

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Université KasdiMerbah – Ouargla**  
**Faculté des hydrocarbures, énergies renouvelable et science de la  
terre et l'univers**  
**Département des sciences de la terre et de l'univers**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

**En Vue De L'obtention Du Diplôme De MASTER en Géologie**

**Spécialité : Hydrogéologie**

**THEME**

**Gestion de la qualité des eaux souterraines dans  
la région d'Ouargla en Algérie**

Soutenu publiquement par :

**Maamri Nadjwa**

Devant le jury :

<b>SATOUH Adel</b>	<b>MCA</b>	<b>UKMO</b>	<b>Président</b>
<b>BOUSSAADA Nawel</b>	<b>MCA</b>	<b>UKMO</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOUSELSAL Boualem</b>	<b>Prof.</b>	<b>UKMO</b>	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire : 2024-2025**



# Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidé, soutenu dans les moments difficiles, et accordé la force, le courage et la patience nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur **Bouselsal Boualem**, mon encadreur, pour m'avoir proposé ce sujet de recherche stimulant et pour la qualité de leur encadrement. Leurs remarques pertinentes, leurs connaissances riches et leurs orientations précieuses ont été d'un apport essentiel dans la maturation et la finalisation de ce travail. Je leur suis particulièrement reconnaissant pour le temps qu'ils m'ont généreusement consacré.

Je remercie sincèrement les jurys pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs observations qui ont permis d'enrichir significativement le travail.

Ma gratitude s'étend également à l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, pour leur encadrement académique, leur disponibilité et leurs conseils éclairés tout au long de mon parcours doctoral.

Enfin, j'exprime mes remerciements les plus chaleureux à mes collègues, amis, ainsi qu'à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. Leur soutien, leurs encouragements et leur bienveillance ont été une source précieuse de motivation tout au long de cette aventure scientifique.

## *Résumé*

Ce mémoire porte sur la gestion de la qualité des eaux souterraines dans la région d'Ouargla, située au sud-est de l'Algérie. Bien que la région bénéficie de ressources aquifères importantes, notamment le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire, leur exploitation directe est limitée par une salinité élevée. L'étude comprend une analyse hydrogéologique et hydrochimique des nappes d'eau souterraines, ainsi qu'une évaluation de l'efficacité des stations de déminéralisation installées dans la zone. Les résultats montrent une amélioration notable de la qualité de l'eau traitée, qui devient conforme aux normes de potabilité. Cette étude confirme ainsi l'efficacité des mesures mises en œuvre par les autorités pour assurer une gestion durable de la qualité de l'eau potable.

**Mots clés :** Ouargla, gestion de la qualité, stations de déminéralisation, potable.

## *Abstract :*

This thesis focuses on the management of groundwater quality in the Ouargla region, located in the southeast of Algeria. Although the area benefits from significant aquifer resources, notably the Terminal Complex and the Intercalary Continental, their direct use is limited due to high salinity. The study includes a hydrogeological and hydrochemical analysis of the groundwater aquifers, as well as an evaluation of the effectiveness of the desalination plants installed in the area. The results show a significant improvement in the quality of the treated water, which becomes compliant with drinking water standards. This study thus confirms the effectiveness of the measures implemented by the authorities to ensure sustainable management of drinking water quality.

**Keywords:** Ouargla, quality management, desalination plants, potable.

## **ملخص**

تتناول هذه الرسالة موضوع إدارة جودة المياه الجوفية في منطقة ورقلة الواقعة جنوب شرق الجزائر. على الرغم من توافر موارد مائية جوفية كبيرة في المنطقة، لا سيما المركب النهائي المتداخل القاري، إلا أن الاستغلال المباشر لهذه الموارد محدود بسبب ارتفاع ملوحة المياه. تشمل الدراسة تحليلاً هيدروجيولوجياً وهيدروكيميائياً لمياه الآبار الجوفية، بالإضافة إلى تقييم فعالية محطات إزالة الأملاح التي تم تركيبها في المنطقة. تُظهر النتائج تحسناً ملحوظاً في جودة المياه المعالجة، حيث أصبحت مطابقة لمعايير مياه الشرب. تؤكد هذه الدراسة بذلك فعالية الإجراءات التي اتخذتها الجهات المختصة لضمان إدارة مستدامة لجودة مياه الشرب.

**الكلمات المفتاحية:** ورقلة، إدارة الجودة، محطات إزالة الأملاح، صالحة للشرب.

## Liste des figures

<u>1. Situation géographique</u>	2
<u>Figure 1: Carte de Situation géographique de la région Ouargla</u>	2
<u>Figure.2 La circonscription administrative de la cuvette d'Ouargla.</u>	3
<u>Figure 3. Évolution démographique de la population des communes d'Ouargla</u>	4
<u>Figure 4 : Coupe géomorphologique schématique de la vallée d’Ouargla</u>	6
<u>Figure 5. La variation des précipitations mensuelles</u>	10
<u>Figure 7. Histogramme de la variation de l'évaporation</u>	12
<u>Figure 8. Histogramme de la variation d’insolation moyenne mensuelle</u>	12
<u>Figure 9. Histogramme de la variation d’humidité mensuelle</u>	13
<u>Figure 10. Histogramme de la vitesse du vent dans la cuvette d’Ouargla</u>	14
<u>Figure 11. Coupe géologique (NO-SE) simplifiée à travers les différents ensembles géologiques de l'Algérie</u>	15
<u>Figure 12. Carte géologique montre les affleurements dans le Sahara</u>	17
<u>Figure 13. La carte géologique d'Ouargla</u>	18
<u>Figure 14. La coupe géologique corrélatrice dans la cuvette d'Ouargla</u>	20
<u>Figure 15. Extension des formations du SASS</u>	22
<u>Figure 16. Carte piézométrique de référence du CI</u>	24
<u>Figure 17. Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal</u>	25
<u>Figure 18. Extensions des aquifère de Sahara septentrional</u>	26
<u>Figure 19. Section hydrogéologique à travers le Sahara</u>	27
<u>Figure 20: coupe hydrogéologique schématique dans la cuvette d’Ouargla</u>	28
<u>Figure 21 : Carte piézométrique de la nappe phréatique d’Ouargla</u>	29
<u>Figure 22 : La position des 53 forages de CT avec la légende lithologique. 2)</u>	30
<u>Figure 23: Carte piézométrique de la nappe de Mio-pliocène</u>	32
<u>Figure 24 : Coupe géologique montre la géométrie de CI dans la zone d’étude</u>	33
<u>Figure 25. Histogramme de la variation de l’indice de WQI dans les eaux des nappes d’Ouargla.</u>	41
<u>Figure 26 : diagramme piper des eaux souterraines d’Ouargla.</u>	42
<u>Figure 27. Localisation des stations de déminéralisation d’Ouargla</u>	46
<u>Figure 28: Schéma illustre les compartiments qui composent la station de d'IFRI Gara</u>	48
<u>Figure 29 : Schéma illustre le principe de l’osmose inverse.</u>	50
<u>Figure 30 : les installations de déminéralisation des eaux de la station d’Ifri Gara</u>	52
<u>Figure 31 : Histogramme comparatif de la concentration en calcium dans l’eau brute et traitée.</u>	53

<a href="#"><u>Figure 32: Histogramme comparatif de la concentration en magnésium dans l'eau brute et traitée.</u></a>	53
<a href="#"><u>Figure 33: Histogramme comparatif de la concentration en sodium dans l'eau brute et traitée.</u></a>	54
<a href="#"><u>Figure34 : Histogramme comparatif de la concentration en potassium dans l'eau brute et traitée</u></a>	54
<a href="#"><u>Figure 35: Histogramme comparatif de la concentration en chlorures dans l'eau brute et traitée.</u></a>	55
<a href="#"><u>Figure 36: Histogramme comparatif de la concentration en bicarbonates dans l'eau brute et traitée.</u></a>	56
<a href="#"><u>Figure 37: Histogramme comparatif de la concentration en sulfates dans l'eau brute et traitée</u></a>	56
<a href="#"><u>Figure38 : Histogramme comparatif de la concentration en nitrates dans l'eau brute et traitée.</u></a>	57
<a href="#"><u>Figure39 : Histogramme comparatif CE dans l'eau brute et traitée.</u></a>	57
<a href="#"><u>Figure 40: Histogramme comparatif de TDS dans l'eau brute et traitée.</u></a>	58
<a href="#"><u>Figure 41 : Histogramme comparatif de pH dans l'eau brute et traitée.</u></a>	58
<a href="#"><u>Figure 42: Histogramme comparatif de la dureté totale dans l'eau brute et traitée.</u></a>	59
<a href="#"><u>Figure 43: Histogramme comparatif de l'indice de qualité de l'eau dans l'eau brute et traitée.</u></a>	60

## Liste des tableaux

<a href="#"><u>Tableau 01. La répartition des populations de la wilaya d'Ouargla.</u></a>	3
<a href="#"><u>Tableau 2. La distribution globale des terres dans la wilaya d'Ouargla en 2018.</u></a>	4
<a href="#"><u>Tableau 3. La répartition des entreprises en divers secteurs en 2018.</u></a>	5
<a href="#"><u>Tableau 4. La répartition l'utilisation des ressources mobilisées par commune en 2018</u></a>	7
<a href="#"><u>Tableau 5. Les ouvrages de stockage des eaux châteaux d'eaux et réservoirs.</u></a>	7
<a href="#"><u>Tableau 6: Répartition de consommation d'eau dans la cuvette d'Ouargla</u></a>	7
<a href="#"><u>Tableau 7: Consommation domestique par localité au (2017)</u></a>	8
<a href="#"><u>Tableau 8. Caractéristiques géographiques de station climatique.</u></a>	9
<a href="#"><u>Tableau 9. La répartition mensuelle des précipitations moyennes.</u></a>	10
<a href="#"><u>Tableau 10. La répartition des températures mensuelles (2007-2021).</u></a>	11
<a href="#"><u>Tableau 11. La répartition de l'évaporation mensuelle (2007-2021).</u></a>	11
<a href="#"><u>Tableau 12. La répartition de l'insolation mensuelle (2007-2021).</u></a>	12
<a href="#"><u>Tableau 13. La répartition des humidités mensuelles (2007-2021).</u></a>	13
<a href="#"><u>Tableau 14. La répartition des vents maximaux (2007-2021).</u></a>	14
<a href="#"><u>Tableau 15. Le bilan hydrique de la cuvette d'Ouargla (méthode de Thorntwaite).</u></a>	14
<a href="#"><u>Tableau 16. Données hydrochimiques sur les eaux souterraines d'Ouargla.</u></a>	36
<a href="#"><u>Tableau 17: Evaluation de la potabilité vis-à-vis aux normes de l'OMS 2017</u></a>	38
<a href="#"><u>Tableau 18. Poids relatif des paramètres hydrochimiques.</u></a>	39
<a href="#"><u>Tableau 19. Capacité des stations de déminéralisation d'Ouargla</u></a>	45
<a href="#"><u>Tableau 20: Comparaison des caractéristiques physicochimiques des eaux brutes et traitées avec les normes de potabilité de l'OMS.</u></a>	60

## Sommaire

	Titre	Page
	Dédicace	/
	Remerciement	/
	Résumé/ Abstract/ الملخص	/
	Sommaire/ Liste des tableaux/ Liste des figures	/
	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1. Généralité sur la zone d'étude</b>		
	1. Situation géographique	2
	2. Le contexte socio-économique	3
	2.1. L'évolution de la population	3
	2.2. L'agriculture	4
	2.3. Industrie	5
	3. Géomorphologie de la zone d'étude	5
	4. Les ressources hydriques dans la région d'Ouargla	7
	5. Le réseau hydrographique	8
	5. 1. Oued M'ya	8
	5.2. N'sa et Oued M'zab	9
	6. Le contexte climatique	9
	6.1. Précipitation:	10
	6.2. La temperature	10
	6.3. L'évaporation	11
	6.4. L'insolation	12
	6.5. L'humidité	12
	6.6. Le vent	13
	6.7. Bilan hydrique	14
	7. Contexte géologique	14
	7.1. Evolution tectonique	15
	7.2. Cadre géologique régional	16
	7.3. Paléogéographie	17
	7.4. La géologie locale	18
	7.4.1. La litho-stratigraphie de la cuvette d'Ouargla	19
	8. Conclusion	21
<b>Chapitre 2. Contexte hydrogéologique et hydrochimique</b>		
	1. Introduction	22
	2. Le système d'aquifère du Sahara septentrional (SASS)	22
	2.1. <i>Continental Intercalaire</i>	23
	2.2. <i>Complexe Terminal</i>	24
	3. Présentation du système d'aquifère de la cuvette d'Ouargla	27
	3.1. <i>La nappe phréatique:</i>	28
	3.2. <i>Complexe Terminal (CT) d'Ouargla</i>	29

3.3. <i>La nappe Albienne</i>	33
4. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines d'Ouargla	33
4.1. Échantillonnage et méthodes d'analyse	34
4.2. Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines d'Ouargla	34
4.3. Qualité de l'eau vis-à-vis à la potabilité	36
5. l'indice de la qualité des eaux (WQI) d'Ouargla	39
6. Facies chimique	41
7. Conclusion	42

### Chapitre 3. Gestion du problème de la qualité d'eau

<u>1. Introduction</u>	44
<u>2. Caractéristiques générales du projet de déminéralisation à Ouargla</u>	44
<u>3. Présentation de la station de dessalement d'Irfi Gara</u>	48
<u>3.1. Bâtiment de traitement</u>	48
<u>3.2. Bâtiment de chloration</u>	48
<u>3.3. Laboratoire d'analyse</u>	49
<u>3.4. Atelier d'entretien</u>	49
<u>3.5. Local technique (énergie)</u>	49
<u>3.6. Logement de fonction</u>	49
<u>3.7. Poste de gardiennage</u>	49
<u>3.8. Bâche d'eau</u>	49
<u>3.9. Station de pompage</u>	49
<u>3.10. Château d'eau</u>	50
<u>4. Le technique dessalement d'eau dans la station d'Irfi Gara</u>	50
<u>4.1. Procédés de déminéralisation utilisés en Algérie</u>	50
<u>4.2. Le technique de l'osmose inverse</u>	50
<u>4.3. Les étapes de déminéralisation dans la station</u>	52
<u>4.3.1. Prétraitement</u>	52
<u>4.3.2. Traitement principal : l'osmose inverse</u>	52
<u>4.3.3. Désinfection</u>	52
<u>5. L'évaluation de la qualité d'eau brute et traitée dans les stations de dessalement</u>	53
<u>5.1. Variation de concentration des paramètres physico-chimiques</u>	53
<u>5.2. Évaluation de la potabilité d'eau</u>	60
<u>6. Conclusion</u>	62
<b>Conclusion générale</b> .....	63
<b>Références</b> .....	64

## **Introduction générale**

La région d'Ouargla, bien qu'elle dispose d'importantes réserves en eaux souterraines stockées dans les aquifères du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI), est confrontée à un problème majeur de qualité. Ces nappes présentent une forte salinité et une composition chimique défavorable, ce qui rend leur exploitation directe difficile pour les usages domestiques, agricoles et industriels sans traitement préalable.

Pour faire face à cette problématique, les autorités ont lancé un projet stratégique visant à garantir une eau conforme aux normes de potabilité. Ce projet s'articule autour de la mise en place de neuf stations de déminéralisation réparties dans les différentes zones de la ville d'Ouargla et ses environs. Ces stations sont conçues pour traiter l'eau brute provenant des forages, réduire sa salinité, améliorer ses caractéristiques physico-chimiques et assurer une distribution d'eau répondant aux standards de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Ce mémoire de master vise à diagnostiquer la qualité des eaux souterraines dans la région d'Ouargla et à évaluer les résultats concrets de ce projet, tant sur le plan technique que sanitaire. Il s'agit également de mesurer l'impact de cette initiative sur la gestion durable de la ressource en eau destinée à l'alimentation en eau potable dans une région aride comme Ouargla.

Le travail est structuré en trois chapitres :

- *Chapitre 1* : Généralités sur la zone d'étude
- *Chapitre 2* : Caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines
- *Chapitre 3* : Gestion de la qualité des eaux dans la cuvette d'Ouargla

Le mémoire se conclura par une synthèse générale des principaux résultats obtenus.

***Chap.01 :***  
***Généralité sur la zone***  
***d'étude***

## 1. Situation géographique

La wilaya d'Ouargla est située au sud-est d'Algérie, à 850 km de la capitale Alger (Figure.1). Elle est entourée par Tamanrasset et Illizi au Sud, par les wilayas d'El Oued et Touggourt au Nord, Ghardaïa à l'ouest et par la Tunisie à l'Est (Figure.1). La cuvette d'Ouargla fait partie du grand bassin versant Sahara Septentrional, elle est située dans le lit d'Oued M'ya (Bas-Sahara, Algérie) (Kharroubi et al. 2022 ; Satouh et al. 2021).

La région investiguée est une dépression alluvionnaire occupe une superficie de 25 289 km<sup>2</sup> (Tableau.1). Elle est composée par un nouveau concept administratif dominant six communes suivantes (Figure.2): N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida, Sidi Khouiled, Hassi Ben Abedallah et la ville d'Ouargla, ses coordonnées géographiques(UTM, Clarke. 1880) sont :

- ✓ X= 710000/ 730000;
- ✓ Y= 3530000/3600000;
- ✓ Z= 164 mètres.

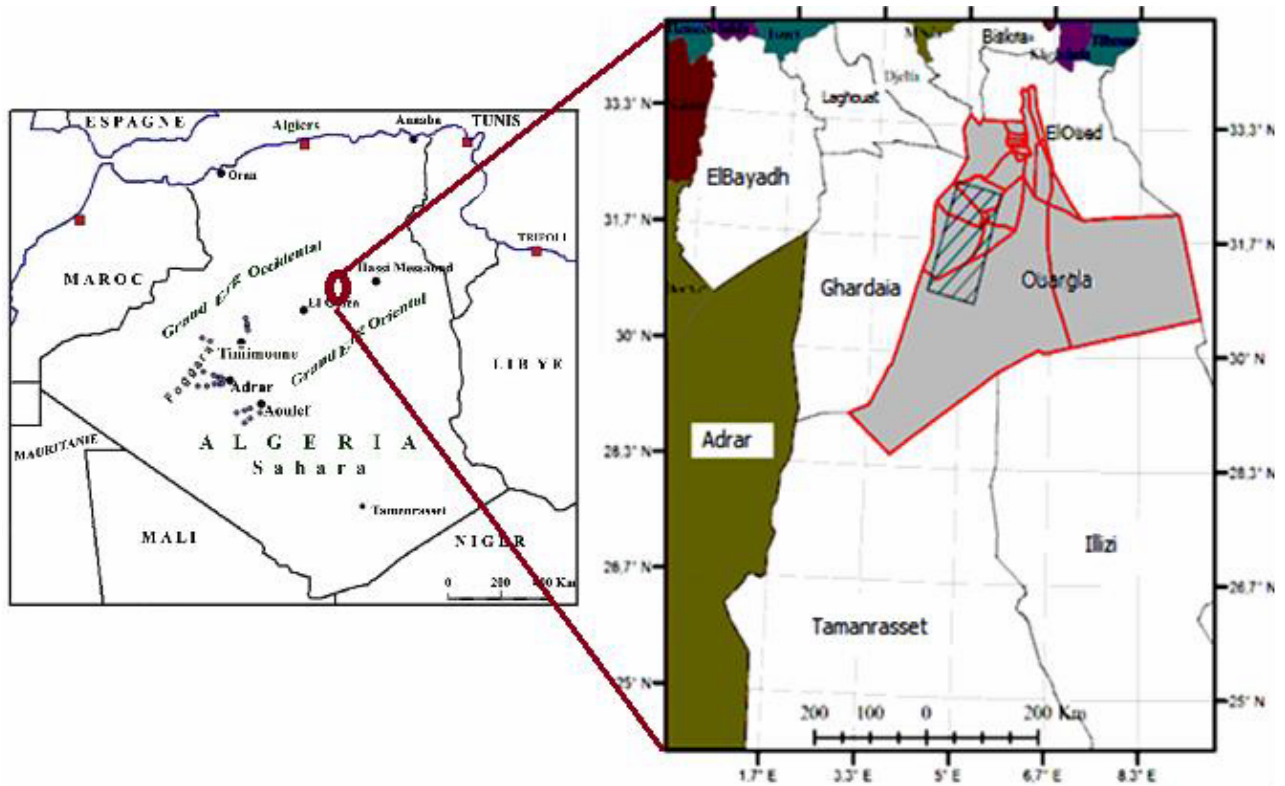


Figure 1: Carte de Situation géographique de la région Ouargla

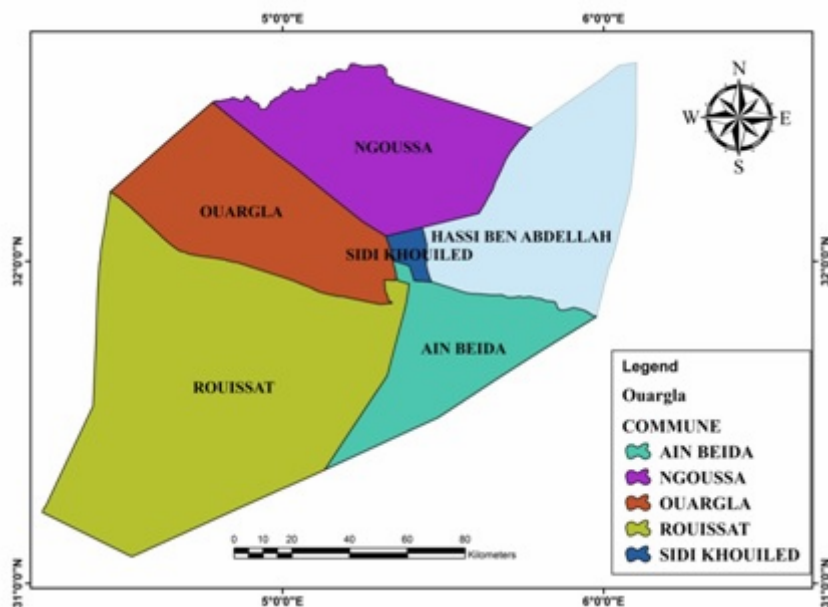


Figure.2 La circonscription administrative de la cuvette d'Ouargla.

## 2. Le contexte socio-économique

### 2.1. L'évolution de la population

Autrefois nomades, les habitants d'Ouargla ont connu une profonde mutation de leur mode de vie, notamment suite à la mise en exploitation des ressources pétrolières dans la région. Toutefois, c'est après l'indépendance que les changements les plus marquants dans la structure démographique ont été observés, comme en témoignent les données issues des recensements successifs (Karroubi et al., 2024).

En 2008, la population de la cuvette d'Ouargla s'élevait à 248 755 habitants. Une décennie plus tard, en 2018, elle atteignait 297 696 habitants, soit une augmentation de 48 941 personnes sur un territoire d'environ 25 289 km<sup>2</sup> (Tableau 1).

La ville d'Ouargla concentre à elle seule 55 % de cette population, représentant plus de 155 000 habitants en 2018, comme l'indique la figure 3. Ce poids démographique met en évidence un mouvement migratoire important vers le centre urbain d'Ouargla au détriment des autres communes de la cuvette.

Tableau 01. La répartition des populations de la wilaya d'Ouargla.

Commune	Superficiés en km <sup>2</sup>	Population 2008	Population 2018
Ouargla	2 887	133 024	155 601
Rouissat	7 331	58 112	73 647
Sidi-Khouïled	7 131	8 803	16 088
Aïn-Beïda	1 973	19 039	25 095
Hassi-B-Abdallah	3 060	13 196	6 652
N'goussa	2 907	16 581	20 613
Totale	<b>25 289</b>	<b>248 755</b>	<b>297 696</b>

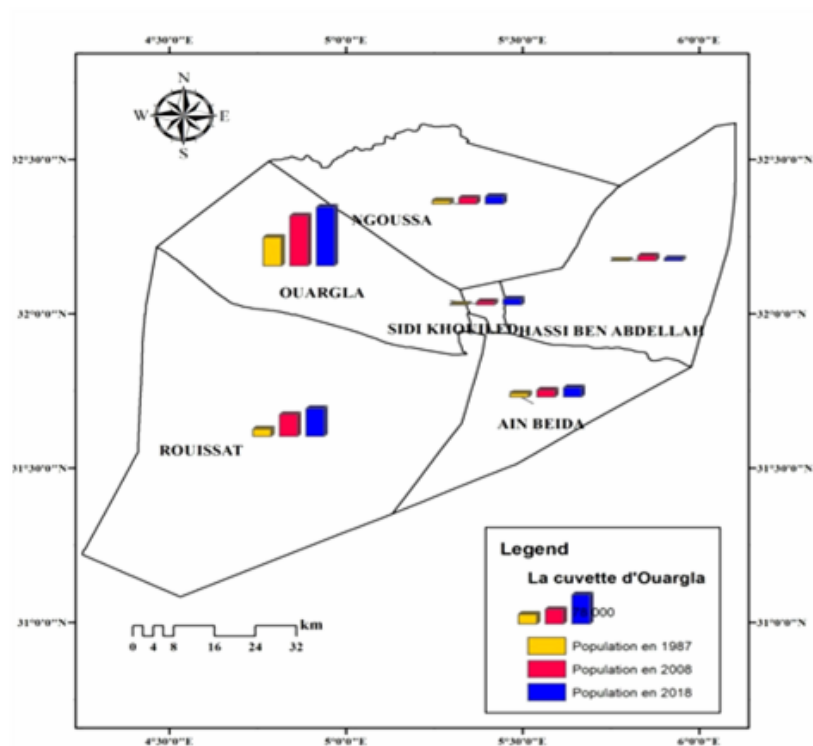


Figure 3. Évolution démographique de la population des communes d'Ouargla

## 2.2. L'agriculture

L'agriculture constitue la seconde source majeure de revenus pour la région. À ce titre, la société d'Activité Agricole Alimentaire (3A spa – filiale du Groupe Sonatrach) supervise une exploitation agricole visant à développer un pôle de production de semences, de phoeniciculture (culture du palmier dattier) ainsi que d'arboriculture fruitière, notamment la culture de figuiers et de grenadiers.

La superficie agricole totale de la cuvette s'élève à 22 356,31 hectares, répartie entre six communes. Environ 50 % de cette superficie est dédiée à la production agricole, plus particulièrement à la culture des dattes. Cela correspond à un effectif d'environ 176 271 palmiers dans la région.

Tableau 2. La distribution globale des terres dans la wilaya d'Ouargla en 2018.

La répartition générale des terres	La superficie en has
Ouargla	2 230
Rouissat	3 354
Sidi-Khouiled	1 695,00
Ain-Beida	3 935,00
Hassi-B-Abdallah	7 556,31
N'Goussa	3 586
<b>La superficie générale de la cuvette</b>	<b>22356,31</b>

### 2.3. Industrie

La wilaya d'Ouargla a opté pour le développement des infrastructures électriques et gazières, afin de garantir l'accès de la population à l'électricité et de soutenir la production industrielle. Ces deux axes stratégiques représentent une priorité, tant pour l'amélioration des conditions de vie des citoyens que pour le renforcement de l'économie nationale.

Sur le plan économique, Ouargla se distingue par une activité centrée principalement autour de deux secteurs :

- **Le secteur de l'énergie**, qui comprend notamment deux entreprises spécialisées dans la production d'électricité.
- **Le secteur industriel**, qui regroupe 11 entreprises œuvrant dans la construction, les industries agroalimentaires, et d'autres branches manufacturières.

Tableau 3. La répartition des entreprises en divers secteurs en 2018.

Secteur	Dénomination de l'entreprise	Activité Principale
Secteur énergie	Direction Régionale Sonelgaz	Distribution énergie électrique
	KAHRIF	Réalisation travaux d'électricité
Secteur industrie	ERIAD	Distribution produits alimentaires
	ERCE	Distribution ciment
	SNVI	Distribution véhicules industriels
	SNTA	Distribution tabacs et allumettes
	ENCC	Montage charpente et chaudronnerie
	ELPAP	Distribution de la cellulose et papier
	ERIAD	Produits semoule et farine
	ERCE	Ensachage des ciments
	ENGI	Produits des gaz industriels
	EIM	Production charpente métallique
	EFMC	Fabrication des matériaux de construction

### 3. Géomorphologie de la zone d'étude

D'après la coupe réalisée par Le lièvre en 1969 (Figur.4) la surface de la cuvette d'Ouargla est constituée des éléments suivants :

- **Hamada Mio-Plio-Quaternaire** : Cette formation continentale détritique constitue un plateau dont l'altitude moyenne avoisine les 200 mètres. Il s'abaisse progressivement d'ouest en est, où il présente une forte érosion, ne laissant subsister que quelques buttes résiduelles, appelées localement *goure*.
- **Glacis** : Sur les versants ouest de la cuvette, les glacis se succèdent du plus ancien au plus récent, en quatre niveaux d'altitude décroissante de 200 à 140 mètres, d'ouest en

est. Les glacis situés à 180 m et 160 m se distinguent par des affleurements de substrat gréseux d'âge Mio-Pliocène. La partie orientale de la cuvette est constituée d'un vaste glacis alluvial sablonneux, avec un sable grossier situé à environ 150 m d'altitude.

- **Grand Erg Oriental** : Occupant près de 66 % du territoire régional, cette vaste étendue est dominée par des dunes de sable pouvant atteindre jusqu'à 200 mètres de hauteur.
- **Vallée** : Elle est représentée par la vallée fossile de l'Oued Mya, vestige d'anciens écoulements fluviaux.
- **Plaines** : De faible étendue, les plaines sont localisées à la limite occidentale de la région et s'étirent du nord au sud.
- **Sebkha** : Il s'agit d'une dépression naturelle temporairement alimentée par les eaux de ruissellement provenant de terrains salins. En saison sèche, elle s'assèche complètement, laissant une croûte saline en surface, souvent composée de gypse et parfois d'autres évaporites.
- **Chott** : Cette dépression plus vaste recueille les eaux de drainage et les eaux usées domestiques. Elle peut être partiellement ou totalement asséchée durant la saison sèche.

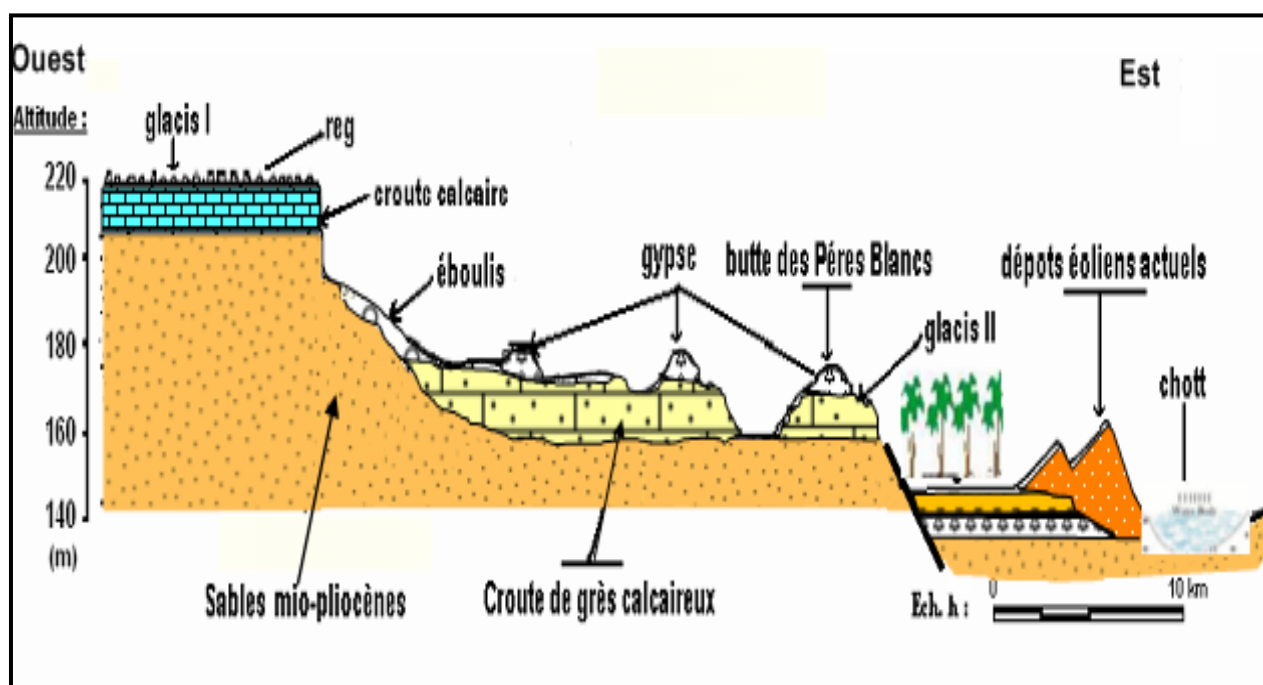


Figure 4 : Coupe géomorphologique schématique de la vallée d'Ouargla (Le lièvre, 1969)

#### 4. Les ressources hydriques dans la région d'Ouargla

La région d'Ouargla dispose d'un potentiel hydrique important, principalement issu des nappes profondes, à savoir la nappe du Complexe Terminal et celle du Continental Intercalaire.

Le volume des ressources en eau mobilisées dans l'ensemble des communes de la wilaya d'Ouargla s'élève à environ 222 263 m<sup>3</sup> par jour. Cette ressource provient de l'exploitation de 60 forages répartis sur l'ensemble du territoire de la région.

Tableau 4. La répartition l'utilisation des ressources mobilisées par commune en 2018

Commune	Nombre de forage	Ressources mobilisées		Débit Exploité m <sup>3</sup> /j
		l/s	m <sup>3</sup> /j	
<b>Ouargla</b>	32	1 281	110 678	62 208
<b>Rouissat</b>	08	835	72 144	34 560
<b>Sidi-Khouiled</b>	06	137	11 837	10 368
<b>Ain-Beida</b>	02	164	14 169	3 456
<b>H.B.Abdallah</b>	03	55	475	5 184
<b>N'Goussa</b>	09	150	12 960	15 552
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>2 622</b>	<b>222 263</b>	<b>131 328</b>

La cuvette d'Ouargla contient des réservoirs d'une capacité de 48 780 m<sup>3</sup> d'eau partagée avec ses communes et il y a encore 6 châteaux d'eau en construction d'une capacité de 3500 m<sup>3</sup>.

La consommation totale calculée est la somme de chaque débit prélevé par chaque forage AEP. La croissance démographique accrue entraîne une demande croissante en eau potable, estimée à 720 l/s pour la ville d'Ouargla et 1520 l/s pour l'ensemble de la cuvette, en plus des besoins de l'industrie et de l'irrigation.

Tableau 5. Les ouvrages de stockage des eaux châteaux d'eaux et réservoirs.

Commune	Réservoirs existants		Réservoirs en réalisation	
	Nombre	Capacité (m <sup>3</sup> )	Nombre	Capacité (m <sup>3</sup> )
Ouargla	25	30 850	02	2 000
Rouissat	07	8 750	02	2 000
Sidi Khouiled	05	2 050	01	500
Ain Beida	05	4 000	01	1 000
Hassi Ben Abdallah	02	600	00	00
N'goussa	09	2 530	00	00
<b>Total Daïra</b>	<b>53</b>	<b>48 780</b>	<b>06</b>	<b>5500</b>

D'après les données du tableau 6, la consommation journalière d'eau dans la région se répartit comme suit : environ 8 640 m<sup>3</sup> pour l'irrigation, 1 061 m<sup>3</sup> pour l'alimentation en eau potable, et 249 m<sup>3</sup> pour les usages industriels. Il convient également de noter la présence de forages non recensés par les services de l'État, qui s'ajoutent aux volumes extraits des nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT).

Tableau 6: Répartition de consommation d'eau dans la cuvette d'Ouargla

Commune	Irrigation (l/s)	Industrie (l/s)	AEP (l/s)	Débit (l/s)
Ouargla	1890	124	517	2531
Rouissait	1110	30	240	1380
Sidi Khouiled	540	0	70	610
Aine Beida	1740	50	14	1804
H-Ben Abdallah	2250	45	20	2315
N'Goussa	1110	0	200	1310

Dans la cuvette d'Ouargla, ces ressources hydriques sont destinées à satisfaire deux besoins essentiels : l'approvisionnement en eau potable pour la population, et l'irrigation des terres agricoles (tableau 6). Plus spécifiquement, 22 forages exploitant la nappe du Continental Intercalaire (CI) sont actuellement en service (tableau 7), avec un débit journalier cumulé de 89 704 m<sup>3</sup>.

Tableau7: Consommation domestique par localité au (2017)

Commune	Population 2017	Nbre de forages (CI)	Débite m <sup>3</sup> /j
Ouargla	164707	1	3300
Rouissait	71954	3	417144
Sidi Khouiled	10900	1	4414
Aine Beida	23574	1	11074
H-Ben Abdallah	6129	13	13663
N'Goussa	20530	3	12406
La cuvette	297794	22	89704

## 5. Le réseau hydrographique

Les oueds sahariens présentent un régime hydrologique irrégulier, marqué par un caractère accidentel plutôt que cyclique. Lors de rares épisodes pluvieux, les oueds peuvent couler pendant quelques jours, provoquant parfois des débordements. Ce phénomène peut survenir jusqu'à trois fois par an dans les zones situées aux marges nord du Sahara, mais reste beaucoup plus exceptionnel dans les régions centrales.

L'hydrographie de la cuvette d'Ouargla est dominée par un système endoréique, c'est-à-dire sans exutoire vers la mer (Dubief, 1953). Elle est structurée par plusieurs bassins versants — notamment ceux de M'ya, M'zab et N'sa — qui composent un réseau hydrographique convergeant vers la sebkha Safioune, au nord de la ville. Cependant, le ruissellement dans cette région est généralement insignifiant. Les vallées aboutissent à des dépressions, souvent délimitées par un réseau dense de fractures tectoniques.

### 5.1. Oued M'ya

Ce cours d'eau draine le versant nord-est du plateau de Tademaït. Son bassin, en forme de vaste gouttière inclinée faiblement vers le nord-est (0,1 à 0,2 %), s'étend sur une superficie de

19 800 km<sup>2</sup>, avec une altitude culminant à 800 m au sud. Au nord d'Ouargla, la vallée devient indiscernable. Selon ( Dubief 1953), l'Oued M'ya quaternaire aurait pu atteindre le chott Melrhir, avec une longueur estimée à 900 km.

Depuis la fin de la dernière grande période humide, le cours de l'oued est devenu discontinu, coulant épisodiquement de sebkha en sebkha avec peu de vigueur. Son tracé est aujourd'hui interrompu par des reliefs situés en aval de la sebkha Safioune, où un lac temporaire se forme lors de périodes de précipitations plus marquées. De nos jours, les grandes crues de l'Oued M'ya ne dépassent plus les 200 km en amont de Ouargla.

## 5.2. N'sa et Oued M'zab

Contrairement à l'Oued M'ya, considéré comme fossile, les oueds N'sa et M'zab sont encore actifs. Ils peuvent connaître une à deux crues par an, atteignant la cuvette d'Ouargla uniquement lors de crues exceptionnelles. Ces deux oueds drainent les piémonts sud-est de l'Atlas saharien, plus précisément la dorsale du M'zab. Ils s'écoulent d'ouest en est-sud-est jusqu'à la sebkha Safioune.

Les alluvions déposées par l'Oued N'sa bloquent la vallée au nord de la sebkha Safioune, empêchant tout écoulement vers l'aval. L'apparition des sebkhas est attribuée à une ancienne période humide, probablement liée au dernier grand épisode pluvial coïncidant avec la glaciation de Würm.

## 6. Le contexte climatique

Pour l'analyse du climat de la région d'Ouargla, les données météorologiques ont été extraites de la station de l'Office National de la Météorologie (ONM) pour la période allant de 2007 à 2021. Les principaux paramètres climatiques pris en compte dans cette étude sont : la température, les précipitations, l'évaporation, la vitesse du vent et l'humidité relative. L'examen de ces paramètres a permis de calculer le **bilan hydrique** de la zone d'étude, fournissant ainsi une évaluation globale des ressources en eau disponibles dans le contexte climatique saharien.

La station météorologique d'Ouargla est localisée dans la cité Khefdji, et les détails de sa situation géographique sont exposés dans le tableau 8.

Tableau 8. Caractéristiques géographiques de station climatique.

Station	X	Y	Z
Ouargla	05°19'22''	31°57'17''	136 m

### 6.1. Précipitation:

Les précipitations sont très faibles et irrégulières, la moyenne mensuelle interannuelle est 3.33 mm (Figure.5 et Tableau.9), alors que la précipitation moyenne annuelle est de 40 mm/an. Le mois du Janvier est le plus pluvieux (7.1mm) et le mois de juillet est le plus sec (0.29mm).

A partir des données concernant cette période (2007-2021), l'histogramme illustrant la variation moyenne des précipitations annuelles révèle que la plus forte précipitation, environ 7,7 mm, a été enregistrée en janvier, tandis que la plus faible, environ 0,2 mm, a été observée en juillet.

Tableau 9. La répartition mensuelle des précipitations moyennes.

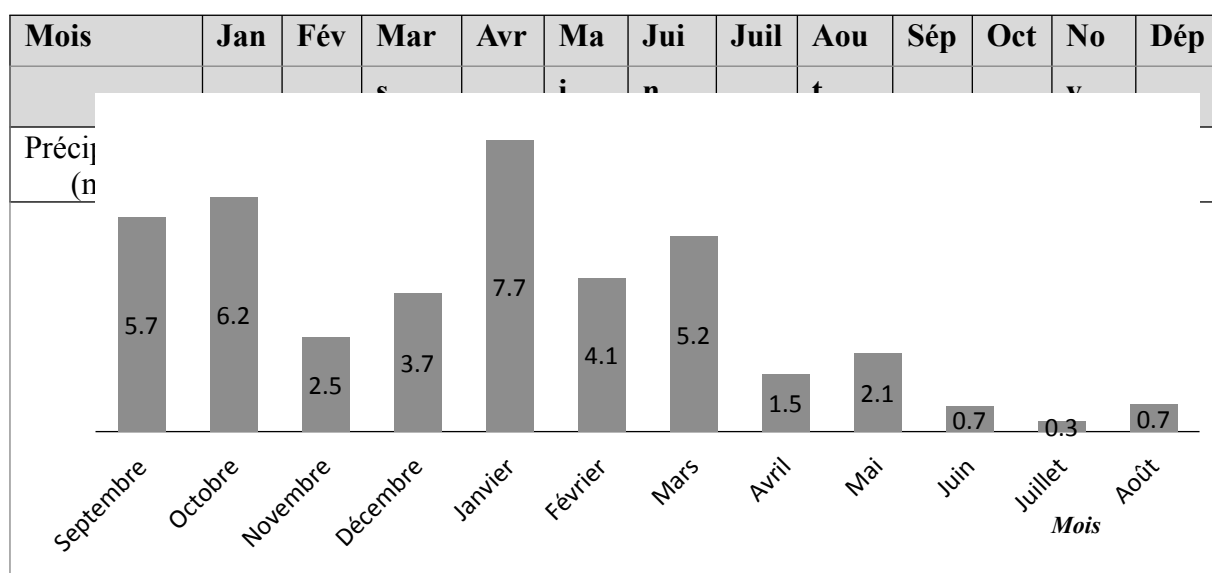


Figure 5. La variation des précipitations mensuelles (2007-2021).

### 6.2. La température

La température de l'air est mesurée à l'aide de thermomètres, est un paramètre météorologique et une grandeur physique qui caractérise l'état thermodynamique de l'atmosphère et constitue un paramètre très important dans le calcul du bilan hydrologique.

L'analyse de la température a été effectuée à l'aide des données collectées (Tableau.10) auprès de l'ONM (2007-2021). D'après l'histogramme de la variation mensuelle des températures, la valeur maximale est de 43,89 °C en juillet et la valeur minimale de 5,2°C en janvier. La variation des températures moyennes de la période étudiée (2007-2021) montre que le mois le plus froid est janvier et le plus chaud est juillet.

Tableau 10. La répartition des températures mensuelles (2007-2021).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Ju	Juil	A
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	------	---

<b>T min °C</b>	23,8	17,4	10,3	5,7	5,2	7,1	10,6	15,3	20,1	24,8	28,1	27,3
<b>T max °C</b>	38,25	31,7	24,33	19,6	19,45	21,33	25,61	30,68	35,36	40,44	43,89	42,51
<b>T moy °C</b>	31,03	24,54	17,31	12,67	12,33	14,21	18,13	23,02	27,71	32,61	35,98	34,93

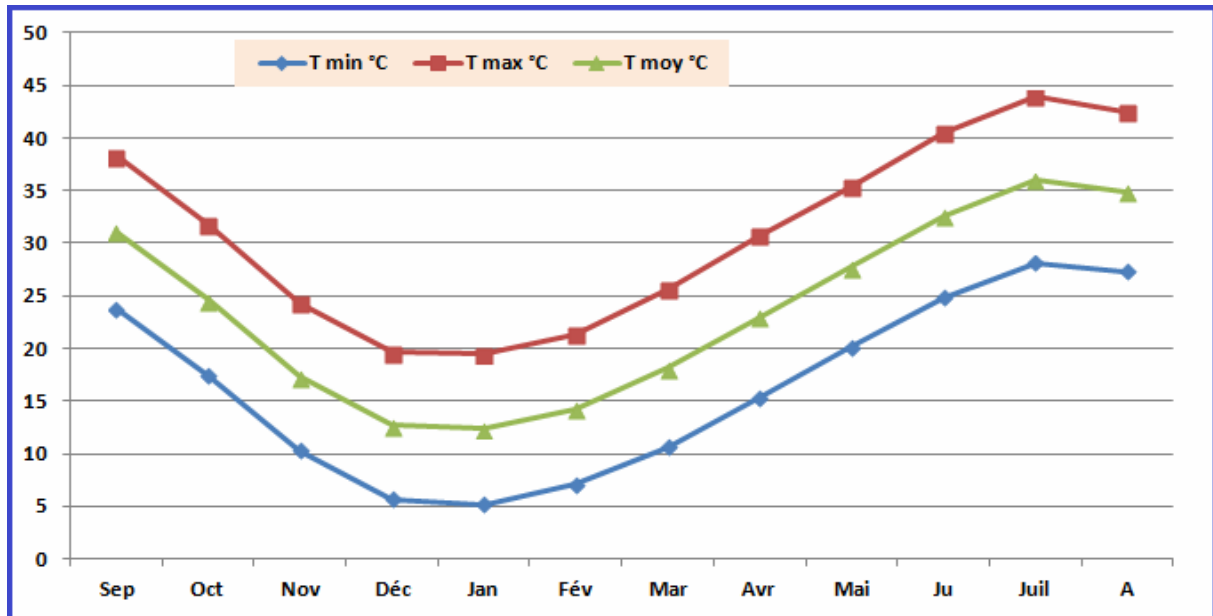


Figure 6. Courbe de la répartition des températures mensuelles (2007-2021).

### 6.3. L'évaporation

L'évaporation désigne le processus par lequel l'eau s'échappe sous forme de vapeur à partir d'un sol nu ou d'une surface d'eau. Elle correspond, plus précisément, au transfert de l'eau de la surface terrestre vers l'atmosphère. Dans la zone d'étude, l'évaporation annuelle moyenne est estimée à environ 251 mm. Le mois de juin enregistre le maximum d'évaporation avec 566,6 mm, tandis que le minimum est observé en décembre, avec une valeur de 87,3 mm.

Tableau 11. La répartition de l'évaporation mensuelle (2007-2021).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Evaporation (mm)</b>	95,6	125,6	189,4	240,7	313,9	371,2	566,6	393,3	281,3	210,7	124,1	87,4

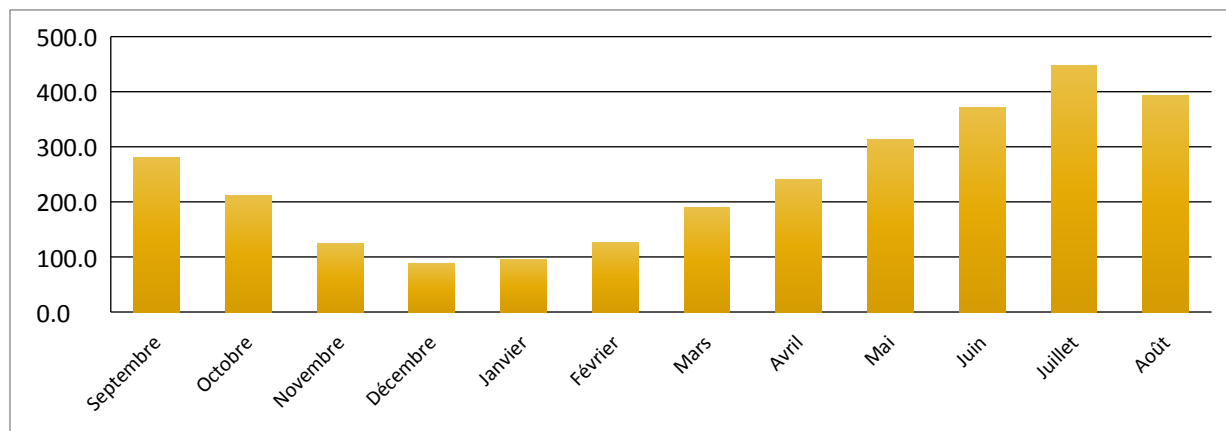


Figure 7. Histogramme de la variation de l'évaporation (2007-2021).

#### 6.4. L'insolation

La région saharienne bénéficie d'un **niveau d'ensoleillement particulièrement élevé**, en raison d'une couverture nuageuse très faible et d'un grand nombre d'heures d'ensoleillement tout au long de l'année. Cette forte intensité du rayonnement solaire favorise l'**évaporation**, une partie de ce rayonnement étant absorbée par le sol tandis que l'autre est réfléchi — un phénomène qui dépend en grande partie de la nature et du type du sol.

La durée moyenne annuelle d'**insolation** dans la zone d'étude est de **264,2 heures par mois**. Le **maximum** est enregistré au mois d'**août**, avec **336,6 heures**, tandis que le **minimum** est observé en **décembre**, avec **232,8 heures**.

Tableau 12. La répartition de l'insolation mensuelle (2007-2021).

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Insolation</b>	249,9	236,7	268,2	279,3	302,5	237,9	320,7	336,6	266	265,4	251,5	232,8

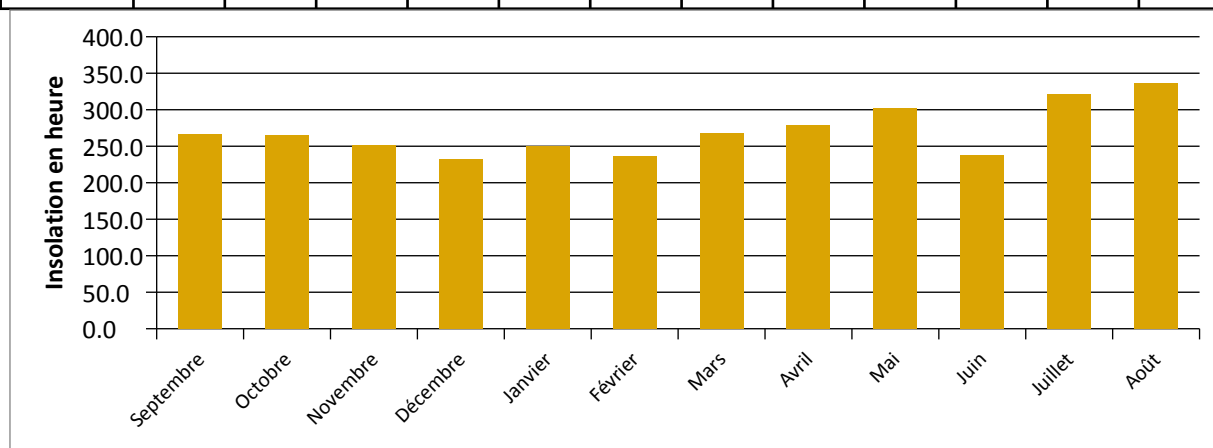


Figure 8. Histogramme de la variation d'insolation moyenne mensuelle (2007-2021).

#### 6.5. L'humidité

L'humidité représente la quantité d'eau en pourcentage présente sous forme de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air, mesurée généralement à l'aide d'un instrument appelé hygromètre. En observant l'histogramme de la variation d'humidité on constate que le mois de juillet est le plus sec, avec un taux de 24%, tandis que le mois de décembre est le plus humide, affichant un taux de 58%. Ceci suggère une relation inverse entre la température et l'humidité.

Tableau 13. La répartition des humidités mensuelles (2007-2021).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité moy (%)	57	49	42	37	31	28	24	28	36	43	52	58

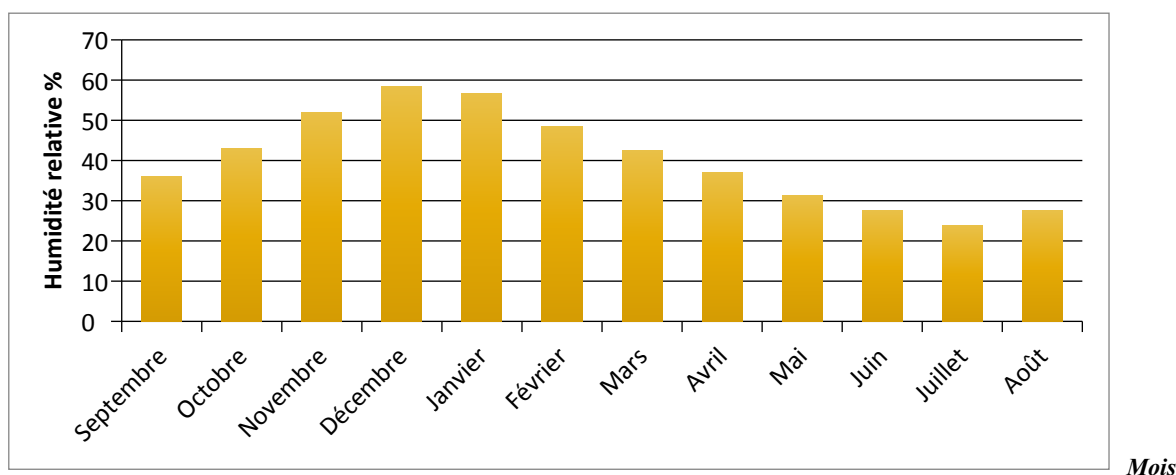


Figure 9. Histogramme de la variation d'humidité mensuelle (2007-2021).

### 6.6. Le vent

Le vent est un courant d'air qui se forme lorsque l'air se déplace d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Dans le Sahara en général en mars-avril il y a de vraies tempêtes de sable de sorte que les vents sont plus forts au printemps, car ils sont chargés de sable balayé par le vent qui donne au ciel une teinte jaune brumeuse. D'énormes masses de sable se déplacent de manière turbulente, parcourant des distances atteignant plusieurs centaines de mètres. Ces événements peuvent persister pendant une période de un à trois jours, voire plus.

Les vitesses des vents enregistrées dans la région d'Ouargla montre une vitesse maximale au mois est Mai de 11.61 m/s et une vitesse minimale au mois de décembre avec une valeur de 7.3 m/s avec la moyenne annuelle de vitesse du vent sont 9.02m/s (Figure.10 et Tableau.14).

Tableau 14. La répartition des vents maximaux (2007-2021).

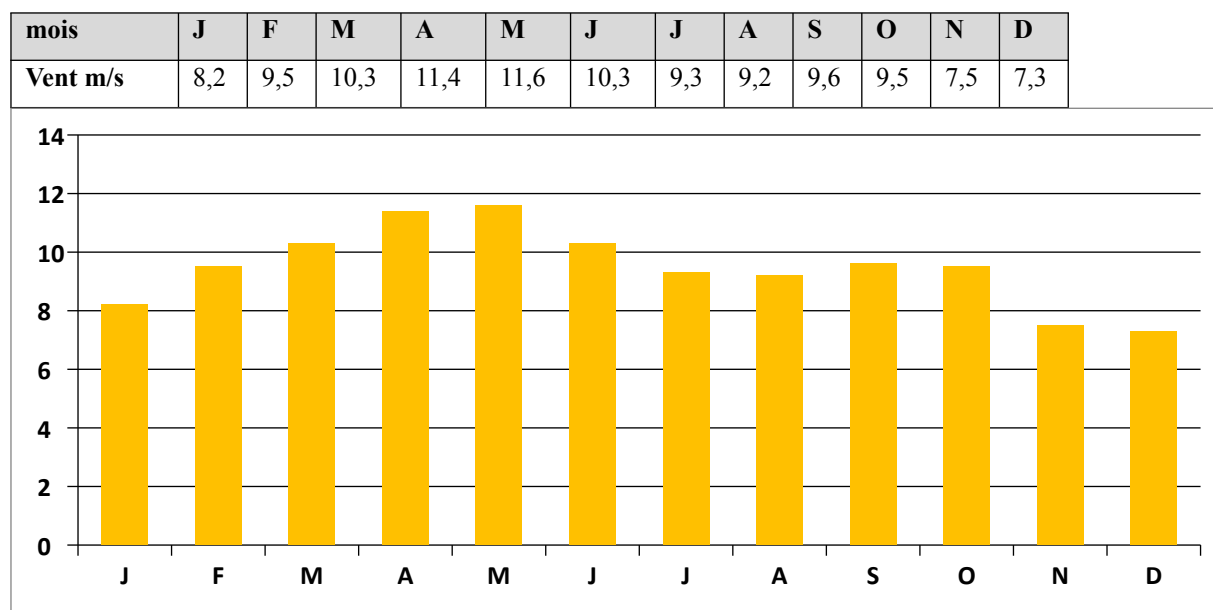


Figure 10. Histogramme de la vitesse du vent dans la cuvette d'Ouargla(en m/s).

### 6.7. Bilan hydrique

Le bilan hydrique calculé pour la zone d'étude (Tableau.15), dans la période (2007-2021) suivant la méthode de Thornthwaite est déficitaire ; la quantité d'eau précipitée sera vite évaporée parce que évapotranspiration potentiel l'ETP est plus importante que les précipitations, la réserve facilement utilisable est nulle pendant les douze mois de l'année. Le déficit agricole est présent pendant toute l'année, elle atteindra son maximum au mois de juin et 267.25 mm.

Tableau 15. Le bilan hydrique de la cuvette d'Ouargla (méthode de Thornthwaite).

Papamètre	Tp	ETP	P	RU	ETR	Def	Exc
S	31,03	152,90	3,60	0,00	3,60	149,30	0,00
O	24,54	77,77	2,50	0,00	2,50	75,27	0,00
N	17,31	27,59	5,60	0,00	5,60	21,99	0,00
D	12,67	11,45	6,20	0,00	6,20	5,25	0,00
J	12,33	11,45	0,70	0,00	0,70	10,75	0,00
F	14,21	16,24	0,20	0,00	0,20	16,04	0,00
M	18,13	37,31	0,60	0,00	0,60	36,71	0,00
A	23,02	74,57	2,10	0,00	2,10	72,47	0,00
M	27,71	133,46	1,50	0,00	1,50	131,96	0,00
J	32,61	206,32	5,20	0,00	5,20	201,12	0,00
J	35,98	271,46	4,10	0,00	4,10	267,36	0,00
A	34,93	234,95	7,70	0,00	7,70	227,25	0,00
Annuel	23,71	1255,48	40,00		40,00	1215,48	0,00

### 7. Contexte géologique

L'étude géologique constitue une étape fondamentale en hydrogéologie, car elle permet de définir l'extension des aquifères ainsi que la nature des horizons aquifères, tout en offrant une description précise des formations géologiques de la zone d'étude. Cette analyse est essentielle pour comprendre la structure géologique à la fois locale et régionale, notamment à travers l'interprétation des cartes géologiques et des coupes litho-stratigraphiques.

Sur le plan tectonique, l'Algérie est subdivisée en deux grandes unités séparées par une ligne de failles continues correspondant à l'accident sud-atlasique. Le nord du pays est caractérisé par des formations alpines, tandis que le sud repose sur une plate-forme tectonique relativement stable et peu déformée.

La stratigraphie et la lithologie du Bas Sahara ont été largement documentées grâce aux travaux chronologiques de plusieurs auteurs, notamment Cornet (1964), Bel & Dermagne (1966), Bel & Cuche (1969), Conrad & Fontes (1970) et Busson (1972). Ces études ont apporté une compréhension approfondie des limites stratigraphiques et de la géologie du Sahara algérien.

### 7.1. Evolution tectonique

La cuvette d'Ouargla se caractérise par une asymétrie nette et continue (Fig. 11), interprétée comme la conséquence des mouvements tectoniques hercyniens et autrichiens qui ont affecté de manière différenciée cette zone (Rouvillois, 1975). La phase autrichienne est particulièrement visible dans la région de Gassi-Touil, où elle se manifeste de manière inhabituelle à l'échelle du niveau désertique.

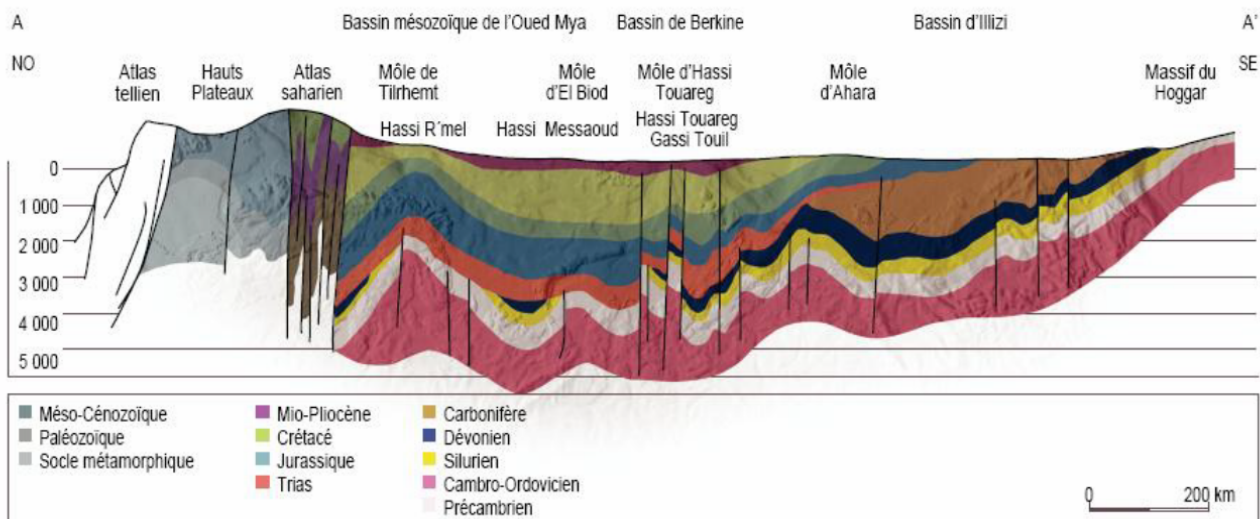


Figure 11. Coupe géologique (NO-SE) simplifiée à travers les différents ensembles géologiques de l'Algérie (WEC, 2007)

Une coupe géostructurale régionale met en évidence un ensemble de failles orientées du nord-ouest au sud-est, révélant les strates géologiques qui traversent la cuvette d'Ouargla. Cette dernière est attribuée à l'influence des failles du Hoggar, d'origine hercynienne, qui affectent des formations géologiques allant du Cambrien au Sénonien inférieur. Ces failles assurent également la communication entre les aquifères profonds, facilitant les échanges hydrauliques entre les différentes couches géologiques (OSS, 2003).

## **7.2 Cadre géologique régional**

La cuvette d'Ouargla s'inscrit dans l'ensemble géologique de la plateforme saharienne (Figure.12). Sur le plan géostructural, cette plateforme est formée d'un socle précambrien qui n'affleure que localement, notamment dans le Sahara central (massif du Hoggar) et le Sahara occidental (massif des Eglab). Ce socle est constitué de roches éruptives et métamorphiques, nivelées par l'érosion, et recouvertes par une épaisse série de formations sédimentaires, dont l'accumulation peut atteindre plusieurs milliers de mètres, datées du Cambrien jusqu'au Quaternaire.

Ces dépôts sédimentaires présentent des plis modérés, organisés en un vaste bassin sédimentaire à structure dissymétrique. Ce bassin est généralement subdivisé en trois sous-domaines : le bassin du Grand Erg Occidental, le bassin du Grand Erg Oriental — séparés par l'anticlinal du M'Zab — et le plateau de la Hamada El Hamra.

La cuvette d'Ouargla est localisée dans la dépression de l'Oued M'ya, zone topographiquement basse, atteignant environ -40 mètres sous le niveau de la mer au niveau du Chott Melrhir, situé plus au nord. Elle est constituée principalement par les formations du bassin oriental, qui contiennent à la fois d'importants aquifères profonds et de vastes gisements pétroliers (Cornet, 1964 ; Fontaine, 1996), faisant de cette région un pôle stratégique pour les ressources naturelles du Sahara.

L'épaisseur de la couverture sédimentaire varie d'environ 400 mètres dans la partie sud et ouest de la dépression, jusqu'à plus de 600 mètres dans sa portion nord (Aliev, 1972).

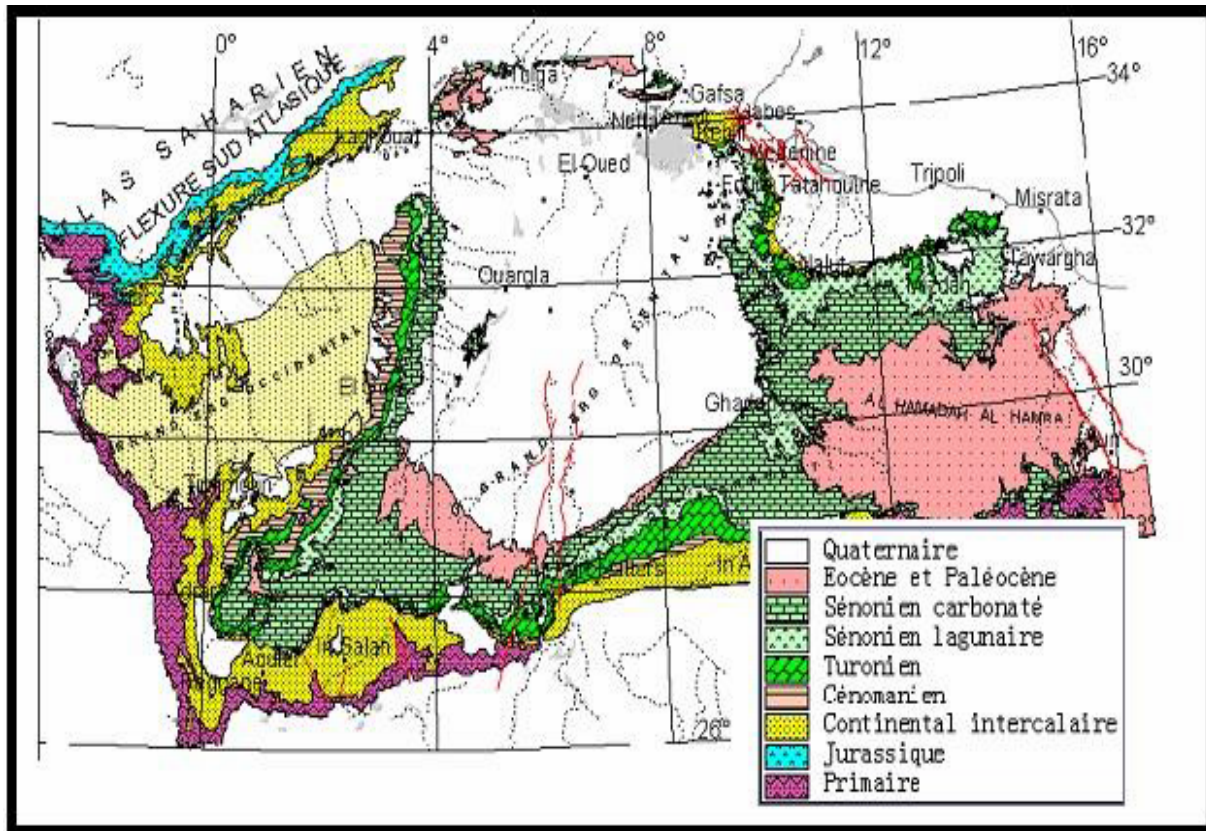


Figure 12. Carte géologique montre les affleurements dans le Sahara (OSS, 2003).

### 7.3. Paléogéographie

L'histoire géologique de la cuvette d'Ouargla est commencée de longues périodes, selon Lièvre (1969) et Rouvillois (1975) au secondaire, la cuvette serait le résultat de mouvements précambriens et primaires aboutissant à un effondrement touchant l'axe supérieur de la vallée de Mya à la vallée d'Oued Righ, comme au Crétacé supérieur est entre deux épisodes marines, la base est un sédiment marin primaire et un toit d'argile marine du Cénomani en, après l'Oligocène une mer épicontinentale a été trouvée au nord du Sahara, mais elle n'a pas atteint la cuvette d'Ouargla.

Selon Lièvre, à l'époque de Post-lutitien, la cuvette s'est changée du fait de l'érosion. La couche calcaire éocène a disparu et s'est réduite à des couches de calcaire recouverte de dépôts sableux cohésifs sous un climat semi-aride au Miocène Potien ou Pliocène inférieur mais les couches supérieures de la sédimentation fluvio-lacustre d'âge Néogène ont disparu en raison de l'érosion fluviale ou du forte rétraction du vent, qui permet aux sédiments sableux quaternaires de se déposer irrégulièrement le long de l'axe approximatif d'Oued Mya.

## 7.4. La géologie locale

La cuvette de Ouargla se caractérise par des formations sédimentaires du Sahara Nord -Est septentrional. A la surface seules les formations géologiques d'âge quaternaire et Mio-Pliocène sont visibles. D'après la carte de la (Figure13), les affleurements géologiques d'Ouargla représentent un terrain tabulaire des formations géologiques d'âge Quaternaire, Miocène, Pliocène et Sénonien. La cuvette est située dans les formations continentales du Mio-Pliocène, dans lesquels des sables siliceux, de grès fins à stratifications entrecroisées, alternent avec des nodules de calcaire, entrecoupés de niveaux de calcaire ou de gypse, ainsi qu'au Sénonien, forment une structure calcaire carbonatée au nord-ouest de la région de recherche (Zeddouri. 2010). La cuvette de Ouargla s'incline en pente (-40m) vers Chott Melhrir marquée par l'axe SW-NE.

La description des formations sédimentaires a été établie par l'interprétation des logs de forages d'eau (Figure.13) et de forages pétroliers. Dans notre étude on donne la description de formations allant jusqu'au Barrémien, c'est-à-dire jusqu'à la limite du système aquifère exploité dans le Sahara septentrional.

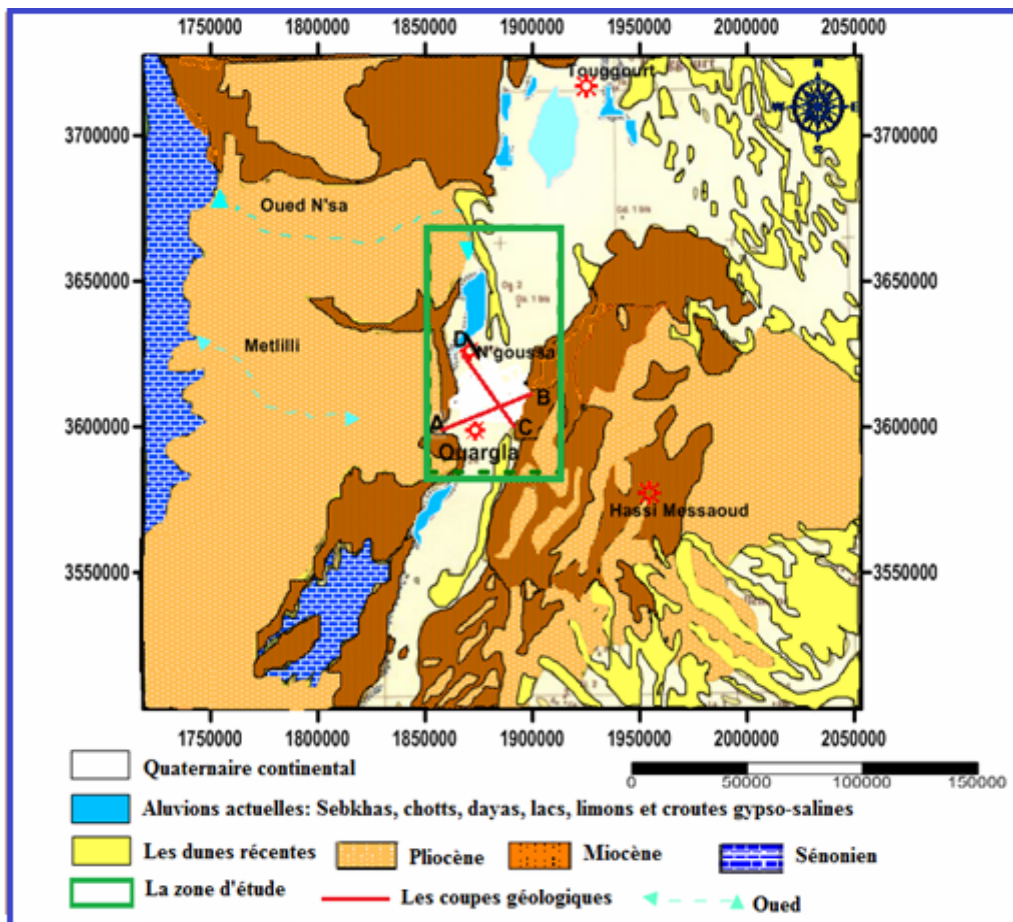


Figure 13. La carte géologique d'Ouargla (Cornet en 1964, modifiée par Kharroubi en 2024).

### 7.4.1. La litho-stratigraphie de la cuvette d'Ouargla

La description litho-stratigraphique est basée sur le traitement et l'analyse des logs des forages hydraulique profonds (Figure 25, 26 et 27), ce qui nous permet de caractériser la lithologie et la stratigraphie de la cuvette d'Ouargla comme suivant (Boussaada et al. 2023 ; Kharroubi et al. 2022):

- **Le Barrémien:** Dans la cuvette d'Ouargla, il est formé de calcaire, dolomie, argile et grès à une profondeur de 1400 m. Son épaisseur varie de 250 m à 400 m (base du Continental Intercalaire).
- **L'Aptien:** Il se compose d'une formation contenant de dolomite, de marne dolomitique de différentes couleurs et du grès, dont l'épaisseur varie de 19 à 46 m. C'est une couche imperméable entre le Barrémien et l'Albien.
- **L'Albien:** C'est un complexe de grès, de sables et de marnes. Il correspond à l'horizon aquifère et son épaisseur varie de 273 à 450 m, ce qui correspond à la série lithologique supérieure de l'horizon du Continental Intercalaire.
- **Le Vraconien:** Il caractérise par un épisode de calcaires dolomitiques parfois argileux entre les marnes de Cénomaniens (base du Complexe Terminal) et les sables de Albien (sommet du Continental Intercalaire). Les épaisseurs y sont de 50 à 100 m.
- **Le Cénomaniens:** C'est un banc contenant une alternance des argiles plastiques marneux. Il est une formation importante couvrant l'aquifère Albien (de 180 à 300 m d'épaisseur).
- **Le Turonien:** La barre Turonienne est constituée de calcaires beiges poreux et de calcaires dolomitiques gris à blancs ayant une épaisseur de l'ordre de 50 à 98 m et recouvre la série imperméable du Cénomaniens.
- **Le Sénonien :** Il est subdivisé par deux formations principales de bas en haut:
  - ✓ Le Sénonien lagunaire (40-350 m d'épaisseur) est composé par des bancs de sels massifs, d'anhydrite et de dolomie avec présence d'argile et gypse agissant comme une barrière imperméable.
  - ✓ Le Sénonien carbonaté d'une épaisseur allant de 150 à 200 m, qui est une formation perméable composée de calcaires gréseux, calcaires dolomitiques et marnes relativement dures avec présence d'anhydrite et un faible pourcentage d'argile.
- **Le Sénono-Eocène:** Les carbonates forment une unité litho-stratigraphique unique, principalement composée de calcaire, avec une épaisseur variant de 140 à 250 mètres. Les fissures secondaires présentes dans cette formation lui confèrent des caractéristiques hydrogéologiques intéressantes.

- **Le Mio-Pliocène**, qui repose de manière hétérogène sur Sénono-eocène, caractérisé par une formation puissante très hétérogène contenant des grès, sables et des argiles avec présence de calcaire
- **Le Quaternaire** : Dans la stratigraphie de la région, on identifie le Quaternaire comme une couche géologique. À la base du Quaternaire, on trouve un niveau composé d'argile et de grès qui repose sur une croûte ancienne. Ce niveau joue un rôle de couverture pour l'aquifère du Mio-Pliocène à Ouargla. La couche supérieure du Quaternaire est principalement constituée de sables éoliens, parfois mêlés de gypse, ainsi que de matériaux résultant du remodelage des formations géologiques du Mio-Pliocène.

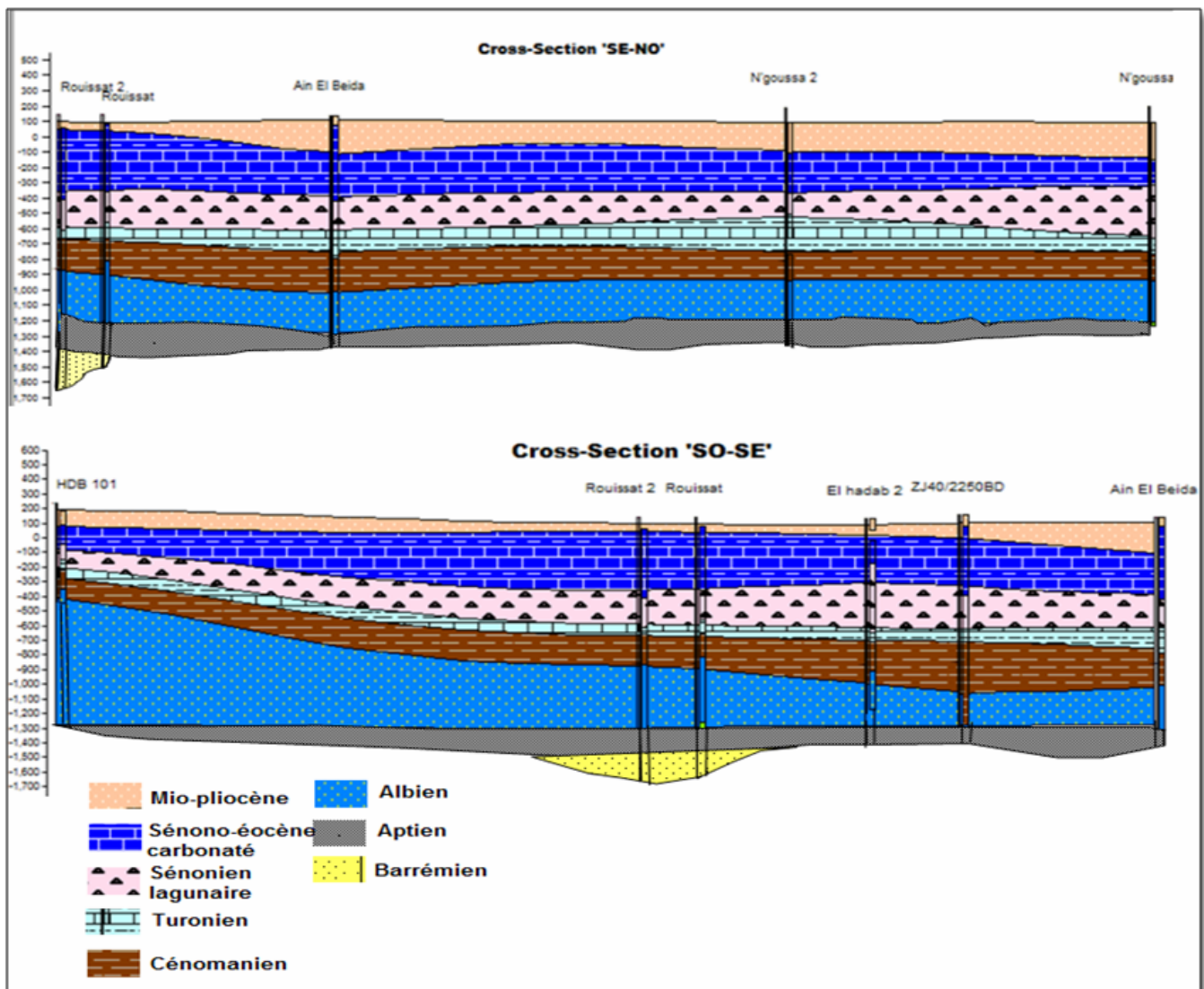


Figure 14. La coupe géologique corrélative dans la cuvette d'Ouargla (Kharroubi, 2024).

## 8. Conclusion

La cuvette d'Ouargla se trouve au nord-est du Sahara algérien, et s'étend sur une superficie d'environ 25 289 km<sup>2</sup>. Cette région saharienne présente une dynamique complexe, marquée par des caractéristiques naturelles et humaines étroitement liées. Sur le plan démographique, la population a connu une croissance rapide, passant de 248 755 habitants en 2008 à près de 297 696 en 2018. Cette concentration humaine, principalement dans la ville d'Ouargla, accentue la pression sur les ressources hydriques et les infrastructures locales.

Du point de vue géomorphologique, la cuvette est composée de formations variées : glacis, dunes du Grand Erg Oriental, sebkhas, chotts et plaines. Ces structures influencent fortement l'hydrodynamisme de la région, favorisant le ruissellement rapide et limitant l'infiltration des eaux.

Le climat de type saharien est extrêmement aride, caractérisé par une faible pluviométrie annuelle (environ 40 mm), des températures très élevées en été (jusqu'à 44 °C), une forte évaporation, et des vents fréquents souvent chargés de sable. Ce contexte climatique engendre un bilan hydrique déficitaire quasi permanent, limitant la recharge naturelle des nappes.

Sur le plan géologique, la cuvette repose sur un ensemble sédimentaire riche, allant du Barrémien au Quaternaire, abritant deux grands aquifères : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. La présence de nombreuses failles favorise la communication entre ces couches, mais soulève aussi des défis en matière de gestion durable des eaux souterraines.

***Chap.02 :***  
***Contexte hydrogéologique***  
***ethydrochimique***

## 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines de la région d'Ouargla. L'étude hydrogéologique vise à évaluer le potentiel des aquifères souterrains en examinant la piézométrie, la géométrie et le fonctionnement hydrodynamique des nappes. Par ailleurs, l'analyse hydrochimique a pour objectif de déterminer les propriétés chimiques des eaux souterraines et d'évaluer leur qualité en vue de l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Ouargla.

## 2. Le système d'aquifère du Sahara septentrional (SASS)

Le système d'aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur le nord d'Afrique et partagé par l'Algérie, la Tunisie et la Libye (OSS. 2003 ; Bouselsal et al. 2014), couvre une superficie d'environ 1.000.000 km<sup>2</sup>, dont 70% est occupée par l'Algérie et comprend deux réservoirs profonds superposés: le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal séparés par une dorsale du M'zab (OSS. 2003 ; Ouarekh et al. 2024).

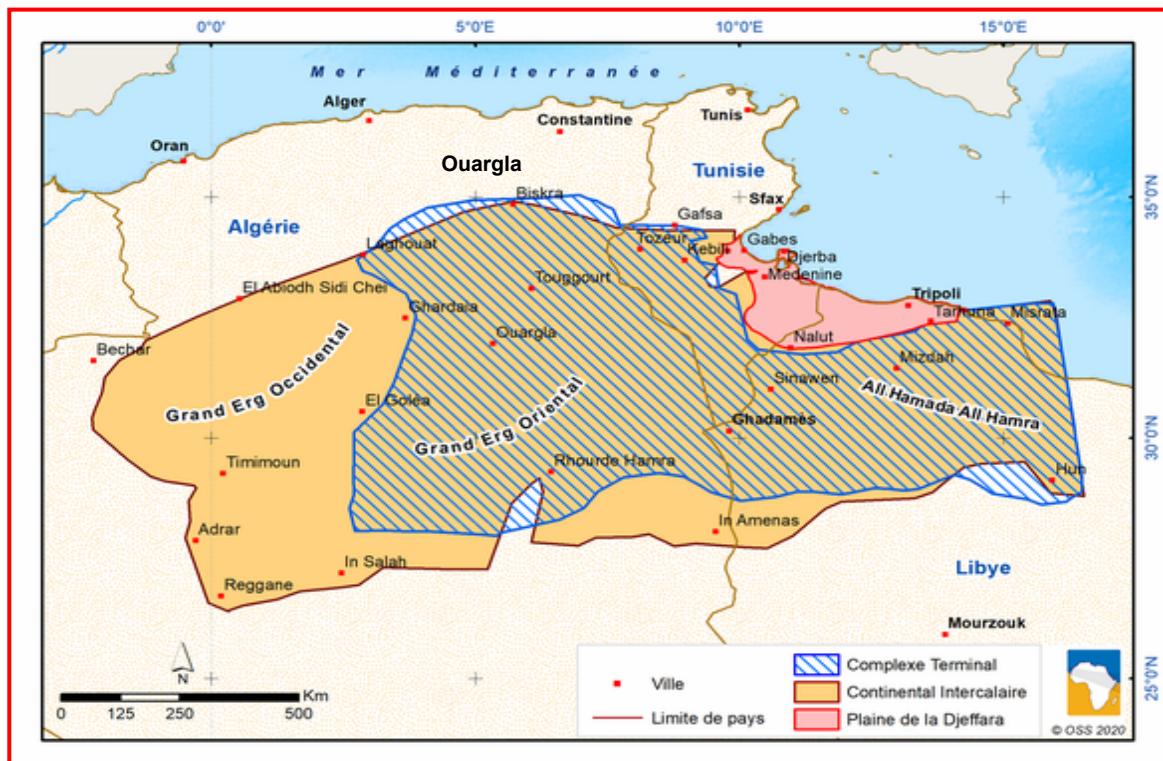


Figure 15. Extension des formations du SASS (OSS. 2020).

Dans le Sahara septentrional, le bassin sédimentaire forme une vaste entité hydrogéologique couvrant une superficie d'environ 780 000 km<sup>2</sup>, avec une épaisseur pouvant atteindre entre 4000 et 5000 mètres (Castany, 1982). Il est délimité, au nord-est, par le sud tunisien, à proximité de la région de Gabès et des reliefs crétacés du Dahar, tandis que sa frontière orientale avec la Libye reste purement conventionnelle. Au nord, le bassin est bordé par les

piémonts de l'Atlas saharien. Vers le sud-est, il est limité par un alignement de plateaux disposés selon une orientation est-ouest, notamment les Hammadas du Tinhert et du Tadmait. À l'ouest, la délimitation est assurée par une dorsale subméridienne reliant l'Oued Saoura à la région de Reggane.

Le système aquifère du SASS s'étend sur une superficie d'environ 700 000 km<sup>2</sup> en Algérie. Il se distingue par la présence de deux unités hydrogéologiques hétérogènes. Le sous-bassin occidental, d'une superficie approximative de 280 000 km<sup>2</sup>, est drainé vers le sud et est partiellement recouvert par le Grand Erg Occidental. Quant au sous-bassin oriental, le plus vaste, il s'étend sur environ 500 000 km<sup>2</sup>, est drainé vers le nord-est et occupe une grande partie du Grand Erg Oriental.

### **2.1. Continental Intercalaire**

Le Continental Intercalaire signifie par une phase continentale entre deux grands cycles sédimentaires marins de bas en haut: Le cycle du crétacé supérieur, c'est la conséquence d'une transgression cénomanienne et le cycle du paléozoïque qui terminer l'orogénèse hercynienne (Kilian. 1931; Busson. 1970).

L'aquifère Continental Intercalaire est un aquifère multicouche. Il est relativement composé de formations gréseuses, argileuses et sableuses d'âge crétacé inférieur (Barrémien, Albien) sur une superficie d'environ 600.000 Km<sup>2</sup> (Cornet. 1964; OSS. 2003 ; Bousselsal 2017).

L'aquifère s'étend du nord au sud, de l'Atlas saharien jusqu'au Tassili et au Hoggar, et d'ouest en est, de la vallée du Guir à Saoura jusqu'au désert libyen.

Lors de l'analyse de la carte piézométrique (Figure 1), on observe que la direction de l'écoulement du Continental Intercalaire (CI) au nord-ouest se divise le long de l'axe de la dorsale du M'zab en deux directions distinctes. Une partie de l'eau s'écoule vers l'est en direction du golfe de Gabes, qui constitue son exutoire naturel, tandis que l'autre partie s'oriente vers le sud et le sud-ouest, alimentant les régions de Gourara, Touât et Tidikelt. Les eaux provenant du plateau du Tinrhert, quant à elles, suivent une trajectoire vers le nord-est sous l'Erg Oriental en direction de l'exutoire en Tunisie. Alors que les exutoires s'indiquent par la carte: les foggaras Touat-Gourara-Tidikelt, Ain Twarga Libyen et l'exutoire Tunisien qui marque par la faille d'El-Hamma (OSS. 2003). De plus, la recharge des aquifères fossiles est cohérente avec la recharge paléoclimatique pendant la période humide du Pléistocène supérieur et avec d'autres recharges par infiltration et ruissellement dans les affleurements suivants (Guendouz. 1985):

- ⇒ Nord-ouest: les piedmonts de l'atlas saharien;
- ⇒ Nord-est: Jebel Nafusa;

⇒ Est: le massif du Dahartunisien;

⇒ Sud: Jebel Hassawna.

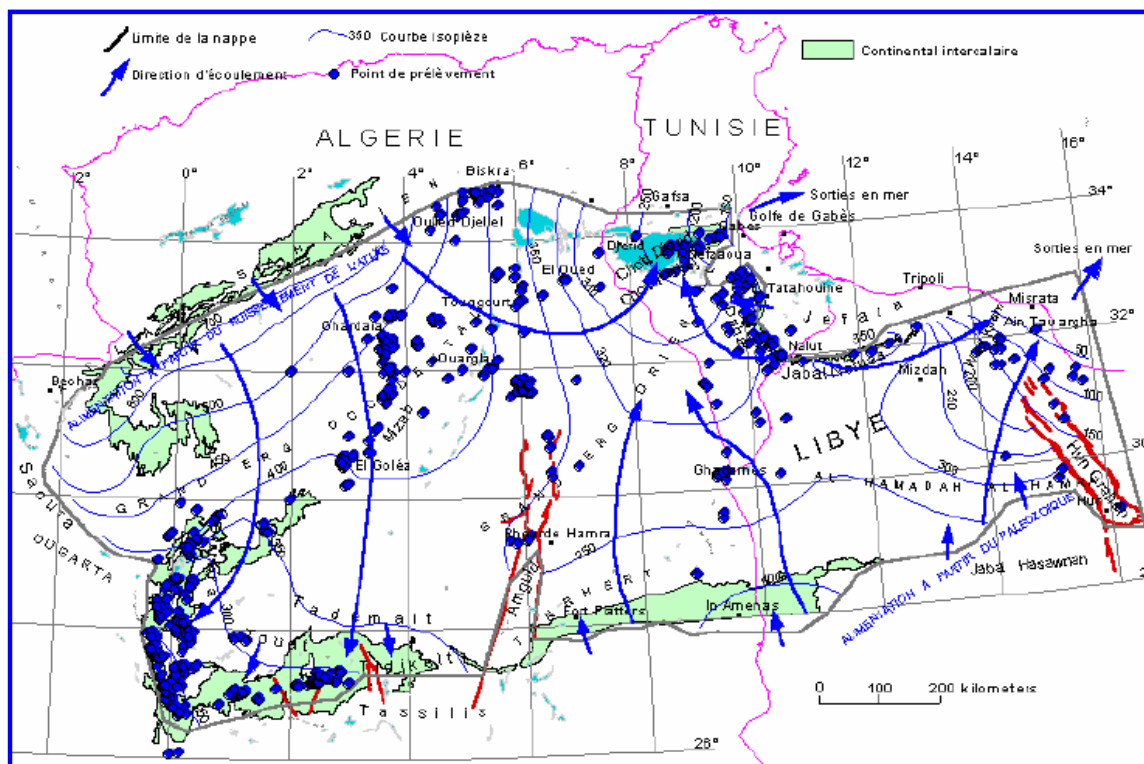


Figure 16. Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).

## 2.2. Complexe Terminal

Le Complexe Terminal est constitué par des formations continentales sableuses et argileuses du Mio-Pliocène selon Killian (1931). Contrairement à Bel et Dermangne, il confirme en 1966 que l'aquifère CT est une formation du Mio-pliocène en relation avec l'Eocène, du Sénonien, du Turonien et Cénomanién.

L'épaisseur de l'aquifère du Complexe Terminal varie considérablement en fonction des régions, avec des mesures allant de 50 à 1600 mètres (OSS, 2003). Dans la partie nord-est de la région, plus précisément à Biskra, l'aquifère atteint une épaisseur de plus de 1600 mètres, tandis que dans les zones d'El Oued, elle s'élève à 500 mètres. En ce qui concerne la dorsale du M'Zab, la cote du toit de l'aquifère atteint les 900 mètres (OSS, 2003 ; Bouselsal et Belksier, 2018). Sa profondeur comprise entre 100 et 600 m qu'il est entouré au nord par les flexures de l'accident du Sud-atlasique, à l'ouest par la dorsale du M'zab, à l'est par les frontières du Tunisie et Libye et au sud par la falaise méridionale du plateau Tinhert (OSS, 2003).

L'allure de la carte piézométrique du CT (Figure. 3) montre les zones de la recharge de l'aquifère CT qui proviennent:

- ⇒ Nord-ouest: l'atlas saharien;
- ⇒ Est: le Dahartunisien;
- ⇒ Sud: les plateaux Tinrhert et Tadmaït;
- ⇒ Ouest: la dorsale du M'zab.

En outre, à l'échelle locale, la nappe du Complexe Terminal peut être alimentée par la dorsale de M'zab au ouest, mais la source de sortie ces eaux sont émergées sur les chotts algéro-tunisien et le Golfe de Syrte (ERESS. 1972).

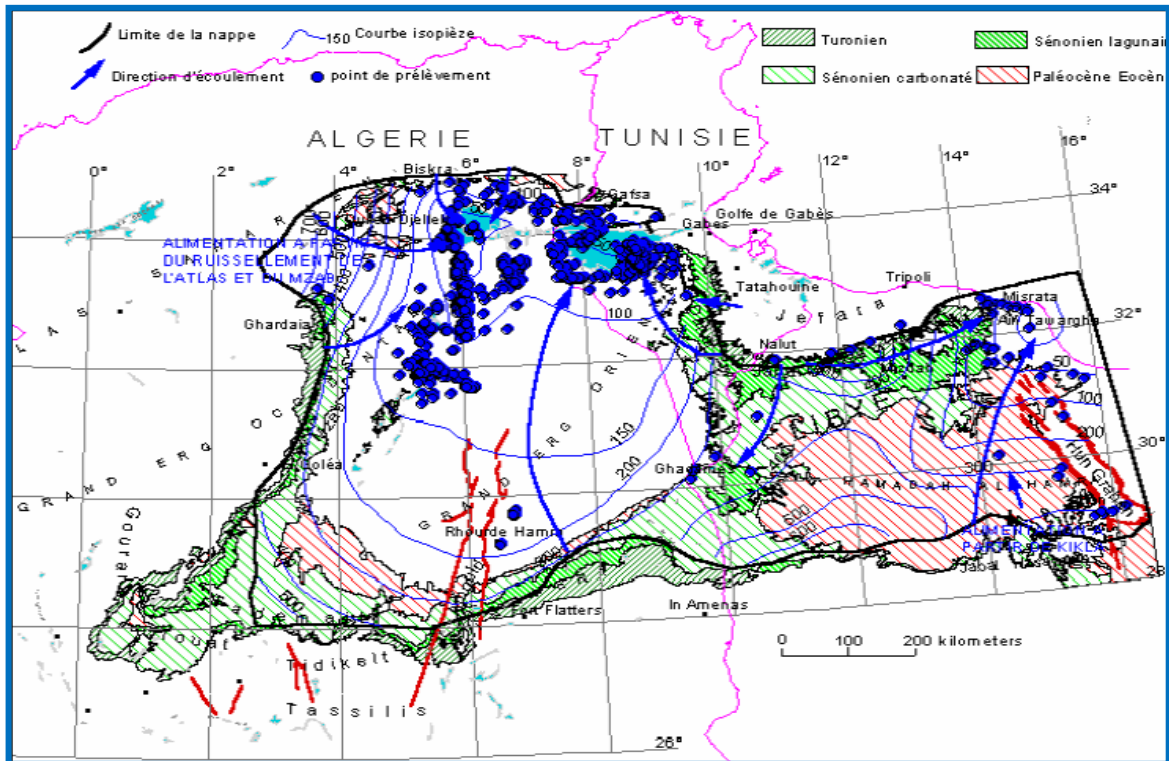


Figure 17. Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS. 2003).

En Algérie, le réservoir du Complexe Terminal s'étend sur environ 350 000 km<sup>2</sup>, principalement dans le bassin du Grand Erg Oriental du Sahara septentrional. Ce système aquifère est constitué de plusieurs nappes superposées, formant un ensemble hydraulique interconnecté, bien que certaines couches puissent présenter des caractéristiques distinctes selon les régions. Les principales nappes composant ce complexe sont :

1. **La nappe du Mio-Pliocène** : Située dans des formations sableuses et argileuses, cette nappe est généralement peu profonde, avec des profondeurs variant entre 100 et 400 mètres. Elle est largement exploitée pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation, notamment dans les zones où elle est aisément accessible.
2. **La nappe Sénono-Éocène** : Composée de formations carbonatées du Sénonien supérieur et de l'Éocène inférieur, cette nappe présente une perméabilité variable. Elle est souvent en

relation hydraulique avec la nappe du Mio-Pliocène, bien que des couches imperméables puissent localement les séparer.

3. **La nappe turonienne** : Constituée principalement de calcaires et de dolomies, cette nappe est généralement recouverte par des formations marneuses peu perméables, notamment dans l'extrême nord du Sahara oriental. Elle est plus individualisée en raison de cette couverture imperméable. Dans la région de Hassi Messaoud, cette nappe contient des formations de calcaire fissuré entre le Sénonien salifère et le Cénomaniens. Cependant, sa forte salinité, atteignant jusqu'à 210 g/l, limite son exploitation pour les usages domestiques ou agricoles.

Ces nappes sont généralement en relation hydraulique, formant un système aquifère complexe. Cependant, des couches imperméables, telles que les formations marneuses du Sénonien inférieur, peuvent localement limiter ces interconnexions. La qualité chimique des eaux varie selon les nappes et les régions, influencée par la lithologie traversée et les conditions géochimiques locales

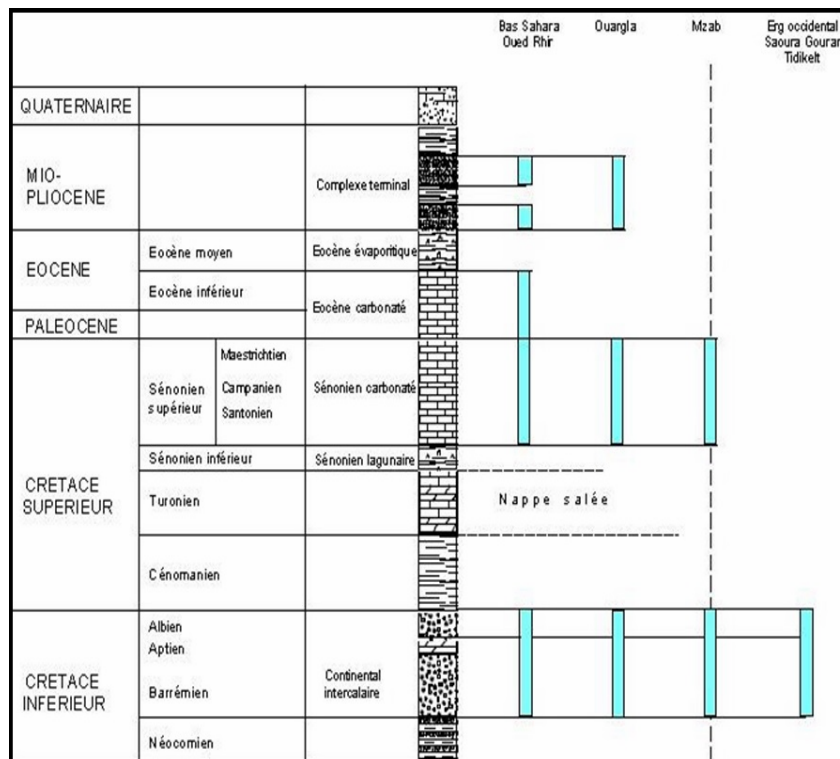


Figure 18. Extensions des aquifères de Sahara septentrional.

Dans le Sahara algérien, les formations géologiques secondaires, tertiaires et quaternaires affleurent sous la forme d'un aquifère épais, notamment dans le Grand Erg Oriental. Ces formations constituent un système aquifère complexe, où l'épaisseur des couches aquifères peut varier significativement. Dans le Grand Erg Occidental, la perméabilité des formations permet une circulation verticale de l'eau à travers les couches du Quaternaire et du Complexe

Terminal, mettant en évidence une drainance importante. Cette caractéristique hydrogéologique favorise les échanges entre les différentes nappes, influençant la dynamique des ressources en eau souterraine dans la région (Bouselsal 2016).

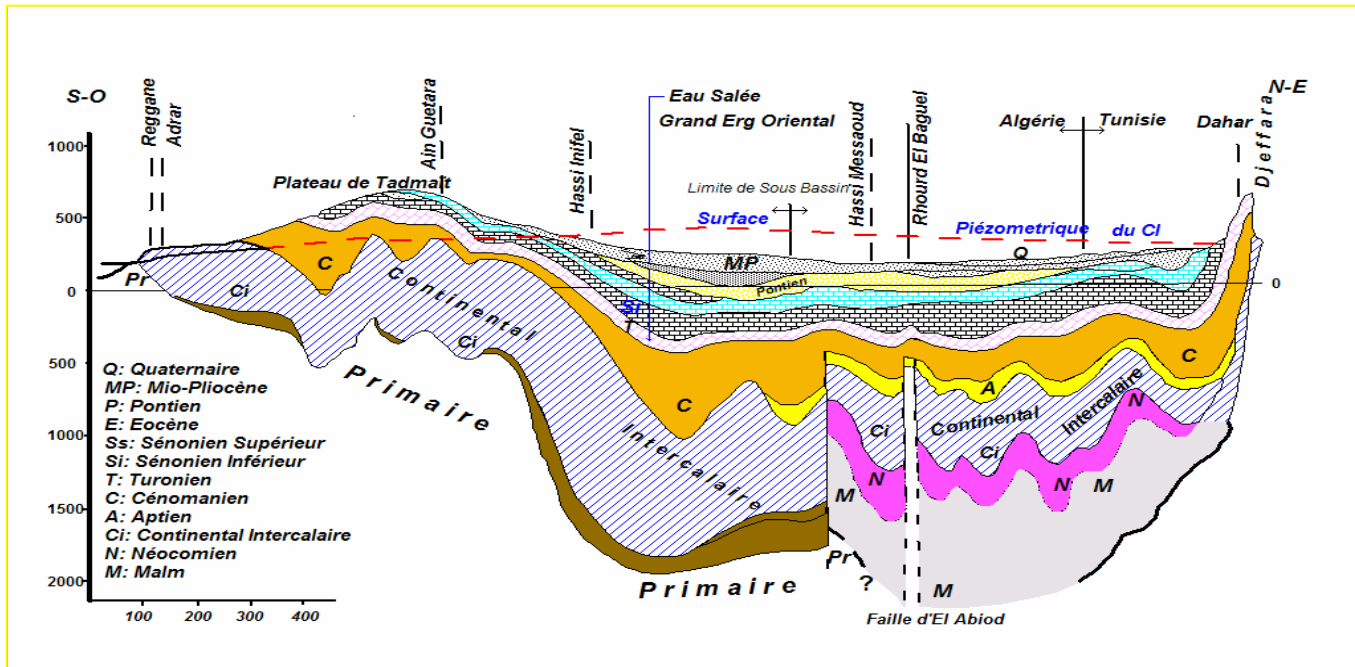


Figure 19. Section hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO. 1972).

### 3. Présentation du système d'aquifère de la cuvette d'Ouargla

Le bassin d'Ouargla présente une structure géologique caractéristique de la plateforme saharienne, formant une cuvette synclinale asymétrique remplie par une épaisse série sédimentaire. Selon (Busson 1970), cette dépression accumule plusieurs milliers de mètres de dépôts s'échelonnant du Primaire au Quaternaire.

En surface, les affleurements visibles correspondent principalement aux formations géologiques du Mio-Pliocène et du Quaternaire. Les données de forage mettent en évidence l'organisation stratigraphique du système aquifère, qui comprend trois niveaux principaux superposés (UNESCO, 1972 ; OSS, 2003) :

1. À la base, l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) constitue la nappe profonde
2. Au milieu, l'aquifère du Complexe Terminal (CT) forme la nappe intermédiaire
3. En surface, la nappe phréatique représente l'aquifère superficiel

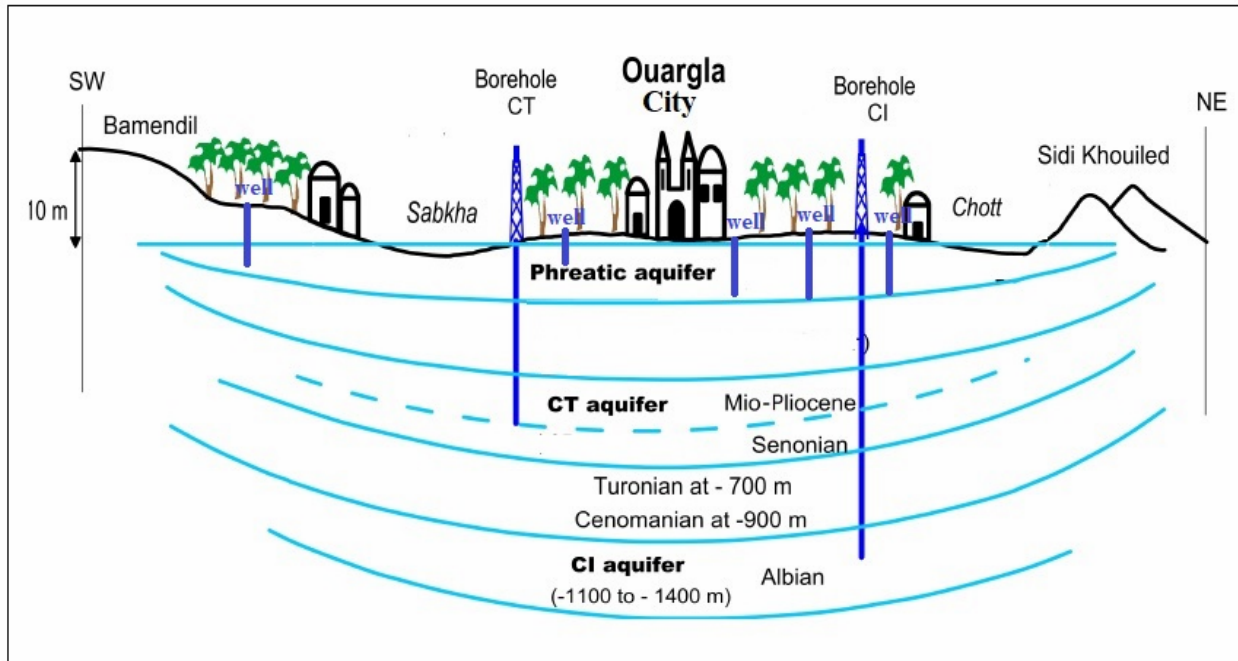


Figure 20: coupe hydrogéologique schématique dans la cuvette d'Ouargla.

### 3.1. La nappe phréatique:

C'est une nappe superficielle constituée de formations alluvionnaires sableuses datant du Quaternaire, affleurant dans certaines dépressions ou vallées. Sa profondeur varie entre 1 et 15 mètres (Satouh et al., 2021 ; Bouselsal et al., 2015).

Cette nappe est alimentée principalement par les précipitations, les crues et les eaux usées. Toutefois, elle n'est pas exploitée en raison de sa forte salinité, avoisinant les 15 g/l (Zaddouri, 2008). Cette salinité élevée résulte du lessivage des formations gypseuses et argileuses, ainsi que de la surexploitation des aquifères profonds. Ce phénomène entraîne une remontée du niveau hydrostatique de la nappe superficielle, perturbant ainsi l'équilibre de l'écosystème oasien.

La carte piézométrique établie en mai 2017 (Satouh et al., 2021) montre que l'écoulement de la nappe phréatique se fait du sud-ouest vers le nord-est. Les courbes isohypses, relativement rapprochées, présentent une concavité orientée vers le sud-ouest. Cette configuration traduit un excès d'eau dû à l'infiltration des eaux usées sous la ville d'Ouargla, ainsi qu'à celle des eaux d'irrigation dans les zones agricoles de Bour Elhaicha et Ain Moussa.

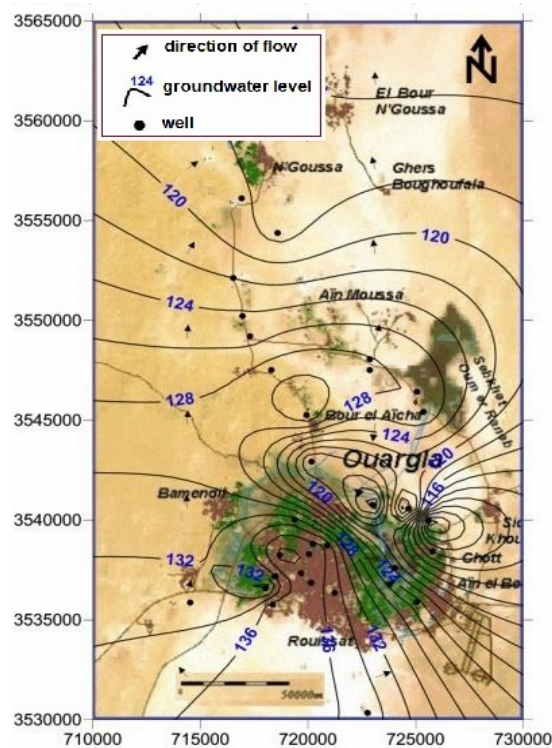


Figure 21 : Carte piézométrique de la nappe phréatique d'Ouargla (Satouh et al. 2021)

### 3.2. Complexe Terminal (CT) d'Ouargla

L'étude géologique du Complexe Terminal d'Ouargla s'appuie sur l'analyse de 53 forages captant l'aquifère dans des formations sableuses ou calcaires, afin de déterminer l'extension lithologique et stratigraphique de l'ensemble. Les colonnes stratigraphiques correspondantes sont situées sur l'ensemble de la cuvette d'Ouargla, comme illustré à la figure 34-1.

La corrélation entre les logs litho-stratigraphiques a été réalisée à l'aide de la version 2022 du logiciel RockWorks. L'interprétation lithologique des coupes géologiques permet de définir la composition générale des formations stratifiées constituant le Complexe Terminal. L'épaisseur de chaque horizon stratigraphique varie selon les zones étudiées (Figure 34-2).

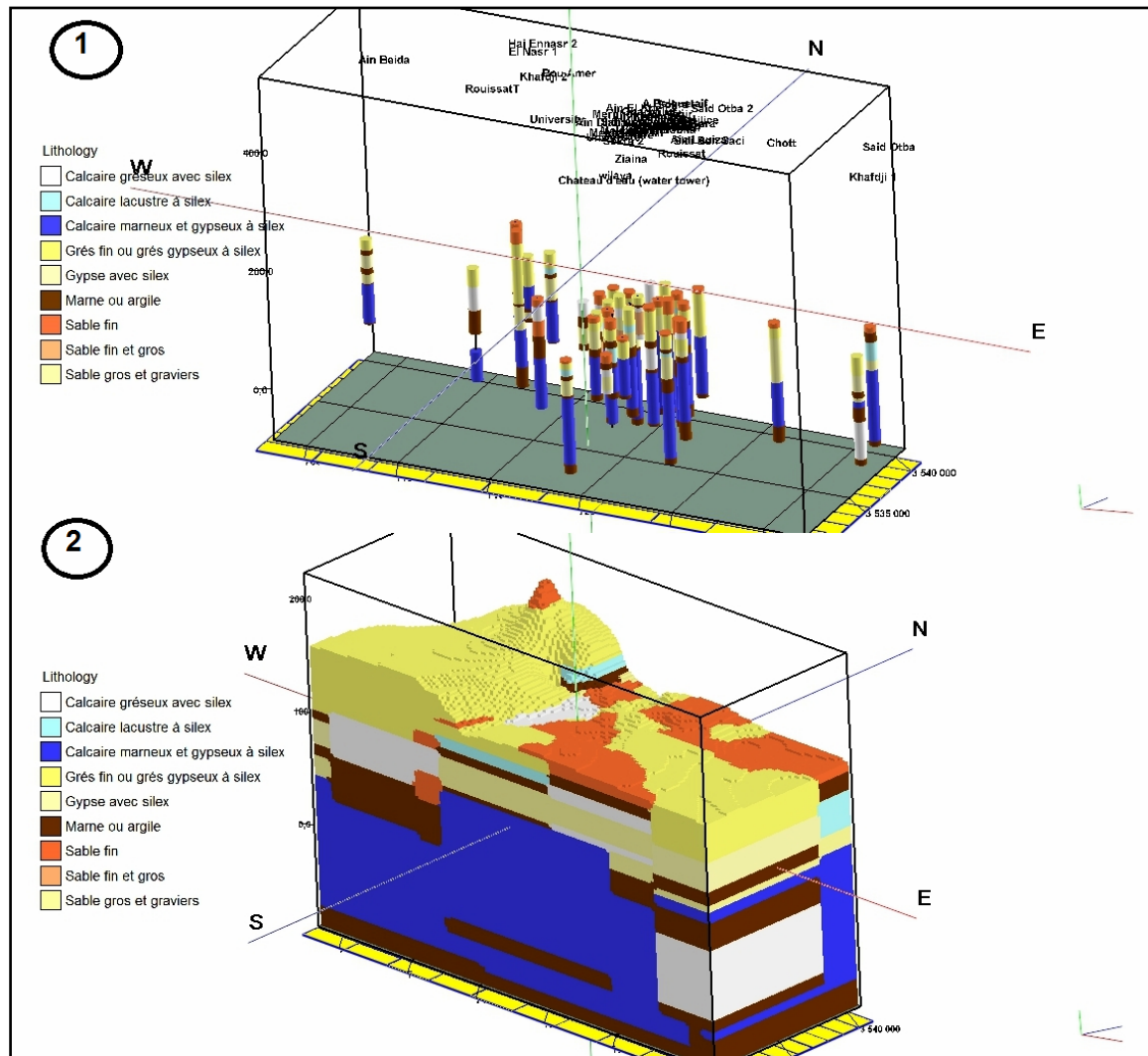


Figure 22 : La position des 53 forages de CT avec la légende lithologique. 2) Model en 3D illustrant la lithologie de CT dans la région d'étude.

La description litho-stratigraphique des formations géologiques a été élaborée à partir de l'interprétation des données issues des forages pétroliers et hydrauliques. Le Complexe Terminal, caractérisé par une hétérogénéité marquée, regroupe des unités perméables appartenant aux séries du Sénono-éocène et du Mio-pliocène.

Il est possible d'y distinguer deux couches aquifères principales, séparées par des formations à perméabilité réduite, voire imperméables. Les principales formations litho-stratigraphiques identifiées, du sommet vers la base, sont les suivantes :

- **Quaternaire:** Ces formations reposent en discordance sur les unités sous-jacentes, avec une distribution irrégulière dans la cuvette d'Ouargla. Elles sont constituées d'alternances de matériaux sableux, gréseux, sablo-argileux, gypseux et marneux. Leur épaisseur varie entre 2 et 15 mètres.

- **Mio-pliocène:**Ce sont les seules formations affleurantes dans la cuvette, généralement recouvertes par une fine couche de sédiments quaternaires. Elles forment un ensemble épais, compris entre 17 et 70 mètres, composé d'une alternance de niveaux sableux, gréseux, argileux, et gypseux avec présence locale de silex.
- **Sénono-éocène :**Ces formations sont constituées principalement de calcaires gréseux, de niveaux gypseux et, par endroits, de marnes. Leur épaisseur est variable, allant de 30 à 200 mètres. La base de ces coupes est marquée par une alternance de marnes argileuses.

En ce qu'il concerne la piézométrie de l'Aquifère Complexe Terminal.L'aquifère du Complexe Terminal (CT) fait l'objet d'une exploitation croissante, ce qui entraîne une baisse continue des niveaux piézométriques. Cette situation devient préoccupante et difficile à maîtriser. Sur l'ensemble du Bas-Sahara algérien, la diminution du niveau piézométrique de cette nappe, notamment dans la zone d'étude, est estimée entre 30 et 50 mètres (OSS, 2003).

La carte de 2014 montre que la partie amont de la nappe Mio-pliocène se situe au sud-ouest, au niveau de Khafdji, avec des altitudes piézométriques comprises entre 128,8 m et 142,7 m. La partie aval, en revanche, est localisée au nord-ouest, dans la région de N'goussa, avec une altitude d'environ 112 m. L'écoulement des eaux souterraines s'effectue donc du sud-ouest vers le nord-est. La carte piézométrique de 2017 confirme cette tendance. La côte piézométrique la plus élevée est relevée au sud-ouest, notamment à Bamendil et Rouissat, atteignant 170,4 m. Les niveaux les plus bas sont observés vers le nord-est, dans certains forages situés à proximité de la ville d'Ouargla, avec une altitude minimale de 44,76 m.

Les dépressions piézométriques visibles sur ces cartes illustrent clairement la surexploitation de l'aquifère. Le gradient hydraulique a également connu une augmentation significative : il est passé de 2,5 ‰ à 4 ‰ en 2014, puis de 4 ‰ à 7 ‰ lors de la campagne de novembre 2017.

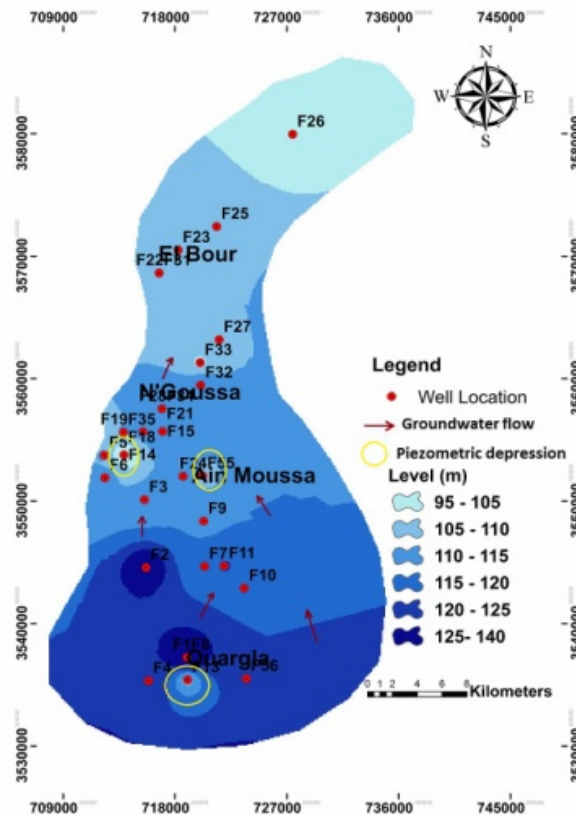


Figure 23: Carte piézométrique de la nappe de Mio-pliocène (2017)

La carte piézométrique de la nappe Sénonienne, établie en 2014, révèle un double sens d'écoulement des eaux souterraines : une direction principale du sud-ouest vers le nord-est et une direction secondaire du nord-ouest vers l'est. Dans la partie sud de la cuvette d'Ouargla, l'écoulement s'effectue depuis le point le plus élevé, situé au sud-ouest de la ville, à 249,3 m, vers le point le plus bas, localisé au centre urbain, à 45,19 m. Les zones de forte exploitation coïncident avec les secteurs urbanisés, notamment dans la ville d'Ouargla.

La carte piézométrique de 2017 montre une configuration similaire à celle de 2014, confirmant la continuité du sens d'écoulement général. Le niveau piézométrique le plus élevé est enregistré au sud-ouest, dans les régions de Rouissat et Khedji, avec une altitude de 155,5 m, tandis que les niveaux les plus bas sont localisés au centre-ville (41 m) et au sud-est (70,21 m). Ces valeurs témoignent d'un abaissement significatif du niveau piézométrique, dû à une surexploitation persistante de la nappe.

L'orientation de l'écoulement reste globalement dirigée du sud-ouest vers le nord-est, avec un écoulement complémentaire d'ouest vers l'est. Le gradient hydraulique, quant à lui, a connu une hausse notable : il est passé de 1 ‰ à 4 ‰ en 2014, puis de 4 ‰ à 6,5 ‰ en novembre 2017.

### 3.3. La nappe Albienne

La nappe du Continental Intercalaire (CI) est formée de couches sableuses et gréseuses, avec des intercalations d'argile et de dolomie gréseuse, appartenant aux séries albiennes et barrémiennes. Elle présente une épaisseur moyenne d'environ 550 mètres, et son toit se situe à une profondeur variant entre 850 et 1 200 mètres. Il s'agit d'une nappe artésienne jaillissante, caractérisée par une pression à la tête des forages d'environ 15 bars. En raison de sa profondeur, l'eau y présente une température élevée, comprise entre 50 °C et 55 °C. Les forages captant le CI sont intensément exploités, notamment en raison de débits élevés, pouvant dépasser 160 litres par seconde. L'aquifère présente une transmissivité importante, estimée à  $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , avec un coefficient d'emmagasinement de 0,001. La salinité de l'eau est de l'ordre de 2 g/l, ce qui, combiné à une composition chimique généralement défavorable, limite son utilisation pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable.

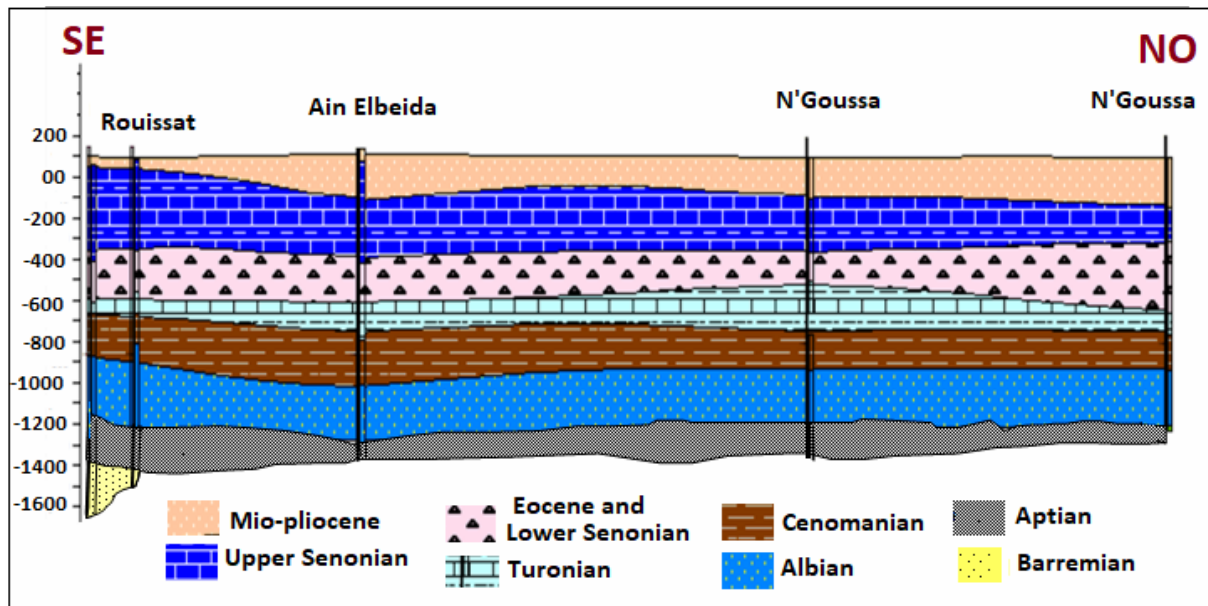


Figure 24 : Coupe géologique montre la géométrie de CI dans la zone d'étude (Boussaada et al., 2023)

### 4. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines d'Ouargla

L'analyse de l'hydrochimie des eaux souterraines représente une étape fondamentale en hydrogéologie, car elle permet de déterminer la composition chimique des aquifères. Cette composition dépend en grande partie de la nature géologique des formations traversées, du temps de séjour de l'eau dans le sous-sol, ainsi que des conditions climatiques locales, notamment pour les nappes phréatiques peu profondes.

Par ailleurs, divers facteurs peuvent influencer la concentration des ions dissous dans ces eaux. Parmi eux figurent les échanges entre les eaux souterraines et de surface, les modalités d'exploitation telles que le forage et le pompage, ainsi que les impacts anthropiques,

notamment l'agriculture intensive et les rejets d'eaux usées. Ces activités peuvent introduire une variété de substances, comme le potassium, le sulfate, le calcium, le magnésium, les nitrates, les phosphates, les pesticides, ou encore certains métaux lourds.

Ce chapitre vise à examiner les propriétés hydrochimiques des eaux souterraines de la région d'Ouargla, en évaluant leur aptitude à l'alimentation en eau potable, tout en identifiant les principaux paramètres chimiques qui les caractérisent.

#### **4.1. Échantillonnage et méthode d'analyse**

Les données exploitées dans le cadre de cette étude ont été fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de la wilaya d'Ouargla. L'échantillonnage couvre un total de 45 forages répartis entre différentes nappes aquifères. Plus précisément, 10 échantillons ont été prélevés à partir de forages captant la nappe du Miopliocène, 10 autres proviennent de la nappe du Sénonien carbonaté, tandis que 10 échantillons supplémentaires concernent la nappe du Continental Intercalaire (CI). Enfin, 5 échantillons ont été prélevés au niveau de la nappe phréatique. Cette diversité d'origine permet une analyse comparative approfondie des caractéristiques hydrochimiques selon la nature de l'aquifère exploité.

Les données disponibles comprennent les coordonnées géographiques et les données hydrochimiques telles que la conductivité électrique (EC), la température (T), le potentiel d'hydrogène (pH), la concentration totale de solides dissous (TDS), la conductivité électrique (CE) et les concentrations en ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ).

Les échantillons d'eau utilisés dans cette étude ont été prélevés et analysés dans différents intervalles du temps dans le laboratoire de l'ANRH d'Ouargla en suivant le protocole d'échantillonnage de Rodier (1996).

Le calcul de la balance ionique a été appliqué aux résultats de chaque analyse pour juger la fiabilité des analyses effectuées. La balance ionique est exprimée en pourcentage et est basée sur la formule 1. Les résultats obtenus sont considérés de qualité acceptable si le pourcentage d'erreur est inférieur à cinq pour cent.

$$\text{Balance ionique} = [(\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions})] * 100 \text{ (Eq. 1)}$$

#### **4.2. Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines d'Ouargla**

Le tableau 16 présente les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines prélevées dans quatre nappes de la région d'Ouargla : le Mio-Pliocène, le Sénonien, le Continental Intercalaire (CI) et la nappe phréatique. Ces nappes, situées à différentes profondeurs, révèlent des contrastes marqués dans leur composition chimique, en lien avec la géologie traversée, les conditions climatiques extrêmes, et les influences anthropiques croissantes.

Les concentrations en **solides dissous totaux (TDS)** sont particulièrement révélatrices de la minéralisation avancée des eaux. Les valeurs moyennes varient de 1764 mg/L dans la nappe Sénonienne à plus de 28 000 mg/L dans la nappe phréatique, traduisant une forte salinité, en particulier dans les nappes superficielles. Cette salinité élevée est également reflétée dans la conductivité électrique (EC), qui atteint en moyenne 5378  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la nappe Mio-Pliocène, et dépasse 27 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la nappe phréatique. De telles valeurs indiquent une charge ionique importante, incompatible avec les normes de potabilité sans traitement préalable.

Les **cations majeurs** ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  et  $\text{K}^{+}$ ) sont très concentrés, surtout dans les nappes Mio-Pliocène et phréatique. Le sodium, en particulier, atteint une moyenne impressionnante de 6619 mg/L dans la nappe phréatique, bien au-delà des recommandations de l'OMS (200 mg/L), ce qui pourrait poser des risques pour la santé, notamment chez les personnes sensibles à une alimentation riche en sel. Le potassium dépasse également les seuils admissibles (12 mg/L), dans toutes les nappes, avec un maximum observé dans la nappe phréatique (jusqu'à 1175 mg/L), reflétant potentiellement une contamination d'origine domestique ou agricole.

Concernant les **anions**, les chlorures ( $\text{Cl}^{-}$ ) et les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) montrent des niveaux particulièrement élevés. La nappe phréatique présente des teneurs moyennes de 11 035 mg/L en  $\text{Cl}^{-}$  et 6380 mg/L en  $\text{SO}_4^{2-}$ , indiquant une probable origine évaporitique et un fort impact de l'évaporation. Le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^{-}$ ), plus modéré, oscille autour de 175 à 345 mg/L selon la nappe, sans franchir les seuils critiques, bien qu'il reflète l'influence des formations carbonatées traversées.

Les concentrations en **nitrate ( $\text{NO}_3^{-}$ )**, indicateurs d'une pollution d'origine anthropique (engrais, eaux usées), varient considérablement. Les teneurs les plus élevées sont relevées dans la nappe phréatique, avec un maximum de 71 mg/L et une moyenne de 37,4 mg/L, dépassant parfois la limite de 45 mg/L fixée par l'OMS. Les nappes profondes (CI et Sénonien) présentent des niveaux plus faibles, ce qui témoigne de leur relative protection vis-à-vis des sources de pollution de surface.

Le **pH**, quant à lui, reste globalement neutre à légèrement alcalin (7,6 à 8,4), ce qui est typique des eaux traversant des formations carbonatées ou contenant des évaporites.

Enfin, la **dureté totale (TH)** est extrêmement élevée dans toutes les nappes, en particulier dans la nappe phréatique (moyenne de 8014 mg/L), traduisant une prédominance de calcium et de magnésium dans la composition ionique des eaux. De telles concentrations ont des implications importantes pour l'usage domestique et industriel de l'eau (entartrage, rendement des installations).

En résumé, les eaux souterraines de la région d’Ouargla, notamment celles issues des nappes superficielles (Mio-Pliocène et phréatique), sont fortement minéralisées et présentent une qualité chimique altérée par l’évaporation intense, les évaporites et les intrusions anthropiques (eaux usées urbaines et les eaux de drainage agricoles). Les nappes profondes, bien que moins affectées, affichent aussi des niveaux de minéralisation élevés, nécessitant des traitements spécifiques pour une utilisation potable durable.

Tableau 16. Données hydrochimiques sur les eaux souterraines d’Ouargla.

Nappe	Stat	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TDS	pH	EC	TH
		(mg/L)										(µS/cm)	Mg/l
MIOPLIOCENE	Min	177.60	33.36	279.42	11.28	313.11	654.72	112.85	9.00	125.04	7.62	2399.04	696.50
	Max	297.40	198.36	1303.40	22.56	1814.05	1872.16	479.46	26.00	531.24	8.12	7452.90	1529.00
	Moy	244.86	146.02	817.31	17.44	1108.45	1108.46	207.40	20.90	229.80	7.92	5378.44	1220.58
	E-T	35.58	54.91	410.87	3.78	523.33	523.33	114.49	4.72	126.85	0,15	1974.96	297.39
Sénonien	Min	105.00	48.24	225.00	12.00	375.00	688.00	88.00	1.00	133.15	7.60	2310	757.92
	Max	311.60	194.00	549.85	35.50	726.69	1025.00	300.12	22.00	2850.00	8.40	3860	1176.67
	Moy	187.17	127.64	350.39	20.34	562.30	828.32	175.86	12.22	1764.24	7.94	3197.60	999.76
	E-T	58.62	42.09	89.41	8.31	113.26	130.80	65.00	7.47	1087.50	0.32	580.80	144.70
CI	Min	83.00	73.00	18	175.00	375	463	67	1	1502	7.66	2165	712.50
	Max	207.50	240.00	54	320.00	565	1050	281	42	2658	8.40	3240	1317.50
	Moy	117.66	131.82	30.03	245.25	460	634.56	148.59	11.03	1855.70	8.03	2698.10	843.41
	E-T	40.05	46.39	9.81	46.40	67.70	171.77	70.57	13.41	349.72	0.29	324.44	184.48
PHEATIQUE	Min	275	128	370	23.5	540	1562.50	134.20	6.00	4254.00	7.84	4320	1295.83
	Max	4125	2009.60	1975.00	1175.00	33250	15875.00	619.15	71.00	73241.00	8.06	69000	17279.58
	Moy	1761.50	866.66	6619.00	387.70	11035	6380.00	345.87	37.40	28646.00	7.93	27426	8014.83
	E-T	1913.95	824.71	8687.05	513.86	14597.94	6504.59	210.12	27.60	31918.08	0.09	30263.49	8092.70

### 4.3. Qualité de l'eau vis-à-vis à la potabilité

L'évaluation de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine constitue aujourd'hui un enjeu majeur de santé publique, particulièrement dans les régions confrontées à une croissance démographique rapide et à une pression accrue sur les ressources hydriques. À l'échelle mondiale, la demande en eau douce ne cesse d'augmenter, tandis que la disponibilité de l'eau potable diminue sous l'effet combiné de la surexploitation des ressources et de la dégradation de la qualité des eaux.

Dans de nombreux pays en développement, l'accès à une eau salubre reste limité, notamment en raison de la contamination croissante des ressources, causée par les activités industrielles, agricoles et domestiques. Ces activités introduisent dans les eaux souterraines et de surface divers polluants tels que les métaux lourds, les nitrates, les pesticides, les hydrocarbures ou encore les agents pathogènes. L'absence d'un système d'assainissement adéquat aggrave la

situation, favorisant l'apparition de maladies hydriques qui figurent parmi les principales causes de morbidité selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Dans ce contexte, l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la région d'Ouargla vis-à-vis des normes de potabilité de l'OMS (2017) a été réalisée à partir des analyses des quatre nappes principales : Mio-Pliocène, Sénonien, Continental Intercalaire (CI) et nappe phréatique. Les résultats présentés dans le tableau 17 montrent une altération généralisée de la qualité chimique, avec de nombreux dépassements des limites permises (PL), notamment pour les paramètres liés à la salinité et à la minéralisation.

Le paramètre **calcium (Ca<sup>2+</sup>)**, dont la limite permise est de 200 mg/L, dépasse cette valeur dans 90 % des échantillons de la nappe Mio-Pliocène, 40 % de ceux du Sénonien, et 100 % dans la nappe phréatique. La **dureté totale (TH)**, reflet de la présence combinée de calcium et de magnésium, est également largement au-dessus de la limite recommandée de 500 mg/L dans l'ensemble des nappes, avec un dépassement dans 100 % des cas pour toutes les nappes analysées. Ces résultats confirment une eau très dure, notamment dans les formations superficielles.

Le **magnésium (Mg<sup>2+</sup>)**, limité à 150 mg/L selon l'OMS, affiche des dépassements notables : 50 % dans la nappe Mio-Pliocène, 30 % dans le Sénonien, 20 % dans le CI, et 90 % dans la nappe phréatique. Ces concentrations élevées s'expliquent par la nature évaporitique et carbonatée des formations traversées, ainsi que par une forte évaporation régionale.

Le **sodium (Na<sup>+</sup>)**, bien que sans limite directement fixée par l'OMS pour la potabilité, est classé comme préoccupant dès 200 mg/L. Il dépasse ce seuil dans 100 % des échantillons des nappes Mio-Pliocène, Sénonien et phréatique, ce qui témoigne d'une salinisation marquée, susceptible d'entraîner des effets néfastes sur la santé, notamment chez les personnes sensibles à l'hypertension.

Les concentrations en **chlorures (Cl<sup>-</sup>)** et **sulfates (SO<sup>2-</sup>)**, dont les limites permises sont respectivement de 600 mg/L et 400 mg/L, révèlent également une qualité dégradée : les sulfates dépassent les normes dans 100 % des échantillons des nappes Mio-Pliocène, Sénonien et CI, et dans 100 % des cas pour la nappe phréatique. Les chlorures excèdent les seuils permis dans 70 % des cas pour les nappes Mio-Pliocène et Sénonien, et dans 90 % des échantillons de la nappe phréatique. Ces résultats sont cohérents avec l'influence des roches évaporitiques et l'intensité des processus de concentration par évaporation.

Le **potassium (K<sup>+</sup>)** dépasse la norme OMS (12 mg/L) dans 90 à 100 % des échantillons de toutes les nappes, ce qui suggère des apports anthropiques probables, notamment d'origine domestique et agricole.

En ce qui concerne les **nitrate** (**NO<sub>3</sub>**), seuls les échantillons de la nappe phréatique affichent des dépassements (60 % des cas au-dessus de 45 mg/L), traduisant une contamination liée à des rejets organiques, à l’usage d’engrais ou à des infiltrations d’eaux usées (Lakhdari and Bouselsal, 2024). Les nappes plus profondes apparaissent mieux protégées contre cette forme de pollution.

Les paramètres globaux de **salinité** sont fortement dépassés. La **TDS** (solides dissous totaux) et la **conductivité électrique (EC)** excèdent les limites permises respectivement dans 70 à 100 % des échantillons, toutes nappes confondues. Ces dépassements indiquent un fort niveau de minéralisation, rendant l’eau généralement impropre à la consommation sans traitement spécifique.

Le **pH**, quant à lui, reste dans les normes OMS (6,5 à 8,5) pour l’ensemble des nappes, indiquant une eau globalement neutre à légèrement alcaline, compatible avec la géochimie régionale dominée par les formations carbonatées.

En résumé, les eaux souterraines de la région d’Ouargla, en particulier celles des nappes Mio-Pliocène et phréatique, présentent une qualité largement altérée par la salinité, la dureté excessive et, dans une moindre mesure, par la pollution nitratée. Ces résultats soulignent l’importance d’un suivi rigoureux, de traitements adaptés (notamment pour la dessalination ou l’adoucissement), et d’une gestion intégrée des ressources pour assurer une distribution d’eau potable sécurisée.

Tableau 17: Evaluation de la potabilité vis-à-vis aux normes de l’OMS (2017)

N°	Norme OMS 2017		N- Miopliocène		N- Sénonien		N-CI		N- Phéatique	
	DL	PL	Echant dépassé PL		Echant dépassé PL		Echant dépassé PL		Echant dépassé PL	
			Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
<b>Ca</b>	75	200	09	90	04	40	01	10	05	100
<b>Mg</b>	50	150	05	50	03	30	02	20	04	90
<b>Na</b>	-	200	10	100	10	100	00	00	05	100
<b>K</b>	-	12	09	90	10	100	10	100	05	100
<b>Cl</b>	200	600	07	70	07	70	00	00	04	90
<b>SO<sub>4</sub></b>	200	400	10	100	10	100	10	10	05	100
<b>HCO<sub>3</sub></b>	300	500	00	00	00	00	00	00	02	40
<b>NO<sub>3</sub></b>	-	45	00	00	00	00	00	00	03	60
<b>pH</b>	-	6,5 to 8,5	00	00	00	00	00	00	00	00
<b>TDS</b>	500	1000	00	00	07	70	10	100	05	100
<b>EC</b>	500	1500	10	100	10	100	10	100	05	100
<b>TH</b>	100	500	10	100	10	100	10	100	05	100

### 5. l’indice de la qualité des eaux (WQI) d’Ouargla

Afin d'évaluer la qualité de l'eau souterraine à des fins de consommation, l'indice de qualité de l'eau potable (WQI) est utilisé dans la présente étude (Ouerakh et al., 2021 ; Bouselsal et al., 2025). La méthode WQI développée la première fois par (Horton 1965) résume une multitude de données relatives à la qualité de l'eau en une valeur numérique, facile à saisir par les différents acteurs en domaine d'eau. La procédure de calcul du WQI comprend quatre étapes différentes, qui sont discutées ci-dessous :

Étape 1 : Dans cette étape, un poids ( $w_i$ ) est attribué à chaque paramètre hydrochimique en fonction de leur importance relative. La valeur du poids attribuée varie de 1 à 5, où la valeur la plus élevée de 5 correspond aux paramètres dont l'importance est élevée dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Tab.18). Le poids relatif ( $W_i$ ) peut être calculé à l'aide de l'équation (2) comme suit :

(Eq. 2)

Où  $w_i$  et  $W_i$  représentent respectivement le poids et le facteur de poids relatif de chaque paramètre hydrochimique,  $n$  est le nombre total de paramètres hydrochimiques, c'est-à-dire  $n = 11$ , comme indiqué dans le Tableau 3.

Tableau 18. Poids relatif des paramètres hydrochimiques.

Paramètres	Poids (qi)	WHO (2017) (Si)	Poids relatif (Wi)
pH	4	8.5	0.114
CE	4	1000	0.114
TDS	5	500	0.114
Ca	2	100	0.057
Mg	1	50	0.028
Na	2	200	0.057
K	2	12	0.057
Cl	3	200	0.085
HCO <sub>3</sub>	3	300	0.085
SO <sub>4</sub>	4	200	0.114
NO <sub>3</sub>	5	45	0.114
Total	35	-	1

Étape 2 : La note de qualité ( $qi$ ) est calculée en divisant la concentration de chaque échantillon d'eau souterraine par sa limite standard telle que prescrite par les normes de l'organisation mondiale de la santé (WHO 2017), puis en multipliant le résultat par 100, comme indiqué dans l'équation 3, ci-dessous :

(Eq. 3)

Où  $qi$  représente l'échelle de notation de qualité,  $Si$  représente les normes pour l'eau potable selon les normes WHO (2017) pour chaque paramètre hydrochimique, et  $Ci$  représente la concentration observée en mg/L de chaque paramètre hydrochimique.

Étape 3 : Le sous-indice ( $SI_i$ ) de chaque paramètre hydrochimique est déterminé en multipliant  $W_i$  et  $q_i$ , comme indiqué dans l'équation (3).

Étape 4 : Enfin, le WQI est calculé en additionnant toutes les valeurs de  $SI_i$  pour chaque échantillon, comme indiqué dans l'équation (3).

Sur la base des résultats des valeurs de WQI, la qualité de l'eau est classée en cinq catégories (Bouselsal and Saibi 2022) : excellente (<50), bonne (50 to 100), médiocre (100 to 200), très médiocre (200 to 300) et non potable (>300).

L'analyse des résultats de l'indice de qualité des eaux (WQI) (Figure. 25) met en évidence une forte dégradation de la qualité des eaux souterraines dans l'ensemble des nappes de la région d'Ouargla. Aucun des échantillons analysés ne relève d'une qualité excellente ou bonne (WQI < 100). Seuls trois forages captant la nappe du Mio-pliocène et trois autres exploitant la nappe sénonienne carbonatée appartiennent à la classe "médiocre". L'ensemble des autres forages étudiés se situe dans les classes "très médiocre" à "non potable". En ce qui concerne les forages captant la nappe phréatique, aucun n'est représenté dans les classes acceptables, car tous présentent un WQI supérieur à 300, les classant dans la catégorie "non potable".

Cette dégradation généralisée de la qualité des eaux résulte de facteurs à la fois géologiques et anthropiques :

**Facteurs géologiques** : la présence de formations évaporitiques (gypse, anhydrite) dans la région favorise une minéralisation accrue des eaux souterraines, ce qui contribue à l'élévation de l'indice WQI.

**Facteurs anthropiques** : l'infiltration des eaux de surface contaminées par les polluants urbains et agricoles (rejets domestiques, engrais, pesticides) aggrave la pollution chimique des nappes.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité impérieuse de mettre en place un traitement des eaux, notamment pour réduire la salinité et la concentration en nitrates, avant leur distribution pour la consommation humaine. Ce traitement est indispensable afin de garantir la sécurité sanitaire des populations et d'améliorer la qualité des ressources en eau exploitées dans la région.

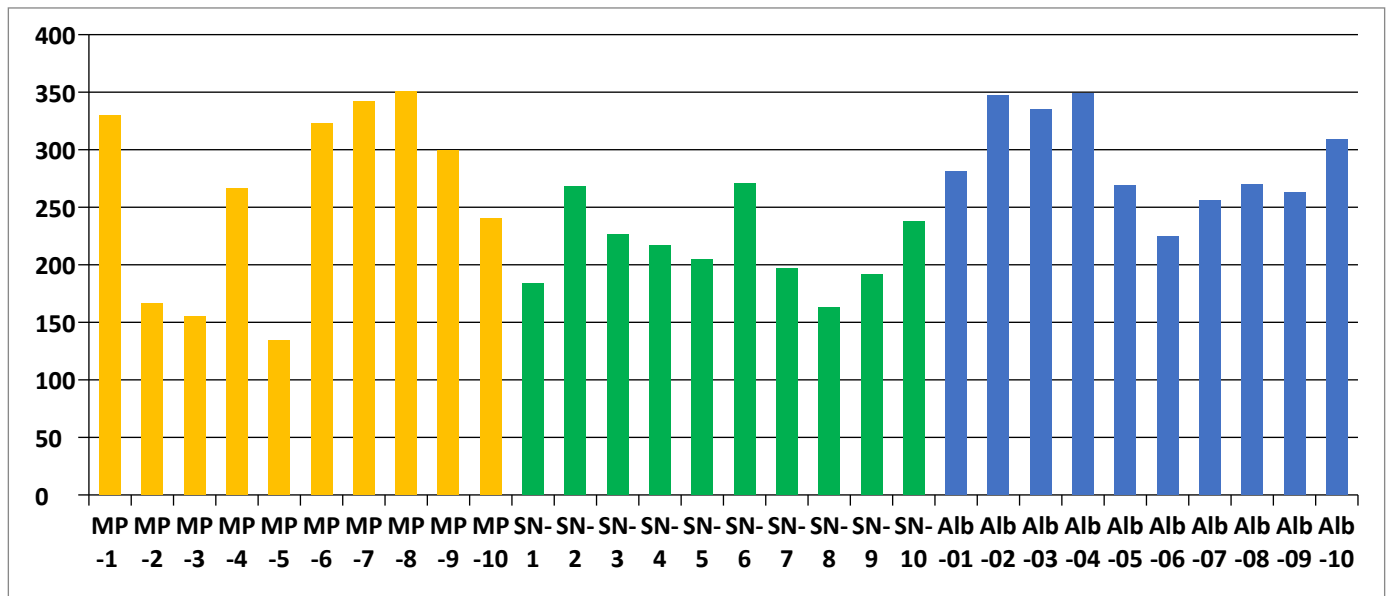


Figure 25. Histogramme de la variation de l'indice de WQI dans les eaux des nappes d'Ouargla.

## 6. Facies chimique

Le diagramme de Piper est utile pour comprendre la chimie des eaux souterraines et ses processus d'évolution. Il permet de déterminer le faciès chimique d'eau (Piper 1944). Le diagramme se constituer d'un champ en forme de losange au centre et de deux champs triangulaires sur les deux côtés. Les cations et anions sont exprimés en pourcentage du total des cations (Ca, Mg and Na+K) et anions (Cl, SO<sub>4</sub> et HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>) présents en meq/l. sur le triangle de gauche il est représenter les cations tandis que sur le triangle droit, les anions sont représentés. Les points présentés sur les triangles sont ensuite projetés dans le champ central en forme de losange qui détermine le faciès de l'eau (Bouselsal et al. 2024).

Le diagramme de Piper (1944) (Fig. 26) a été utilisé afin de caractériser les eaux des différentes nappes souterraines étudiées. L'interprétation des résultats des analyses chimiques met en évidence deux principaux faciès hydrochimiques :

(a) Le **faciès chloruré sodique**, dominant, est observé dans environ 80 % des forages du Mio-Pliocène, 60 % de ceux de la nappe phréatique et 20 % des forages du Sénonien. Ce faciès est associé à une forte minéralisation des eaux, résultant principalement de l'évaporation intense caractéristique du climat aride de la région, ainsi que de l'infiltration rapide d'eaux usées non traitées.

(b) Le **faciès chloruré et sulfaté, calcique et magnésien** caractérise le reste des points d'eau échantillonnés. Les eaux appartenant à ce groupe présentent une minéralisation moyenne, traduisant une influence plus modérée des processus de concentration saline.

La répartition de ces faciès témoigne de la complexité des processus hydrogéochimiques à l'œuvre dans la région d'Ouargla, où la salinité des eaux souterraines résulte d'une interaction étroite entre les conditions géologiques (nature des formations traversées) et les facteurs climatiques (aridité, évaporation), aggravés localement par des pressions anthropiques.

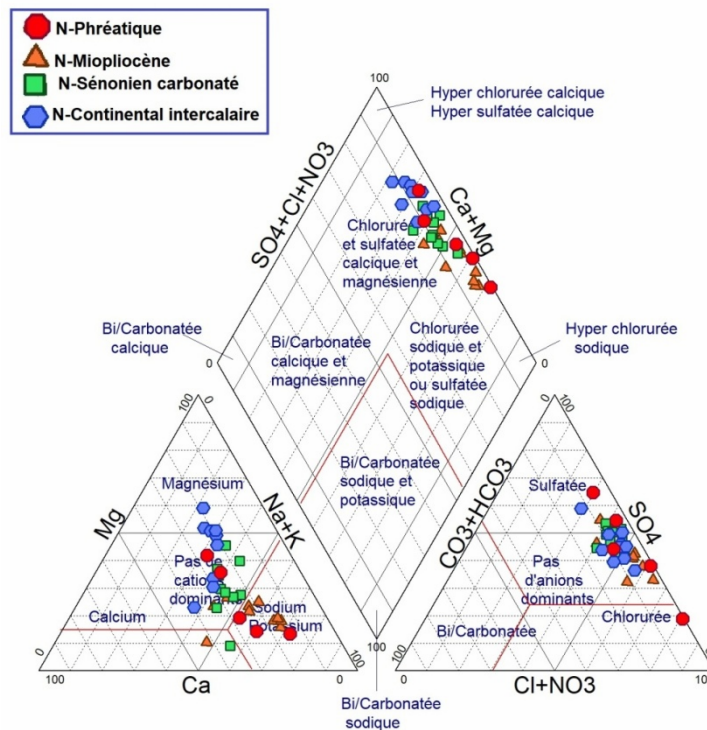


Figure 26 : diagramme piper des eaux souterraines d'Ouargla.

## 7. Conclusion

La région d'Ouargla fait partie intégrante du système aquifère du Sahara septentrional (SASS), l'un des plus vastes systèmes hydrogéologiques d'Afrique du Nord. Le sous-sol de la zone d'étude est structuré en trois niveaux aquifères superposés : la nappe phréatique, l'aquifère du Complexe Terminal (CT), et l'aquifère du Continental Intercalaire (CI). La nappe phréatique, peu profonde (entre 1 et 15 mètres), repose sur des formations alluvionnaires sableuses du Quaternaire. Elle est fortement affectée par l'évaporation et l'infiltration des eaux usées, ce qui entraîne une salinité très élevée, souvent supérieure à 15 g/L. L'aquifère du Complexe Terminal se compose de deux nappes principales : la nappe du Mio-Pliocène, située à des profondeurs variant entre 100 et 400 mètres, dans des formations sableuses et argileuses, et la nappe sénonienne, installée dans des formations carbonatées (calcaires, dolomies, gypse), atteignant parfois 600 mètres de profondeur. Enfin, l'aquifère du Continental Intercalaire, situé entre 850 et 1200 mètres, est formé de grès et d'argiles crétacées. Il présente une bonne transmissivité et des débits élevés, mais ses eaux sont

chaudes (50 à 55 °C) et modérément salines (environ 2 g/L), ce qui limite leur usage sans traitement.

Sur le plan chimique, les eaux souterraines de la région présentent une forte minéralisation, avec des teneurs élevées en sodium, chlorures, sulfates, calcium et magnésium, en particulier dans les nappes superficielles. L'évaluation de la qualité selon les normes de l'OMS (2017) montre que la majorité des échantillons dépassent les seuils admissibles pour plusieurs paramètres, notamment la salinité, la dureté, et les nitrates. L'indice de qualité de l'eau (WQI) confirme cette dégradation : la quasi-totalité des forages étudiés se classent dans les catégories « très médiocre » à « non potable ». Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'un suivi permanent de la qualité des eaux et la mise en œuvre de traitements adaptés pour assurer un usage durable et sécurisé de cette ressource vitale dans un contexte saharien à forte contrainte environnementale.

*Chap.03 : Gestion de la  
qualité des eaux dans la  
cuvette d'Ouargla*

## **1. Introduction**

La région d'Ouargla, bien qu'abondamment dotée en ressources en eaux souterraines, fait face à une problématique majeure de qualité, en raison de la forte salinité et de la composition chimique défavorable de ses principales nappes. Cette contrainte limite l'exploitation directe de ces eaux pour les besoins domestiques, agricoles et industriels, en l'absence d'un traitement adéquat. Le chapitre précédent a mis en évidence les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la région, ainsi que les teneurs élevées en sels dissous, notamment dans la nappe phréatique et dans le Complexe Terminal.

Face à cette situation, les pouvoirs publics ont mis en place un projet stratégique visant à assurer une distribution d'eau conforme aux normes de potabilité. Ce projet repose sur la mise en œuvre de **neuf stations de déminéralisation**, réparties dans les différentes zones de la ville d'Ouargla et de ses environs. Ces stations ont été conçues pour traiter l'eau brute issue des forages, en abaisser la salinité, améliorer sa qualité physico-chimique et garantir une distribution d'eau traitée répondant aux standards de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Ce chapitre vise donc à présenter de manière détaillée :

- les caractéristiques générales du projet de déminéralisation, incluant sa capacité de production, ses objectifs et ses acteurs ;
- l'implantation géographique et les spécificités techniques des neuf stations construites, avec un focus sur leur mode de fonctionnement basé principalement sur l'osmose inverse ;
- enfin, une analyse comparative de la qualité de l'eau avant et après traitement, sur la base de plusieurs paramètres clés (salinité, dureté, chlorures, etc.), permettant d'évaluer l'efficacité du système mis en place.

Cette analyse mettra en lumière les résultats concrets obtenus à travers ce projet, tant du point de vue technique que sanitaire, et permettra d'apprécier la portée réelle de cette initiative dans la gestion durable de la qualité d'eau désignée à l'approvisionnement en eau potable dans une région aride comme Ouargla.

## **2. Caractéristiques générales du projet de déminéralisation à Ouargla**

Dans un contexte marqué par la salinisation croissante des ressources en eaux souterraines, le gouvernement algérien, à travers le Ministère des Ressources en Eau, a initié un programme ambitieux visant à garantir un accès durable à une eau de qualité pour la population de la région d'Ouargla. Ce programme s'est concrétisé par le lancement d'un projet structurant intitulé : « *Étude, réalisation et exploitation de neuf (09) stations de déminéralisation d'eau à Ouargla* ».

L'objectif principal de ce projet est de **réduire la salinité de l'eau distribuée à la population**, en la ramenant à un niveau inférieur à **0,5 g/l**, contre des valeurs initiales avoisinant les **3 g/l** dans l'eau brute. En parallèle, le projet vise à améliorer les paramètres physicochimiques et bactériologiques de l'eau, en conformité avec les **normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)**.

Au-delà de l'amélioration de la qualité de l'eau, ce programme vise également à Prévenir les dommages causés par l'entartrage sur les réseaux de distribution et les équipements domestiques, réduire la dépendance des populations à des sources d'eau alternatives coûteuses, Renforcer la sécurité sanitaire dans une région à climat aride, et créer de l'emploi local à travers l'exploitation et la maintenance des installations.

Les **stations de déminéralisation d'eau** sont conçues pour **traiter un volume global de 70 500 m<sup>3</sup> d'eau brute par jour**, provenant des nappes profondes via des forages existants. Grâce à un rendement moyen de **75 %**, les neuf stations sont capables de fournir quotidiennement jusqu'à **52 875 m<sup>3</sup> d'eau traitée**, soit l'équivalent de l'approvisionnement de la majorité des habitants de la ville de Ouargla et de ses alentours.

Les capacités individuelles des stations varient selon leur zone d'implantation, allant de **3 000 m<sup>3</sup>/j** pour les stations de petite taille (comme Gherbhouz ou Zyayna), jusqu'à **27 000 m<sup>3</sup>/j** pour la station d'El Hadeb, qui constitue la plus importante du réseau.

Tableau 19. Capacité des stations de déminéralisation d'Ouargla

Nom de la station	Capacité eaux brutes (m3/j)	Capacité eaux traitées (m3/j)
GHARBOUZ	3000	2250
AIN EL KHEIR	9000	6750
HAI BOUZID	4500	3375
M'KHADMA	3000	2250
IFRI-GARA	10500	7850
ZYAYNA	3000	2250
EL KHAFDJI	7500	5625
BAMENDIL VILLAGE	3000	2250
EL HADEB	27000	20250
TOTAL	70500	52875

Le projet est piloté par l'Algérienne des Eaux (ADE), en qualité de maître d'ouvrage délégué, sous la supervision du Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement. La réalisation des stations de traitement a été confiée à un groupement international. Celui-ci comprend l'entreprise autrichienne AQUA ENGINEERING GmbH, chargée de la fourniture des équipements de traitement et de l'assistance à l'exploitation, ainsi que les sociétés CGC

(Chine) et SPA CHINAGEO (Algérie), responsables des travaux de génie civil. Le contrôle et le suivi technique du projet ont été assurés par un groupement de bureaux d'études composé du Cabinet MERLIN (France), de SATEIG (Algérie) et de MERLIN INGÉNIERIE SPA (Algérie). Le coût total du projet s'élève à plus de **5,2 milliards de dinars algériens**, avec un financement partiellement libellé en euros, soulignant la dimension internationale de la coopération technique mobilisée.

Les stations de déminéralisation de la région d'Ouargla sont réparties sur le territoire pour couvrir les principaux pôles de consommation d'eau. Sept de ces stations sont implantées au sein de la commune d'Ouargla, tandis que les deux autres sont situées dans la commune de Rouissat. Cette répartition géographique a été pensée en fonction des réseaux d'alimentation existants, des zones de densité de population et de la disponibilité des forages profonds produisant de l'eau brute.

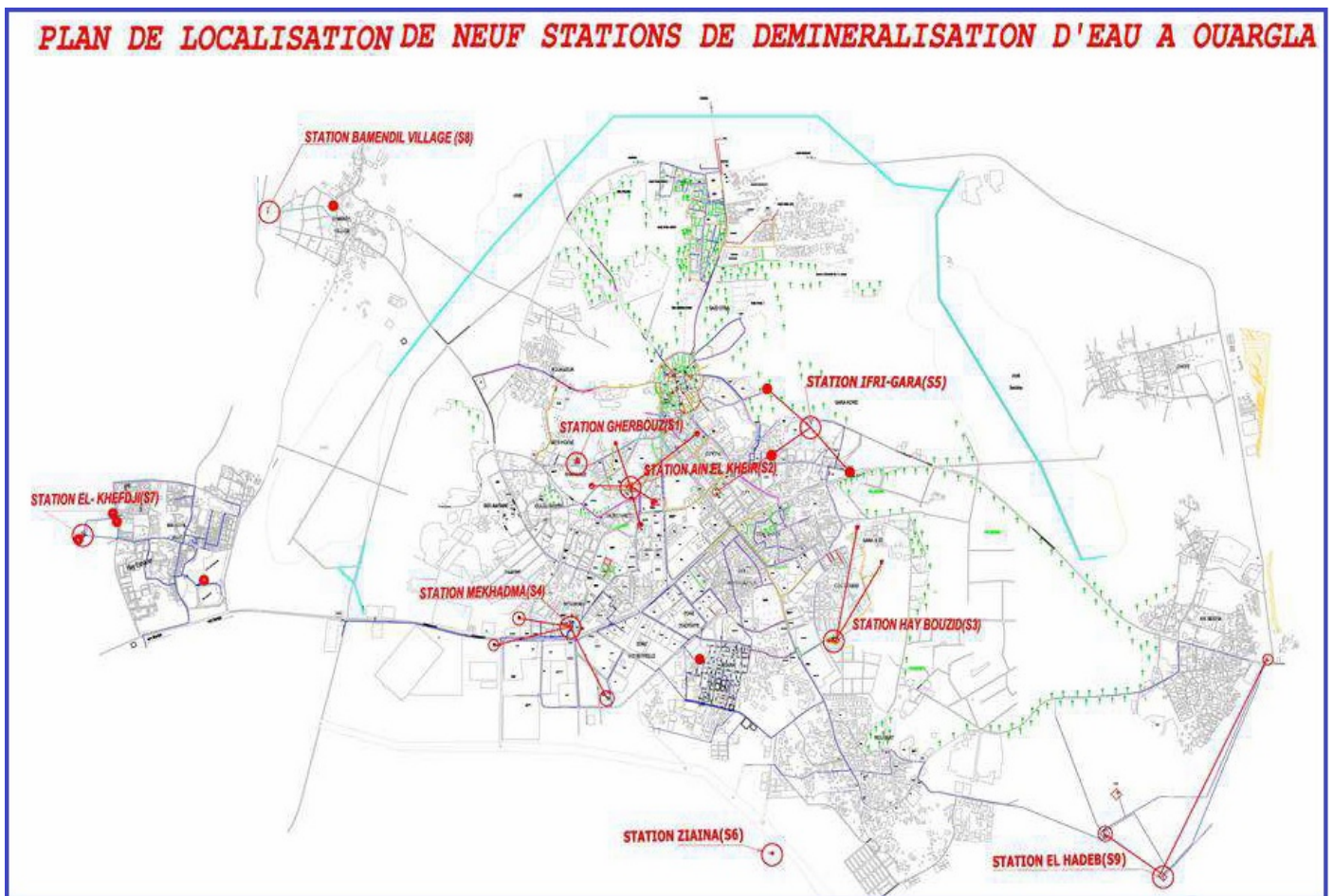


Figure27. Localisation des stations de déminéralisation d'Ouargla

Chaque station est adossée à un **complexe hydraulique existant**, ce qui a permis de mutualiser les infrastructures, d'optimiser les coûts et de réduire les délais de mise en œuvre.

Ces complexes sont alimentés par des forages dont la salinité moyenne est de l'ordre de **3 g/l**, ce qui nécessite un traitement spécifique pour atteindre les normes de potabilité.

Toutes les stations de déminéralisation ont été conçues selon une architecture modulaire standardisée mais adaptable aux besoins locaux, en fonction du débit à traiter et de la composition de l'eau brute. Leur fonctionnement repose sur trois grands blocs de traitement :

1. **Le prétraitement**, qui vise à protéger les membranes d'osmose inverse contre l'encrassement. Il comprend : une **filtration sur sable** pour l'élimination des matières en suspension et une **microfiltration par cartouches**, qui retient les particules fines et les colloïdes.
2. **Le traitement principal**, basé sur la technologie de l'**osmose inverse**, qui constitue le cœur du processus. Ce procédé repose sur le passage de l'eau sous haute pression à travers des membranes semi-perméables, capables de retenir plus de 75 % des sels dissous et des microcontaminants. Ce choix technologique s'est imposé grâce à plusieurs avantages :
  - réduction efficace de la salinité (de 3 g/l à < 0,5 g/l),
  - élimination des ions responsables de la dureté (calcium, magnésium),
  - faible consommation énergétique comparée à d'autres procédés thermiques,
  - modularité permettant une adaptation à diverses capacités.
3. **Le post-traitement**, qui comprend la **désinfection par chloration** pour assurer la stabilité microbiologique de l'eau traitée, avant sa distribution. Dans certains cas, une **reminéralisation** peut être ajoutée pour corriger le pH et améliorer les qualités organoleptiques.

Chaque station dispose également des infrastructures suivantes :

- un bâtiment de traitement accueillant les équipements de filtration et d'osmose,
- un local technique pour l'énergie électrique et les pompes haute pression,
- un laboratoire d'analyse pour le suivi de la qualité de l'eau,
- un atelier d'entretien pour la maintenance régulière des installations,
- un bâtiment de chloration avec dispositifs de sécurité.

Ces stations sont automatisées et surveillées en temps réel via des interfaces de contrôle-commande, permettant une gestion optimisée et une réactivité rapide en cas d'anomalie.

Ce projet d'envergure constitue ainsi un modèle de réponse stratégique et durable aux défis de la qualité de l'eau dans les régions sahariennes, en combinant expertise technique, ingénierie avancée et approche intégrée de la gestion des ressources.

### 3. Présentation de la station de dessalement d'Irfi Gara

La station de dessalement d'Irfi Gara est située dans la cité de Casbah. Elle s'étend sur une superficie totale de 6 169 m<sup>2</sup> et se compose de dix bâtiments. La station d'Irfi Gara est conçue pour produire initialement 22 500 m<sup>3</sup>/jour d'eau osmosée, avec une capacité extensible à 30 000 m<sup>3</sup>/jour.

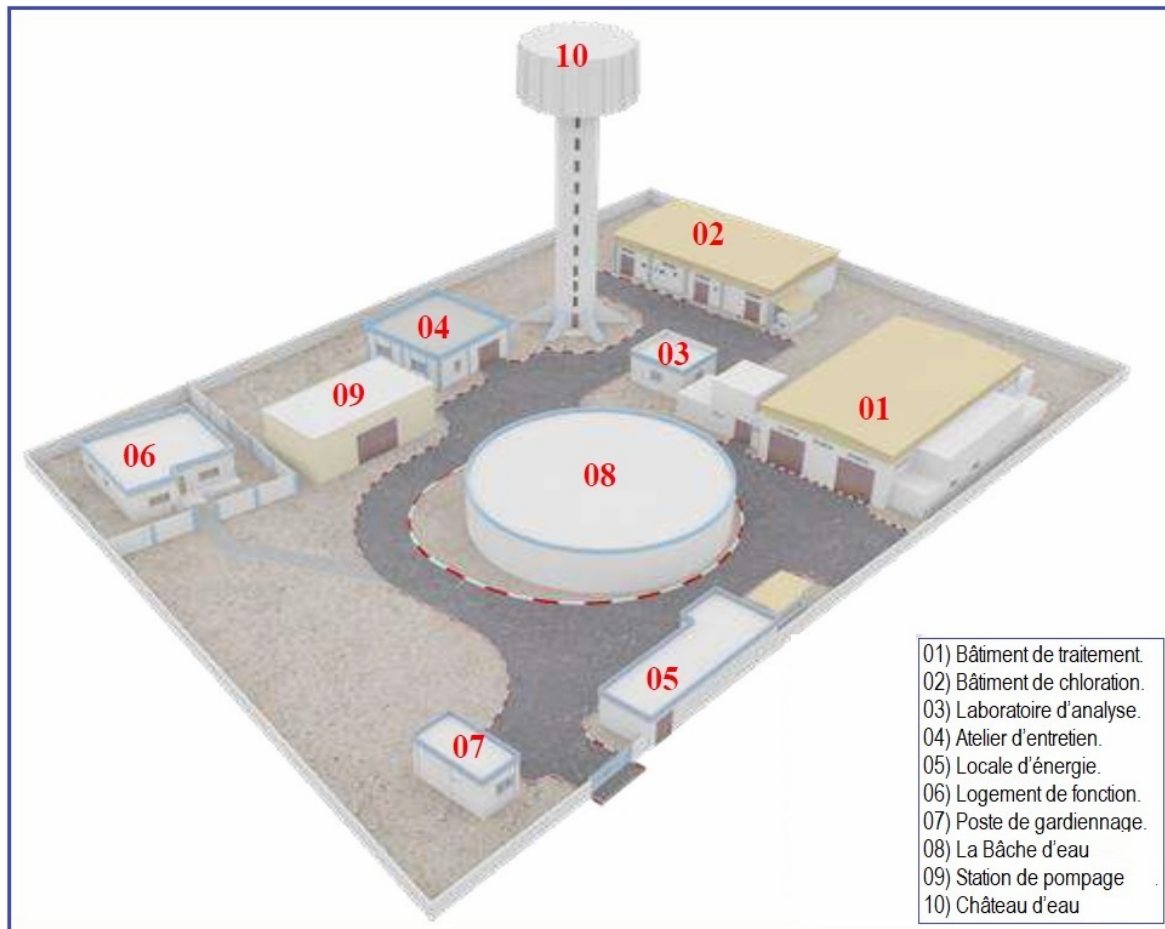


Figure 28: Schéma illustre les compartiments qui composent la station de d'IFRI Gara.

#### 3.1. Bâtiment de traitement

Le bâtiment de traitement constitue le cœur de la station. Il regroupe l'ensemble des étapes du processus de dessalement, depuis la réception de l'eau brute jusqu'à son transfert vers le réservoir de stockage. D'une superficie de 260 m<sup>2</sup>, il comprend également une salle de contrôle et un bureau destiné au chef de station.

#### 3.2. Bâtiment de chloration

Rattaché au bâtiment de traitement, le bâtiment de chloration est dédié à la préparation et au stockage des produits chimiques utilisés durant le processus. Il est divisé en quatre zones fonctionnelles :

- Une zone pour la préparation du lait de chaux,
- Une zone de stockage du chlore,
- Une zone de stockage du chlorure ferrique,
- Et une grande zone pour le stockage de la chaux en poudre, avant et après préparation. Des pompes spécifiques sont utilisées pour doser et injecter ces substances selon leurs concentrations respectives.

### **3.3. Laboratoire d'analyse**

Le laboratoire a pour mission de surveiller en continu la qualité de l'eau à chaque étape du traitement. Les principaux paramètres analysés sont :

- pH : entre 7,5 et 8,5
- Indice de Langelier : positif
- Alcalinité :  $\geq 30$  mg/l ( $\text{HCO}_3^-$ )
- Teneur en matières dissoutes totales (TDS) : entre 150 et 500 mg/l
- Dureté totale ( $\text{CaCO}_3$ ) :  $\geq 150$  mg/l
- Turbidité :  $\leq 0,4$  NTU

### **3.4. Atelier d'entretien**

L'atelier est destiné à l'entretien et à la réparation des équipements de la station, tels que les pompes et les moteurs. Il couvre une surface de 64 m<sup>2</sup>.

### **3.5. Local technique (énergie)**

Ce local fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement de la station. Sa superficie est de 44 m<sup>2</sup>. Il est divisé en deux parties :

- Un poste électrique à moyenne tension (MT),
- Et un groupe électrogène fonctionnant automatiquement en cas de coupure de courant, assurant une couverture de 75 % de la demande énergétique.

### **3.6. Logement de fonction**

Un bâtiment est prévu pour héberger le personnel travaillant au sein de la station.

### **3.7. Poste de gardiennage**

Un poste de sécurité est implanté à l'entrée de la station afin d'assurer la protection des installations et des équipements.

### **3.8. Bâche d'eau**

Le château d'eau est conçu pour recevoir l'eau brute provenant des forages, qui constitue la source principale d'approvisionnement de la station.

### **3.9. Station de pompage**

La station de pompage permet le transfert de l'eau entre les différentes unités de traitement au sein du complexe.

### **3.10. Château d'eau**

La bache d'eau est une réserve destinée au stockage de l'eau traitée avant sa distribution.

## **4. Le technique dessalement d'eau dans la station d'Ifri Gara**

### **4.1. Procédés de déminéralisation utilisés en Algérie**

En Algérie, plusieurs stations de traitement des eaux sont en service, s'attaquant aussi bien à la déminéralisation des eaux saumâtres qu'au dessalement de l'eau de mer. Ces stations mettent en œuvre divers procédés tels que l'osmose inverse, l'électrodialyse et les échangeurs d'ions. Parmi ces techniques, l'osmose inverse est de loin la plus répandue à l'échelle nationale.

Pour le traitement des eaux saumâtres dont la salinité est inférieure à 4 g/L, les procédés d'osmose inverse et d'électrodialyse sont les plus adaptés. Toutefois, en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de ses performances et de son adoption généralisée, l'osmose inverse reste la solution privilégiée en Algérie.

### **4.2. Le technique de l'osmose inverse**

L'osmose inverse est une technique de traitement de l'eau par séparation membranaire. Elle consiste à faire passer de l'eau à travers une membrane semi-perméable, sous l'effet d'une pression élevée, afin de retenir les sels dissous, les ions, les molécules organiques, ainsi que les micro-organismes.

Contrairement à l'osmose naturelle, où l'eau migre d'un milieu moins concentré vers un milieu plus concentré en solutés, **l'osmose inverse inverse ce phénomène** : l'eau est forcée de passer du milieu le plus concentré vers le moins concentré, laissant derrière elle les impuretés.

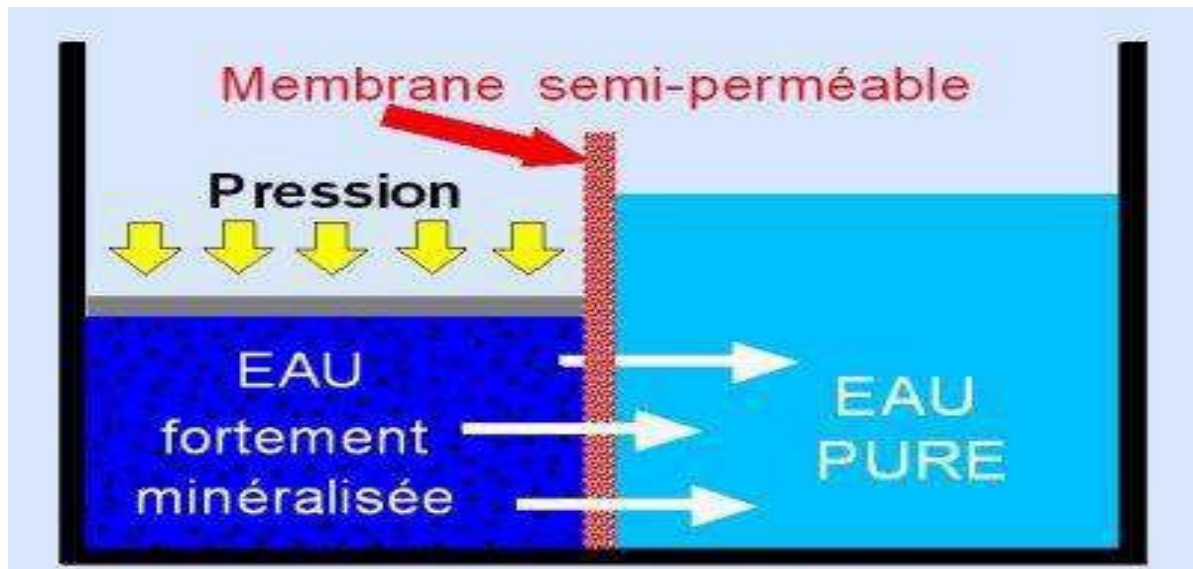


Figure29 : Schéma illustre le principe de l'osmose inverse.

L'osmose inverse est largement utilisée dans plusieurs domaines. Elle permet tout d'abord le **dessalement de l'eau de mer**, afin de la rendre propre à la consommation. Elle est également utilisée pour la **déminéralisation des eaux saumâtres**, qui présentent une salinité modérée. Ce procédé est indispensable dans la **production d'eau potable**, mais aussi d'**eaux ultra-pures** destinées à des usages industriels spécifiques, notamment dans les secteurs **pharmaceutique, électronique** ou encore **hospitalier**. Enfin, l'osmose inverse est employée dans le **traitement des eaux usées ou industrielles**, permettant leur réutilisation ou leur rejet dans le respect des normes environnementales.

Avantages :

- Procédé le plus utilisé en Algérie
- Coût de production raisonnable par m<sup>3</sup> d'eau
- Faible consommation énergétique
- Débit de production élevé
- Facilité d'automatisation et de contrôle
- Consommation de produits chimiques négligeable

Inconvénients :

- Eau produite très douce, nécessitant une reminéralisation
- Durée de vie limitée des membranes en raison du colmatage

Ces inconvénients peuvent être corrigés : la reminéralisation est réalisable en post-traitement dans les réservoirs de stockage, et l'injection d'antiscalants permet de limiter le colmatage des membranes

### **4.3. Les étapes de déminéralisation dans la station**

Le traitement des eaux en station de déminéralisation se déroule en trois grandes phases : prétraitement, traitement principal (osmose inverse) et désinfection.

#### **4.3.1. Prétraitement**

Le prétraitement vise à adapter l'eau brute aux exigences du système de traitement principal, en éliminant les impuretés physiques, chimiques et biologiques. Il a deux objectifs principaux:

- Préserver la performance des membranes en évitant leur encrassement
- Garantir une qualité d'eau compatible avec les exigences des membranes semi-perméables

**a) Filtration sur sable:** Cette étape permet d'éliminer les matières en suspension, la turbidité et une partie des micro-organismes. Trois mécanismes de filtration sont mis en œuvre :

- **Interception directe** : rétention mécanique des particules
- **Mouvement brownien** : capture des particules colloïdales
- **Adsorption physique** : fixation des particules sur le support filtrant

**b) Microfiltration** : Elle affine la filtration avec des pores plus fins (0,2  $\mu\text{m}$  à 0,05  $\mu\text{m}$ ), permettant une rétention efficace des bactéries. Réalisée à l'aide de cartouches plissées, elle assure une barrière complémentaire avant le traitement par osmose inverse.

#### **4.3.2. Traitement principal : l'osmose inverse**

L'osmose inverse est un procédé de séparation membranaire fonctionnant sous pression. Contrairement à l'osmose naturelle, où l'eau migre vers le milieu plus concentré, l'osmose inverse force l'eau à passer d'un milieu concentré vers un milieu dilué à travers une membrane semi-perméable.

#### **4.3.3. Désinfection**

La désinfection a pour but d'éliminer les agents pathogènes. Elle repose sur trois paramètres : le type de désinfectant, le temps de contact et la concentration appliquée.

La chloration est employée à Ifri Gara. Elle consiste à injecter du chlore dans l'eau pour neutraliser les micro-organismes. Bien que peu utilisée dans l'industrie à cause des sous-produits chlorés, elle reste efficace et couramment appliquée dans les stations de traitement des eaux.

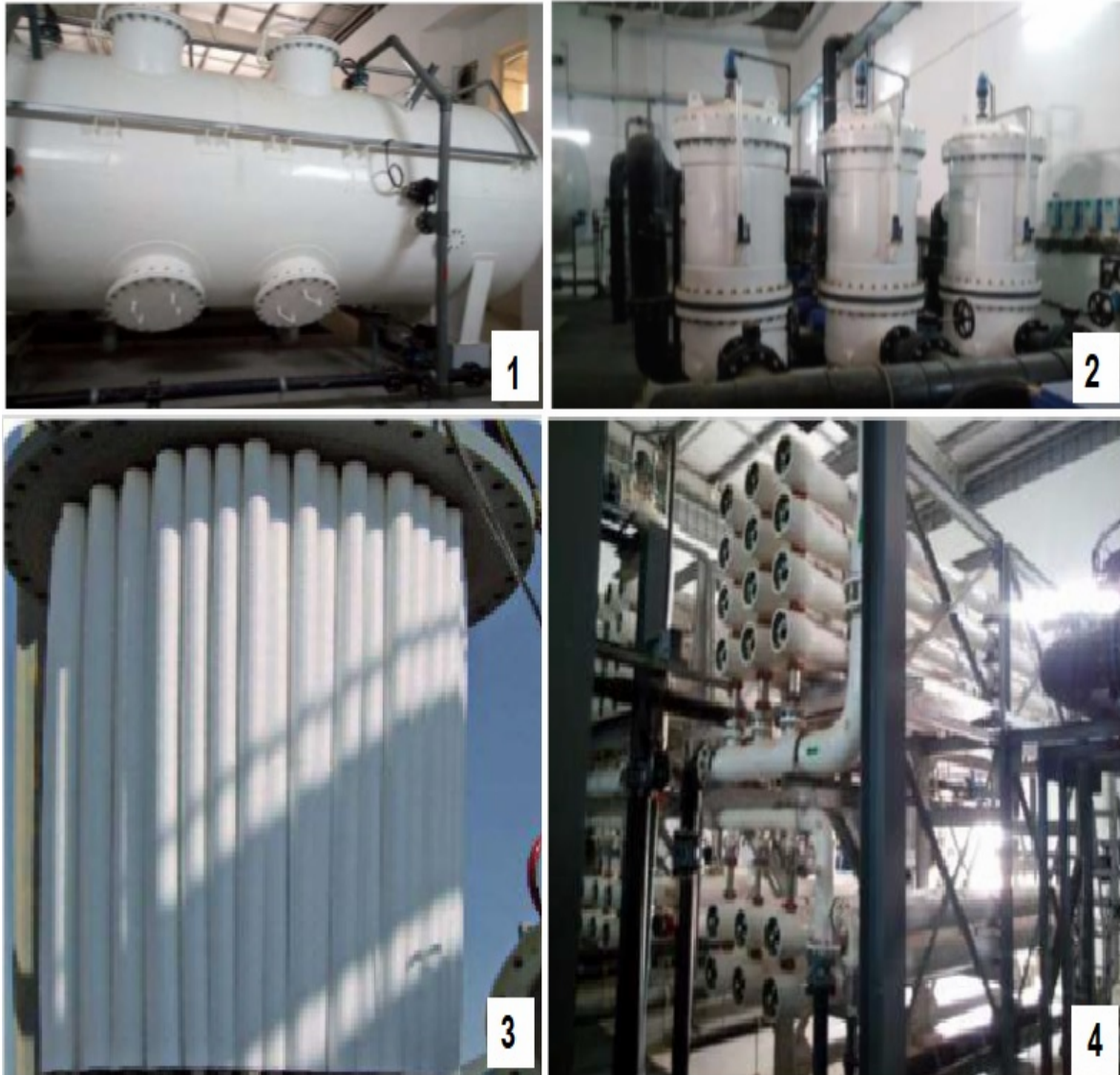


Figure30 : les installations de déminéralisation des eaux de la station d'Ifri Gara : (1) : les filtres à sable, (2) les iltres à cartouches, (3) les cartouches de microfiltration et (4) l'unité d'osmose et de l'osmose inverse.

## 5. L'évaluation de la qualité d'eau brute et traitée dans les stations de dessalement

### 5.1. Variation de concentration des paramètres physico-chimiques

#### 5.1.1. Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

L'analyse du graphique montre une réduction significative de la concentration en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) après traitement dans les stations d'Ain Kheir et Ifri Gara entre 2023 et 2025. La station d'Ain Kheir présente une meilleure efficacité, avec des concentrations résiduelles plus faibles. Quelques variations sont observées à Ifri Gara, notamment en 2024, suggérant une performance légèrement moins constante. Globalement, les deux stations améliorent la qualité de l'eau en réduisant la concentration de calcium (36 à 60 mg/l).

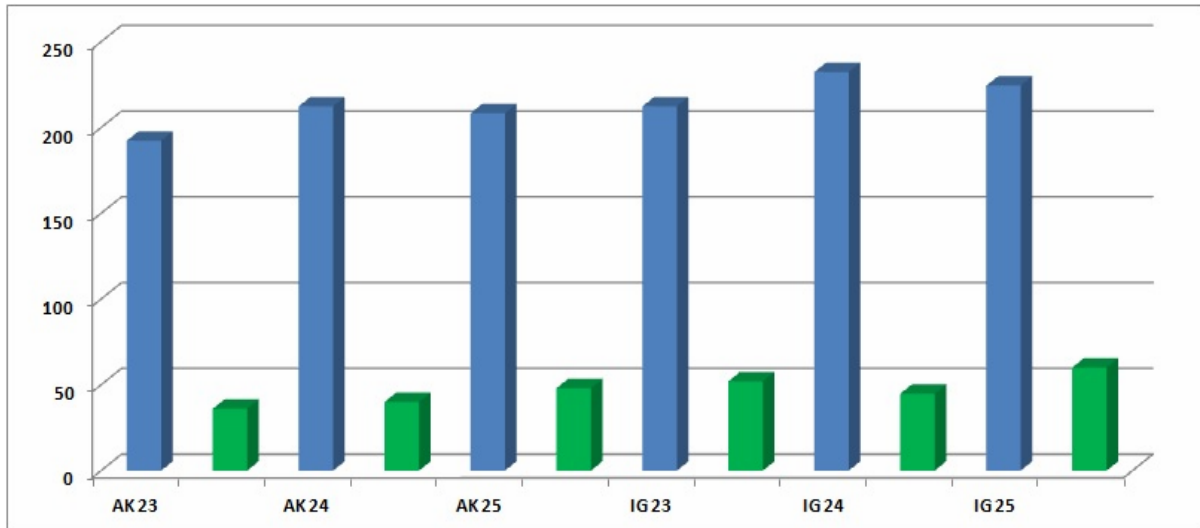


Figure31 : Histogramme comparatif de la concentration en calcium dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.2. Le magnésium ( $Mg^{2+}$ )

Le graphique met en évidence les concentrations en magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans les eaux brutes et traitées des stations de Aïn Lekhier (AK) et Afri (IG). De manière générale, les teneurs en magnésium sont significativement réduites après traitement dans les deux stations pour devenir à moins 39 mg/l, ce qui reflète une bonne efficacité des procédés utilisés.

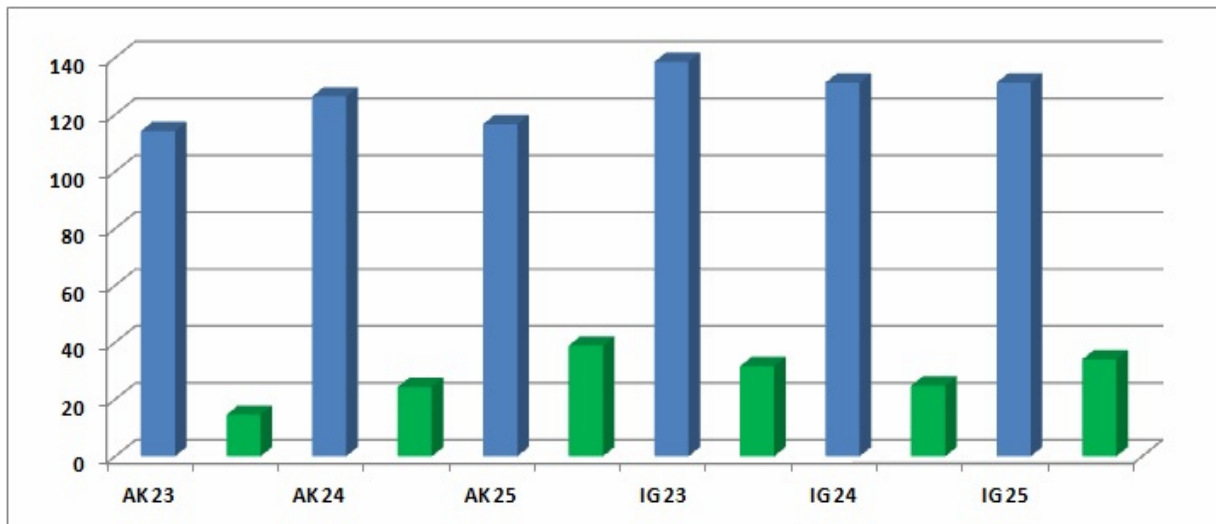


Figure 32: Histogramme comparatif de la concentration en magnésium dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.3. Le sodium ( $Na^+$ )

L'étude des concentrations en sodium ( $Na^+$ ) dans les eaux brutes et traitées des stations d'Aïn Lekhier (AK) et Ifri (IG) révèle des niveaux relativement élevés dans les eaux brutes, dépassant les 300 mg/l dans la majorité des échantillons. Après traitement, une réduction significative est observée dans toutes les stations, bien que les valeurs restent variables, les concentrations de sodium dans les eaux traitées varient entre 62 et 103 mg/l.

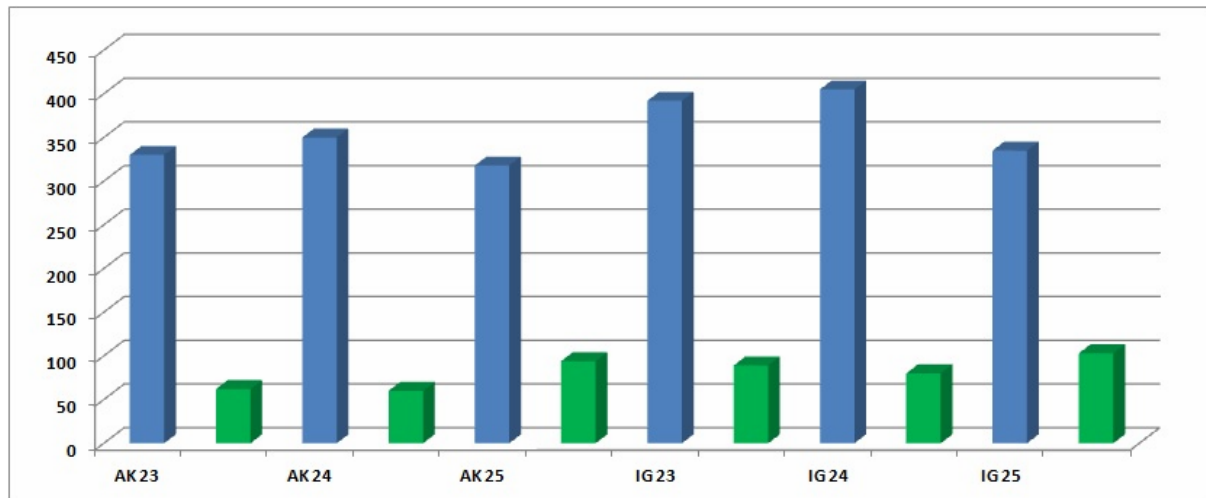


Figure 33: Histogramme comparatif de la concentration en sodium dans l'eau brute et traitée.

#### 5.1.4. Le potassium (K<sup>+</sup>)

Le graphique montre que les concentrations en potassium dans l'eau brute restent relativement stables dans les deux stations, oscillant autour de 24 à 28 mg/L. après traitement, les valeurs diminuent de manière significative, atteignant des niveaux compris entre 5 et 10 mg/l. Cette baisse témoigne de l'efficacité du processus de traitement pour réduire les concentrations en ions potassium, ce qui est bénéfique pour respecter les normes de potabilité et améliorer la qualité organoleptique de l'eau distribuée.

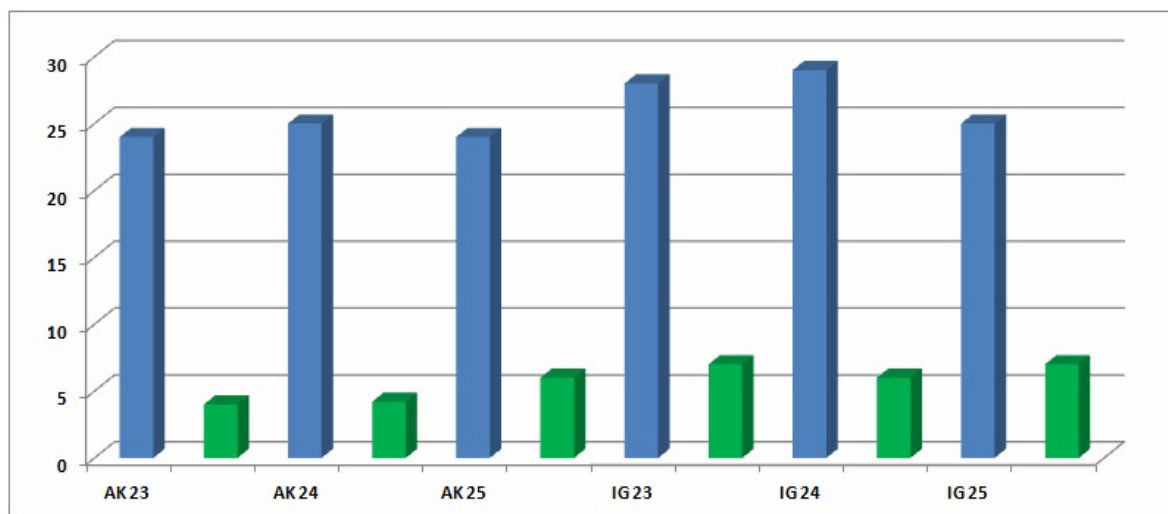


Figure34 : Histogramme comparatif de la concentration en potassium dans l'eau brute et traitée

#### 5.1.5. Les chlorures (Cl<sup>-</sup>)

Le graphique met en évidence une nette différence entre les concentrations de chlore dans l'eau brute (barres bleues) et l'eau traitée (barres vertes) pour les stations Aïn Lekhir (AK) et Ifri (IG) sur la période 2023–2025. L'eau brute présente des concentrations de chlore beaucoup plus élevées, ce qui peut être dû à une forte teneur naturelle en chlorures. L'eau traitée montre

des valeurs de chlore nettement plus faibles varie entre 141 et 210 mg/l. Cette comparaison reflète l'efficacité des procédés de traitement dans la réduction de la charge chlorée à un niveau conforme à la norme de l'OMS.

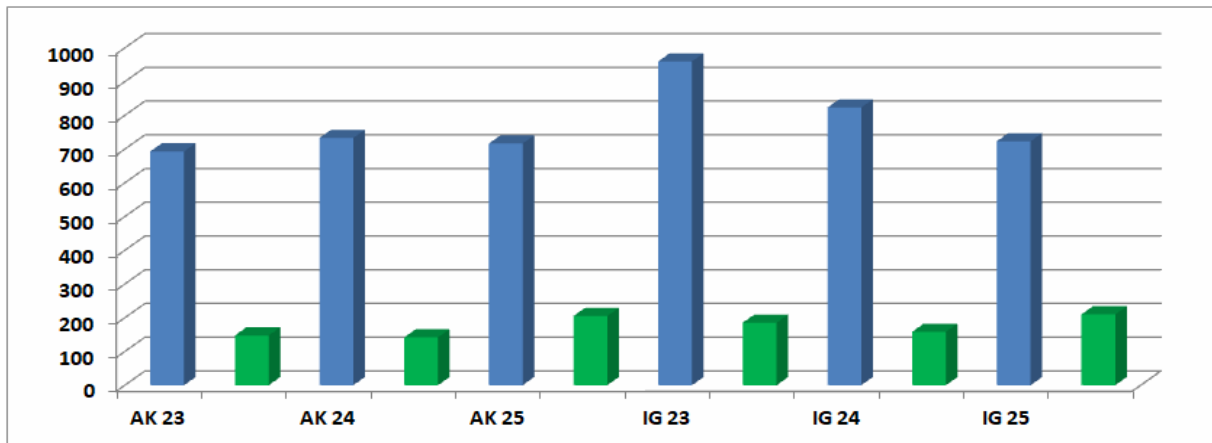


Figure 35: Histogramme comparatif de la concentration en chlorures dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.6. Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Le graphique met en évidence une diminution significative des concentrations en bicarbonates entre l'eau brute (barres bleues) et l'eau traitée (barres vertes) dans les deux stations au cours des trois années analysées. À Aïn Lekhir (AK), les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  dans l'eau brute varient entre 110 et 140 mg/L, tandis que les valeurs dans l'eau traitée chutent à des niveaux nettement inférieurs, ne dépassant pas 30 mg/L. À Ifri (IG), les concentrations en eau brute atteignent jusqu'à 160 mg/L, avec une réduction traduisant l'efficacité du traitement appliqué pour ajuster la charge alcaline de l'eau, contribuant à un meilleur équilibre du pH et à la prévention des dépôts calcaires dans les réseaux de distribution. Le maintien de niveaux modérés de bicarbonates reste toutefois essentiel pour éviter les phénomènes de corrosion

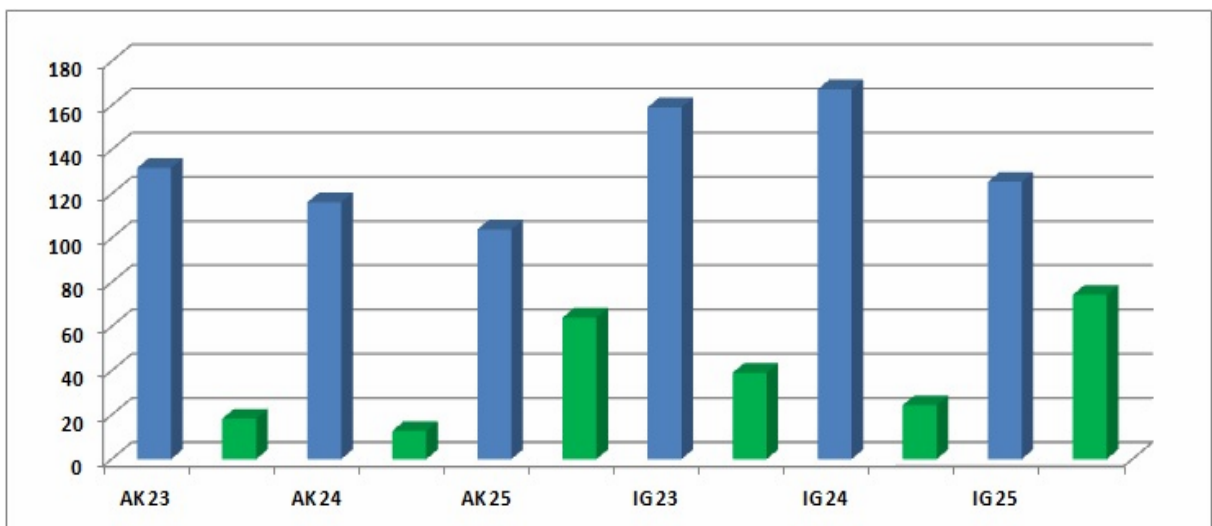


Figure 36: Histogramme comparatif de la concentration en bicarbonates dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.7. Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Le graphique met en évidence une diminution significative des concentrations en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) après traitement dans les deux stations (Aïn El Khir et Ifri), sur les trois années étudiées. Les valeurs passent de niveaux très élevés dans l'eau brute (jusqu'à plus de 700 mg/L) à des niveaux beaucoup plus faibles après traitement (de 87 à 170 mg/l), ce qui témoigne de l'efficacité du procédé de déminéralisation mis en œuvre, notamment dans la réduction des sels dissous.

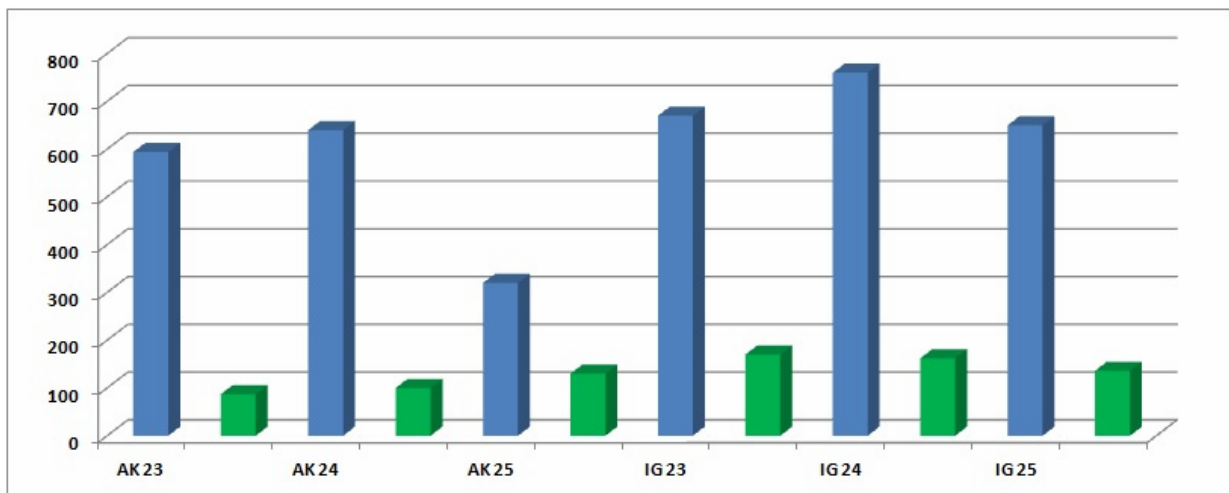


Figure 37: Histogramme comparatif de la concentration en sulfates dans l'eau brute et traitée

### 5.1.8. Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

L'analyse des concentrations en nitrates dans les eaux brutes et traitées des stations de Aïn Lekhier (AK) et Afri (IG) révèle des tendances contrastées. Dans la station de Aïn Lekhier, les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  sont modérées et relativement stables, avec une légère diminution après traitement, indiquant une efficacité correcte du procédé. En revanche, la station d'Ifri présente une anomalie marquée au niveau de l'échantillon IG24, où la concentration en nitrates dans l'eau brute atteint un pic très élevé, dépassant les 30 mg/L. Les concentrations des nitrates dans les eaux traitées restent supérieures à 10 mg/l dans la majorité des cas, ce qui laisse dire que le traitement effectué est moins efficace pour ce paramètre.

Cette valeur soulève une alerte sur une possible contamination ponctuelle ou chronique, En général, les niveaux dans la plupart des échantillons restent proches des seuils recommandés

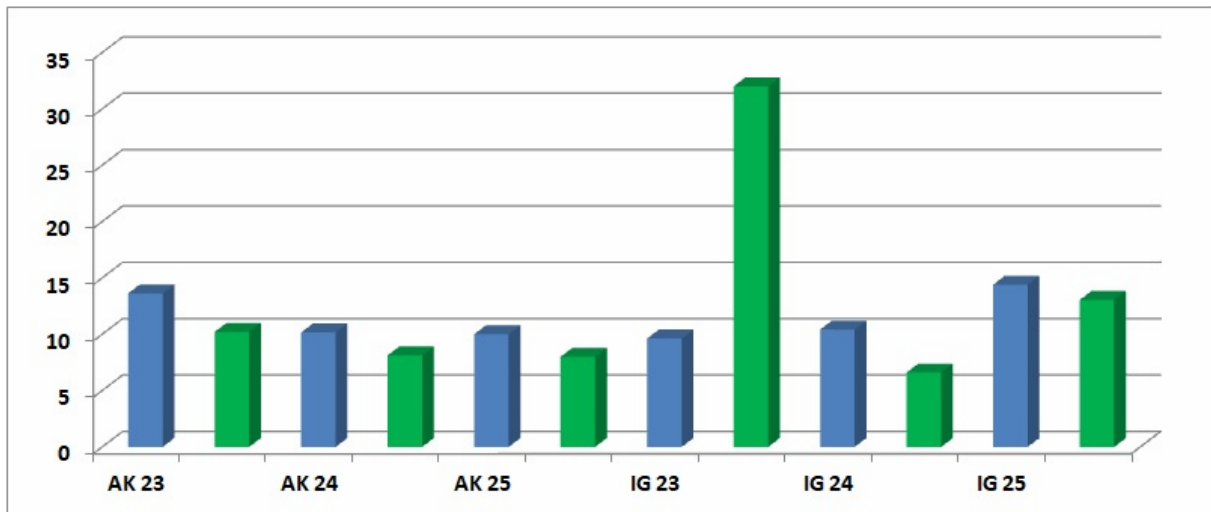


Figure38 : Histogramme comparatif de la concentration en nitrates dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.9. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) entre 2023 et 2025 dans les stations de Ain Kheir et Ifri Gara montre des valeurs très élevées avant traitement ( $> 3600 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), traduisant une eau fortement minéralisée. Après traitement, la CE diminue de manière significative, atteignant des niveaux conformes aux normes de potabilité ( $< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Cela reflète l'efficacité des stations à réduire la salinité et améliorer la qualité de l'eau.

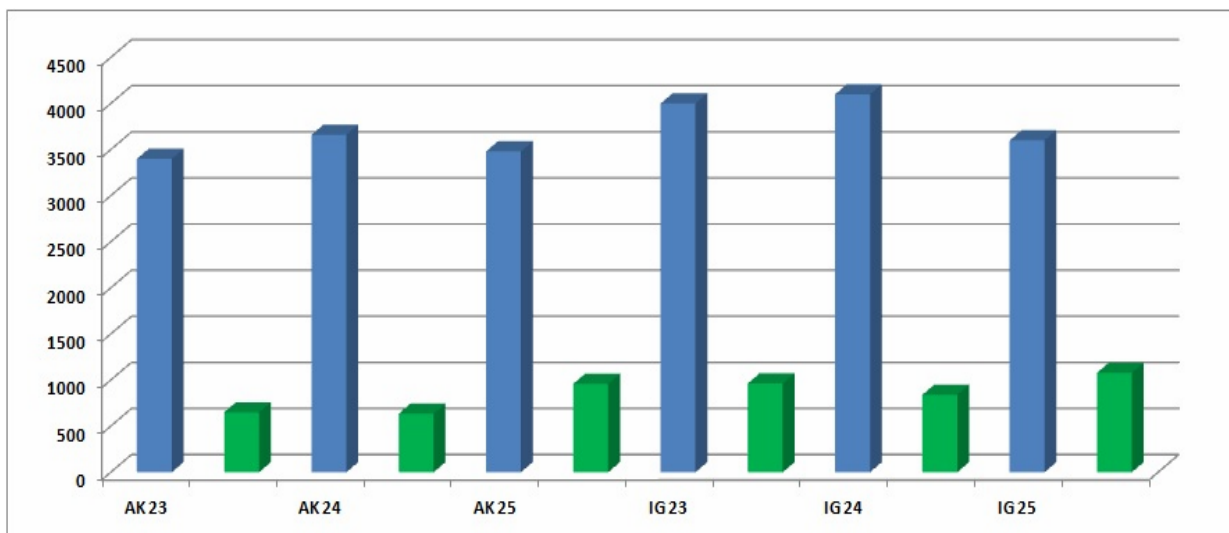


Figure39 : Histogramme comparatif CE dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.10. Le solide total dissous (TDS)

Le graphique illustre une réduction marquée des solides dissous totaux (TDS) après traitement dans les stations d'Aïn El Khir et Ifri au cours des années 2023 à 2025. Les concentrations passent d'un niveau élevé dépassant  $1800 \text{ mg}/\text{L}$  dans l'eau brute à des valeurs inférieures à  $600 \text{ mg}/\text{L}$  après traitement. Cette baisse significative confirme l'efficacité du procédé de

traitement, notamment en matière de dessalement et d'amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau. »

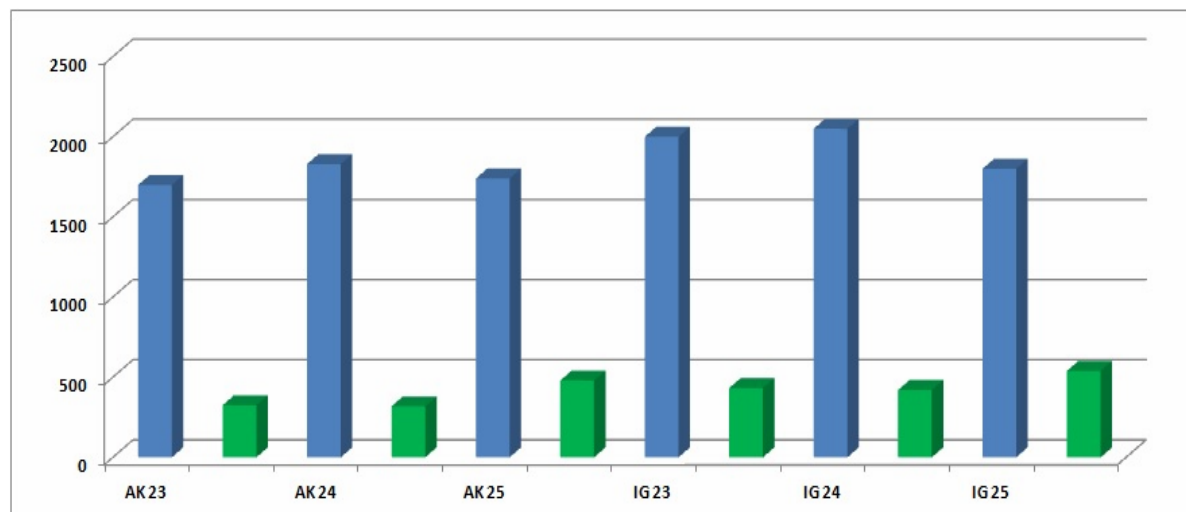


Figure 40: Histogramme comparatif de TDS dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.11. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le graphique montre une stabilité relative des valeurs de pH après traitement dans les deux stations (Aïn El Khir et Ifri), avec des niveaux situés majoritairement dans la zone légèrement basique (7,5–8,5). On observe une légère augmentation du pH après traitement, notamment à Aïn El Khir, ce qui reflète une bonne maîtrise des conditions de correction chimique lors du processus de traitement de l'eau. »

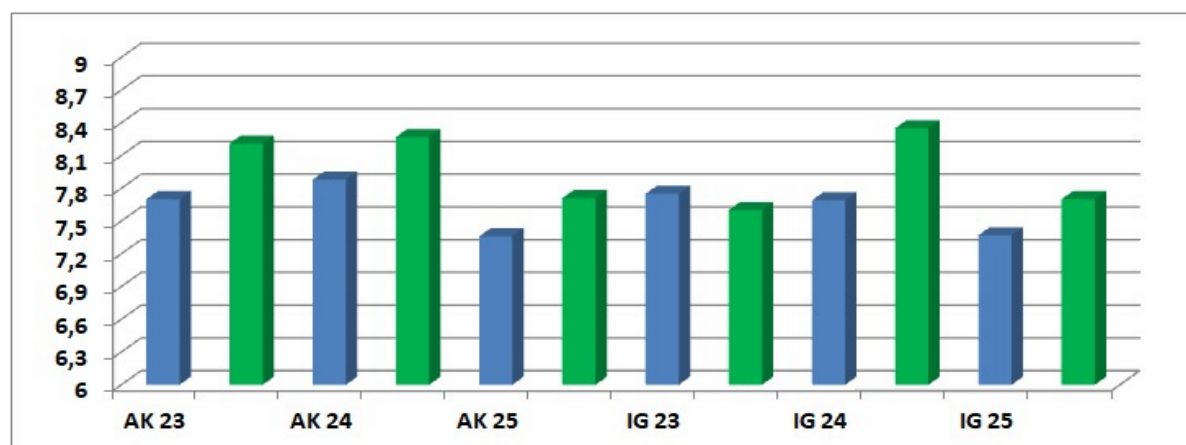


Figure 41 : Histogramme comparatif de pH dans l'eau brute et traitée.

### 5.1.12. La dureté totale (TH)

La dureté totale correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium, généralement exprimée en mg/l de CaCO<sub>3</sub>. Selon la classification de Sawyer et McCarty (1967), une eau est dite douce si sa dureté est inférieure à 75 mg/l, moyennement dure entre 75 et 150 mg/l, dure entre 150 et 300 mg/l, et très dure au-delà de 300 mg/l.

Le graphique illustre une différence marquée entre la dureté totale de l'eau brute (barres bleues) et celle de l'eau traitée (barres vertes) pour les stations d'Aïn Lekhir (AK) et d'Ifri Gara (IG) durant la période 2023–2025. La dureté de l'eau brute varie entre 900 et 1120 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, ce qui indique une eau très dure. En revanche, après traitement, la dureté se situe entre 150 et 290 mg/l de CaCO<sub>3</sub> : bien que toujours classée comme « dure », elle respecte les normes internationales de potabilité (Bouselsal and Zouari, 2022; Boualem and Egbueri, 2024).

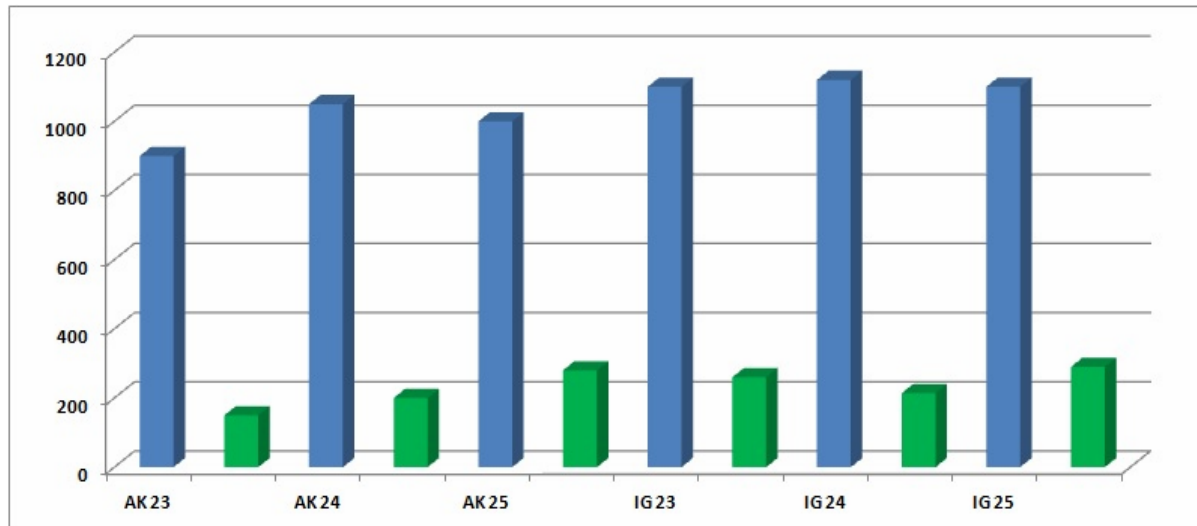


Figure 42: Histogramme comparatif de la dureté totale dans l'eau brute et traitée.

## 5.2. Évaluation de la potabilité d'eau

### 5.2.1. Potabilité vis-à-vis à la norme de l'OMS (2017)

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes et celles des eaux traitées, en les confrontant aux normes de potabilité définies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2017). Comme mentionné dans le chapitre précédent, les eaux brutes issues des nappes souterraines de la région d'Ouargla présentent fréquemment des dépassements par rapport aux limites recommandées, notamment pour des paramètres essentiels tels que la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), le potassium (K), le sulfate (SO<sup>2-</sup>), le sodium (Na), le chlorure (Cl<sup>-</sup>) et la dureté totale (TH).

En revanche, les résultats des analyses montrent que les eaux traitées respectent pleinement les seuils fixés par les normes internationales de l'OMS. Cette conformité témoigne de l'efficacité des procédés de traitement mis en œuvre dans les stations de déminéralisation, qui permettent d'assurer la production d'une eau potable de qualité, répondant aux exigences sanitaires de la population locale

Tableau 20: Comparaison des caractéristiques physicochimiques des eaux brutes et traitées avec les normes de potabilité de l'OMS.

N°	Norme OMS 2017		Station Ifri				Station AK			
			Eau brute		Eau traitée		Eau brute		Eau traitée	
	DL	PL	N° Ech dép	% Ech	N° Ech dép	% Ech	N° Ech dép	% Ech	N° Ech	% Ech
Ca	75	200	PL 3	dép100	0	00	PL 2	dép16	0	00
Mg	50	150	0	00	0	00	0	00	0	00
Na	-	200	3	100	0	00	3	100	0	00
K	-	12	3	100	0	00	3	100	0	00
Cl	200	600	3	100	0	00	3	100	0	00
SO <sub>4</sub>	200	400	3	100	0	00	2	66.66	0	00
HCO <sub>3</sub>	300	500	0	00	0	00	0	00	0	00
NO <sub>3</sub>	-	45	0	00	0	00	0	00	0	00
pH	-	6,5 to 8,5	0	00	0	00	0	00	0	00
TDS	500	1000	3	100	0	00	3	100	0	00
EC	500	1500	3	100	0	00	3	100	0	00
TH	100	500	3	100	0	00	3	100	0	00

### 5.2.2. Potabilité par application de la méthode WQI

L'application de la méthode de l'indice de qualité de l'eau (WQI) aux échantillons d'eau brute et traitée révèle une nette amélioration de la qualité de l'eau. L'indice WQI passe ainsi de valeurs comprises entre 187 et 220 pour les eaux brutes à des valeurs allant de 45 à 68 après traitement, indiquant une eau de qualité allant de bonne à excellente. Ces résultats confirment l'efficacité des stations de traitement des eaux dans la région d'Ouargla.

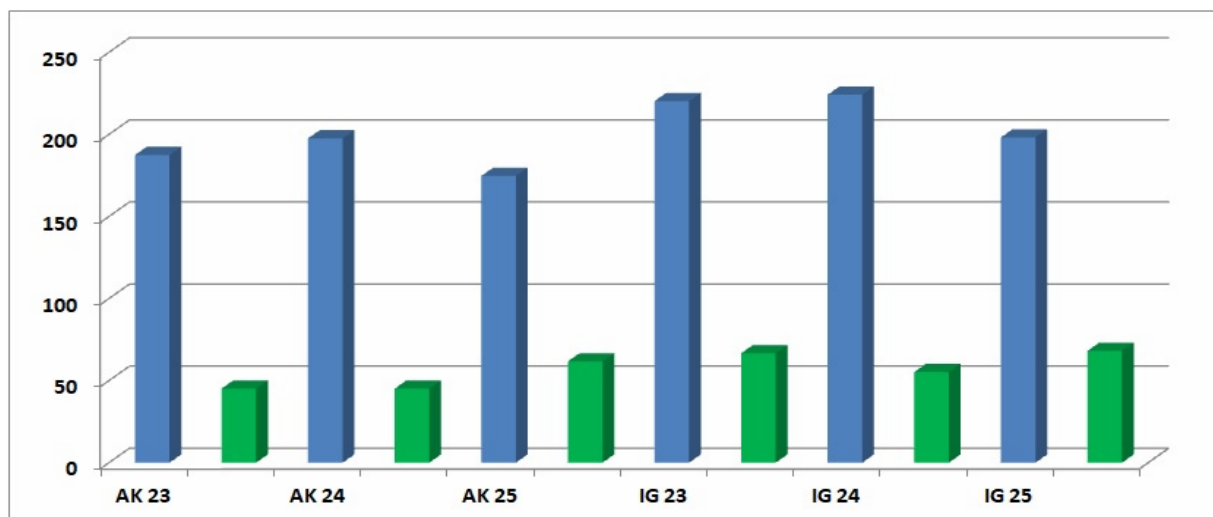


Figure 43: Histogramme comparatif de l'indice de qualité de l'eau dans l'eau brute et traitée

## **6. Conclusion**

La problématique de la qualité des eaux souterraines dans la cuvette d'Ouargla, caractérisée par une salinité élevée et une composition chimique défavorable, a longtemps constitué un frein majeur au développement socio-économique de la région. Face à ce défi, la mise en œuvre d'un programme structurant de déminéralisation, fondé principalement sur la technologie de l'osmose inverse, représente une réponse stratégique et durable. Les résultats obtenus, tant sur le plan technique que sanitaire, démontrent l'efficacité du dispositif mis en place. L'amélioration substantielle des paramètres physico-chimiques notamment la réduction des concentrations en sels dissous, en ions responsables de la dureté et en contaminants majeurs atteste de la performance des stations de traitement, en particulier celle d'Ifri Gara. L'évaluation croisée avec les normes de potabilité de l'OMS, ainsi que l'indice WQI, confirme la conformité de l'eau produite et sa qualité notable. Au-delà de la dimension technologique, ce projet incarne une véritable politique de gestion intégrée des ressources en eau en milieu aride, combinant rigueur scientifique, partenariat institutionnel et valorisation des compétences locales. Il constitue, de ce fait, un modèle de gouvernance hydraulique pouvant être reproduit dans d'autres régions sahariennes confrontées à des problématiques similaires. En définitive, la réussite de ce projet illustre l'importance de l'innovation et de la planification à long terme dans la préservation et la valorisation durable des ressources hydriques stratégiques.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

L'étude approfondie de la cuvette de Ouargla met en évidence une réalité environnementale complexe, marquée par une interaction étroite entre les dynamiques naturelles, démographiques et hydrogéologiques. Cette région saharienne, soumise à un climat aride extrême et à une croissance démographique soutenue, connaît une pression croissante sur ses ressources en eau, déjà limitées par des conditions géomorphologiques défavorables et une recharge naturelle quasi inexistante.

Sur le plan hydrogéologique, la région repose sur un système aquifère stratifié comprenant trois nappes principales : la nappe phréatique, le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Bien que ces aquifères offrent un potentiel en eau considérable, les analyses physico-chimiques révèlent une forte minéralisation des eaux, avec des concentrations élevées en sels dissous et en éléments indésirables, en particulier dans les couches superficielles. Cette situation rend l'eau brute inapte à la consommation directe et nécessite des traitements spécifiques pour en garantir l'usage durable.

Face à ces contraintes, la mise en place d'un projet structurant de déminéralisation, basé essentiellement sur la technologie de l'osmose inverse, a permis de transformer ces ressources dégradées en une eau potable conforme aux normes de l'OMS. La création de neuf stations de traitement, notamment celle d'Ifri Gara, témoigne de la pertinence de cette réponse technique. L'amélioration significative des paramètres de qualité de l'eau, observée à travers les comparaisons avant et après traitement, confirme l'efficacité du système mis en place. En définitive, la gestion intégrée et durable de la qualité des eaux à Ouargla constitue un modèle exemplaire pour les régions sahariennes confrontées à des défis similaires.

Cette expérience démontre qu'une approche fondée sur la connaissance du terrain, l'innovation technologique et une gouvernance hydrique rigoureuse peut assurer la sécurité hydrique et soutenir les dynamiques de développement dans des milieux aussi contraignants que le Sahara.

# *Reference*

### Références

1. Aliev, M. M. (1972). Structure géologique et perspectives pétrolières du Sahara algérien (Traduit du russe). Éditions Mir.
2. Bel F & Cuche D (1969) Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.
3. Bel F & Dermagne F (1966) Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.
4. Bouselsal B, Satouh A, Egbueri j, Hashim M, Arafat A, Paramasivam P, Alzaed A, Hussein E. (2025). Groundwater for drinking and sustainable agriculture and public health hazards of nitrate: Developmental and sustainability implications for an arid aquifer system. Results in Engineering Vol, 25, March 2025, 104160. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104160>
5. Boualem B, Egbueri J.C (2024) Graphical, statistical and index-based techniques integrated for identifying the hydrochemical fingerprints and groundwater quality of In Salah, Algerian Sahara. Environ Geochem Health 46, 158. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01931-6>
6. Bouselsal, B., Satouh, A. & Egbueri, J.C. 2024. Evaluating water quality, mineralization mechanisms, and potential health risks of nitrate contamination in the Continental Intercalaire aquifer of Reggane, Algeria. Environ Earth Sci 83, 539 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11844-3>.
7. Bouselsal B (2016) Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued Souf SE Algérie. Thèse de doctorat. Université d'Annaba, Algérie, p. 204.
8. Bouselsal B (2017) Groundwater quality in arid regions: The case of Hassi Messaoud Region SE Algeria. Journal of Fundamental and Applied Sciences 91:528.
9. Bouselsal B, Belksier MS (2018) Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued SE Algérie. Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement. Volume III - Numéro 1 - Avril 2018. P 74 -80.
10. Bouselsal B., Kherici N., Hadj-Said S. (2015). Vulnérabilité et risque de Pollution de la nappe libre d'El-Oued (SE Algérie) : application de la Méthode DRASTIC. Bulletin du Service Géologique National., Vol. 26, n° 1.
- 11.
12. Bouselsal B, Saibi S (2022) Evaluation of groundwater quality and hydrochemical characteristics in the shallow aquifer of El-Oued Region Algerian Sahara. Groundwater for Sustainable Development 17:100747. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100747>.
13. Bouselsal B, Zouari K (2022). Identification of Groundwater Quality and Hydrogeochemical Processes in the Shallow Aquifer of El-Oued Algerian Sahara. In: New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences: Proceedings of the 2nd Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences CAJG-2, Tunisia 2019 pp. 579-583. Cham: Springer International Publishing, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72543-3\\_130](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72543-3_130).
14. Bouselsal B., Kherici N., Hadj-Said S., Belksier M.S. (2014) Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale cas des eaux des aquifères d'el-oued (SE Algérie).

*Reference*.....

- International Journal for Environment & Global Climate Change. Vol 2, Issue 3, 2014. P 21-31.
15. Boussaada N, Bouselsal B, Benhamida SA, Hammad N, Kharroubi M (2023) Geochemistry and water quality assessment of continental intercalary aquifer in Ouargla region Sahara, Algeria. *Journal of Ecological Engineering* 2023, 24 2, 279–294. doi.org/10.12911/22998993/156832.
  16. Busson G (1970) *Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens.* Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides» Géol., 11, 811p. Ed.
  17. Busson G (1972) *Principes. Méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien.* Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle-Série C. 26, Paris.
  18. Castany G (1982) *Principes et méthodes de l'hydrogéologie.* Edition: DUNOD, Paris. 233p.
  19. Conrad G & Fontes JC (1970) Hydrologie isotopique du Sahara Nord-Occidental. "Isotope Hydrology 1970", A.I.E.A., Proceed. Symp. Vienne (1970) 405-419.
  20. Cornet A (1964) Introduction à l'hydrogéologie saharienne. *Géog. Phys. et Géol. Dyn.*, vol. VI, fasc. 1,5: 72.
  21. Dubief (1953) *Le climat du Sahara.* Mém. Hors série. Ins. Rech. Sahara, 275 p.
  22. ERESS (1972) *Etude des ressources en eau du Sahara septentrional.* Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris
  23. Fontaine, B. (1996). *Hydrogéologie du Sahara septentrional (Mémoire n° 8).* Service Géologique de l'Algérie.
  24. Guendouz A (1985) *Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est septentrional, Algérie.* Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris XI, 243 p.
  25. Horton RK (1965) An index number system for rating water quality. *J Water Pollut Control Fed* 37(3):300–306.
  26. Paris.v 175. pages. 825-827.
  27. Kharroubi M, Bouselsal B, Sudhir K.S. (2024). Groundwater quality and non-carcinogenic element health risks assessment using multi-technical models: A case of the deep aquifer of the complex terminal in Ouargla city (southeastern Algeria). *Groundwater for Sustainable Development* 25:101140. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101140>.
  28. Kharroubi M., Bouselsal B., Ouarekh M., Benaabidate L., Khadri R. 2022. Water Quality Assessment and Hydrogeochemical Characterization of the Ouargla Complex Terminal Aquifer (Algerian Sahara). *Arabian Journal of Geosciences* 1–24. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09438-z>
  29. Lakhdari AS, Bouselsal B. (2024). Investigation of the quality of the groundwater and the nitrate pollution hazards to human health in the desert region of Algeria. *Ecological Questions* 35(2024)4. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2024.053>
  30. Kilian C (1931) *Les principaux complexes continentaux du Sahara.* C.R. Soc. Géol. Fr. Paris

*Reference*.....

31. Lelievre RF (1969) Assainissement de la cuvette d'Ouargla. Ministère des travaux publique et la construction. Rapport Géohydraulique n°02, p18
32. Office National de la Météorologie (ONM). (2021). Données climatiques de la région de, Ouargla pour la période 2007–2021. Rapport interne, ONM, Alger, Algérie.
33. OSS (Observatoire Sahara et Sahel) (2003) Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.
34. Ouarekh M, Bouselsal B, Benaabidate L, Belksier M.S, Chellat S, Satouh A (2024). Geochemical evaluation of fluoride enrichment in the complexe terminal aquifer and its implications for human health in Oued Souf, Algerian Sahara. *Sustain. Water Resour. Manag.* 10, 163 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01148-6>.
35. Ouarekh M., Bouselsal B., Belksier M.S., Benaabidate L. 2021. Water quality assessment and hydrogeochemical characterization of the Complex Terminal aquifer in Souf valley, Algeria. *Arabian J. Geosci.* 14, 2239. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08498-x>
36. Rouvillois B (1975) Le pays de Ouargla (Sahara Algérien) variation et organisation d'un espace rural en milieu désertique. In: Méditerranée, troisième série, tome 38, 1-1980. pp. 83-84.
37. Satouh A, Bouselsal B, Chellat S, Benaabidate L (2021) Determination of groundwater vulnerability using the DRASTIC method in Ouargla Shallow Aquifer, Algerian Sahara. *Journal of Ecological Engineering* 22(6):1–8. <https://doi.org/10.12911/22998993/137680>.
38. Sawyer, C.N., McCarty, P.L., 1967. *Chemistry for Sanitary Engineers*, second ed. McGraw Hill, New York, p. 518. Schoeller, H., 1962. *Les eaux*
39. UNESCO (1972) *Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional*. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France.
40. WEC. (2007). *La géologie pétrolière de l'Algérie*. In *Sonatrach – Schlumberger Well Evaluation Conference - Algérie 2007*, Édité par Schlumberger, 2007.
41. World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). Geneva: WHO Press.
42. Zeddouri A (2010) *Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des nappes du complexe terminal de la région d'Ouargla*. Thèse de Doctorat, Univ. d'Annaba.