoir et les filtres à sable, ce qui permet d'évaluer l'efficacité du refroidissement initial. Le troisième point est localisé entre les filtres à sable et les microfiltres, zones cruciales pour la rétention des matières en suspension. Le quatrième point de prélèvement est situé à la sortie de la première ligne de membranes d'osmose inverse, correspondant à l'étape la plus délicate et la plus sensible du traitement. Le cinquième et dernier point est positionné à la sortie de la deuxième ligne de

système membranaire. L'eau dessalée provenant des deux lignes est ensuite collectée et dirigée vers les consommateurs. Une petite partie de cette eau est dérivée vers le réservoir d'eau propre de la station pour assurer divers usages internes, notamment le nettoyage périodique des filtres à sable, des microfiltres et des membranes, ainsi que la préparation des solutions chimiques nécessaires au bon fonctionnement de l'installation.

Cette démarche méthodique d'échantillonnage permet d'avoir une vision globale et progressive du fonctionnement réel de la station, de repérer d'éventuelles anomalies, et d'évaluer les performances de chaque unité de traitement, de l'eau brute jusqu'à l'eau purifiée.

La figure (4.1) présente un schéma illustratif et simplifié des principaux points de prélèvement des échantillons d'eau, réalisés au niveau de la station de dessalement par osmose inverse implantée à Ouled Djellal.

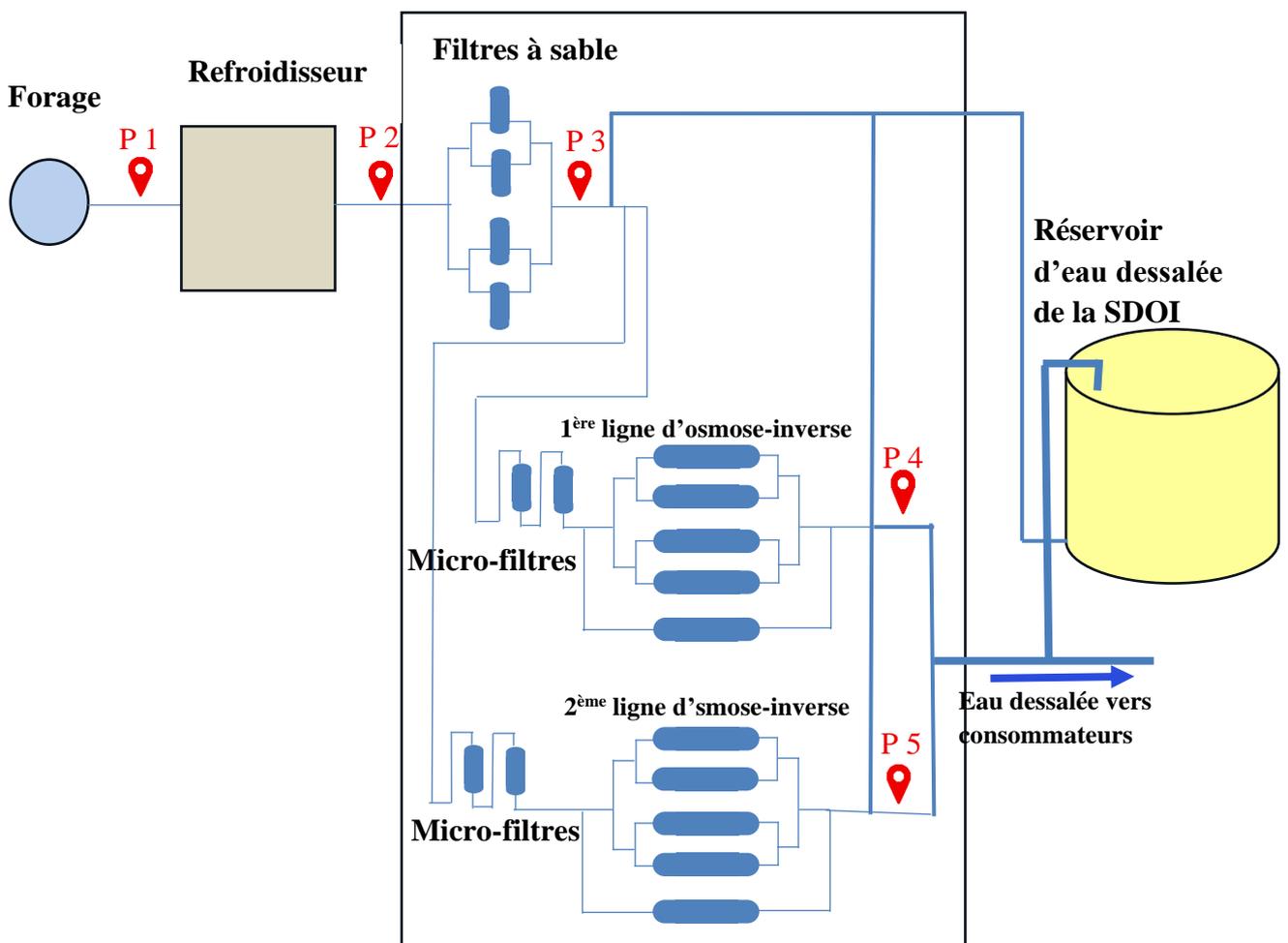


Figure 4. 1: Schéma représentatif et approximatif des différents points de prélèvement des échantillons d'eau au sein de la station de dessalement par osmose inverse située à Ouled Djellal.

4.2.1 Prélèvement des échantillons d'eau

Le prélèvement des échantillons constitue l'étape préliminaire essentielle de toute analyse physico-chimique. Il s'agit d'une phase fondamentale du processus analytique, car la fiabilité des résultats dépend en grande partie de la représentativité et de la qualité de l'échantillonnage. Ainsi, toutes les précautions nécessaires ont été rigoureusement respectées afin de garantir des échantillons fidèles aux conditions réelles des points de prélèvement.

Pour cette opération, des bouteilles en plastique d'une capacité de 1,5 litre ont été utilisées. Avant leur utilisation, chaque bouteille a été soigneusement lavée, d'abord à l'eau du robinet pour éliminer toute impureté grossière, puis rincée à l'eau distillée afin d'éviter toute contamination résiduelle. Sur le site de prélèvement, une étape supplémentaire cruciale a été effectuée : les bouteilles ont été rincées avec l'eau du point de prélèvement lui-même, garantissant ainsi une parfaite adaptation au milieu à analyser.

Cette précaution vise à minimiser toute interaction indésirable entre le contenant et le contenu, et à assurer une meilleure représentativité de l'échantillon collecté. Une fois les prélèvements réalisés, chaque bouteille a été immédiatement étiquetée de manière claire et précise, avec mention du point de prélèvement, de la date et de l'heure, afin d'éviter toute confusion ultérieure. Enfin, l'ensemble des échantillons a été soigneusement conditionné dans une boîte de transport dédiée, offrant une protection optimale pendant leur acheminement vers le laboratoire. La figure (4.2) présente une photographie illustrant les bouteilles contenant les échantillons d'eau prélevés aux différents points stratégiques de la station de dessalement d'Ouled Djellal. Chaque bouteille correspond à un emplacement précis du processus de traitement, reflétant ainsi l'évolution de la qualité de l'eau tout au long de la chaîne de dessalement.



Figure 4. 2: Bouteilles contenant les échantillons d'eau prélevés aux différents points de la station de dessalement d'Ouled Djellal.

Cette image témoigne du sérieux accordé à la démarche expérimentale et à la rigueur du protocole d'échantillonnage mis en œuvre sur le terrain.

4.2.2. Normes algériennes de potabilité de l'eau et indice de balance

a) Normes algériennes de potabilité

Avant d'aborder l'analyse des résultats et leur interprétation, il convient tout d'abord de rappeler les normes algériennes de potabilité de l'eau. Ces normes constituent un cadre de référence essentiel permettant d'évaluer la conformité de la qualité de l'eau aux exigences sanitaires et réglementaires en vigueur. La mise en évidence de ces seuils réglementaires est indispensable pour situer les valeurs mesurées et juger de leur acceptabilité vis-à-vis de l'alimentation humaine.

Tableau 4. 1: Paramètres physiques (Réf. : Arrêté interministériel du 5 juillet 1993, JORA n°52/1993 ; NA 174-106/1992)

Paramètre	Valeur limite	Référence
Température (°C)	Pas de limite stricte	JORA 1993
Couleur (UCV)	≤ 15	JORA 1993, NA 174-106
Turbidité (NTU)	≤ 5	JORA 1993
Odeur et goût	Acceptables	JORA 1993
Conductivité (μS/cm à 25°C)	≤ 2800	NA 174-106, OMS 2017
TDS (résidu sec à 180°C)	≤ 1500 mg/l	JORA 1993, NA 174-106

Tableau 4. 2: Paramètres chimiques majeurs (Réf. : JORA 1993 ; NA 174-106/1992 ; OMS 2017)

Paramètre	Limite admissible	Référence
pH	6.5 – 8.5	JORA 1993
Chlore libre	0.2 – 0.5 mg/l	NA 174-106, ADE
Calcium (Ca ²⁺)	≤ 200 mg/l	NA 174-106
Magnésium (Mg ²⁺)	≤ 150 mg/l	NA 174-106
Sodium (Na ⁺)	≤ 200 mg/l	NA 174-106
Potassium (K ⁺)	≤ 12 mg/l	NA 174-106
Chlorures (Cl ⁻)	≤ 250 mg/l	JORA 1993, NA 174-106
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	≤ 250 mg/l	JORA 1993, NA 174-106
Nitrates (NO ₃ ⁻)	≤ 50 mg/l	JORA 1993, OMS 2017
Nitrites (NO ₂ ⁻)	≤ 0.1 mg/l	JORA 1993, OMS 2017
Ammonium (NH ₄ ⁺)	≤ 0.5 mg/l	JORA 1993, NA 174-106
Fer total (Fe)	≤ 0.3 mg/l	NA 174-106
Manganèse (Mn)	≤ 0.1 mg/l	NA 174-106
Fluorures (F ⁻)	≤ 1.5 mg/l	JORA 1993, OMS 2017
Aluminium (Al)	≤ 0.2 mg/l	JORA 1993, NA 174-106

Tableau 4. 3: Paramètres microbiologiques (Réf. : JORA 1993 ; NA 174-107/1992 ; OMS 2017) avec : JORA est le Journal Officiel de la République Algérienne.

Paramètre	Valeur limite	Référence
Coliformes totaux (37°C)	0 / 100 ml	JORA 1993, NA 174-107
Coliformes fécaux (E. coli)	0 / 100 ml	JORA 1993, NA 174-107, OMS 2017
Entérocoques fécaux	0 / 100 ml	JORA 1993, NA 174-107
Germes aérobies revivifiables (22°C)	≤ 100 / ml	NA 174-107
Germes aérobies revivifiables (37°C)	≤ 20 / ml	NA 174-107

Tableau 4. 4: Paramètres liés à la salinité (Arrêté interministériel du 5 juillet 1993, publié au JORA n°52 du 13 octobre 1993, fixant les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine)

Paramètre	Valeur maximale admissible	Unité	Indication sur la salinité
TDS (résidu sec à 180 °C)	≤ 1500 mg/l	mg/l	Mesure directe de la salinité
Conductivité électrique	≤ 2800 µS/cm à 25°C	µS/cm	Indirectement liée à la salinité
Chlorures (Cl ⁻)	≤ 250 mg/l	mg/l	Ions salins dominants
Sodium (Na ⁺)	≤ 200 mg/l	mg/l	
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	≤ 250 mg/l	mg/l	

La **salinité** est généralement considérée excessive pour une eau potable si le **TDS dépasse 1500 mg/l**, ce qui correspond à environ **1.5 g/l**.

b) Indice de balance

Équilibre ionique d'une eau naturelle (notion de balance ionique) :
 Les eaux naturelles sont généralement en équilibre ionique, ce qui signifie que la somme des charges des cations est globalement équivalente à celle des anions. Cet équilibre électrochimique est une condition essentielle pour garantir la stabilité chimique de l'eau. Il peut être vérifié à l'aide de la relation suivante :

$$\sum cations \left(\frac{meq}{l} \right) = \sum anions \left(\frac{meq}{l} \right) \Rightarrow \sum cations \left(\frac{meq}{l} \right) - \sum anions \left(\frac{meq}{l} \right) = 0$$

Dans la pratique, l'équilibre ionique est généralement évalué par le calcul de l'indice de balance ionique (IB), un indicateur clé permettant de vérifier la cohérence analytique entre les cations et les anions présents dans l'eau. Cet indice constitue un outil simple mais puissant pour juger de la fiabilité des analyses chimiques réalisées.

$$IB (\%) = 100. \frac{\left| \sum cations \left(\frac{meq}{l} \right) - \sum anions \left(\frac{meq}{l} \right) \right|}{\sum cations \left(\frac{meq}{l} \right) + \sum anions \left(\frac{meq}{l} \right)}$$

Tableau 4. 5: paramètres ioniques aux points de prélèvement des échantillon et indice de balance

	A la sortie du forage Au point de prélèvement P1	A la sortie du Re froidisseur c'est-à-dire au point P2	A la sortie des filtres à sable Au point de prélèvement P3	1 ^{ère} ligne d'osmose inverse Au point de prélèvement P4	2 ^{ème} ligne d'osmose inverse Au point de prélèvement P5
Ca+ (mesurer)	305,181	305,81	305,81	43,25	43,25
Mg+2 (calculer)	157,49	157,49	157,49	18,74	18,74
k+ (mesurer)	26,8	26,8	26,8	12,4	12,4
Na+ (mesurer)	79	79	79	40	40
HCO3	37,088	37,088	37,088	6,588	6,588
SO4- (mesurer)	393	393	393	120	120
Cl- (mesurer)	624,8	624,8	624,8	170,4	170,4
NO3-(mesurer)	4,455	4,455	4,455	2,74	2,74
Fe (mesurer)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
NH+(mesurer)	0,092	0,092	0,092	0,037	0,037
po4-3(mesurer)	0	0	0	0	0
TDS(mesurer)	0	0	0	517	556
sal(mesurer)	2,6	2,8	2,8	0,3	0,4
Temp (mesurer)	14,5	11,2	11,1	11,1	11,8
pH (mesurer)	7,65	7,63	7,6	8,03	7,87
CE (mesurer)	5200	5500	5610	1100	1200
Turbid. (mesurer)	0,62	0,18	0,44	0,17	0,56

TH (mesurer)	141	141	141	18,4	18,4
TAC (mesurer)	185,44	185,44	185,44	32,94	32,94
IB (%)	9,95	9,95	9,95	12,83	12,83

Interprétation de IB :

IB	Interprétation
IB = 0	Cas idéal
$0 < IB \leq 5\%$	Le résultat d'analyse est bon (analyse menée dans des bonnes conditions)
$5 < IB \leq 10\%$	Le résultat d'analyse est acceptable (résultats d'analyse exploitables)
IB > 10%	Le résultat d'analyse est non exploitable (l'analyse est à refaire)

Pour trois de nos points de prélèvement, les résultats des analyses indiquent que l'indice de balance est acceptable. Pour deux autres points, il est légèrement supérieur à la limite d'acceptabilité. Compte tenu du manque de moyens pour effectuer des analyses plus approfondies, ces résultats sont admis tels quels, et l'on passe à l'étape suivante.

4.2.3 Analyse physico-chimiques des échantillons

4.2.3.1 Température

La température de l'eau constitue un paramètre fondamental dans la compréhension des processus physico-chimiques intervenant dans le traitement et la qualité de l'eau. Elle influence de manière significative des phénomènes essentiels tels que la fluoration, la solubilité et l'ionisation des agents coagulants, les variations du pH, ainsi que l'efficacité des procédés de désinfection. Une connaissance précise de ce paramètre est donc indispensable pour assurer la performance des traitements appliqués.

Dans le cas des eaux souterraines de la nappe albienne de la région d'Ouled Djellal, les températures mesurées varient entre 14,5 °C et 11,1 °C. Cette faible variation traduit une stabilité apparente de la température. Toutefois, il convient de souligner que ces valeurs ont été obtenues en laboratoire, à partir d'échantillons prélevés et transportés, et non mesurées directement in situ.

Ainsi, la constance observée peut être attribuée, en partie, aux conditions de conservation des échantillons et à la période de réalisation des analyses. Contrairement aux mesures sur site, les analyses différées en laboratoire ne traduisent pas toujours fidèlement les fluctuations thermiques réelles du milieu aquifère et des points de prélèvement au moment du prélèvement. Cette situation souligne l'importance de réaliser des mesures directes, aux points de

prélèvement, sur le terrain, en particulier pour les paramètres sensibles à la température, afin d'obtenir des résultats plus représentatifs des conditions naturelles.

4.2.3.2 Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène, représente la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse. Il constitue un paramètre fondamental, notamment dans les procédés de traitement de l'eau, où il influence directement des opérations clés comme la coagulation/floculation et la désinfection. Dans les laboratoires de contrôle des stations de traitement, sa mesure est indispensable et, si nécessaire, son ajustement permet d'optimiser l'efficacité des traitements. Le pH varie de 0 à 14 : une eau est dite *acide* si sa valeur est inférieure à 7, *alcaline* si elle dépasse 7, et *neutre* si elle est égale à 7. L'analyse du pH requiert l'utilisation de solutions tampons de référence (pH 4, pH 7 et pH 10), ainsi qu'un pH-mètre équipé d'une électrode de verre. Selon le protocole défini par la norme NF T 90-800, la procédure se déroule en deux étapes principales :

a) Étalonnage de l'appareil : allumer le pH-mètre, rincer soigneusement l'électrode à l'eau distillée, l'immerger dans une solution tampon de pH 7 contenue dans un petit bécher, attendre la stabilisation de l'affichage (standard 2), puis retirer et rincer de nouveau l'électrode.

b) Méthode de mesure : prélever environ 100 ml d'eau à analyser, y placer un agitateur réglé sur une faible vitesse, y plonger l'électrode, attendre la stabilisation de la mesure tout en maintenant l'agitation, puis noter la valeur affichée du pH.

La figure (4.3) présente une photo du pH-mètre utilisé pour la mesure du pH, tandis que l'histogramme de la figure (4.4) illustre les résultats obtenus pour les différents échantillons d'eau analysés, mettant en évidence la variation du potentiel hydrogène selon les points de prélèvement.



Figure 4. 3: Appareil pH-mètre utilisé pour la mesure du potentiel hydrogène

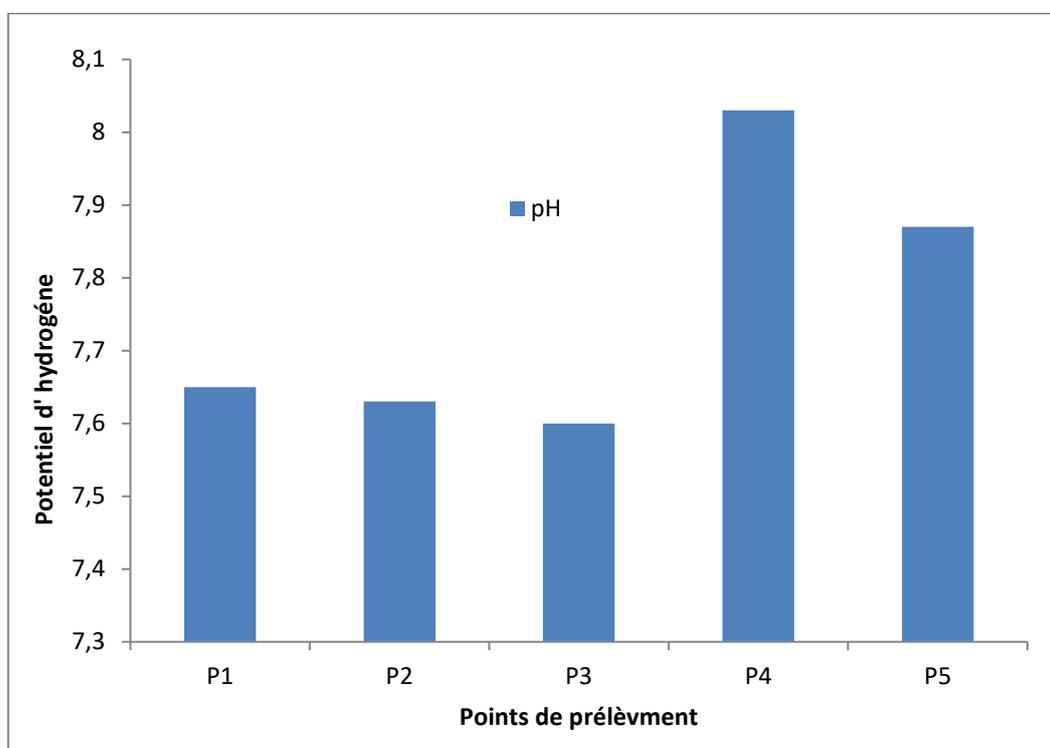


Figure 4. 4: Histogramme des valeurs de pH des échantillons d'eau analysés

Les valeurs du pH relevées aux cinq points de prélèvement demeurent globalement stables, variant légèrement entre 7,6 et 8,0. Cette stabilité dans une plage légèrement basique est particulièrement favorable, car elle assure des conditions optimales pour le bon fonctionnement et la durabilité des membranes d'osmose inverse.

4.2.3.3 Conductivité électrique

La conductivité électrique constitue un indicateur clé pour évaluer la concentration en sels dissous dans l'eau. Étroitement liée au degré de minéralisation, elle augmente proportionnellement avec la teneur en ions présents dans la solution. Plus la température s'élève, plus la conductivité est importante. Ce paramètre, mesuré à l'aide d'un conductimètre et exprimé en siemens par centimètre (S/cm) ou en unités dérivées comme les microsiemens ($\mu\text{S}/\text{cm}$), permet une estimation rapide et fiable de la minéralisation globale de l'eau. Il est également couramment utilisé pour évaluer la salinité. Selon les normes de qualité, une conductivité mesurée à 20 °C se classe comme suit : entre 50 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'eau est de qualité excellente ; entre 400 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la qualité est considérée comme bonne ; entre 750 et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elle devient médiocre mais reste utilisable ; au-delà de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la minéralisation est jugée excessive.

Pour obtenir une mesure fiable de la conductivité, deux étapes sont nécessaires.

a) Étalonnage de l'appareil : allumer le conductimètre, rincer l'électrode avec de l'eau distillée, puis l'immerger dans une solution standard de KCl placée dans un petit bécher. Il convient ensuite d'attendre la stabilisation de l'affichage de la constante de la cellule.

b) Méthode de mesure : prélever environ 100 ml d'eau à analyser, y plonger l'électrode et patienter jusqu'à stabilisation de la lecture. Pour nos échantillons d'eau, le résultat s'affiche directement en $\mu\text{S}/\text{cm}$. La figure (4.5) présente deux clichés illustrant le conductimètre utilisé pour la mesure de la conductivité électrique des échantillons d'eau.



Figure 4. 5: Conductimètre utilisé pour l'évaluation de la conductivité de l'eau.

La figure (4.6) illustre l'évolution des valeurs de conductivité relevées dans les différents échantillons d'eau prélevés au niveau de la station de dessalement d'Ouled Djellal, mettant en évidence les variations de minéralisation selon les points de prélèvement.

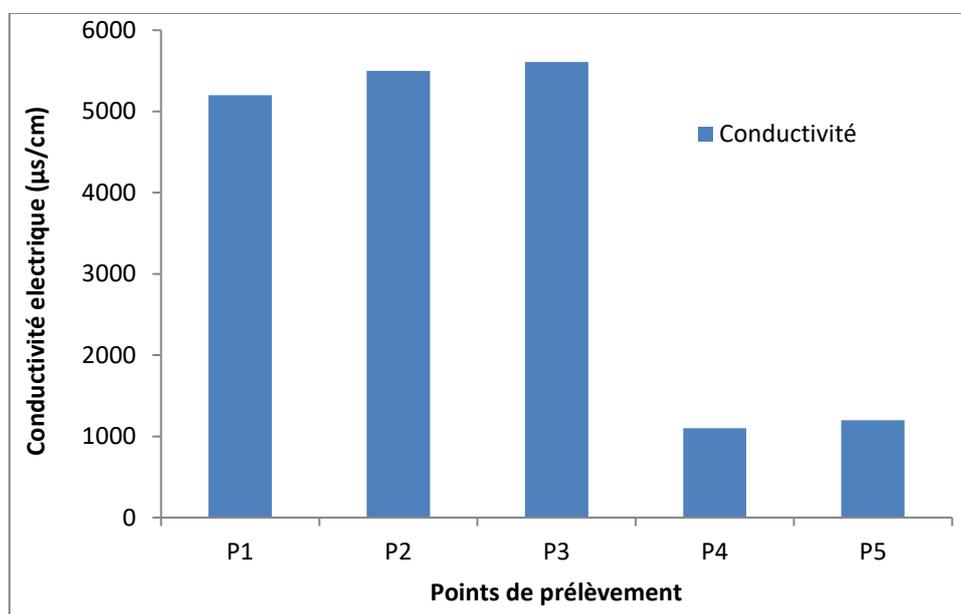


Figure 4. 6: Variation de la conductivité des échantillons d'eau prélevés à la station de dessalement d'Ouled-Djellal

La conductivité électrique de l'eau enregistrée à l'entrée de la station de dessalement est très élevée, avec des valeurs comprises entre 5200 et 5610 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduisant une forte minéralisation de l'eau brute. Après traitement par osmose inverse, une chute spectaculaire est observée, la conductivité descendant à des valeurs situées entre 1100 et 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette réduction significative témoigne de l'efficacité du procédé de déminéralisation, confirmant ainsi les performances optimales des membranes utilisées.

4.2.3.4 Turbidité

La turbidité de l'eau correspond à la présence de particules en suspension, qu'elles soient d'origine minérale ou organique, vivantes ou inertes. Plus une eau est chargée en biomasse phytoplanctonique ou en matières sédimentaires, plus elle devient turbide. Cette caractéristique physique influe directement sur la pénétration de la lumière et des rayons ultraviolets dans la colonne d'eau, affectant ainsi les processus de photosynthèse et favorisant, dans certains cas, le développement microbien. De plus, la turbidité peut altérer la température de l'eau, influencer sa teneur en oxygène dissous, et impacter indirectement son évaporation ainsi que sa salinité. On considère qu'une eau claire présente une turbidité inférieure à 5 NTU (Nephelometric Turbidity Unit), tandis qu'au-delà de 50 NTU, l'eau est visiblement trouble.

La figure (4.7) ci-dessous illustre l'appareil utilisé pour effectuer les mesures de turbidité.



Figure 4. 7: Turbidimètre néphélométrique utilisé pour l'analyse de la turbidité de l'eau. Son fonctionnement repose sur le principe de la diffusion de la lumière. Un faisceau lumineux, généralement issu d'une source LED ou infrarouge, traverse l'échantillon d'eau placé dans une cuve. Les particules présentes dans l'eau diffusent cette lumière dans plusieurs directions. L'appareil est équipé d'un photodétecteur placé à un angle de 90° par rapport au faisceau incident (configuration néphélométrique). Ce capteur mesure l'intensité de la lumière diffusée à cet angle précis. Plus la concentration de particules est élevée, plus la lumière est diffusée, et plus la valeur mesurée (en NTU) est importante.

La figure (4.8) illustre l'évolution des valeurs de la turbidité dans les différents échantillons d'eau prélevés au niveau de la station de dessalement d'Ouled Djellal. Cette représentation graphique permet de visualiser les variations de turbidité aux différentes étapes du traitement, mettant en évidence l'efficacité des procédés de clarification et de filtration.

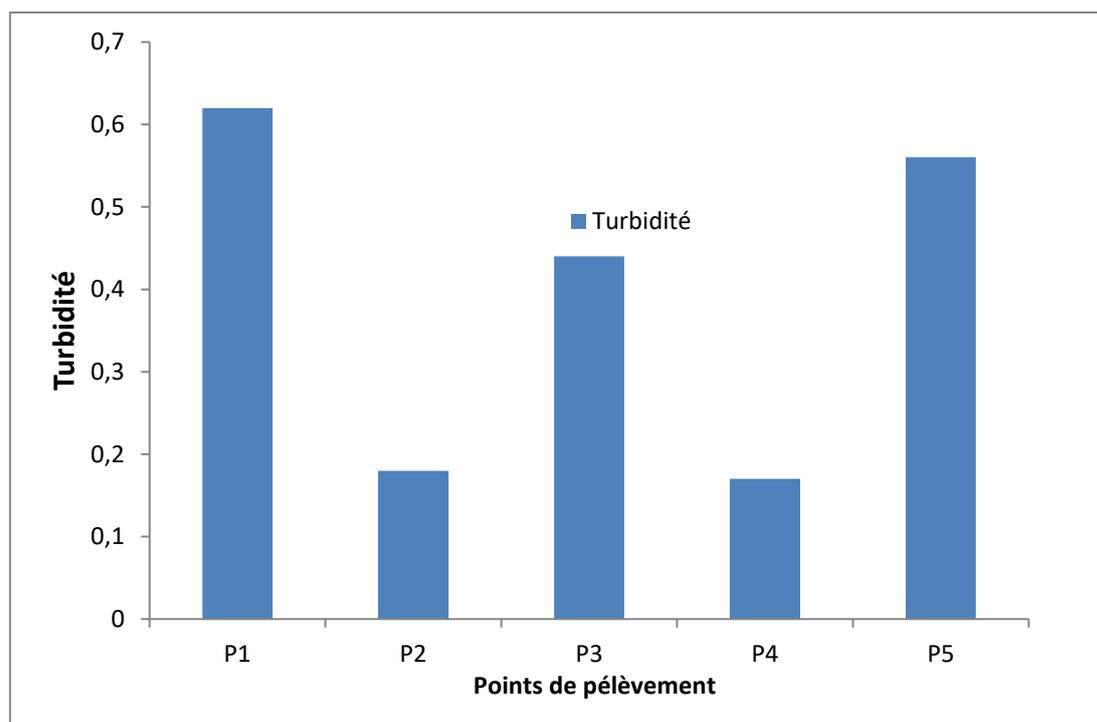


Figure 4. 8: Variation des valeurs de turbidité des échantillons d'eau prélevés à la station de dessalement d'Ouled Djellal.

La turbidité de l'eau diminue de manière significative après l'étape de microfiltration, atteignant une valeur aussi faible que 0,17 NTU, ce qui témoigne de la grande efficacité du prétraitement dans l'élimination des particules en suspension. Toutefois, on observe une légère remontée de la turbidité à 0,56 NTU après le passage par l'osmose inverse du second ligne de dessalement. Cette augmentation modérée pourrait être attribuée à un phénomène de relargage de particules ou à un défaut de rinçage du système, sans pour autant compromettre la qualité globale de l'eau traitée.

4.2.3.5 Salinité et TDS

a) Salinité

La salinité désigne la concentration totale des sels dissous dans l'eau, exprimée généralement en grammes par litre (g/l) ou en parties par mille (‰). Elle est un indicateur fondamental de la qualité de l'eau, notamment pour distinguer les eaux douces, saumâtres et salées. La salinité est particulièrement importante dans les études des eaux souterraines, marines ou dessalées, car elle influence fortement les usages possibles de l'eau (irrigation, consommation humaine, industrie, etc.). La salinité des échantillons prélevés a été mesurée à l'aide d'un conductimètre, un appareil permettant d'estimer la teneur en sels dissous à partir de la conductivité électrique de l'eau.

La figure (4.9) illustre l'évolution de la salinité aux différents points de prélèvement tout au long du processus de dessalement au sein de la station de Ouled Djellal.

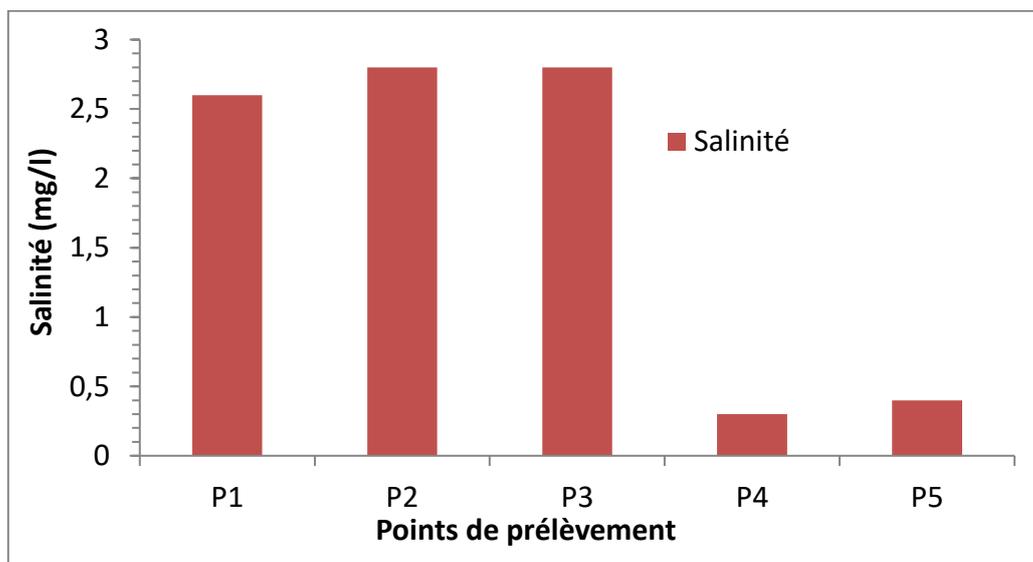


Figure 4. 9: Variation de la salinité aux différents points de prélèvement au cours du processus de dessalement à la station de Ouled Djellal

Les analyses ont révélé une présence notable de sels dissous dans l'eau brute, avec des concentrations initiales variant entre 2,6 et 2,8 mg/l. Toutefois, après passage par le procédé d'osmose inverse, ces concentrations ont été drastiquement réduites, atteignant des valeurs proches de zéro. Ce résultat met en évidence l'efficacité remarquable du système de dessalement utilisé au sein de la station de Ouled Djellal.

b) Résidus secs totaux (TDS)

Le TDS (Total Dissolved Solids), ou résidus secs totaux, correspond à la somme de toutes les substances dissoutes dans l'eau, incluant les sels minéraux (comme Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}), les oligo-éléments et parfois des composés organiques. Le TDS est généralement exprimé en mg/l (milligrammes par litre). La mesure des valeurs de TDS dans les échantillons d'eau prélevés a été réalisée à l'aide d'un conductimètre, instrument dont le fonctionnement repose sur le lien direct entre la conductivité électrique de l'eau et la concentration en ions dissous.

La figure (4.10) met en évidence l'évolution du TDS (Total Dissolved Solids) aux différents points de prélèvement, tout au long du processus de dessalement réalisé au niveau de la station de Ouled Djellal.

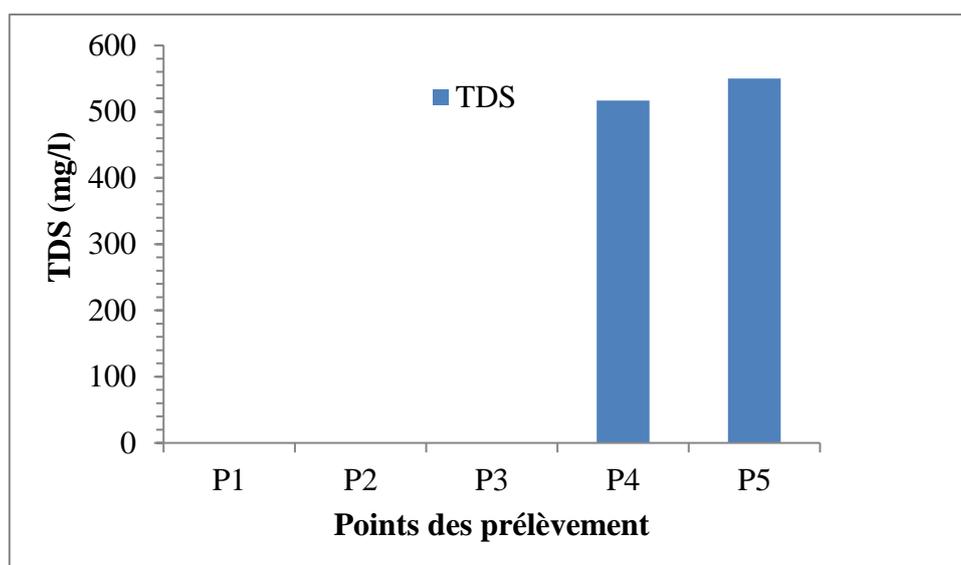


Figure 4. 10: Évolution du TDS (Total Dissolved Solids) aux différents points de prélèvement durant le processus de dessalement à la station de Ouled Djellal

Les résidus secs totaux (TDS) sont inexistantes aux trois premiers points de prélèvement, ce qui traduit une absence quasi totale de substances dissoutes dans l'eau traitée à ces étapes du processus. En revanche, aux quatrième et cinquième points, les valeurs enregistrées atteignent respectivement 517 mg/l et 550 mg/l, indiquant une reconcentration progressive des sels dissous, probablement en raison de phénomènes de réinjection, de mélange résiduel ou de pertes d'efficacité du traitement dans les étapes finales.

4.2.3.6 Dureté Totale (TH)

La dureté de l'eau désigne principalement la concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) dissous dans l'eau. Elle est généralement exprimée en mg/l de CaCO_3 (carbonate de calcium) ou en °f (degré français) où $1\text{ °f} = 10\text{ mg/l de CaCO}_3$.

La mesure de la dureté Totale (TH) des échantillons d'eau prélevés a été réalisée par titrage complexométrique à l'EDTA, en utilisant l'ériochrome noir T comme indicateur. Pour cela, on prélève généralement 100 ml d'eau à analyser, puis on effectue le titrage avec une solution d'EDTA jusqu'à l'apparition d'un changement de couleur caractéristique, passant du rouge au bleu. Le volume d'EDTA 0,01 M utilisé permet alors de déterminer directement la valeur de la TH en degrés français (°f), sachant que 1 ml d'EDTA correspond à 1 °f pour 100 ml d'échantillon.

La figure (4.11) présente de manière claire et comparative les résultats de la mesure de la dureté totale des cinq échantillons d'eau prélevés aux différents points choisies de la station de

dessalement d'Ouled Djellal. Ces données permettent d'apprécier l'efficacité du processus de traitement vis-à-vis des teneurs en calcium et magnésium.

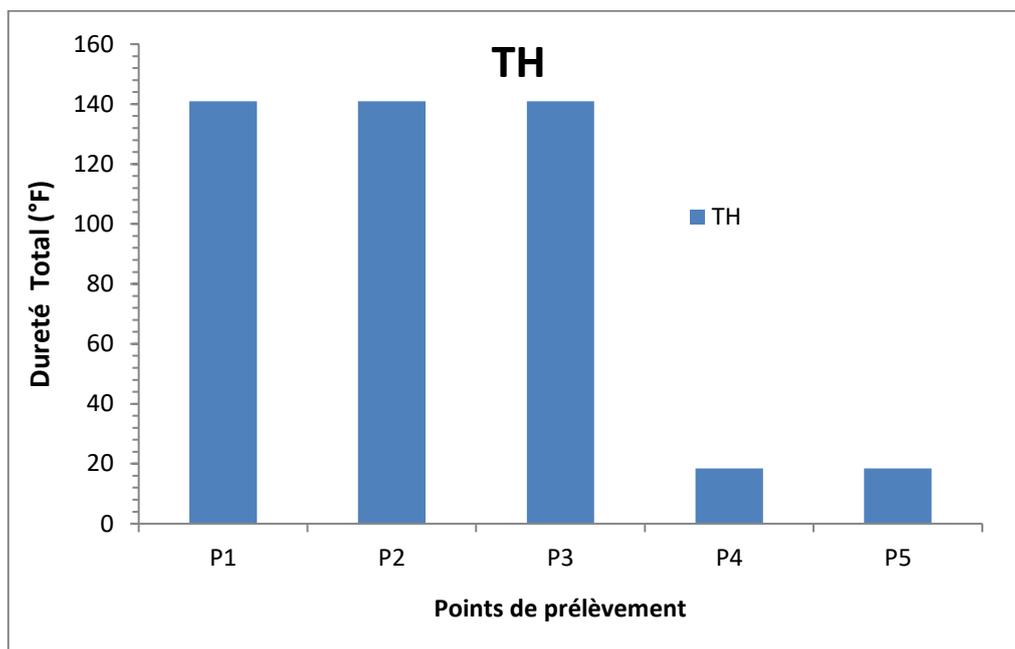


Figure 4. 11: Évolution de la dureté totale (TH) des cinq échantillons d'eau prélevés au niveau de la station de dessalement d'Ouled Djellal

Les résultats obtenus révèlent que pour les trois premiers points de prélèvement, une dureté totale élevée, égale à 141 °f, a été enregistrée. Cette valeur indique une eau fortement minéralisée, classée parmi les eaux dures, ce qui est typique de l'eau saumâtre brute avant traitement. Cependant, après le passage à travers le système de microfiltration (filtres à cartouche), notamment au niveau du point P3 la dureté chute de façon significative pour atteindre 18,4 °f. Cette réduction marquée traduit l'efficacité du prétraitement physique dans l'élimination partielle des ions responsables de la dureté, notamment le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}).

Fait remarquable, cette valeur de 18,4 °f demeure inchangée après le passage à travers la membrane d'osmose inverse, ce qui suggère que l'essentiel de la réduction de la dureté s'est opéré en amont, lors de la microfiltration, et que l'osmose inverse a stabilisé cette qualité sans provoquer de variation supplémentaire notable.

4.2.4 Mesure des paramètres ioniques des échantillons d'eau

4.2.4.1 Les cations

a) Calcium (Ca^{2+})

L'analyse du calcium dans l'eau repose sur des méthodes chimiques ou physiques visant à quantifier avec précision la concentration de l'ion Ca^{2+} , un élément essentiel dans l'évaluation de la dureté de l'eau. Cette analyse est réalisée par spectrophotométrie. La présence du calcium est un indicateur clé de la qualité minérale de l'eau, car des concentrations trop élevées peuvent entraîner des dépôts de tartre dans les installations, tandis que des niveaux trop faibles peuvent affecter l'équilibre calco-carbonique.

b) Magnésium (Mg^{2+})

Après avoir mesuré avec précision la dureté totale (TH) ainsi que la concentration en ions calcium (Ca^{2+}) dans les cinq échantillons d'eau prélevés au niveau de la station de dessalement, il a été possible d'estimer la concentration en magnésium (Mg^{2+}) par voie de calcul. Pour ce faire, on a utilisé la formule générale de la dureté totale, exprimée en degrés français ($^{\circ}\text{f}$), qui relie les deux principaux ions responsables de la dureté :

$$\text{TH} (^{\circ}\text{f}) = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \times 2,5 + [\text{Mg}^{2+}] \times 4,1}{10} \quad (4.1)$$

Cette relation permet de déterminer indirectement la teneur en magnésium, une fois les valeurs de la TH et du calcium connues, offrant ainsi une estimation fiable de la part du magnésium dans la minéralisation globale de l'eau.

Ainsi, la formule permettant de calculer la concentration en ions magnésium (Mg^{2+}) s'écrit comme suit :

$$[\text{Mg}^{2+}] = \frac{10 \times \text{TH} - [\text{Ca}^{2+}] \times 2,5}{4,1} \quad (4.2)$$

Cette expression mathématique constitue un outil précieux pour affiner le diagnostic de la qualité de l'eau, notamment dans le cadre du suivi et de l'optimisation des performances du processus de dessalement.

La figure (4.10) illustre l'évolution des concentrations en calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) tout au long du processus de purification au sein de la station de dessalement de Ouled Djellal,

mettant en évidence l'efficacité des différentes étapes de traitement dans la réduction de ces cations dissous.

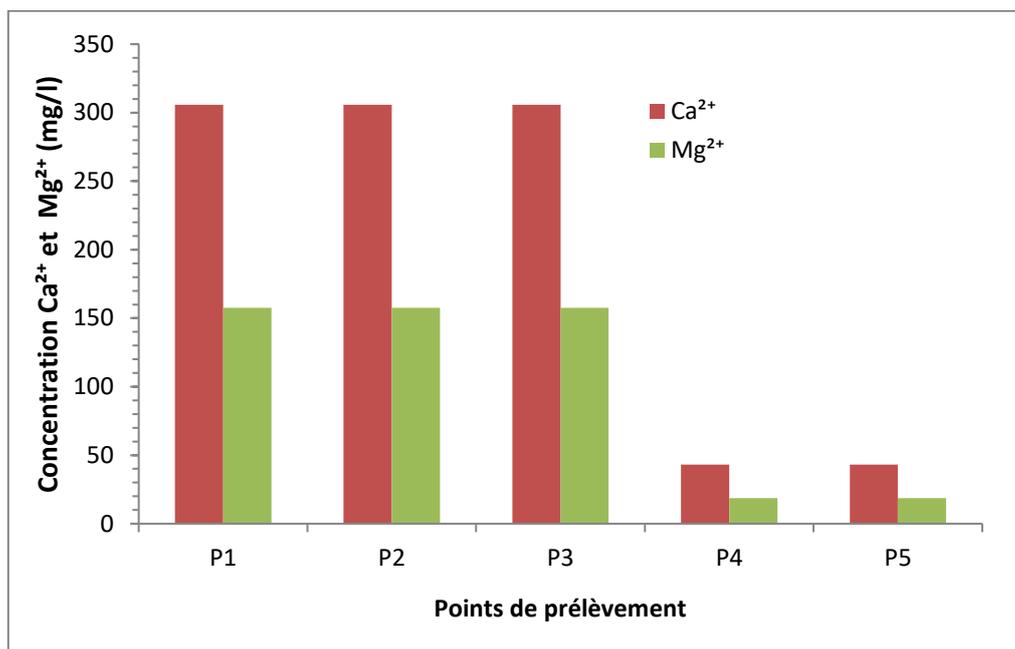


Figure 4. 12: Variation des concentrations en calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) durant le processus de purification à la station de dessalement de Ouled Djellal

Les résultats d'analyse des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) aux points de prélèvement 1, 2 et 3 révèlent des concentrations très élevées, respectivement 305 mg/l pour Ca^{2+} et 157,49 mg/l pour Mg^{2+} , ce qui reflète une minéralisation importante typique des eaux saumâtres dures. Ces teneurs témoignent de la richesse de l'eau en sels responsables de la dureté totale, principalement les carbonates et les sulfates de calcium et de magnésium, rendant l'eau inadaptée à la consommation directe.

Toutefois, une réduction significative de ces concentrations est observée à partir du point de prélèvement P3, situé en aval des filtres à cartouche (microfiltres), indiquant une première étape d'épuration efficace. La concentration en calcium chute alors à 43 mg/l, tandis que celle du magnésium descend à 18,74 mg/l à la sortie de la membrane d'osmose inverse (point P5 correspond à la deuxième ligne d'osmose inverse). Ces baisses traduisent clairement l'efficacité combinée du prétraitement physique et du procédé de dessalement par osmose inverse, capable de réduire les cations responsables de la dureté de plus de 85 %.

Ce résultat met en évidence non seulement la performance du système de traitement, mais aussi l'amélioration notable de la qualité de l'eau, la rendant conforme aux normes de potabilité en termes de dureté et de concentration en sels dissous.

c) Sodium (Na^+)

La mesure de la concentration en sodium (Na^+) des échantillons d'eau a été effectuée à l'aide d'un spectromètre. Pour cela, il suffit de plonger la sonde ou la pointe du spectromètre dans l'échantillon, puis de sélectionner le mode de détection spécifique au sodium sur l'appareil. Après quelques instants de stabilisation, une valeur précise de la concentration en sodium s'affiche automatiquement à l'écran, généralement exprimée en mg/L. Cette mesure revêt une importance capitale pour l'évaluation du degré de salinité de l'eau, en particulier dans les procédés de dessalement et dans le suivi de la qualité des eaux souterraines, ce qui correspond précisément aux cas d'étude abordés dans notre travail.

d) Potassium (K^+)

La mesure de la concentration en potassium (K^+) des cinq échantillons, a été effectuée à l'aide d'un spectromètre. L'analyse consiste à immerger la sonde de l'appareil dans l'échantillon d'eau, puis à sélectionner le mode spécifique à l'ion potassium (K^+) sur l'appareil de mesure. Après un court temps de stabilisation, la valeur de la concentration en potassium s'affiche automatiquement à l'écran, généralement exprimée en milligrammes par litre (mg/L). Cette analyse joue un rôle essentiel dans la détection d'éventuelles anomalies minérales et dans la vérification de la conformité de l'eau traitée aux normes de qualité, en particulier dans les contextes sensibles tels que le dessalement et l'exploitation des eaux souterraines qui représentent précisément les axes principaux de nos cas d'étude.

La figure (4.11) présente le spectromètre utilisé pour l'analyse des cations métalliques dissous dans l'eau. Cet appareil de haute précision permet de mesurer avec fiabilité les concentrations en calcium (Ca^{2+}), sodium (Na^+) et potassium (K^+), des éléments clés pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des échantillons prélevés, notamment dans le cadre du contrôle des eaux destinées au dessalement.



Figure 4.13: Spectromètre utilisé pour la mesure des cations Ca^{2+} , Na^+ et K^+

La figure (4.12) met en évidence la variation des concentrations en sodium (Na^+) et en potassium (K^+) mesurées aux cinq points d'échantillonnage au sein de la station de dessalement des eaux saumâtres d'Ouled Djellal. Cette représentation graphique permet d'illustrer de manière claire et comparative l'évolution de ces deux cations majeurs, étroitement liés à la minéralisation de l'eau et à son comportement électrochimique, tout au long du processus de traitement.

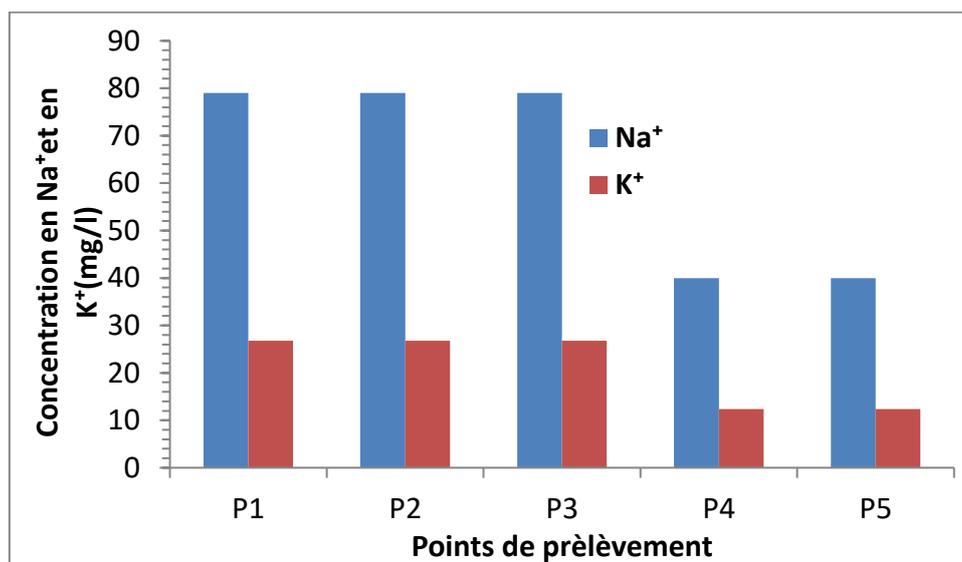


Figure 4. 14: Évolution des concentrations en sodium (Na^+) et en potassium (K^+) aux différents points de prélèvement au sein de la station de dessalement d'Ouled Djellal

L'analyse des concentrations en sodium (Na^+) et en potassium (K^+) au niveau des différents points d'échantillonnage de la station de dessalement d'Ouled-Djellal met en évidence des tendances marquantes quant à l'évolution de ces cations à travers les différentes étapes du traitement.

Aux trois premiers points de prélèvement (P1, P2 et P3), la concentration en sodium reste constante, avec une valeur de 79 mg/l, indiquant une stabilité de ce paramètre dans l'eau brute en amont du système de dessalement. Toutefois, après le passage de l'eau à travers les microfiltres puis les membranes d'osmose inverse, cette concentration connaît une réduction significative, atteignant 40 mg/l aux points P4 et P5. Cette chute reflète l'efficacité du processus de traitement dans l'élimination partielle du sodium, un ion majoritaire typique des eaux saumâtres.

En ce qui concerne le potassium, on observe également une diminution progressive des concentrations : de 28,6 mg/l aux points P1, P2 et P3, la teneur en K^+ baisse jusqu'à 12,4 mg/l aux points P4 et P5. Bien que le potassium soit présent en moindre quantité que le sodium, sa

réduction importante confirme la performance du système de traitement dans la rétention des ions monovalents, même si ceux-ci sont plus difficilement éliminés par osmose inverse en raison de leur plus petit rayon ionique et de leur grande mobilité.

e) Ammonium (NH_4^+)

La détection de l'ammonium dans l'eau repose sur une méthode spectrométrique basée sur la formation d'un complexe coloré bleu-vert, résultant de la réaction de l'ion ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite, en présence de nitrosopentacyanoferrate (III) de sodium (communément appelé nitroprussiate de sodium). Pour la préparation de l'échantillon, on prélève 40 ml d'eau que l'on place dans une fiole jaugée de 50 ml. On y ajoute ensuite 4 ml du réactif I, puis 4 ml du réactif II, avant de compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Après une attente de 1 heure 30 minutes, l'apparition d'une coloration verte indique la présence d'ammonium dans l'échantillon. La lecture se fait ensuite à une longueur d'onde de 655 nm, et le résultat est exprimé directement en mg/litre, permettant une évaluation précise de la concentration d'ammonium dans l'eau analysée.

La figure (4.13) illustre, à travers trois photos explicatives, les principales étapes expérimentales suivies pour la formation d'un complexe coloré bleu-vert, révélateur de la présence d'ammonium (NH_4^+) dans l'échantillon analysé. Cette réaction colorimétrique constitue une méthode fiable pour la détection et la quantification de l'ammonium.

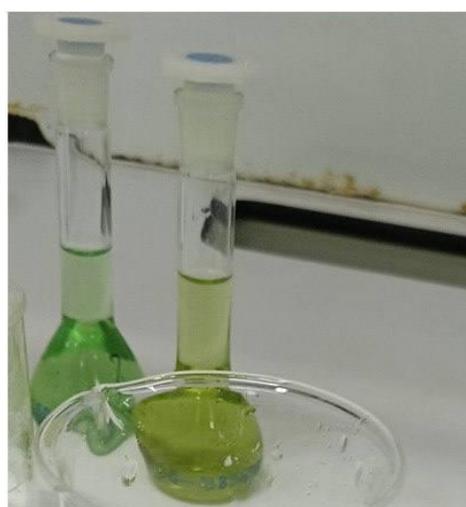




Figure 4. 15: Étapes de formation du complexe coloré bleu-vert pour la détection de l'ammonium (NH_4^+)

La figure (4.14) met en évidence la variation de la concentration en ammonium (NH_4^+) tout au long du processus de dessalement au niveau de la station de Ouled Djellal, illustrant l'efficacité progressive des différentes étapes de traitement dans l'élimination de ce composé indésirable.

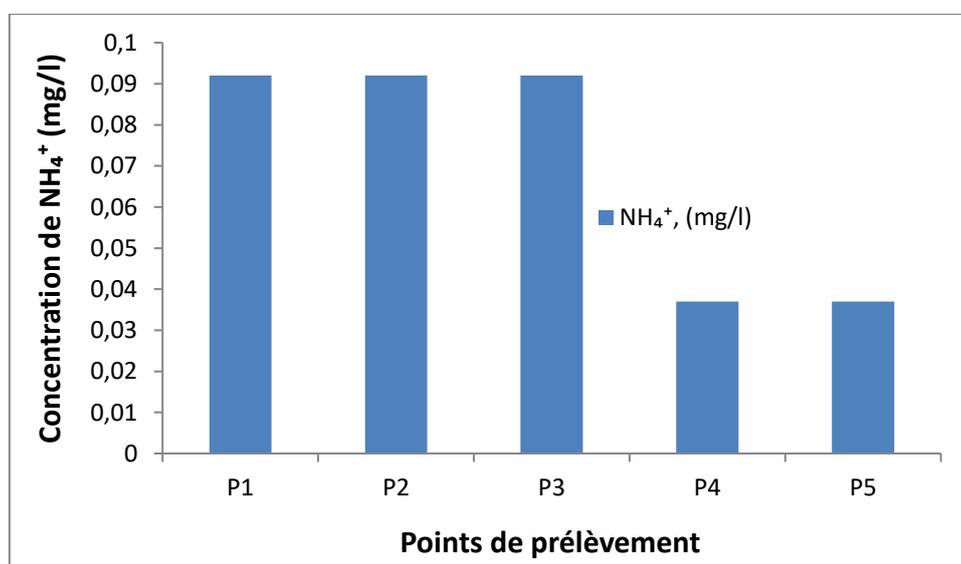


Figure 4. 16: Variation de la concentration en ammonium (NH_4^+) durant le processus de dessalement à la station de Ouled Djellal

En ce qui concerne l'ammonium (NH_4^+), les résultats mettent en évidence une réduction notable et progressive de sa concentration tout au long du processus de traitement. Aux trois premiers points de prélèvement (P1, P2 et P3), la teneur reste stable à 0,092 mg/l, traduisant une présence homogène dans l'eau brute. Toutefois, à mesure que l'eau traverse les étapes de filtration et d'osmose inverse, on enregistre une diminution significative de cette concentration, atteignant 0,037 mg/l aux points P4 et P5. Cette baisse reflète l'efficacité des procédés de traitement dans l'élimination de l'ammonium, un paramètre essentiel pour la qualité de l'eau produite.

f) Fer (Fe^{2+})

La détection du fer ferreux dans l'eau repose sur une réaction colorimétrique spécifique, mettant en jeu des réactifs tels que la 1,10-phénanthroline ou la dipyridyle, qui réagissent avec les ions Fe^{2+} pour former un complexe coloré stable. En particulier, l'association avec la 1,10-phénanthroline génère un complexe rouge-orangé intense, dont la coloration est proportionnelle à la concentration en fer et peut être quantifiée par spectrophotométrie. Pour la préparation de l'échantillon, on ajoute à 50 ml d'eau à analyser : 1 ml de chlorhydrate d'hydroxylamine (réducteur), 2 ml de tampon acétate (pour stabiliser le pH), et 2 ml de phénanthroline 1,10. Le mélange est ensuite placé 15 minutes à l'obscurité afin de favoriser la réaction. L'apparition d'une coloration rouge brique témoigne de la présence de fer ferreux dans l'échantillon.

La figure (4.15) illustre les différentes étapes de préparation des échantillons destinés à l'analyse du fer ferreux (Fe^{2+}) dans les eaux prélevées à la sortie des différentes étapes du processus de dessalement de la station de Ouled Djellal. Cette procédure met en évidence la rigueur du protocole utilisé pour garantir des résultats fiables et représentatifs de la qualité de l'eau traitée.



Figure 4. 17: Étapes de préparation des échantillons pour l'analyse du fer ferreux (Fe^{2+}) des eaux prélevées de la station de dessalement de Ouled-Djellal

L'analyse des échantillons révèle une stabilité remarquable de la teneur en fer ferreux dans l'ensemble des points de prélèvement, avec des valeurs constantes enregistrées à 0,02 mg/l.

4.2.4.2 Les anions

a) Ortho-phosphate (PO_4^{3-})

L'analyse de l'orthophosphate (PO_4^{3-}) a pour objectif de quantifier la concentration de phosphore sous forme de phosphate inorganique dissous dans l'eau. Ce paramètre est crucial dans les processus de traitement des eaux, ainsi que pour le suivi de la pollution, notamment à cause du rôle central que joue le phosphate dans l'eutrophisation des milieux aquatiques. Pour préparer l'échantillon, on prélève 40 ml de chaque échantillon prélevé, puis on y ajoute 1 ml d'acide ascorbique et 2 ml d'un réactif mélange. Après 20 minutes, l'apparition d'une coloration bleue indique la présence d'orthophosphates dans l'échantillon.

Le test réalisé sur les cinq échantillons révèle que l'eau provenant du forage ne contient pas d'orthophosphates détectables. Cette absence d'orthophosphates indique une faible teneur en phosphore minéral dissous dans l'eau brute, ce qui peut être interprété comme un indicateur de bonne qualité vis-à-vis de la pollution d'origine domestique ou agricole.

b) Sulfate (SO_4^{2-})

L'analyse des sulfates (SO_4^{2-}) permet d'évaluer la qualité chimique de l'eau, qu'elle soit destinée à la consommation humaine, à des usages industriels ou à la surveillance de la pollution d'une nappe. Les sulfates peuvent avoir une origine naturelle ou provenir de rejets anthropiques, notamment industriels. Des concentrations élevées peuvent entraîner des effets indésirables, tant sanitaires que techniques. Pour l'analyse, on prépare l'échantillon en mélangeant 20 ml d'eau à analyser avec 73 ml d'eau distillée, 5 ml d'une solution stabilisante et 2 ml de BaCl_2 . Un blanc est réalisé avec 93 ml d'eau distillée. Après agitation pendant 2 minutes, l'apparition d'un précipité blanc signale la présence de sulfates.

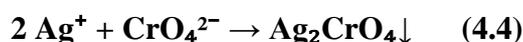
c) Chlorure (Cl^-)

Le dosage des ions chlorure (Cl^-) en laboratoire est couramment réalisé par la méthode de Mohr, une technique de titrage argentimétrique simple et efficace. Elle consiste à ajouter progressivement une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) à un échantillon d'eau contenant des ions chlorure, en présence d'un indicateur, le chromate de potassium (K_2CrO_4).

Lors de l'ajout du nitrate d'argent, les ions argent (Ag^+) réagissent immédiatement avec les ions chlorure (Cl^-) pour former un précipité blanc de chlorure d'argent, selon la réaction suivante :



Lorsque tous les ions chlorure sont précipités, l'excès d'ions argent réagit avec les ions chromate (CrO_4^{2-}) pour produire un précipité rouge-brun de chromate d'argent, indiquant le point d'équivalence du titrage :



Le volume de nitrate d'argent consommé à ce point permet de déterminer la concentration en ions chlorure dans l'échantillon à l'aide de la formule suivante :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times C_{\text{AgNO}_3} \times 35,45}{V_{\text{échantillon}}} \quad (4.5)$$

Où : V_{AgNO_3} est le volume de nitrate d'argent utilisé (en litres) ; C_{AgNO_3} est la concentration de la solution titrante (en mol/l) ; 35,45 représente la masse molaire du chlore (en mg/mmol) ; $V_{\text{échantillon}}$ est le volume de l'échantillon analysé (en litres).

Les concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) et en ions chlorure (Cl^-) mesurées dans les cinq échantillons d'eau analysés révèlent des variations significatives au cours du processus de traitement. Ces résultats, illustrés dans la figure (4.16), permettent de visualiser clairement l'évolution de ces deux paramètres physico-chimiques essentiels à l'évaluation de la salinité de l'eau. On y observe notamment une tendance à la diminution progressive des concentrations, témoignant de l'efficacité des différentes étapes de traitement, notamment la microfiltration et l'osmose inverse.

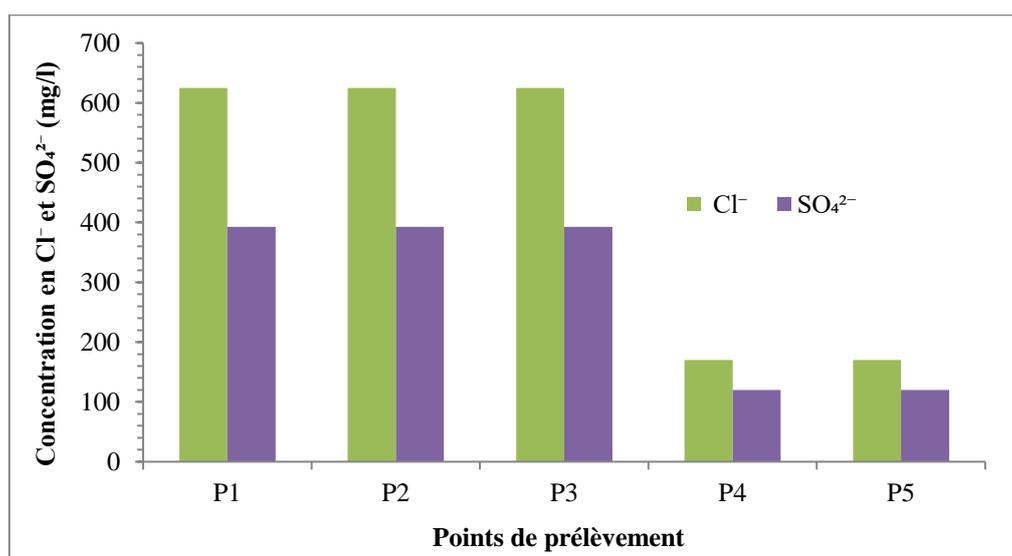


Figure 4. 18: Évolution des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) et en ions chlorure (Cl^-) dans les cinq échantillons d'eau prélevés

Les concentrations en ions sulfates (SO_4^{2-}) affichent une valeur initiale particulièrement élevée, atteignant 393 mg/l aux premiers points de prélèvement (P1 à P3), ce qui reflète une charge saline importante dans l'eau brute. Toutefois, une réduction significative est observée après le passage de l'eau à travers les systèmes de microfiltration, illustrant ainsi l'efficacité de cette étape dans l'élimination des sels dissous. À la sortie du traitement, aux points P4 et P5, la concentration en sulfates chute à 120 mg/l, témoignant de l'impact notable du prétraitement sur la qualité chimique de l'eau avant son passage par les membranes d'osmose inverse.

Les concentrations en ions chlorure (Cl^-) présentent une valeur initiale très élevée, dépassant les 600 mg/l au niveau des premiers points de prélèvement (P1 à P3), ce qui traduit une forte salinité de l'eau brute en amont du traitement. Cette concentration connaît une réduction marquée après l'étape de microfiltration, traduisant un premier effet de prétraitement. Toutefois, c'est au niveau du traitement par osmose inverse que l'abattement est le plus significatif, avec une chute spectaculaire de la teneur en chlorures jusqu'à 170 mg/l aux points P4 et P5. Cette diminution témoigne de la performance élevée des membranes d'osmose inverse dans l'élimination des sels dissous et en particulier des ions chlorure, contribuant ainsi à l'obtention d'une eau conforme aux normes de potabilité.

d) Nitrate (NO_3^-)

L'analyse des nitrates (NO_3^-) est fondamentale pour la surveillance de la pollution des eaux, notamment celle d'origine agricole (engrais azotés), domestique (rejets d'eaux usées) ou industrielle. Une teneur élevée en nitrates peut provoquer des risques sanitaires graves, tels que la méthémoglobinémie chez les nourrissons, ainsi que des déséquilibres écologiques par eutrophisation. Pour effectuer cette analyse, on prélève 10 ml d'eau à analyser, auxquels on ajoute 3 gouttes de salicylate de sodium. L'échantillon est ensuite chauffé au bain-marie jusqu'à évaporation, puis laissé à refroidir. On ajoute alors 2 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4), suivi, après 2 minutes, de 15 ml d'eau distillée et de 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium. L'apparition d'une teinte jaune indique la présence de nitrates. La figure (4.000) montre les analyses réalisées au laboratoire pour détecter la présence des nitrates dans les échantillons d'eau prélevés des différents points de la station de dessalement d'Ouled Djellal.

La figure (4.17) présente les analyses effectuées en laboratoire pour détecter la présence de nitrates dans les échantillons d'eau prélevés aux différents points d'échantillonnage de la station de dessalement d'Ouled Djellal. Elle illustre les étapes du protocole expérimental, révélant

visuellement la réaction caractéristique indiquant la présence de ces ions, essentiels à surveiller pour garantir une eau de qualité.



Figure 4. 19: Préparation de l'échantillon pour analyser Nitrate (NO_3^-)

La figure (4.18) illustre de manière claire et pertinente la variation des concentrations en nitrates (NO_3^-) tout au long du processus de dessalement au sein de la station de Ouled Djellal. Cette représentation graphique permet de visualiser l'évolution de ce paramètre clé, souvent associé à la pollution d'origine agricole ou domestique. Cette analyse met clairement en évidence que la concentration en nitrates dans l'eau captée à partir de la nappe albienne au niveau de Ouled-Djellal demeure inférieure à la limite fixée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), soit 50 mg/l.

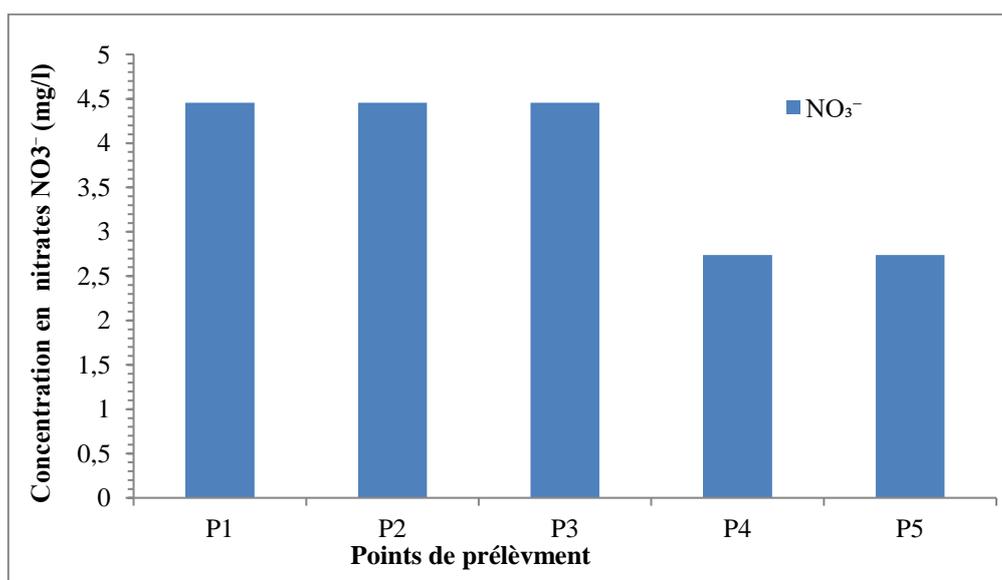


Figure 4. 20: Variation des concentrations en nitrates (NO_3^-) au cours du processus de dessalement dans la station de Ouled Djellal

Ce résultat indique que l'eau brute respecte les normes internationales de potabilité en ce qui concerne les nitrates, un paramètre essentiel pour la santé publique.

e) Titre Alcalimétrique et Titre Alcalimétrique Complet

Le TA (Titre Alcalimétrique) et le TAC (Titre Alcalimétrique Complet) sont deux paramètres fondamentaux dans l'analyse de l'eau, utilisés pour évaluer son alcalinité, c'est-à-dire sa capacité à neutraliser les acides. Le TA, aussi appelé titre à la phénolphtaléine, mesure uniquement la présence des ions hydroxydes (OH^-) et carbonates (CO_3^{2-}) ; il est déterminé par titrage jusqu'à un pH de 8,3, point où la phénolphtaléine change de couleur. Le TAC, quant à lui, mesure l'alcalinité totale, principalement due aux ions bicarbonates (HCO_3^-), en plus des hydroxydes et carbonates. Il est obtenu par un titrage à l'acide fort jusqu'à un pH de 4,5, généralement à l'aide d'un pH-mètre ou d'un indicateur coloré comme le rouge de méthyle. Ces deux grandeurs sont essentielles pour évaluer le pouvoir tampon de l'eau, détecter les risques de corrosion ou de formation de tartre, et adapter les traitements chimiques dans les systèmes d'eau potable, d'irrigation ou industriels. La figure (4.19) illustre les valeurs des concentrations en (TAC) aux points de prélèvement à la station de dessalement d'Ouled-Djellal.

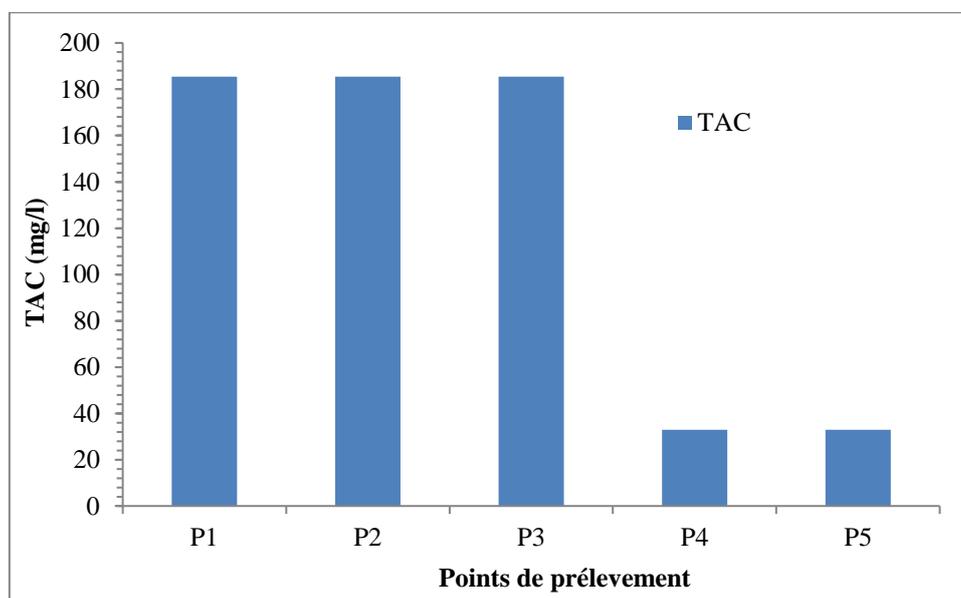


Figure 4. 21: Variation des concentrations en nitrates (TAC) au cours du processus de dessalement dans la station de Ouled-Djellal

L'analyse des titres alcalimétriques (TA et TAC) effectuée en laboratoire sur les cinq échantillons d'eau prélevés révèle des résultats significatifs. Le TA est nul pour l'ensemble des points (P1 à P5), indiquant l'absence de carbonates (CO_3^{2-}) et d'hydroxydes (OH^-) dans l'eau.

Cela signifie que l'alcalinité mesurée est exclusivement due aux ions bicarbonates (HCO_3^-), ce qui est courant dans les eaux naturelles, en particulier les eaux souterraines.

Concernant le TAC, des valeurs élevées ont été enregistrées aux trois premiers points de prélèvement (P1, P2 et P3), atteignant 185,44 mg/l, ce qui traduit une forte teneur en bicarbonates et donc une eau naturellement très minéralisée, typique des eaux issues de la nappe albienne. En revanche, aux deux derniers points (P4 et P5), après passage de l'eau à travers les membranes, le TAC chute à 32,94 mg/l, illustrant l'efficacité des membranes dans la réduction de la minéralisation de l'eau.

4.3. Préparation des réactifs

La préparation des réactifs nécessaires au traitement de l'eau est assurée à l'aide de deux réservoirs distincts, comme illustré à la figure (4.22). Le premier, situé à gauche de la figure, est dédié à la préparation de la solution d'acide sulfurique, utilisée principalement pour l'ajustement du pH et le contrôle de la précipitation des carbonates. Le second réservoir, placé à droite, est réservé à la préparation de l'antiscalant, un inhibiteur d'entartrage destiné à prévenir la formation de dépôts minéraux dans les membranes d'osmose inverse. Cette configuration vise à garantir une distribution précise et sécurisée des produits chimiques, tout en assurant la continuité et l'efficacité du procédé de dessalement.



Figure 4. 22: Préparation des réactifs à la station de dessalement de Ouled Djellal

Le recours à une préparation manuelle des réactifs, combiné à l'absence d'un système d'automatisation en temps réel, peut entraîner des retards dans l'ajustement des dosages nécessaires. Cette limitation technique risque de compromettre la réactivité du système face aux besoins variables de l'eau en produits chimiques, notamment en cas de fluctuations brusques des paramètres de qualité. Une telle configuration réduit la précision, augmente le risque d'erreur humaine et peut impacter négativement l'efficacité globale du traitement.

4.4 Système de commande et d'automatisation

Le système de commande et d'automatisation installé se compose de trois principales armoires électriques, réparties selon les étapes clés du processus de traitement de l'eau. La première armoire, située au niveau du bassin de refroidissement, est dédiée exclusivement au pilotage de la turbine d'aération. Les seconds groupes d'armoires sont installées au niveau de l'unité de prétraitement, plus précisément au niveau du système d'eau brute et des filtres à sable sous pression. Il est à noter que chaque filtre à sable est équipé de sa propre armoire de commande, garantissant une gestion individualisée et optimisée du fonctionnement. Ces armoires sont complètement fermées, assurant ainsi une protection adéquate contre l'humidité et les poussières. En revanche, la troisième armoire, dédiée au contrôle et à l'automatisation de l'unité d'osmose inverse, est installée à proximité immédiate des pompes haute pression. Contrairement aux précédentes, celle-ci est partiellement ouverte, ce qui peut soulever des préoccupations en matière de sécurité et de durabilité dans un environnement humide. Les figures 4.23, 4.24 et 4.25 présentent les emplacements et les caractéristiques de ces armoires.



Figure 4. 23: Armoire de commande de la turbine d'aération (refroidissement) (station de Ouled Djellal)



Figure 4. 24: Armoire de commande du système de prétraitement : eau brute + filtres à sable (station de Ouled Djellal) -armoire fermée-



Figure 4. 25: Armoire de commande du système d'osmose inverse (station de Ouled Djellal) - armoire ouverte-

Malgré la présence d'un système de commande et d'automatisation réparti sur plusieurs armoires, de nombreuses limites techniques compromettent son efficacité, sa fiabilité et sa capacité à assurer une exploitation optimale. Tout d'abord, il est important de souligner que l'ensemble des armoires assure uniquement des fonctions de commande manuelle, à l'exception de celle dédiée à l'unité d'osmose inverse (RO), qui intègre à la fois des fonctions de commande et d'automatisation. Cette disparité fonctionnelle reflète une conception partiellement structurée et peu homogène du système de contrôle.

Chaque filtre à sable est équipé d'une armoire individuelle, ce qui permet un pilotage localisé mais entraîne une complexification de l'architecture électrique et une augmentation des charges de maintenance. De plus, aucune salle de supervision centralisée et isolée n'a été prévue : les opérations de suivi s'effectuent donc au cœur des installations, dans un environnement bruyant et peu propice à une surveillance attentive. Cette configuration affecte négativement le confort de travail des opérateurs et la qualité globale de la supervision.

Le système d'affichage et de surveillance est également très limité. Seuls le pH et la conductivité électrique (CE) sont affichés, et ce de manière peu fiable. En témoignent des valeurs aberrantes, comme un pH affiché à 16,59, suggérant une défaillance probable du capteur, du transmetteur ou de l'afficheur. De plus, des grandeurs critiques comme le débit (Q) et la pression (P) ne sont pas monitorées, ce qui empêche une évaluation dynamique du fonctionnement hydraulique de l'unité. Par ailleurs, la qualité des sondes utilisées (capteurs,

transmetteurs, afficheurs) est à remettre en question, tant du point de vue de la précision que de la robustesse.

En ce qui concerne le dosage des réactifs (acide sulfurique, antiscalant), aucune automatisation n'est en place. Les opérations sont effectuées manuellement, sans aucune régulation asservie aux paramètres de l'eau brute. De même, les pompes doseuses ne sont pas connectées au système de commande : elles sont manipulées manuellement, exposant le processus à des erreurs humaines, à un manque de réactivité face aux variations de qualité de l'eau et à un risque accru de sous- ou sur-dosage.

En résumé, le système de commande en place présente un niveau d'automatisation insuffisant, une absence de centralisation, et une surveillance limitée, autant de facteurs qui restreignent l'optimisation du fonctionnement et la sécurité de l'installation. Une restructuration complète du système de contrôle, intégrant une salle de supervision dédiée, des équipements de mesure de qualité, une télémessure fiable et une commande automatisée des pompes et dosages, apparaît indispensable pour répondre aux exigences de performance et de durabilité dans le contexte du traitement de l'eau.

4.5 Stocks et ressources humaines

Parmi les principaux défis rencontrés au niveau de la station de dessalement des eaux saumâtres de Ouled Djellal figure une série de carences critiques qui compromettent gravement son fonctionnement et sa pérennité. On note en premier lieu l'absence de consommables essentiels, tels que les produits chimiques (acide, antiscalant, neutralisants), les membranes d'osmose inverse et les filtres à cartouches, indispensables au bon déroulement du procédé de traitement. À cela s'ajoute un manque ou bien l'absence flagrant de personnel, tant au niveau des agents d'exploitation de base que des techniciens qualifiés, limitant fortement la capacité de supervision, d'intervention et d'entretien des installations.

La situation est aggravée par l'indisponibilité de pièces de rechange, y compris des composants majeurs tels que les pompes haute pression, les vannes, les débitmètres et autres accessoires essentiels à la continuité du service. De plus, l'absence d'un programme de maintenance préventive et corrective rend l'installation vulnérable aux arrêts fréquents et aux dégradations progressives.

À ces insuffisances s'ajoute une problématique structurelle préoccupante : la présence de fuites d'eau récurrentes dans plusieurs sections de la chaîne de dessalement. Ce constat soulève de sérieuses interrogations sur la qualité des matériaux utilisés, notamment en ce qui concerne les soudures et les assemblages mécaniques, qui semblent ne pas répondre aux standards de durabilité requis pour ce type d'installation soumise à des pressions et à une salinité élevée.

Face à l'ensemble de ces défis, une remise à niveau globale de la station s'impose, incluant la fourniture régulière des consommables, le renforcement des capacités humaines, la disponibilité de pièces de rechange critiques et une amélioration des pratiques de construction et de maintenance.

4.6 Conclusion

L'étude expérimentale menée sur la station de dessalement d'Ouled Djellal a permis de mettre en évidence l'efficacité globale du système de traitement, notamment à travers l'osmose inverse et les prétraitements physiques. Les résultats révèlent une amélioration significative de la qualité de l'eau entre le captage et la sortie du système, avec une diminution remarquable des paramètres tels que la salinité, la turbidité, le TDS, les concentrations ioniques (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) et la dureté totale. L'absence de TA et la baisse du TAC indiquent également une réduction de l'alcalinité de l'eau, confirmant la performance du traitement appliqué. Toutefois, certaines observations, comme la légère remontée de la turbidité en sortie d'osmose inverse, suggèrent l'intérêt de renforcer le contrôle des étapes finales ou d'envisager un post-traitement adapté. Ces résultats confortent la pertinence des techniques mises en œuvre et ouvrent la voie à des recommandations techniques pour améliorer encore la qualité de l'eau produite et optimiser le fonctionnement de la station.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

La raréfaction des ressources en eau dans les régions arides, comme celle d'Ouled Djellal, impose une réflexion stratégique sur les solutions alternatives capables de garantir un approvisionnement pérenne et sécurisé en eau potable. Dans ce contexte, le dessalement par osmose inverse s'impose comme une technologie de choix, notamment là où les ressources conventionnelles sont limitées, fortement salines ou inadaptées à la consommation humaine.

Le présent mémoire s'inscrit dans une démarche de diagnostic technique et fonctionnel de la station de dessalement d'Ouled Djellal, installée en 1976 et actuellement hors service. L'étude a permis de mieux cerner le contexte hydrique local, de présenter les principes du dessalement, d'analyser l'état des équipements de la station, et d'en évaluer les performances à travers une campagne expérimentale menée in situ.

Les analyses ont mis en évidence de nombreuses insuffisances techniques : équipements obsolètes, membranes colmatées, absence d'automatisation, et déficit en maintenance et en compétences techniques. Cependant, les résultats des essais montrent que, malgré ces limites, la technologie d'osmose inverse demeure efficace pour améliorer significativement la qualité de l'eau brute fortement minéralisée extraite de la nappe albienne.

Dans cette optique, plusieurs recommandations ont été formulées : remplacement des membranes, automatisation des opérations, intégration d'énergies renouvelables, mise en place d'un programme de maintenance régulier et formation du personnel technique. Ces mesures sont essentielles pour garantir une relance durable et performante de la station.

Toutefois, il convient de souligner que si, après réhabilitation, la station ne parvient pas à fournir un débit suffisant pour satisfaire durablement les besoins en eau potable de la population, il sera nécessaire d'envisager soit son extension, soit la construction d'une nouvelle unité de dessalement plus adaptée aux exigences actuelles. Il n'est plus acceptable, dans un contexte de stress hydrique croissant, de distribuer aux citoyens une eau de robinet non potable, ou de revenir à des solutions précaires et coûteuses. Une stratégie claire, anticipative et fondée sur une vision à long terme est donc impérative pour garantir un accès équitable, continu et de qualité à l'eau potable dans la région.

En définitive, ce travail souligne l'importance de conjuguer ingénierie, gouvernance et mobilisation des ressources humaines pour assurer la viabilité des projets de dessalement dans

Conclusion générale

les zones sahariennes. La réhabilitation de la station d'Ouled Djellal peut ainsi servir de modèle reproductible, aussi bien pour répondre aux besoins locaux que pour inspirer des projets similaires ailleurs en Algérie et dans d'autres régions confrontées aux mêmes défis.

Recommandations

Recommandations

Bien que l'eau dessalée produite respecte les normes de potabilité, la station de dessalement de Ouled Djellal présente de nombreuses défaillances techniques, organisationnelles et structurelles qui compromettent fortement son efficacité, sa fiabilité et sa durabilité à long terme. Afin d'assurer une remise en service optimale, sécurisée et conforme aux standards actuels en matière de traitement de l'eau, les recommandations suivantes sont formulées :

1. Modernisation du système de commande, de supervision et d'automatisation

- Contacter le fabricant italien des armoires pour récupérer soit le programme original, soit la table d'échange des E/S afin de permettre la reprogrammation de l'automate.
- Installer un système SCADA dans une salle de commande isolée des bruits, pour une supervision centralisée, plus confortable et plus réactive.
- Renouveler les capteurs défectueux (pH, CE, Q, P...) et utiliser du matériel de mesure robuste et fiable, garantissant des relevés fiables.
- Automatiser le dosage des réactifs en asservissant les pompes doseuses aux valeurs mesurées en temps réel.

2. Mise en place d'un plan de gestion et d'exploitation

- L'absence d'un plan de gestion structuré constitue une faiblesse majeure. Il est indispensable de concevoir et mettre en œuvre un plan global d'exploitation, de maintenance et de sécurité, avec une répartition claire des responsabilités, un suivi des opérations et des procédures normalisées.
- Ce plan doit également inclure un programme de contrôle des fuites et une planification rigoureuse de la maintenance préventive.

3. Élimination des fuites et amélioration de l'étanchéité

- Les fuites récurrentes constatées dans plusieurs sections du système provoquent des pertes de charge significatives et une chute de la pression de service, en particulier au niveau des membranes d'osmose inverse, où une pression stable et élevée est indispensable au bon déroulement du processus de dessalement.
- Il est donc impératif de détecter, localiser et éliminer toutes les fuites, en renforçant ou remplaçant les conduites, raccords et soudures non conformes, avec des matériaux résistants à la pression et à la salinité.

4. Approvisionnement régulier en consommables essentiels

- Mettre en place une logistique d'approvisionnement sécurisée en membranes, filtres, acide, antiscalant et autres consommables critiques.
- Constituer un stock de sécurité minimal pour éviter les interruptions prolongées.

5. Ressources humaines et renforcement des compétences

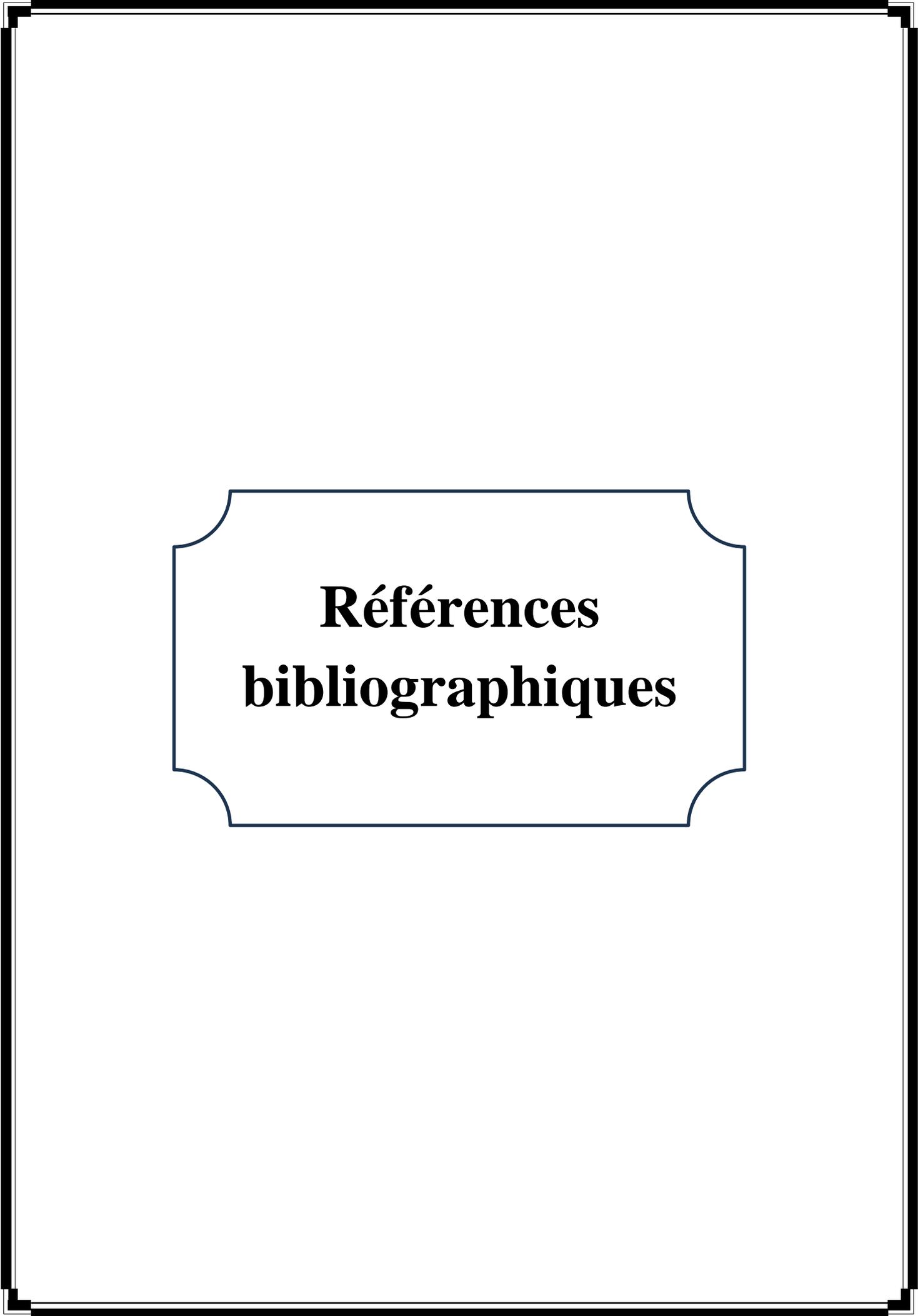
- Recruter des agents d'exploitation qualifiés et former en continu le personnel en poste sur les aspects techniques, sécuritaires et de maintenance.
- Développer une culture d'anticipation, orientée vers la prévention des pannes et l'amélioration continue.

6. Disponibilité des pièces de rechange et maintenance structurée

- Mettre en place un magasin technique avec les pièces de rechange stratégiques (pompes, vannes, joints, sondes...).
- Établir un calendrier de maintenance préventive, avec des fiches de suivi et des inspections périodiques.

7. Suivi qualité et indicateurs de performance

- Installer un data logger pour archiver en continu les données techniques.
- Définir des indicateurs clés de performance (KPI) permettant de suivre l'évolution de l'efficacité, de la consommation énergétique, de la qualité de l'eau produite, etc.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- ❖ **Baba Ahmed, M. (2015).** Les ressources en eau souterraine en Algérie saharienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 28(2), 125–136.
- ❖ **Cornelissen, E. R., et al. (2007).** "Membrane cleaning in reverse osmosis systems." *Desalination*, 207(1–3), 295–306.
- ❖ EPA (2020). *Water Treatment Manual: Disinfection*. U.S. Environmental Protection Agency.
- ❖ **Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013).** Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197–207.
- ❖ **Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009).** Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317–2348.
- ❖ **Lee, S., Kim, S. H., & Cho, J. (2011).** "Cleaning strategies for membrane fouling in reverse osmosis systems." *Journal of Water Process Engineering*, 1, 6–11.
- ❖ **OMS (Organisation mondiale de la santé). (2017).** Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4^e édition. Genève : OMS.
- ❖ **Remini, B. (2010).** *L'exploitation des eaux profondes du Sahara algérien : bilan et perspectives*. *Sécheresse*, 21(4), 233–240.
- ❖ **Schäfer, A. I., Fane, A. G., & Waite, T. D. (2005).** *Nanofiltration: Principles and Applications*. Elsevier.
- ❖ **Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008).** Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310.
- ❖ **Toumi, A., Bensmaine, A., & Djehiche, A. (2018).** Évaluation de la performance des stations de dessalement dans le sud algérien. *Journal Algérien des Régions Arides*, 12(1), 65–74.
- ❖ **Voutchkov, N. (2012).** *Desalination Engineering: Planning and Design*. McGraw-Hill.
- ❖ **WHO (World Health Organization). (2017).** Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition. Geneva: WHO Press.
- ❖ **Chinini mohamed salah edine (2022)** (Les caractéristiques physico-chimiques des eaux albiennes de la wilaya d'Ouled Djellal mémoire en Licence professionnelle, 71 pages). Université de Bouira

Références bibliographiques

- ❖ **Chebéti bachire(2022)** (Réhabilitation de la station de traitement d'Ouled Djellal Mémoire de Master ,114 pages). Université de Biskra
- ❖ **Ammari abdesstar(2024)** (Etat de déminéralisation des eaux souterraines au Sahara septentrional (Algérie) et possibilité de réutilisation des eaux de rejet des ces stations) THESE du diplôme de Doctorat 3ème Cycle ,160 pages). Université d'Ouargla
- ❖ **Maafa aida 2020** (Thème : Dessalement de L'eau de mer Mémoire de Master ,76 pages). Université de Guelma
- ❖ **Zeghidi abdallah (2020)** (Suivi de la performance de la station de déminéralisation des eaux souterraines El Meghaier –W-El Oued Mémoire de Master, 65 pages). Université de Biskra
- ❖ **Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) Biskra.(2025)**. Donnes et informations , 20 pages.
- ❖ **Direction des ressources en eau (DRE), Ouled Djellal (2025)**. Donnes et informations , 15 pages.