



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



**Université Ahmed Draïa Adrar**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences de la Matière**

**MEMOIRE**  
**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Science de la Matière**

**Filière : Chimie**

**Spécialité : Chimie de l'environnement**

**Intitulé**

**ETUDE DE L'ORIGINE DE LA SALINITE DE  
LA NAPPE DU CONTINENTAL  
INTERCALAIRE**

**Présenté par :**

**ILLOUL Zohra**

**BOUDIHAJ Halima**

**Soutenu le : ---/---/2020**

**Devant le jury :**

**Examineur : KALLOUM Slimane Pr. Univ. Adrar**

**Examineur : SLIMANI Saïd M. C. A Univ. Adrar**

**Promoteur : NASRI Bahous Dr. Univ. Adrar**

**Année Universitaire : 2019/2020**

## REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Dans le premier lieu,*

*Nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant, le*

*Très Miséricordieux*

*Tout ce travail est impossible ... { الحمد لله رب العالمين }*

*Nous voulons exprimer notre gratitude avec ces quelques lignes de remerciements*

*À tous ceux qui ont leur présence, leur soutien et leur disponibilité*

*Avec leurs conseils, nous avons trouvé le courage de mettre en œuvre ce projet.*

*Nous voulons toujours exprimer notre profonde et sincère gratitude*

*Merci à M. NASSIR Bahous qui nous a progressivement honoré*

*Ce travail et ces précieux conseils ont été d'une grande contribution. Nous portons donc*

*Sachez le temps précieux qu'il nous a consacré.*

*Nous remercions également M. SALAH MAHMOUD Saïd et les membres du jury y remerciant chaleureusement.*

*Accepter le respect de notre travail avec leur règle.*

*Enfin, nous ne pouvons pas terminer ce projet sans exprimer notre gratitude à tous.*

*Professeur au Département de science des matériaux.*

*Enfin, nous remercions l'Agence nationale des ressources en eau pour*

*Bonne hospitalité et bon accueil dans le domaine professionnel, ce qui nous permet de le faire*

*Nous recherchons la salinité dans l'eau.*

# *Dédicace*

*Ce travail est de plaire à la femme qui me donne un bourgeon et m'encourage à être une star dans le ciel quand j'étais une pierre au sol ..... maman.*

*À mon père après tous les efforts qu'il a faits pour le bien de notre famille, qui lui a souhaité une longue et heureuse vie*

*À mes frères: (Muhammad Al-Saleh \* Abdul Rahman)*

*À mes sœurs: (Zouleykha \* Saliha \* Fatima \*)*

*Pour mes nièces: (Ali \* Malak)*

*Pour toute la famille ILLULL*

*Même les gens du palais TAOUARRIT.*

*À tous mes amis, chers compagnons de l'intérieur de l'Université Ahmad Draia Adrar, et à l'extérieur du stade de supervision à mes honorables professeurs qui ont illuminé nos chemins de connaissances et de connaissances*

*Je dédie le fruit de cet humble travail*

*I\*Zabra*

# Dédicace

*À ceux qui m'ont appris le succès et la patience ... À ceux qui m'ont appris à donner immédiatement ... mon père.*

*À ceux qui m'ont enseigné et qui ont eu du mal à atteindre ma place ... À ceux dont les prières ont été le secret de mon succès et de leur tendresse à soigner mes blessures ... ma mère.*

*Pour toute ma chère famille*

*Pour mes frères Nour El-Din, Abdel-Salam, Abdullah et Mansour, et pour le cadet Abdel-Rahman...*

*À mes sœurs Fatima, Rafidah, Hasna..*

*Sidra, Al-Firdaws, Shams Al-Din, Jawad*

*À mon ange dans la vie, Oussama...*

*À toutes les familles de Bou Hajjaj et Tathawi, chacune en leur nom, où qu'elles se trouvent.*

*À mon collègue Zahra de mémoire..*

*Pour mes amis, mes amis de l'intérieur et de l'extérieur de l'université.*

*Cher professeur, Dr. NARE Bahous À mes honorables professeurs qui ont illuminé nos voies de savoir et de savoir.*

*Je dédie le fruit de cet humble travail*

*B\*Halima*

## Table des matières

Table des matières .....	i
Liste des Abréviations et Nomenclature .....	i
Listes des figures .....	iii
Liste des Tableaux .....	iii
Liste des annexes .....	iii
ملخص .....	iv
Abstract.....	v
Résumé .....	vi
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I . Cadre physique générale.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Situation géographique de la région .....	3
I.2.1 Limite de la zone d'étude.....	4
I.3 Réseau Hydrographique .....	4
I.4 Aspect socio-économique.....	5
I.4.1 Agriculture .....	5
I.4.2 L'Élevage.....	5
I.4.3 Industrie .....	5
I.5 Géologie de la zone .....	5
I.5.1 Quaternaire.....	6
I.5.2 Complexe terminale .....	6
I.5.3 Le Turonien.....	7
I.5.4 Le Cénomanién .....	7
I.5.5 Continental intercalaire .....	7
I.5.6 Le Jurassique.....	7
I.5.7 Le Trias .....	8
I.5.8 Le Paléozoïque.....	8
I.6 Hydrogéologie de la région .....	9
I.7 Climatologie .....	11
I.8 Recharge paléorecharge de la nappe .....	11
I.9 La salinisation des eaux souterraines.....	12
I.9.1 Les causes de la salinisation des aquifères .....	12
I.9.1.1 L'intrusion marine .....	12
I.9.1.2 Mélanges avec des saumures anciennes .....	12

I.9.1.3	Dissolution des formations évaporitiques .....	13
I.9.1.4	Sources anthropiques de salinisation .....	14
I.9.1.5	Sources anthropiques industrielles.....	14
I.9.2	Conséquences de la salinité des eaux.....	14
I.9.3	Problème du Sodium sur le sol .....	14
I.10	La salinisation des sols .....	15
I.10.1	Types de salinisation des sols .....	15
I.10.2	Mécanismes de la salinisation dans le sol.....	15
I.11	Conclusion.....	16
<b>Chapitre II . Matériel et Méthodes .....</b>	<b>17</b>	
II.1	Introduction .....	17
II.2	Prélèvement des échantillons.....	17
II.2.1	Analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau .....	17
II.2.1.1	Détermination du pH.....	17
II.2.1.2	Mesure de la conductivité .....	18
II.2.1.3	Détermination de la turbidité.....	19
II.2.1.4	Détermination du résidu sec .....	19
II.2.1.5	Mesure de la dureté de l'eau (TH) .....	20
II.2.1.6	Détermination de l'alcalinité (TA-TAC).....	20
II.2.1.7	Dosage du Sodium et du Potassium par photométrie de flamme.....	21
II.2.1.8	Dosage des Chlorures .....	22
II.2.1.9	Dosage des sulfates $SO_4^{2-}$ .....	23
II.2.1.10	Dosage des carbonates et bicarbonates .....	23
II.2.1.11	Détermination du Calcium et Magnésium .....	23
II.2.1.12	Détermination des nitrates <b>NO<sub>3</sub></b> – .....	24
II.2.1.13	Détermination des nitrites ( <b>NO<sub>2</sub></b> –) .....	26
II.2.1.14	Dosage de l'ammonium .....	28
II.2.1.15	Dosage de l'orthophosphates ( <b>P043</b> –) .....	29
II.3	Conclusion .....	31
<b>Chapitre III . Résultats et Discussions .....</b>	<b>32</b>	
III.1	Introduction .....	32
III.2	Résultats et discussions .....	32
III.2.1	Potentiel Hydrogène (pH) .....	33
III.2.2	La Conductivité (EC).....	33
III.2.3	Résidu Sec.....	33
III.2.4	Dureté totale.....	34
III.2.5	Les éléments majeurs .....	34

III.2.5.1	Le calcium <b>Ca<sup>2+</sup></b> + .....	34
III.2.5.2	Le Magnésium <b>Mg<sup>2+</sup></b> + .....	34
III.2.5.3	Le Sodium <b>Na<sup>+</sup></b> + .....	35
III.2.5.4	Le Potassium <b>K<sup>+</sup></b> + .....	35
III.2.5.5	Les Chlorures <b>Cl<sup>-</sup></b> - .....	35
III.2.5.6	Les Sulfates <b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> - .....	35
III.2.5.7	Les Carbonates et les bicarbonates <b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b> - et <b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> - .....	36
III.2.6	Les éléments mineurs .....	36
III.2.6.1	Les nitrates <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> - .....	36
III.2.6.2	Les nitrites <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b> - .....	36
III.2.6.3	L'azote ammoniacale <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b> + .....	37
III.2.6.4	Les phosphates <b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b> + .....	37
III.2.7	Le faciès géochimique .....	37
III.2.7.1	Diagramme de Piper .....	37
III.2.7.2	Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF .....	37
III.2.8	Relation chimiques des éléments .....	38
III.2.8.1	Sodium-Chlorure (Na-Cl) .....	38
III.2.8.2	Sulfate-Calcium (SO <sub>4</sub> -Ca) .....	39
III.2.8.3	Sodium-Calcium (Na-Ca) .....	39
III.2.8.4	Sulfate- Magnésium (SO <sub>4</sub> -Mg) .....	40
III.2.9	Utilisation de l'analyse en Composantes Principales (ACP) .....	40
III.2.9.1	Valeurs propres .....	41
III.2.9.2	Matrice de corrélation .....	41
III.2.10	Effet de la salinité des eaux sur l'irrigation .....	42
III.3	Conclusion .....	43
	Conclusion générale .....	44
	Références Bibliographiques .....	46
	Annexes .....	49

## Liste des Abréviations et Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
ANRH	Agence Nationale de Ressources Hydrauliques	
AEP	Alimentation en Eau Potable	
CE	Conductivité électrique	ms/cm
CI	Continental Intercalaire	
CT	Continental Terminal	
EDTA	Ethylène Diamine Tétra Acétique	
H%	Taux Humidité	
MES	Matières En Suspension	mg
OMS	Organisation Mondiale de la Santé	
OSS	Observatoire Du Sahara du Sahel	
N	Azote	
NO2-	Nitrite	
NO3-	Nitrate	
NH3	Ammoniac	
NH4-	Ammonium	
P	Phosphore	
PE	Prise d'essai	ml
PH	Potentiel Hydrogène	
SAR	Sodium Adsorption Ration	
SASS	Système Aquifère Du Sahara Septentrional	
T	Température	°C
TH	La Dureté Totale	
Symbole	Désignation	Unité
ANRH	Agence Nationale de Ressources Hydrauliques	
AEP	Alimentation en Eau Potable	
CE	Conductivité électrique	ms/cm
CI	Continental Intercalaire	
CT	Continental Terminal	
EDTA	Ethylène Diamine Tétra Acétique	
H%	Taux Humidité	
MES	Matières En Suspension	mg

OMS	Organisation Mondiale de la Santé	
OSS	Observatoire Du Sahara du Sahel	
N	Azote	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrite	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrates	

## Listes des figures

Figure I.1. Situation géographique de la région d'Adrar .....	3
Figure I.2. Limites géographiques de la région.....	4
Figure I.3. Répartition des bassins du Sahara Algérien .....	6
Figure I.4. Les couches géologiques dans la zones d'étude [10].....	8
<b>Figure I.5</b> Extension du formation du SASS [13].....	9
<b>Figure I.6</b> Prélèvements totaux dans les aquifères sahariens en milliards de m <sup>3</sup> /an [13] .....	11
Figure II.1 Mesure du pH.....	18
Figure II.2 Mesure de la turbidité.....	19
Figure II.3 Photomètre de flamme de type WTW.....	22
Figure II.4 Dosage des nitrates.....	25
Figure II.5 Conservation des flacons à l'obscurité.....	26
Figure II.6 Les solutions étalons des nitrites.....	27
Figure II.7 Dosage de l'ammonium.....	29
Figure II.8 Dosage des phosphates.....	30
Figure II.9:UV-Visible pour mesurer la densité optique des éléments, .....	31
Figure III.1 Points d'eau échantillonnées .....	32
Figure III.2. Teneurs en nitrates dans les eaux d'Adrar.....	36
Figure III.3 Diagramme de Piper des eaux de la région.....	37
Figure III.4 Diagramme de Schoeller des eaux d'Adrar.....	38
Figure III.5. Corrélation NaCl.....	39
Figure III.6 Courbe de corrélation du CaSO <sub>4</sub> .....	39
Figure III.7 Courbe de corrélation Na-Ca .....	40
Figure III.8 Courbe de corrélation MgSO <sub>4</sub> .....	40
Figure III.9 Représentation graphique en ACP des eaux d'Adrar .....	42
Figure III.10 Diagramme de Richards des eaux de la région d'Adrar.....	43

## Liste des Tableaux

Tableau III-1 Représentation des valeurs propres de la matrice .....	41
Tableau III-2 Matrice de corrélation .....	41

## Liste des annexes

Annexe 1. Statistiques descriptives des données 2011 .....	49
Annexe 2. Statistiques descriptives des piézomètres .....	49

### ملخص

تقع منطقة أدرار في الجزء الجنوبي من الجزائر، وتمثل الحد الجنوبي الغربي لشبكة طبقات المياه الجوفية في الصحراء الشمالية. الغرض من هذه الدراسة هو تقييم جودة المياه الجوفية للحفرة القارية والكشف عن ملوحة هذه المياه في منطقة أدرار، وكذلك تقديم تفسير للظواهر التي هي أصل هذا التمدن. مفرطة في هذه المنطقة، ولإجراء هذه الدراسة، يجب معرفة الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية وغيرها من طبقات المياه الجوفية القارية في منطقة توات. وتسمى هذه مفرش المائدة أيضا. وهو موجود في تكوين طين الحجر الرملي في العصر الطباشيري السفلي. من وجهة النظر الكيميائية، فإن هذه المياه معدنة للغاية وصعبة للغاية، وتحتوي على نسبة عالية من الكلوريد والكبريتات والصوديوم. أوضحت النتائج أن نوعية المياه الجوفية ضعيفة من ناحية إمكانية الشرب. وهي عمومًا لا تشكل خطرًا على القلوية ولكنها عالية الخطورة في تملح التربة، حيث أن واجهات كلوريد الصوديوم هي السائدة.

أخيرًا، نستنتج أن هذه المياه ذات جودة فيزيائية كيميائية رديئة للاستهلاك البشري.

**كلمات مفتاحية:** ادرار ; ملوحة ; مياه جوفية ; مصدر

### **Abstract**

Adrar region is located in the southern part of Algeria, it represents the southwestern limit of the aquifer system of northern Sahara.

The aim of this study is to assess the quality of the groundwater and to detect the salinity of these waters in the Adrar region, and also to provide an explanation of the phenomena which are at the origin of this mineralization. excessive in this region and to carry out this study, the geological, hydrogeological and other characteristics of the Continental Intercalary aquifer in the Touat region must be known. This tablecloth is also called the Albian tablecloth. It is contained in the sandstone-clay formation of the Lower Cretaceous. From the chemical point of view these waters are very mineralized and excessively hard, with high contents of chlorides, sulfates and sodium. The results showed that the groundwater quality is poor from the standpoint of potability. They generally do not present a risk of alkalization but a high risk of salinization for the soil. The sodium chloride facies is predominant. Finally we conclude that these waters are of poor physicochemical quality for human consumption.

**Key Words;** Adrar; Salinity; Groundwater; Source.

### Résumé

La région d'Adrar se situe dans la partie sud de l'Algérie, elle représente la limite Sud-ouest de système aquifère de Sahara septentrional.

Le but de cette étude est d'évaluer la qualité des eaux souterraines du continental intercalaire et de détecter la salinité de ces eaux dans la région de l'Adrar, et aussi de fournir une explication des phénomènes qui sont à l'origine de cette minéralisation excessive dans cette région et pour réaliser cette étude, doivent être connues les caractéristiques géologique, hydrogéologique et autres de la nappe du Continental Intercalaire dans la région du Touat. Cette nappe est appelée aussi nappe de l'Albien. Elle est contenue dans la formation gréseux-argileuse du Crétacé inférieur. Du point de vue chimique ces eaux sont très minéralisées et excessivement dures, avec de fortes teneurs en chlorures, sulfates et en sodium. Les résultats ont montré que les eaux souterraines que la qualité est médiocre du point de vue de la potabilité. Elles ne présentent généralement pas de risque d'alcalinisation mais un risque élevé de salinisation pour les sols. Le faciès chloruré sodique est prédominant.

En fin on conclut que ces eaux sont de mauvaise qualité physico-chimique pour la consommation humaine.

**Mots clés :** Adrar ; Salinité ; Eaux souterraines ; Sources.

### Introduction générale

Ces dernières années les pays méditerranéens sont confrontés à de graves problèmes d'eau en termes de quantité et de qualité. En Algérie, la disponibilité de l'eau est devenue une préoccupation majeure en raison de la pénurie de cette substance utile. Actuellement, les besoins en eau potable sont d'environ 450 m<sup>3</sup> par habitant et par an et aura tendance à diminuer à environ 420 m<sup>3</sup> par habitant et par an en 2020, [1].

La région d'Adrar a connu dernièrement une grande évolution dans le domaine socioéconomique, agricole et industriel. En parallèle, les besoins en eau ont augmenté. Pour subvenir aux besoins de croissance de la demande en eau, des nombreux forages ont été réalisés, s'ajoutant au système de captage traditionnel (foggara et puits). Ces contraintes ont engendré un grand nombre de problèmes talque, le tarissement des foggaras, le rabattement de la nappe, et la dégradation de la qualité des eaux.

Un rapport dans le cadre du projet contrat de nappe à a révélé, deux problèmes essentiels ; d'un point de vue quantitatif, les prélèvements sur la nappe et l'augmentation de ceux-ci au fil des années engendrent une baisse significative du niveau de la nappe, qui a notamment pour conséquence le tarissement des foggaras. Les projections d'évolution de la demande en eau dans la zone, tant pour l'AEP que pour l'agriculture, indiquent que l'impact quantitatif sur la nappe pourrait s'aggraver dans les années à venir, avec la poursuite de la baisse du niveau de la nappe dans les zones d'influence des prélèvements.

D'un point de vue qualitatif, la nappe présente des contaminations localement significatives au droit des zones à forte densité d'agriculture irriguée, et à proximité de ces zones, résultant d'une part de l'utilisation des intrants agricoles et d'autre part de la salinisation induite par l'irrigation. Les normes de potabilité de la nappe sont ainsi localement dépassées pour une série de paramètres [2].

Face à ces constats, il est nécessaire de prendre des mesures pour améliorer la gestion durable et la préservation de cette précieuse ressource en eau souterraine dans cette région, en harmonie avec le nécessaire développement socio-économique de la région. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, lequel permettra de collecter les informations utiles et de déterminer les sources et l'origine de la salinisation de cette nappe et pour arriver à proposer des réponses adéquates aux problématiques conduisant à la bonne gestion, l'exploitation et la protection de cette ressource.

## Introduction générale

---

L'objectif de notre travail est de déterminer et de comprendre les processus de minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère, ensuite d'identifier les différents facteurs qui sont à l'origine de la pollution et à la minéralisation excessive liée au milieu naturel et à l'ensemble des processus d'origine anthropique et biogéochimique.

Ce travail est constitué principalement de trois chapitres, précédés par une introduction générale.

Dans le premier chapitre, on a présenté le cadre physique de la zone d'étude et les informations nécessaires sur les ressources en eaux dans cette région.

Le deuxième chapitre expose le matériel et la méthodologie adoptée durant notre expérimentation.

Le quatrième chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus à l'issue des expériences.

Enfin une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail et dégage les perspectives ouvertes par nos résultats.

## Chapitre I . Cadre physique générale

### I.1 Introduction

La région d'Adrar est caractérisée par un climat extrêmement aride, et par la présence d'une ressource en eau à la fois unique, fragile et faiblement renouvelable, constituée de la nappe du Continental Intercalaire. L'augmentation des besoins en eau, essentiellement pour l'agriculture irriguée et pour l'AEP, forment aujourd'hui une pression importante sur la nappe qui menace l'équilibre quantitatif de celle-ci. Sur le plan environnemental, également le développement croissant des activités anthropiques dans cette zone, notamment dans les secteurs agricole et industriel, pose un risque accru de dégradation de la qualité des ressources hydriques exploitées.

### I.2 Situation géographique de la région

La wilaya d'Adrar se trouve au Sud-Ouest de l'Algérie à une distance d'environ 1543 km de la capitale Alger. Elle couvre une superficie globale d'environ 427971 km<sup>2</sup> soit 19,97% du territoire national (Fig.I.1). Elle est limitée Par [3]:

- Au Sud par le Mali ;
- Au à Sud-Est par la wilaya de Tamanrasset ;
- Au Sud-Ouest par la wilaya de Tindouf et la Mauritanie ;
- Au Nord par la wilaya d'El-Bayad
- Au Nord-Est par la wilaya de Ghardaïa.
- Au Nord-Ouest par la wilaya de Béchar.

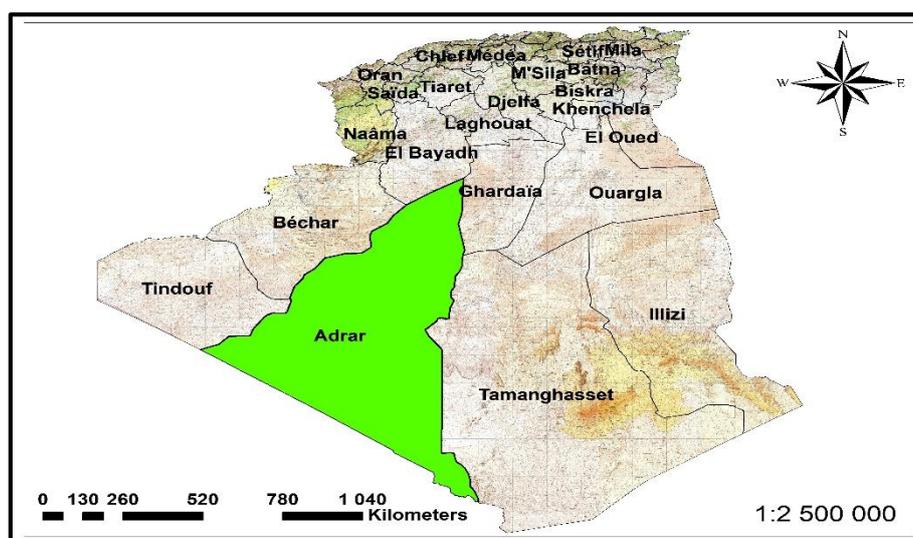


Figure I.1. Situation géographique de la région d'Adrar

Ce territoire est divisé en trois parties ; le Gourara est représenté par la wilaya de Timimoune, la partie nord de la zone. La région de Touat s'étend du Brinkane jusqu'au Reggane ; c'est la plus vaste des régions. La région de Tidikelt se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh qui représente le centre de la région. Celle de Tanezrouft forme la partie de Bordj Badji Mokhtar [4].

### I.2.1 Limite de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie de la wilaya d'Adrar, elle est située entre les latitudes 26°30'N et 28°30'N et les longitudes 0°30'W et 0°30'E, elle s'étend de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Reggan sur presque une distance de 270 km. Cette zone est limitée (Fig.I.2).

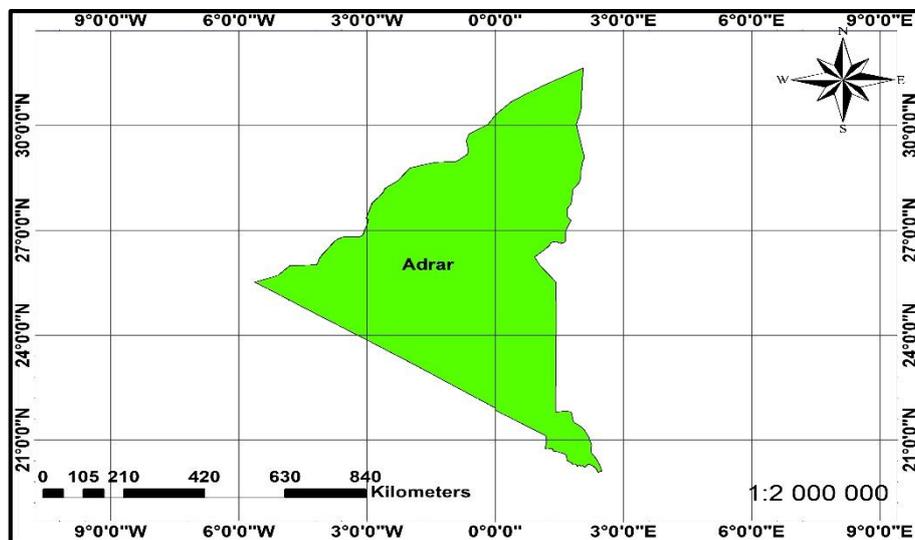


Figure I.2. Limites géographiques de la région

- Au Nord par le Grand Erg Occidental.
- A l'Ouest par Erg Echech
- Au Sud par la Tanezrouft.
- A l'Est par le plateau de Tademaït [5]

### I.3 Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique fait partie du bassin occidental du Sahara Septentrional témoigne des écoulements endoréiques de surface au cours des périodes humides du Quaternaire. Les deux principaux oueds qui existent dans cette région sont, Oued Messaoud (l'ancien affluent de la rive gauche de l'oued Saoura) et Oued Tilia (draine le versant occidental du plateau Crétacé du Tademaït, il passe au sud de la commune de Timmi) [6]

## **I.4 Aspect socio-économique**

### **I.4.1 Agriculture**

Le secteur agricole a connu une grande évolution dans les dernières années, avec les subventions de l'état, des centaines de forages sont réalisés, des milliers d'hectares sont cultivés, dans le cadre de la mise en valeur des grands périmètres pour la production des céréales et autres cultures pour arriver à une auto-suffisance de la région, les périmètres de mise en valeur sont situés à l'Est de la zone d'étude et par fois en amont des forages d'AEP et des champs captant, tout le long de l'axe reliant Adrar à Reggane [2].

A l'intérieur de la palmeraie, on trouve plusieurs variétés de cultures sont produites dont le rendement est très faible à cause, des faibles superficies et les méthodes d'irrigation traditionnelles utilisées, généralement ces cultures sont utilisées pour une autoconsommation.

### **I.4.2 L'Élevage**

Vu la rareté des précipitations et l'aridité de la région, les pâturages sont inexistantes ce qui constitue l'entrave principale qui gêne le développement de l'élevage dans cette région, quelques espèces animales typiques aux régions sahariennes, camelins, caprins, ovins et des centaines de bovins constitue la ressource animale dans la région [7]. Dans ces dernières années la région a connu un développement dans d'élevage de poules au niveau des périmètres agricoles.

### **I.4.3 Industrie**

La région d'Adrar a connu ces années une dynamique industrielle accélérée avec la découverte des gisements de gaz et pétrole, elle est devenue un pôle industriel avec la réalisation de la raffinerie de Saba en ajoutant plusieurs petites usines (briqueterie, minoterie...etc.) [8].

## **I.5 Géologie de la zone**

Les études réalisées sur cette région nous a permis de lister une vingtaine d'étages stratigraphiques traversés. Certains ont été regroupés pour permettre une corrélation plus aisée des formations géologiques. Les étages datés du Primaire et les formations du socle, sont regroupés sous le nom du Paléozoïque, les séries datées du Lias au Malm ont été regroupées sous le Jurassique, les formations du Crétacé inférieur datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme « Continental Intercalaire C.I ». Le terme « Complexe Terminal C.T » désigne les formations datées du Sénonien au Miopliocène. Ces regroupements ont permis de



deux systèmes aquifères sont séparés. La nappe s'étend sur une superficie de l'ordre de 350 000 km<sup>2</sup> [12].

### **I.5.3 Le Turonien**

Il est formé par deux étages le Turonien supérieur : constitué par des calcaires jaunes dolomitiques et d'argiles, et le Turonien inférieur : formé par des calcaires blancs dolomitiques et marneux [13].

### **I.5.4 Le Cénomanién**

Le Cénomanién est représenté par une alternance de bancs de calcaire et dolomie, d'argile et d'évaporites (anhydrite ou sel). Son épaisseur est de 50 m, il forme la base du plateau de Tademaït, on constate aussi que le Cénomanién inférieur est argileux alors que le Cénomanién supérieur est calcaire [13].

### **I.5.5 Continental intercalaire**

Le Continental Intercalaire est marqué comme l'ensemble compris entre le jurassique et le cénomanién, cet ensemble comprend des formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur. Constitué par l'Albien qui est constitué à la base par des grès et des sables dans lesquels s'intercalent des argiles et des argiles dolomitiques et au sommet par une dalle quartzitique. L'Aptien est un bon repère géologique, généralement formé par un faciès calcaro-dolomitique appelé « barre aptienne » l'épaisseur de cet horizon est comprise entre 10 et 30 m. Le Barrémien est constitué par des grès grossier à gravier, d'argile et des sables admettant des passées d'argiles. Le Néocomien comprenant des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base, elles sont surmontées par une alternance de dolomie et d'argile. Dans notre région d'étude les horizons ci-dessus sont assemblés pour former une seule nappe homogène, le Continental Intercalaire au sens large, appelé aussi localement « la nappe Albienne » [10].

### **I.5.6 Le Jurassique**

Cette formation est représentée par des argiles tendres légèrement sableuses parfois micacées avec des passées de dolomie, grès et calcaire d'une épaisseur totale comprise entre 200 et 300 m. Le Jurassique inférieur et moyen comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement du sel et d'anhydrite. Les formations du jurassique supérieur sont formées par des intercalations d'argile, d'argile sableuse et de calcaire dolomitique [10].

### I.5.7 Le Trias

Il est généralement représenté par une sédimentation de type lagunaire constituée d'argile, d'argile plastique, d'argile bariolée gypseuse, d'anhydrite parfois massive et de dolomie [11].

### I.5.8 Le Paléozoïque

Les formations d'âges paléozoïques affleurent au Sud-ouest de la ville d'Adrar vers la ville de « Koussane et Bouzzane », elles plongent sous le recouvrement mésozoïque et cénozoïque jusqu'à son apparitions à l'Est de la ville de Reggane, on trouve de haut en bas :

Le Carbonifère affleure près du village de Tiouririne par des couches de calcaire, argile et gypse qui appartient au Namurien et par des grès, calcaires et argiles du Viséen inférieur et supérieur, alors que le Tournaisien représenté par des grès argileux.

Le Dévonien affleure essentiellement dans la région de Zaouit Kounta sous forme de grès et de calcaire et argile. Le Silurien se trouve au Sud de Lahmeur par des argiles à graptolites. Les formations d'âges ordoviciennes affleurent près de Tasfaout par des formations de grès rouge ou vert, silts et argile.

Le précambrien est représenté par un matériel volcano-détritique dit « série verte » composé d'une alternance de grauwackes à débris de roches et conglomérat à galets de socle (quartzite, gneiss, granite)[10].

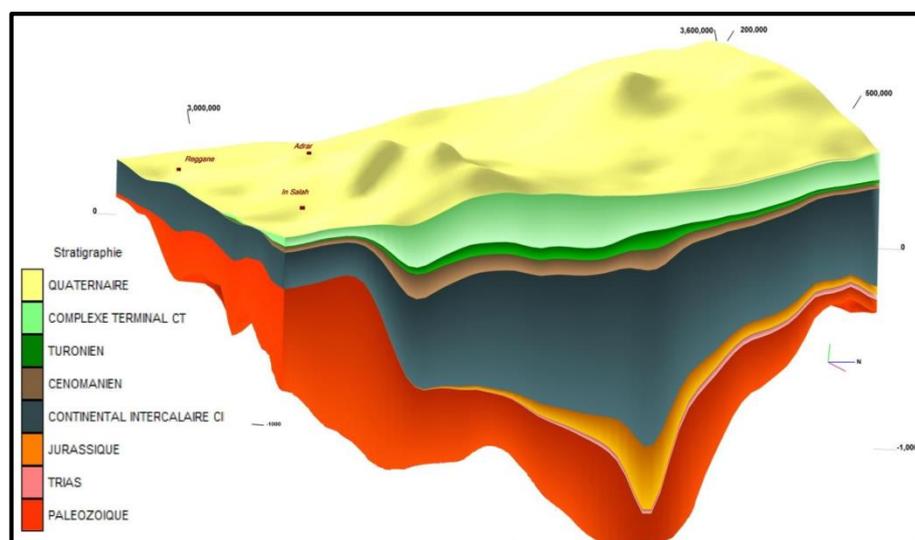
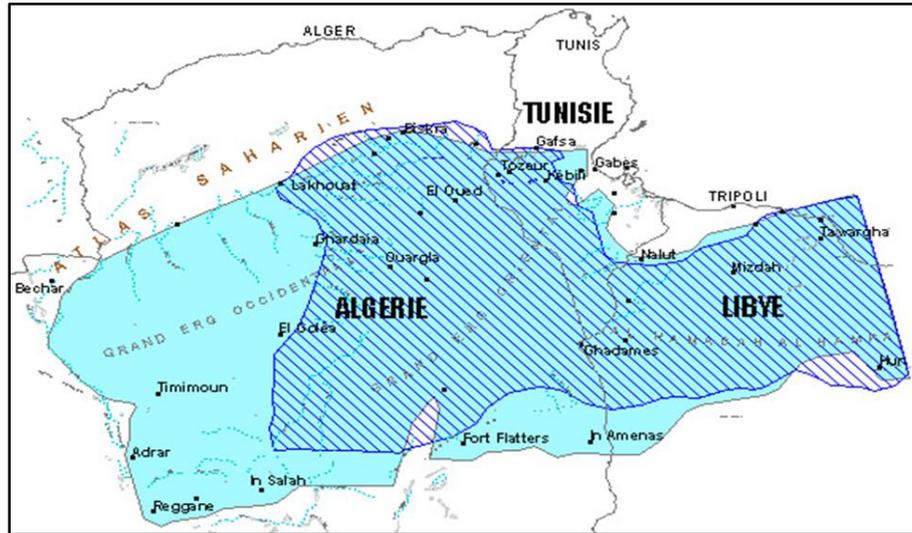


Figure I.4. Les couches géologiques dans la zones d'étude [10]

## I.6 Hydrogéologie de la région

Les recherches pétrolières sont à l'origine de la découverte de système hydraulique au Sahara qui est le système aquifère du Sahara septentrionale (SASS). Ce système désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : la formation du Continental Intercalaire (CI), la plus profonde et celle du Complexe Terminale (CT) (Fig. 1.5).



**Figure I.5** Extension du formation du SASS [13]

Ce système aquifère formé par les nappes aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal s'étend dans sa plus grande partie dans le territoire saharien d'Algérie. Plusieurs études réalisées pour l'estimation de la capacité du réservoir du Continental Intercalaire mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie libyenne du système aquifère.

Le système aquifère du Sahara septentrional est partagé entre l'Algérie la Tunisie et la Libye. Il couvre une superficie plus d'un million de km<sup>2</sup>, il est reparti entre trois pays à savoir l'Algérie (700 000 km<sup>2</sup>), la Tunisie (80 000 km<sup>2</sup>) et la Libye (220 000 km<sup>2</sup>) [13].

Il s'étend du Nord depuis l'Atlas Saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et le rebord méridional du Tinrhert au Sud et de l'Ouest depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye à l'Est. Ce bassin renferme une série des couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI) [11].

Le Continental Intercalaire dans la région d'Adrar affleure tout le long de l'axe reliant Timimoun à In Salah, elle représente la partie à surface libre du Système Aquifère du Sahara Septentrional dans sa partie Sud-Ouest. La nappe d'eau est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, composée d'une lithologie meuble, argile, grès, sable et gravier, avec niveau

statique est de l'ordre de 10 à 30 m par rapport au sol et qui dépasse les 100 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, avec des débits des forages de l'ordre de 20 à 50 l/s qui engendrent des rabattements de 10 à 25 m [14].

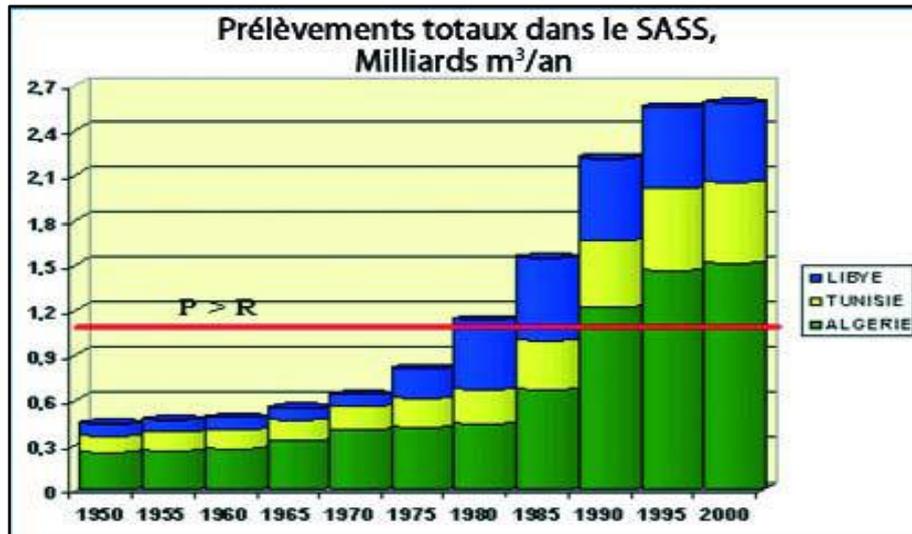
Les études réalisées sur le SASS ont montré que le Continental Intercalaire possède une épaisseur qui diminue de l'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud, il est de l'ordre de 700 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, alors qu'il est de moins de 40 m vers l'Erg Echech. En général l'épaisseur dans la région d'Adrar ne dépasse pas les 250 m [9].

Étant donné les conditions du climat, aride à saharien, ces formations sont faiblement alimentées : la recharge du système représente environ 1 milliard de  $m^3$  d'eau par an au total, infiltrés essentiellement aux piémonts de l'Atlas saharien en Algérie, ainsi que sur le Dahar en Tunisie et le Djebel Nefoussa en Libye. Cependant, l'extension du système et l'épaisseur des couches ont favorisé l'accumulation de réserves considérables au cours des siècles passés.

Plusieurs études réalisées pour l'estimation de la capacité du réservoir du Continental Intercalaire mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie libyenne du système aquifère. Ces études ont montré que les réserves du SASS sont entre  $20000 \times 10^9 m^3$  et  $60000 \times 10^9 m^3$  [9].

Le système aquifère saharien est en effet exploité par près de 8800 points d'eau, forages, puits et sources : 3 500 points au Continental Intercalaire et 5300 au Complexe Terminal. Par pays, ces points de prélèvement se répartissent comme suit : 6500 points en Algérie, 1200 points en Tunisie et 1100 points en Libye.

L'évolution du nombre de forages et de leur régime d'exploitation indique des croissances extrêmement fortes au cours des vingt dernières années (Fig. I.6) : cette exploitation atteint aujourd'hui 2,5 milliards  $m^3$ /an (soit 1,50  $m^3$ /an en Algérie, 0,55  $m^3$ /an en Tunisie et 0,45  $m^3$ /an en Libye), contre 0,6 milliard en 1970. Si cette évolution, partagée par les trois pays, devait se prolonger, il y aurait sans doute de sérieuses raisons de s'inquiéter pour l'avenir des régions sahariennes, où l'on a pu d'ores et déjà enregistrer les premiers signes d'une détérioration de l'état de la ressource en eau [13].



**Figure I.6** Prélèvements totaux dans les aquifères sahariens en milliards de m<sup>3</sup>/an [13]

Cette forte exploitation se trouve aujourd'hui confrontée à de nombreux risques : salinisation des eaux, l'accroissement excessif des profondeurs de pompage, réduction de l'artésianisme, tarissement des exutoires, tarissement des foggaras, la réalimentation potentielle du CT par les eaux salées des Chotts et interférences entre les trois pays [13].

## I.7 Climatologie

Le climat dans la région d'Adrar est connu par sa température élevée, sa précipitation rare et irrégulière, ses tempêtes de sable violentes, ces conditions rendent la région très hostile. Elle se caractérise donc par un climat désertique et hyper aride très sec. Les températures sont très élevées en été (49°C), douces en hiver, faible humidité relative (27,25 %) et forte intensité lumineuse. Les précipitations annuelles ne dépassent guère les 50 mm/an. Ce qui conduit à des conditions climatiques élevées (Evapotranspiration potentielle dépasse 3000 mm/an) [15].

## I.8 Recharge paléorecharge de la nappe

Les réserves dites fossiles sont situées, en général, à des grandes profondeurs et connues pour être pratiquement non renouvelables. Dans les régions arides du monde, comme le Nord de l'Afrique, la péninsule arabique, l'Australie et le sud-ouest des Etats-Unis Amérique, ces nappes sont d'autant plus importantes qu'elles peuvent être un facteur déterminant du développement socioéconomique [16].

L'utilisation du terme « eau fossile » est peu utilisée dans le lexique des hydrogéologues, l'eau qui s'infiltré dans la nappe est en mouvement, jusqu'à sa sortie soit par pompage ou perdue aux exutoires naturels, la durée de ce mouvement nous donne une fausse idée que les eaux sont en générales fossiles.

D'après les études précédentes, c'est pendant la période humide de l'Holocène que la recharge de la nappe du Continental Intercalaire s'est effectuée, les simulations de paléo recharge du modèle OSS montrent que l'hypothèse d'une recharge faible à nulle sur l'atlas saharien, le Dahar, Jebel Nefusa et le Mزاب est inacceptable [16].

## **I.9 La salinisation des eaux souterraines**

L'un des causes principales de dégradation de la qualité des eaux, particulièrement en zone aride et semi-aride est la salinisation. C'est un phénomène environnemental qui affecte la qualité chimique des eaux naturelles et qui rend impropres à la consommation humaine beaucoup d'aquifères [17].

La salinité ou la minéralisation d'une eau est généralement déterminée par le TDS (Total dissolved Solids) ou par sa chlorinité (la quantité (en g/kg) d'ions chlore, brome et iode qui précipitent lors du titrage au nitrate d'argent). Elle peut également être définie par sa conductivité électrique [18].

### **I.9.1 Les causes de la salinisation des aquifères**

Les origines de la salinisation sont diverses et complexes et dépendent de plusieurs facteurs tels que la position géographique, la géologie et la nature de l'aquifère. Plusieurs mécanismes peuvent ainsi être à l'origine de la salinisation des eaux souterraines [19]. Il s'agit principalement de l'intrusion marine, du contact de l'aquifère avec des saumures et de la dissolution d'évaporites (saumures secondaires). A ces processus naturels s'ajoutent les sources anthropiques dont les plus courantes sont les rejets industriels et les eaux d'irrigation [20].

#### **I.9.1.1 L'intrusion marine**

L'intrusion marine représente l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus affectant la qualité de l'eau des aquifères côtiers. C'est un phénomène naturel engendré par la surexploitation des aquifères côtiers. En effet, plus de 75 % de la population mondiale vit en région côtière. Cette population est dépendante des ressources en eau côtière, et pour l'essentiel des ressources en eau souterraine [21].

#### **I.9.1.2 Mélanges avec des saumures anciennes**

La salinisation des nappes peut provenir du contact de l'aquifère avec des saumures anciennes qui sont des solutions hypersalines préservées dans des aquifères qui échangent peu avec les eaux de surface (aquifères profonds, captifs, peu perméables). Il s'agit le plus souvent

d'eaux marines résiduelles fortement concentrées en sels, formées suite à l'évaporation d'une eau de mer ancienne. Dans de telles situations, les concentrations en sels peuvent être très importantes, si bien qu'une petite portion de saumures suffit à provoquer une salinisation importante [18].

L'augmentation graduelle de la salinité et la modification de la composition chimique de la nappe vers une prédominance des ions chlorure et sodium peut également résulter de convection et de diffusion des fluides salins piégés dans une formation en connexion avec la nappe d'eau douce. Les deux réservoirs, et formation contenant une quantité non négligeable d'eau, peuvent être superposés ou contigus [21].

L'impact de ce type de salinisation est particulièrement dramatique dans les aquifères où l'eau douce n'est pas renouvelée. Il s'agit par exemple du cas des aquifères fossiles. De nombreuses études ont montré que les ressources en eau souterraine des régions comme le Sahel, le Sahara et les zones arides du Moyen-Orient sont essentiellement fossiles et reflètent une paléorecharge qui remonte au Pléistocène tardif [22].

### **I.9.1.3 Dissolution des formations évaporitiques**

La dissolution des minéraux des évaporites dans les bassins sédimentaires constitue une source fréquente de minéralisation dans les aquifères. La halite et le gypse sont les minéraux les plus souvent impliqués dans les cas de salinisation par une réaction eau-roche. Les réactions de dissolution dépendent de conditions physico-chimiques et thermodynamiques bien particulières (pression, température, constante de solubilité du minéral impliqué, force ionique de la solution...). La dissolution de la halite se traduit par une augmentation de la concentration en ions chlore ( $\text{Cl}^-$ ), tandis que la dissolution du gypse conduit à une augmentation des ions calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) et sodium ( $\text{Na}^+$ ).

La saturation de ces sels dans la solution contrôle leurs concentrations maximales. Au cours de l'évaporation d'une eau de mer, on assiste successivement à la saturation suivie de la précipitation de la calcite d'abord, puis du gypse, de la halite, de l'epsomite, de la sylvite, la carnallite, la bischofite et la tachyhydrite... [18]. Dans la zone non-saturée et dans les nappes en conditions oxydantes, l'oxydation des sulfures comme par exemple la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) peut conduire à une formation de sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  et donc à une augmentation accrue de la salinité de la nappe. Les activités anthropiques comme l'exploitation minière peuvent provoquer ou accélérer la dissolution des évaporites (exploitation de la potasse) et générer des effluents acides et hautement concentrés en sels (drainage minier acide et salin) [23]

### **I.9.1.4 Sources anthropiques de salinisation**

En zone aride et semi-aride, l'activité agricole en général et l'irrigation en particulier est la principale source de salinisation des eaux souterraines. Les sources de salinisation peuvent provenir de l'eau d'irrigation. En effet, l'usage d'eaux salées pour l'irrigation génère un apport en ions comme le chlorure ou le sodium. Les intrants agricoles naturels comme artificiels constituent une source non négligeable en ions potassium ou nitrate, ammonium dans la nappe [21].

### **I.9.1.5 Sources anthropiques industrielles**

D'autres sources de salinisation d'origine anthropique sont liées aux activités industrielles qui rejettent des eaux usées mais aussi l'évacuation des eaux usées industrielles ou domestiques et l'épandage de sels de déneigement sur les routes [18].

## **I.9.2 Conséquences de la salinité des eaux**

Le sel dans l'eau ou le sol a comme principales conséquences une augmentation de la pression osmotique, qui se traduit par une toxicité pour les végétaux et les organismes du sol due à l'accumulation de certains ions, dont  $\text{Na}^+$ . Il s'ensuit une dégradation du sol et de services écosystémiques. La salinité peut également entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes [24].

## **I.9.3 Problème du Sodium sur le sol**

Lorsque la concentration des ions  $\text{Na}^+$  à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cet effet. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, (Sodium Absorption Ratio : SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent. Il est donc impératif d'étudier les paramètres qui définissent les caractéristiques des eaux destinées à l'irrigation [25].

## I.10 La salinisation des sols

La salinisation des terres est un le processus majeur de dégradation des sols qui diminue leur fertilité et constitue une étape dans la désertification des terres arides. La salinisation des terres est un problème qui touche la plupart des pays situés en zone aride et semi-aride.

La salinisation au sens large est un terme générique caractérisant une augmentation progressive de la concentration des sels dans les sols sous l'influence de conditions hydrologiques particulières (lessivage insuffisant, proximité de la nappe...), d'apport d'eau d'irrigation salée ou de l'aridité du climat. Elle désigne trois processus de dégradation saline des sols que sont : la salinisation (au sens strict), l'alcalinisation et la sodisation (ou sodification) [26].

### I.10.1 Types de salinisation des sols

Il existe deux types de salinisation, l'une est une salinisation naturelle et dite primaire, elle peut provenir de l'altération des évaporites qui sont des sédiments issus de l'évaporation de l'eau et la précipitation des sels qui y sont dissous. Les minéraux principaux de ces roches sont le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), l'halite ( $\text{NaCl}$ ) et la sylvite ( $\text{KCl}$ ). L'exemple de salinisation primaire le plus répandu est la salinisation des terres arides. C'est un phénomène naturel qui dérive d'une longue accumulation de sels à la surface du sol et d'un manque de lessivage adéquat [18].

La salinisation secondaire d'origine anthropique est essentiellement due à la pratique de l'irrigation. Elle affecte 60 millions d'hectares soit 24% des terres irriguées dans le Monde.

La salinisation secondaire des terres agricoles est particulièrement répandue dans les milieux arides et semi-arides où la production agricole nécessite des systèmes d'irrigation adéquats. La source de salinisation peut se situer à plusieurs niveaux : la qualité de l'eau d'irrigation, la qualité du sol, le niveau de la nappe et les conditions climatiques [27].

### I.10.2 Mécanismes de la salinisation dans le sol

La salinisation provoque une concentration de la solution du sol qui conduit à la précipitation successive de minéraux. Ceci modifie la composition chimique de départ de la solution du sol et détermine différentes voies d'évolution des sols en fonction de l'abondance relative des différents ions [27].

Lorsque la solution du sol se concentre et que la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) précipite, l'alcalinité et le calcium ne peuvent augmenter simultanément. Si la concentration en calcium est supérieure à celle de l'alcalinité, la concentration du calcium augmente et celle de l'alcalinité diminue.

L'alcalinité résiduelle est calculée en soustrayant les charges de cations et en ajoutant celle d'anions, impliqués dans les précipitations, à l'alcalinité. Elle est le plus souvent considérée par rapport à la précipitation de la calcite et correspond alors à la définition du concept de (Residual Sodium Carbonates (RSC)).

$$\text{Alcalinité résiduelle calcite} = \text{RSC} = \text{Alcalinité} - 2[\text{Ca}] - 2[\text{Mg}] \text{ (meq /l)}$$

## I.11 Conclusion

Dans cette partie de notre étude on a présenté des informations générales sur la zone d'étude et on a constaté que la région d'Adrar dispose d'une seule aquifère, fragile et faiblement renouvelable, constituée par la nappe du Continental Intercalaire.

On constate aussi que les activités socioéconomiques ont engendré des dégradations de la qualité est la quantité de ces ressources, notamment par la salinisation des eaux.

## Chapitre II . Matériel et Méthodes

### II.1 Introduction

Les différents travaux effectués dans le cadre de cette étude ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

### II.2 Prélèvement des échantillons

Les prélèvements ont été effectués manuellement dans des flacons de polyéthylène de 1500 ml de capacité. L'échantillon doit toujours être parfaitement identifié et porter le numéro et les coordonnées du point d'eau, la date, et la profondeur et le niveau statique. Ces échantillons sont conservés selon les méthodes standard[29], et transportés par la suite au laboratoire de l'ANRH Adrar.

Une analyse des paramètres physiques (pH, CE, TDS, T) et des éléments chimiques a été effectuée pour les éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ), le cycle de l'azote ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ), et les éléments mineurs en traces ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

#### II.2.1 Analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau

##### II.2.1.1 Détermination du pH

La mesure du pH a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre muni d'une électrode préalablement étalonnée avec des solutions tampon pH (4 et 7). La méthode consiste à plonger l'électrode dans l'échantillon contenu dans un bêcher, Après la stabilisation de l'affichage sur le cadran du pH mètre, on lit la valeur du pH directement [29].

##### Mode opératoire

Tout d'abord on rince le bêcher et l'électrode avec de l'eau distillée, puis avec de l'eau à analyser, ensuite, on remplit le bêcher avec l'échantillon et on immerge l'électrode avec agitation, Nous lisons directement le pH lorsque sa valeur est stabilisée. Le montage est donné par la figure suivante (Fig. II.1).



Figure II.1 Mesure du pH

### II.2.1.2 Mesure de la conductivité

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes de platine de 1 cm<sup>2</sup> de surface, séparé par une distance de 1 cm, Elle est l'inverse de la résistivité électrique ( $\rho$ ) [29].

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \times \frac{L}{S}$$

Avec :

$\gamma$  : conductivité (en  $\Omega$ , m-1 ou S,m-1)

$\rho$ : résistivité (en  $\Omega$ , m),

R : résistance (en  $\Omega$ ),

L : distance entre les deux électrodes (en m),

S : surface de chaque électrode (en m<sup>2</sup>)

#### 🔧 Mode opératoire

Premièrement on rince plusieurs fois la cellule de la conductivité avec de l'eau distillée, puis on plonge l'électrode complètement dans un récipient contenant l'eau à analyser. Par la suite on agite l'échantillon afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide, cette agitation permet d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes. Enfin on note la valeur finale affichée sur le conductimètre. Le résultat est donné directement en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [29].

### II.2.1.3 Détermination de la turbidité

La turbidité mesure la propriété optique de l'eau qui résulte de l'absorption de la lumière par les particules en suspension présentes dans l'eau [29].

#### ✚ Mode opératoire

On met l'appareil (Fig. II.2) sous tension et après rinçage plusieurs fois la cuvette par l'échantillon à analyser, on remplit par la suite la cuvette par ce dernier et on place la prise d'essai de l'échantillon et on appuie " READ " le résultat en NTU s'affiche [29].



Figure II.2 Mesure de la turbidité

### II.2.1.4 Détermination du résidu sec

La détermination des résidus sec permet d'estimer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau. La détermination du résidu sur l'eau non filtrée permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension, c'est le résidu total. Si l'eau est filtrée préalablement à la mesure, le résidu correspond alors aux matières dissoutes. Une certaine quantité d'eau est évaporée dans une capsule tarée. Le résidu desséché est ensuite pesé.

#### ✚ Mode opératoire

Tarer une capsule préalablement lavée, rincée à l'eau distillée et desséchée. On prélève 100 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée et on le verse dans la capsule. Ensuite on porte cette dernière à l'étuve à 110° C, pendant 24 heures, on laisse refroidir pendant ¼ d'heure au dessiccateur, en fine on pèse immédiatement et rapidement.

### II.2.1.5 Mesure de la dureté de l'eau (TH)

Le titre hydrotimétrique (TH) d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium.

#### Principe

Les ions des élément alcalino-terreux présente dans l'eau forment un complexe de type chélate avec le sel de l'acide éthylène-diamine-tétracétique. La disparition des dernières traces d'élément libre à doser est décelée par le virage de l'indicateur spécifique. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la participation de magnésium, la méthode de dosage est pour la somme des ions de calcium et de magnésium.

#### Réactifs

- Solution titrée de l'EDTA N/50 ;
- Solution tampon a pH compris entre 10 et 11 ;
- Un indicateur noir d'ériochromeT.

#### Mode opératoire

Prendre 100ml d'eau à l'aide d'une pipette de 50ml et les transférés dans un erlenmeyer de 500 ml. La solution est chauffée à 60 °C, et on ajoute 5ml de la solution tampon et 30mg de l'indicateur. On titre alors avec la solution titrée de l'EDTA jusqu'au virage du rouge violacé au bleu.

### II.2.1.6 Détermination de l'alcalinité (TA-TAC)

#### Principe

L'alcalinité est la capacité quantitative des milieux aqueux à réagir avec les ions hydrogènes. À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bases et des sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement de la présence d'hydrogencarbonates, carbonates et hydroxydes. D'autres sels d'acides faibles peuvent aussi être dosés et interfèrent dans la mesure : acides humiques, phosphates, citrates, tartrates. La silice ionique peut aussi interférer notamment lorsque le pH est supérieur à 8,5.

#### Réactif

Acide sulfurique 0.2 N, avec une solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0.5 % et une solution de méthylorange 0.5 %.

#### Mode opératoire

Pour la détermination de TA : prélever 100 ml d'eau à analyse dans un erlenmeyer de 250ml, ensuite ajoute 1 à 2 gouttes phénophtaléine. Une coloration rose doit alors apparaitre, dans le contraire le TA est nul, ce qui se produit en général pour les eaux naturelles dont le  $\text{pH} < 8,3$ . Verser ensuite doucement à l'aide d'une burette, en agitant constamment et ceci jusqu'à décoloration complète de la solution soit (V) le nombre de millilitre d'acide versé

Pour la détermination de TAC : utiliser un prélèvement primitif s'il n'y a pas de coloration. Ajoute 2 gouttes de méthylorange et titrez de nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune au jaune orange ( $\text{pH}=4,3$ ). Soit (V') le nombre de millilitres d'acide versé depuis le début du dosage. Retrancher 0.5ml, quantité d'acide nécessaire pour le virage de l'indicateur, qui est un peu plus faible que le pH de neutralisation exacte de l'hydrogénocarbonate.

### II.2.1.7 Dosage du Sodium et du Potassium par photométrie de flamme

#### Principe

Les ions en solution sont portés, au moyen d'une flamme de température convenable à un niveau énergétique supérieur à la normal (on dit que les atomes sont excités par la flamme). Libérés de la flamme, ils restituent l'énergie acquise en émettant une radiation caractéristique de l'élément. On pulvérise donc au moyen d'un gicleur, la solution à doser dans une flamme de température déterminée par l'élément que l'on recherche. On sélectionne la radiation attendu au moyen d'un filtre. L'intensité de la radiation est proportionnelle à la concentration de l'élément présent dans la solution. On établit donc une gamme d'étalons pour chaque élément dosé et l'on s'y réfère pour déterminer une concentration inconnue.

Le sodium et le potassium sont dosés à partir de la même solution étalon à des sensibilités différentes du photomètre de flamme (Fig. II.3).

#### Réactifs

- Solution mère de Sodium et de Potassium ;
- Solutions étalons en  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  ;
- Solution mère de calcium ;
- Solutions étalons de calcium ;

#### Appareillage

- Photomètre à flamme ;
- Bouteille de gaz ;
- Compresseur d'air.



Figure II.3 Photomètre de flamme de type WTW

### II.2.1.8 Dosage des Chlorures

#### ✚ Principe

Les chlorures, en présence du thiocyanate mercurique  $[\text{Hg}(\text{SCN})_2]$  et de l'alun ferrique  $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{NH}_4)_2 24\text{H}_2\text{O}]$  donnent en milieu nitrique et acide un complexe coloré orange susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 nm.

#### ✚ Réactifs

- Solution saturée de thiocyanate mercurique ;
- Solution d'alun ferrique ;
- Solution mère de chlorures à 10 g/l ;
- Solutions étalons.

#### ✚ Mode opératoire

On place (5 ml) d'échantillon dans des fioles de 50 ml, les PE des solutions étalons, le témoin ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et les échantillons sont alors traités de manière identique à savoir, on ajoute dans l'ordre 5ml de la solution de thiocyanate mercurique préalablement diluée au 1/3 puis 3 ml de la solution nitrique d'alun ferrique également diluée au 1/6, on agite vigoureusement les fioles pour uniformiser la coloration qui apparaît et on laisse au repos pendant un demie heure. Enfin on effectue la lecture au colorimètre à la longueur d'onde de 470nm en réglant le zéro avec le témoin.

### II.2.1.9 Dosage des sulfates $\text{SO}_4^{2-}$

#### ✚ Principe

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu, très fin est stabilisé par la gélatine. On effectue sur le trouble une mesure turbidimétrique à la longueur d'onde de 495 nm.

#### ✚ Réactifs

- Solution de chlorure de baryum et de gélatine ;
- Solution mère de sulfate a 10g/l ;
- Solutions étalons.

#### ✚ Mode opératoire

On prend (5ml) d'échantillon dans des fioles de 50ml et les PE des solutions étalons, le témoin ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et les échantillons sont alors traités de manière identique à savoir on ajoute à chaque PE, 5 ml de la solution de  $\text{BaSO}_4$  et de la gélatine préalablement diluée 1/6. Compléter avec l'eau distillée Q.S.P. 50 ml, on agite pour uniformiser le trouble et on laisse au repos pendant 20 minutes jusqu'à la mesure. Une nouvelle agitation aurait comme conséquences la formation de bulles d'air et par conséquent une perturbation des mesures, on effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 495 nm en réglant le zéro avec le témoin.

### II.2.1.10 Dosage des carbonates et bicarbonates

#### ✚ Principe

Les carbonates n'existant qu'à  $\text{pH} > 8,3$  et les bicarbonates si le  $\text{pH}$  est compris entre 4,4 et 8,3. Au cours d'un dosage acidimétrique doublé d'une mesure de  $\text{pH}$ , à quel moment ces ions sont encore présents ou non dans l'échantillon.

#### ✚ Réactifs

- Solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en 0.01N
- $\text{pH}$ -mètre

#### ✚ Mode opératoire

On prendre 40 ml dans le bécher et on dose avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  jusqu'à le  $\text{pH} = 4.4$

### II.2.1.11 Détermination du Calcium et Magnésium

#### ✚ Principe

Le sel disodique de l'acide Ethylène Diamine Tétra Acétique cristallisé avec  $H_2O$ , appelé aussi complexons ou versante forme avec un nombre de cation des complexes dont la stabilité dépend essentiellement du pH.

#### Réactifs

- Solution EDTA ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ) : 40g de EDTA ; ajoutez 5 g Soude caustique (NaOH) et 1 g Chlorure de Magnésium ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) ensuite compléter à 1000ml d'eau distillée ;
- Solution d'hydroxyde d'ammonium ( $NH_4OH$ ) : 67 g de chlorure d'ammonium avec 448 ml d'Ammoniaque  $NH_3$  (25%) et de HCl concentré et compléter à 1000 ml d'eau distillée ;
- Solution d'hydroxyde de sodium : 80g de NaOH avec 1000 ml d'eau distillée
- Noir ériochromeT ;
- Solution mère de  $Ca^{2+}$  à 100 mg/l

#### Mode opératoire

On prend 10 ml échantillon et on ajoute 2 ml de NaOH, puis une ajoute de Meruxide, et on titre avec l'EDTA jusqu'au virage au violet, soit  $V_1$  de  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ . Pour le volume ( $V_2$  pour  $Mg^{2+}$ ) On prend PE de 10 ml et on ajoute 2 ml de solution tampon, puis un ajoute le Noir ériochromeT, et on titre avec l'EDTA jusqu'au virage au bleu.

### II.2.1.12 Détermination des nitrates $NO_3^-$

Les nitrates sont réduits en nitrites par une solution d'hydrazine en milieu alcalin et en présence du sulfate de cuivre comme catalyseur.

Les nitrites obtenus sont alors dosés par colorimétrie, diazotation avec l'acide sulfanilique et copulations avec l' $\alpha$  – Naphthylamine. On mesure la densité du colorant ainsi formé à 520 nm [29].

#### Réactifs

- ✓ Solution mère de nitrates à 1000 mg/l :

Dissoudre 1,631g de nitrates de potassium préalablement séchés au dessiccateur et compléter à 1000 ml par de l'eau distillée,

- ✓ Solutions étalons :

Prendre successivement : 0,5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 et 15 ml de la solution mère de nitrate et compléter chaque prélèvement à 100 ml par de l'eau distillée, On obtient alors des solutions

étalons contenant respectivement : 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 et 150 mg/l de nitrates (Fig. II.4) [29].



Figure II.4 Dosage des nitrates

- ✓ Solution de soude à 0,05 M ;
- ✓ Mélange réducteur à préparer au moment de l'emploi :
  - 5 ml de la solution de Sulfate de Cuivre ;
  - 5 ml de la solution d'hydrazine ;
  - Eau distillée Q.S.P 200 ml.
- ✓ Mélange colorant (conserver en flacon brun) :
  - 10 ml d'acétone,
  - 20 ml d'acide sulfanilique,
  - 20 ml d'E.D.T. A ;
  - 20 ml d'acétate de sodium,
  - 20 ml d' $\alpha$ -Naphthylamine,
  - Eau distillée Q.S.P 1000 ml,

Ajouter l' $\alpha$ -Naphthylamine en dernier et après une dilution pour éviter la formation d'un précipité blanc laiteux, et compléter avec l'eau distillée à 1000 ml.

#### Mode opératoire

De préférence, on effectue le dosage dans des flacons bruns et on réalise le mélange suivant en introduisant dans le flacon : 1 ml prise d'essai, 5 ml de solution de soude à 0,05 M, après l'agitation on ajoute, 5 ml de mélange réducteur, encore une fois on agite ce dernier mélange.

Après une heure, on ajoute 40 ml du mélange colorant, et on met à l'obscurité pendant 15 min, finalement on mesure la densité à 520 nm (Fig. II.5) [29].



Figure II.5 Conservation des flacons à l'obscurité.

#### ✚ Expression des résultats

La courbe donne directement les teneurs en azote nitriques des échantillons exprimés en mg/l.

#### II.2.1.13 Détermination des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )

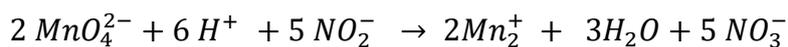
Par diazotation des nitrites avec l'acide sulfanilique à pH 2,5 puis par copulation du composé formé avec l' $\alpha$ -Naphthylamine, on obtient un colorant azoïque rouge stable au moins 12 heures dont on mesure l'intensité à 520 nm [29].

#### ✚ Réactifs

- Solution d'acide sulfanilique ;
- Solution d' $\alpha$ -Naphthylamine ;
- Solution tampon d'acétate de sodium ;
- Solution d'E, D.T.A à 5 g/l ;
- Solution mère étalon des nitrites à 100 mg/l :
  - Eau distillée Q.S.P 1000 ml ;
  - 150 mg de nitrite de sodium ; On les conserve en y ajoutant 1ml/l de chloroforme.

#### ✚ Titrage de la solution mère de nitrite

Le nitrite est oxydé au moyen d'un excès de permanganate, L'excès d'oxydant est ensuite dosé par iodométrie [29].



Tout d'abord on fait le mélange suivant dans un bécher : 10 ml de permanganate de potassium à 0,01N, avec 2 ml d'acide sulfurique dilué au 1/2, et 20 ml de solution de nitrite. Après l'agitation on ajoute 5 ml d'iodure de potassium à 10%. La concentration de la solution mère de nitrite exprimé en mg/l, est donnée par :

$$[\text{NO}_2^-] \text{ en mg /l} = \frac{(\text{T}_{\text{thiosulfate de sodium}} \times (V_0 - V) \times 23000}{\text{PE}}$$

Avec :

$V_0$  : le volume trouvé pour un témoin effectué avec de l'eau distillé (ml).

$V$  : le volume de thiosulfate de sodium nécessaire pour l'échantillon (ml).

$T$  : titre de thiosulfate de sodium (mol/l).

PE : prise d'essai (ml)

A partir de cette solution de nitrites, on prépare une solution fille à 1mg/l de  $\text{NO}_2^-$

➤ Solutions étalons :

Prendre successivement : 1, 2, 4, 6, 8, 10 ml de la solution à 1 mg/l de  $\text{NO}_2^-$  et compléter par l'eau distillée à 50 ml. On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 0,02;0,04; 0,08; 0,12; 0,16 et 0,20 mg/l de  $\text{NO}_2^-$  (Fig. II.6).



Figure II.6 Les solutions étalons des nitrites

### ✚ Mode opératoire

On réalise le mélange en introduisant 50ml de prise d'essai, avec 1ml de solution d'E.D.T.A et 1 ml d'acide sulfanilique, ensuite on agite et on attend 10 minutes, puis on ajoute 1ml d'  $\alpha$  -Naphtylamine, 1ml de la solution de tampon acétate. Encore une fois on agite et on attend 30 minutes, enfin on effectue la mesure colorimétrique à 520 nm [29].

### Expression des résultats

Après le traçage de la courbe d'étalonnage on lit directement les teneurs en azote nitreux des échantillons exprimé en mg/l.

#### II.2.1.14 Dosage de l'ammonium

L'ammonium, en milieu alcalin et en présence d'hypochlorite de sodium donne avec le phénol une coloration bleue d'indophénol susceptible d'un dosage colorimétrique. On utilise du nitroprussiate de sodium comme catalyseur [29].

### Réactifs

- Solution mère d'ammonium 1 g/l ( $NH_4^+$ ):

Peser 2,972g de chlorure d'ammonium  $NH_4Cl$  préalablement séché et refroidi au dessiccateur. Dissoudre cette quantité dans de l'eau distillée et compléter à 1000 ml.

- Solution d'ammonium 10 mg/l ( $NH_4^+$ ).

Prendre 2 ml de la solution mère à 1g/l et compléter à 200 ml par de l'eau distillée.

- Solution d'hypochlorite de sodium à 2° chlorométrique
- Solution étalon :

Prendre successivement : 0,25; 0,5 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 ; 7 et 10ml de la solution à 10mg/l et compléter à 50 ml par de l'eau distillée, On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 0,05 ; 0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2mg/l de ( $NH_4^+$ ) [29].

- Mélange des réactifs :

On mélange les 3 premiers réactifs dans les proportions suivantes :

- 200 ml de la solution tampon et complexante ;
- 25 ml de la solution de phénate de sodium ;
- 10 ml de la solution de nitroprussiate de sodium ;

### Mode opératoire

La mesure colorimétrique s'effectue en opérant le mélange suivant : 20 ml PE, 2 ml du réactif mélangé, 0,5 ml d'hypochlorite à 2 °Cl.

La coloration bleue se développe à partir du moment où on les laisse les flacons à l'obscurité pendant une heure et demie, La coloration reste stable plusieurs heures. Ensuite on effectue la mesure colorimétrique à 625 nm (Fig II.7) [29].



Figure II.7 Dosage de l'ammonium

#### ✚ Expression des résultats

La courbe donne directement la teneur en azote ammoniacal des échantillons exprimés en mg/l.

#### II.2.1.15 Dosage de l'orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

En milieu acide et en présence du molybdate d'ammonium  $\text{MO}_7(\text{NH}_4)_4\text{H}_2\text{O}$ , les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui est réduit par l'acide ascorbique, et développe une coloration bleue pouvant être dosée colorimétriquement à une longueur d'onde de 710 ou 800 nm [29].

#### ✚ Réactifs

- Solution d'acide ascorbique à 10 g/l.
- Solution de molybdate d'ammonium.
- Solution mère de l'ortho-phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) à 1g/l :

Dissoudre 143,2 mg de phosphate Dihydrogénophosphate de potassium ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) (desséché au préalable à l'étuve à 100°C) dans 1000 ml d'eau distillée.

- Solution de ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) à 10 mg/l :

Placer dans une fiole jaugée de 200 ml, 2 ml de la solution mère et compléter ensuite par de l'eau distillée jusqu'à atteindre le trait de jauge.

- Solutions étalons :

Prendre successivement les volumes de : 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 ; 15 et 20 ml de la solution à 10 mg/l, puis compléter à 50 ml avec de l'eau distillée, On obtient donc des solutions étalons contenant respectivement les concentrations suivantes : 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 et 4 mg/l.

### ✚ Mode opératoire

Dans des tubes à essai on introduit 20 ml prise d'essai, puis on ajoute 5 ml des réactifs mélangés (3 volumes de la solution molybdique, 1 volume de la solution de l'acide ascorbique) (Fig. II.8).



Figure II.8 Dosage des phosphates

On les met à l'étuve durant 20 minutes à 80 °C et on les laisse refroidir puis on mesure l'absorption à une longueur d'onde de 825 nm (Fig. II.9) [29].



Figure II.9:UV-Visible pour mesurer la densité optique des éléments,

#### Expression des résultats :

La courbe donne directement la teneur en ortho-phosphate des échantillons exprimée en mg/l.

### II.3 Conclusion

Dans cette partie les différentes méthodes et matériels utilisés pour la réalisation de cette étude ont été exposé en détails. L'interprétation des résultats obtenus sont donnés dans le chapitre qui suit.

## Chapitre III . Résultats et Discussions

### III.1 Introduction

Dans la région d'Adrar, les eaux souterraines constituent un apport très important d'eau de boisson et d'irrigation. Ces dernières années, cette région a connu une très grande évolution agricole. Cependant, l'un des principaux facteurs limitant du développement économique est la disponibilité de l'eau potable. Il est donc impératif dans cette région de suivre la qualité physico-chimique des eaux de différents points d'eaux et de comparer cette qualité aux normes algérienne et OMS de potabilité de l'eau de boisson et de son utilisation pour l'irrigation.

La connaissance de l'évolution du chimisme des eaux de la région ainsi que la détermination du faciès chimique, et l'appréciation de la potabilité des eaux et leurs aptitudes à l'irrigation sera donné dans cette partie.

### III.2 Résultats et discussions

Dans cette étude nous avons exploité les données de trois campagnes (données collectées de l'ANRH Adrar), la première campagne a été effectuée durant l'année 2010 sur un nombre de 258 échantillons des forages et puits d'alimentation en eau potable (AEP) et d'irrigation, la deuxième a été effectuée en 2018 sur un réseau piézométrique de 14 échantillons, et la troisième a été réalisée sur 12 échantillons au cours de l'année 2020, afin de donner une bonne répartition dans l'espace et dans le temps et pour mieux caractériser l'aquifère du continental intercalaire. Les points échantillonnés sont représentés sur la carte suivante (Fig.III.1).

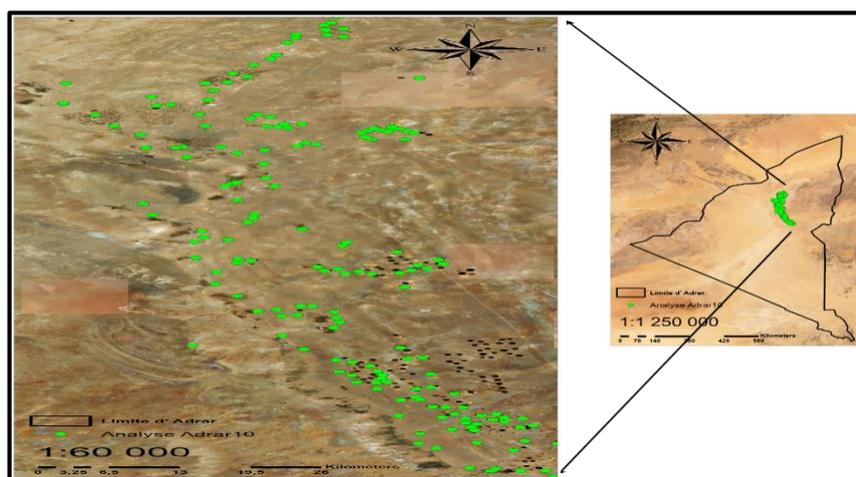


Figure III.1 Points d'eau échantillonnées

### III.2.1 Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il est fonction de l'activité des ions hydrogènes  $H^+$  présents dans cette eau. Dans les eaux naturelles cette activité est due à des causes diverses en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels. Selon la réglementation locale, les valeurs du pH des eaux souterraines doivent être situées entre 6,5 et 9 [30].

Les données des analyses dans cette région ont montré que le pH varie entre 6,43 et 9,22 avec un caractère plus ou moins alcalin. Ces résultats sont conformes aux normes algériennes et celle de l'OMS.

### III.2.2 La Conductivité (EC)

La conductivité électrique de l'eau est une mesure de la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. La conductivité électrique de l'eau est une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ) qui sont formées par la dissolution des sels minéraux dans l'eau. La conductivité donne une idée sur la minéralisation de l'eau est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau. La valeur maximale recommandée pour la conductivité électrique par l'OMS est de 2800  $\mu S/cm$  [31].

L'analyse des données de la conductivité montre que les eaux de la région d'Adrar ont une conductivité qui varie entre 700 et 8030  $\mu S/cm$ . Dans certaines régions les conductivités sont très élevées et dépassent parfois largement les normes de potabilité, elles sont supérieures à 2800  $\mu S/cm$  et qu'elles atteignent les 8030  $\mu S/cm$ .

### III.2.3 Résidu Sec

Le résidu sec ou TDS représente la composition totale en minéraux, sels dissous, et de la matière organique, contenus dans l'eau. Ses valeurs peuvent être mesurées à partir de la conductivité soit par dessiccation à 110 – 180 °C pendant 24 h. Pour des raisons de saveur, l'OMS recommande une valeur limite de 1000 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine [31]. Le Ministère des ressources en eau prescrit une valeur de 1500 mg/l [30]. Dans les pays à climat semi-aride et aride cette valeur est largement dépassée.

Les résultats des analyses effectuées dans cette région ont montré que le TDS des eaux analysées oscille entre 400 et 5200 mg/l. Les analyses des eaux la compagnie piézométrique de l'année 2018 montre que le résidu sec oscille entre 505 mg/l et 2460 mg/l. L'actualisation de la

compagne piézométrique en 2020 montre qu'il n'existe aucune évolution du RS dans les piézomètres.

### III.2.4 Dureté totale

La dureté totale d'une eau est un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés, elle correspond à sa composition en calcium et en magnésium. Elle se divise en dureté temporaire est liée directement à son alcalinité carbonatée et la dureté permanente est prédominée par la présence des sulfates et des chlorures de calcium et de magnésium. Elle s'exprime soit en meq/l soit en mg/l de  $\text{CaCO}_3$  soit en °F.

La dureté des eaux de la région d'Adrar se situe entre 4 et 236°F, avec une valeur moyenne de 53,15 °F, ces teneurs traduisent des eaux très dures qui sont supérieures à 30°F. On constate également que 82 % des eaux sont dures avec une valeur supérieure à 30 °F.

Pour les eaux de consommation, les normes algériennes indiquent comme bonne qualité une eau dont la dureté inférieure à 20 °F [30].

### III.2.5 Les éléments majeurs

#### III.2.5.1 Le calcium $\text{Ca}^{2+}$

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau indique, soit une dissolution des formations carbonatées, calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomie [ $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ ] ou bien la dissolution des formations évaporitiques, gypse [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ] et anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). La teneur des eaux de la région en ions calcium varie entre (9 – 536) mg/l avec une valeur moyenne de 107,069 mg/l, avec 92 % des échantillons ont des teneurs inférieures à 200 mg/l. les analyses des piézomètres en 2018 et 2020 ont donné une teneur en Calcium qui varie entre 40 mg/l et 168 mg/l, avec une évolution négligeable.

#### III.2.5.2 Le Magnésium $\text{Mg}^{2+}$

Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les formations évaporitiques (sel de  $\text{Mg}$ ), la carnallite ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), la kiesérite ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), et carbonatés, la dolomie [ $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ ], les valeurs de magnésium dans la région varient de 3 à 255 mg/l, avec une moyenne de 67,65 mg/l. Ces résultats montrent également que 96 % sont conformes à la norme de potabilité (150 mg/l) d'après l'OMS. Les deux compagnes des analyses des piézomètres ont montré que les valeurs du magnésium sont entre 22,5 et 117,5 mg/l.

### III.2.5.3 Le Sodium $Na^+$

L'origine de l'élément sodium est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles telle que l'halite ( $NaCl$ ), les teneurs des eaux de la région sont comprises entre 22 et 790 mg/l avec une moyenne de 262,840. Ces données indiquent que les eaux de ces régions sont contenues dans des formations salifères qui dépassent parfois largement la valeur 200 mg/l (62 %), les valeurs les plus élevées supérieures à 400 mg/l sont localisées dans la région de Reggane, Bouda et Fenoughil alors que les valeurs inférieures à 200 mg/l sont localisées dans la commune d'Adrar. La campagne piézométrique effectuée en 2018 montre que la teneur en sodium dans les piézomètres est entre 98.6 et 490 mg/l, quant à l'évolution n'a pas observée.

### III.2.5.4 Le Potassium $K^+$

L'élément potassium peut être observé dans les eaux issues des formations argileuses et des eaux issues des formations évaporitiques riches en sylvite ( $KCl$ ), et carnallite ( $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$ ), les valeurs enregistrées dans les eaux de la région sont entre 8 et 165 mg/l, avec une valeur moyenne de 24,078 mg/l.

### III.2.5.5 Les Chlorures $Cl^-$

La présence des chlorures dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des sels naturels comme la sylvite ( $KCl$ ) et de l'halite ( $NaCl$ ). Les teneurs en chlorures sont très élevées dans notre région et dépassent les 1200mg/l, les fortes teneurs sont localisées dans les régions de Fenoughil, Reggane et Bouda. Cette teneur varie entre 46 mg/l et 1200 mg/l avec une valeur moyenne de 390,451 mg/l. On ce qui concerne les mesures piézométriques de 2018 et 2020 ont montré que les valeurs sont entre 110 mg/l et 750 mg/l.

### III.2.5.6 Les Sulfates $SO_4^{2-}$

La présence des sulfates est généralement due au lessivage des formations évaporitiques, telle que le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ ) et l'anhydrite ( $CaSO_4$ ), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite ( $FeS_2$ ). Les teneurs des sulfates dans les eaux de la région d'Adrar varient de 10 mg/l à plus de 2100 mg/l, les teneurs les plus élevées sont observées dans la région de Reggane, Fenoughil et Bouda. Les dernières analyses de 2018 et 2020 ont données des teneurs qui oscillent entre 140 mg/l et 800 mg/l.

### III.2.5.7 Les Carbonates et les bicarbonates $CO_3^{2-}$ et $HCO_3^-$

Les ions bicarbonates et les carbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous-sol. Les teneurs en bicarbonates dans les eaux de la zone d'étude varient de 9 à 262 mg/l, avec 80 % des teneurs sont entre 100 et 200 mg/l, les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la région de Timi. Les piézomètres donnent des valeurs entre 61 mg/l et 158,6 mg/l.

### III.2.6 Les éléments mineurs

Les composés azotés nitrates, nitrites et azote ammoniacal, sont du généralement à une pollution anthropique, l'origine artificielle de ces pollutions sont les contaminations par des engrais et les rejets domestiques.

#### III.2.6.1 Les nitrates $NO_3^-$

La concentration des nitrates dans les eaux de la région sont parfois très élevées, ils dépassent les 50 mg/l dans presque 40 % des eaux analysées, et peut atteindre des valeurs de 214 mg/l dans certains points. Les valeurs enregistrées au niveau des piézomètres sont relativement entre 0,17 mg/l et 83,65 mg/l (Fig. III.2).

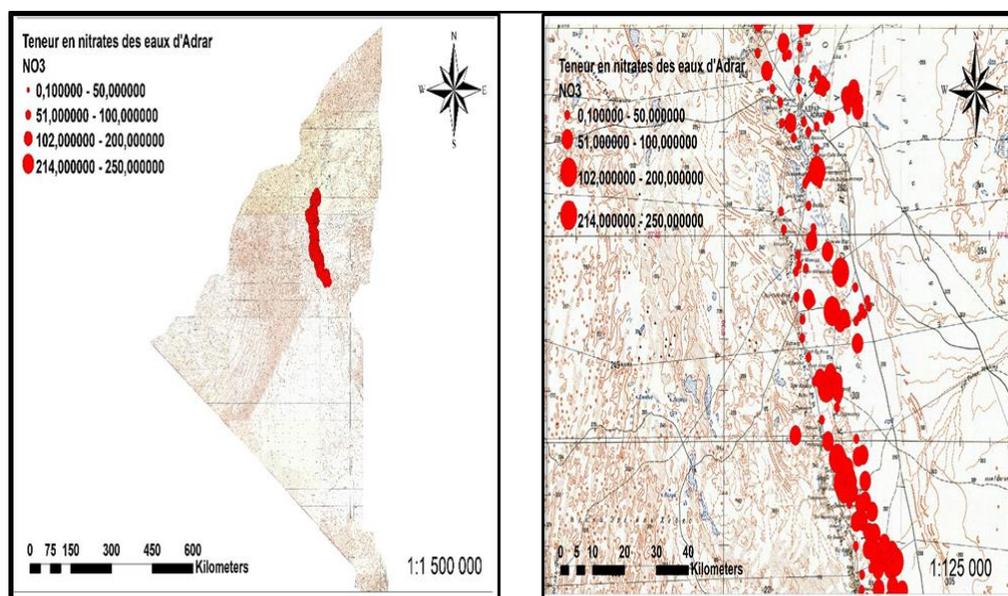


Figure III.2. Teneurs en nitrates dans les eaux d'Adrar

#### III.2.6.2 Les nitrites $NO_2^-$

Les nitrites sont la forme la plus instable dans les composés azotés, ils varient de quelques traces à 0,45 mg/l.

### III.2.6.3 L'azote ammoniacale $NH_4^+$

Les teneurs de l'ammonium sont de l'ordre de quelques traces à 0,35 mg/l et sont au-dessous de la norme (0,5 mg/l) dans la totalité des eaux.

### III.2.6.4 Les phosphates $PO_4^{3+}$

Les phosphates dans les eaux de la région sont entre quelques traces et 0,35 mg/l, ces résultats mettent en évidence que les valeurs les plus élevées rencontrées dans les puits et forages d'irrigations cela signifie que ces contaminations sont d'origine agricole.

## III.2.7 Le faciès géochimique

### III.2.7.1 Diagramme de Piper

Le report des eaux sur le diagramme de Piper nous permet de caractériser les différentes familles des faciès chimiques. On peut déduire de ces résultats que le faciès le plus dominant est chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une tendance à chloruré sodique et potassique (Fig. III.3).

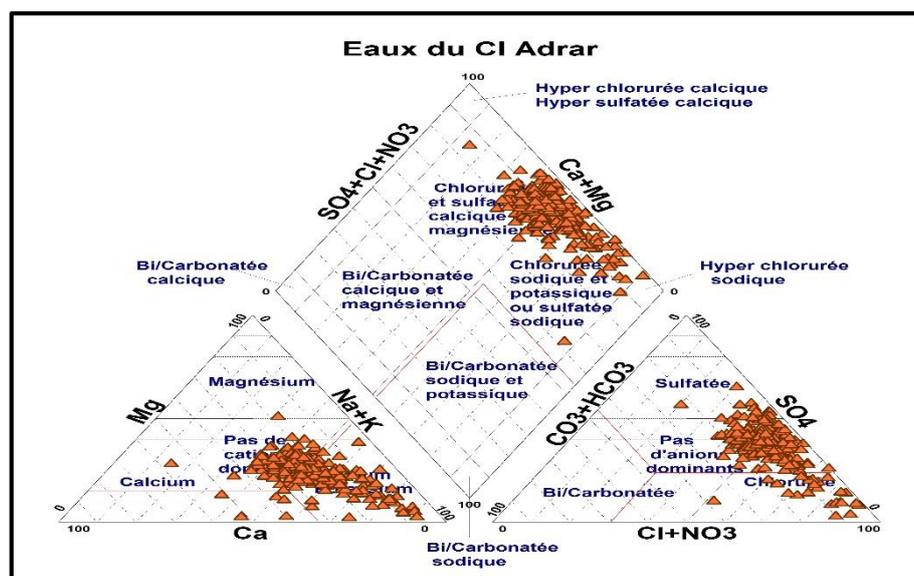


Figure III.3 Diagramme de Piper des eaux de la région

### III.2.7.2 Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF

Le diagramme de Schöeller Berkaloff permet de représenter les faciès chimiques des eaux à travers la représentation des différents éléments sur un seul graphe. Il nous donne aussi la classification de la qualité de l'eau. A partir de cette figure (Fig.III.4) on constate une prédominance du faciès chloruré sodique et la qualité passable à mauvaise de ces eaux.

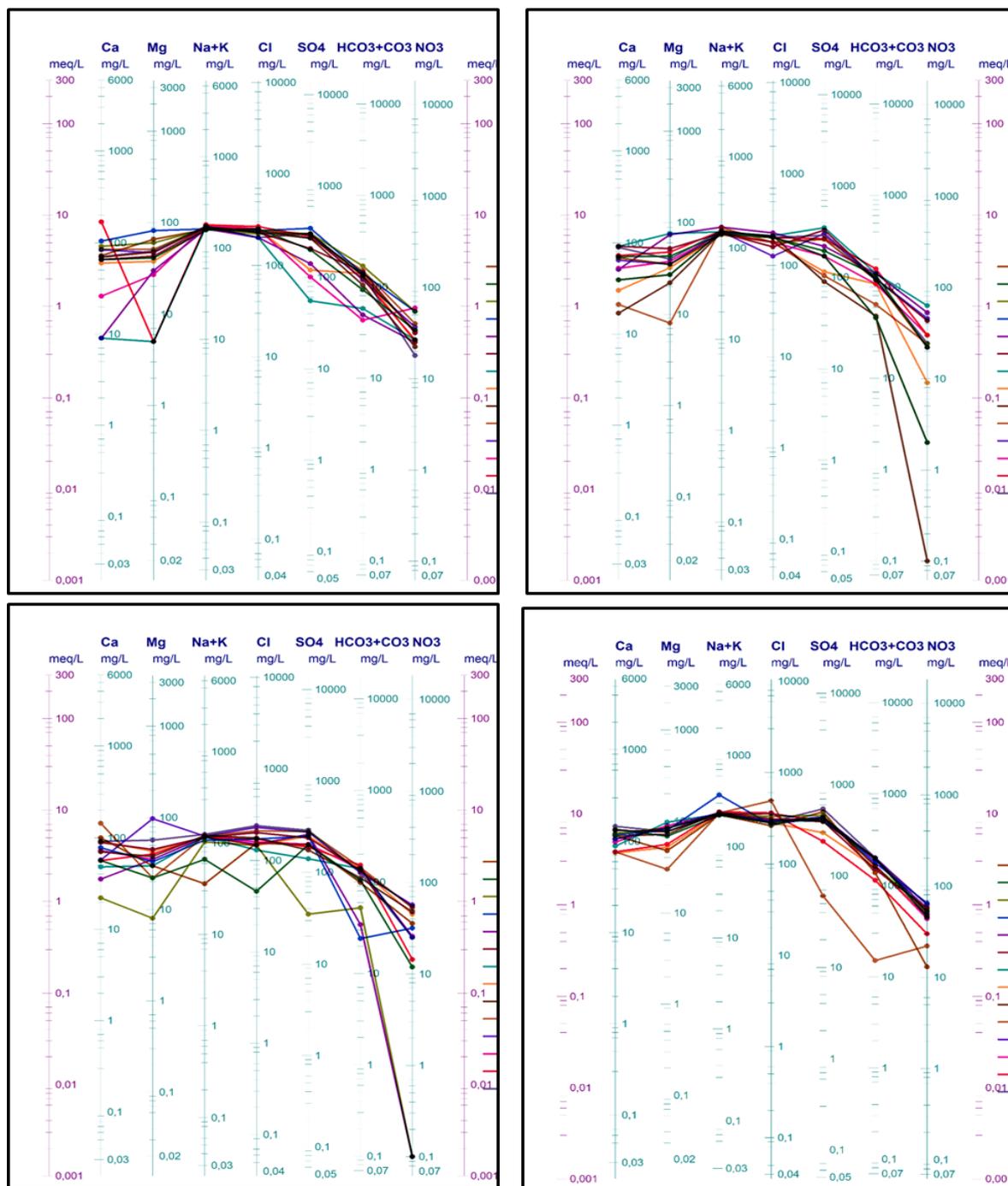


Figure III.4 Diagramme de Schoeller des eaux d'Adrar

### III.2.8 Relation chimiques des éléments

#### III.2.8.1 Sodium-Chlorure (Na-Cl)

La relation qui se présente par la (Fig.III.5), montre la bonne corrélation entre le Sodium et le chlorure (NaCl) avec un coefficient de la régression linéaire de 0,93, ce qui indique une origine commune, probablement l'halite (NaCl), et qui confirme la domination du faciès chloruré sodique.

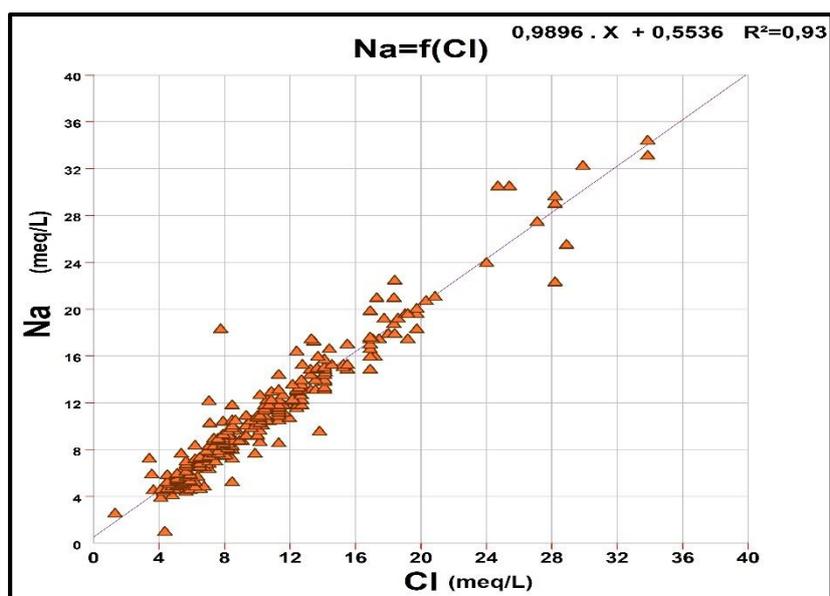
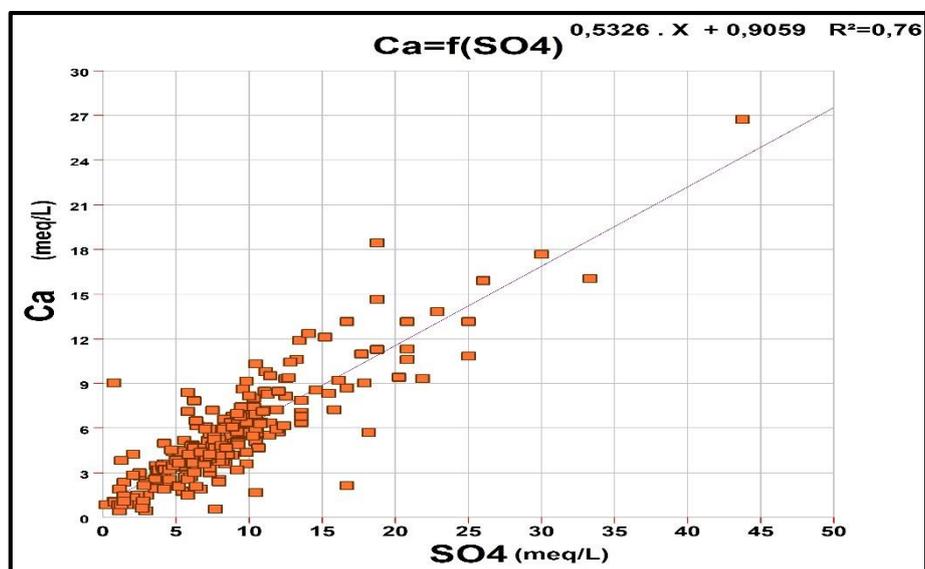


Figure III.5. Corrélation NaCl

### III.2.8.2 Sulfate-Calcium (SO<sub>4</sub>-Ca)

Les sulfates ont une bonne proportionnalité avec le calcium ce qui traduit des origines communes, soit du gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) soit de l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), avec un coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0,76 (Fig.III.6).

Figure III.6 Courbe de corrélation du CaSO<sub>4</sub>

### III.2.8.3 Sodium-Calcium (Na-Ca)

La faible relation qui existe entre le sodium et le calcium (Fig.III.7) avec un facteur de corrélation de 0,41, montre l'existence d'une autre source pour le sodium par un échange de base des formations argileuses de la région d'où l'existence d'un excès de sodium.

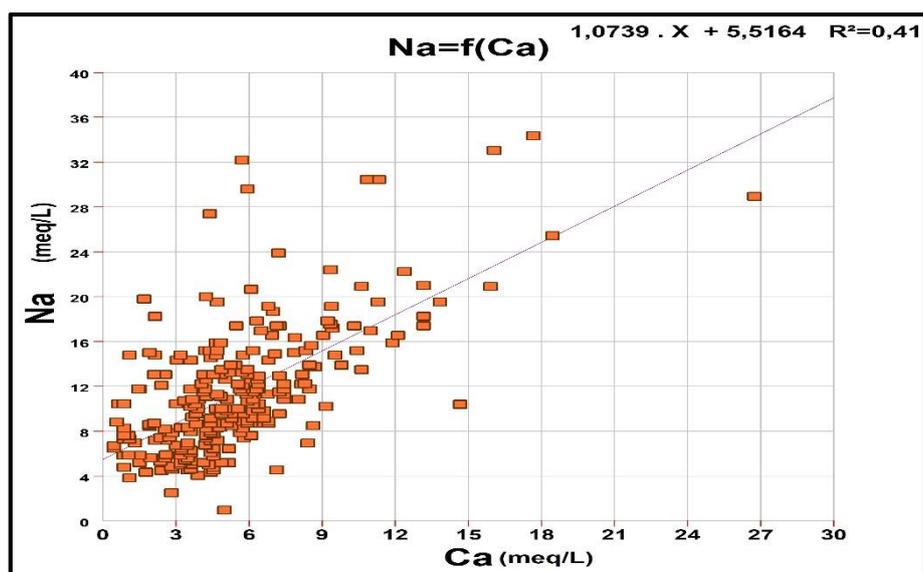
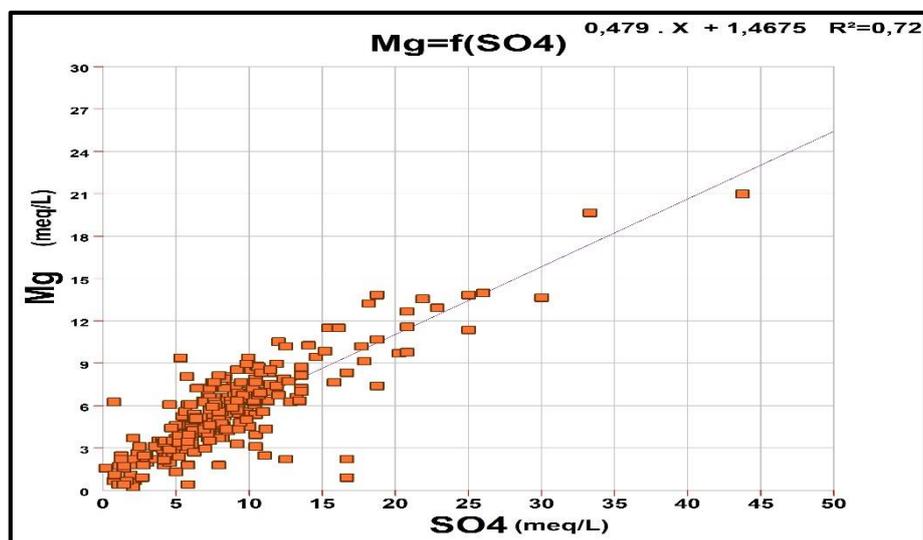


Figure III.7 Courbe de corrélation Na-Ca

#### III.2.8.4 Sulfate- Magnésium (SO<sub>4</sub>-Mg)

La relation entre le magnésium et les sulfates est donnée par la figure (Fig.III.8). Cette figure indique que la relation sulfate magnésium est bien liée avec une évolution proportionnelle, donc l'origine et probablement du sel de magnésium la kiesérite (MgSO<sub>4</sub>). Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0,72.

Figure III.8 Courbe de corrélation MgSO<sub>4</sub>

#### III.2.9 Utilisation de l'analyse en Composantes Principales (ACP)

Le but de cette analyse est de montrer les différents points qui ont les mêmes caractéristiques et de voir l'évolution des concentrations en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des points d'observation.

### III.2.9.1 Valeurs propres

La matrice des données comporte neuf (08) variables et 256 individus, qui expriment 100 % des renseignements (Tableau III.1).

Tableau III-1 Représentation des valeurs propres de la matrice

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	4,726	1,194	0,818	0,473	0,437	0,233	0,106	0,012
Variabilité (%)	59,073	14,923	10,221	5,916	5,468	2,916	1,328	0,155
% cumulé	59,073	73,996	84,217	90,133	95,601	98,517	99,845	100,000

### III.2.9.2 Matrice de corrélation

Notre interprétation sera limitée au cercle formé par les deux axes F1 et F2 seulement car il peut fournir le maximum d'information (74 %) ce qui rend l'analyse plus fiable (Tableau III.2).

Tableau III-2 Matrice de corrélation

Variabiles	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	HCO3
Ca	<b>1</b>							
Mg	0,765	<b>1</b>						
Na	0,640	0,627	<b>1</b>					
K	0,438	0,403	0,591	<b>1</b>				
Cl	0,674	0,633	0,963	0,574	<b>1</b>			
SO4	0,868	0,849	0,738	0,524	0,687	<b>1</b>		
NO3	0,524	0,553	0,381	0,096	0,377	0,445	<b>1</b>	
HCO3	0,346	0,384	0,123	0,079	0,115	0,261	0,200	<b>1</b>

À partir de la matrice de corrélation on peut dire que l'axe vertical F1 qui exprime 59,07% des informations expose les eaux fortement minéralisées riche en Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na, K, HCO<sub>3</sub> et NO<sub>3</sub>.

L'axe horizontal F2 qui exprime 14,92 % des informations qui oppose les eaux chlorurées sodiques et potassiques aux eaux contenant les autres éléments minéraux (Fig. III.9).

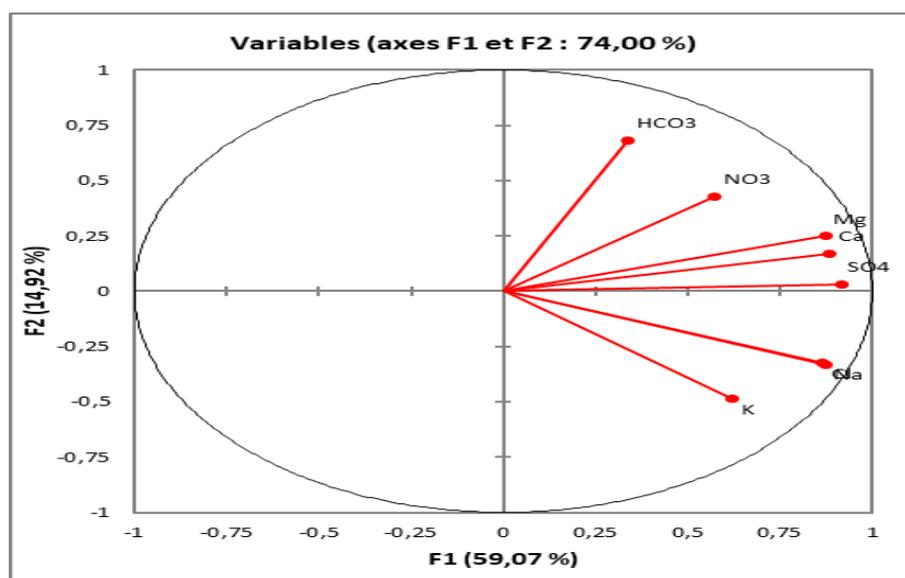


Figure III.9 Représentation graphique en ACP des eaux d'Adrar

### III.2.10 Effet de la salinité des eaux sur l'irrigation

Pour mettre en évidence tout danger que peut présenter certains éléments chimiques de l'eau d'irrigation sur les sols agricoles et les plantes. La classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau (méthode de Richards) permet de bien classer les eaux en fonction de leurs conductivités électriques à 25 °C et le SAR (Sodium Adsorption Ratio) dans l'eau, défini par la formule ci-dessous (Fig.III.10).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

Le report des eaux étudiées sur ces diagrammes montre que :

La classe **C3S1** : est dominante dans les zones d'Adrar, Oued ghozala, et Aougrouit se sont les eaux dont la conductivité est inférieure à 2250  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Les eaux étudiées sont de la 3<sup>ème</sup> classe. Ces eaux présentent un risque de salinité appréciable et faible risque d'alcalinité ; donc ce sont des eaux à utiliser pour l'irrigation en prévoyant des doses de lessivage et nécessite un drainage pour empêcher le dépôt des sels et en conséquent la salinité des sols (formation de sebkhas).

La classe C3S2 : cette classe présente les eaux dont la conductivité inférieure à 2250  $\mu\text{s}/\text{cm}$  toujours, ces eaux sont de la 4<sup>ème</sup> classe, ce sont des eaux qui présentent un fort danger de salinité et un risque moyen d'alcalinité. L'utilisation de cette classe d'eau pour l'irrigation nécessite des plantes tolérantes et des doses de lessivage sur des sols légers et bien drainés.

La classe C4S2 : cette classe est dominante aussi, ces eaux sont de la 5<sup>ème</sup> classe, ce sont des eaux qui présentent un fort danger de salinité et une alcalinité moyenne, c'est une classe de mauvaise qualité d'eau à utiliser avec beaucoup de précautions et bien drainés et prévoir des plantes tolérantes à la salinité, le lessivage est très important.

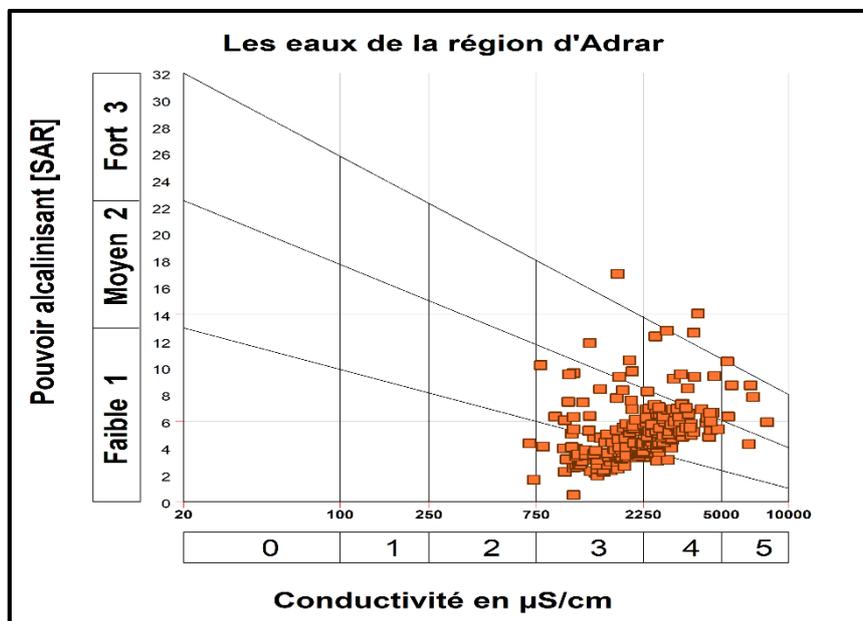


Figure III.10 Diagramme de Richards des eaux de la région d'Adrar

### III.3 Conclusion

La région d'Adrar possède un gisement considérable en eau souterraines, mais malheureusement ne sont pas toujours potables, elles sont salées et considérées comme des eaux de mauvaise qualité.

Les eaux souterraines représentent les principales ressources et l'unique source en eau potable. A travers ces résultats on constate que la qualité des eaux dans ces zones est variable en fonction des zones et en fonction des activités. Mais la plupart des eaux analysées présentent des anomalies de la dégradation de la qualité, plus particulièrement par les sels dissous ou par les nitrates.

### Conclusion générale

Plusieurs études ont été effectuées sur l'évaluation de la qualité des eaux de la nappe du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar, dont la principale est celle des états des lieux du projet contrat de nappe dans le cadre du projet coopération SPW DGARNE (Belgique) et l'AGIRE, ces travaux ont révélé une salinisation des eaux souterraines dans cette région.

Malgré, ces travaux l'origine de ce problème reste encore mal identifiée. Dans le but de donner une explication aux phénomènes qui sont à l'origine de la minéralisation excessive dans cette région et d'établir une cartographie de la qualité des eaux dans cette zone, cette étude a été effectuée au niveau du laboratoire de l'ANRH Adrar.

Les résultats obtenus mettent en évidence que la zone d'Adrar est située dans la partie Sud-Ouest de l'Algérie, elle représente la limite occidentale du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS).

Ces résultats montrent aussi que les eaux souterraines constituent les principales ressources en eau potable, et la seule nappe exploitée dans cette est la nappe du Continental Intercalaire.

On constate aussi que les eaux du CI sont caractérisées par un pH alcalin, est la majorité des eaux analysées sont conformes avec les normes de potabilités. Elles sont également caractérisées par des conductivités élevées et qui atteint par fois 2800  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

On peut déduire aussi de ces résultats que les TDS des eaux analysées sont relativement élevées et peut atteindre 5200 mg/l, ce qui traduit une salinisation des eaux et des soles notamment dans les zones agricoles.

Les données disponibles des analyses des eaux de trois campagnes utilisées dans cette étude montrent qu'il n'existe aucune évolution de la minéralisation des eaux durant la période 2011-2020.

On peut déduire de ces résultats que le faciès le plus dominant est chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une tendance a chloruré sodique et potassique, ceci a été confirmé par l'étude des relations des éléments chimiques.

On remarque aussi que le sens d'accroissement de la minéralisation se fait toujours du Nord- Est vers le Sud - Ouest, ce qui correspond au sens d'écoulement de la nappe. Les points les plus chargés sont constatés dans la partie avale de la nappe, elle proviendrait probablement du lessivage du terrain traversé et du recyclage des eaux d'irrigation.

## Conclusion Générale

---

On peut conclure aussi que ces eaux dépassant 2000 mg/l sont de mauvaise qualité physico-chimique pour la consommation humaine. Il est à signaler que ces eaux nécessitent un traitement adéquat si on veut l'utiliser pour la consommation humaine.

Ces résultats montrent également qu'on peut utiliser les eaux des classes C3S1 et C3S2 pour l'irrigation avec précaution en prévoyant des doses de lessivage et nécessite un drainage pour empêcher le dépôt des sels et en conséquent la salinité des sols (formation de sebkhas).

En fin, il nous est très difficile d'aboutir à des conclusions bien précises sur les sources de contamination des eaux par la salinité à cause de l'indisponibilité des informations annuelles sur l'évolution des teneurs en éléments chimiques. Donc une étude détaillée avec un suivi périodique durant une longue période apparait très utile pour aboutir à des résultats fiables.

Ce travail peut constituer un support pour les études au futur et considéré comme un guide pour ceux qui travaillent dans le domaine de l'eau.

Prenant en compte de ces résultats qui font état d'une situation préoccupante, il apparait urgent, de prendre les mesures préventives tel que le contrôle rigoureux de toutes sources de pollution possible. Et d'assurer une gestion rationnelle des nappes en évitant une surexploitation qui peut engendrer la dégradation de la qualité de l'eau et du sol. Ainsi qu'il est nécessaire de limiter l'emploi des engrais aux abords des champs captant. En fin il convient de réfléchir dès maintenant à des procédés permettant d'obtenir d'autres sources à partir des eaux usées épurées dans des conditions admissibles techniquement et économiquement et écologiquement, selon les lois en vigueur.

### Références Bibliographiques

- [1] B. Remini, « La problématique de l'eau en Algérie du nord », *LARHYSS J. P-ISSN 1112-3680E-ISSN 2602-7828*, n° 8, 2010.
- [2] AGIRE, « Contrat de Nappe rapport etat des lieux et bilan de diagnostic Gouvernance et Gestion Intégrée des Ressources en Eau en Algérie », AGIRE, Adrar, Rapport Interne, 2018.
- [3] H. Cherifi, « Inventaire des orthoptères dans deux milieux », Memoire de Master, Université Ahmed Draïa-Adrar, Adrar, 2019.
- [4] A. Benelarbi et M. Bahazaz, « Impact des eaux d'irrigation sur la culture du palmier dattier dans la région d'Adrar », Memoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem, Algerie, 2017.
- [5] O. Banaceur, « Etude hydrogéologique et hydrochimique de foggara dans la région Touat (Adrar) », Memoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algerie, 2016.
- [6] B. Baallaoui et M. Mehdi, « L'importance et l'utilisation de la géologie dans l'exploitation des carrières (cas du gisement de koussan wilaya d'Adrar) », Memoire de Master, Universite Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algerie, 2017.
- [7] D. E. Moussaoui, « Contribution à l'étude morphométrique de *Leucaena leucocephala* (Lam.) dans la région d'Adrar », Memoire de Magister, Tlemcen, 2016.
- [8] A. Othmani et Z. Yahyaoui, « Evaluation de l'impact du parc éolien sur l'environnement dans la région d'Adrar », Memoire de Master, Université Ahmed Draia - ADRAR, Adrar, 2019.
- [9] O. du S. et S. OSS, « Bassin Occidental ; Hydrogéologie et Modèle conceptuel », Observatoire du Sahel et Sahara, Tunisie, Etude et rapport projet SASS, 2005.
- [10] M. Benhamza, « Aperçu hydrogéologique et hydrochimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines «foggara» dans la région d'Adrar », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algerie, 2013.
- [11] B. Nasri, « Étude Expérimentale et Optimisation d'un Système de Dessalement Solaire En Milieu Saharien », These de doctorat, Université Ahmed Draïa-Adrar, Adrar, 2019.
- [12] S. Ouali, « Étude géothermique du sud de l'Algérie », Memoire de Magister, Université de Boumerdes, Algerie, 2005.
- [13] OSS, « Système Aquifère Du Sahara Septentrional (Algérie, Tunisie, Lybie): Gestion Commune d'un Bassin Transfrontalier », Observatoire du Sahel et Sahara, Tunisie, Synthèse du SASS I, 2008.

## Références Bibliographiques

---

- [14] Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, « Étude hydrologique et hydrochimique de la région d'Adrar », Agence Nationale des ressources Hydrauliques, ANRH Adrar, Rapport Interne, 2011.
- [15] A. Laaboudi, B. Nasri, T. Ansari, et M. Benhamza, « L'énergie renouvelable une alternative pour la préservation des foggaras », *Algerian J. Environ. Sci. Technol.*, 2019.
- [16] M. Ouled Baba Sy, « Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional », Thèse doctorat, Thèse de Doctorat en Géologie. Université de Tunis el Manar. 271p, Tunisie, 2005.
- [17] W. D. Williams, « Anthropogenic salinisation of inland waters », *Saline Lakes*, n° 466, p. 329–337, 2001.
- [18] A. Vengosh, « Salinization and saline environments », *Treatise Geochem.*, vol. 9, p. 333-365, 2003, doi: DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/09051-4.
- [19] M. J. Martínez-Sánchez, C. Pérez-Sirvent, J. Molina-Ruiz, M. L. Tudela, et M. L. García-Lorenzo, « Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator », *J. Geochem. Explor.*, vol. 109, n° 1-3, p. 1–7, 2011.
- [20] W. Kloppmann, A. Bourhane, et F. Asfirane, « Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau », BRGM, 2011.
- [21] A. A. Gnin, « Etude et modélisation hydrogéologique des interactions eaux de surface-eaux souterraines dans un contexte d'agriculture irriguée dans le delta du fleuve Sénégal », 2015.
- [22] P. G. Cook, W. M. Edmunds, et C. B. Gaye, « Estimating paleorecharge and paleoclimate from unsaturated zone profiles », *Water Resour. Res.*, vol. 28, n° 10, p. 2721–2731, 1992.
- [23] A. Bourhan, « Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude », *Géosciences La Réunion. BRGM Univ Avignon*, p. 108, 2010.
- [24] A. Younsi, « Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia Côtière, Maroc) », These de doctorat, Maroc, 2001.
- [25] A. E. K. Rouabhia et L. Djabri, « L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocene de la plaine d'El Ma El Abiod », *LARHYSS J. P-ISSN 1112-3680E-ISSN 2602-7828*, n° 8, 2010.
- [26] S. Marlet et J.-O. Job, « Processus et gestion de la salinité des sols », p. 797-822, 2006.

## Références Bibliographiques

---

- [27] S. Khan, R. Tariq, C. Yuanlai, et J. Blackwell, « Can irrigation be sustainable? », *Agric. Water Manag.*, vol. 80, n° 1-3, p. 87–99, 2006.
- [28] O. Ribolzi, P. Andrieux, V. Valles, R. Bouzigues, T. Bariac, et M. Voltz, « Contribution of groundwater and overland flows to storm flow generation in a cultivated Mediterranean catchment. Quantification by natural chemical tracing », *J. Hydrol.*, vol. 233, n° 1-4, p. 241–257, 2000.
- [29] J. Rodier, B. Legube, N. Merlet, et R. Brunet, *L'analyse de l'eau - 9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*, Dunod. France: Dunod, 2009.
- [30] Minstre des Ressources en Eau MRE, *Décret exécutif N°A14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif N°A 11-125 du 17. Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars. 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine*, vol. N°13. 2014, p. 14-17.
- [31] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, 2011.

**Annexes**

**A- Données des analyses physico-chimiques des eaux**

**Annexe 1. Statistiques descriptives des données 2011**

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca	266	9,000	536,000	110,305	66,504
Mg	266	3,000	255,000	68,038	37,088
Na	266	22,000	790,000	262,840	128,270
K	266	8,000	165,000	24,078	15,148
Cl	266	46,000	1200,000	390,451	193,859
SO <sub>4</sub>	266	10,000	2100,000	413,107	259,793
NO <sub>3</sub>	266	0,100	214,000	49,875	36,403
HCO <sub>3</sub>	266	9,000	262,000	129,765	47,710

**Annexe 2. Statistiques descriptives des piézomètres**

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca mg/l	11	40,000	168,000	89,818	41,813
Mg mg/l	11	22,500	117,500	56,136	32,314
Na mg/l	11	98,600	490,000	172,391	121,515
K mg/l	11	6,000	45,600	13,609	12,121
Cl mg/l	11	110,000	750,000	246,818	195,656
SO <sub>4</sub> mg/l	11	140,000	800,000	387,636	196,804
CO <sub>3</sub> mg/l	11	0,000	0,000	0,000	0,000
NO <sub>3</sub> mg/l	11	0,170	83,650	26,019	21,084