

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Chadli Bendjedid – El Tarf

Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de génie des procédés

Mémoire de master professionnel

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Dessalement et Traitement des Eaux

Thème

***Évaluation de la Qualité Physico-Chimique du Perméat destiné
aux usages industriels***

de la Station de Dessalement de Koudiet Edraouech (El Tarf)

Présenté par :

- Kherici Amel Anfel

Encadre par :

- Dr. KHALED-KHODJA Soumeya

Soutenue le 16 /06/2025 Devant le jury composé de :

Dr. MEDJDOUB Norednine	Président	(MCB)	Univ. EL-Taref
Dr. KHALED-KHODJA Soumeya	Encadrante	(MCA)	Univ. EL-Taref
Dr. BOUOUDEN Walid	Examineur	(MCB)	Univ. EL-Taref

Année Universitaire: 2024-2025



Remerciements

Avant tout je remercie Allah qui m'a donné la force et la volonté pour réaliser ce travail de recherche scientifique.

*Je remercie infiniment mon encadrante **Dr. KHALED-KHODJA S.** pour son aide et assistance précieuse, ses conseils et ses encouragements pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens à témoigner ma reconnaissance à **Dr. MEDJDOUB Norednine** pour avoir accepté de présider mon jury du projet de fin d'étude.*

*Je remercie **Dr. BOUOUDEN Walid** d'avoir accepté d'examiner mon travail du projet de fin d'étude.*

Je tiens à remercier également les enseignants du département.

*Je tiens à remercier **Dr Boudjema Boughrara** directeur de laboratoire de physico -chimie des matériaux (LPCM) Université Chadli Bendjedid EL TARF , pour son soutien.*

*Je tiens à remercier très sincèrement tous le personnel de laboratoire pédagogique (chimie) Université Chadli Bendjedid EL TARF et laboratoire de chimie de l'université Chadli Benjedid El-tarf (SNV), particulièrement **Kherici soufiane**.*

Finalement, je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail



Dédicace

Je dédie ce travail

*A ceux que dieux ma donnée de plus chère
A mes parents, qui m'ont beaucoup aidé avec leurs précieux
Conseils et leurs soutien moral toute au long de mes études*

*A mes chères frères : Moncef, Abed EL Rahman à qui je souhaite une
vie pleine de bonheur, de santé et de réussite*

*A ma précieuse sœur Maroua, les mots ne peuvent résumer ma
reconnaissance et mon amour à ton égard.*

*A tous mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie
et de bonheur ; Que toute personne m'ayant aidé de
Près ou de loin*

	Pages
Figure I.1. Répartition en pourcentage de l'utilisation de l'eau entre les usages domestique,industriel et agricole dans le monde	4
Figure I.2. Distillation par Étapes Multiples	8
Figure I.3. Distillation à Effets Multiples.....	9
Figure I. 4. Distillation par Compression de Vapeur(MVC/TVC)	9
Figure I.5. Schéma d'une unité simple de dessalement par osmose inverse (RO).....	10
Figure I.6. Schéma de l'Osmose directe.....	10
Figure I.7. Schéma d'électrodialyse	10
Figure I.8. Principes de fonctionnement et schéma d'une unité de nanofiltration	11
Figure I. 9. Schéma d'une installation de dessalement par échange d'ions	11
Figure I.10. Schéma de dessalement par hydratation.....	12
Figure I.11. Classification des technologies de dessalement.....	12
Figure I.12. Procédé de l'osmose inverse	13
Figure I.13. Séparation en phase liquide par perméation à travers une membrane	13
Figure I.14. Prétraitement conventionnel	17
Figure II.1. Stations de dessalement (1) et la centrale thermique (2) de koudiet Edraouech	23
Figure II. 2. Situation géographique de l'usine de dessalement de Koudiet Edraouech.....	24
Figure II.3. pH mètre.....	27
Figure II. 4. Conductimètre	27
Figure II.5. Thermomètre	28
Figure III. 1. Variation de la température du perméat en fonction du temps	29
Figure III.2. Variation du pH du perméat en fonction de temps	29
Figure III.3. Variation de la conductivité électrique du perméat en fonction de temps	30
Figure A.1. Réservoir de stockage de l'eau osmosée	37
Figure A.2. Mesure de la conductivité, la température et le pH du perméat in situ	37

Liste des tableaux

	Pages
Tableau I.1. Principales utilisations de l'eau dans l'industrie	5
Tableau I.2. Comparaison entre les diverses membranes.....	15
Tableau I.3. Paramètres clés de la qualité de l'eau pour les HRSG, selon les normes NF EN 12952-12 (1).....	20
Tableau I.4. Paramètres de qualité de l'eau pour chaudières HRSG (Haute Pression) basés sur les recommandations VGB-S-010-T-00:2011-12.EN (2).....	21
Tableau A.1. Variation de la température en fonction du temps	38
Tableau A.2. Variation du pH en fonction du temps.....	38
Tableau A.3. Variation de la conductivité électrique en fonction du temps.....	39

Liste des abréviations

°C : Degrés Celsius.

CA : cellulose acétate

CaCO₃ : carbonate de calcium

CE : conductivité électrique

ED : électrodialyse

FO : forward osmosis

HRSG : Heat Recovery Steam Generator (générateur de vapeur à récupération de chaleur)

MED : Distillation à Multiples Effets

MMM : membrane à matrix mixte

MSF: Multi Stage Flash.

MVC : Compression Mécanique de Vapeur.

NF: Nano filtration.

NF EN : norme française norme européen

OI : Osmose inverse

PES :polyetersulfone

PSF : polysulfone

Q_P : Débit du perméat.

SDI: Silt Density Index(indice de colmatage)

SKD : Station Koudiet Edraouech

SWRO : Sea Water Reverse Osmosis

TFC : Composite à Film mince

TFN : Nnanocomposite à Film mince

TVC : Compression Thermique de Vapeur

VGB-S-010-T-00:2011-12.EN : standard technique établi par l'association VGB PowerTech e.V. (aujourd'hui vgbe energy e.V.), une organisation reconnue internationalement dans le secteur de l'énergie.

μS/cm : micro siemens par centimètre

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des abréviations.....	V
Sommaire	VI
Introduction générale	1

Chapitre I. Généralités

I.1.L'Eau et ses Caractéristiques	4
I.2.Importance de l'eau dans l'industrie	4
I.3.Paramètres physico-chimiques de l'eau	5
I.4.Conséquences des impuretés dans l'eau industrielle	8
I.5.Technologies de Dessalement	8
I.6.Focus sur l'Osmose Inverse (OI).....	13
I.6.1.Principe de fonctionnement de l'OI.	13
I.6.2.Types de membranes et leurs caractéristiques	14
I.6.3.Avantages et inconvénients de l'OI	16
I.6.4.Processus de prétraitement et de post-traitement des stations d'OI.....	16
I.7.Exigences en qualité d'eau pour les usages industriels clés.....	19
I.7.1.Eau d'alimentation de chaudière (circuits vapeur)	19

Chapitre II. Matériel et méthodes

II.1.Présentation de la Centrale de Koudiet Edraouech de la wilaya d'El Taref.....	23
II.3.Prélèvement et Conservation des Échantillons.....	25
II.4.Justification du choix des descripteurs ciblés.....	25

Sommaire

II.5.Les analyses effectuées in situ (sur terrain)	26
 chapitre III. Résultat et discussion	
III.1.La température (T°C)	29
III.2.Le pH.....	29
III.3.Conductivité électrique (CE)	30
Conclusion générale	33
Références biographiques	35
Annexes	39
Résumés	

Introduction générale

L'eau est une ressource très convoitée car vitale pour la vie sur Terre. Elle est indispensable dans toutes nos activités domestiques, industrielles et agricoles. Malheureusement, une eau de bonne qualité devient, de nos jours, de plus en plus rare. Cette raréfaction s'explique par plusieurs facteurs : la croissance démographique, la modification des modes de vie, la pollution, une gestion inefficace de l'eau et les effets du changement climatique, comme les sécheresses ou les inondations [1]. La pénurie d'eau a de lourdes conséquences sur les écosystèmes aquatiques, la biodiversité, le bien-être humain et le développement durable.

L'eau joue également un rôle crucial dans l'industrie, où elle est utilisée dans de nombreux processus, tels que la production d'énergie, le refroidissement, le nettoyage ou la fabrication de produits chimiques. Une pénurie hydrique peut donc affecter directement la compétitivité économique et la sécurité industrielle [3].

Face à cette crise, plusieurs solutions sont envisagées. Il s'agit notamment d'une meilleure gestion de la demande en eau : économies domestiques (toilettes à faible débit, détection des fuites), recyclage industriel, ou irrigation agricole de précision (goutte-à-goutte) [2]. Parmi les alternatives techniques, le dessalement de l'eau de mer ou saumâtre se présente comme une option intéressante, bien que nécessitant des précautions environnementales [1].

Le dessalement de l'eau de mer connaît une croissance rapide à l'échelle mondiale. En 2022, plus de 21 000 usines de dessalement étaient opérationnelles, produisant environ 110 millions de m³ d'eau douce par jour. Cette capacité a été multipliée par cinq depuis l'année 2000, avec une croissance annuelle estimée entre 6 % et 12 % [4].

L'Algérie est l'un des pays ayant eu recours au dessalement de l'eau de mer pour faire face à la rareté croissante de ses ressources en eau. Le pays prévoit d'atteindre 19 usines de dessalement d'ici fin 2024, avec une capacité de production totale de 2,11 millions de m³ par jour [5]. Des projets supplémentaires sont en cours pour augmenter cette capacité, notamment avec la construction de cinq nouvelles stations dont le taux d'avancement dépasse 75 %. L'objectif est de couvrir 60 % des besoins en eau potable de la population d'ici 2030 [6].

La station de dessalement de Koudiet Edraouech, située à Berrihane, wilaya d'El Tarf, représente une infrastructure critique pour l'approvisionnement en eau de la région. Conçue pour atteindre une capacité de production de 300 000 m³/jour, cette installation a lancé sa phase d'essais techniques début mars 2025, avec un démarrage des travaux en juin 2022 [7]. La station

intègre des technologies modernes axées sur l'économie d'énergie [8], ce qui est caractéristique des usines de dessalement par osmose inverse (OI) de l'eau de mer (SWRO) [7]. L'osmose inverse est reconnue pour sa capacité à produire une eau de bonne qualité à un coût compétitif par rapport à d'autres techniques de dessalement [9].

Pour répondre aux besoins spécifiques des installations, notamment pour les cycles thermiques et la production de vapeur, où une eau de haute qualité est indispensable pour garantir la performance, la sécurité et la durabilité des équipements industriels, la station utilise le perméat ou eau dessalée.

L'utilisation du perméat produit par la station de dessalement de Koudiet Edraouech doit avoir des caractéristiques physico-chimiques spécifiques et conformes aux normes requises, afin de garantir la performance des équipements, prévenir la corrosion, et l'entartrage.

En effet, bien que l'osmose inverse produise une eau de grande pureté, son usage dans des installations sensibles comme les turbines de production d'électricité et les circuits de refroidissement impose un contrôle strict de paramètres tels que les chlorures, les sulfates, le calcium, le magnésium et la silice. Une qualité d'eau non conforme peut entraîner la formation de dépôts, altérer les échanges thermiques, provoquer une corrosion prématurée des matériaux, augmenter les coûts de maintenance et impacter la performance des processus industriels. De plus, la non-conformité aux spécifications des fabricants d'équipements peut compromettre la fiabilité et la durabilité des installations [10].

La présente recherche a pour objet principal d'évaluer la qualité physico-chimique du perméat produit par la station de Koudiet Edraouech. L'évaluation se concentrera sur son adéquation pour une application industrielle particulièrement exigeante : l'alimentation des turbines de production d'électricité (via les chaudières).

Le manuscrit comporte trois chapitres essentiels qui se focalisent sur :

Le premier chapitre se rapporte à une revue de la littérature portant sur les principes, technologies et enjeux du dessalement de l'eau de mer, avec un accent particulier sur l'osmose inverse.

Le deuxième chapitre s'articule autour de la description de la station de dessalement et les points de prélèvement du perméat et de sa conservation. Enfin, les descripteurs physico-chimiques mesurés : pH, Conductivité, température, etc.

Introduction générale

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus et leur comparaison avec les normes internationales et nationales pour usages Industriels.

Enfin, une conclusion sur les principales constatations et les perspectives futures sont débattues.

Chapitre I. Généralités

Chapitre I. Généralités

I.1. L'Eau et ses Caractéristiques

La demande en eau douce s'inscrit dans un contexte de pression croissante liée à la croissance démographique, à l'urbanisation accélérée et aux besoins sectoriels. L'utilisation mondiale de l'eau se répartit principalement en trois grandes catégories : l'agriculture, qui constitue le principal poste de consommation avec environ 70 à 82 % selon les régions ; l'industrie, qui mobilise environ 22 à 59 % dans les pays à revenu élevé ; et les usages domestiques, dont la part reste généralement inférieure à 11 %. Dans les pays à revenu élevé, l'eau est majoritairement utilisée par l'industrie, tandis que dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, c'est l'agriculture qui domine, absorbant jusqu'à 82 % de l'eau disponible. Cette disparité reflète les différences structurelles en matière de développement économique et d'infrastructure hydrique [11].

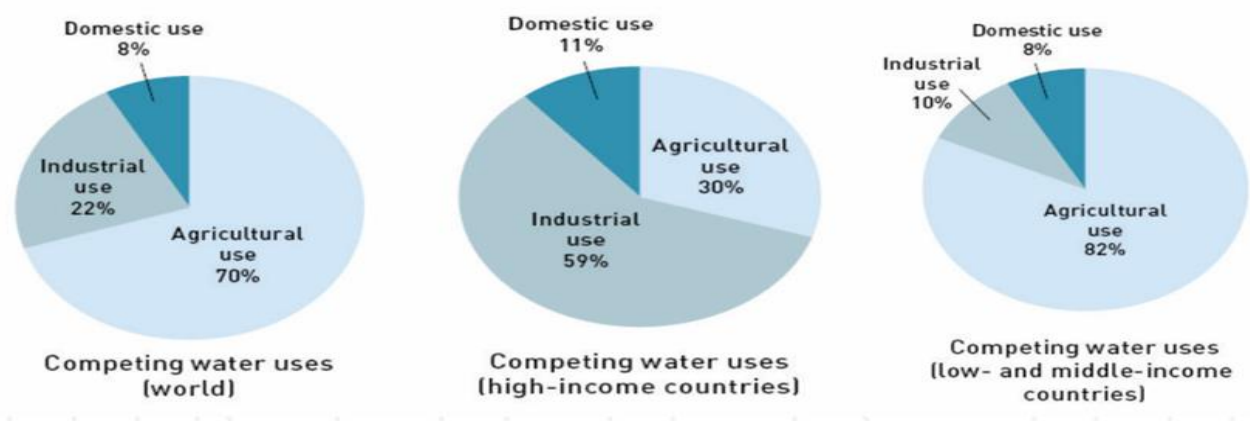


Figure I.1.Répartition en pourcentage de l'utilisation de l'eau entre les usages domestique, industriel et agricole dans le monde [11]

I.2. Importance de l'eau dans l'industrie

De nombreuses industries utilisent l'eau pour la production, cette dernière doit posséder des propriétés particulières telles que la solubilité, le potentiel de transport ou le potentiel d'échange thermique [12]. Les principaux usages de l'eau dans l'industrie peuvent être résumés comme suit :

1. Production d'énergie thermique :

Nécessite principalement l'utilisation de l'eau dans l'industrie, notamment dans les pays développés. L'eau est utilisée pour le refroidissement des centrales électriques nucléaires, à charbon et à gaz. Les principales méthodes de refroidissement présentent deux systèmes :

- Systèmes à passage unique : prélèvent de grands volumes d'eau et en restituent la majeure partie à la source, mais à des températures élevées (pollution thermique).

Chapitre I. Généralités

- Systèmes à recirculation (tours) : utilisent l'eau plus efficacement, mais les pertes par évaporation sont plus importantes, ce qui augmente la consommation d'eau. [13]

2. Fabrication et transformation

L'eau est essentielle dans divers procédés de production, notamment :

Incorporation du produit : l'eau entre dans le produit final (par exemple, boissons, produits chimiques, etc.).

- Nettoyage et rinçage : pour les matières premières, les équipements et les installations.
- Transport : des matériaux au sein des installations (en particulier dans les industries papetières).
- Réactions chimiques et mélanges : courants dans les secteurs pharmaceutique, alimentaire, textile, etc. [13]

3. Refroidissement dans la fabrication

Outre la production d'électricité, de nombreuses usines utilisent de l'eau pour le refroidissement des équipements et des procédés, notamment : machines-outils, fours, Compresseurs. Cette eau peut être recyclée en interne ou rejetée après traitement [14].

4. Usage sanitaire et des installations

Les toilettes, les cuisines et les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) des installations industrielles utilisent également de l'eau. Bien que mineure par rapport au traitement et au refroidissement, elle contribue aux prélèvements totaux [13].

Tableau I.1. Principales utilisations de l'eau dans l'industrie [13]

Catégories d'utilisation	Objectifs / Fonctions principales
Production d'énergie thermoélectrique	Refroidissement des centrales
Fabrication et transformation	Eau intégrée aux procédés industriels
Refroidissement dans la fabrication	Refroidissement d'équipements et des procédés
Usage sanitaire et des installations	Fonctions de confort et hygiène dans les locaux industriels

I.3. Paramètres physico-chimiques de l'eau

1.pH

Le pH indique l'acidité ou la basicité de l'eau. Dans l'industrie, un pH mal ajusté peut provoquer la corrosion des équipements ou la précipitation de sels. Les industries de papeterie ou celles qui utilisent les chaudières, le contrôle du pH est impératif. Le pH varie souvent, entre 6.5 et 9.6 selon l'usage [15].

2.Acidité

L'acidité de l'eau, souvent due au CO₂ libre ou aux acides minéraux, favorise la corrosion des surfaces métalliques et en béton. Elle doit être neutralisée avant utilisation industrielle, en particulier dans les circuits fermés ou à haute température [15]

3.Alcalinité

L'alcalinité provient des bicarbonates, carbonates et hydroxydes. Elle influence la stabilité du pH, la corrosion et les traitements chimiques. Une alcalinité excessive peut entraîner la formation de dépôts dans les chaudières [16].

4.calcium

Le calcium est la principale cause de formation de tartre dans les chaudières et les systèmes de refroidissement. Sous forme de carbonate ou sulfate, il se dépose et réduit l'efficacité thermique. Sa présence est limitée dans les eaux de process [15].

5.Magnésium

Comme le calcium, le magnésium forme des dépôts, notamment de l'hydroxyde de magnésium, et peut accélérer la corrosion. Il est particulièrement indésirable dans les eaux de chaudière et de refroidissement [16].

6.DuretéTotale

La dureté représente la somme du calcium et du magnésium. Elle cause l'entartrage, perturbe les procédés textiles, et augmente la consommation de savon. Une eau trop dure doit être adoucie pour un usage industriel optimal [16].

7.Chlorures

Les chlorures accélèrent la corrosion des métaux, surtout dans les chaudières et les circuits en acier inoxydable. Même en faibles concentrations, ils peuvent rendre l'eau impropre pour les systèmes haute pression [15].

Chapitre I. Généralités

8.Sulfates

Les sulfates forment des dépôts durs, notamment le sulfate de calcium, difficile à éliminer. Ils sont très problématiques dans les systèmes de chauffage et dans les industries utilisant la vapeur [16].

9.Silice

La silice est problématique dans les turbines à vapeur, formant des dépôts sur les ailettes. Elle est difficile à éliminer et nécessite des traitements spécifiques. Les concentrations doivent rester très faibles dans les circuits critiques [15].

10.Fer

Même sous forme de traces, le fer provoque des taches, décolore les produits et perturbe les procédés (ex. : textile, boissons, papier). Il forme des dépôts d'oxydes qui encrassent les équipements et les résines échangeuses d'ions [15].

11.Manganèse

Le manganèse agit comme le fer : il tache, forme des dépôts noirs et peut interagir avec des traitements chimiques. Il est particulièrement redouté dans les procédés alimentaires et de coloration [15].

12.OxygèneDissous

L'oxygène dissous est l'un des agents les plus corrosifs. Dans les chaudières, il attaque le métal et favorise la formation de piqûres, un type de corrosion localisée causée par la création de microcellules électrochimiques. Dans ces zones, de petites parties du métal deviennent anodiques et se corrodent rapidement, formant des trous qui peuvent évoluer en fissures profondes et compromettre l'intégrité des installations. Il doit être éliminé par désaération ou agents réducteurs (hydrazine, sulfite)[16].

13.Dioxydedecarbonate

Le CO₂ dissous forme de l'acide carbonique, un corrosif puissant, notamment dans les réseaux de condensat. Il est libéré lors de la décomposition des bicarbonates dans les chaudières [15].

14.Aluminium

L'aluminium, issu des coagulants ou de la corrosion d'aluminium, forme des boues gênantes et réagit avec certains colorants. Il est très nuisible dans les industries de textiles et de la rayonne [15].

Chapitre I. Généralités

15.ChloreLibre

Le chlore, souvent utilisé pour désinfecter, peut corroder les installations et altérer les produits (ex. : aliments, papiers, etc.). Sa présence doit être limitée après traitement [15].

16.MatièreOrganique

Les matières organiques causent goûts, odeurs, couleurs et colmatage des filtres. Elles doivent être éliminées, notamment pour les industries alimentaires, textiles et papetières [15].

17.ConductivitéélectriqueetTDS

La conductivité mesure la concentration globale en ions dissous ; elle est corrélée aux solides dissous totaux (TDS) et impacte la corrosion et l'efficacité des traitements par échange d'ions.[16].

I.4. Conséquences des impuretés dans l'eau industrielle

Les impuretés dans l'eau industrielle peuvent avoir des effets particulièrement nuisibles sur les infrastructures industrielles : corrosion des conduites et équipements industriels, formation de tartre (entartrage), bio-encrassement (biofouling), altération des procédés industriels sensibles, etc.

Ces effets impactent la performance, la durabilité et les coûts d'exploitation des équipements utilisés dans les procédés industriels [17].

I.5. Technologies de Dessalement

I.5.1. Dessalement Thermique (Activé par la Chaleur)

Ces systèmes utilisent la chaleur pour évaporer ou geler l'eau, séparant ainsi les sels dissous. Ils sont énergivores, mais capables de traiter une eau très salée. Parmi ces techniques nous citerons :

Distillation par Étapes Multiples (MSF) : l'eau de mer est chauffée et évaporée dans plusieurs chambres à pression décroissante.[18]

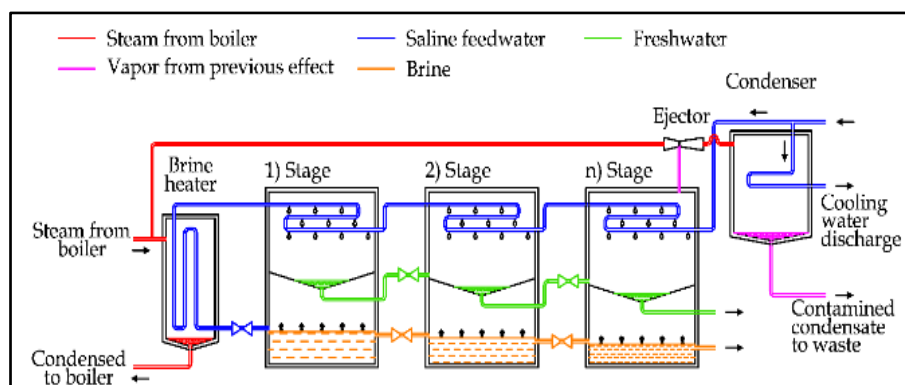


Figure I.2. Distillation par Étapes Multiples [19]

Chapitre I. Généralités

Distillation à Effets Multiples (MED) : l'eau s'évapore et se condense à travers plusieurs effets en cascade.[18]

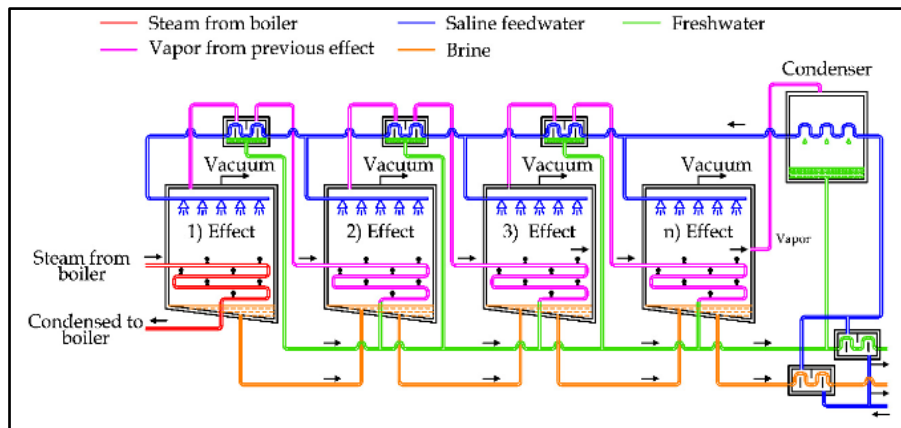


Figure I.3. Distillation à Effets Multiples [19]

Distillation par Compression de Vapeur (MVC/TVC) : utilise un compresseur thermique ou mécanique pour recycler la chaleur de la vapeur.[18]

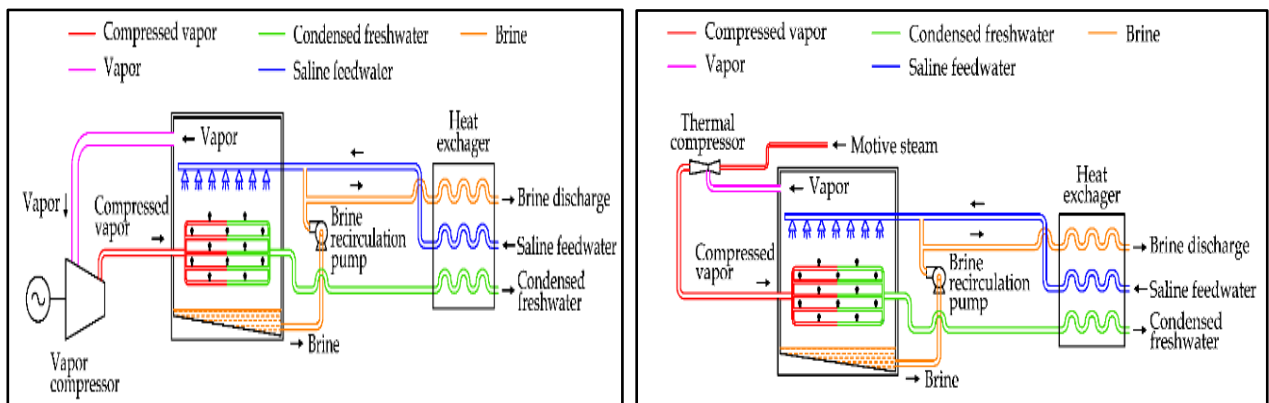


Figure I. 4. Distillation par Compression de Vapeur(MVC/TVC) [19]

I.5.2. Dessalement par Membrane (Activé par Pression)

Ces systèmes utilisent la pression pour forcer l'eau à travers des membranes semi-perméables, retenant les sels. Parmi ces techniques nous citerons :

Osmose Inverse (RO) : c'est la méthode la plus utilisée. Elle applique une forte pression pour faire passer l'eau à travers la membrane.[18]

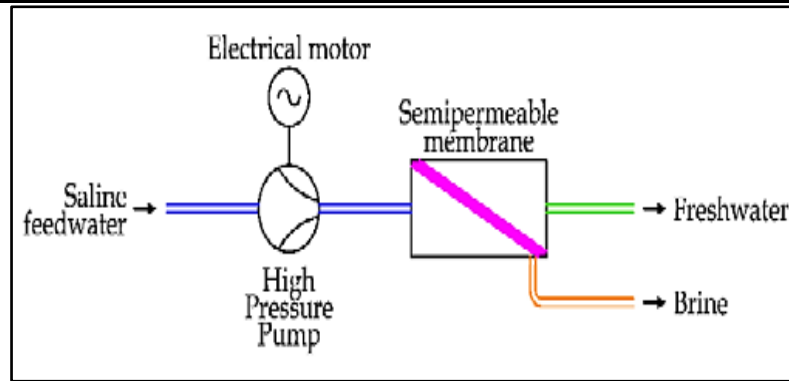


Figure I.5. Schéma d'une unité simple de dessalement par osmose inverse (RO) [19]

Osmose Directe (FO) : elle s'appuie sur la différence de pression osmotique plutôt que sur la pression appliquée.[18]

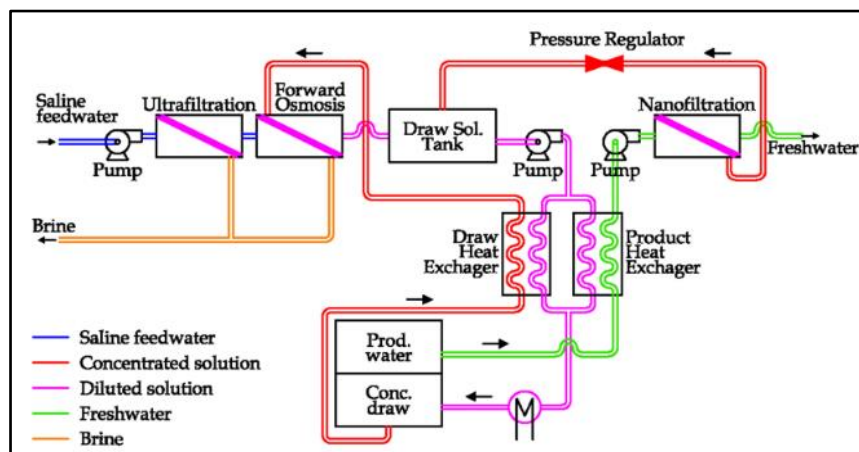


Figure I.6. Schéma de l'Osmose directe [19]

Électrodialyse (ED) : elle utilise un champ électrique pour déplacer les ions de sel à travers des membranes.[18]

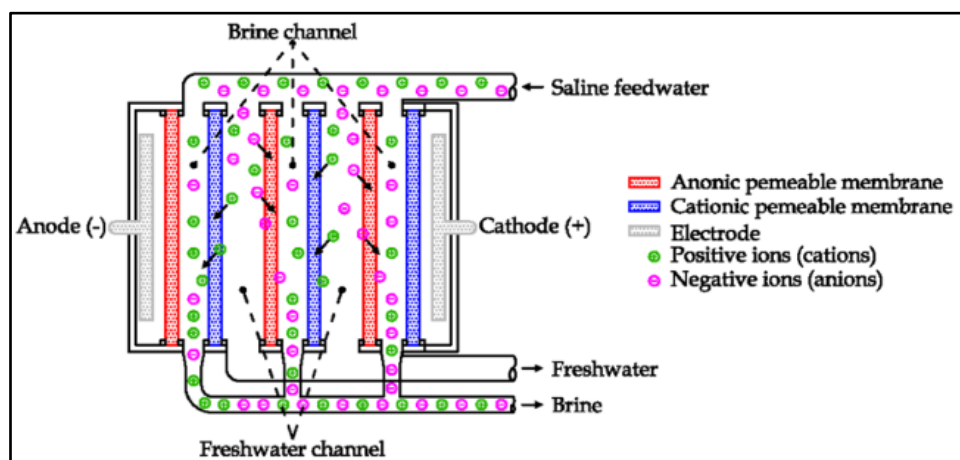


Figure I.7. Schéma d'électrodialyse [19]

Chapitre I. Généralités

Nanofiltration (NF) : elle est semblable à l'osmose inverse mais avec des pores plus grands, laissant passer certains sels et composés organiques.[18]

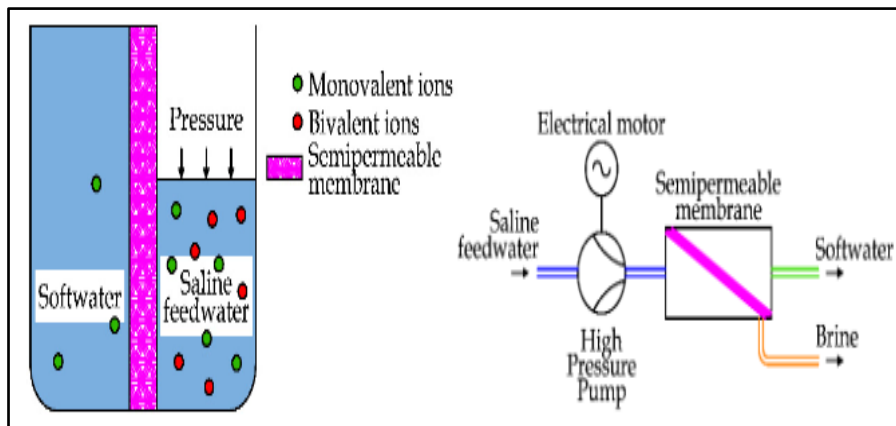


Figure I.8.Principes de fonctionnement et schéma d'une unité de nanofiltration [19]

I.5.3. Dessalement Chimique

Dans ce procédé des réactions chimiques ou des interactions physiques sont utilisées pour séparer les sels de l'eau. Parmi ces derniers nous citerons :

Échange d'Ions (I. Ex) : utilise des résines pour échanger les ions salins contre des ions inoffensifs.[18]

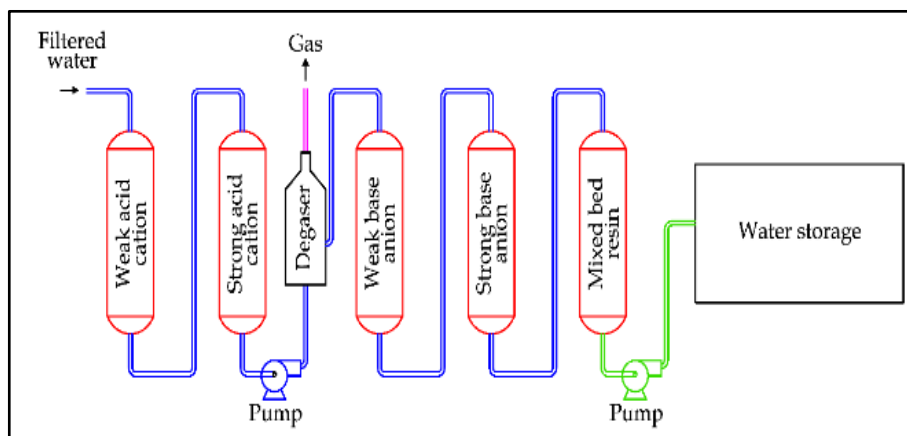


Figure I. 9. Schéma d'une installation de dessalement par échange d'ions [19]

Extraction Liquide–Liquide (LLE) : dans cette technique des solvants sélectifs sont utilisés pour extraire l'eau ou les sels.

Hydrates Gaz (Dessalement par hydratation) (G.Hyd) : formation de cristaux semblables à de la glace avec l'eau, en excluant les sels.[18]

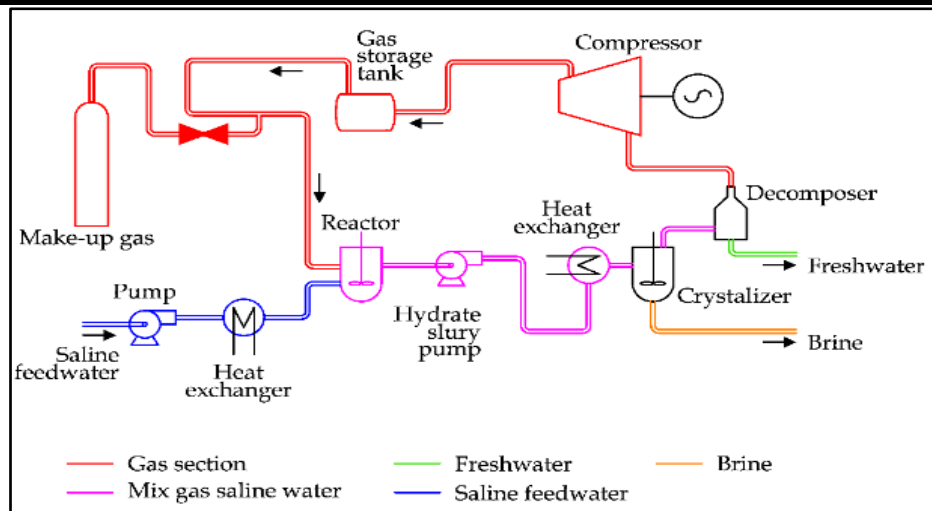


Figure I.10. Schéma de dessalement par hydratation [19]

• Dessalement par Adsorption (Ads)

Utilise des matériaux adsorbants (comme le gel de silice) qui attirent et retiennent la vapeur d'eau.

Fonctionne avec de la chaleur de faible qualité ou de récupération.

Très efficace énergétiquement et respectueux de l'environnement [18].

Enfin, les différentes techniques de dessalement sont résumées dans la figure 11.

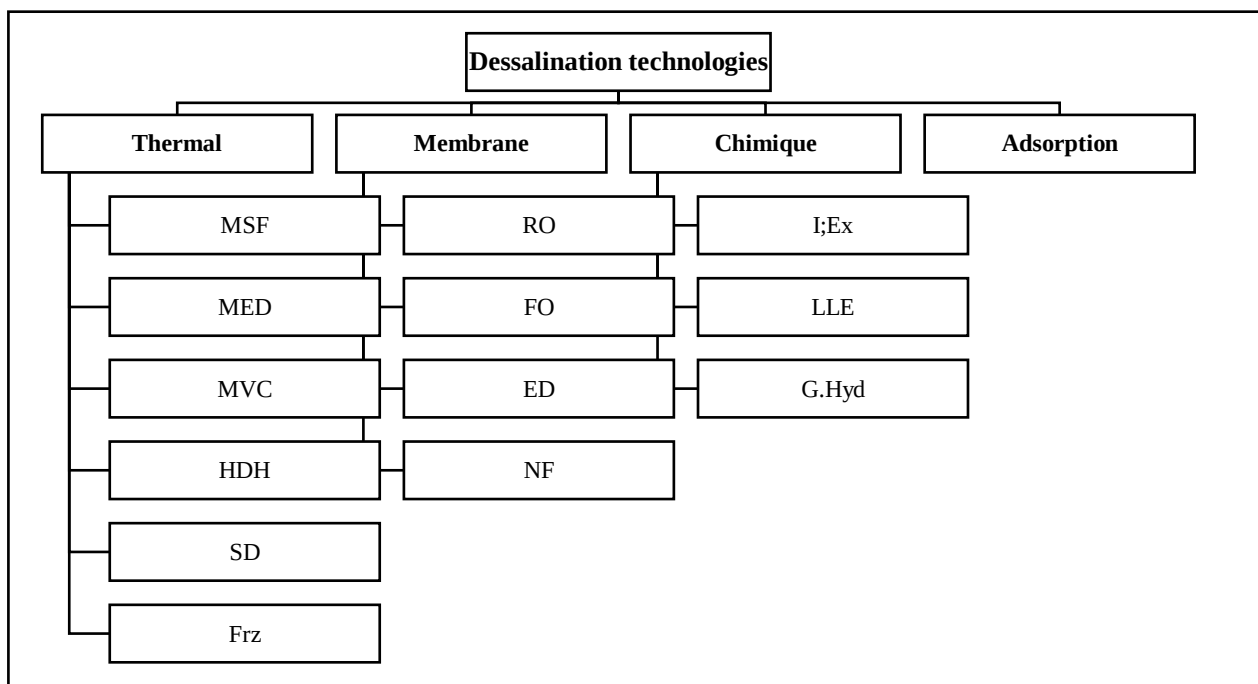


Figure I.11. Classification des technologies de dessalement [18]

I.6. Focus sur l'Osmose Inverse (OI)

I.6.1. Principe de fonctionnement de l'OI

L'osmose inverse consiste à faire passer l'eau au travers des membranes semi perméables, sous l'effet de la pression différentielle de la solution concentrée vers la solution diluée. Le taux d'élimination est exprimé en pourcentage de la salinité totale, la réduction de la salinité de l'eau saumâtre est supérieure à 92% contre plus de 98,5% pour l'eau de mer [20]

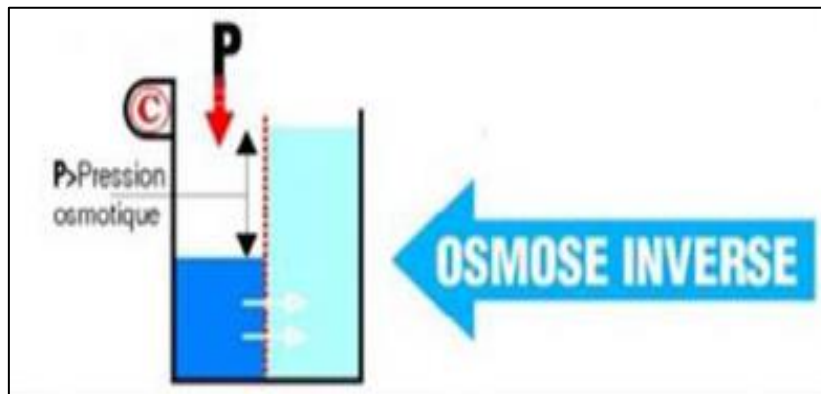


Figure I. 12. Procédé de l'osmose inverse [21]

L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit Q_0) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes :

- Une partie qui passe à travers la membrane ou perméat (débit Q_p).
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane, appelée concentrât ou retentât (débit Q_c), et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane [20].

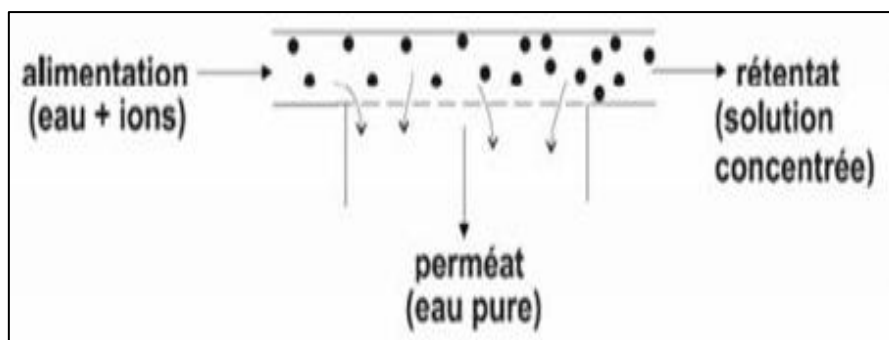


Figure I.13. Séparation en phase liquide par perméation à travers une membrane [22]

Chapitre I. Généralités

I.6.2. Types de membranes et leurs caractéristiques

Les membranes couramment employées en osmose inverse incluent :

1. Membranes Cellulosiques (Cellulose Acétate - CA) : Ce sont des membranes asymétriques à peau intégrée, formées d'Esters de cellulose (diacétate, triacétate). Leurs caractéristiques se présentent comme suit :

- Très hydrophile.
- Faible perméabilité à l'eau ($\sim 1 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$).
- Rejet du NaCl : 85–98 %.
- Bonne tolérance au chlore.
- Sensibles à l'hydrolyse, aux bactéries, à des températures élevées.
- Plage de pH étroite (5–7).
- Surface lisse $\Rightarrow$ moins de colmatage. [23]

2. Membranes Composites à Film Mince (Thin-Film Composite - TFC, généralement en polyamide - PA) : formées de trois couches PA sélective ($< 200 \text{ nm}$), support microporeux (PSf ou PES), tissu non tissé. Les principales caractéristiques de ces membranes sont :

- Perméabilité à l'eau élevée.
- Rejet du NaCl : 95–99,9 %.
- Moins hydrophile que les membranes CA.
- Surface rugueuse $\Rightarrow$ plus sensible au colmatage.
- Tolérance faible au chlore ($< 0,1 \text{ ppm}$).
- Plage de pH plus large (3–10, voire 2–11).
- Température maximale d'utilisation est de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ [23].

3. Membranes à Multicouches de Polyelectrolytes : elles sont formées par un assemblage couche par couche de poly cations et poly anions. Leurs caractéristiques principales sont :

- Facilité de fabrication par auto-assemblage.
- Bon rejet des ions divalents, moins efficace pour les monovalents.
- Propriétés dépendantes du nombre de couches, de la charge et du pH.
- Peu coûteuses, mais moins performantes que les TFC pour le NaCl [23].

Chapitre I. Généralités

4. Membranes à Matrice Mixte (Mixed Matrix Membranes - MMM ou TFN) : leur structure présente une incorporation de nanoparticules (zeolites, SiO₂, TiO₂, Ag, GO, CNT) dans la couche PA ou le support. Leurs principales caractéristiques ont :

- Meilleure perméabilité à l'eau.
- Meilleure résistance chimique et thermique.
- Propriétés antifouling améliorées (ex : argent pour biofouling).
- Complexité de fabrication (dispersion des nanoparticules, interactions chimiques...) [23].

5. Membranes Biomimétiques : sont formées par une incorporation de canaux à eau comme les aquaporines dans une couche PA. Leurs caractéristiques se résument en :

- Sélectivité exceptionnelle (rejet parfait des solutés).
- Flux d'eau très élevé.
- Technologie prometteuse, mais coûteuse et difficile à produire à grande échelle.
- Stabilité à long terme encore en cours d'étude [23]

Tableau I.2. Comparaison entre les diverses membranes [23]

Type de membrane	Perméabilité à l'eau	Réjection des sels	Plage pH	Résistance au chlore	Caractéristiques clés
CA	Basse (~1)	Moyenne (85–98%)	5–7	Bonne (<1 ppm)	Très hydrophile, stable au chlore
TFC-PA	Moyenne à haute (1–10)	Élevée (95–99.9%)	3–10	Faible (<0.1ppm)	Performance élevée, surface rugueuse
Poly electrolyte	Moyenne	Faible (mono-ions)	Variable	Variable	Préférée pour NF
TFN/MMM	Élevée	Élevée	Large	Meilleure	Ajout de nanoparticules
Biomimétique (AQP)	Très élevée	Très élevée	Moyenne	En développement	Inspiration biologique

I.6.3. Avantages et inconvénients de l'OI

1. Les avantages

- Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%).
- Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m³).
- Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau.
- Un coût d'investissement relativement bas.
- Une durée de mise en œuvre réduite.[24]
- Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bioélectroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles.
- pH légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibrage de pH du sang généralement trop toxique)
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins [25].

2. Les inconvénients

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

- Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions.
- Nécessité d'un personnel qualifié.
- Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement.
- Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent.
- La perte de cinq litres d'eau pour un litre d'eau osmosée car la membrane doit être continuellement nettoyée.
- L'eau perd tous ses minéraux y compris les minéraux bénéfiques comme certains alcalins, notamment le calcium et le magnésium [26].

I.6.4. Processus de prétraitement et de post-traitement des stations d'OI

1. Prétraitement

- **Prétraitement conventionnel** (Fig.I.14) : habituellement, dans une usine de dessalement de l'eau de mer, le processus de prétraitement conventionnel comprend les étapes suivantes :

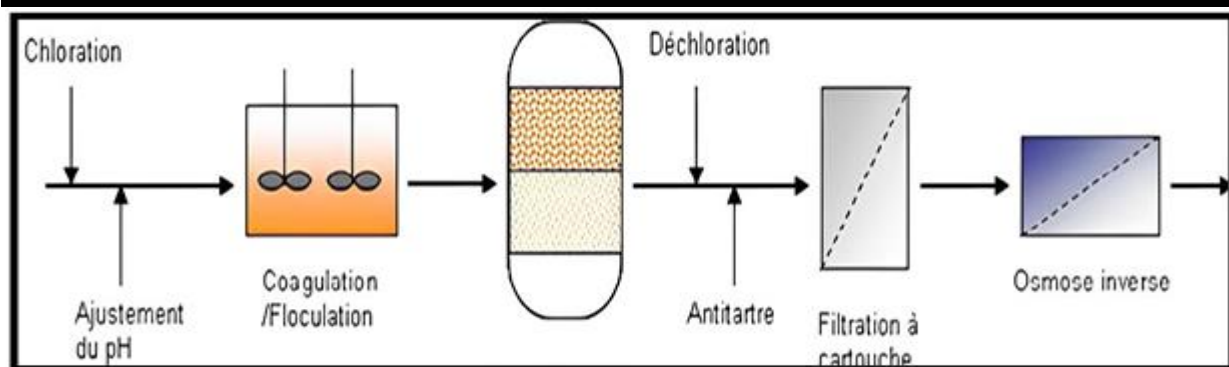


Figure I. 14. Prétraitement conventionnel [27]

- **Préfiltration grossière** : en premier lieu, l'eau subit une filtration grossière pour éliminer les éléments volumineux susceptibles d'endommager les équipements et de réduire l'efficacité globale du processus de traitement.
- **Chloration** : elle vise à désactiver les micro-organismes (principalement les bactéries) ainsi que les micro-algues et les champignons, qui peuvent être pathogènes et entraîner un colmatage significatif des membranes, phénomène appelé biofouling.
- **Ajustement du pH** : l'ajout d'acide, tel que l'acide sulfurique (H_2SO_4), est nécessaire pour prévenir l'entartrage causé par le CaCO_3 .
- **Coagulation et floculation** : la coagulation a pour but de neutraliser les charges primaires afin d'annuler les forces de répulsion, suivie par le piégeage des particules dans les précipités. Cette neutralisation est réalisée par l'ajout de composés d'éléments traces métalliques tels que Al^{3+} et Fe^{3+} . La floculation vise à augmenter les contacts entre les particules en provoquant une différence de la vitesse entre les particules.
- **Décantation** : après la coagulation-floculation, si la densité des floccs formés est supérieure à celle de l'eau, ceux-ci se déposent par décantation.
- **Filtration sur sable mono- ou bicouche** : la filtration sur sable est nécessaire pour éliminer les agglomérats produits lors de la coagulation. Le filtre monocouche est constitué de sable de granulométrie comprise entre 0,4 et 1 mm sur une hauteur de 1 m. Le filtre bicouche est constitué par une couche de 0,7 m de sable surmontée d'une couche de 0,3 m d'anthracite.
- **Déchloration et antitartre** : compte tenu de la grande sensibilité des membranes d'osmose inverse en polyamide, membranes les plus utilisées actuellement, il est indispensable d'assurer une déchloration de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre avant son entrée dans les modules. La déchloration se fait par ajouts de réactifs chimiques tels que le bisulfite de sodium, qui est le

Chapitre I. Généralités

plus utilisé suite à son efficacité et son coût relativement faible, ou par passage sur charbon actif (poudre ou grains).

- **Prévention du tartre** : pour éviter les tartres dans les modules d'osmose inverse, il est conseillé d'injecter dans l'eau brute des inhibiteurs d'entartrage ou antitartres. Les produits utilisés sont : les poly phosphates (efficaces et bon marché mais ils peuvent éventuellement former des dépôts d'orthophosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse). Les polymères carboxyliques efficaces sur la plupart des tartres, ces produits ne posent pas de problèmes pour les rejets. Ils présentent l'inconvénient d'être chers. L'acidification de l'eau brute, en provoquant la décomposition des bicarbonates, est aussi un moyen efficace de prévenir les dépôts de CaCO_3 .

- Filtration sur cartouche est l'étape finale et cruciale du prétraitement conventionnel avant l'osmose inverse (OI). Son rôle principal est de protéger les membranes sensibles d'osmose inverse des particules fines qui pourraient les endommager ou les colmater, prolongeant ainsi leur durée de vie et garantissant l'efficacité du système. Les filtres à cartouche sont conçus avec des seuils de filtration très précis, généralement entre 1 et 5 micromètres (μm). Cela leur permet de retenir les sédiments fins, la silice colloïdale, et d'autres matières en suspension qui n'auraient pas été éliminées par les étapes précédentes [27].

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

• Prétraitement par les procédés membranaires :

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

- Flux de l'osmose inverse significativement accru ;
- Consommation moindre de produits chimiques ;
- Prolongation de la durée de vie des membranes d'osmose inverse ;
- Capacité à fonctionner avec une variété de qualités d'eau d'alimentation ;
- Réduction de la nécessité de désinfection et de nettoyage l'osmose inverse [27].

Chapitre I. Généralités

2. Poste traitement :

Le traitement final a pour objectif principal de rééquilibrer les caractéristiques de l'eau produite en ajustant sa salinité à des niveaux compatibles avec la consommation humaine. Pour ce faire, elle est mélangée à une autre source d'eau potable. Ce processus permet également d'augmenter la dureté et l'alcalinité de l'eau, contribuant ainsi à améliorer sa qualité globale. Des étapes complémentaires peuvent également être nécessaires, notamment l'élimination du bore et la chloration.

Ce traitement final comprend deux étapes essentielles :

- **Ajustement du pH** : L'eau issue de l'osmose inverse est généralement agressive, avec un pH inférieur au pH de saturation. Pour y remédier, une solution alcaline (NaOH) est automatiquement injectée selon le pH mesuré, afin de neutraliser l'eau. Cela permet d'éliminer les effets du CO₂ dissous, garantissant une eau ni agressive ni incrustante, évitant ainsi divers problèmes de corrosion ou de dépôts.
- **Chloration finale** : Bien que les membranes d'osmose inverse éliminent la majorité des micro-organismes tels que bactéries et virus, une désinfection résiduelle reste indispensable. La chloration finale permet de prévenir toute contamination ultérieure ainsi que le développement biologique indésirable dans le réseau de distribution. [28]

I.7. Exigences en qualité d'eau pour les usages industriels clés

I.7.1. Eau d'alimentation de chaudière (circuits vapeur)

L'eau utilisée dans les circuits vapeur (chaudières) doit répondre à des exigences de très haute pureté afin de prévenir les dépôts, la corrosion et les risques d'explosions liés à la vapeur.

Une qualité d'eau insuffisante peut entraîner de graves conséquences, notamment la formation de tartre qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur et peut provoquer une surchauffe et une panne. La corrosion suite à la formation de dépôts de silice peut entraîner la défaillance des composants de la chaudière. La présence de chlorures (Cl⁻) et de sodium (Na⁺), ou plus précisément le chlorure de sodium (NaCl), sont des facteurs connus pour provoquer des fissures de corrosion sous contrainte (CSC) dans certains matériaux, notamment les aciers inoxydables. C'est un phénomène de dégradation très insidieux et dangereux car il peut entraîner la rupture soudaine d'une pièce même sous des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité [29].

C'est pourquoi la qualité de l'eau utilisée pour l'alimentation de la chaudière doit obéir à des normes strictes. La centrale thermique de Koudiet Edraouech possède une chaudière de récupération de chaleur (HRSG) qui exige l'utilisation d'une eau de très grande pureté afin d'éviter des problèmes coûteux et dangereux comme la corrosion, l'entartrage et les dépôts.

Chapitre I. Généralités

Bien qu'il n'existe pas une seule norme "HRSG" universelle, les chaudières de récupération de chaleur tombent sous le coup des normes générales des chaudières à tubes d'eau, et les exigences sont souvent encore plus strictes en raison des cycles combinés et des pressions élevées qu'elles peuvent atteindre.

Les normes européennes applicables à ce type de chaudière sont : NF EN 12952-12 : "Chaudières à tubes d'eau et installations auxiliaires - Partie 12 : Exigences relatives à la qualité de l'eau d'alimentation et de l'eau en chaudière." (1)

Cette norme définit les caractéristiques chimiques de l'eau d'alimentation (l'eau qui entre dans la chaudière) et de l'eau de chaudière (l'eau qui circule à l'intérieur de la chaudière) nécessaires pour garantir un fonctionnement sûr et efficace. Elle fournit également les méthodes de vérification de ces caractéristiques.

La qualité de l'eau pour une HRSG (chaudières de récupération de chaleur ou générateur de vapeur à récupération de Chaleur) est un domaine complexe qui nécessite un contrôle rigoureux de multiples paramètres chimiques, souvent guidé par les normes de la série EN 12952 et les recommandations VGB-S-010-T-00 pour garantir la fiabilité et l'efficacité de l'installation.

Les HRSG, surtout celles à haute pression, exigent une eau de très haute pureté. Les paramètres critiques à surveiller et à contrôler (tableau 3) sont similaires à ceux d'une chaudière conventionnelle, mais avec des exigences souvent plus strictes :

Tableau I. 3. Paramètres clés de la qualité de l'eau pour les HRSG, selon les normes NF EN 12952-12 (1)

Paramètres	Eau d'alimentation (Feed Water)	Eau de Chaudière (Boiler Water)
Conductivité cationique à 25°C	$\leq 0,05 \mu\text{S/cm}$	$\leq 50 \mu\text{S/cm}$
Oxygène dissous (OD)	$\leq 5 \mu\text{g/L}$ (ppb), idéalement $\leq 2 \mu\text{g/L}$ (ppb)	-
pH à 25°C	9.6 à 10.0	9 à 10.5
Silice (SiO_2)	$\leq 10 \mu\text{g/L}$, pour les très haute P $\leq 5 \mu\text{g/L}$	≤ 20 à $50 \mu\text{g/L}$
Sodium (Na^+)	$\leq 2 \mu\text{g/L}$ (ppb), pour les très haute P $\leq 1 \mu\text{g/L}$	≤ 10 à $20 \mu\text{g/L}$
Fe (Fer total)	$\leq 10 \mu\text{g/L}$	-
Cu (Cuivre total)	$\leq 5 \mu\text{g/L}$	-
Dureté (Ca + Mg)	$< 1 \mu\text{g/L}$ (non détectable)	-

Chapitre I. Généralités

ppb : parties par milliard (parts per billion) ; **P** : pression ; Boiler water : eau qui circule à l'intérieur de la chaudière

Au-delà des normes européennes générales, les recommandations VGB sont très largement reconnues et utilisées au niveau international pour la chimie de l'eau et de la vapeur dans les centrales électriques, y compris pour les HRSG (tableau 4). La référence principale est : VGB-S-010-T-00:2011-12.EN : "Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants / Industrial Plants" (Qualité de l'eau d'alimentation, de l'eau de chaudière et de la vapeur pour les centrales électriques / installations industrielles, édition 2011) (2).

Il est important de noter que ces normes VGB résume l'expérience acquise en matière de chimie de l'eau-vapeur et fournit des directives détaillées, non pas des valeurs limites absolues, mais des plages de fonctionnement admissibles pour minimiser la corrosion et optimiser la durée de vie de l'installation. Il couvre toutes les plages de pression appliquées aux chaudières, y compris le fonctionnement à pleine charge et les modes de démarrage.

Tableau I.4. Paramètres de qualité de l'eau pour chaudières HRSG (Haute Pression) basés sur les recommandations VGB-S-010-T-00:2011-12.EN (2)

Paramètres	Eau d'alimentation (Feed Water)	Eau de Chaudière (Boiler Water) ⁸
CE spécifique à 25°C (après dégazage) ¹	Typiquement : $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$	$\leq 50 \mu\text{S/cm}^{10}$
CE cationique à 25°C (après échangeur cationique) ²	Typiquement : $\leq 0,05 \mu\text{S/cm}$	-
pH à 25°C	Typiquement : 9,6 à 10,0 ³ ou 8,8 à 9,2 ⁴	Typiquement: 9,0 à 10,5 ; De 10,5 à 11,5 ⁹ .
OD	Typiquement : $\leq 5 \mu\text{g/L}$, idéalement: $\leq 2 \mu\text{g/L}$	-
SiO ₂	Typiquement : $\leq 10 \mu\text{g/L}$; $\leq 5 \mu\text{g/L}^5$ ou même $\leq 2 \mu\text{g/L}^5$	≤ 20 à $50 \mu\text{g/L}^{11}$
Na ⁺	Typiquement : $\leq 2 \mu\text{g/L}$; $\leq 1 \mu\text{g/L}^6$	Typiquement : ≤ 10 à $20 \mu\text{g/L}^{12}$
Fe total	Typiquement : $\leq 10 \mu\text{g/L}$	-
Cu total	Typiquement : $\leq 5 \mu\text{g/L}$	-
Dureté (Ca + Mg)	Typiquement : $< 1 \mu\text{g/L}^7$	-
Alcalinité (total) ou TAC		Typiquement : Non applicable ¹³ 100 à 400 mg/L en CaCO ₃ ¹⁴

Chapitre I. Généralités

1 : Certaines recommandations peuvent tolérer légèrement plus en présence d'amines, mais pour la conductivité cationique, c'est très strict ; 2 : c'est souvent le critère le plus strict et le plus représentatif de la pureté ionique ; 3 : pour systèmes tout acier/inox ; 4 : Si des alliages de cuivre/laiton sont présents (moins courant dans les HRSG modernes à haute pression) ; 5 : Pour chaudières à très haute pression/supercritiques ; 6 : Pour chaudières à très haute pression/supercritiques ; 7 : Non détectable (Zéro dureté), inférieur à la limite de détection ; 8 : Eau de Chaudière (Boiler Water) est chauffée et transformée en vapeur à l'intérieur du tambour. Sa concentration en impuretés est plus élevée que celle de l'eau d'alimentation en raison de l'évaporation de l'eau pure ; 9 : Peut-être plus élevé pour les chaudières à basse et moyenne pression ; 10 : Pour les HRSG haute pression ; 11 : Pour chaudières à haute pression (à ajuster pour que la silice dans la vapeur reste acceptable) ; 12 : pour les HRSG haute pression ; TAC : Titre Alcalimétrique Complet reflète les ions bicarbonates (HCO_3^-), les ions carbonates (CO_3^{2-}) et les ions hydroxydes (OH^-) dans les eaux très basiques ; 13 : Pour les chaudières à haute pression ; 14 : Pour les chaudières à basse pression.

Chapitre **II**. Matériel et Méthodes

Chapitre II. Matériel et Méthodes

II.1. Présentation de la Centrale de Koudiet Edraouech de la wilaya d'El Taref

La centrale de Koudiet Edraouech est un établissement classé à double vocation (Photo 1). D'une part cette société produit de l'électricité (Sharikat Kahraba Koudiet EDraouch : SKD). L'usine a été raccordée au réseau électrique national le 31 décembre 2024. D'autre part c'est une usine de dessalement de l'eau de mer. C'est ce dernier aspect qui a été pris en considération dans ce travail.

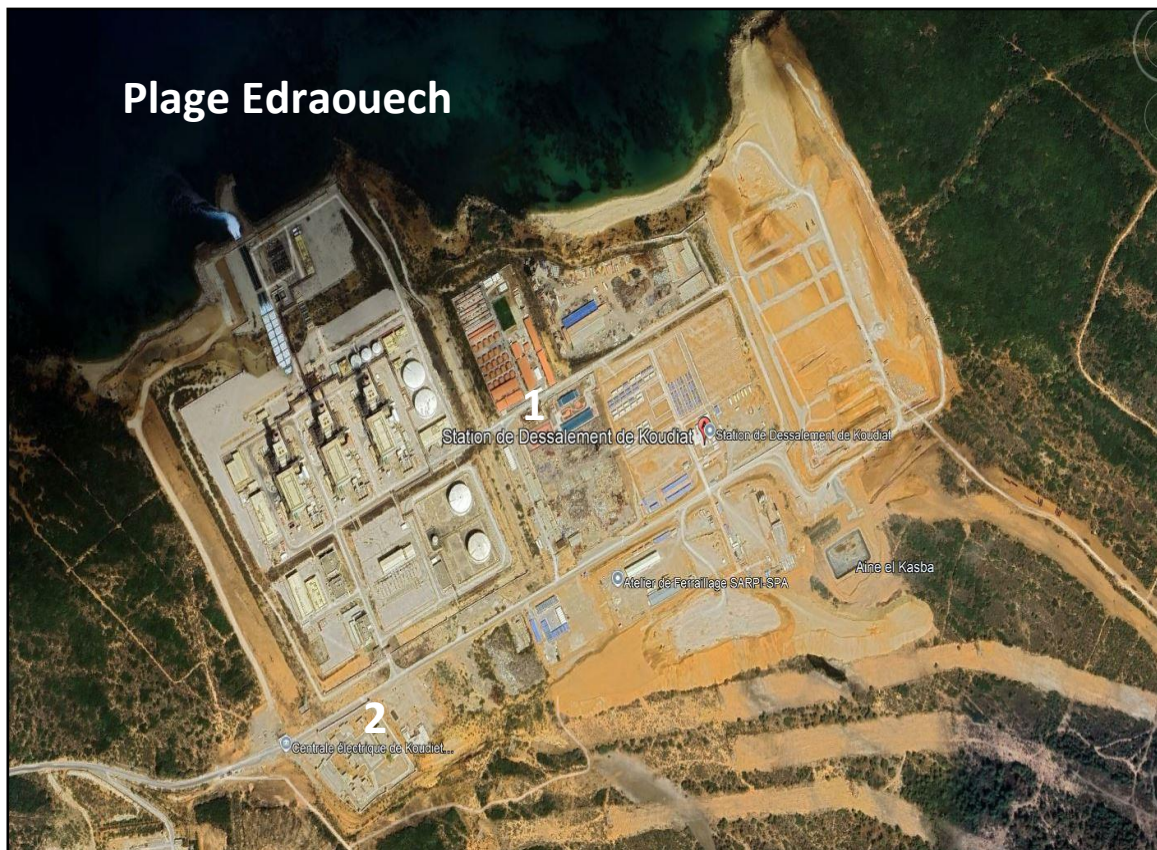


Figure II.1. Stations de dessalement (1) et la centrale thermique (2) de koudiet Edraouech

Le dessalement de l'eau de mer est une stratégie nationale visant à accroître l'utilisation de l'eau dessalée. De nombreuses nouvelles usines de dessalement en cours de construction à travers le pays ont pour objet d'augmenter significativement le pourcentage d'eau dessalée dans l'approvisionnement total en eau potable.

Koudiet edraouech fait partie de ces usines de dessalement. Elle a pour objectif primordial la production d'eau de mer dessalée afin de pallier à la rareté de l'eau douce. Elle possède une capacité de production impressionnante de 300 000 mètres cubes par jour (300 000 m³/jour) d'eau dessalée. Elle est conçue pour répondre aux besoins en eau potable pour plus de 3 millions de personnes réparties dans les wilayas d'Annaba, d'El Tarf, de Guelma et de Skikda.

Chapitre II. Matériel et Méthodes

Sa mise en service et son inauguration ont été menés avec succès le 1er janvier 2025. La première livraison de 60 000 mètres cubes d'eau dessalée était prévue pour le 7 février 2025. Le Président Abdelmadjid Tebboune a officiellement inauguré l'usine le 26 février 2025.

Le processus de dessalement adopté par l'usine est la technologie de l'osmose inverse (OI). D'après les autorités algériennes toutes les usines de dessalement, y compris Koudiet edraouech, ont été construites dans des délais exceptionnellement courts et qu'elles bénéficient d'une expertise 100% algérienne, tout en respectant les normes internationales.

II.2. Situation géographique de la station de dessalement

Implantée sur la frange littorale algérienne, l'usine est localisée dans la commune de Berrihane, sur un petit monticule nommé « Koudiet Edraouech » dont elle porte le nom. Elle est bordée au nord par la mer méditerranée, à l'est par la ville d'El Kala et la commune d'El Taref. Au sud, elle est limitée par la commune de Bouhadjar et à l'ouest, elle est bordée par la commune de Ben M'hidi.

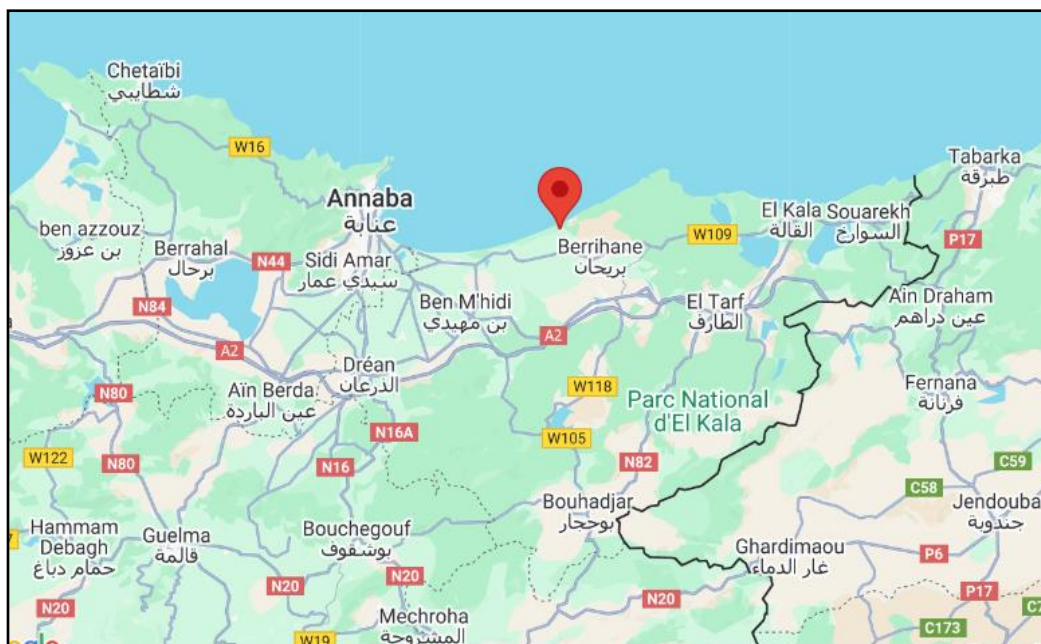


Figure II. 2. Situation géographique de l'usine de dessalement de Koudiet Edraouech

La station est distante de la ville d'Annaba, qui la limite du nord-ouest, d'environ 30 km. Ses coordonnées géographiques sont 36°52'26.89''N, et 08°05'01.96''E.

L'accès au site se fait depuis W 109, qui est une route à deux voies, qui relie Annaba à El Tarf et traverse les agglomérations de Ferdjioua, El Harraba et Berrihane qui sont les plus proches de la centrale [30].

Chapitre II. Matériel et Méthodes

II.3. Prélèvement et Conservation des Échantillons

L'échantillonnage a été effectué de manière hebdomadaire, du 12 mars au 18 mai 2025. Les échantillons d'eau ont été prélevés du réservoir où est stocké le perméat. Ce dernier sera utilisé ultérieurement comme eau d'alimentation des chaudières.

Les échantillons d'eau osmosée prélevée ont été mis dans des contenants en polyéthylène, préalablement nettoyés à l'eau distillé et rincer au moins trois fois avec de l'eau échantillonnée, conformément aux bonnes pratiques d'échantillonnage. Les échantillons sont ensuite conservés, à l'obscurité, dans une glacière à une température de 4 °C, puis congelés à -20 °C jusqu'à analyse.

II.4. Justification du choix des descripteurs ciblés

Les chaudières à haute pression, exigent une eau de très haute pureté. Les principaux paramètres critiques à surveiller et à contrôler pour éviter l'entartrage, la corrosion et les dépôts sont :

- **La dureté (Ca + Mg) :** ces ions sont très problématiques car ils constituent la principale cause de l'entartrage. Ils forment des dépôts (calcaire) sur les surfaces de transfert de chaleur de la chaudière. Ce qui entraîne la réduction du rendement thermique (perte d'énergie), surchauffe locale des tubes (pouvant entraîner des fissures, voire des ruptures), et nécessité des nettoyages chimiques coûteux.
- **Solides Dissous Totaux (SDT) / Conductivité :** l'accumulation de sels dissous dans la chaudière peut entraîner du primage (entraînement de gouttelettes d'eau avec la vapeur, transportant des impuretés dans les turbines ou les systèmes aval) et de la mousse. Les conséquences se traduisent par la corrosion des turbines, dépôts dans les conduites de vapeur, et réduction de la qualité de la vapeur.
- **La silice (SiO₂) :** est un contaminant particulièrement insidieux. À des températures élevées, elle peut se volatiliser avec la vapeur et former des dépôts vitreux très durs sur les aubes (palettes) de turbine, difficiles à éliminer. Ce qui peut avoir comme conséquences la perte de l'efficacité de la turbine, déséquilibre des rotors, et dommages importants.
- **Oxygène Dissous (O₂) :** constitue un agent corrosif majeur pour les métaux ferreux des chaudières. Il provoque des corrosions localisées (piqûres). Ce qui peut provoquer un vieillissement prématuré des tubes, des fuites et des ruptures.

Chapitre II. Matériel et Méthodes

- **Dioxyde de Carbone (CO_2)** : le CO_2 peut se dissoudre dans les condensats pour former de l'acide carbonique, qui est corrosif pour les lignes de retour de condensat. Ce qui peut provoquer la corrosion des tuyauteries.
- **pH** : s'il n'est pas contrôlé peut entraîner la corrosion ou l'entartrage. Ce qui aura pour conséquences, la corrosion acide ou caustique des matériaux de la chaudière.
- **Fer et Cuivre** : ces métaux peuvent former des dépôts dans la chaudière, agissant comme des sites de corrosion ou réduisant le transfert de chaleur. Ils peuvent causer des dépôts et la corrosion.
- **Sodium (Na^+)** : le sodium est un bon indicateur de la pureté de l'eau car il est facilement transporté par la vapeur et peut causer de la corrosion sous contrainte dans la turbine.
- **Carbone Organique Total (COT)** : les matières organiques peuvent se décomposer en acides organiques dans la chaudière, entraînant de la corrosion, ou former des dépôts.
- **Chlorures (Cl^-) et Sulfates (SO_4^{2-})** : ces ions sont très corrosifs, surtout en présence d'oxygène ou sous des dépôts localisés.

Dans cette initiation à la recherche, nous avons pour objet de doser ces divers descripteurs. Malheureusement, les contraintes administratives et les contraintes de terrain ne nous ont pas permis de suivre tous les paramètres pertinents, cités antérieurement.

Nous avons pu faire le suivi que de trois descripteurs : la CE, le pH et la température. Ces derniers ont été mesurés sur terrain.

II.5. Les analyses effectuées in situ (sur terrain)

- **Mesure du pH** : consiste à mesurer la concentration en ion hydrogène (H^+) dans l'eau afin de déterminer son acidité ou son alcalinité. L'appareil utilisé pour mesurer ce paramètre est un stylo de terrain, de la marque Hanna HI98107.



Figure II.3. pH mètre

► **Mesure de la conductivité** : elle reflète la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le siemens ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout est importante, plus la conductivité sera élevée. Le conductimètre utilisé pour mesurer la conductivité est de MW301 PRO EC METER.



Figure II. 4. Conductimètre

Chapitre II. Matériel et Méthodes

► **Mesure de la température** : cette dernière est très liée à la conductivité, plus elle est élevée et plus la conductivité est élevée. Ce descripteur a été mesuré par un thermomètre de la marque lutron TM-917.



Figure II.5. Thermomètre

Chapitre III. Résultats et Discussion

Chapitre III. Résultats et discussion

Les résultats préliminaires relatifs à la qualité physico-chimiques du perméat (eau osmosée) utilisé pour l'alimentation en eau (Feed Water) de la chaudière de la centrale thermique de Koudiet Edraoueche, se présentent comme suit :

III.1. la température (T°C)

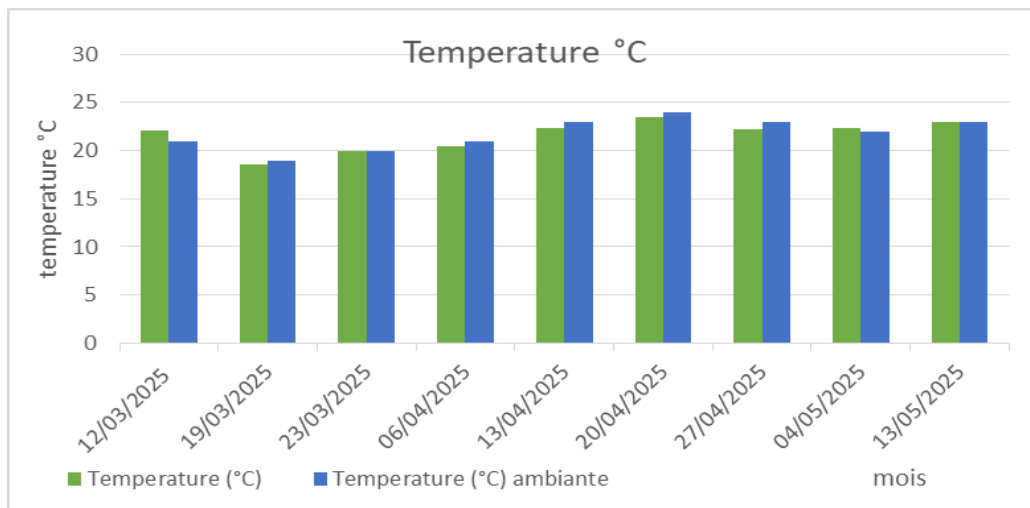


Figure III. 1. Variation de la température du perméat en fonction du temps

D'après la fig III.1, nous remarquons que la température du perméat et celle de l'air ambiant se valent. Ce qui est évident puisque l'eau est stockée dans un réservoir en plein air, et donc sa température s'équilibre naturellement avec celle du milieu ambiant.

III.2. Le pH

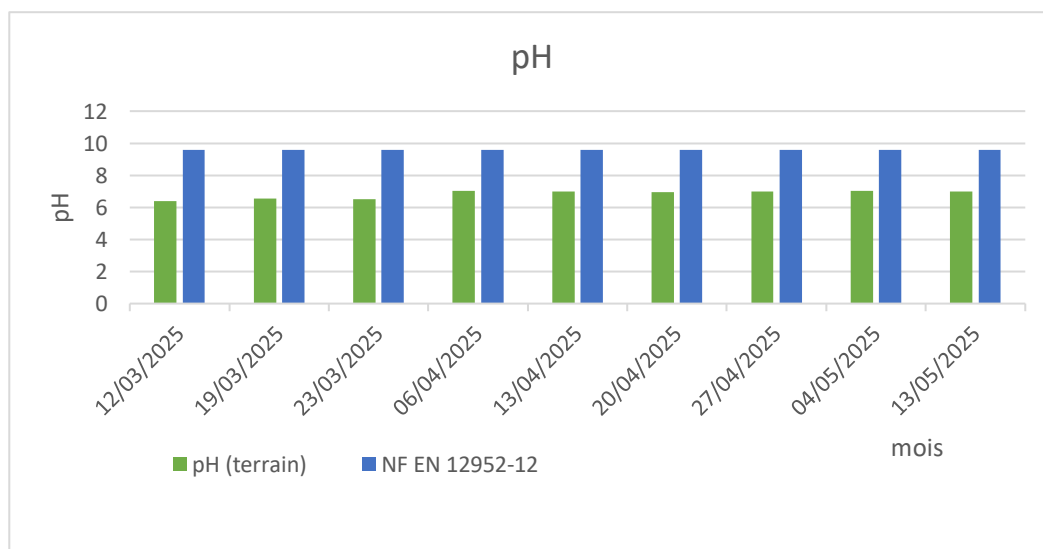


Figure III.2. Variation du pH du perméat en fonction de temps

Les valeurs de pH mesurés in situ (sur terrain) varient d'une valeur minimale de 6.39 à une valeur maximale de 7.03 (Fig.III.2.). Le pH de l'eau osmosée utilisée, comme eau d'alimentation

Chapitre III. Résultats et discussion

de la chaudière (Feed Water), présente un pH bien en dessous de la norme européenne NF EN 12952-12 qui spécifie un intervalle de pH fluctuant entre de 9,6 à 10.

III.3. Conductivité électrique (CE)

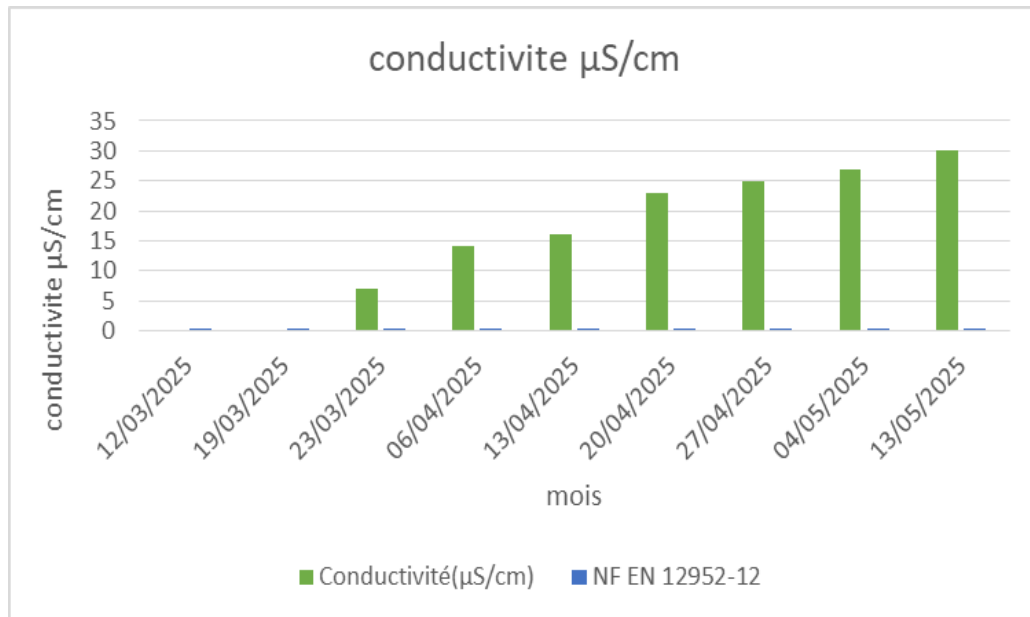


Figure III.3. Variation de la conductivité électrique du perméat en fonction de temps

Selon la fig III.3., nous remarquons que la CE électrique du perméat augmente graduellement au fil du temps et varie de 0 à 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, elle reste dans la plupart des cas bien plus élevée que la norme recommandée (0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Enfin, nous pouvons dire qu'à priori le pH et la CE ne sont pas conformes aux exigences de la norme NF EN 12952-12, qui définit les exigences minimales pour la qualité de l'eau d'alimentation (Feed water) des chaudières à haute pression (HRSG).

Conclusion

Conclusion

Face aux enjeux croissants de la raréfaction de l'eau douce en Algérie, l'osmose inverse s'impose comme une solution technologique performante pour le dessalement de l'eau de mer. Cette étude a permis d'évaluer la qualité physico-chimique du perméat produit par la station de dessalement de la centrale électrique de Koudiet Edraouech (El Tarf), afin d'en déterminer sa conformité pour divers usages industriels critiques tels que l'alimentation des chaudières et des circuits de refroidissement.

Les chaudières haute pression (HRSG), associées souvent aux stations de dessalement pour la production d'énergie et d'eau, comme celles utilisées dans la centrale électrique de Koudiet Edraouech, nécessitent une eau d'alimentation de très grande pureté. La haute qualité de l'eau est absolument primordiale pour éviter des problèmes coûteux et dangereux comme la corrosion, l'entartrage et les dépôts.

La norme européenne NF EN 12952-12 (pour les chaudières à tubes d'eau) fournit des directives précises sur les exigences de qualité de l'eau d'alimentation (Feed Water) et de l'eau circulant à l'intérieur de la chaudière (Boiler Water). Les exigences sont souvent encore plus strictes en raison des cycles combinés et des pressions élevées qu'elles peuvent atteindre.

D'après les résultats préliminaires obtenus dans cette étude, nous pouvons avancer que :

- Le pH acide de l'eau osmosée (Feed Water) pourrait présenter un risque élevé de corrosion s'il n'est pas ajusté à un pH basique (9.6 à 10) afin de maintenir une alcalinité protectrice pour les métaux.
- La CE est le paramètre le plus critique, indiquant la présence d'ions dissous. Sa mesure donne une meilleure indication des impuretés ioniques corrosives. Les mesures obtenues montrent des valeurs très élevées et dépassant largement la norme requise de 0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La qualité de l'eau osmosée produite par la station de dessalement de Koudiet Edraouech pour l'alimentation de la chaudière n'est pas conforme aux limites recommandées par la norme européenne NF EN 12952-12. L'utilisation directe du perméat peut entraîner des risques importants de corrosion, d'entartrage et de dépôts compromettant ainsi, la sécurité et la durée de vie de la chaudière.

Pour être utilisée, l'eau d'alimentation ou perméat devra subir des traitements complémentaires comme :

Conclusion

- Un conditionnement chimique, par ajout de capteurs d'oxygène (par exemple, hydrazine ou hydroquinone) et d'agents alcalinisant (ammoniac ou amines) pour ajuster le pH et contrôler les dernières traces de corrosion.
- Une déminéralisation poussée, généralement, par des lits d'échange d'ions à lits mélangés (résines anioniques et cationiques) ou par électrodéionisation (EDI) pour atteindre une conductivité ultra-faible.

En résumé, la qualité de l'eau pour une chaudière HRSG est un domaine complexe qui nécessite un contrôle rigoureux de multiples paramètres chimiques, souvent guidé par les normes de la série EN 12952 et les recommandations VGB-S-010-T-00 pour garantir la fiabilité et l'efficacité de l'installation.

Pour les perspectives futures, nous pouvons dire que cette étude devra être suivie sur une période plus prolongée et d'autres descripteurs critiques tels que : oxygène dissous, la silice (SiO_2), le sodium (Na^+), le fer total, le cuivre total et la dureté ($\text{Ca}+\text{Mg}$) devons être suivis de manière systémique et maintenus rigoureusement dans les normes requises.

Il est aussi important d'estimer la qualité de l'eau à l'intérieur de la chaudière (Boiler Water) afin d'estimer l'efficacité des traitements complémentaires de l'eau d'alimentation.

Ces mesures sont nécessaires pour garantir un fonctionnement sûr et efficace des chaudières
hautes pression

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Tsiourtis, N. X. (2001). Desalination and the environment. *Desalination*, 141(3), 223–236.
- [2] Hossain, M. F. (2019). Water. *Sustainable Design and Build*, 301–418.
- [3] F. A.Padder, A.Bashir, (2023). Scarcity of water in the twenty-first century: Problems and potential remedies. PT Radja Intercontinental Publishing, medalion journal ,Volumes 4 No.1, E-ISSN: 2986-7754
- [4] Eyl-Mazzega, M., Cassignol, C. (2022). Géopolitique du dessalement d'eau de mer. Ifri. ISBN : 979-10-373-0596-1
- [5] S.Imadalou(2023), Un programme complémentaire est en cours d'exécution : 19 usines de dessalement réceptionnées d'ici à 2024 ,elwatan-dz.com, <https://elwatan-dz.com/un-programme-complementaire-est-en-cours-dexecution-19-usines-de-dessalement-receptionnees-dici-a-2024>
- [6] Mahdi Amine(2024), Eau dessalée : L'Algérie portera sa production à 3,7 millions m3/jour d'ici fin 2024. algerie360 . https://www.algerie360.com/eau-dessalee-lalgerie-portera-sa-production-a-37-millions-m3-jour-dici-fin-2024/#google_vignette
- [7] Arslen A., 2025. « Station de dessalement de l'eau de mer de Koudiet Eddraouche à Berrihane (El Tarf) : Début de la phase des essais techniques ». *Journal El watan*, 1p. <https://elwatan-dz.com/station-de-dessalement-de-leau-de-mer-de-koudiet-eddraouche-a-berrihane-el-tarf-debut-de-la-phase-des-essais-techniques>
- [8] Gaïdi M. F., 2025. « Station de dessalement Koudiet Eddraouche (El Tarf) : Mise en service avant le Ramadhan, selon le PDG de Sonatrach ». *Journal El watan*, 1p. <https://elwatan-dz.com/station-de-dessalement-koudiet-eddraouche-el-tarf-mise-en-service-avant-le-ramadhan-selon-le-pdg-de-sonatrach>
- [9] Ncube r. & Inambao F. L., 2021. “ Experimental data analysis for a reverse osmosis desalination plant ”. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, Vol. 11, Issue 3, 421-440 p.
- [10] J. Mark Systems. (2024). *The Critical Role of Reverse Osmosis (RO) Units in Boiler Feed Water Treatment*. J. Mark Systems A WTRBOX company , <https://www.jmarksystems.com/blog/the-critical-role-of-reverse-osmosis-ro-units-in-boiler-feed-water-treatment>

Références Bibliographiques

- [11] O.Van Cleemput, L.Saso, (2017). Manual on Scientific Communication for Postgraduate Students and Young Researchers in Technical, Natural and Life Sciences: A practical guide for the preparation of theses, papers, posters and other scientific documents. InTechOpen.
- [12] Magara, Y. (2002). *Industrial water*. In *Water quality and standards – Vol. I*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO.ISBN 978-1-84826-447-2
- [13] Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., & Alcamo, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: A global simulation study. *Global Environmental Change*, 23(1), 144–156.
- [14] **U.S. Geological Survey (USGS)**. (2015). *Estimated Use of Water in the United States in 2015*. U.S. Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/circ/1441/circ1441.pdf>
- [15] N. Manivasakam(2011), *Industrial water quality requirements*. Chemical Publishing Company. ISBN-10 : 0820600040 ISBN-13 : 978-0820600048
- [16] Patil, P.N., Sawant, D.V., & Deshmukh, R.N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water – A review. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 1194–1207
- [17] Proner, M. C., de Meneses, A. C., Veiga, A. A., Schlüter, H., Oliveira, D. de, & Luccio, M. D. (2021). *Industrial Cooling Systems and Antibiofouling Strategies: A Comprehensive Review*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(8), 3278–3294.
- [18] Youssef, P. G., AL-Dadah, R. K., & Mahmoud, S. M. (2014). Comparative Analysis of Desalination Technologies. *Energy Procedia*, 61, 2604–2607.
- [19] Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A Review of the Water Desalination Technologies. *Applied Sciences*, 11(2), 670.
- [20] Amoura C. , Toumi R. (2020), Dessalement de l’eau de mer par osmose inverse, Université Badji mokhtar , Faculté : Sciences de l’Ingéniorat, Département : Génie des procédés, Domaine : Science et technologie Filière : Génie des procédés ,Spécialité : Génie des procédés de l’environnement
- [21] Bonnin.J, *Hydraulique urbaine*. Edition: Eyrolles. 228p, 1986

Références Bibliographiques

- [22] Nisan S. 2008. A Comprehensive economic evaluation of desalination systems, using renewable, fossil fuelled based and nuclear energies, including external environmental costs, Desalination
- [23] Wang, Y.-N., & Wang, R. (2019). Reverse Osmosis Membrane Separation Technology. Membrane Separation Principles and Applications, 1–45.
- [24] F.TATA-DUCRU (2009) ,Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes. Agence Française de Développement. 5, rue Roland Barthes, PARIS. FRANCE.
- [25] C. TANSAKUL (2009):« Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT, université de TOULOUSE France.
- [26] Khenchouche I., Khat M. (2020). « L'optimisation de la géométrie de la membrane dans le processus de l'osmose inverse ». Faculté de Génie des Procédés, Université Salah Boubnider-Constantine.
- [27] M. CHEMIRIK, (2024). Dimensionnement de la chaîne de prétraitement de la station dessalement Beni Saf Water Company (W. d'Aïn Témouchent) École Nationale Supérieure d'Hydraulique "Le Mujahid Abdellah Arbaoui"]. Option : Réutilisation des Eaux Non Conventionnelles (RENC).
- [28] Jean-Pierre Méricq (2009) : « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT de l'université de TOULOUSE Franc
- [29] Panigrahi, B. S., & Ganapathysubramanian, K. (2015). Boiler Water Treatment. Mineral Scales and Deposits, 639–655. doi:10.1016/b978-0-444-63228-9.00026-7
- [30] Zemmouri,A(2014). Effets de la qualité de l'eau sur les performances de la centrale thermique de Koudiet Ed Draouch, Université Badji Mokhtar. Faculté des sciences de l'ingénierat.Département de génie mécanique. spécialité : énergétique et environnement .Mémoire master

Références Bibliographiques

Sites web

<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1295212/chaudieres-a-tubes-deau-et-installations-auxiliaires-partie-12-exigences-re/fa049152/629>

VGBE-010-00-2023-08-EN: Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants/Industrial Plants - vgbe.energy shop

Annexes

Annexe 1.



Figure A.1. Réservoir de stockage de l'eau osmosée

Annexe 2.



Figure A.2. Mesure de la conductivité, la température et le pH du perméat in situ

Annexe 3.

Tableau A.1. Variation de la température en fonction du temps

Dates de prélèvements	T°C du perméat	T°C de l'air ambiant
12/03/2025	22,1	21
19/03/2025	18,6	19
23/03/2025	20	20
06/04/2025	20,4	21
13/04/2025	22,4	23
20/04/2025	23,5	24
27/04/2025	22,2	23
04/05/2025	22,3	22
13/05/2025	23	23

Annexe 4.

Tableau A.2. Variation du pH en fonction du temps

Dates de prélèvements	pH (in situ)	Norme NF EN 12952-12
12/03/2025	6,39	9,6
19/03/2025	6,53	9,6
23/03/2025	6,49	9,6
06/04/2025	7,01	9,6
13/04/2025	6,97	9,6
20/04/2025	6,95	9,6
27/04/2025	6,99	9,6
04/05/2025	7,03	9,6

Annexe 5.

Tableau A.3. Variation de la conductivité électrique en fonction du temps

Date du prélèvement	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NF EN 12952-12
12/03/2025	0	0,05
19/03/2025	0	0,05
23/03/2025	7	0,05
06/04/2025	14	0,05
13/04/2025	16	0,05
20/04/2025	23	0,05
27/04/2025	25	0,05
04/05/2025	27	0,05
13/05/2025	30	0,05

Résumés

Face à la raréfaction de l'eau douce en Algérie, aggravée par la pollution, la démographie et le changement climatique, le dessalement de l'eau de mer devient une solution stratégique, notamment dans l'industrie où l'eau joue un rôle essentiel.

Ce travail évalue la qualité physico-chimique du perméat produit par la station de dessalement de Koudiet Edraouech (El Tarf), destiné à des usages industriels, principalement l'alimentation en eau des chaudières. Des échantillons d'eau osmosée ont été prélevés de façon hebdomadaire du mois de mars au mois de mai 2025. Trois descripteurs ont été suivis : le pH, la conductivité et la température.

Les résultats préliminaires obtenus montrent que le pH de l'eau d'alimentation est dans la plupart des cas acide ce qui n'est pas conforme à la norme (9.6 à 10). La conductivité, initialement nulle, a fortement augmenté au fil du temps pour atteindre 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bien au-delà du seuil maximal de 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fixé par la norme. Quant à la température, elle varie de 18 et 23 °C et reste proche de celle de l'air ambiant, sans impact critique sur le perméat.

Enfin l'eau produite par osmose inverse pour l'alimentation de la chaudière haute pression de la centrale n'obéit pas aux recommandations de la norme NFEN12952-12. Pour être utilisée, elle devra subir un traitement complémentaire (conditionnement chimique et une déminéralisation poussée).

Mots-clés : dessalement de l'eau de mer, osmose inverse, chaudière HRSG, Eau d'alimentation, qualité physico-chimique, Koudiet Edraouech- El Tarf.

Faced with the scarcity of freshwater in Algeria, exacerbated by pollution, demographics, and climate change, seawater desalination is becoming a strategic solution, particularly in industries where water plays an essential role.

This work evaluates the physicochemical quality of the permeate produced by the Koudiet Edraouech desalination plant (El Tarf), intended for industrial uses, primarily as boiler feedwater. Samples of reverse osmosis water were collected weekly from March to May 2025. Three descriptors were monitored: pH, conductivity, and temperature.

The preliminary results show that the pH of the feedwater is, in most cases, acidic, which does not conform to the standard (9.6 to 10). Conductivity, initially zero, increased sharply over time to reach 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, well beyond the maximum threshold of 0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ set by the standard. As for temperature, it varies between 18 and 23 °C and remains close to ambient air temperature, without critical impact on the permeate.

Finally, the water produced by reverse osmosis for feeding the high-pressure boiler of the power plant does not comply with the recommendations of the NFEN12952-12 standard. To be used, it will require supplementary treatment (chemical conditioning and advanced demineralization).

Keywords: seawater desalination, reverse osmosis, HRSG boiler, feed water, physicochemical quality, Koudiet Edraouech - El Tarf.

تواجه الجزائر ندرة متزايدة في المياه العذبة، تفاقمته بسبب التلوث والنمو الديموغرافي وتغير المناخ. لهذا السبب، أصبحت تحلية مياه البحر حلاً استراتيجيًا، خاصة في الصناعات التي تلعب فيها المياه دورًا حيويًا. يقوم هذا العمل بتقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الناتجة من محطة تحلية مياه كودية الدراوش (الطارف)، المخصصة للاستخدامات الصناعية، وبشكل أساسي لتغذية الغلايات. تم جمع عينات من مياه التناضح العكسي أسبوعيًا من مارس إلى مايو 2025. وتمت مراقبة ثلاثة مؤشرات رئيسية : الموصلية الكهربائية، الرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة. أظهرت النتائج الأولية أن الرقم الهيدروجيني لمياه التغذية في معظم الحالات حمضي، وهو لا يتوافق مع المعيار المحدد (9.6 إلى 10). أما الموصلية الكهربائية، التي كانت صفرًا في البداية، فقد ارتفعت بشكل حاد بمرور الوقت لتصل إلى 30 ميكرو سيمنز/سم، متجاوزة بكثير الحد الأقصى البالغ 0.05 ميكرو سيمنز/سم الذي حدده المعيار. وبالنسبة لدرجة الحرارة، فقد تراوحت بين 18 و 23 درجة مئوية، وبقيت قريبة من درجة حرارة الهواء المحيط، دون تأثير حرج على المياه الناتجة. لاستخدامها، في الختام، فإن المياه المنتجة بتقنية التناضح العكسي لتغذية الغلاية عالية الضغط في المحطة لا تتوافق مع توصيات المعيار (NFEN12952-1). ستحتاج إلى معالجة إضافية (معالجة كيميائية وإزالة أملاح متقدمة).

الكلمات المفتاحية : تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، غلاية عالية الضغط، الجودة الفيزيائية والكيميائية، كودية الدراوش – الطارف.