



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

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Académique

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Présenté par :

zekri azzouzi

&

Badjillali Mohammed zine el abidine

Thème :

***Étude comparative de la maintenance appliquée dans les
stations de déminéralisation de ville d'Ouargla cas des
stations : Gharbouz, Ziaina et Bamandil***

Soutenu publiquement le : 07/06/2026

Devant le jury de :

Dr. Khireddine Abdelaziz	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
Dr. Bentaleb Fayçal	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
Mr. Mebarki Abdelyamine	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année universitaire : 2025 - 2026



الإهداء

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل، فله الحمد والشكر على نعمه التي لا تُحصى.

أهدي ثمرة هذا الجهد إلى والديّ العزيزين، اللذين كانا سندني في مسيرتي العلمية، وإلى أمي الغالية وأبي الكريم، تقديراً
لنضحياتهما، ودعواتهما الصادقة، وتشجيعهما المتواصل، فجزاهما الله عني خير الجزاء.

كما أهدي هذا العمل إلى جميع عمال مؤسسة **الجزائرية للمياه**، عرفاناً بجهودهم وتقانيهم في أداء مهامهم وخدمة المرفق
العمومي.

وإلى أصدقائي وزملائي الذين رافقوني خلال هذه المسيرة، وشاركوا معي لحظات التعب والاجتهاد، وكانوا مصدر دعم
وتشجيع.

وإلى كل من ساندني معنوياً ونفسياً، وقدم لي كلمة طيبة أو نصيحة نافعة أو دعوة صادقة أسهمت في مواصلة هذا الطريق.

وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل المتواضع.

أهديكم جميعاً ثمرة جهدي، راجية أن يكون فيه النفع والفائدة.





الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل المتواضع

أهدي ثمرة جهدي هذا إلى أعز الناس على قلبي، إلى والديّ الكريمين، اللذين كانا مصدر العطاء والتضحية، واللذين لم يبخلا عليّ بالدعم والتشجيع والدعاء طوال مسيرتي الدراسية، حفظهما الله وأطال في عمرهما

وإلى أفراد أسرتي الكريمة، الذين كانوا سنداً لي في مختلف مراحل حياتي، فكانوا خير عون وخير رفيق

وإلى جميع عمال مؤسسة الجزائرية للمياه، تقديراً لجهودهم المبذولة في خدمة المواطن وضمان توفير هذه النعمة الحيوية

وإلى أصدقائي وزملائي الذين شاركوني مشوار الدراسة، ووقفوا إلى جانبي في أوقات التعب والاجتهاد، فكانوا خير معين وخير رفقة

وإلى كل من قدّم لي كلمة تشجيع أو نصيحة صادقة أو دعماً معنوياً ونفسياً أسهم في إنجاز هذا العمل

وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في نجاحي ووصولي إلى هذه المرحلة

أهدي هذا العمل المتواضع راجياً من الله أن يجعله نافعاً ومفيداً

والحمد لله رب العالمين



Sommaire

الإهداء.....	iii
Sommaire	iv
liste des figures.....	vi
liste des tableaux	viii
Introduction générale	x
Chapitre I : Les techniques de déminéralisation des eaux	3
I.1 Introduction	4
I.2 Techniques de déminéralisation	4
I.2.1 Échange d'ions	4
I.2.2 Microfiltration	6
I.2.3 Ultrafiltration	6
I.2.4 Nanofiltration	7
I.2.5 Électrodialyse (ED)	8
I.2.6 Osmose inverse	10
I.2.7 Phénomène de colmatage	13
I.2.8 Nettoyage des membranes	15
I.3 Conclusion.....	18
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....	19
II.1. Introduction	20
II.2. Généralités sur la zone d'étude	20
II.2.1. Situation géographique	20
II.2.2. Emplacement	21
II.2.3. Climatologie	22
II.2.4 Hydrographie	24
II.2.5 Zones basses (chotts et sebkhas).....	24
II.2.6. Aspect géologique.....	25
II.2.7. Hydrogéologie et ressources en eau	26
II.2.8. Situation démographique.....	27
II.2.9 Alimentation en eau potable et assainissement	28
II.3 Description de la filière de traitement	28
II.3.1. Station de déminéralisation de Gharbouz.....	28

II.3.2. Station de déminéralisation de Ziaina	38
II.3.3. Station de déminéralisation de Bamandil	39
II.4. Conclusion	40
Chapitre III : Résultats et discussions	42
III.1 Introduction.....	43
III.2 Traitement et exploitation des résultats	43
III.3 La station de Bamandil	43
III.3.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt	44
III.3.2 Interprétation de la courbe.....	46
III.3.4 Récapitulatif	47
III.3.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A.....	47
III. 3.5 Calcul indicateurs de maintenance dans la station de Bamandil	48
III.4 La station de Gharbouz.....	50
III.4.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt	50
III.4.2 Interprétation de la courbe.....	52
III.4.3 Récapitulatif	52
III.4.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A.....	53
III.4.5 Calcul et analyse des indicateurs de maintenance	55
III.5 La station de Ziaina	56
III.5.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt	56
III.5.2 Interprétation de la courbe.....	58
III.5.3 Récapitulatif	58
III.5.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A.....	59
III.5.5 Calcul et analyse des indicateurs de maintenance	60
III.6 Analyse comparative	61
III.7 Conclusion	62
III.8 Recommandations	63
Conclusion Générale.....	65
Références bibliographiques	66

Liste des figures

Figure I.1 : Système d'échangeur d'ions	6
Figure I.2 : Principe de l'ultrafiltration	7
Figure I.3 : Système industriel de nanofiltration	8
Figure I.4 : Principe de l'électrodialyse	9
Figure I.5 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	10
Figure I.6 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse	11
Figure I.7 : Pompe haute pression.....	12
Figure I.8 : Phénomène de colmatage sur membrane d'osmose inverse	13
Figure I.9 : Rétrolavage d'un module membranaire à l'aide	16
Figure I.10 : Systèmes et équipements de Nettoyage chimique en place (CIP)	17
Figure II.1 : Situation générale.....	20
Figure II.2 : Carte de situation de la ville d'Ouargla	21
Figure II.3 : Variation de la précipitation moyenne annuelle à Ouargla	22
Figure II.4 : Variation de l'humidité moyenne mensuelle à Ouargla	23
Figure II.5 : Variation de l'évaporation moyenne annuelle à Ouargla	23
Figure II.6 : Variation de la vitesse moyenne mensuelle de vent à Ouargla	24
Figure II.7 : Sebkhats et chotts d'Ouargla : (a) Sebkhats Safioune, (b) Chott Ain Beida et (c) Chott Oum Er-Raneb	25
Figure II.8 : Relief géologique de la région d'Ouargla	26
Figure II.9 : Les nappes de complexe terminal et continental intercalaire	26
Figure II.10 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara	27
Figure II.11 : Schéma synoptique de la station de GHARBOUZ	29
Figure II.12 : Complexe de GHARBOUZ en 3D.....	31
Figure II.13 : Ligne de filtre à sable.	32
Figure II.14 : La pompe de gavage.....	32
Figure II.15 : Les filtres à cartouches	33
Figure II.16 : Unité d'osmose inverse.	33
Figure II.17 : Pompe haute pression.	34
Figure II.18 : Pompe injection d'antitartre (anti scalant).	34
Figure II.19 : Débitmètre électromagnétique.	35
Figure II.20 : Multi paramètre (pH, conductivité, TDS, salinité).	36
Figure II.21 : Bâtiment de traitement à la station de GHARBOUZ.	36

Figure II.22 : Bâtiment de chloration à la station de GHARBOUZ.	37
Figure II.23 : Bâtiment de Laboratoire d'analyse à la station de GHARBOUZ.	37
Figure II.24 : Bâtiment d'Atelier d'entretien à la station de GHARBOUZ.	38
Figure II.25 : Bâtiment Locale d'énergie à la station de GHARBOUZ.	38
Figure II.26 : Plan de localisation des Neuf stations avec les forages d'alimentation	41
Figure II.27 : Courbe la méthode ABC représente.....	45
Figure III.1 : Représentation le classement courbe ABC	46
Figure III.2 : Érosion la turbine due au phénomène de cavitation.	47
Figure III.3 : Vue du joint d'étanchéité sur la flasque.	48
Figure III.4 : Courbe la méthode ABC représente le nombre	51
Figure III.5 : Représentation le classement courbe ABC	52
Figure III.6 : Corrosion et érosion du corps de la pompe dues	53
Figure III.7 : Érosion d'une partie de l'arbre de la pompe.....	54
Figure III.8 : Dégâts matériels causés par le phénomène de cavitation sur une turbine.	54
Figure III.9 : Courbe la méthode ABC représente le nombre	57
Figure III.10 : Représentation le classement courbe ABC	58
Figure III.11 : Comparaison entre un roulement sain.....	59
Figure III.12 : Flambage ou déformation résiduelle de l'arbre	60
Figure III.13 : Grillage des bobinages du moteur électrique	60
Figure III.14 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système	61

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Résines cationiques fortes	5
Tableau I.2 : Echangeurs anioniques	5
Tableau III.1 : Équipements en fonction du temps d'arrêt.....	44
Tableau III.2 : Cumul des temps d'arrêt et pourcentages.....	44
Tableau III.3 : Répartition des classes en fonction ratio de discrimination.....	45
Tableau III.4 : Services de maintenance en fonction du nombre de pannes.....	48
Tableau III.5 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système	49
Tableau III.6 : Equipements en fonction temps d'arrêt.....	50
Tableau III.7 : Cumulation de temps d'arrêt des équipements en fonction de range.....	51
Tableau III.8 : Services de maintenance en fonction du nombre de pannes.....	55
Tableau III.9 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système	55
Tableau III.10 : Equipements en fonction temps d'arrêt.....	56
Tableau III.11 : Cumulation de temps d'arrêt des équipements en fonction de range	56
Tableau III. 12 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système.....	72
Tableau III. 13 : Synthèse comparative des indicateurs de fiabilité	74

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie, et plus particulièrement la région d'Ouargla, est confrontée à un stress hydrique sévère, accompagné d'une minéralisation élevée des eaux souterraines dont la teneur en sels atteint environ 3 g/L, engendrant ainsi des défis techniques et sanitaires considérables.

Afin de remédier à cette problématique, les autorités ont entrepris la réalisation de stations de déminéralisation et de traitement des eaux — telles que les stations de Bamandil, Gharbouz et Ziaina — en recourant à la technique de l'osmose inverse, dans le but de garantir un approvisionnement en eau potable conforme aux besoins de la population.

Dans quelle mesure l'application des techniques de maintenance des équipements (à travers l'utilisation du diagramme de Pareto ABC et des indicateurs MTBF/MTTR) peuvent-elles contribuer, à travers une étude comparative, à évaluer l'efficacité opérationnelle des trois stations de déminéralisation (Bamandil, Gharbouz et Ziaina) dans la région d'Ouargla ?

Et quels sont les équipements critiques qui pénalisent le plus la disponibilité de chacune de ces stations ?

Chapitre I :

Les techniques de déminéralisation des eaux

I.1 Introduction

La gestion des ressources en eau représente un enjeu majeur à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions arides et semi-arides où la disponibilité de l'eau douce est limitée. Dans ce contexte, l'Algérie fait face à un stress hydrique croissant en raison de la faible pluviométrie, de l'augmentation de la demande en eau et du développement industriel.[1]

Afin de répondre à ces défis, plusieurs techniques de traitement ont été développées, notamment celles visant à améliorer la qualité de l'eau en réduisant sa teneur en sels dissous. La déminéralisation de l'eau consiste précisément à éliminer les ions minéraux tels que les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-}), responsables de la salinité et de la dureté.

Les procédés de déminéralisation reposent sur différents principes physiques, chimiques et électrochimiques. Parmi les plus utilisés, on distingue les techniques d'échange d'ions, les procédés membranaires (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) ainsi que l'électrodialyse.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales techniques de déminéralisation, leurs principes de fonctionnement, leurs domaines d'application.

I.2 Techniques de déminéralisation

I.2.1 Échange d'ions

a. Définition

L'échange d'ions est un procédé physico-chimique qui consiste à remplacer les ions présents dans une solution par d'autres ions de même charge, grâce à une résine échangeuse d'ions insoluble.

Les résines sont généralement des polymères synthétiques contenant des groupes fonctionnels capables de fixer sélectivement les ions.

b. Principe de fonctionnement

Le principe repose sur une réaction réversible où :

- les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+}) sont échangés contre des ions Na^+ ou H^+ ;
- les anions (Cl^- , SO_4^{2-}) sont échangés contre des ions OH^- .

c. Types d'échangeurs

- **Échangeurs cationiques** : élimination des cations ;
- **Échangeurs anioniques** : élimination des anions.

Tableau I.1 : Résines cationiques fortes [2].

Résine	Cations fixes	Cations remplace	Utilisation	Régénération
Sous forme sodium (R- Na ⁺)	Alcano-terreux Mg ²⁺ ,Ca ²⁺	Sodium Na ⁺	Adoucissement par permutation sodique	Sel de sodium : chlorure de sodium
Sous forme hydrogène (R-H ⁺)	Tous les cations	Hydrogène H ⁺	Déminéralisation totale	Acide chlorhydrique, acide sulfurique (parfois)

d. Applications

- Adoucissement de l'eau ;
- Déminéralisation totale ;
- Traitement des eaux industrielles.

e. Avantages et limites**Avantages :**

- Haute efficacité ;
- Bonne qualité d'eau obtenue.

Limites :

- Nécessité de régénération chimique ;
- Production de rejets.

Tableau I. 2 : Echangeurs anioniques [2].

Résine	Cations fixes	Utilisation	Régénération
Sous forme R-H ⁺	Anions	Traitement de déminéralisation totale en aval d'un échangeur cationique fortement acide	Soude caustique NaOH
Sous forme Cl ⁻	Nitrates (NO ₃ ⁻)	Dénitratation	NaCl



Figure I. 1 : Système d'échangeur d'ions [2].

I.2.2 Microfiltration

La microfiltration est un procédé membranaire permettant la séparation des particules en suspension grâce à des membranes dont les pores sont compris entre 0,1 et 10 μm .

Caractéristiques :

- Retient : bactéries, matières en suspension ;
- Ne retient pas : sels dissous.

Avantages :

- Faible pression (< 3 bars) ;
- Coût énergétique réduit.

Limites :

- Inefficace pour la déminéralisation complète.

I.2.3 Ultrafiltration

L'ultrafiltration (UF) utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm.

Ces membranes permettent de séparer les composants en solution selon leur taille, en retenant les macromolécules tout en laissant passer l'eau et les sels dissous.

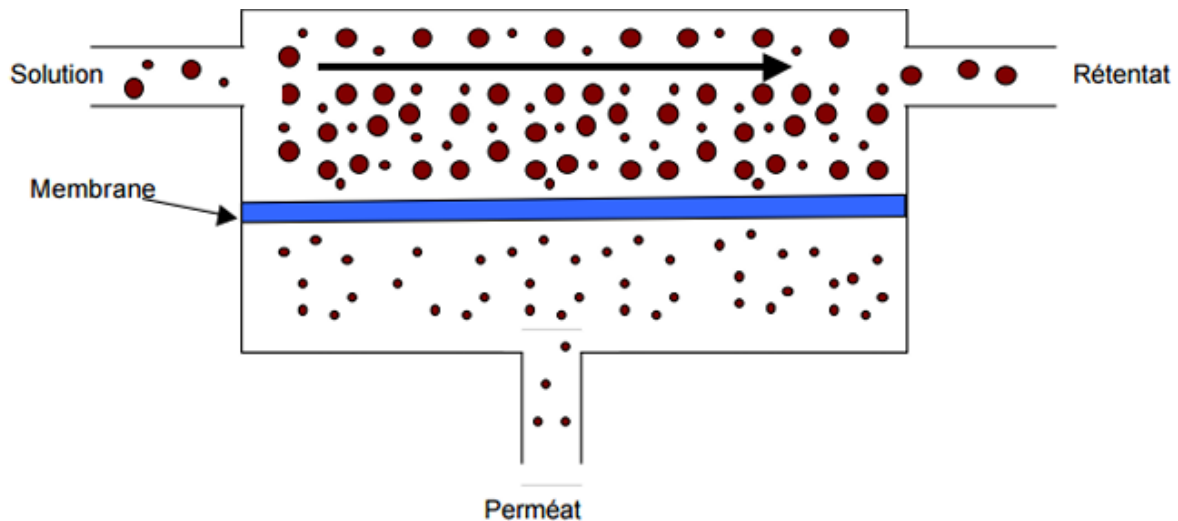


Figure I. 2 : Principe de l'ultrafiltration [3].

Principe :

- Retient :
 - Macromolécules (polymères, protéines) ;
 - Colloïdes.
- Laisse passer :
 - Petites molécules comme l'eau et les sels dissous ;
- Les mécanismes de filtration se basent principalement sur la taille des pores et la masse molaire des solutés [3].

Applications :

- Prétraitement avant osmose inverse ;
- Traitement des eaux industrielles (électronique, alimentaire, etc.) ;
- Élimination des macromolécules dans les effluents domestiques, industriels ou médicaux.

Limites :

- N'élimine pas les sels dissous ni les petites molécules

I.2.4 Nanofiltration

La nanofiltration (NF) se situe entre l'ultrafiltration (UF) et l'osmose inverse (OI). Cette technique utilise des membranes semi-perméables capables de séparer sélectivement les composants en solution en fonction de leur taille et de leur charge, correspondant à l'échelle nanométrique ($\approx 10 \text{ \AA}$).



Figure I. 3 : Système industriel de nanofiltration [3].

Principe :

- Les mécanismes de transfert sont intermédiaires entre ceux de l'ultrafiltration et de l'osmose inverse ;
- Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200–250 g/mol ne sont généralement pas retenus ;
- Les sels ionisés multivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à 250 g/mol sont fortement retenus ;
- Pour les macromolécules, la masse molaire est exprimée en daltons (1 Da = 1 g/mol).

Applications :

- Adoucissement de l'eau ;
- Réduction de la dureté ;
- Traitement des eaux contenant des composés organiques de masse molaire élevée.

Avantages :

- Consommation énergétique modérée par rapport à l'osmose inverse ;
- Sélectivité élevée pour les ions multivalents et les macromolécules.

I.2.5 Électrodialyse (ED)

L'électrodialyse est un procédé électrochimique basé sur la migration des ions sous l'effet d'un champ électrique.

Elle utilise un électrodialyseur composé de nombreux compartiments séparés par des membranes cationiques et anioniques alternées.

Une électrode est placée à chaque extrémité pour assurer le passage du courant. Cette configuration crée une alternance de compartiments de dilution (réduction de la concentration en sels) et de concentration (augmentation de la concentration en sels).

Les substances non ionisées ne sont pas affectées, car le courant électrique agit uniquement sur les ions.

Principe

- Les cations migrent vers la cathode, en traversant les membranes cationiques ;
- Les anions migrent vers l'anode, en traversant les membranes anioniques ;
- Les membranes sélectives assurent la séparation des ions, créant des compartiments alternés de dilution et de concentration ;
- Le rendement d'élimination des sels est d'environ 45 % par passe, nécessitant souvent plusieurs cycles pour atteindre la déminéralisation souhaitée ;
- Les mécanismes de migration ionique dépendent de la concentration de la solution, du courant appliqué et de la nature des membranes [4].

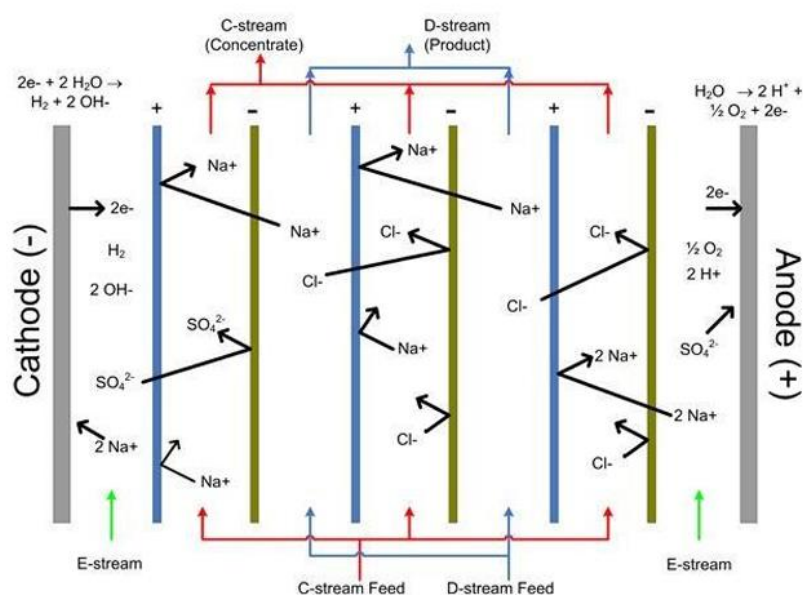


Figure I. 4 : Principe de l'électrodialyse [4].

Applications

- **Dessalement des eaux saumâtres** : Réduction de la teneur en sels pour rendre l'eau potable ou utilisable industriellement.
- **Traitement industriel** :
 - Concentration des bains en galvanoplastie ;
 - Traitement des effluents pour récupération et réutilisation des sels ;
 - Préparation de solutions chimiques spécifiques (industrie alimentaire, électronique, chimie fine).

- **Minéralisation partielle** : Augmentation contrôlée de la concentration en ions dans certaines solutions selon les besoins industriels.

Limites

- Moins efficace pour les eaux très concentrées, car la résistance ohmique élevée limite le passage du courant ;
- Nécessité de rester en dessous des courants limites pour éviter la formation de composés parasites sur les membranes ;
- La concentration de la solution doit être adaptée pour éviter la cristallisation des sels, qui pourrait endommager le système ;
- Le rendement partiel par passe nécessite plusieurs cycles pour obtenir la déminéralisation complète.

I.2.6 Osmose inverse

a. Principe de l'osmose inverse

L'osmose inverse peut être définie comme étant un procédé de séparation en phase liquide par perméabilité à travers une membrane permsélective sous l'action d'un gradient de pression.

Une membrane permsélective est une barrière qui permet certains transferts de masse entre deux milieux qu'elle sépare et qui en interdit d'autres.

Considérons un système à deux compartiments séparés par une membrane permsélective et contenant deux solutions de concentrations différentes.

Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. L'osmose inverse est largement appliquée au dessalement d'eau [5].

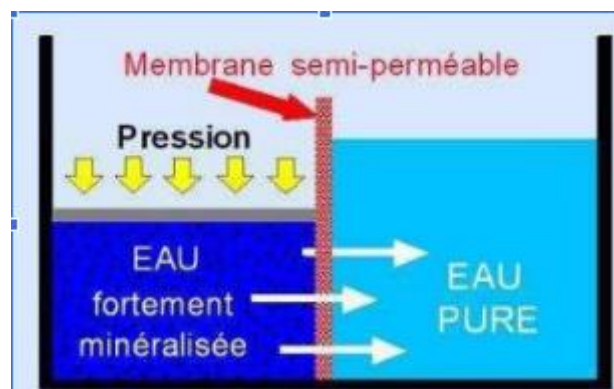


Figure I. 5 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [5].

b. Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

L'unité d'osmose inverse fait partie intégrante du bâtiment de traitement. Elle est alimentée par des pompes hautes pression et des modules contenant des membranes.

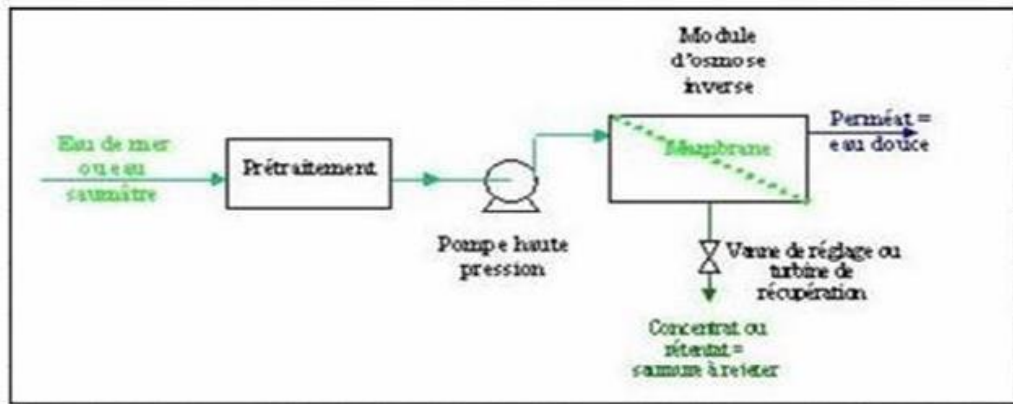


Figure I. 6 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.

c. Pression osmotique

La pression osmotique d'une solution est reliée à l'activité du solvant par la relation :

$$\pi = \frac{RT}{v} \log_e a$$

où :

- π : pression osmotique (bar) ;
- R : concentration des gaz parfaits ($\text{cm}^3 \cdot \text{bar} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) ;
- T : température thermodynamique (K) ;
- V : volume partiel molaire du solvant ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) ;
- a : activité du solvant

d. Le pompage haut pression

Après le prétraitement (filtres à sable et filtres à cartouches), l'eau est reprise par des pompes d'alimentation haute pression vers l'unité d'osmose inverse.

Après acidification par ajout de H_2SO_4 jusqu'à un pH de $\pm 6,9$, l'eau est portée à une pression de 15,5 bar (absolu) pour traverser les modules d'osmose inverse.



Figure I. 7 : Pompe haute pression

e. Les modules d'osmose inverse

Les modules d'osmose inverse sont les composants où s'effectue la séparation. L'eau y est séparée en 2 courants :

- **Le perméat :** L'eau débarrassée des ions jusqu'à une concentration résiduelle de l'ordre de 7% de la concentration initiale.
- **Le concentrat (saumure) :** La partie où les ions sont plus concentrés et qui est rejetée. Cette opération s'effectue en 2 étapes pour optimiser le taux de conversion. Après chaque arrêt d'une ligne d'osmose inverse, les éléments (modules) sont rincés avec du perméat pur afin d'empêcher les dépôts de sels.

f. Type de membranes

Les membranes agissent comme une barrière qui permet le transfert préférentiel de l'eau (solvant) tout en retenant les sels dissous (solutés).

La sélectivité des membranes d'osmose inverse pour les différentes espèces chimiques dépend de leur possibilité de solvation par l'eau : les espèces les plus fortement solvatées ont un taux de rejet plus important.

I.2.7 Phénomène de colmatage

Le colmatage correspond à l'accumulation de substances sur ou dans la membrane, ce qui réduit ses performances. C'est l'un des problèmes majeurs dans les procédés à membranes comme l'osmose inverse.

Il résulte de l'interaction entre la membrane, les polluants ou les sels dissous présents dans l'eau brute, et les conditions hydrodynamiques de fonctionnement.

Ce phénomène entraîne une dégradation progressive des performances de l'unité de traitement. [6]



Figure I. 8 : Phénomène de colmatage sur membrane d'osmose inverse [6].

a. Types de colmatage

- **Colmatage minéral (entartrage)**

Il est dû à la précipitation de sels peu solubles sur la surface de la membrane, principalement lorsque leur produit de solubilité est dépassé dans le concentrat. [7]

Les sels les plus couramment impliqués sont :

- Le carbonate de calcium (CaCO_3) ;
- Le sulfate de calcium (CaSO_4) ;
- Le sulfate de baryum (BaSO_4) ;
- Le sulfate de strontium (SrSO_4) ;
- La silice (SiO_2).

Ce type de colmatage est favorisé par un taux de conversion élevé, une température élevée et un pH mal ajusté.

✓ Colmatage organique

Il provient de l'accumulation de matières organiques naturelles (acides humiques et fulviques) ou de composés organiques synthétiques présents dans l'eau brute. [8]

Ces substances peuvent s'adsorber sur la membrane et former une couche qui réduit la perméabilité. Les eaux de surface ou les eaux souterraines influencées par des matières organiques y sont plus sensibles.

✓ Colmatage particulaire

Il est causé par la présence de particules fines en suspension (argiles, limons, colloïdes, oxydes métalliques) qui se déposent à la surface de la membrane.

L'indice de colmatage (SDI – Silt Density Index) est utilisé pour évaluer le potentiel colmatant des particules. Un SDI supérieur à 3 ou 4 est généralement considéré comme risqué pour les membranes d'osmose inverse. [9]

✓ Bio-colmatage

Il correspond à la formation d'un biofilm à la surface de la membrane suite à la prolifération de micro-organismes (bactéries, algues, etc.).

Le biofilm réduit le flux de perméat, augmente la chute de pression et peut dégrader chimiquement certains types de membranes.

Il est favorisé par une température élevée, une stagnation et la présence de nutriments (carbone organique, phosphore, azote) dans l'eau d'alimentation. [10]

b. Conséquences**✓ Diminution du débit de perméat**

L'accumulation de matières colmatantes sur la membrane augmente la résistance hydraulique, ce qui réduit le flux d'eau traversant la membrane à pression constante.

Le débit d'eau traitée diminue progressivement, entraînant une baisse de la productivité de la station.

✓ Augmentation de la pression de fonctionnement

Pour maintenir un débit constant face au colmatage, il est nécessaire d'augmenter la pression d'alimentation. Cela entraîne une surconsommation énergétique et sollicite davantage les équipements (pompes haute pression, canalisations).

✓ Réduction de la durée de vie des membranes

Le colmatage accélère le vieillissement des membranes. Les nettoyages chimiques fréquents, bien que nécessaires pour restaurer les performances, dégradent progressivement la structure des membranes. Une membrane colmatée de manière irréversible doit être remplacée, ce qui représente un coût d'exploitation important.

c. Moyens de prévention et de contrôle

Dans les stations de déminéralisation, plusieurs actions sont mises en œuvre pour limiter le colmatage :

- **Prétraitement poussé** : filtration sur sable (élimination des matières en suspension), microfiltration sur cartouches (retenue des particules fines).
- **Injection d'anti-tartre (ASC – Anti-Scalant)** : pour inhiber la précipitation des sels minéraux dans les modules d'osmose inverse. [11]
- **Injection de bisulfite de soude (NaHSO_3)** : pour réduire le chlore libre à zéro et éviter l'oxydation des membranes.
- **Contrôle du pH** : par ajout d'acide sulfurique (H_2SO_4) pour limiter le risque d'entartrage calco-carbonique.
- **Rinçages automatiques** : après chaque arrêt d'une ligne d'osmose inverse, un rinçage au perméat pur est effectué pour éliminer les sels concentrés et éviter les dépôts.
- **Mesures en ligne** : surveillance du SDI (Silt Density Index), de la turbidité, de la conductivité et du chlore résiduel pour anticiper les risques de colmatage

I.2.8 Nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes est une opération essentielle pour maintenir les performances d'une unité d'osmose inverse.

Il vise à éliminer les dépôts accumulés à la surface ou dans la structure de la membrane (colmatage minéral, organique, particulaire ou biologique).

Un programme de nettoyage bien adapté permet de restaurer les capacités de production et de prolonger la durée de vie des modules membranaires, dont le coût représente une part importante de l'investissement. [11]

a. Types de nettoyage

✓ Nettoyage physique (rétrolavage)

Le rétrolavage consiste à inverser le sens de circulation du flux à travers la membrane. L'eau (souvent du perméat) est injectée à contre-courant pour décoller et évacuer les particules et les matières en suspension déposées en surface.

Ce type de nettoyage est fréquemment utilisé sur les étapes de prétraitement (filtres à sable, microfiltration).

En osmose inverse, le rétrolavage n'est pas toujours possible en raison de la conception des modules (modules spiralés).

À la place, on réalise un rinçage à faible pression avec du perméat pur pour diluer et évacuer les sels concentrés et les matières faiblement adhérentes. Ce rinçage est systématiquement effectué après chaque arrêt d'une ligne d'osmose inverse pour éviter les précipitations et le développement microbien.

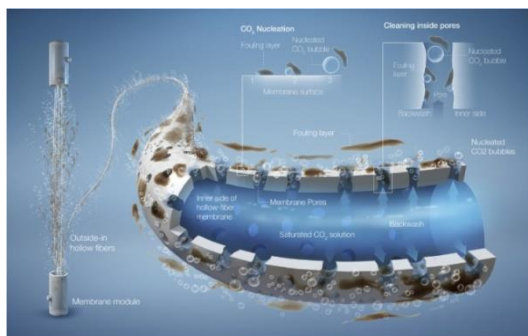


Figure I. 9 : Rétrolavage d'un module membranaire à l'aide.

✓ **Nettoyage chimique (CIP – Cleaning In Place)**

Le nettoyage chimique, ou nettoyage en place, consiste à faire circuler des solutions chimiques dans les modules membranaires sans démonter les éléments. [12]

Les produits utilisés sont choisis en fonction du type de colmatage identifié :

- **Solutions acides** (acide citrique, acide chlorhydrique, acide sulfurique) : Efficaces contre les dépôts minéraux (carbonate de calcium, oxydes de fer, etc.).
- **Solutions basiques** (soude NaOH, parfois associée à des détergents) : Utilisées pour éliminer les matières organiques et les biofilms.
- **Agents chélatants** (EDTA) : pour complexer certains métaux et faciliter leur élimination.
- **Biocides** (solutions à base de chlore ou de peroxyde d'hydrogène) : Réservés aux membranes résistantes à l'oxydation, avec des concentrations et des temps de contact rigoureusement contrôlés.

La solution de nettoyage est généralement chauffée (30 à 40 °C) pour améliorer son efficacité, puis recircule dans les modules pendant une durée déterminée (30 minutes à plusieurs heures), suivie d'un rinçage abondant au perméat avant la remise en production.

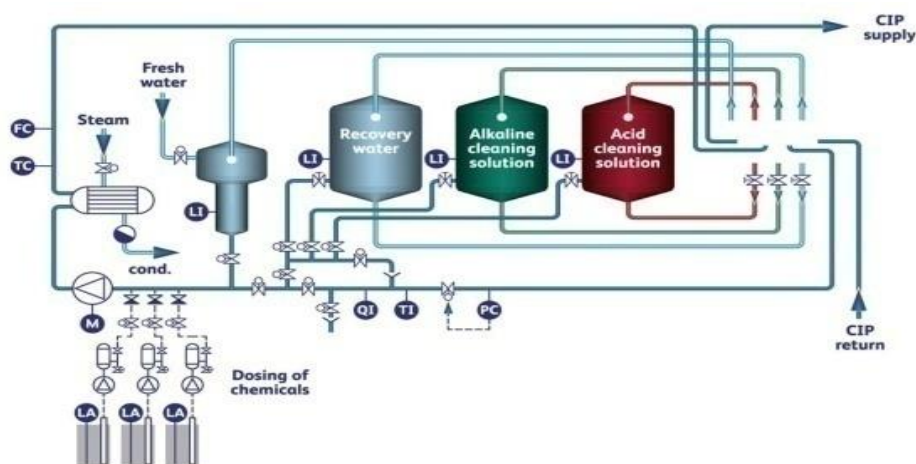


Figure I. 10 : Systèmes et équipements de Nettoyage chimique en place (CIP). [12]

✓ Nettoyage préventif

Contrairement au nettoyage curatif qui intervient après une baisse de performances constatée, le nettoyage préventif est planifié à intervalles réguliers (par exemple toutes les 4 à 8 semaines), indépendamment des signes de colmatage.

Cette stratégie permet de maintenir les membranes dans un état de propreté constant, d'éviter l'installation durable de biofilms ou de dépôts cristallins difficiles à éliminer, et de réduire la fréquence des nettoyages chimiques agressifs.

Elle repose sur une surveillance continue des paramètres de fonctionnement (débit, pression, conductivité du perméat, différence de pression entre l'entrée et la sortie des modules). [12]

b. Objectifs

✓ Restaurer les performances

L'objectif principal du nettoyage est de ramener les indicateurs de performance à des valeurs proches de celles observées après la mise en service initiale :

- **Récupération du débit de perméat :** Un nettoyage efficace permet de restaurer le flux d'eau traitée.
- **Réduction de la pression différentielle :** La chute de pression (ΔP) entre l'alimentation et le concentrat diminue après élimination des dépôts.
- **Stabilisation de la qualité du perméat :** Un colmatage important peut altérer la sélectivité de la membrane ; le nettoyage rétablit un taux de rejet des sels conforme aux spécifications.

I.3 Conclusion

La déminéralisation de l'eau repose sur un ensemble de techniques complémentaires adaptées aux caractéristiques de l'eau à traiter et aux exigences de qualité.

Les procédés membranaires, en particulier l'osmose inverse, occupent aujourd'hui une place dominante en raison de leur efficacité élevée. Toutefois, leur performance dépend fortement du prétraitement et de la maîtrise du phénomène de colmatage.

Le choix de la technique appropriée doit donc prendre en compte des critères techniques, économiques et environnementaux, afin d'assurer un fonctionnement optimal des installations de traitement.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

La ville d'Ouargla, située au cœur du Sahara algérien, est confrontée à des défis majeurs en matière de ressources en eau.

La qualité de l'eau potable, issue principalement des nappes souterraines profondes, présente une salinité élevée (environ 3 g/L), ce qui a engendré des problèmes techniques et sanitaires pour la population (1).

Pour y remédier, un projet d'envergure a été lancé pour la réalisation de neuf stations de déminéralisation [13].

Ce chapitre a pour objectif de présenter le cadre géographique, climatique, hydrographique, géologique et hydrogéologique de la région d'étude, ainsi qu'une description détaillée de la filière de traitement des trois stations concernées par notre étude : Gharbouz, Ziaina et Bamandil.

II.2. Généralités sur la zone d'étude

II.2.1. Situation géographique

La wilaya d'Ouargla se situe au sud-est de l'Algérie, au cœur du Sahara septentrional.

La ville d'Ouargla, chef-lieu de la wilaya, se trouve dans une dépression appelée la « cuvette de Ouargla ». Ses coordonnées géographiques sont comprises entre la longitude 5°15' et 5°25' Est et la latitude 31°55' et 32°00' Nord. [16]

La cuvette s'étend sur une superficie d'environ 99 000 hectares, incluant les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khouiled. [16]

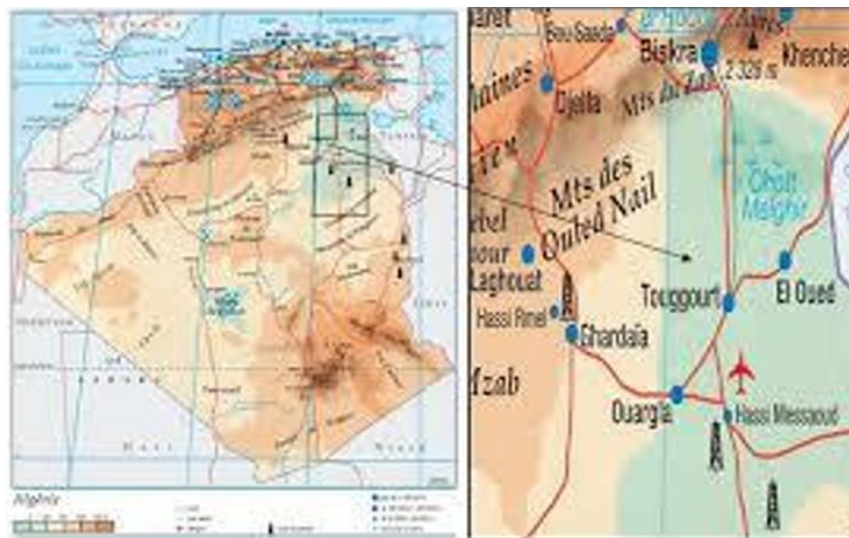


Figure II. 1 : Situation générale.

La région est délimitée par [16] :

- **Au Nord** : Sebkhat Safioune ;
- **A l'Est** : Les ergs Touil et Arifdji ;
- **Au Sud** : Les dunes de Sedrata ;
- **A l'Ouest** : Le versant est de la dorsale du M'Zab.

La distance du Sud au Nord est de 70 km, et celle de l'Est à l'Ouest est de 20 km.

Cette configuration topographique en cuvette favorise l'accumulation des eaux de surface et la remontée de la nappe phréatique dans certaines zones.

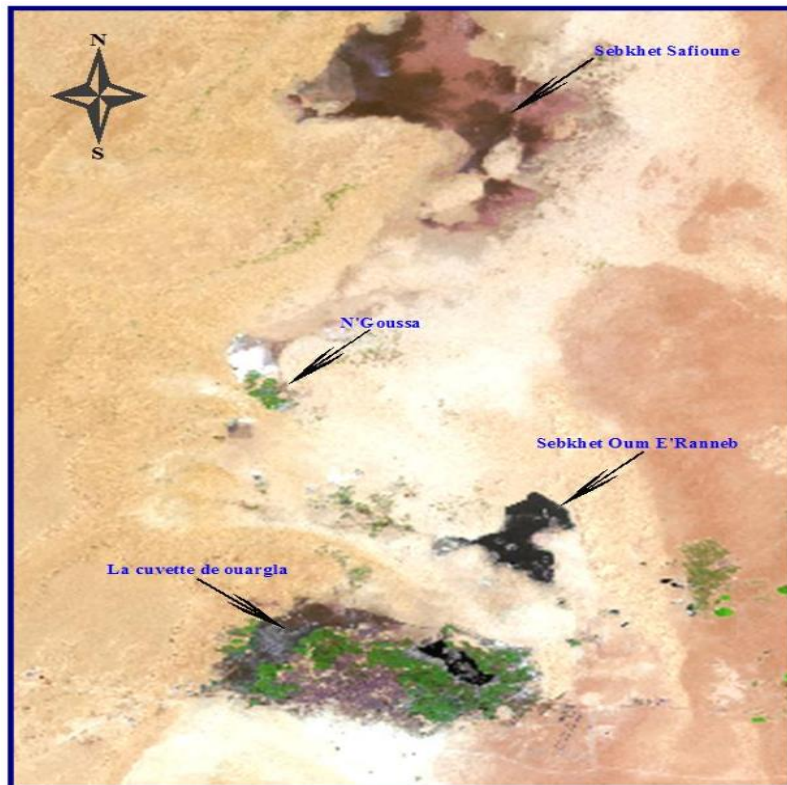


Figure II. 2 : Carte de situation de la ville d'Ouargla [16].

II.2.2. Emplacement

Le projet des neuf stations de déminéralisation est implanté dans différents quartiers de la commune d'Ouargla et de la commune de Rouissat. [17]

Les trois stations qui font l'objet de notre étude sont situées comme suit :

- **Station de Gharbouz** : Située dans le quartier de Gharbouz, au nord du chef-lieu de wilaya.
- **Station de Ziaina (Sokra)** : Située dans la commune de Rouissat.
- **Station de Bamendil Village** : Située dans la zone de Bamendil, au sud de la ville.

Ces stations ont été intégrées au sein de complexes hydrauliques existants, en utilisant les infrastructures déjà en place. [13]

II.2.3. Climatologie

La région d'Ouargla est caractérisée par un climat saharien aride, avec des étés torrides et des hivers doux.

Les données climatologiques utilisées dans cette étude sont issues de l'Office National de la Météorologie (ONM) pour la période 2006-2015 [18].

a) Température

Les températures moyennes mensuelles varient considérablement entre l'hiver et l'été.

Les températures maximales peuvent dépasser 45 °C en été, ce qui influence directement l'évaporation et la qualité des eaux.

b) Précipitations

Les précipitations sont rares et irrégulières dans la région. La moyenne annuelle est de 68,09 mm, avec une répartition saisonnière marquée [18].

Les pluies se produisent essentiellement en hiver et en automne, tandis qu'une période sèche s'étend généralement d'avril à octobre.

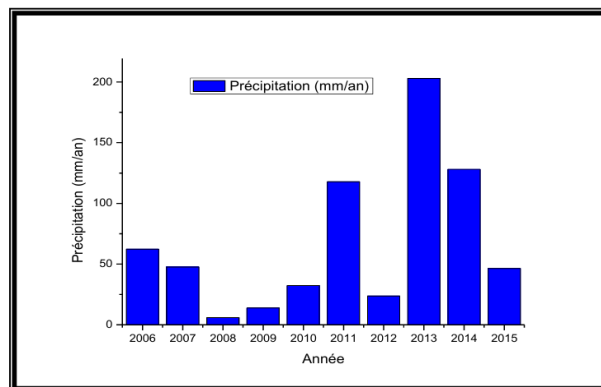


Figure II. 3 : Variation de la précipitation moyenne annuelle à Ouargla. [18]

c) Humidité

L'humidité relative de l'air est très faible, avec une moyenne annuelle de 41,78 %. Elle atteint son minimum en été (26,6 % en juillet) sous l'effet des vents chauds et de l'évaporation intense, et son maximum en hiver (59,2 % en janvier). [18]

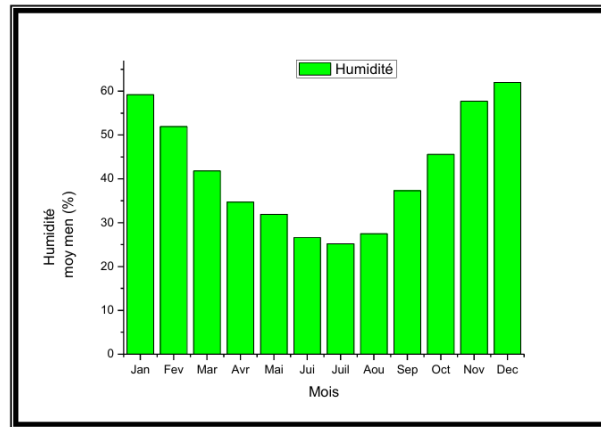


Figure II. 4 : Variation de l'humidité moyenne mensuelle à Ouargla [18].

d) Évaporation

L'évaporation est très élevée en raison des températures élevées et de l'ensoleillement intense.

La moyenne annuelle est d'environ 3 500 mm, avec un pic estival dépassant 450 mm par mois. [18]

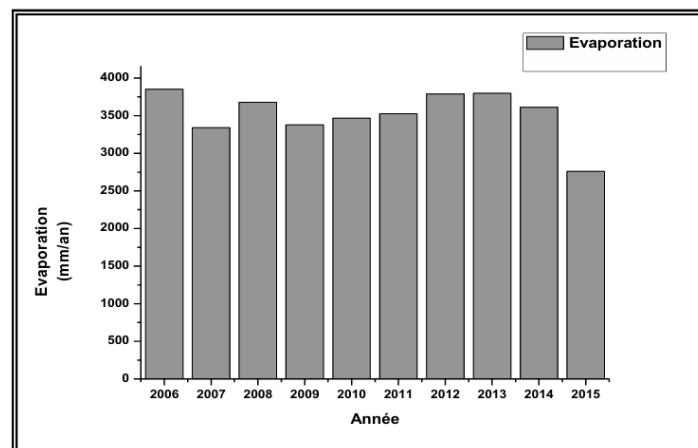


Figure II.5 : Variation de l'évaporation moyenne annuelle à Ouargla [18].

e) Vents

Les vents dominants sont de secteur Nord-Ouest. Le Sirocco, vent chaud et sec, peut souffler à toutes les époques de l'année, avec des vitesses maximales atteignant 4,91 m/s en mai. [18]

Ces vents contribuent à l'évaporation et au transport de particules sableuses.

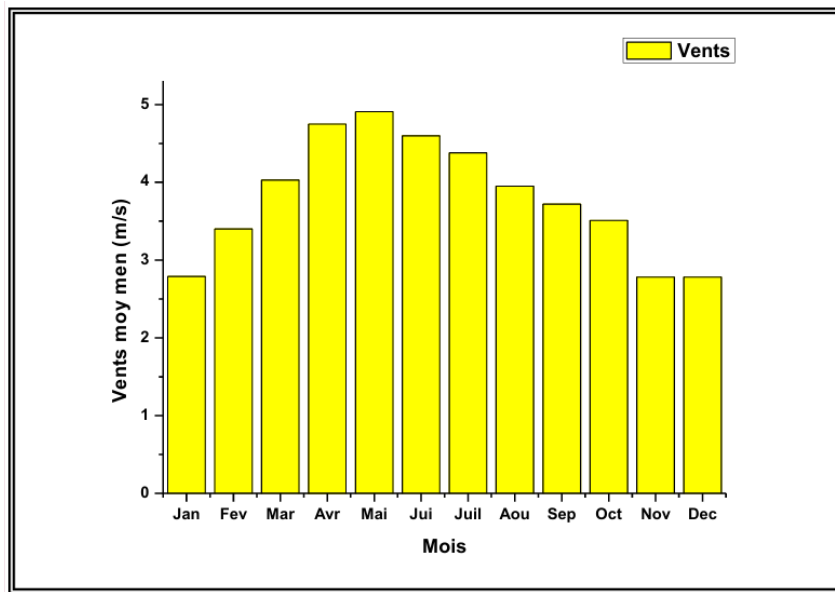


Figure II.6 : Variation de la vitesse moyenne mensuelle de vent à Ouargla [18].

II.2.4 Hydrographie

Le réseau hydrographique de la région est de type endoréique, avec des oueds temporaires qui s'écoulent vers les dépressions fermées que constituent les chotts et les sebkhas. [1]

Les principaux oueds sont :

- **Oued M'Zab** : long d'environ 320 km, il coule d'ouest en est jusqu'à Sebkhat Safioune. Les crues sont exceptionnelles, les dernières observées datant de 1991, 1994 et octobre 2015.
- **Oued N'sa** : bassin versant de 7 800 km², il se déverse également dans Sebkhat Safioune.
- **Oued M'ya** : bassin versant de 19 800 km², ses écoulements sont plus fréquents en novembre, octobre, mai et juin.

II.2.5 Zones basses (chotts et sebkhas)

Sur les 99 000 hectares de la cuvette d'Ouargla, la superficie occupée par les zones de sebkhas et chotts est évaluée à 21 000 ha, dont 3 500 ha sont représentés par les chotts, lieux d'apparition des eaux stagnantes. [19]

Les plus importants sont :

- Chott Ain Beida ;
- Chott Oum-Er-Raneb ;
- Sebkhet Safioune (au nord de la cuvette, point le plus bas de la région).

Ces zones jouent un rôle de réceptacle naturel des eaux de surface et des excédents de la nappe phréatique.



(a)



(b)



(c)

Figure II.7 : Sebkhats et chotts d'Ouargla : (a) Sebkhats Safioune, (b) Chott Ain Beida et (c) Chott Oum Er-Raneb.

II.2.6. Aspect géologique

La géomorphologie de la région est constituée des éléments suivants : [20]

- **La hamada** : plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses Mio-Pliocène et Plio-Quaternaire, dont l'altitude est de 200 m en moyenne ;
- **Les formations sableuses** : composées de dunes et de cordons d'erg ;
- **Les étendues alluviales** : correspondant au lit de l'oued Mya selon un axe SW-NE ;

- **Les sebkhas** : marécages salés occupant le fond des dépressions.



Figure II. 8 : Relief géologique de la région d'Ouargla [20].

II.2.7. Hydrogéologie et ressources en eau

Les eaux souterraines constituent la principale ressource hydrique de la région.

Elles sont contenues dans plusieurs nappes superposées. [20]

a) Le Continental Intercalaire (CI) – Nappe albienne

C'est l'un des plus grands réservoirs souterrains d'Afrique.

Il est constitué de grès et d'argiles sableuses d'âge Crétacé inférieur (Barrémien et Albien). Sa profondeur dans la région d'Ouargla est d'environ 1300 m, avec une épaisseur dépassant 150 m. [20]

L'eau est artésienne, avec une température de 57 °C et une faible salinité (environ 2 g/L). Le débit d'un forage artésien peut atteindre 200 L/s.

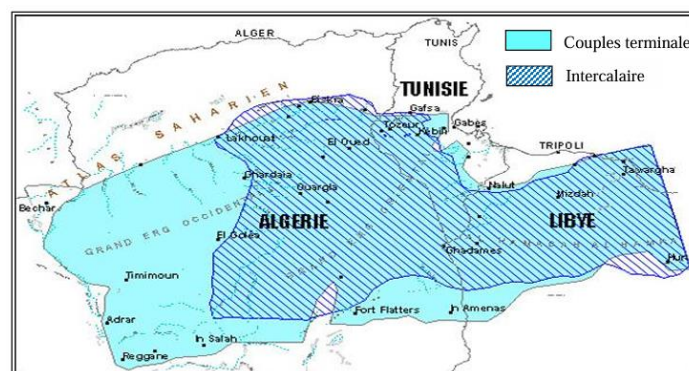


Figure II. 9 : Les nappes de complexe terminal et continental intercalaire [20].

b) Le Complexe Terminal (CT)

Il contient trois nappes superposées : [20]

- **Nappe du Turonien** : formée de calcaires fissurés, elle constitue un aquifère captif d'une épaisseur d'environ 60 m.
- **Nappe du Sénonien** : située entre 450 et 500 m de profondeur, elle est formée de calcaires poreux à silex. C'est la nappe la plus exploitée pour l'alimentation en eau potable en raison de sa bonne qualité chimique.
- **Nappe du Mio-Pliocène** : profondeur variant de 60 à 200 m, constituée de sables fins à grossiers. Sa salinité varie de 1,8 à 4,6 g/L, avec une température de 23 à 25 °C.

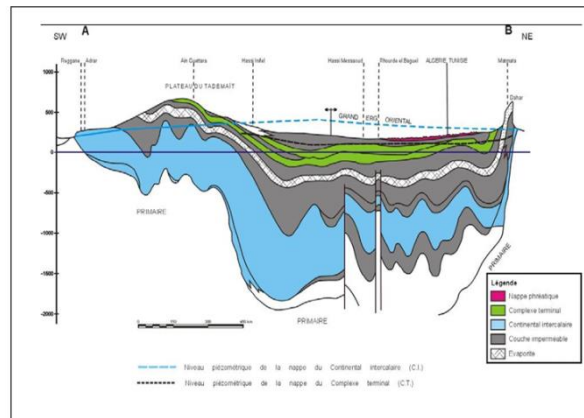


Figure II .10 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara [20].

c) La nappe phréatique

Elle repose sur une couche imperméable et se trouve à faible profondeur (0,5 à 3 m) dans les zones urbaines et agricoles. [21]

Sa salinité est très élevée, pouvant atteindre 70 g/L, ce qui la rend inexploitable pour l'alimentation en eau potable.

Elle affleure dans les zones les plus basses, notamment au niveau des chotts.

II.2.8. Situation démographique

D'après le dernier recensement de 2008, la population de la ville d'Ouargla a atteint 224 325 habitants, avec un taux d'accroissement annuel de 0,8 %.

La population estimée pour les années suivantes peut être calculée par la relation : [22]

Avec :

$$P_n = p_0 \times (1 + t)^n$$

- P_n : population à l'horizon n ;
- P_0 : population de référence (2008) ;
- t : taux d'accroissement (0,8 %) ;

- n : nombre d'années.

Cette croissance démographique entraîne une augmentation continue des besoins en eau potable.

II.2.9 Alimentation en eau potable et assainissement

Le réseau d'eau potable de la ville d'Ouargla est de type mixte, avec une longueur totale de 398,572 km. Le système comprend 41 forages et 33 réservoirs.

La dotation en eau potable est de 160 L/j/hab.

Le réseau d'assainissement est de type unitaire (eaux usées + eaux pluviales), avec un taux de raccordement variant de 40 à 60 % selon les communes. [13]

II.3 Description de la filière de traitement

Les trois stations de déminéralisation étudiées sont conçues selon le même principe de traitement par osmose inverse. [13]

Chaque station est alimentée par des forages captant les nappes profondes (Albien, Sénonien ou Mio-Pliocène) et dispose d'une capacité de traitement nominale de **3 000 m³/j** pour une production d'eau traitée de **2 250 m³/j**, soit un taux de conversion de 75 %. [17]

II.3.1. Station de déminéralisation de Gharbouz

La station de Gharbouz est implantée au sein du complexe hydraulique du même nom, qui couvre une superficie de 6 169 m². [13]

Depuis son intégration à l'Algérienne des Eaux (ADE) le 4 janvier 2022, la station est alimentée par trois forages. [23]

La salinité de l'eau brute est moyenne et sa température est moyenne.

La station est alimentée en eau brute à partir de deux forages principaux : Forage GHARBOUZ et forage BOU AMEUR, dont le débit de chacun est mesuré par un débitmètre électronique installé en amont de la bache des eaux brutes.

La station dessert environ 10 000 citoyens [13]

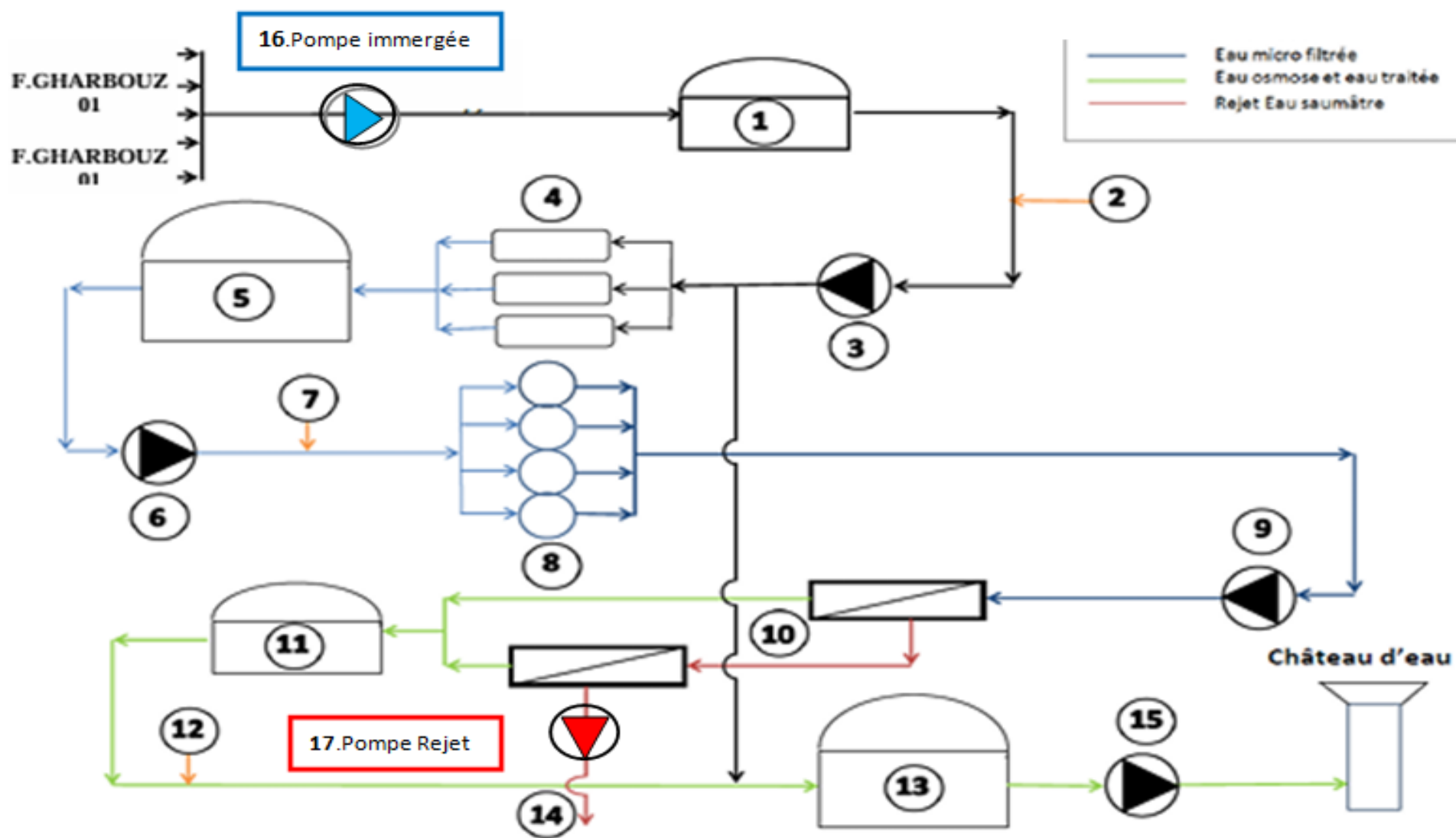


Figure II. 11 : Schéma synoptique de la station de GHARBOUZ. [17]

Les équipements sont prévus en première phase pour produire 22.500 m³/j d'eau osmosée à 200 ppm.

Les ouvrages de génie-civil, bâtiment compris, sont conçus pour une production d'eau osmosée de 30.000 m³/j.

L'installation comprend principalement :

1. Bassin d'eau brute 40 m³.
2. Injection : Chlore (désinfection), acide sulfurique (réduction pH), chlorure ferrique (floculation).
3. (2+1) Pompes de 9600 m³/j sur 21mCE pour l'alimentation des filtres à sable.
4. Filtres à sable bicouche (contre les matières en suspension) 3 U; surface unitaire 15,12 m².
5. Bassin d'eau filtrée 130 + 70 m³ (dont un compartiment pour les eaux de lavage des filtres à sable).
6. (2+1) Pompes d'alimentation des filtres à cartouches (8784 m³/j sur 25 mCE).
7. Injection SBS (Décoloration) et ASC (anti-tartre).
8. Filtres à cartouches (2+1) U ; 50 cartouches / filtre.
9. (2+1) Pompes d'alimentation haute pression vers l'unité d'osmose inverse (8784 m³/j sur 139 mCE).
10. Unité d'osmose inverse à deux étages :
 - 1er étage : 72 membranes modèle ESPA2-LD (HYDRANAUTICS), type spiralé, diamètre 10.16 pouces, surface active 37.10 m², pression maximale 4.16 MPa.
 - 2ème étage : 36 membranes modèle ESPA4 (HYDRANAUTICS), mêmes caractéristiques techniques (spiralé, polyamide composite, surface 37.10 m², pression 4.16 MPa).
 - Total membranes installées : 108 unités.
11. Bassin d'eau osmosée 40 m³.
12. Injection : lait de chaux (Potabilisation de l'eau osmosée), chlore (désinfection).
13. Bâche d'eau traitée 2 × 1000 m³.
14. Evacuation saumure vers drains.
15. (2+1) Pompes eau traitée (7056 m³/j sur 51 mCE) vers château d'eau 500 m³ [17]
16. Pompes eau de rejet (7056 m³/j sur 51 mCE) vers l'extérieur de la station
17. (1+0) Pompe submersible d'eau brute (7056m³/j sur 204 mCE) vers le réservoir

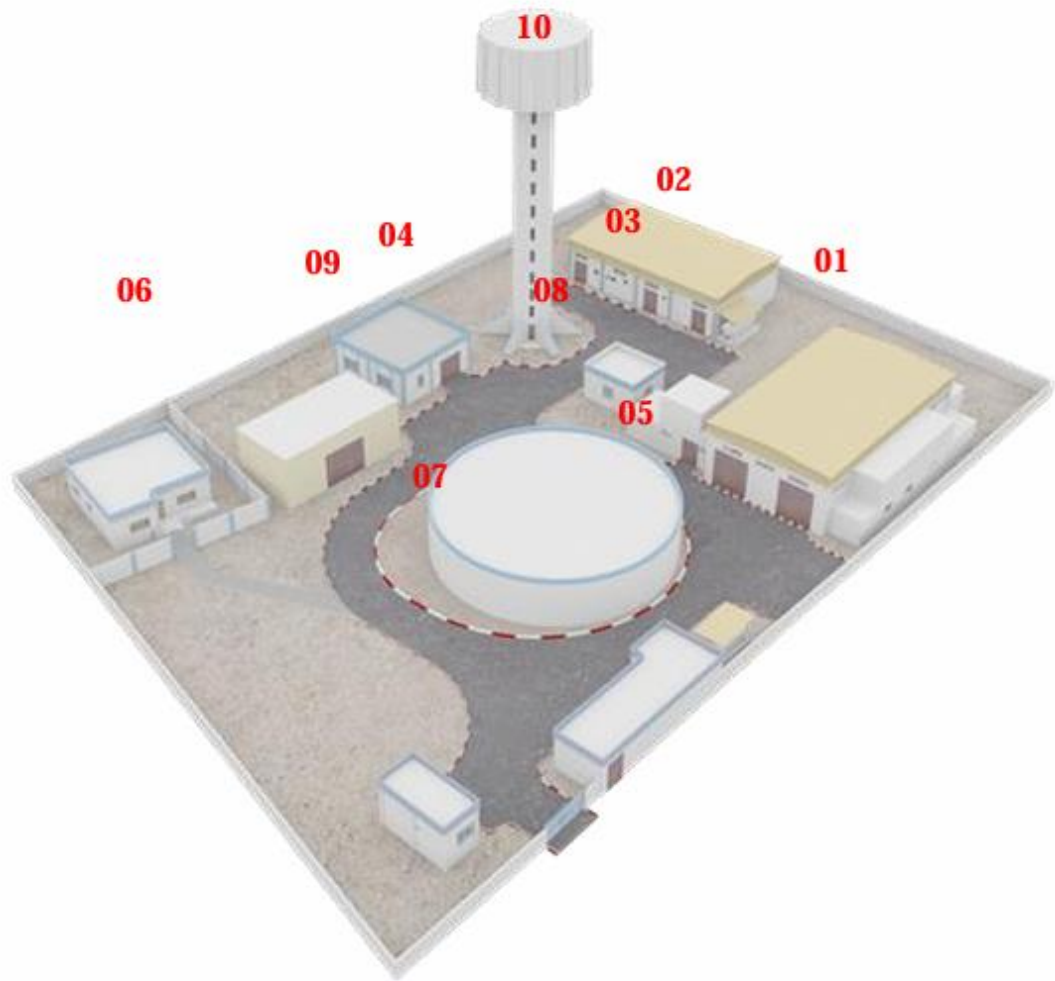


Figure II. 12 : Complexe de GHARBOUZ en 3D. [13]

- 01) Bâtiment de traitement.
- 02) Bâtiment de chloration.
- 03) Laboratoire d'analyse.
- 04) Atelier d'entretien.
- 05) Locale d'énergie.
- 06) Logement de fonction.
- 07) Poste de gardiennage.
- 08) La Bâche d'eau (ouvrage existant).
- 09) Station de pompage (ouvrage existant).
- 10) Château d'eau (ouvrage existant).

a. Bâtiment de traitement

C'est le cœur de la station. D'une superficie de 260 m², il abrite toutes les étapes de la production d'eau, depuis le prétraitement jusqu'à l'osmose inverse. [13]

Il contient également la salle de contrôle et le bureau du chef de station.

Les équipements principaux comprennent les filtres à sable, les pompes basse pression, les filtres à cartouches, les pompes haute pression et les unités d'osmose inverse.

1. Prétraitement

Le prétraitement comprend des filtres à sable (filtration sur lit de sable) pour éliminer les matières en suspension, suivis d'une coagulation-floculation au chlorure ferrique, puis d'une filtration sur cartouches (filtres à cartouches de 5 µm). Une bâche d'eau brute assure le stockage avant l'osmose inverse.



Figure II.13 : Ligne de filtre à sable.



Figure II.14 : La pompe de gavage.

2. Pompes basse pression (pompes de gavage) :

Elles vers les filtres à cartouches puis vers les pompes haute pression. Elles sont généralement de type centrifuge et servent à "nourrir" le circuit en amont.



Figure II.15 : Les filtres à cartouches.

3. Unité d'osmose inverse

Cette unité est constituée de membranes d'osmose inverse spiralées et d'un cadre support. Le système de pompage est conçu pour assurer la circulation de l'eau à travers les membranes avec des pressions adaptées. On distingue deux types principaux de pompes dans ce circuit :



Figure II.16 : Unité d'osmose inverse.

4. Pompes haute pression :

Elles sont situées après la filtration sur cartouches. Elles élèvent la pression de l'eau à un niveau suffisant (généralement entre 10 et 12 bars pour les eaux saumâtres) pour vaincre la pression osmotique et forcer l'eau à traverser les membranes. Ces pompes sont souvent de type centrifuge multi-étages ou à pistons axiaux pour atteindre des rendements élevés.



Figure II.17 : Pompe haute pression.

5. Système de nettoyage CIP

Un système de nettoyage en place (CIP) est installé pour nettoyer chimiquement les membranes lorsque leurs performances diminuent (colmatage, entartrage). Il comprend une cuve de nettoyage, une pompe CIP, des filtres et des vannes de dérivation.

6. Système de contrôle

La station est équipée d'une armoire de commande programmable (API – automate programmable industriel) qui assure la surveillance et la commande automatique.



Figure II.18 : Pompe injection d'antitartre (anti scalant).

L'unité de traitement est également équipée de plusieurs instruments de mesure pour assurer un suivi précis et continu des paramètres de fonctionnement :

7. Débitmètres :

- **Débitmètres électromagnétiques** : Utilisés sur les arrivées d'eau brute de chaque forage pour mesurer le débit avec précision. Ils fonctionnent sans perte de charge et sont adaptés aux eaux chargées.



Figure II. 19 : Débitmètre électromagnétique.

- **Débitmètres sur le perméat (eau osmosée) et le concentré (rejet)** : Ils permettent de calculer le taux de conversion en temps réel. Des technologies comme l'effet Vortex ou électromagnétique sont utilisées.

8. Mesure de pression :

- **Manomètres locaux** : Placés à des points clés (sortie des filtres, refoulement des pompes HP, entrée/sortie des membranes) pour une lecture visuelle directe.
- **Pressostats basse et haute pression** : Ils protègent le système (ex : arrêt de la pompe HP si la pression d'aspiration est insuffisante, ou si la pression de refoulement dépasse un seuil de sécurité).
- **Capteurs de pression différentielle (ΔP)** : Placés avant/après les filtres à sable, les filtres à cartouches et les étages de membranes. Une augmentation de la ΔP indique un colmatage et déclenche un lavage (filtres) ou un nettoyage CIP (membranes).
- **Autres capteurs** :
 - **Conductimètres** : Mesurent la conductivité (TDS) de l'eau brute, du perméat et du concentré pour évaluer le taux de rejet des sels par les membranes.
 - **Capteurs de pH** : Surveillent le pH après injection d'acide ou de bisulfite.
 - **Capteurs de température** : Compensent les mesures de conductivité et surveillent la température maximale admissible par les membranes.



Figure II. 20 : Multi paramètre (pH, conductivité, TDS, salinité).

9. Paramètres de fonctionnement :

Le taux de production (conversion) est de **75 %**, le débit d'eau osmosée est de **2 250 m³/j**, le débit d'eau de rejet est de **42 m³/h**, et le débit d'eau de service est de **20 m³/h**



Figure II. 21 : Bâtiment de traitement à la station de GHARBOUZ.

b. Bâtiment de chloration

Ce bâtiment est dédié à la préparation et au stockage des produits chimiques utilisés dans le traitement (ADE, 2008).

Il est divisé en plusieurs espaces pour (ADE, 2008) :

- La préparation du lait de chaux (reminéralisation) ;
- Le stockage du chlore (désinfection) ;
- Le stockage du chlorure ferrique (coagulation-floculation) ;
- Le stockage de la poudre de chaux avant préparation.



Figure II. 22 : Bâtiment de chloration à la station de GHARBOUZ.

c. Laboratoire d'analyse

Le laboratoire assure le suivi de la qualité de l'eau à chaque étape du traitement.

Les analyses effectuées régulièrement portent sur :

- Le pH ;
- La turbidité ;
- La conductivité ;
- La dureté totale (TH) ;
- L'alcalinité (TA et TAC) ;
- Les chlorures, sulfates, nitrates ;
- Le chlore résiduel ;
- Les matières totales dissoutes (TDS).



Figure II. 23 : Bâtiment de Laboratoire d'analyse à la station de GHARBOUZ.

d. Atelier d'entretien

D'une superficie de 64 m², cet atelier est destiné à la maintenance et à la réparation des équipements de la station (pompes, moteurs, vannes, etc.).



Figure II. 24 : Bâtiment d'Atelier d'entretien à la station de GHARBOUZ.

e. Locale d'énergie

D'une superficie de 44 m², ce local abrite le poste électrique moyenne tension (MT) et un groupe électrogène qui prend automatiquement le relais en cas de coupure de courant, assurant ainsi une couverture de 75 % des besoins énergétiques de la station.



Figure II.25 : Bâtiment Locale d'énergie à la station de GHARBOUZ.

II.3.2. Station de déminéralisation de Ziaina

Elle a été raccordée au réseau de l'Algérienne des Eaux (ADE) le 2 juin 2022. [23]

La salinité de l'eau brute est élevée et la température est élevée (eau du forage Hadeb 03 environ 60 °C).

Elle est alimentée par deux forages : [17]

- **Forage de Ziaina :** Captant la nappe du Mio-Pliocène ;
- **Forage Hadeb 03 :** Captant la nappe de l'Albien.

En raison de la température élevée de l'eau de ce dernier (environ 60 °C), une tour de refroidissement à deux cellules a été installée pour abaisser la température à 40 °C avant injection dans la bache d'eau brute.

La station possède les mêmes équipements et le même schéma de traitement que la station de Gharbouz, à savoir :

- Prétraitement (filtres à sable, coagulation-floculation, filtration sur cartouches) ;
- Unité d'osmose inverse (membranes spiralées, pompes haute pression) ;
- Système de nettoyage CIP ;
- Système de contrôle et supervision (API, écran tactile).

Paramètres de fonctionnement :

Le taux de production (conversion) est de 75 %, le débit d'eau osmosée est de 2 250 m³/j, le débit d'eau de rejet est de 42 m³/h, et le débit d'eau de service est de 20 m³/h.

Un débitmètre électromagnétique DN 150 contrôle le débit des eaux refroidies.



Figure II.II. 26 : Refroidisseur de la station de Ziaina (S6).

II.3.3. Station de déminéralisation de Bamandil

La station de Bamandil Village (S8) est située dans la zone de Bamandil, au sud de la ville. [17]

Elle a été mise en service au sein de l'Algérienne des Eaux (ADE) le 15 mars 2022. [23]

La salinité de l'eau brute est faible et la température est basse.

Elle est alimentée par **deux forages** captant la nappe du Mio-Pliocène : [17]

- **Forage Bamandil 01** : débit exploité de 1 525 m³/j ;
- **Forage Bamandil 02** : débit exploité de 1 475 m³/j.

La station possède les mêmes équipements et le même schéma de traitement que les stations de Gharbouz et Ziaina :

Prétraitement (filtres à sable, coagulation-floculation, filtration sur cartouches) ;

Unité d'osmose inverse (membranes spiralées, pompes haute pression) ;

- Système de nettoyage CIP ;
- Système de contrôle et supervision (API, écran tactile).

Paramètres de fonctionnement :

Le taux de production (conversion) est de 75 %, le débit d'eau osmosée est de 2 250 m³/j, le débit d'eau de rejet est de 42 m³/h, et le débit d'eau de service est de 20 m³/h.

II.4. Conclusion

La région d'Ouargla dispose de ressources en eau souterraine importantes mais très minéralisées, ce qui a justifié la réalisation des stations de déminéralisation. [20]

Le climat saharien aride, caractérisé par des températures élevées, une faible pluviométrie et une forte évaporation, aggrave la problématique de la rareté et de la qualité de l'eau.

Les trois stations étudiées (Gharbouz, Ziaina et Bamandil) présentent des caractéristiques techniques communes, notamment l'utilisation du procédé d'osmose inverse, mais différent par la salinité et la température de leurs eaux brutes :

- **Station de Gharbouz** : intégrée le **4 janvier 2022**, alimentée par **3 forages**, salinité **moyenne**, température **moyenne** ;
- Station de Ziaina : intégrée le 2 juin 2022, alimentée par 2 forages, salinité élevée, température élevée (avec refroidissement) ;
- Station de Bamandil : **intégrée le 15 mars 2022**, **alimentée par 2 forages**, **salinité faible**, **température basse**.

Toutes les trois disposent des mêmes paramètres de fonctionnement : **taux de conversion de 75 %**, débit d'eau osmosée de **2 250 m³/j**, débit de rejet de **42 m³/h** et débit de service de **20 m³/h**.

La connaissance de leur situation géographique, de leurs conditions climatiques, de leurs ressources hydrogéologiques et de leurs infrastructures est essentielle pour comprendre les enjeux liés à la qualité de l'eau potable produite.

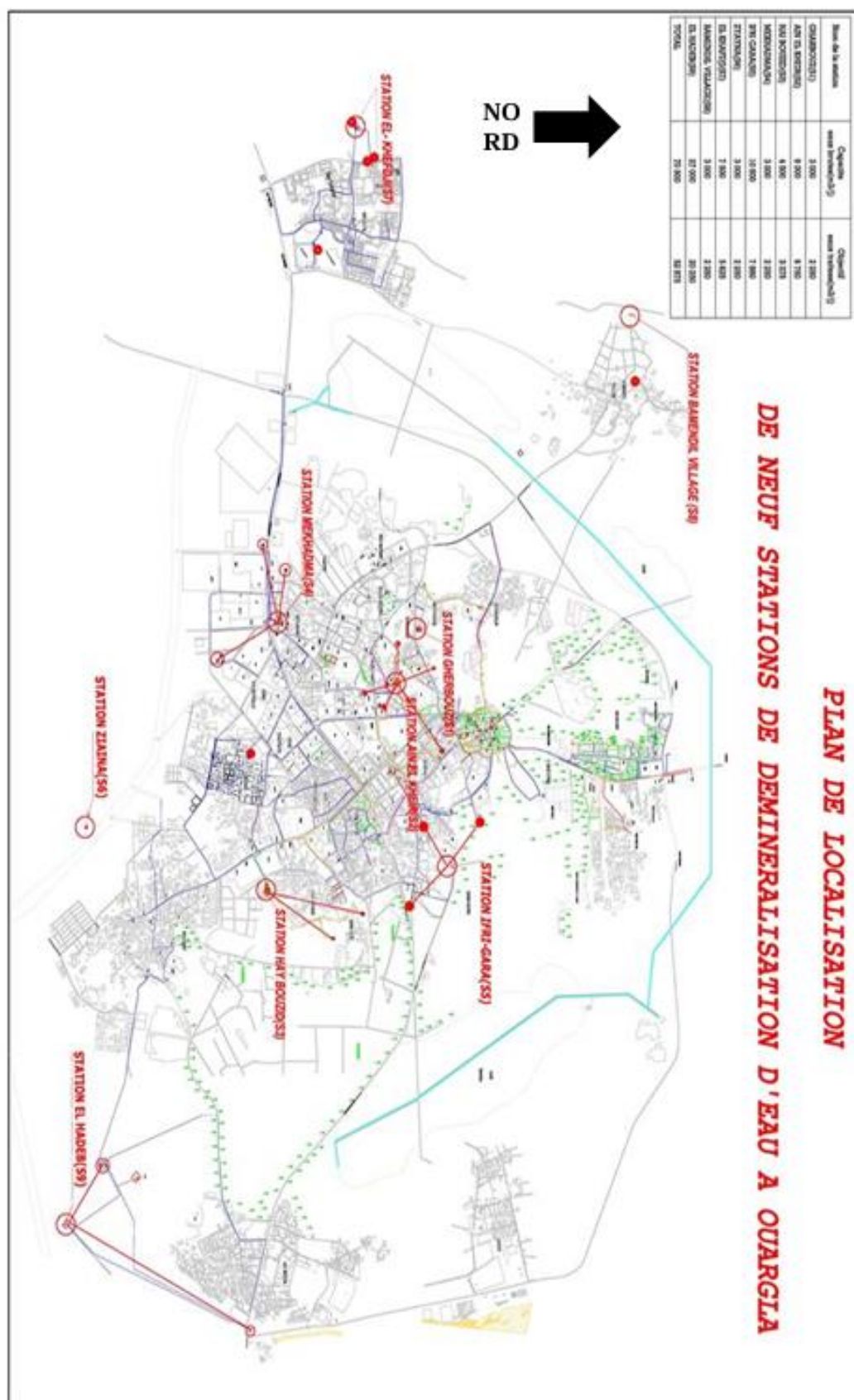


Figure II.27 : Plan de localisation des Neuf stations avec les forages d'alimentation.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction

Afin d'obtenir une représentativité statistique fiable, l'étude s'est étalée sur une période d'une année complète. Les données primaires ont été extraites rigoureusement des registres de maintenance de chaque site.

Ce recensement exhaustif a permis de comptabiliser l'ensemble des interventions de maintenance corrective effectuées au cours de l'exercice annuel.

III.2 Traitement et exploitation des résultats

Le traitement de l'historique des interventions a permis d'établir une segmentation ABC pour chaque station. Les résultats sont consignés dans les tableaux et illustrés par les graphiques correspondants comme suit :

Station de Bamandil : Les données synthétisées dans le Tableau III.1 et tableau III.2 ont permis de générer la courbe de la Figure III.1 et Figure III.2.

Station de Gharbouz : Les statistiques présentées dans le Tableau III.6 et Tableau III.7 sont représentées par la courbe de la Figure II.5 et Figure II.6.

Station de Ziaina : Le bilan consigné dans le Tableau III.10 et Tableau III.11 a servi de base pour tracer la courbe de la Figure III.10 et Figure III.11.

Chaque courbe de Pareto a été construite selon les paramètres suivants :

En abscisses : le pourcentage cumulé du nombre de services de maintenance.

En ordonnées : le pourcentage cumulé du nombre d'interventions réalisées.

Cette analyse comparative permet de distinguer les services appartenant à la Classe A, dits "services vitaux", qui concentrent la majorité des pannes.

Ces résultats constituent un outil d'aide à la décision essentiel pour optimiser la planification de la maintenance préventive et améliorer la disponibilité des installations de déminéralisation

III.3 La station de Bamandil

Les arrêts par équipements sont données par le tableau III.1 .

Tableau III.1 : Équipements en fonction du temps d'arrêt.

Équipement	Temps d'arrêt (h)
Pompe immergée	23
Pompe rejet	14
Pompe intermédiaire	9
Clapet anti-retour	5
Pompe BP	4
Pompe HP	3
Défaillance des capteurs	2
Coupure d'électricité	1

III.3.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt

Tableau III.2 : Cumul des temps d'arrêt et pourcentages.

Equipement	Temps d'arrêt (H)	Cumul Temps d'arrêt	% Cumul D.I	Range	Cumul Range	% Cumul Range
Pompe immergée	23	23	38	1	1	13
Pompe rejet	14	37	60	1	2	25
Pompe Intermédiaire	9	46	75	1	3	38
Clapet anti retour	5	51	84	1	4	50
Pompe. BP	4	55	90	1	5	63
Pompe. HP	3	58	95	1	6	75
Défaillance des capteurs	2	60	98	1	7	88
Coupure d'électricité	1	61	100	1	8	100

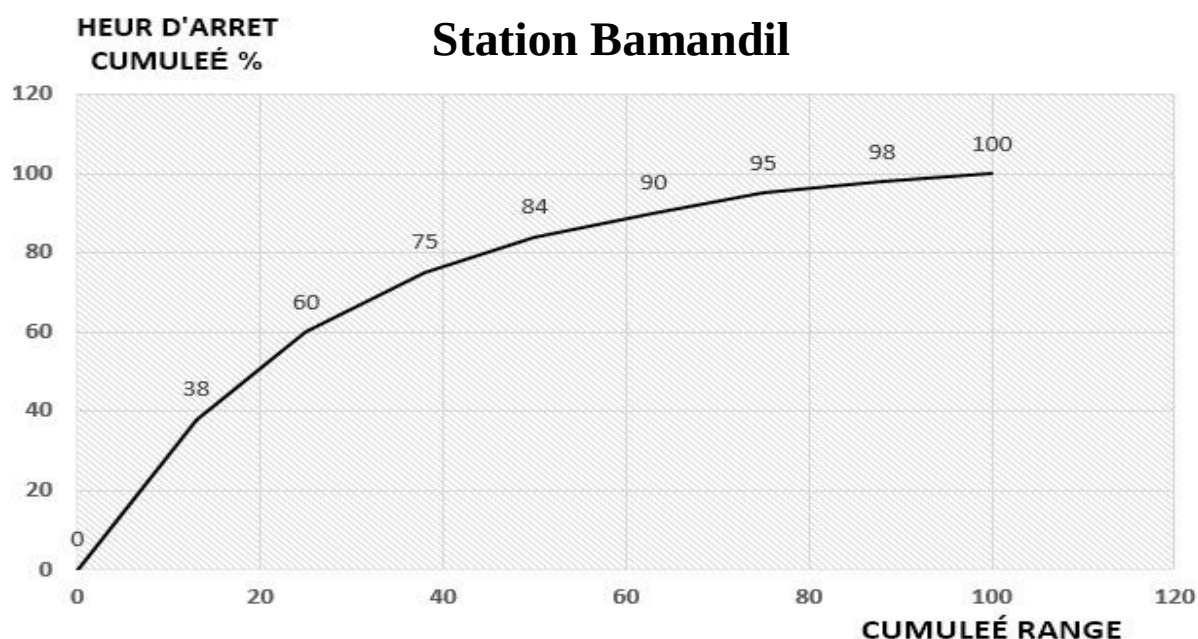


Figure III.1 : Courbe la méthode ABC représente.

Avant de faire une interprétation de la courbe, il est judicieux de calculer l'indice de discrimination ou bien l'indice de Gini, qui permet de déterminer, avec l'aide du graphique, si le critère retenu est pertinent, et donc de savoir s'il faut poursuivre l'étude. L'indice est symbolisé par le signe γ (gamma). Il doit être supérieur à 0.6 pour montrer que l'étude est intéressante. A partir de Tableau III.3, à été calculé l'indice γ par la formule

on détermine γ graphiquement comme suit : $\gamma = AC/AB = 0.67$

Les valeurs de γ se rapprochent par les deux méthodes, et puisque γ est nettement supérieur à 0.6, le critère retenu des nombres interventions est pertinent, et notre étude est intéressante. A partir tableau on choisir zone 2 A=20% B=30% C= 50% .

Tableau III.3 : Répartition des classes en fonction ratio de discrimination.

Valeur du ratio	Zone	A	B	C
$1 > RD \geq 0.90$	1	10	10	80
$0.90 > RD \geq 0.85$	2	10	20	70
$0.85 > RD \geq 0.75$	3	20	20	60
$0.75 > RD \geq 0.65$	4	20	30	50
$0.65 > RD$	5	Non interprétable		

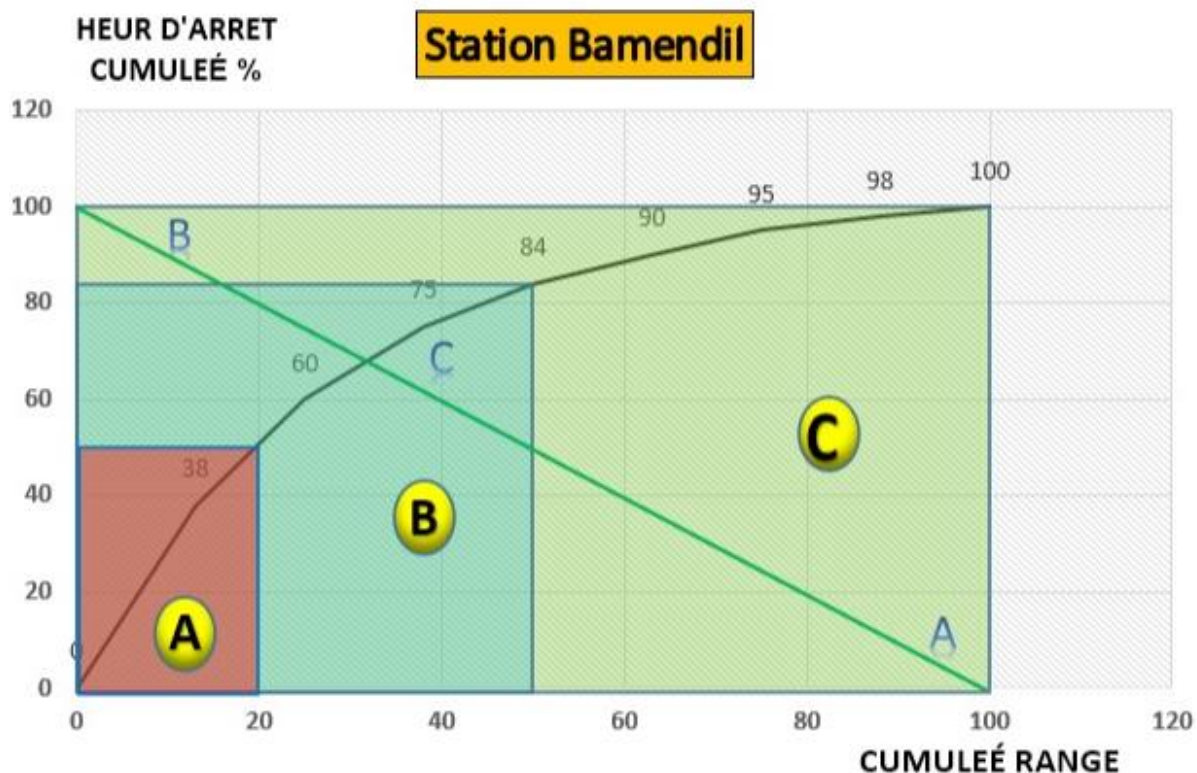


Figure III.2 : Représentation le classement courbe ABC.

III.3.2 Interprétation de la courbe

Les équipements de la station ont été classés selon leur impact sur les temps d'arrêt comme suit :

Zone A : représente 20% de l'ensemble des équipements (pompe immergée), ils sont responsables de 49% des temps d'arrêt total. Ce sont des équipements critiques qui nécessitent une maintenance préventive intensive.

Zone B : représente une part intermédiaire de 30% des équipements (Pompe intermédiaire, Pompe rejet et Clapet anti retour) responsable de 35% des temps d'arrêt. Cette catégorie nécessite un suivi périodique régulier.

Zone C : se compose des éléments d'importance secondaire, représentant 50% des équipements mais ne contribuant qu'à 16% des temps d'arrêt

III.3.3 Collecte et exploitation des données de maintenance

Cette étude s'appuie sur l'analyse des données extraites des registres de maintenance manuels de la station, couvrant une période d'exploitation d'une année complète. En l'absence d'un système GMAO, nous avons procédé à un dépouillement rigoureux de ces archives pour recenser les pannes et les temps d'arrêt des équipements.

III.3.4 Récapitulatif

L'application de la classification (ABC) au système de pompage permet de définir les priorités ; ainsi, la pompe immergée est classée en zone A en raison de son rôle vital dans la continuité de l'alimentation en eau. Ce type d'équipement nécessite une surveillance continue de l'intensité du courant et de la pression, ainsi qu'une maintenance préventive périodique afin de prévenir le grillage ou l'usure mécanique. En revanche, les accessoires simples se classent dans les zones B et C, ce qui permet d'orienter les ressources financières et techniques vers la protection du moteur immergé pour garantir la durée de vie la plus longue possible.

L'analyse a été focalisée sur la pompe immergée en tant qu'élément critique de la zone A ; à cet effet, il est indispensable d'étudier les défaillances courantes telles que le phénomène de cavitation ou les défauts d'isolement électrique. Dans ce contexte, j'expliquerai les composants opérationnels de cette pompe ainsi que les symptômes de ses pannes.

III.3.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A

Analyse des défaillances des pompes immergées

Le système de pompage constitue l'élément moteur essentiel du processus de dessalement. L'analyse rigoureuse des registres de maintenance ainsi que les diagnostics visuels in situ ont permis d'identifier et de caractériser les modes de défaillance les plus récurrents.

a. Cavitation:

Appears as high noise (gravel sound) due to vapor bubbles at the pump inlet, often due to a drop in suction pressure (NPSH) or an increase in temperature.

La partie endommagée est la turbine

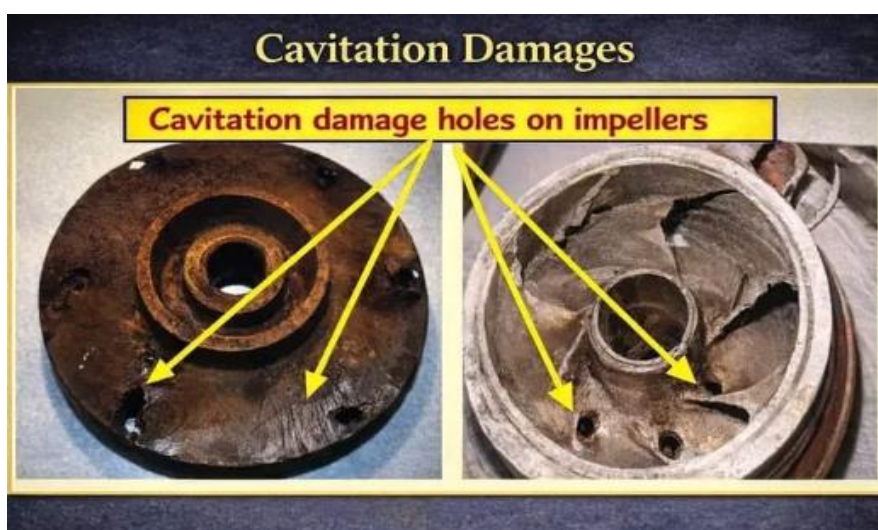


Figure III.3 : Érosion la turbine due au phénomène de cavitation.

b. Défaillance de la garniture mécanique :

Détérioration ou dommage des joints et des barrières mécaniques, entraînant une fuite du fluide contenu au niveau de l'arbre de rotation.



Figure III. 4 : Vue du joint d'étanchéité sur la flasque.

III. 3.5 Calcul indicateurs de maintenance dans la station de Bamandil

Tableau III. 4 : Services de maintenance en fonction du nombre de pannes.

<i>Equipement</i>	<i>Temps d'arrêt(H)</i>	<i>Nombre de panne</i>
Pompe immergée	23	1
Pompe rejet	14	2
Pompe Intermédiaire	9	3
Clapet anti retour	5	2
Pompe BP	4	1
Pompe HP	3	1
Défaillance des capteurs	2	2
Coupure d'électricité	1	3

a. Temps moyen entre pannes (MTBF)

$$\text{MTBF} = (\sum \text{Temps de Fonctionnement}) / (\text{Nombre de pannes})$$

$MTBF = (8760 - \text{temps d'arrêt}) / (\text{nombre de pannes})$

Le tableau suivant résume les résultats des calculs des indicateurs de maintenance pour chaque équipement :

Tableau III.5 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système.

Equipement	Temps d'arrêt (H)	Nombre de panne
Pompe immergée	23	1
Pompe rejet	14	2
Pompe Intermédiaire	9	3
Clapet anti retour	5	2
Pompe BP	4	1
Pompe HP	3	1
Défaillance des capteurs	2	2
Coupure d'électricité	1	3

b. Calcul du MTTR global du système

Puisque le système est composé de plusieurs équipements en série, le Temps Moyen de Réparation global (MTTR global) représente le rapport entre le temps total d'arrêt de production et le nombre total de pannes enregistrées pour l'ensemble des composants.

$$MTTR_{global} = \frac{\sum \text{temps d'arrêt}}{\sum \text{Nombre de pannes}}$$

D'après les données de notre étude (Tableau III.5) :

$$MTTR = \frac{23+14+9+5+4+3+2+1}{1+2+3+2+1+1+2+3} = \frac{61}{15} = 4.07h$$

c. Calcul du MTBF global du système

$$MTBF_{global} = \frac{\sum \text{Temps de fonctionnement total}}{\sum \text{Nombre de total}}$$

Application numérique :

$$MTBF_{global} = \frac{8760-61}{15} = 578.6h$$

d. Calcul de la disponibilité globale du système (D)

$$D_{global} = MTBF_{global} / (MTBF_{global} + MTTR_{global})$$

Application numérique :

$$D_{global} = \frac{578.6}{578.6 + 4.07} = 0.9930 = 99.30\%$$

III.4 La station de Gharbouz

Les arrêts des équipements de la station de Gharbouz sont donnés par le tableau III.6.

Tableau III.6 : Equipements en fonction temps d'arrêt.

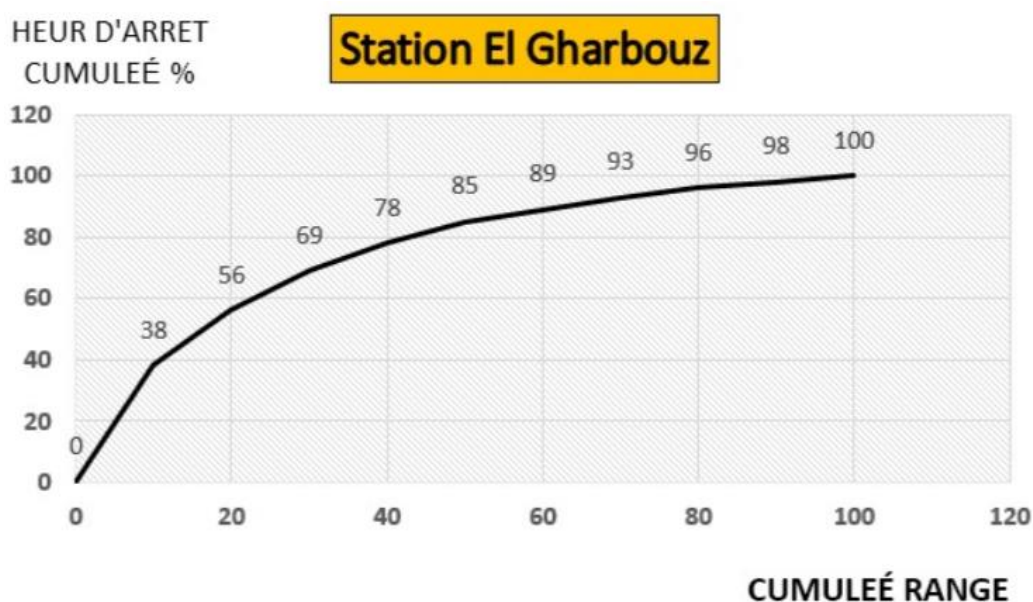
Equipement	Temps d'arrêt(H)
Pompe immergée	42
Pompe Rejet	21
Pompe Intermédiaire	14
Pompe BP	10
Clapet anti retour	8
Défaillance des capteurs	5
Pompe HP	4
PLS	4
Épuisement du réservoir d'anti-tartre	2
Coupure d'électricité	2

III.4.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt

De la même manière on a collecté temps d'arrêt de chaque service de maintenance, on a classé selon temps d'arrêt le tableau III.6 se présente la cumulation temps d'arrêt en fonction range.

Tableau III.7 : Cumulation de temps d'arrêt des équipements en fonction de range.

Equipement	Temps d'arrêt (H)	Cumul Temps d'arrêt	%Cumul D.I	Range	Cumul Range	% Cumul Range
Pompe immergée	42	42	38	1	1	10
Pompe Rejet	21	63	56	1	2	20
Pompe Intermédiaire	14	77	69	1	3	30
Pompe BP	10	87	78	1	4	40
Clapet anti retour	8	95	85	1	5	50
Défaillance des capteurs	5	100	89	1	6	60
Pompe HP	4	104	93	1	7	70
PLS	4	108	96	1	8	80
Épuisement du réservoir d'anti-tartre	2	110	98	1	9	90
Coupure d'électricité	2	112	100	1	10	100

**Figure III. 5 :** Courbe la méthode ABC représente le nombre.

De la même manière on a précédemment déterminé γ graphiquement comme suit :

$$\gamma = AC/AB = 0.70$$

Les valeurs de γ se rapprochent par les deux méthodes, et puisque γ est nettement supérieur à 0.6, le critère retenu des nombres interventions est pertinent, et notre étude est intéressante. A partir tableau on choisir zone 2. A=20% B=30% C= 50%.

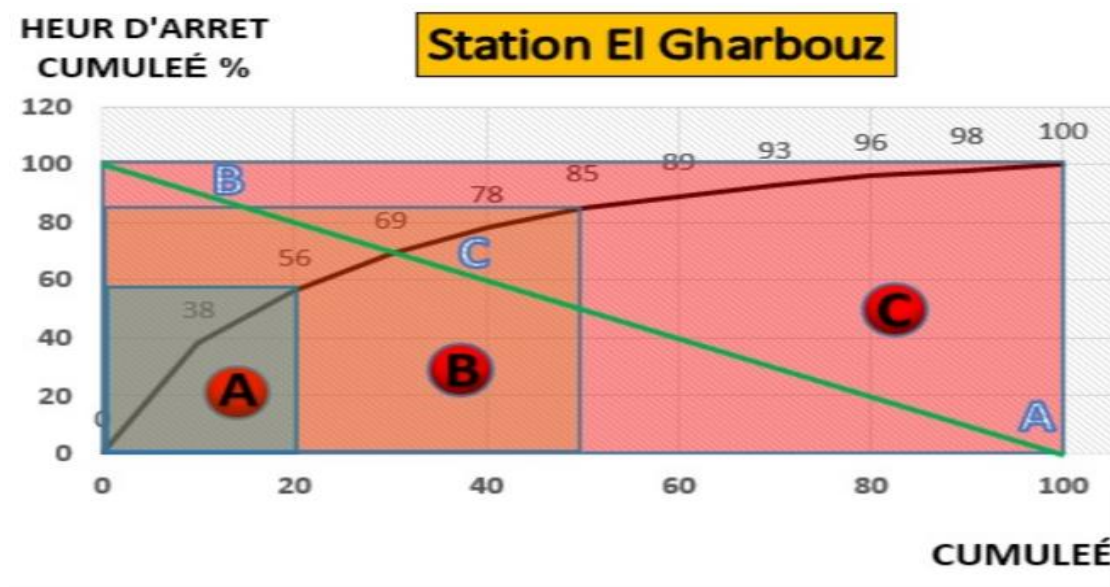


Figure III. 6 : Représentation le classement courbe ABC.

III.4.2 Interprétation de la courbe

Zone A : représente 20% de l'ensemble des équipements (Pompe Rejet et Pompe immergée) , ils sont responsables de 55% des temps d'arrêt total. Ce sont des équipements critiques qui nécessitent une maintenance préventive intensive.

Zone B : représente une part intermédiaire de 30% des équipements (Pompe BP et Clapet anti retour,Pompe Intermédiaire) , responsable de 29% des temps d'arrêt. Cette catégorie nécessite un suivi périodique régulier.

Zone C : se compose des éléments d'importance secondaire, représentant 50% des équipements mais ne contribuant qu'à 16% des temps d'arrêt.

III.4.3 Récapitulatif

L'application de la méthode ABC classe la pompe immergée et la pompe de rejet en zone A, en raison de leur rôle indispensable à la continuité du cycle de pompage et de traitement. Ces deux équipements critiques exigent une surveillance rigoureuse de l'intensité et de la pression, ainsi qu'une maintenance préventive systématique pour prévenir le grillage ou l'usure mécanique et éviter tout arrêt de production.

Le focus de cette étude porte ainsi sur ces deux unités de la zone A, afin d'analyser leurs défaillances récurrentes, telles que la cavitation, l'usure des composants ou les défauts électriques, dans le but d'optimiser leur disponibilité opérationnelle.

III.4.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A

Sur la base du constat sur site et de l'analyse technique des systèmes de pompage, notamment l'examen de la pompe de rejet et de la pompe immergée, il a été révélé une détérioration notable de l'état mécanique des équipements due à des conditions de fonctionnement sévères. Cela se manifeste clairement par les aspects suivants :

- a) Corrosion et Érosion du corps de la pompe :** Les parois internes subissent un amincissement et une perte d'épaisseur sous l'effet de la salinité de l'eau et du frottement des particules sableuses, ce qui fragilise la structure externe.



Figure III. 7 : Corrosion et érosion du corps de la pompe.

- b) **Usure de l'arbre** : Une usure résultant du frottement continu ou des vibrations anormales, pouvant mener, à des stades avancés, à la rupture de l'arbre et à l'arrêt complet du moteur.



Figure III .8 : Érosion d'une partie de l'arbre de la pompe.

- c) **Phénomène de Cavitation** : Considéré comme l'une des défaillances hydrauliques les plus critiques, ce phénomène provoque une érosion (piqûres) des composants internes et la formation de cavités dans les turbines, suite à l'implosion des bulles de vapeur au sein du fluide.



Figure III. 9 : Dégâts matériels causés par le phénomène de cavitation sur une turbine.

III.4.5 Calcul et analyse des indicateurs de maintenance

Tableau III. 8 : Services de maintenance en fonction du nombre de pannes.

Équipement	Temps d'arrêt(H)	Nombre de panne
Pompe immergée	42	2
Pompe rejet	21	3
Pompe Intermédiaire	14	4
Pompe BP	10	2
Clap anti R	8	3
Défaillance des capteurs	5	2
Pompe HP	4	1
PLS	4	1
Épuisement du réservoir d'antitartre	2	1
Coupure d'électricité	2	4

Tableau III. 9 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système.

Équipement	Temps d'arrêt (H)	Nombre de panne
Pompe immergée	42	2
Pompe rejet	21	3
Pompe Intermédiaire	14	4
Pompe BP	10	2
Clap anti R	8	3
Défaillance des capteurs	5	2
Pompe HP	4	1
PLS	4	1
Épuisement du réservoir d'antitartre	2	1
Coupure d'électricité	2	4

Calcul du MTBF global

$$MTBF_{global} = (8760 - 112)/23 = 376 \text{ h}$$

Calcul de la disponibilité globale (D)

$$D_{global} = 376 / (376 + 4.87 = 98.72\%)$$

III.5 La station de Ziaina

Les arrêts des équipements de la station de Ziaina sont donnés par le tableau III.10.

Tableau III. 10 : Equipements en fonction temps d'arrêt.

Equipement	Temps d'arrêt (H)
Pompe immergée	280
Pompe Rejet	25
Pompe Intermédiaire	19
Clapet anti- retour	14
Pompe BP	12
Nettoyage du réservoir	11
Défaillance des capteurs	7
Pompe HP	7
Filtre cartouche	6
Épuisement du réservoir d'antitartre	6
CIP	6
Coupure d'électricité	2

III.5.1 Classification des équipements selon le temps d'arrêt

De la même manière on a collecté temps d'arrêt de chaque service de maintenance, on a classé selon temps d'arrêt le tableau III.10 se présente la cumulation temps d'arrêt en fonction range.

Tableau III. 11 : Cumulation de temps d'arrêt des équipements en fonction de range.

Equipment	Temps d'arrêt (H)	Cumul Temps d'arrêt	%Cumul D.I	Range	Cumul Range	% Cumul Range
Pompe immergée	280	280	71	1	1	8
Pompe. Rejet	25	305	77	1	2	17
Pompe Intermédiaire	19	324	82	1	3	25
Clapet anti-retour	14	338	86	1	4	33
Pompe BP	12	350	89	1	5	42
Nettoyage du réservoir	11	361	91	1	6	50

Défaillance des capteurs	7	368	93	1	7	58
Pompe HP	7	375	95	1	8	67
Filter cartouche	6	381	96	1	9	75
Épuisement du réservoir d'antitartre	6	387	98	1	10	83
CIP	6	393	99	1	11	92
Coupure d'électricité	2	395	100	1	12	100

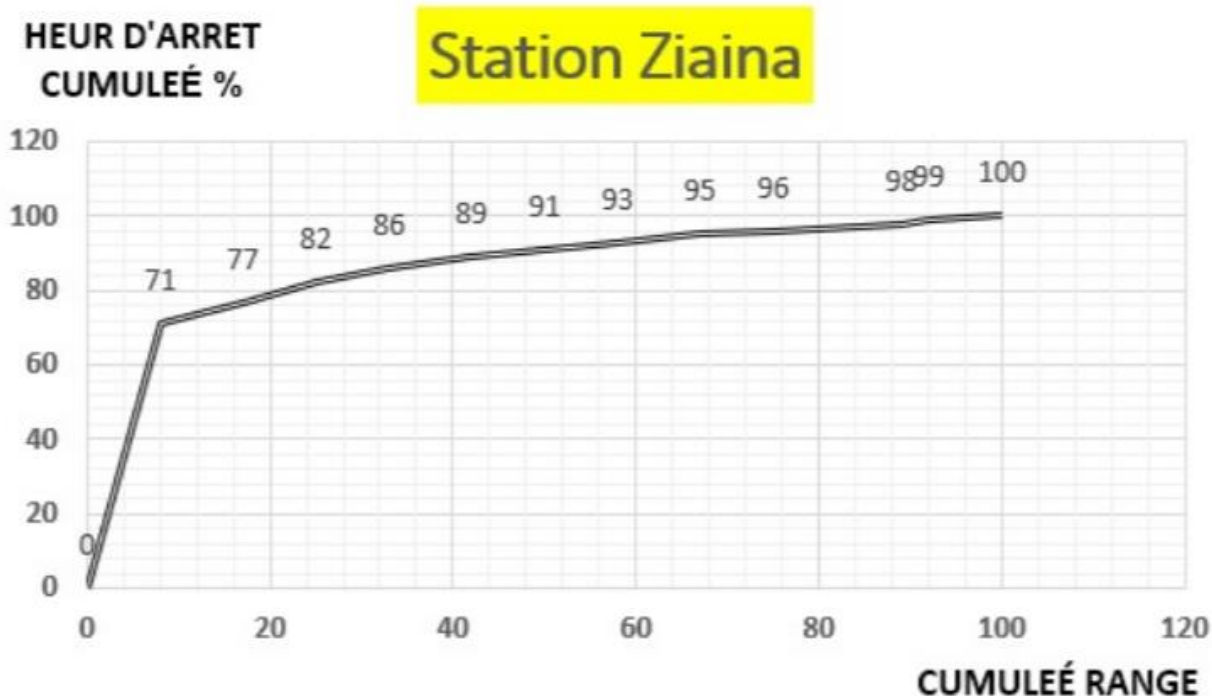


Figure III.10 : Courbe la méthode ABC.

De la même manière on détermine γ graphiquement comme suit :

$$\gamma = AC/AB = 0.79$$

Les valeurs de γ se rapprochent par les deux méthodes, et puisque γ est nettement supérieur à 0.6, le critère retenu des nombres interventions est pertinent, et notre étude est intéressante. A partir tableau on choisir zone 3. A=20% B=20% C= 60%.

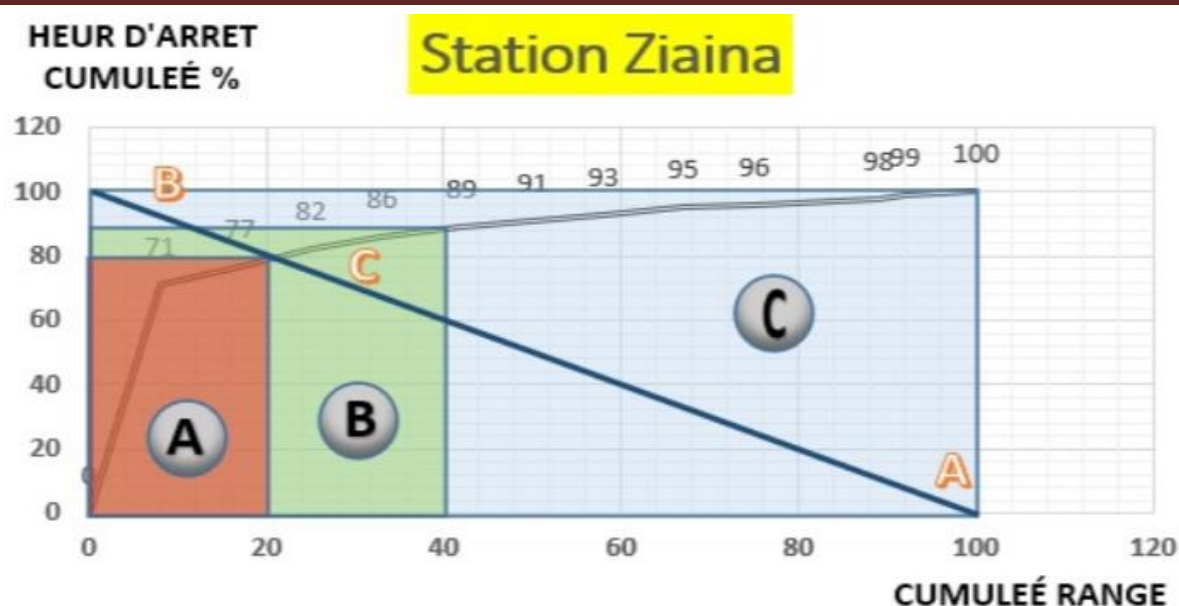


Figure III. 11 : Représentation le classement courbe ABC.

III.5.2 Interprétation de la courbe

Les équipements de maintenance sont classés selon leur des temps d'arrêt comme indique Figure III.10, ils ont été identifiés comme suit :

Zone A : les équipements pompe rejet et pompe immergée classé dans la zone A constituent 20% de l'ensemble des équipements, cependant, raison de leur impact critique, ils sont responsables 80% des temps d'arrêt total. Leur bon fonctionnement est essentiel, car ils influencent directement la performance des employés et, par conséquent, le rendement global de l'entreprise.

Zone B : une part intermédiaire les équipements Pompe Intermédiaire, Pompe BP et clape anti retour représentent environ 20% responsable 12% des Temps d'arrêt des équipements.

Zone C : IL se compose des éléments d'importance faible, représentant 60 % du total des équipements contribuant à environ 8 % temps d'arrêt.

III.5.3 Récapitulatif

L'application de la méthode ABC à la station de Ziaina a permis d'identifier les équipements critiques de zone A, notamment la pompe de rejet et la pompe intermédiaire, qui représentent 20% des équipements mais sont responsables de 80% des temps d'arrêt total. Ces deux équipements exigent une surveillance rigoureuse et une maintenance préventive systématique.

Les équipements de zone B (fuites et clapet anti retour) représentent 20% des équipements avec 12% des temps d'arrêt, nécessitant un suivi périodique régulier. Quant à la zone C, elle regroupe 60% des équipements ne contribuant qu'à 8% des arrêts, ce qui confirme leur importance secondaire dans la hiérarchisation des interventions de maintenance.

III.5.4 Analyse de systèmes défaillants de zone A

Les pompes de rejet et les pompes immergées de la Zone A sont considérées comme des équipements critiques opérant dans un environnement particulièrement hostile, caractérisé par une salinité élevée et des températures d'eau extrêmes. Ces conditions aggravent les contraintes mécaniques et thermiques, menant à une dégradation accélérée de leur état. D'après l'analyse des registres de maintenance, les principaux modes de défaillance identifiés sont les suivants :

- a) **Défaillance des roulements** : Ces composants sont essentiels pour assurer la rotation fluide et régulière de l'arbre de la pompe. Sous l'effet des hautes températures, les propriétés de lubrification se dégradent, entraînant une usure prématurée.

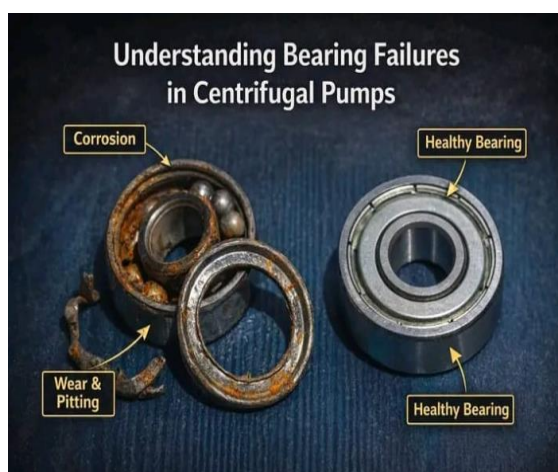


Figure III.12 : Comparaison entre un roulement sain.

- b) **Flambage ou déformation de l'arbre** : Ce phénomène résulte généralement de vibrations excessives ou de contraintes mécaniques déséquilibrées, provoquant une flexion résiduelle et une perte de l'alignement axial.



Figure III.13 : Flambage ou déformation résiduelle de l'arbre.

- c) **Grillage du bobinage électrique :** Conséquence directe d'une surcharge électrique ou d'un défaut d'isolement. En milieu salin et chaud, l'efficacité du refroidissement diminue, provoquant une élévation thermique critique qui mène à la destruction irréversible des enroulements.



Figure III. 14 : Grillage des bobinages du moteur électrique.

III.5.5 Calcul et analyse des indicateurs de maintenance

En utilisant les mêmes formules définies en III.12, nous calculons directement les indicateurs de maintenance pour la station Ziaina.

Tableau III. 12 : Indicateurs de fiabilité et de maintenance des équipements du système.

Équipement	Temps d'arrêt (H)	Nombre de panne
Pompe immergée	280	3
Pompe rejet	25	5
Pompe Intermédiaire	19	4
Clap anti R	14	4
Pompe BP	12	3
Nettoyage du réservoir	11	1
Défaillance des capteurs	7	3
Pompe HP	7	2
Filtre cartouche	6	1
Épuisement du réservoir d'antitartre	6	2
CIP	6	1
Coupure d'électricité	2	4

a. Calcul du MTTR global

$$MTTR_{global} = (280+25+19+14+12+11+7+7+6+6+6+2)/3+5+4+4+3+1+3+2+1+2+1+4)/33$$

$$MTTR_{global} = 395/33$$

$$MTTR_{global} = 11.97h$$

b. Calcul du MTBF global

$$MTBF_{global} = (8760 - 395)/33$$

$$MTBF_{global} = 253.48$$

c. Calcul de la disponibilité globale (D)

$$D_{global} = 253.48/(253.48 + 11.97)=0.95.49=95.49\%$$

III.6 Analyse comparative

Le tableau suivant présente une synthèse comparative des principaux indicateurs de fiabilité et de maintenance calculés pour les trois stations :

Tableau III. 13 Synthèse comparative des indicateurs de fiabilité

Indicateur	Station Bamandil	Station Gharbouz	Station Ziaina
Nombre d'équipements	8	10	12
Nombre total de pannes	15	23	33
Temps d'arrêt total (h)	61	112	395
MTBF global (h)	578.6	376	253.48
MTTR global (h)	4.07	4.87	11.97
Disponibilité D (%)	99.30%	98.72%	95.49%

L'analyse comparative des trois stations révèle des disparités significatives dans leurs performances de maintenance.

Sur le plan de la classification ABC :

- Dans la station Bamandil, la pompe immergée représente seule la zone A avec 49% du temps d'arrêt total, accompagnée d'une disponibilité de 99.30%, un MTBF de 578.6h et un MTTR de 4.07h.
- Dans la station Gharbouz, la zone A regroupe la pompe immergée et la pompe de rejet, responsables de 55% des temps d'arrêt, avec une disponibilité de 98.72%, un MTBF de 376h et un MTTR de 4.87h.
- La station Ziaina enregistre la concentration d'arrêts la plus élevée en zone A, où la pompe immergée et la pompe de rejet atteignent 80% des temps d'arrêt total, avec une disponibilité de 95.49%, un MTBF de 253.48h et un MTTR de 11.97h, soit le triple de la station Bamandil.

III.7 Conclusion

Ces résultats confirment que la pompe immergée et la pompe de rejet constituent les maillons les plus critiques dans les trois stations. Les indicateurs de la station Ziaina révèlent un vieillissement avancé des équipements et un besoin urgent de révision du plan de maintenance, en accordant la priorité aux équipements de zone A dans chaque station.

III.8 Recommandations

Sur la base des résultats obtenus et de l'analyse comparative des trois stations, les recommandations suivantes sont proposées :

- **Pour la station de Bamandil :**
 - Maintenir le plan de maintenance préventive actuel qui a prouvé son efficacité ;

- Assurer une surveillance continue de la pompe immergée (zone A) en contrôlant régulièrement l'intensité du courant et la pression ;
- Planifier des inspections périodiques des équipements de zone B et C afin de prévenir toute dégradation ;
- Mettre en place un système GMAO pour assurer le suivi des défaillances et la planification des interventions de maintenance préventive de manière organisée et précise.
- **Pour la station de Gharbouz :**
 - Renforcer la maintenance préventive de la pompe immergée et de la pompe de rejet (zone A) qui concentrent 55% des temps d'arrêt ;
 - Réduire les délais d'intervention en constituant un stock de pièces de rechange pour les équipements critiques ;
 - Mettre en place un suivi périodique rigoureux des capteurs et du clapet anti-retour (zone B) ;
 - Adopter un système GMAO pour enregistrer et analyser les défaillances récurrentes, afin d'optimiser la programmation des interventions et réduire les temps d'arrêt.
- **Pour la station de Ziaina :**
 - Engager un programme de réhabilitation urgent des équipements de zone A, notamment la pompe immergée et la pompe de rejet qui représentent 80% des temps d'arrêt ;
 - Réduire le MTTR actuel (11.97h) en améliorant la disponibilité des techniciens et des pièces de rechange ;
 - Installer un système de surveillance en temps réel pour détecter les défaillances avant qu'elles n'entraînent des arrêts prolongés ;
 - Envisager le remplacement des équipements vieillissants pour améliorer la fiabilité globale du système ;
 - Introduire en urgence un système GMAO pour pallier l'absence d'une base de données organisée, et assurer le suivi des indicateurs MTBF, MTTR et disponibilité D en temps réel.

- **Recommandation commune aux trois stations :**

Il est fortement recommandé de généraliser l'utilisation du système GMAO dans toutes les stations, afin de garantir un enregistrement systématique des données de maintenance et une amélioration continue des indicateurs de performance.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'analyse comparative par la méthode ABC a permis de cibler la Zone A (systèmes de pompage) comme la classe la plus critique dans les trois stations d'Ouargla (Bamandil, Gharbouz et Ziaina), où les défaillances sont directement liées à la forte salinité et à l'agressivité de l'eau.

La méthodologie repose sur la méthode ABC pour classer les équipements selon leur impact sur les temps d'arrêt, ainsi que sur le calcul des indicateurs de fiabilité (MTBF, MTTR, disponibilité) à partir de données annuelles.

Principaux résultats :

Station de Bamandil : meilleure performance (disponibilité 99,30 %, MTBF 578,6 h, MTTR 4,07 h). La pompe immergée (zone A) concentre 49 % des arrêts.

Station de Gharbouz : disponibilité 98,72 %, MTBF 376 h, MTTR 4,87 h. Les pompes immergée et de rejet (zone A) représentent 55 % des arrêts.

Station de Ziaina : performance la plus faible (disponibilité 95,49 %, MTBF 253,48 h, MTTR 11,97 h). Les mêmes équipements critiques (zone A) totalisent 80 % des arrêts, en raison des conditions sévères (température élevée jusqu'à 60 °C, forte salinité).

Recommandations : renforcer la maintenance préventive des pompes critiques, installer des pompes de secours, adopter un système GMAO, et réhabiliter d'urgence les équipements de la station de Ziaina.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Algérienne des Eaux (ADE). (2008). *Mémoire technique de marché : Étude, réalisation, exploitation et assistance pour la maintenance de neuf stations de déminéralisation d'eau à Ouargla*. Alger : ADE.
- [2] Algérienne des Eaux (ADE). (2015). *Rapport du projet : Étude, réalisation, exploitation et assistance pour la maintenance de neuf stations de déminéralisation d'eau à Ouargla*. Alger : ADE.
- [3] Algérienne des Eaux (ADE) – Direction d'Ouargla. (2022). *Données d'exploitation et historique de mise en service des stations de déminéralisation de Gharbouz, Ziaina et Bamendil* (communication personnelle).
- [4] Aumassip, G. (1971). *Néolithique sans poterie de la région de l'oued Mya*. Alger : SNED.
- [5] Bliefert, C., & Perraud, R. (2001). *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets*. Paris : Tec & Doc.
- [6] Bonard, & Gardel. (2004). *Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation*. Lausanne, Suisse.
- [7] Boutelli, H. (2011). *Salinité des eaux et des sols au niveau de la sebkha de Bamendil : caractérisation et conséquences sur l'environnement* (Mémoire de master). Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [8] Danis, P. (2003). *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J2700.
- [9] Degrémont. (2005). *Mémento technique de l'eau* (10e éd.). Rueil-Malmaison : Tec & Doc.
- [10] Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDA). (2002). *Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau* (Document technique n°14).
- [11] Gaid, K., & Tréal, Y. (2007). Le dessalement des eaux par osmose inverse : l'expérience de Véolia Water. *Desalination*, 203, 1–14.
- [12] Kruithof, J., Kamp, P. C., & Folmer, H. (2001). Membrane integrity monitoring at the UF/RO Heemskerk plant. In *Proceedings of the Membrane Technology Conference*. Texas, USA.
- [13] Lozier, J. C., Jones, G., & Bellamy, W. (1997). Integrated membrane treatment in Alaska. *Journal AWWA*, 89(10), 50–64.
- [14] Masschelein, W. J. (1996). *Processus unitaires du traitement de l'eau potable*. Paris.
- [15] Maurel, A. (1993). *Techniques séparatives à membranes*. Techniques de l'Ingénieur, J2790.
- [16] Maurel, A. (2001). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres* (2e éd.). Paris : Tec & Doc.
- [17] Maurel, A. (2006). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. Paris : Tec & Doc.

-
- [18] Office National de la Météorologie (ONM). (2016). *Données climatologiques de la station de Ouargla (2006–2015)*. Alger.
- [19] Office National des Statistiques (ONS). (2008). *Guide statistique de la wilaya de Ouargla*. Alger.
- [20] Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture (UNESCO). (1972). *Étude des ressources en eau du Sahara septentrional*. Paris.
- [21] Rodier, J. (1984). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (7e éd.). Paris : Dunod.
- [22] Rouvillois-Brigol, M. (1975). *Le pays de Ouargla : organisation d'un espace rural en milieu désertique*. Paris : Université Paris-Sorbonne.
- [23] Wilf, M. (2005). Optimization of seawater RO system design. *Desalination*, 173, 1–12

Résumé

La région d'Ouargla, située dans le Sahara algérien, est confrontée à une pénurie d'eau potable en raison de la forte salinité des eaux souterraines (environ 3 g/L). Pour y remédier, neuf stations de déminéralisation par osmose inverse ont été construites. Cette étude analyse la maintenance de trois stations représentatives : Gharbouz, Ziaina et Bamandil.

Pour remédier à cette problématique, nous recommandons une stratégie basée sur une maintenance préventive intensive combinée à l'intégration d'une pompe de secours (en standby) dans le système d'exploitation. Cette approche stratégique permettra de :

Assurer la continuité de service (pompage d'eau) et éliminer complètement les temps d'arrêt imprévus lors d'une panne ; Augmenter la durée de vie des pompes grâce à l'alternance de fonctionnement entre la pompe principale et la pompe de secours ; Réduire les coûts globaux de maintenance et rationaliser la gestion du stock des pièces de rechange essentielles.

Mots clé : Déminéralisation, Eau potable, osmose inverse et la maintenance.

ملخص:

تواجه منطقة ورقلة، الواقعة في الصحراء الجزائرية، نقصاً في مياه الشرب نتيجة ارتفاع ملوحة المياه الجوفية (حوالي 3 غ/لتر). ولمعالجة هذه المشكلة، تم إنشاء تسع محطات لتحلية المياه بتقنية التناضح العكسي. تُحلل هذه الدراسة صيانة ثلاث محطات نموذجية: غربوز، وزيانا، وبمنديل. ولحل هذه المشكلة، نوصي باستراتيجية تعتمد على الصيانة الوقائية المكثفة، بالإضافة إلى دمج مضخة احتياطية في نظام التشغيل. سيضمن هذا النهج الاستراتيجي ما يلي: ضمان استمرارية الخدمة (ضخ المياه) والقضاء التام على فترات التوقف غير المخطط لها أثناء الأعطال؛ زيادة عمر المضخات من خلال التشغيل المتناوب بين المضخة الرئيسية والاحتياطية؛ خفض تكاليف الصيانة الإجمالية وتبسيط إدارة مخزون قطع الغيار الأساسية. **الكلمات المفتاحية:** إزالة المعادن، مياه الشرب، التناضح العكسي، الصيانة.

Abstract:

The Ouargla region, located in the Algerian Sahara, faces a drinking water shortage due to the high salinity of its groundwater (approximately 3 g/L). To address this, nine reverse osmosis demineralization plants have been built. This study analyzes the maintenance of three representative plants: Gharbouz, Ziaina, and Bamandil. To address this issue, we recommend a strategy based on intensive preventive maintenance combined with the integration of a backup (standby) pump into the operating system. This strategic approach will: Ensure continuity of service (water pumping) and completely eliminate unplanned downtime during a breakdown; Increase pump lifespan through alternating operation between the main and backup pumps; Reduce overall maintenance costs and streamline the management of essential spare parts inventory.

Keywords: Demineralization, Drinking water, Reverse osmosis and maintenance.