

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الأرض و الكون

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme : Master Académique
En Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

Adaptation des eaux de la nappe du Continental
Intercalaire à l'irrigation. Cas de la région d'Oued Righ
(SE Algerien)

Membres de Jury :

Président :

Examineur :

Encadrant : Dr Zahi Faouzi

Présenté par :

Mehibel Saida

Dorbi Messaouda

Année Universitaire 2021-2022

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciement

Tout d'abord, nous à remercier Allah pour avoir donné la force et le courage de réaliser ce travail.

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier notre encadrant Dr Zahi Faouzi pour avoir accepté de diriger ce travail et pour leurs précieux conseils et encouragements au cours de ce travail et Melle HadeF Selma qui nous a aidé soutenu jusqu'au bout.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs du personnel du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers ainsi qu'à tous nos collègues étudiants de la deuxième année Master hydrogéologie.

Mehibel S & Dorbi M

Je dédie ce travail à :

A mes chers parents

A mes frères : Zoubir, Tarek, Mohammed, Abdo

A ma sœur: Assia

A mon fiancé Nasro

A mes cousine : Rokia, Chaima

A mon binôme saida

A mes amies : Nihad, Fatima, Ahlam, Rahma,

Lamia, Hicham

A toute ma famille du plus grand au plus petit.

Je dédie ce travail également à tous qui auront le plaisir de lire cemémoire.

Messaouda.

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont Contribué de

Près ou de loin

À l'élaboration de ce travail plus particulièrement :

*A Mon Père Abdellouaheb Que Dieu Lui Fasse miséricorde et le place dans ses paradis
Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai*

Toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

A ma mère « Salima »

*« Tu m'as donnée la tendresse et le courage pour réussir tout ce que je peux offrir ne pour a
Exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte, je t'offre ce modeste travaille pour*

tout

Remercier pour les sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée».

À mes frères : Riad, Zoheir, Abderrahim, Mohamed Ali, Abdelatif et les enfants de mes frères:

Abdallah, Yahia, Iman

À mes sœurs : Wahiba, Hafida, Naima, Akila, Khadidja, Fatima et les enfants de mes sœurs :

Iyad, kossai, Siradj, Abderrahmane, Rihab, sohaib, Yassmine, Lina, Meriem

Ils sont présents à tous mes examens avec leur soutien moral et leur bonheur

A toutes ma famille,

A toutes mes amie, Hichem, Nihed, Ahlem, Sofia, Fatima, Rania,

Bouchra, Assma, Inass, Mona, Khadidja, Youcef

A mon binôme Messaouda

A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie ce travail également à tous qui auront le plaisir de lire ce mémoire.

Dédie par : Saida

Résumé

Les besoins en eau dans la vallée de l'Oued Righ (SE Algérie) sont assurés par les eaux souterraines, à savoir la nappe du Complexe Terminal et la nappe du Continental Intercalaire. Les eaux de cette dernière sont caractérisées par des températures comprises entre 48.8 et 65.5°C, un pH assez proche de la neutralité avec une tendance à la basicité après refroidissement et une forte minéralisation atteignant 1,8g/l. Le présent travail a pour objectif d'évaluer l'aptitude à l'irrigation, des eaux géothermales du Continental Intercalaire avant et après refroidissement. Plusieurs indicateurs de qualité ont été utilisés à savoir ; le pourcentage de Sodium (Na%), le taux d'absorption du sodium (SAR), le bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), le ratio de Kelly (RK), l'indice de perméabilité (IP), le ratio d'absorption du magnésium (MAR), la salinité potentielle (PS). Les résultats obtenus révèlent que les eaux de la nappe albienne (Intercalaire Continental) ont une qualité admissible et parfois médiocre pour l'irrigation. Ces eaux sont fortement minéralisées et peuvent convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés.

Mots clés : Eaux souterraines, continentale intercalaire, eaux géothermales, irrigation, Oued Righ.

Abstract

The needs for water in the Oued Righ valley (SE Algeria) are provided by groundwater resources, namely the aquifer of the Terminal Complex and that of the Continental Intercalary. The waters of the latter are characterized by very high temperatures ranging between 48.8 and 65.5 ° C, a pH close to neutrality with a tendency to basicity after cooling and a high mineralization reaching 1.8g / l. The objective of the present study is to evaluate the suitability for irrigation of the geothermal waters of the Intercalary Continental before and after cooling. Several quality indicators were used namely; the percentage of Sodium (Na%), the Sodium Absorption Ratio (SAR), the Residual Sodium Bicarbonate (RSBC), the Kelly Ratio (KR), the Permeability Index (PI), the Magnesium Absorption Ratio (MAR), the Potential Salinity (PS). The results obtained reveal that the water of the Albian aquifer (Continental Intercalary) has an admissible and sometimes poor quality for irrigation. These waters are highly mineralized and may be suitable for the irrigation of certain species that are well tolerant of salts on soils well drained.

Keywords: Groundwater, Continental Intercalary, Geothermal water, Irrigation, Oued Righ.

الملخص

يتم ضمان متطلبات المياه في سهل واد ريغ (جنوب شرق الجزائر) من خلال استغلال الموارد الجوفية للمنطقة، والمتمثلة في مياه المركب النهائي والمتداخل القاري. تتميز مياه هذا الأخير بدرجات حرارة عالية جداً تتراوح بين 48.8 و65.5 درجة مئوية، ودرجة حموضة قريبة من الحياد مع ميل إلى القاعدية بعد التبريد وتمعدن مرتفع يصل إلى 1.8 جم / لتر. إن الهدف من هذه الدراسة هو تقييم مدى ملاءمة الري للمياه الساخنة للمتداخل القاري قبل وبعد عملية التبريد. وقد تم الاعتماد على العديد من مؤشرات الجودة والمتمثلة في: نسبة الصوديوم (%Na) ونسبة امتصاص الصوديوم (SAR) وبيكربونات الصوديوم المتبقية (RSBC) ونسبة كيلي (RK) ومؤشر النفاذية (PI) ونسبة امتصاص المغنيسيوم (MAR) والملوحة المحتملة (PS). بينت النتائج المتحصل عليها أن مياه طبقة المياه الجوفية للمتداخل القاري تتميز بنوعية رديئة للري وأحياناً ذات نوعية مقبولة لتمييزها بتمعدن عالي لكنها قد تكون مناسبة لري بعض أنواع المحاصيل المقاومة للملوحة في تربة جيدة التصريف، ولكنها تتطلب مراقبة مسبقة للتغيرات في الملوحة.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، المتداخل القاري، المياه الساخنة، الري، واد ري.

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Resumé	
ملخص	
Abstract	
Sommaire	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	

	Page
Introduction Générale	01
<i>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</i>	
I.1.Introduction	03
I.2.Situation géographique de la région	03
I.3.Canal d'Oued Righ	04
I.4.Topographie	05
I.5.Occupation des sols	05
I.5.1.Population	05
I.5.2.Sols de la vallée.....	06
I.5.3.Activité agricoles	07
I.5.4.Aspect socio - économique	07
I.6.Conclusion	08
<i>Chapitre II : Géologie et Hydrogéologie</i>	
II.1.Introduction	09
II.2. Aperçu Géologie	09
II.2.1. La géologie régionale	09
II.2.2. La structure Synclinale de Base Sahara	09
II.3. La géologie locale	11
II.3.1. Description stratigraphique	12
II.3.1.1. Secondaire	12
a) L'albien	12
b) Le Vraconien	12
c) Le Cénomaniens	12
d) Le Turonien	12
e) Le Sénonien	12
II.3.1.2. Tertiaire	13
a) L'Eocène inférieur carbonaté	13
b) L'Eocène moyen évaporitique	13
c) Miocène -pliocène	13
II.3.1.3. Quaternaire	13
II.4. Evolution Tectonique	13
II.5. Aperçu Hydrogéologie	14
II.5.1. La nappe du quaternaire (nappe phréatique)	15
II.5.2. La nappe du Complexe Terminal	15
II.5.3. La nappe du Continental Intercalaire (CI)	17
II.5.4. Exploitation des nappes souterraines dans la vallée d'oued Righ	18
II.6. Conclusion	19
<i>Chapitre III : Caractéristiques Hydroclimatiques</i>	
III.1. Introduction	20
III.2. Station de mesure	20
III.3. Paramètres Climatiques	21

III.3.1. Précipitations	21
III.3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles	21
III.1.2. Précipitations moyennes saisonnières	21
III.3.2. Température	22
III.4. Type de climat	23
III.5. Le Bilan hydraulique	24
III.5.1. Evapotranspiration	24
III.5.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	24
III.6. Bilan hydrologique de Thornthwaite	24
III.1. Evapotranspiration réelle (ETR)	26
III.7. Estimation du ruissellement	27
III.8. Estimation de l'infiltration	27
III.9. Conclusion	28

Chapitre IV : Hydrochimie et aptitude des eaux à l'irrigation

IV.1. Introduction	29
IV. 2. Caractérisation physiques – chimiques	30
IV. 2.1. Faciès Hydrochimique.....	30
IV. 2.2. Formule ionique.....	31
IV. 2.2.1. Diagramme de piper.....	31
IV. 2.2.2. Diagramme de Stiff.....	32
IV. 3. Paramètres physico – chimiques.....	33
IV. 3.1. La température (T°C).....	34
IV. 3.2. pH.....	34
IV. 3.3. La Conductivité électrique (CE).....	35
IV. 3.4. La Salinité.....	36
IV.4. Les cation	36
IV.4.1. Le Calcium (Ca ²⁺).....	36
IV.4.2. Le magnésium (Mg ²⁺).....	37
IV.4. 3. Sodium (Na ⁺).....	38
IV.4. 4. Potassium (K ⁺).....	38
IV.5. Les anions.....	39
IV.5.1. Les Carbonates (CO ₃ ²⁻).....	39
IV.5.2. Les Bicarbonates (HCO ₃ ²⁻).....	40
IV.5. 3. Les Chlorures (Cl ⁻).....	41
IV.5.4. Les Sulfates	41
IV.6. Généralité sur l'irrigation	42
IV.7. Causes de la Salinité des sols	43
IV.8. Aptitudes des eaux à l'irrigation.....	43
IV.8.1. Pourcentage de Sodium (Na%).....	44
IV.8.2. Taux d'absorption du Sodium SAR.....	45
IV.8.3. Bicarbonate de Sodium résiduel (RSBC).....	46
IV.8.4. Ration de Kelly (RK).....	47
IV.8.5. Indice de perméabilité.....	47
IV.8.6. Ration d'absorption de magnésium (MAR).....	48
IV.8.7. Salinité potentielle (PS)	49
IV.8.8. Carbonate de sodium résiduel (RSC).....	49
IV.9. Conclusion.....	50
Conclusion Générale	51
Références Bibliographiques	

Listes de Figures

	Page
N° : Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	
Fig. I.1. Situation géographique de la vallée d'Oued Righ.....	03
Fig. I.2. Limites administrative de la région d'Oued Righ.....	04
Fig. I.3. Canal d'Oued Righ.....	05
Fig.I.4. Répartition de la population de d'Oued- Righ par zone.....	06
Fig.I.5. Zones touristiques (A) Lac Témacine ; (B) Lac Mégarine	07
Chapitre II : Géologie et Hydrogéologie	
Fig.III.1. Les grandes unités géologique du Sahara.....	09
Fig.II.2. Coupe géologique schématique N.S Passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par la vallée de Oued Righ.....	10
Fig.II.3. Extrait de la Carte géologique du Bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien.....	11
Fig.II.4. Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara Septentrional	14
Fig.II.5. Les nappes aquifères du Sahara Algérien.....	15
Fig.II.6. Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région d'Oued Righ.....	16
Fig.II.7. Coupe hydrogéologique montrant le toit et la surface piézométrique du CI.....	17
Fig.II.8. Evolution du Comportement de la nappe phréatique.....	18
Chapitre III : Caractéristiques Hydroclimatiques	
Fig.IV.1. Localisation des stations météorologique du grand bassin Saharien	20
Fig.III.2. Précipitation moyennes mensuelle de la station de Touggourt (1975 –2020).....	21
Fig.III.3. Précipitation moyennes saisonnières à la station de Touggourt.....	22
Fig.III.4. Température moyenne mensuelle de la station de Touggourt.....	23
Fig.III.5. Courbe pluviométrique de la station de Touggourt (1975 –2020).....	23
Fig.III.6. Bilan hydrique selon Thornthwaite (station de Touggourt 1975- 2020).....	26
Chapitre IV : Hydrochimie et aptitude des eaux à l'irrigation	
Fig.IV.1. Inventaire des points de prélèvement dans la vallée d'Oued Righ.....	30
Fig.IV.2. Faciès chimiques des eaux souterrains selon le diagramme de Piper.....	32
Fig.IV.3. Faciès chimique selon le diagramme de Stiff (A) Forage (B) Station.....	33
Fig.IV.4. Température des eaux de CI de la région d'Oued Righ.....	34
Fig.IV.5. Variation du Ph des eaux du CI dans l'Oued Righ.....	35
Fig.IV.6. Conductivité électrique des eaux du CI dans la région d'Oued Righ.....	35
Fig.IV.7. Salinité des eaux de CI dans la région d'Oued Righ.....	36
Fig. IV.8. Variation de Calcium des eaux de CI dans la région de d'Oued Righ.....	37
Fig. IV.9. Variation de magnésium des eaux du CI dans la région d'Oued Righ	37
Fig. IV.10. Variation de sodium des eaux du CI dans la région d'Oued Righ	38
Fig. IV.11. Variation de potassium dans des eaux du CI dans la région d'Oued Righ.....	39
Fig. IV.12. Variation des carbonates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ ...	40
Fig. IV.13. Variation des bicarbonates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ...	40
Fig. IV.14. Variation des chlorures dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ.....	41
Fig. IV.15. Variation des sulfates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ.....	42
Fig. IV.16. Classification des eaux du CI de la région d'Oued Righ selon le diagramme de Wilcox.....	44
Fig. IV.17. Classification des eaux du CI selon le diagramme de Richards.....	46
Fig. IV.18. Classification des eaux du CI selon le diagramme de Doneen	48

Liste des tableaux

	Page
Chapitre II	
Tab. II.1. Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien.....	14
Chapitre III	
Tab. III.1. Coordonnées de la station météorologique de Touggourt.....	20
Tab. III.2. Bilan hydriques selon Thornthwaite (station de Touggourt).....	25
Tab. III.3. ETR selon Turc à la station de Touggourt (1975 – 2020).....	26
Tab. III.4. Ruissellement par la formule de Tixeront – Berkaloff.....	27
Tab. III.5. Estimation de l'infiltration en (mm)	28
Chapitre IV	
Tab.IV.1 : Classification hydrochimique des eaux du CI selon la formule ionique.....	31
Tab.IV.2 : Paramètres physico – chimique	33
Tab.IV.3 : Résultats de différents paramètres d'aptitude des eaux à l'irrigation	43
Tab.IV.4 : Classification d'eau d'irrigation selon le diagramme de Richard	45
Tab.IV.5: Classification d'eau d'irrigation selon l'indice de RSBC.....	47
Tab.IV.6: Classification des eaux selon l'indice de Kelly (Rk).....	47
Tab.IV.7: Classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de Doneen(IP)	48
Tab.IV.8: Classification des eaux selon la salinité potentielle.....	49
Tab.IV.9: Classification des eaux selon le carbonate de sodium résiduel.....	50

Liste des abréviations

CI : Continentale Intercalaire.

CT : Complexe Terminale.

ONS : Office National de statistique.

OSS : Organisation du Sahara Septentrional.

Km : Kilomètre.

Méq /l : milliéquivalent par litre.

Még /l : milligramme par litre.

m : mètre.

ARNH : Agence Nationale des Ressources Hydrique.

°C : Degré Celsius.

mm : Millimètres.

CE : Conductivité Electrique.

ONM : Office National de la Météorologie

pH : le potentiel Hydrogène.

µS/cm: Microsiemens par Centimètre.

m³/s : Mètre cubes par Seconde.

P : Précipitations.

ETP : Evapotranspiration Potentielle.

De : Déficit d'écoulement.

ETR : Evapotranspiration réelle.

R : Ruissellement.

DA : Déficit Agricole.

TH: Dureté totale.

HCO₃⁻ : Bicarbonate.

Cl⁻ : Chlorures.

SO₄²⁻ : Sulfate

Mg²⁺ : Magnésium

Ca²⁺ : Calcium

K⁺ : Potassium

Na⁺ : Sodium

SAR : Taux d'absorption de sodium

Na% : Pourcentage de sodium

MAR : Ration d'absorption de magnésium

RSBC : Bicarbonate de sodium résiduel

RK : Ration de Kelly

IP : Indice de perméabilité

PS : Salinité potentielle

RSC : Carbonate de sodium résiduel

Introduction générale

Introduction Générale

L'eau présente à l'échelle de la planète un élément vital pour la subsistance de tout être vivant, c'est aussi un facteur prépondérant pour toute activité socioéconomique. L'eau est donc une ressource précieuse, d'autant plus qu'elle n'est pas uniformément répartie. L'Algérie, de par sa situation géographique est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales. En effet, la région de l'Oued Righ, qui fait partie du Sahara septentrional, connue pour son climat hyper-aride et ses ressources en eaux souterraines essentiellement fossiles, peu ou relativement renouvelables ; à savoir le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire (Zerrouki et Salhi, 2017).

Dans le Sahara algérien du nord-est, la région de l'Oued Righ est l'une des plus importantes zones géothermiques et est définie par un climat aride. Les ressources en eau de la vallée de l'Oued Righ sont hétérogènes en termes de conditions géologiques et environnementales ; elle est marquée par un système d'eau souterraine multicouche à travers les nappes phréatiques le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire (Hammadi et al, 2022). Ce dernier constitue un grand réservoir d'eau souterraine d'une superficie de 600 000 km². Vu la température élevée de ces eaux (>60°C), qui sont classées dans la catégorie des eaux géothermales à basse énergie. Leur utilisation nécessite un refroidissement avant toutes utilisations. Leur exploitation tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

La présente étude a pour objectif de connaître les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines du Continental Intercalaire dans la région de Oued Righ et d'évaluer leur aptitude à l'irrigation de type gravitaire. A partir de cette démarche, le manuscrit est organisé en quatre chapitres présentés comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation détaillée de notre zone d'étude, du point de vue situation géographique, et géomorphologique pour découvrir la relation qui existe entre des différentes formes morphologiques caractérisant la région d'étude.
- Le deuxième chapitre a pour objectif d'étudier le contexte géologique et hydrogéologique ; il permet d'identifier les différents matériaux et les différentes structures des formations susceptibles d'être aquifère.
- Le troisième chapitre a pour but principal d'étudier les caractéristiques hydro-climatologiques de la région d'étude ; de mieux connaître l'évolution des

caractéristiques climatiques et d'estimer le régime hydrologique dans la région d'étude.

- Le quatrième sera réservé aux matériels et méthodes utilisés pour l'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines du Continental Intercalaire (nappe Albienne) et l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux avant et après le refroidissement.

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale avec quelques recommandations.

Chapitre I
Présentation de la zone
d'étude

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de notre zone d'étude, afin de donner un aperçu général sur les caractéristiques du milieu naturel (relief et topographie, végétation, ressources pédologiques, climat et aspects socio-économiques), dans le but de comprendre l'état des ressources en eau dans la vallée de l'Oued Righ, l'une des plus importantes régions phoenicicole du Sahara algérien, près de 20000 ha environ de palmiers (*Ben Ziouch et al., 2006 ; Belksier et al., 2015 ; Rezaiki et Zaghad, 2019*).

I.2. Situation géographique de la région

La vallée d'Oued Righ est une entité géographique située dans le Sud-Est algérien entre les latitudes 32°54' et 34°09' Nord et les longitudes 05°50' et 05°75' Est. Elle commence au sud avec le village d'El Goug (Touggourt, Ouargla) et se termine au nord avec le village d'Oum-Thiours (Oued Souf). Elle est limitée au nord par le plateau de Still, à l'est par l'Erg Oriental, au sud par le prolongement de l'Erg Oriental et à l'ouest par le plateau gréseux (*fig.I.1*).

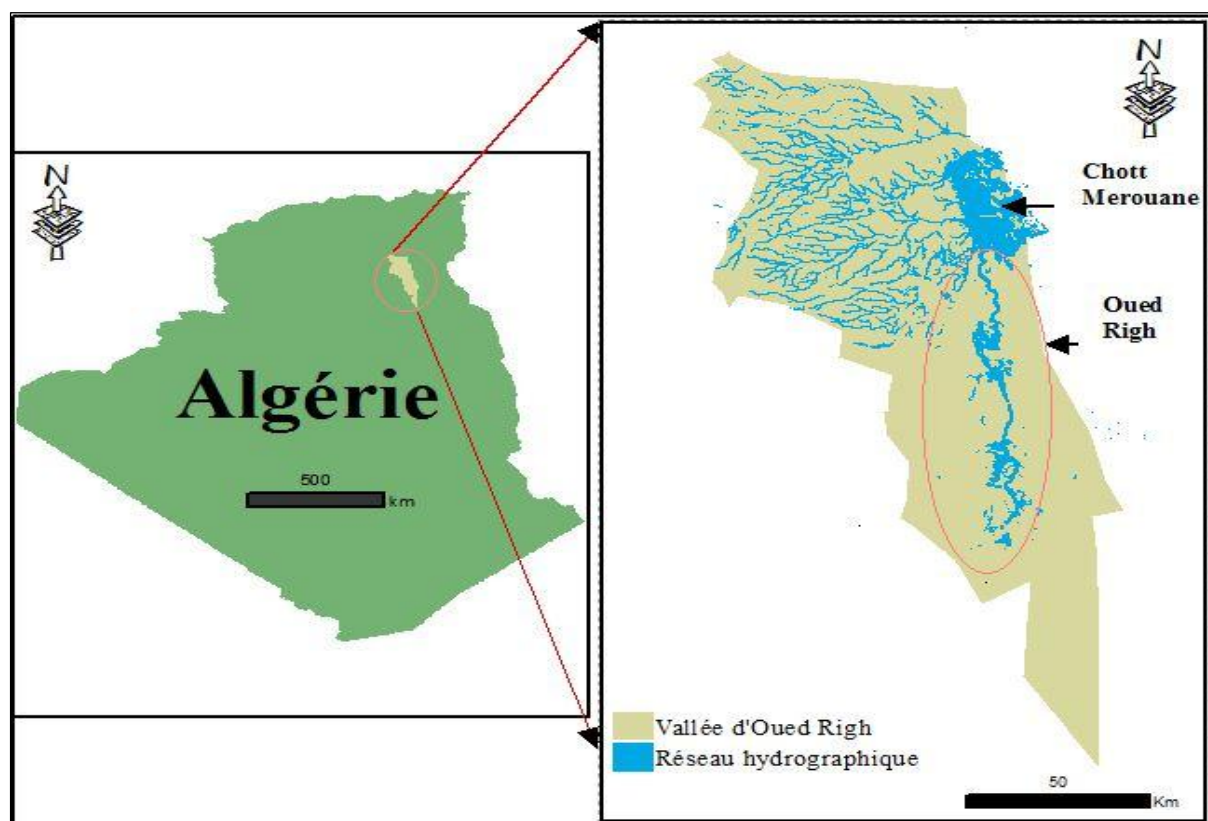


Fig. I.1. Situation géographique de la vallée d'Oued Righ

Cette vallée est caractérisée par une dépression de 20 km de large, étirée du sud au nord sur 150 km, vers Chott Merouane, l'altitude passe progressivement de +100 m à El-Goug en amont (la côte la plus élevée) à - 31 m à Chott Merouane en aval avec une pente générale de l'ordre de 1‰ à Djamaa (*Dubost, 1992 ; Zahi et al. 2013*). La vallée est traversée par un canal principal (canal de l'oued Righ), qui joue un rôle très important dans la vallée car il assure l'évacuation des eaux

d'irrigation excédentaires (drainage) ; et celles de l'assainissement des zones urbaines (*Rezaiki et Zaghad, 2019*).

Selon l'ancien découpage administratif, la vallée d'Oued Righ s'étend sur le territoire de deux wilayas : Au sud, elle comprend les daïras de Touggourt, Mégarine et Temacine (Wilaya de Ouargla), où la vallée commence et plus précisément à partir de la palmeraie d'El Goug (*Douadi, 1996*). Vers le nord, elle comprend la wilaya d'El Meghaier, où elle se termine et plus précisément dans les palmeraies d'Om Thiour, tandis que la daïra de Djmaa, représente la partie centrale de la vallée.

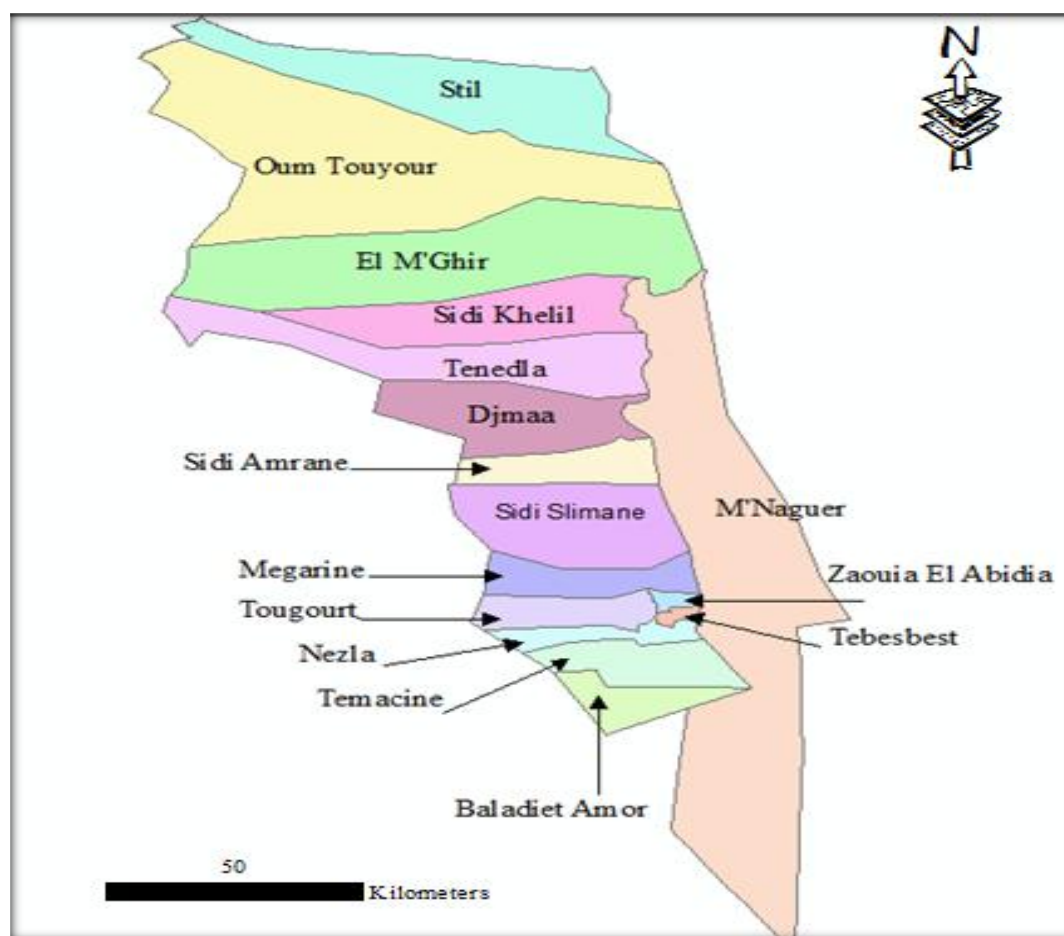


Fig. I.2. Cadre administratif de la région d'Oued Righ.

I.3. Canal d'Oued Righ

Avec des méthodes simples et traditionnelles, le canal d'Oued Righ a été construit manuellement par les habitants de la région, pour drainer le surplus d'eau d'irrigation des palmeraies (*Bouterid, 2021*) et l'eau d'irrigation provenait des sources naturelles des puits artésiens et celles exploitées par pompage (*Boussaada, 2017*). Afin de résoudre ces problèmes, les habitants de l'Oued Righ ont construit un canal pour drainer ces eaux le long de la vallée vers le Chott Merouane. Il assure le rabattement de la nappe phréatique, le drainage de la vallée par l'évacuation des eaux

d'irrigation excédentaires et l'évacuation des eaux usées des zones urbaines qui sont situées de part et d'autre du canal (fig.I.3) (Boussaada, 2017 ; Bouterid, 2021).

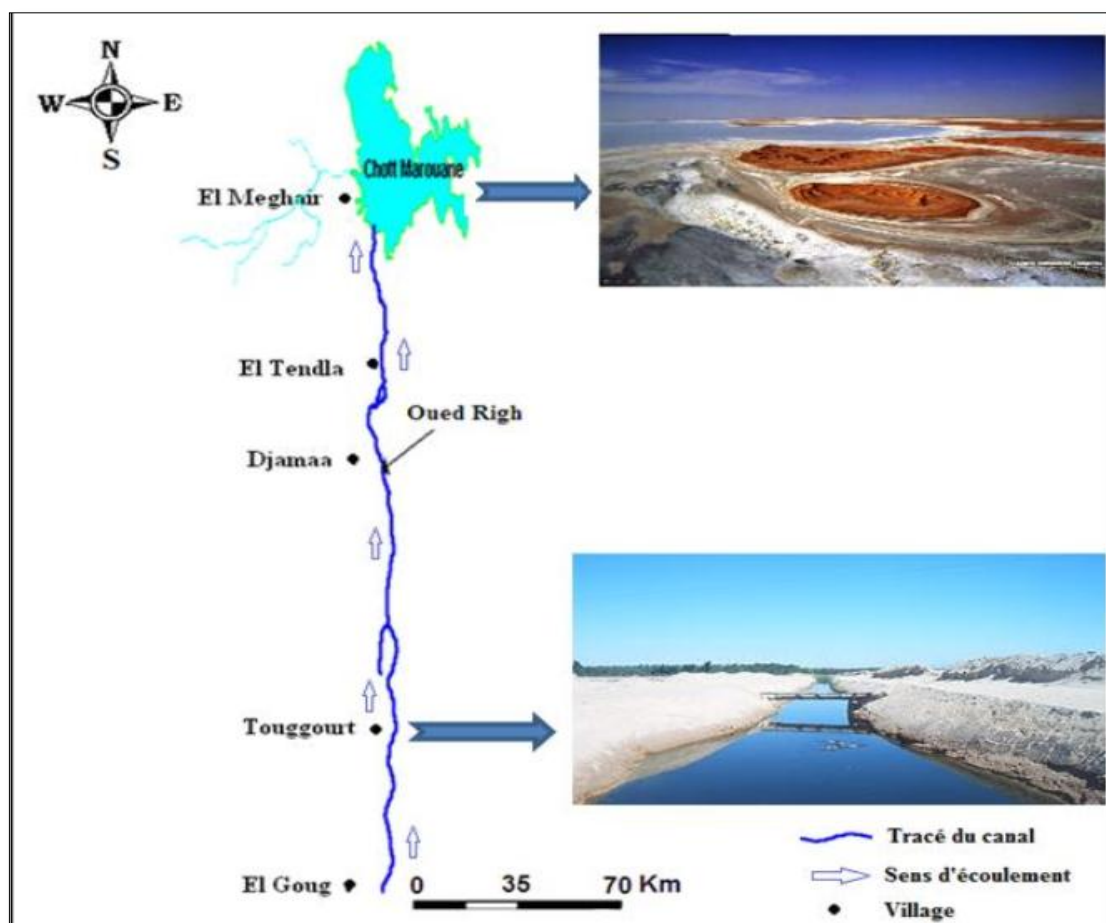


Fig.I.3. Canal d'Oued Righ (Boussaada, 2017)

I.4. La topographie

La vallée d'Oued Righ est considérée comme une zone homogène en termes de composition, car il s'agit d'une grande dépression de cratère s'étendant du sud au nord, composée de dunes de sable s'étendant sur la majeure partie de celle-ci, et de quelques plaines composées de boue et de sable, et est décrite comme un désert inférieur. La principale caractéristique de cette zone est son inclinaison vers le nord, ou plus précisément vers les grands chotts. L'altitude passe très progressivement de plus de 100 m à El Goug à moins 31 m au milieu du Chott Merouane (+70 m à Touggourt, +30 m à Djamaa, 0 m à El Meghier (Ben Abdallah et Bouaichi, 2019), cette pente permet à l'excédent d'eau de s'écouler vers le Nord (Dubost, 2002).

I.5. Occupation des Sols

I.5.1. Population : En 2008, la population de l'Oued-Righ représente environ 11% de la population du Sahara algérien. Elle est répartie sur vingt-huit communes, dont cinq regroupent 76% de la population totale (Touggourt, Témachine, Méggarine, Djamaa et Meghaier). La ville de Touggourt abrite à elle seule 40% de la population de la région. La distribution de la population

par zone, est la suivante (ONS, 2008); la zone sud (entre l'oasis d'El Goug au sud et l'oasis de Sidi Slimane au nord) compte 211088 habitants (59%) la zone centrale (entre Ain-Echoucha au sud et Tinedla au nord) compte 77348 habitants (22%) et la zone aval de l'oued Righ (Sidi Khalil, Mghaier et Oum Thior) avec 68043 habitants (19%) (fig.I.4).

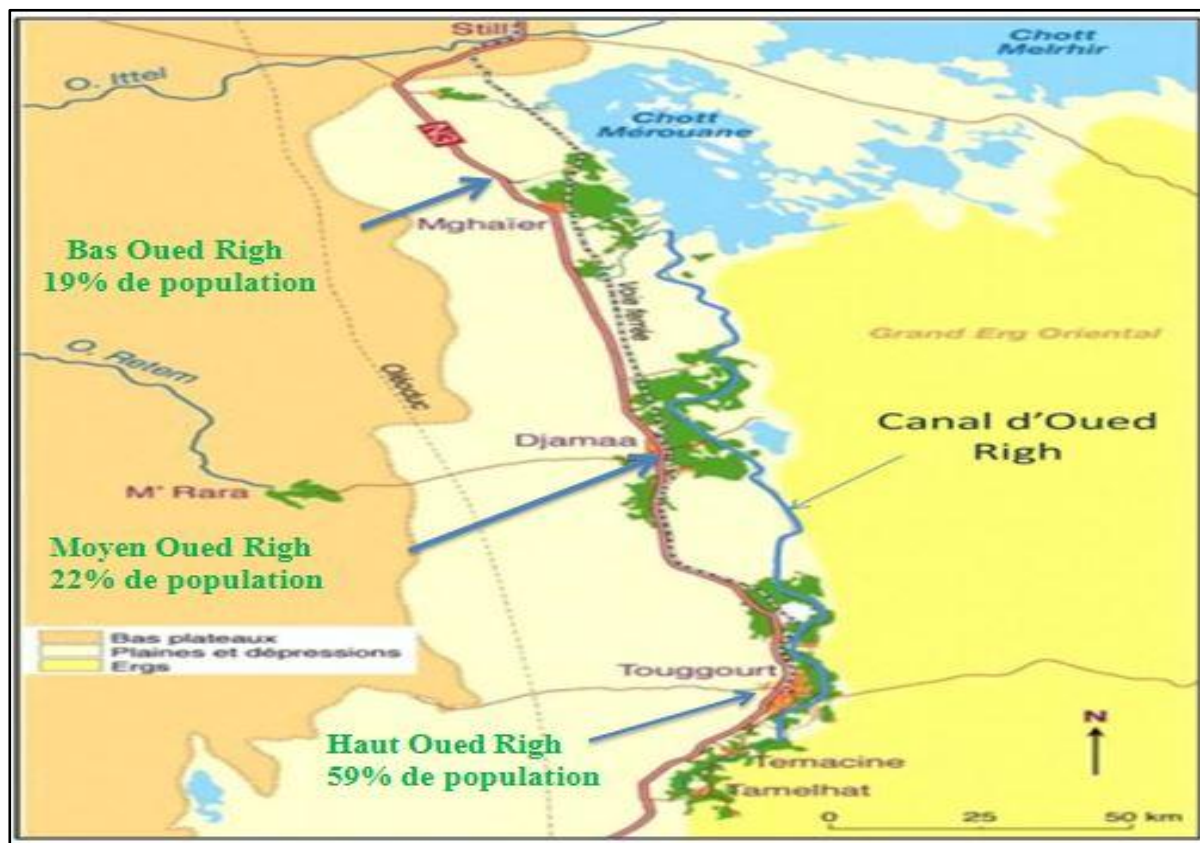


Fig. I.4. Répartition de la population de l'oued –Righ par Zone (Kouzmine, 2009)

I.5.2. Sols de la vallée : Les sols de la région sont principalement caractérisés par des dépôts éoliens sableux. Ils sont généralement meubles et bien aérés en surface, et sont le plus souvent salés ou très salés. La couverture pédologique du Sahara est très hétérogène et se compose de sols minéraux, de sols peu évolués, de sols halomorphes et de sols hydro morphes (Dubost, 1991). D'une manière générale, le sol de la région de l'Oued Righ a une texture sableuse à sablo-limoneuse avec une forte perméabilité, une structure particulière, un degré de salinité élevé et un faible taux de matière organique. Il est également caractérisé par la présence d'une nappe phréatique proche de la surface (Khadraoui, 2007). La texture du sol est très grossière par endroits et la teneur en sable fin et grossier peut dépasser 90%. La détermination de la composition granulométrique des agrégats de certains profils a été perturbée par la présence importante de gypse.

I.5.3. Activités agricoles : La principale culture pratiquée dans la vallée de l'Oued Righ est le palmier dattier, qui occupe entre 10 et 15% de la superficie de la région. Elle est souvent associée à des cultures sous-jacentes : maraîchage (tomates, piments, ail, oignons), fourrages

(luzerne, orge, choux fourragers), condiments (menthe, coriandre, anis vert) et quelques arbres fruitiers dispersés dans les palmeraies (grenades, abricots, figues, etc.) A l'exception des fourrages, les autres cultures sous-jacentes sont en grande partie destinées à l'autoconsommation.

I.5.4.Aspect socio-économique : Le secteur agricole, qui était l'activité principale, a été quelque peu délaissé actuellement en raison du faible rendement des palmiers dû aux effets néfastes de la salinisation de l'eau et du sol, de la remontée de la nappe phréatique, du vieillissement des palmiers, etc. Le palmier dattier est la principale culture de la région, avec la variété "Déglet Nour" qui domine, suivie de "Ghars" et "Dégla Beidha". Les cultures autres que les palmiers sont peu développées et occupent 10 à 15% de la superficie, dont l'orge et la luzerne sont les cultures fourragères les plus importantes. Les cultures maraîchères telles que l'ail, les oignons, les carottes et les navets sont également produites pour la consommation locale. Les cultures maraîchères d'été (piments et pastèques) sont limitées en superficie. Dans le domaine de l'industrie, il existe plusieurs petites usines, principalement des briqueteries situées à proximité de la source de matière première, ainsi que des complexes de traitement des hydrocarbures, de transformation des matières plastiques ; des usines d'aluminium ainsi que des entreprises de conditionnement de dattes. Le tourisme existe aussi, du fait de l'existence de certaines niches touristiques comme les oasis, le lac de Témachine, le lac Mégarine, les anciennes médinas, les tombeaux des rois, etc.



Fig. I.5. Zones touristiques ; (A) Lac Témachine, (B) Lac Mégarine

I.6. Conclusion

La zone d'étude, nommée d'après son canal principal "la vallée de l'Oued Righ" appartenant au bas Sahara, et qui s'étend sur une superficie de 3750 ha. Elle se prolonge sur environ 150km selon un axe nord-sud. Sa topographie est très plate, approchant 1 ‰. Son étendue couvre plus d'une cinquantaine d'oasis où la culture du palmier dattier reste la seule ressource socio-économique pour la satisfaction des besoins de la population qui occupe la région, ce qui équivaut à environ 11% de la population du Sahara algérien. Les sols de la région ont une texture sableuse fine à sablo-limoneuse à forte teneur en sel dans le Nord et grossière à dominante sableuse dans le Sud.

Chapitre II

Géologie & Hydrogéologie

II.1. Introduction

Dans cette partie, nous avons essayé de décrire la géologie régionale du Bas Sahara puis la géologie locale de la vallée de l'Oued Righ, et plus précisément celle de l'intercalaire continental, ce qui nous conduit à une synthèse globale et locale des caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère.

II.2. Aperçu Géologie

II.2.1. La géologie régionale

La région du Bas Sahara est un vaste bassin limité à l'Ouest par la dorsale du M'Zab, au Sud par les Hamadas de Tademaït et de Tinghert, à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien et au Nord par les montagnes des Aurès et des Nememchas (*fig.II.1*). Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent doucement vers la partie déprimée marquée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ. En revanche, au Nord, il s'élève au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par les Chotts, dont le fond se trouve sous le niveau de la mer. La zone d'étude fait partie du bassin du Sahara Nord de l'Algérie, ou plus précisément du bassin oriental.

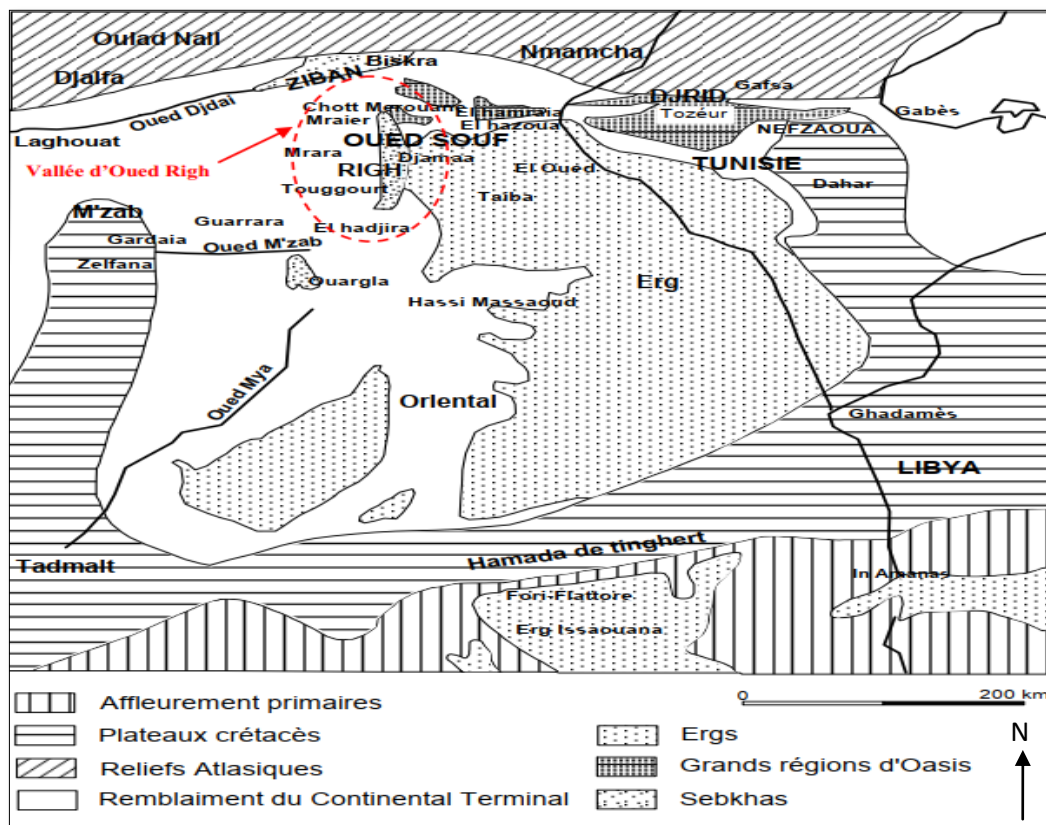


Fig. II.1. Les grandes unités géologiques du Sahara (Nesson, 1975 ; Rezaiki et Zaghad, 2019).

II.2.2. La structure synclinale de Bas Sahara

Les formations aquifères du désert du nord-est sont toutes d'origine sédimentaire, car la région a connu de longues phases de sédimentation alternativement marine et continentale tout au long de

son histoire géologique (fig.II.2). Les sédiments résultants ont été plus importants parce qu'un immense bassin est apparu très tôt dans cette partie du désert et a été affecté presque continuellement par la suite par des mouvements descendants (Nesson, 1975 ; Rezaiki et Zaghad, 2019 ; Chaib, 2016). Après le dépôt des formations marines du premier stade, le désert a subi des mouvements tectoniques verticaux et horizontaux, suivis d'autres mouvements après le Trias. Les blocs cristallins centraux sont alors soulevés et la couverture sédimentaire ondule en dessous au fur et à mesure que le désert du nord-est s'affaisse (Nesson, 1975 ; Rezaiki et Zaghad, 2019 ; Chaib, 2016).

Le Bas désert a maintenant atteint une structure de bassin asymétrique synchrone délimitée à l'ouest, au sud et à l'est par ses strates dépressionnaires, qui sont des formations sédimentaires secondaires et tertiaires donnant généralement des surfaces trapézoïdales très marquées. Au nord, un profond cratère a été creusé au pied de l'Aurès et des sédiments rectilignes se sont déposés presque verticalement (Nesson, 1978 ; Chaib, 2016).

Ces sédiments se sont formés après de longues phases d'alternance de sédimentation marine et continentale. Ils sont plus importants au nord qu'au sud, atteignant près de 2000 m. L'accumulation de sédiments reflète la présence d'une zone de subsidence située au nord, à la limite nord du socle africain (Nesson, 1975 ; Rezaiki et Zaghad, 2019 ; Chaib, 2016).

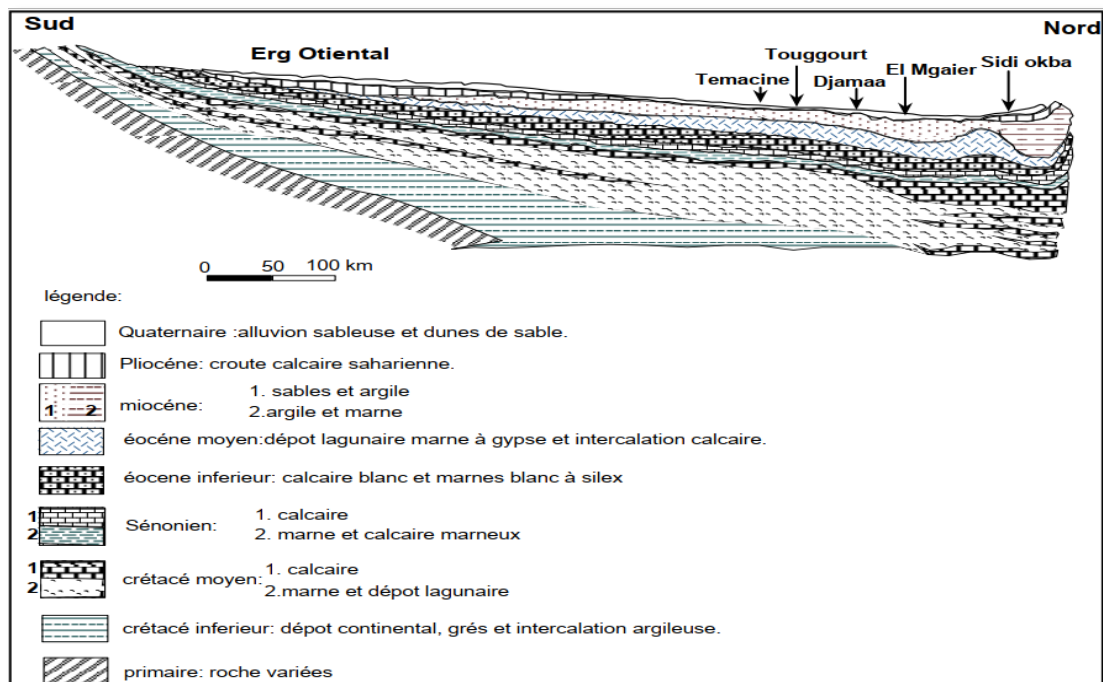


Fig. II.2. Coupe géologique schématique N-S passant par la cuvette secondaire saharienne et par la vallée de Oued Righ (Cornet, 1962 ; Belksier et al., 2016)

Depuis, des transgressions marines se sont produites à plusieurs reprises dans cette région, par exemple au Jurassique et au Crétacé inférieur, qui ont été de courte durée et dont les principaux sédiments accumulés à cette époque étaient des sables éoliens et fluviaux et des argiles continentales. L'ensemble de ces dépôts, dont les sables ont été transformés en grès poreux, est appelé Intercalaire continental, car il apparaît dans l'échelle stratigraphique après les formations issues d'une transgression marine cénomaniennne (Nesson, 1975 ; Rezaiki et Zaghad, 2019).

II.3. La géologie locale

La zone d'étude fait partie du bassin du Sahara oriental, devenu célèbre grâce à la recherche pétrolière. C'est pourquoi, afin d'étudier la géologie de la région, nous élargirons le champ de recherche à l'ensemble du bas désert, étant donné l'ampleur des phénomènes géologiques, stratigraphiques et tectoniques qui caractérisent la région (Boussaada, 2017). Nous distinguons trois ensembles : (i) Les terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux de Tadmaït et de Tinghert et le massif du Houggar. (ii) Les terrains mésozoïques et cénozoïques constituent l'essentiel des affleurements en bordure du bas Sahara. (iii) Les dépôts continentaux du tertiaire supérieur et du quaternaire occupent le centre du bassin (Boussaada, 2017) (fig. II. 3).

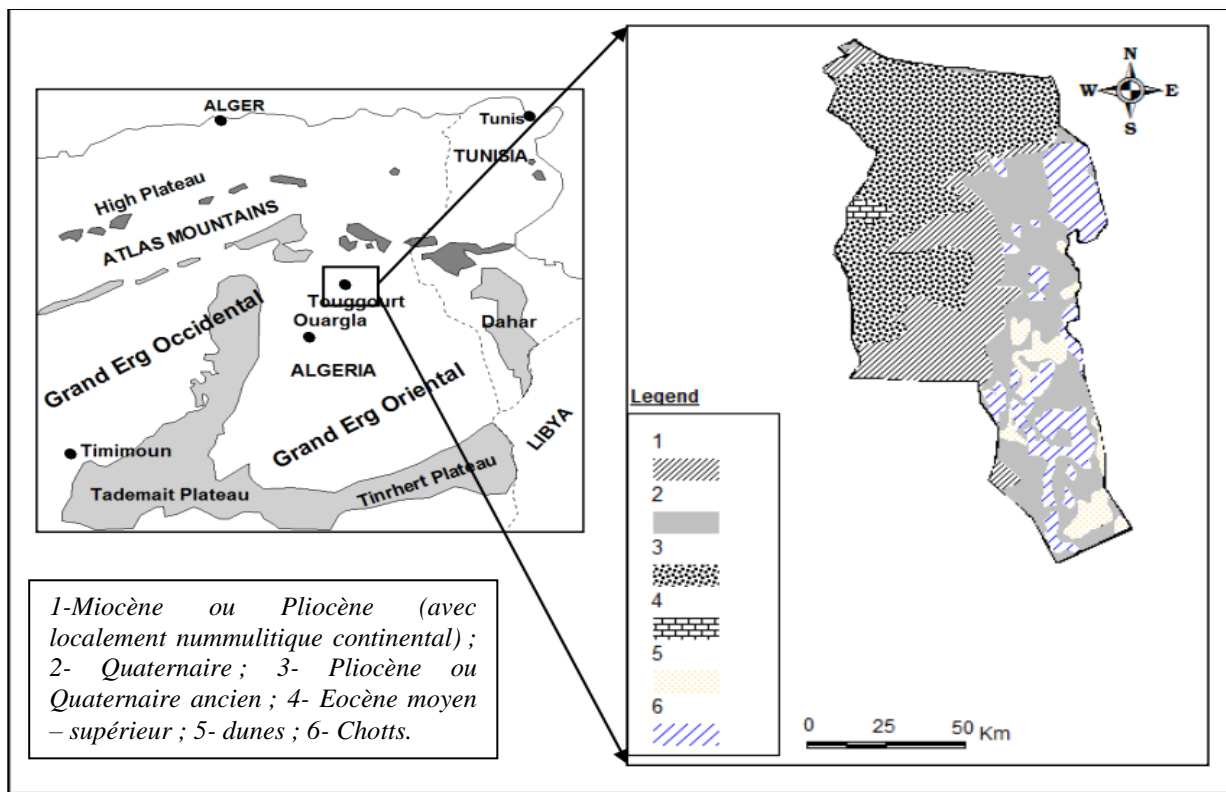


Fig. II.3.Extrait de la carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro – Tunisien (Busson, 1967 ; Chaib, 2016)

La prospection géophysique et les forages pétroliers ont permis de préciser la profondeur du socle précambrien (Furon, 1968), qui se situe entre 3000 et 5000m. Par conséquent, les dépôts

sédimentaires ont une épaisseur d'environ 4500m. Le long du versant sud, il existe un énorme fossé de subsidence dans lequel l'épaisseur maximale des sables et argiles de l'Oligocène et du Mio-Pliocène est d'environ 2000m, l'épaisseur maximale de la série post-albienne est d'environ 3000m. Dans cette étude, nous nous intéressons principalement à la couverture sédimentaire post-paléozoïque, qui contient les principaux aquifères du Sahara (*Belksier et al. , 2015*).

II.3.1. Description stratigraphique

Grâce aux travaux de nombreux auteurs qui ont travaillé et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, tant dans le cadre de la géologie pétrolière que par des chercheurs universitaires ; *Savornin, 1931 ; Karpoff, 1952 ; Cornet, 1964 ; Furon, 1964 ; Busson, 1967-1971 et Conrod, 1996*, et étant donné que la géologie permet la connaissance des formations susceptibles de constituer de bons aquifères. Les formations géologiques de la zone d'étude seront décrites de la plus ancienne à la plus récente (*Rezaiki et Zaghad, 2019*).

II.3.1.1. Secondaire

a) L'albien : se présente comme une série très épaisse formée d'une alternance de couches gréseuses avec des passées d'argiles schisteuses.

b) Le Vraconien : c'est en fait un étage de transition entre l'Albien et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance de calcaires et de calcaires argileux. Nous rencontrons aussi quelques passages de dolomies compactes microcristallines avec des intercalations d'argiles.

c) Le Cénomaniens : Le Cénomaniens est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. L'épaisseur des bancs est de 1 à 5m environ. Dans la moitié Sud, le Cénomaniens est essentiellement constitué d'argiles et de marnes, avec de l'anhydrite et parfois même du sel, les carbonates sont rares.

d) Le Turonien : représenté par des dépôts marins. Dans l'ensemble, il est calcaire, dolomitique et marneux à la base et dolomitique ou calcaire au sommet. Son épaisseur varie d'un endroit à l'autre et dépasse parfois les 650 m.

e) Le Sénonien : Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées : (i) Le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argile et de sel. (ii) Le Sénonien carbonate est formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrites. Le sommet de la formation est souvent marqué par un petit banc à silex. La limite supérieure est toujours difficile à situer car il y a une continuité lithologique et identité de faciès entre le Sénonien carbonate et l'Eocène carbonate qui le recouvre.

II.3.1.2 Tertiaire

a) L'Eocène inférieur carbonaté : L'Eocène carbonaté a des caractéristiques lithologiques qui le rendent difficile à distinguer du Sénonien. Seule la présence ou l'absence de nummulites permet de faire la différence. Le Sénonien et l'Eocène carbonaté réunis, forment un puissant ensemble calcaire. Sa puissance peut atteindre 600 m dans la région des Chotts (*Nesson, 1975*).

b) L'Eocène moyen évaporitique : Au-dessus de l'Eocène carbonaté, on rencontre une formation constituée par une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrite. L'Eocène évaporitique constitue un aquitard entre l'Eocène carbonaté et les sables Mio-Pliocène. Il semble raisonnable de grouper en une seule unité hydrogéologique (aquitard) l'Eocène évaporitique et les argiles de base de Mio-Pliocène. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 m.

c) Mio-Pliocène : est un ensemble puissant composé de sable et d'argile, il est caractérisé par une forte hétérogénéité que ce soit dans la direction verticale ou horizontale.

Selon *Bel et Demargne(1966)*, le Mio-Pliocène comporte deux niveaux à intérêt hydrogéologique : (i) Niveaux inférieur grès-sableux : C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara Oriental. (ii) Niveau supérieur sableux : du point de vue hydrogéologique, ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. Ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

II.3.1.3. Quaternaire

Son épaisseur est variable et peut atteindre localement une dizaine de mètres (10 m). Le Quaternaire est essentiellement à faciès sableux, séparé du Pliocène supérieur par des couches d'argiles et d'évaporites et souvent intercalé par des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses qui s'édifient plus loin en d'importantes accumulations sableuses dans le Grand Erg Oriental. Il occupe la quasi-totalité du lit de la vallée de l'Oued Righ et en résulte du démantèlement de la falaise Mio-Pliocène situé aux limites de la vallée de l'Oued Righ.

II.4. Evolution Tectonique

L'architecture actuelle de la plate-forme saharienne est le résultat de plusieurs phases tectoniques intenses qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Au Sahara occidental, les mouvements de l'orogénèse hercynienne sont principalement responsables de la déformation et de la structuration. Dans le Sahara central et nord-est, les mouvements hercyniens et les mouvements mésozoïques sont tous deux responsables de la structuration. Les principales phases tectoniques qui ont façonné la plate-forme saharienne sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tab .II .1 Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952, in Medjani, 2016, Rezaiki et Zaghad, 2019)

Age	Style
1- Antécambrien	Plis très aigus, faible.
2- Paléozoïque	Mouvements amples d'axe Est – Ouest formation de chaînes orientées N-S, NNE – SSW ou NW-SE sur des axes antécambrien.
3 – Post éocène et anté- Miocène	Renjeu des structures hercynienne avec leur orientation ancienne.
4- Post –Miocène	Premiers plis d'axe NW-SE.
5 - Post – Pliocène	Mouvement peut-être dans la région Nord seule plis en genou de l'Aurès d'axe E-W.
6- Fini du Quaternaire ancien	Plis affectant le Mio –Pliocène seul ou accompagné du quaternaire ancien, suivants deux axes orthogonaux dont l'axe NW-SE est le principal.
7- Néolithique	Mouvement de grande amplitude à plis faible et localisés.

II.5. Aperçu hydrogéologique

Le bassin versant de l'Oued Righ est rempli de sols quaternaires (sables, calcaires, grès, argiles et évaporites) qui constituent l'aquifère de surface (niveaux d'évaporation sableux et argileux). L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part et la présence d'une tranchée d'autre part. La subsidence a favorisé la formation de deux grands systèmes aquifères captifs déterminés par le complexe Mio-Pliocène Terminal (CT) et Continental Intercalaire (CI) formé entre les deux cycles marins du Paléozoïque suivi par le Crétacé supérieur aux limites inférieure et supérieure (fig.II.4). Ces deux horizons ont des profondeurs relatives de 500m et plus de 1500m respectivement pour CT et CI (Boussaada, 2017 ; Maabdi et al .,2017)

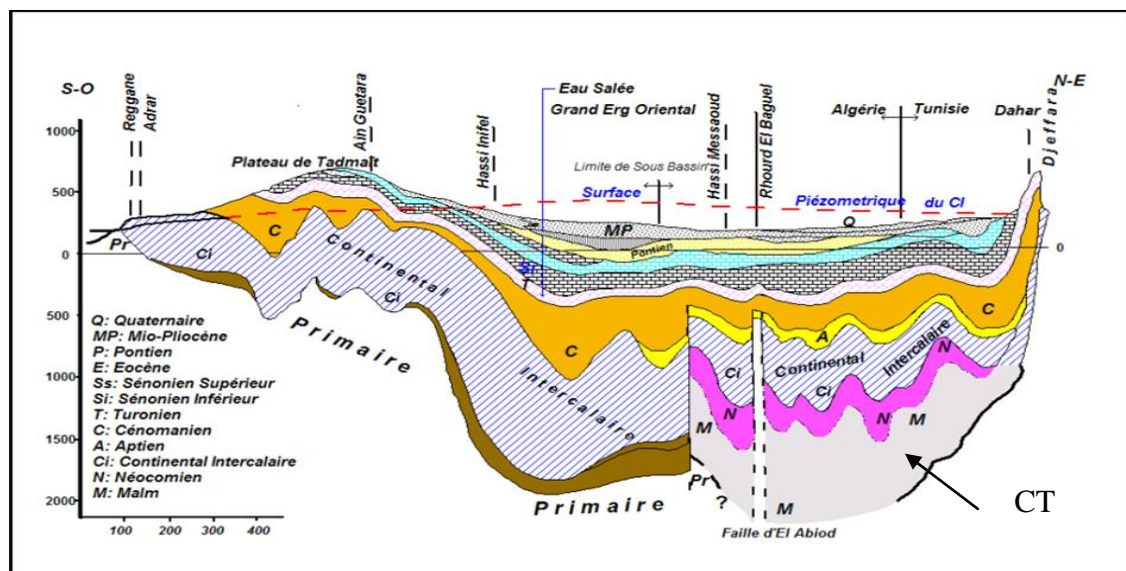


Fig. II.4. Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional (Unesco, 1972)

Le système aquifère du Sahara septentrional 'SASS' (OSS, 2003) s'étend sur une vaste zone limitrophe de l'Algérie, de la Tunisie et de la Libye (fig.II.5). Cet ensemble contient une série de

couches aquifères qui sont regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Continental Terminal (CT). Le domaine SASS couvre une superficie d'environ 1 000 000 km², dont 700 000 km² en Algérie, 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye et s'étend du nord au sud, de l'Atlas saharien aux affleurements du Tidikelt et à la limite sud de Tinghert, et d'ouest en est de la vallée de Guir-Saoura à la région du Graben Hun en Libye (*Chaib, 2016*).

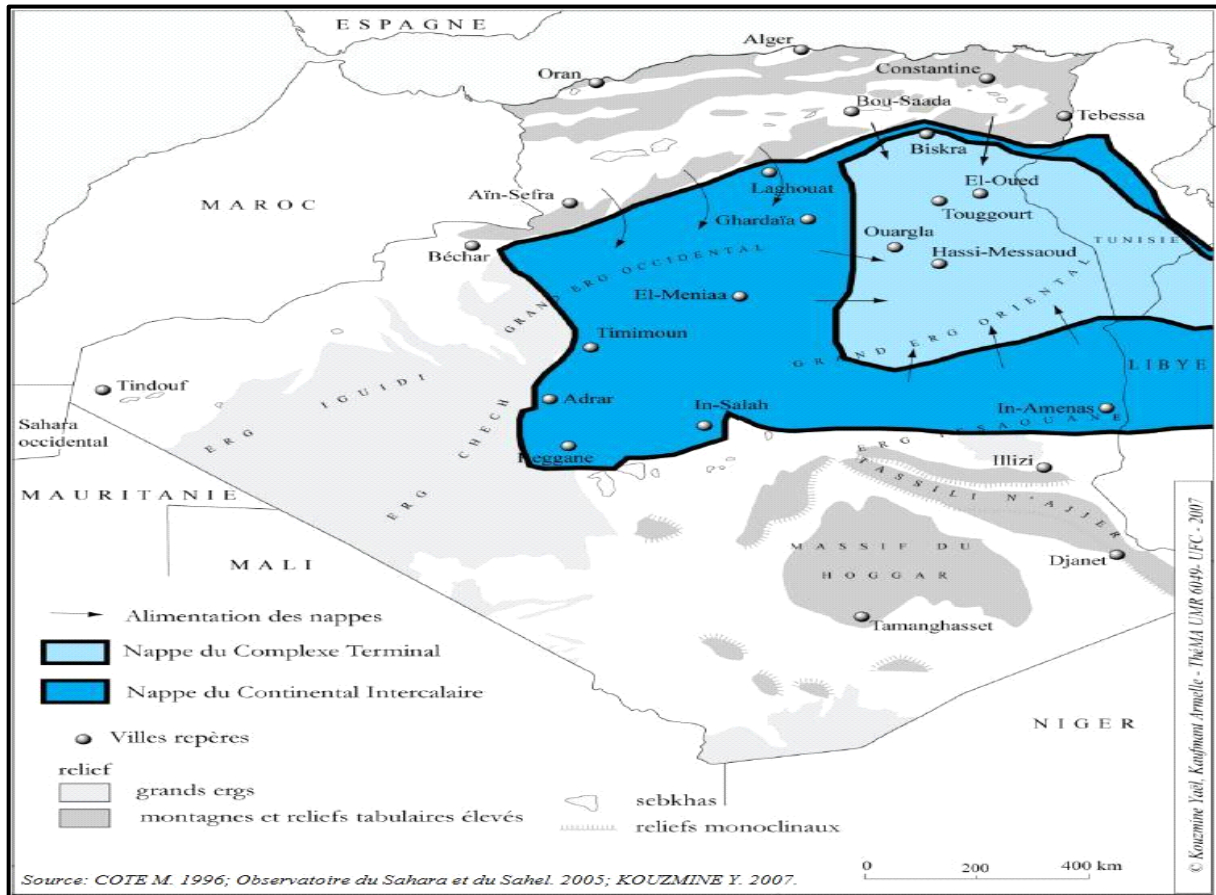


Fig .II.5. Les nappes aquifères du Sahara Algérien (in Kouzmine, 2007)

II.5.1. La nappe du quaternaire (nappe phréatique)

Elle est constituée principalement de sables, à la base desquels des couches d'argile et d'évaporites semi-perméables la séparent du Pliocène supérieur. Cette nappe est principalement alimentée par l'infiltration des eaux des oueds et surtout par la percolation des eaux usées et des eaux de drainage en période d'irrigation (*Rezaiki et Zaghad, 2019*). En partie supérieure des formations continentales, des aquifères de 02 à 10 m de profondeur augmentent les réserves hydrauliques du Bas Sahara (*Beggas et Meissa, 2017*).

II.5.2. La Nappe du Complexe Terminal

Le système de réservoirs souterrains du Complexe Terminal est moins étendu que celui du Continental Intercalaire, mais couvrant la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur une superficie de plus de 350 000 kilomètres carrés ; les profondeurs vont de

100m à plus de 500m, avec une épaisseur moyenne de 220m (Belksier, 2017). Sa température varie entre 20° et 30° à la sortie du forage (ANRH, 2006 ; Beggas et Meissa, 2017). Ce complexe est constitué par le remplissage de formations continentales sableuses et argileuses qui reposent de manière incongrue sur des calcaires érodés de l'Éocène inférieur (Belksier, 2017). Cet aquifère peut être divisé en trois horizons aquifères (fig.II.6):

Le premier aquifère sableux : variant de 50 à 100 mètres de puissance à certains endroits, il s'agit d'un aquifère semi-captif peu profond, constitué de sable fin à moyen, de sable argileux et de grès de l'ère glaciaire délimité par des formations semi-perméables (Rezaiki et Zaghad, 2019).

Le second aquifère : dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 36 mètres, surmonté par l'aquifère précédent, il est composé de formations datant du Miopliocène, principalement constituées de grès, de graviers et de sables avec la présence de quelques lentilles argileuses plus durables et perméables que ses prédécesseurs (Rezaiki et Zaghad, 2019).

Le troisième aquifère : est constitué de calcaire carbonifère/éocène inférieur, atteignant 200 m d'épaisseur à Touggourt et 360 m à Meghaier. Il est principalement constitué de calcaire et de calcaire dolomitique avec des marnes anciennes, de l'anhydrite et du gypse (Rezaiki et Zaghad, 2019).

L'ensemble de ces aquifères s'écoule du sud au nord et leurs niveaux de pression varient d'environ 80 mètres à El Goug à environ 40 mètres au bord du Chott. En général, la surface piézométrique du second aquifère captif est plus élevée que celle du premier niveau : cette différence peut atteindre 40 mètres dans le nord du bassin (Rezaiki et Zaghad, 2019).

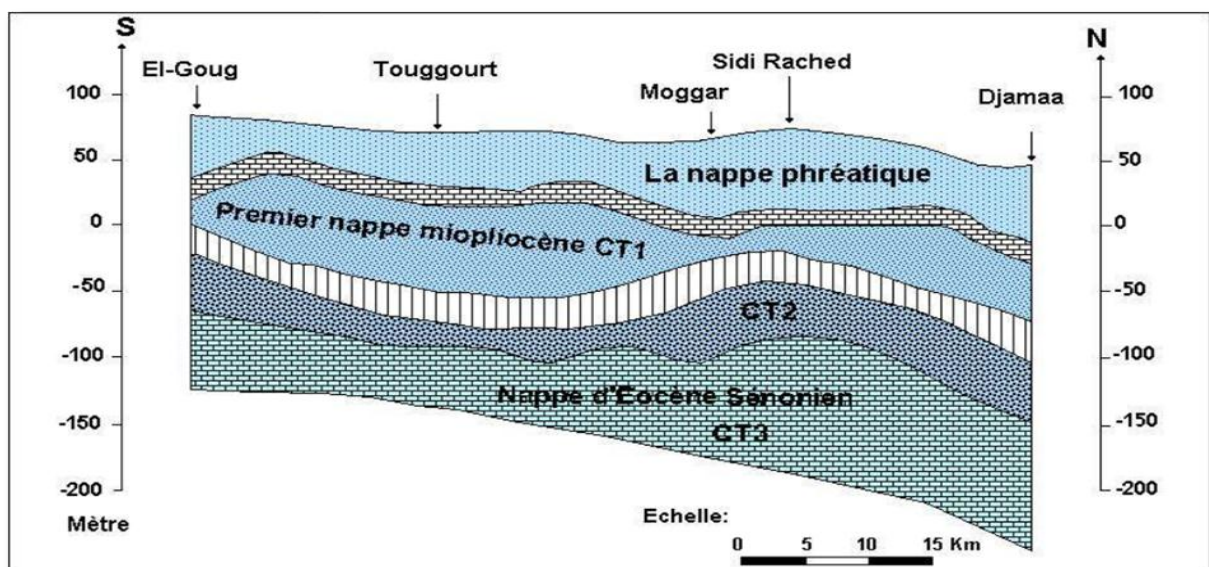


Fig. II.6. Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région d'Oued Righ (ANRH)

Le Complexe Terminal fournissait 6 m³/s en 1970 (Eress, 1972). Dans ce complexe, deux tiers de l'eau courante sont pompés et le reste, et l'essentiel de l'artésien se concentre dans la partie

nord du Bassin entre Tinedla et El Meghaier, tandis que le pompage domine le sud : de Touggourt à Blidet Amor, bien qu'El Goug, la plus méridionale des palmeraies, est toujours alimenté par des eaux artésiennes (Rezaiki et Zaghad, 2019). La profondeur de cet aquifère est comprise entre 100 et 500 m. De plus, ses eaux sont caractérisées par une température basse de 25° à 30°. La transmittance est de 4 à 300 x 10⁻³ m²/sec et le coefficient de stockage est de 0,5 à 150 x 10⁻³ (Tesco, 1986 ; Rezaiki et Zaghad, 2019).

II.5.3. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

Souvent appelée "nappe albiennne", elle constitue la plus grande réserve d'eau souterraine du Sahara algérien. Elle est essentiellement constituée de sédiments post-paléozoïques du Trias à l'Albien et est représentée par une alternance de couches gréseuses et argileuses où les niveaux perméables sont dominants, avec une épaisseur utile de plus de 250 m partout et atteignant parfois 1000 m par endroits. Il s'agit en effet d'un immense réservoir aquifère contenant un volume considérable d'eau douce, du fait de son extension sur l'ensemble du Sahara septentrional sur plus de 600 000 km² (Conrad et al., 1969), soit seulement 1/6ème, environ 10 000 milliards, sont exploitables (in Zerrouki, 2017). Le Continental intercalaire s'étend du nord au sud, de l'Atlas saharien au Tassili du Hoggar et d'ouest en est, des vallées du Guir et de la Saoura au désert de Libye (fig.II.7).

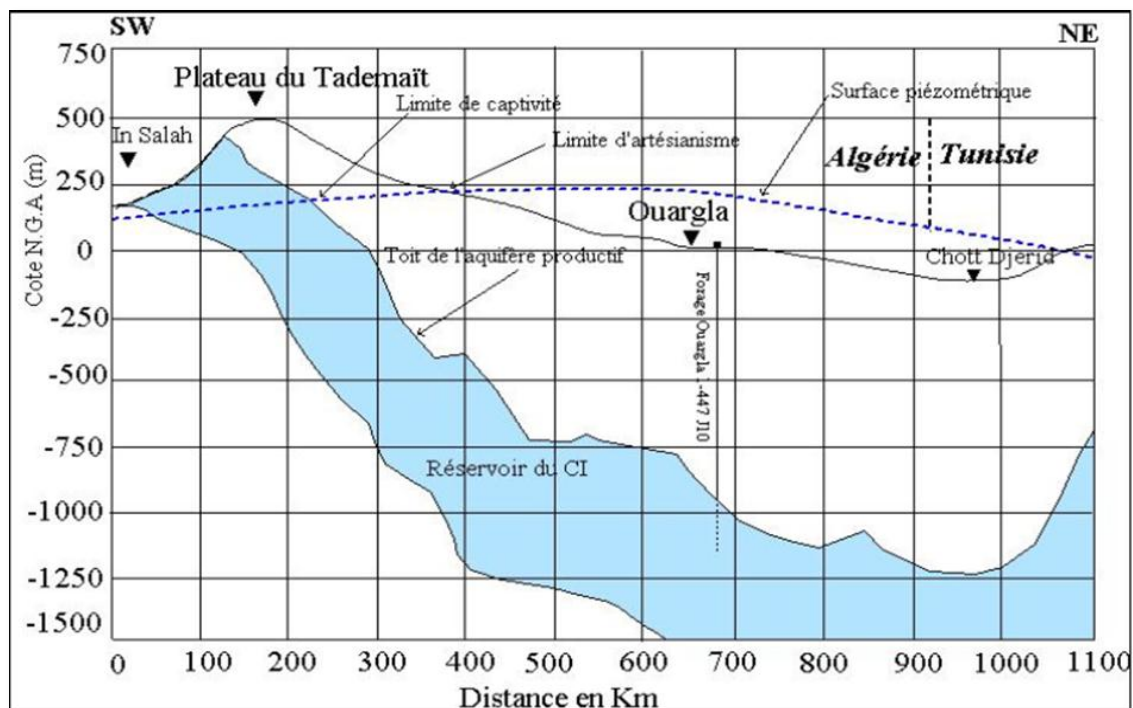


Fig.II.7. Coupe hydrogéologique montrant le toit et la surface piézométrique du CI (Unesco, 1972).

Enfin, au centre du bassin, plus précisément dans la gouttière de l'Oued Righ, où les captages sont profonds de 1760m au nord de la vallée, la nappe est fortement artésienne et l'eau qui s'en échappe à une température élevée qui dépasse parfois 60°C et une pression de 26 bars, à la sortie

des forages. Ses eaux se caractérisent par leur caractère corrosif (H_2SO_4 et CO_2) et sa minéralisation qui varie entre 1 et 2 g/l de résidu sec, parfois jusqu'à 5 g/l. A Oued Righ la porosité des grès et sables de cet aquifère a été évaluée à 26%, la perméabilité est de 10^{-3} m/s (Castany, 1968), la transmissivité est de l'ordre de 6 à $30 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le coefficient d'emmagasinement est de 1 à $50 \cdot 10^{-3}$ (Tesco, 1986).

En général, l'écoulement des eaux continentales intercalaires de l'Atlas saharien diverge le long de l'axe de la dorsale du M'Zab dans deux directions : l'une dans la partie occidentale du nord au sud et l'autre dans la partie orientale d'ouest en est.

II.5.4. Exploitation des nappes souterraines dans la vallée d'oued Righ

Dans la vallée d'oued Righ, les eaux de surface étant très rares et incertaines, les habitants se sont inévitablement tournés vers l'exploitation des ressources profondes par le biais de forages et de puits artésiens, qui sont, en volume, très importants. La question de l'exploitation de ces aquifères est un véritable pari pour l'avenir. Au départ, l'eau mobilisée, provenant de la nappe phréatique, est rejetée dans la même nappe au moyen de puits perdus après un usage domestique ou agricole dans les zones d'épandage, de sorte qu'une partie s'évapore et le reste rejoint la nappe phréatique (fig.II.8).

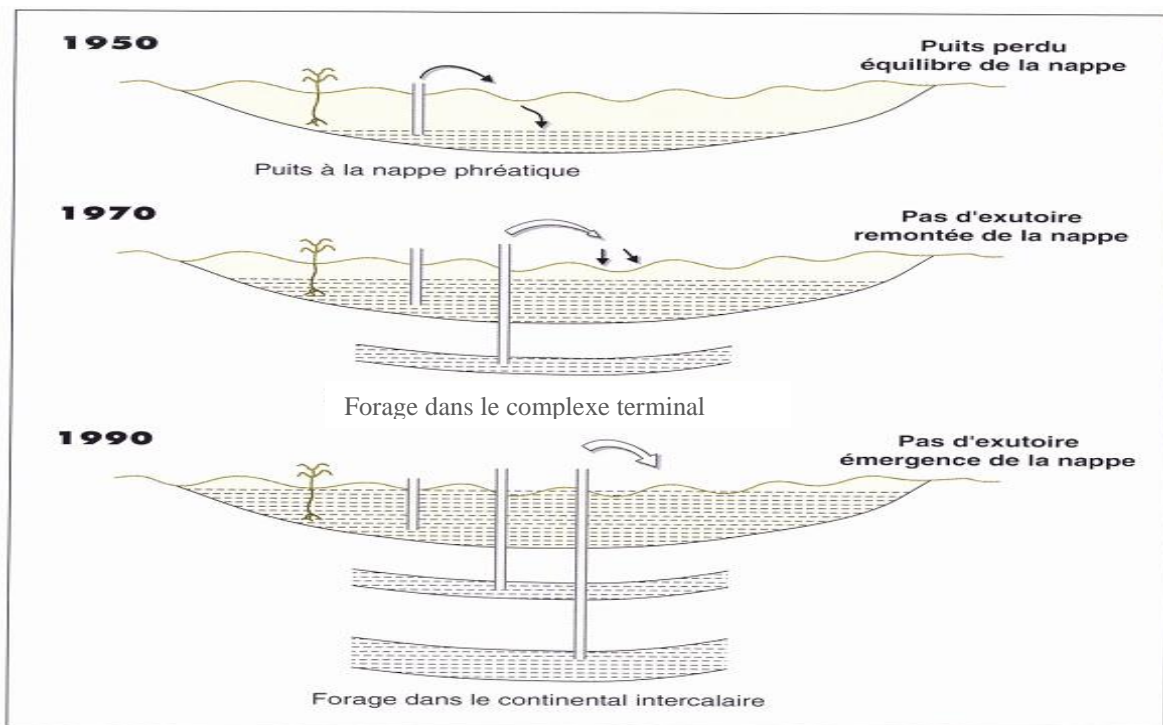


Fig. II.8. Evolution du comportement de la nappe phréatique (Marc Côte, 1991)

Entre le volume d'eau fourni et le volume d'eau rejeté, un certain équilibre s'établit et la nappe phréatique reste stable. En raison du développement économique de la région, qui entraîne une forte croissance démographique, et du système d'irrigation traditionnel, les autorités font appel

aux ressources des aquifères profonds (le Complexe Terminal et les aquifères intercalaires continentaux) pour satisfaire les besoins en eau domestiques, agricoles et industriels, ce qui génère un autre type de déséquilibre (fig.II.8). Suite à l'exploitation intensive des eaux souterraines profondes, à la présence de fuites dans les réseaux d'adduction d'eau et d'assainissement et à l'insuffisance des réseaux d'évacuation des eaux usées et de drainage de l'irrigation, et en l'absence d'exutoire naturel, cette eau atteint la nappe phréatique et la fait monter. Cela entraîne une élévation de la nappe phréatique dans la période de 1975 à 1980. Dans certains cas, la nappe arrive finalement à la surface, révélant un déséquilibre écologique.

Dans le but d'évacuer les eaux excédentaires et de maintenir la nappe phréatique à un niveau acceptable et d'éviter sa remontée, puis la stagnation des eaux à la surface du sol, un grand drain a été réalisé en 1984, d'une longueur estimée à 130 km, qui dirige les eaux de drainage vers le chott Merouane (-31m) sur une centaine de kilomètres de Blidet Amor au Sud (côte + 100m) à Meghaier au Nord. C'est le seul cours d'eau pérenne du Bas Sahara avec un débit de 2 à 2,5 m³/s et même 5 m³/s (ANRH de Ouargla) en amont de l'embouchure dans le chott de Merouane. Sa pente moyenne de 1 pour mille est suffisante pour évacuer correctement les eaux des oasis et du système de drainage. Enfin, L'état actuel du canal connaît une dégradation continue, qui risque de remettre en cause le rôle important de cet exutoire principal de la vallée.

II.6. Conclusion

La vallée de l'Oued Righ est une véritable gouttière aplatée, allongée dans le sens sud-nord, et fait partie intégrante du Sahara inférieur, plus précisément de la province du Trias. Elle est constituée de formations du Cambrien au Tertiaire qui sont en grande partie recouvertes par le Grand Erg Oriental, avec seulement quelques affleurements observés sur les bords. Les formations paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux de Tadmait et de Tinhert et le massif du Hoggar. Les formations mésozoïques, discordantes sur le socle primaire, souvent érodées, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continentale, dont c'est cette dernière qui lui donne le nom d'Intercalaire Continental.

Le Continental intercalaire est capté entre 1450 m et 1600 m de profondeur, affleure en bordure du bassin, notamment aux confins de l'Atlas saharien et à Tinhert. Les problèmes qui affectent la région sont nombreux (surexploitation, drainage, montée des eaux, etc.). Mais le canal, qui est justement le rein de la vallée, joue un rôle très important dans la région, car il protège l'environnement en évacuant les eaux de drainage et d'assainissement.

Chapitre III
Caractéristiques
Hydroclimatiques

III.1.Introduction

Le climat affecte une grande partie de l'activité humaine, comme la production agricole, la production et la consommation d'énergie, l'utilisation de certaines ressources comme l'eau, les aspects clés de l'environnement étant immédiatement pertinents pour la climatologie (Ghendir,2016). Dans ce chapitre, le contexte hydro-climatique est généralement abordé à travers les caractéristiques des données climatiques (température, précipitations), puis l'estimation des différentes composantes du bilan hydrique.

III.2. Station de mesure

La zone d'étude fait partie du bassin du Sahara algérien, elle appartient au sous-bassin n°04 de la région de Ouargla (Bouabdallah et Falkat, 2018). La carte ci-dessous (fig.III.1) représente les principales stations météorologiques, actuellement en activité, du grand bassin saharien (Ghendir, 2016).

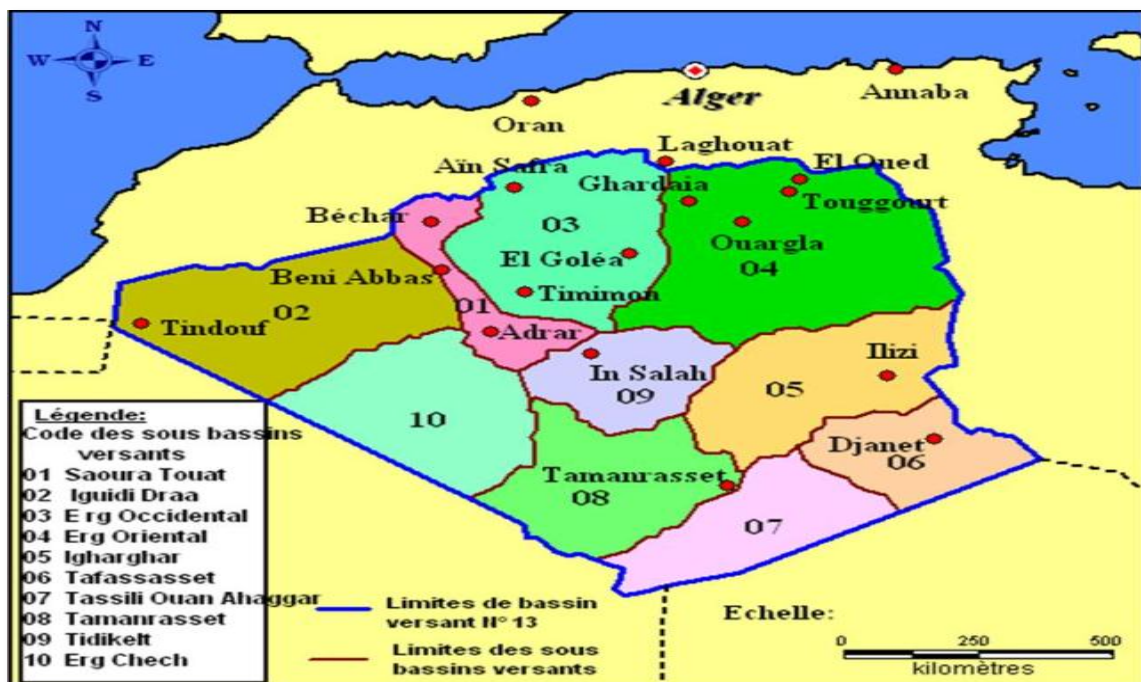


Fig. III.1. Localisation des stations météorologiques du grand bassin saharien (Ghendir, 2017)

Dans ce chapitre, les données climatiques utilisées sont celles disponibles à l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), sur une période d'observation de 45 ans pour la station de Touggourt (1975-2020) (tab.III.2).

Tab .III.2 : Coordonnées de la station météorologique de Touggourt.

Station	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Période d'observation (45ans)
Touggourt	84	33°04N	06°05E	1975-2020

III.3. Paramètres Climatiques

III.3.1. Précipitations

Les précipitations est un facteur très important désigne tous type d'eau (pluies, neiges), qui conditionne l'écoulement superficiel et souterraine qui influence sur le volume d'eau emmagasinée, par conséquence, abaissant ou augmentant le niveau piézométrique de la nappe. La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres (Ramade, 1984).

III.3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations sont irrégulières et rares dans la région d'Oued Righ (Rezaiki et Zaghad, 2019). D'après l'histogramme suivant (fig.III.2), on peut voir que le mois le plus arrosé est janvier, qui enregistre les précipitations maximales avec 11.12 mm, alors que juillet est le mois le plus sec avec des précipitations minimales de 0.57 mm, avec une moyenne annuelle d'environ 5.06 mm.

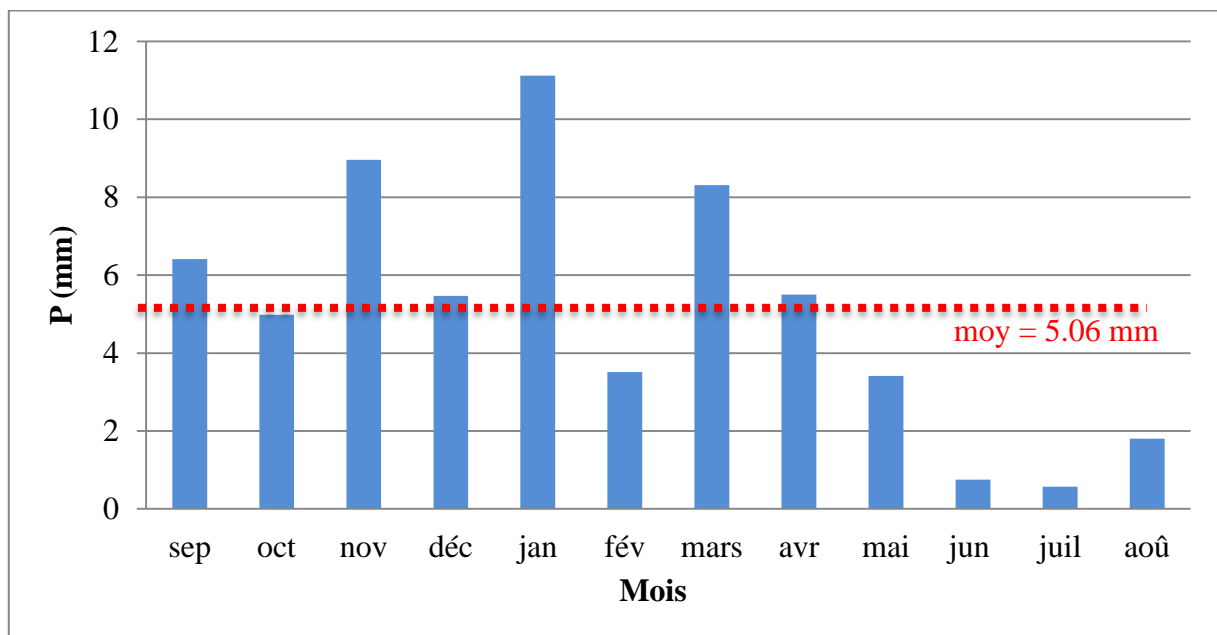


Fig. III.2. Précipitations moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975 – 2020)

III.3.1.2. Précipitations moyennes saisonnières

Afin de distinguer les précipitations saisonnières se produisant dans des conditions de température différentes, nous avons calculé le pourcentage de précipitations de chaque saison par rapport au total annuel (Bouzned, 2017). Conformément à l'année agricole, chaque saison est subdivisée en trois mois comme suit: (Rezaiki et Zaghad, 2019 ; Bellabidi et Adaika, 2016).

- **Automne** : Septembre – Octobre – Novembre.- **Hiver** : Décembre – Janvier – Février.
- **Printemps** : Mars –Avril – Mai. - **Été** : Juin – Juillet – Août.

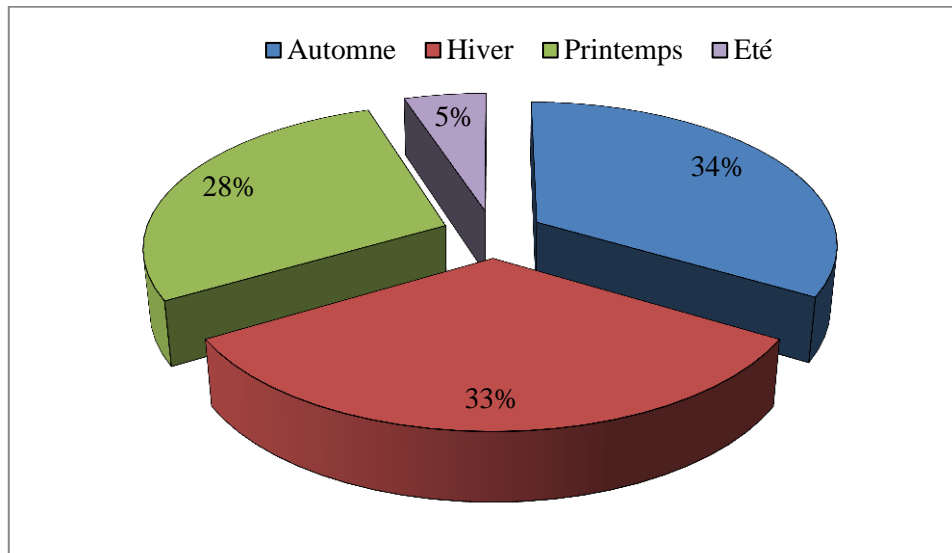


Fig. III.3. Précipitations moyennes saisonnières à la station de Touggourt (1975-2020)

La figure (III.3) montre que la plupart des précipitations annuelles tombent en hiver et en automne, au total 40.45 mm ou 67.79 % de la quantité annuelle. Au printemps, il tombe environ 17,23 mm, soit 28.34 %. Enfin, la saison estivale reste la plus sèche avec 3.11 mm ou seulement 5.11 % des précipitations annuelles.

III.3.2. Température (T°C)

La température est le deuxième facteur important dans l'étude climatique, car elle agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration et par conséquent sur le déficit annuel et saisonnier de l'écoulement. En effet, le Sahara algérien possède une température maximale d'environ 40°C pendant la période critique (juillet et août), qui peut parfois dépasser les 50°C, alors qu'en hiver elle peut descendre jusqu'à -10°C (Toutain, 1979 in Koul, 2014).

La représentation graphique de la variation des moyennes mensuelles des températures montre que le mois de Janvier est le mois le plus froid (10.29°C), alors que le mois d'Juillet est le plus chaud (34.44 °C) (fig.III.4).

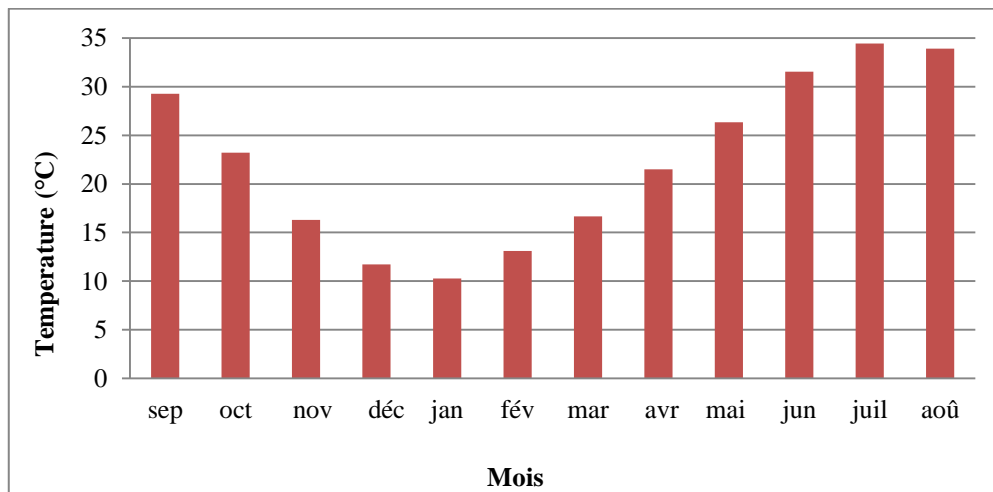


Fig. III.4: Température moyenne mensuelle de la station de Touggourt (1975 -2020)

III.4. Type de climat

➤ Diagramme Ombrothermique

La représentation du diagramme Ombrothermique (combinaison de deux paramètres climatiques : la température et les précipitations) permet de déterminer le type de climat qui prévaut dans une région donnée. Un mois sec est défini, selon (Bagnouls et Gaussen, 1953, 1957), comme celui où le cumul des précipitations (moyenne en millimètres) est égal ou inférieur à deux fois la température ($P \leq 2T$). Grâce à cette formule ($P \leq 2T$), il est possible de construire le diagramme pluviométrique traduisant la durée de la saison sèche en fonction des intersections des deux courbes (Zahi, 2014 ; Bouachiba et Boudraa, 2020). A partir de ce diagramme (fig.III.5), on remarque que $P < T$ sur toute l'année, c'est-à-dire que la région d'étude est caractérisée par un climat saharien sec sur toute l'année.

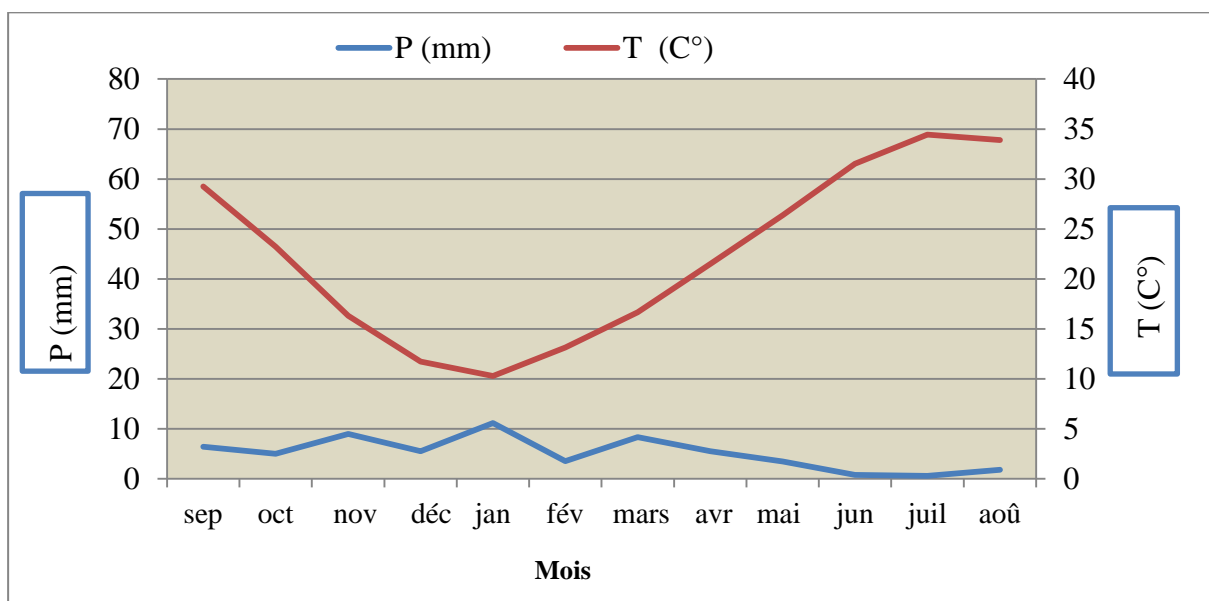


Fig. III.5: Diagramme Ombrothermique de la station de Touggourt (1975-2020)

III.5. Le Bilan hydraulique

Pour une région donnée, l'établissement d'un bilan hydrique selon Thornthwaite consiste à évaluer la répartition des précipitations reçues sur une surface, entre les différentes composantes, à savoir le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration, afin d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influencent directement la variation des réserves (*Hireche et Layadi, 2020*). L'équation du bilan hydrique est exprimée par la relation :

$$P = ETR + R + I$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm). **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm).

R : Ruissellement en (mm). **I** : Infiltration moyenne en (mm).

III.5.1. Evapotranspiration

Ce paramètre, l'évapotranspiration, est le plus important, il représente la somme des quantités d'eau exprimées en (mm) évaporées par la surface du sol et utilisées par les plantes (*Habes, 2013; Medouri et Sekfali, 2021*). L'évapotranspiration est composée de deux mots : évaporation et transpiration, et se définit comme les phénomènes d'évaporation de l'eau (phénomène physique) et de transpiration des plantes (phénomène biologique) (*Bouakkaz et Zentout, 2020*):

III.5.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

Le terme d'évapotranspiration potentielle (PET) désigne la quantité maximale d'eau qui peut s'évaporer à partir des sols, des surfaces d'eau libre et transpirer par les organismes vivants sur une surface limitée et pendant une période définie. Pour l'estimation de l'évapotranspiration, on a utilisé la formule proposée par C.W. Thornthwaite en 1948, qui est basée principalement sur la température de l'air (*Rezaiki et Zagher, 2019*).

$$ETP = 16[10T/I]^a k$$

Avec: $i = (T/5)^{1.514}$, $I = \sum i^{12} = 122.21$ $I = 121.37$

$a = 1.6 (I/100) + 0.5 = 2.45$

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle (mm).

a : paramètre arbitraire lié à la température. **T** : Température moyenne mensuelle (C°).

i : Indice thermique mensuel. **I** : Somme des indices thermiques mensuels.

K : Coefficient d'ajustement mensuel.

III.6. Bilan hydrologique de Thornthwaite

Cette méthode, la plus utilisée pour les climats subhumides et semi-arides, consiste à calculer l'évapotranspiration mensuelle réelle (ETR) à partir des précipitations mensuelles moyennes, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la réserve facilement utilisable (RFU) contenue dans le sol, nécessaire au bon fonctionnement physiologique des plantes (*Benazzedin et Meziti, 2020*).

Le calcul de l'évapotranspiration réelle par la méthode Thornthwaite est lié au volume des précipitations de trois manières (*tab.III.3*):

- **1^{ère} cas:** $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$: Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation (un sol saturé, lorsqu'il a absorbé une lame d'eau équivalente à 100 mm de précipitations), le surplus représentera le ruissellement de surface.
- **2^{ème} cas :** $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$: Dans ce cas, les réserves du sol seront utilisées jusqu'à ce que l'ETP soit satisfaite.
- **3^{ème} cas:** $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$: Dans ce cas, il y aura un déficit qui représentera la quantité d'eau apportée pour l'irrigation (déficit agricole).

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des calculs du bilan hydrique de la station de Touggourt.

Tab. III.3 : Bilan hydrique selon Thornthwaite (station de Touggourt ; 1975-2020)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
P (mm)	6.41	4.98	8.96	5.47	11.12	3.51	8.31	5.5	3.41	0.75	0.57	1.8	60.79
T(C°)	29.26	23.22	16.3	11.73	10.29	13.12	16.65	21.5	26.35	31.53	34.44	33.9	/
I	14.51	10.22	5.98	3.63	2.98	4.30	6.17	9.10	12.38	16.24	18.57	18.13	122.21
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	/
ETP (mm)	139.93	74.78	27.86	11.72	9.13	16.18	35.15	70.23	127.18	199.04	252.5	227.2	1193.4
ETR (mm)	6.41	4.98	8.96	5.47	9.13	5.5	8.31	5.5	3.41	0.75	0.57	1.8	60.79
RFU100 mm	0	0	0	0	1.99	0	0	0	0	0	0	0	/
Da (mm)	133.52	69.8	18.9	6.25	0	10.68	26.84	64.73	123.76	198.29	250.58	224.22	1127.57
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	/

T : Température mensuelle (C°). **P** : Précipitations mensuelles (mm). **I** : Indice Thermique.

K : Coefficient de latitude. **ETP** : Evapotranspiration potentielle (mm). **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm). **RFU** : Réserve facilement utilisable (mm). **DA** : Déficit agricole (mm). **EX** : Excédent (mm).

Sur la base du bilan hydrique établi par la formule de Thornthwaite sur la période de 1975 à 2020 (*tab.III.3*), on constate que l'ETP est supérieure aux précipitations tout au long de l'année excepté pour le mois de janvier où les précipitations deviennent supérieures à l'ETP. La moyenne annuelle de l'évapotranspiration potentielle est de 1193.40 mm, atteignant son maximum en juillet avec 251.15 mm. Pendant la majeure partie de l'année, les précipitations sont égales à l'ETR, à part les mois de janvier et février. En effet, l'ETR a une moyenne annuelle d'environ 60.79 mm. La RFU n'est formée qu'en janvier avec une valeur de 1.99 mm, elle est nulle par ailleurs pour le reste de l'année. Ceci a donné lieu à un déficit agricole annuel d'environ

1127.57 mm, qui est observé tout au long de l'année à l'exception du mois de janvier, ce qui implique que l'irrigation est indispensable presque toute l'année.

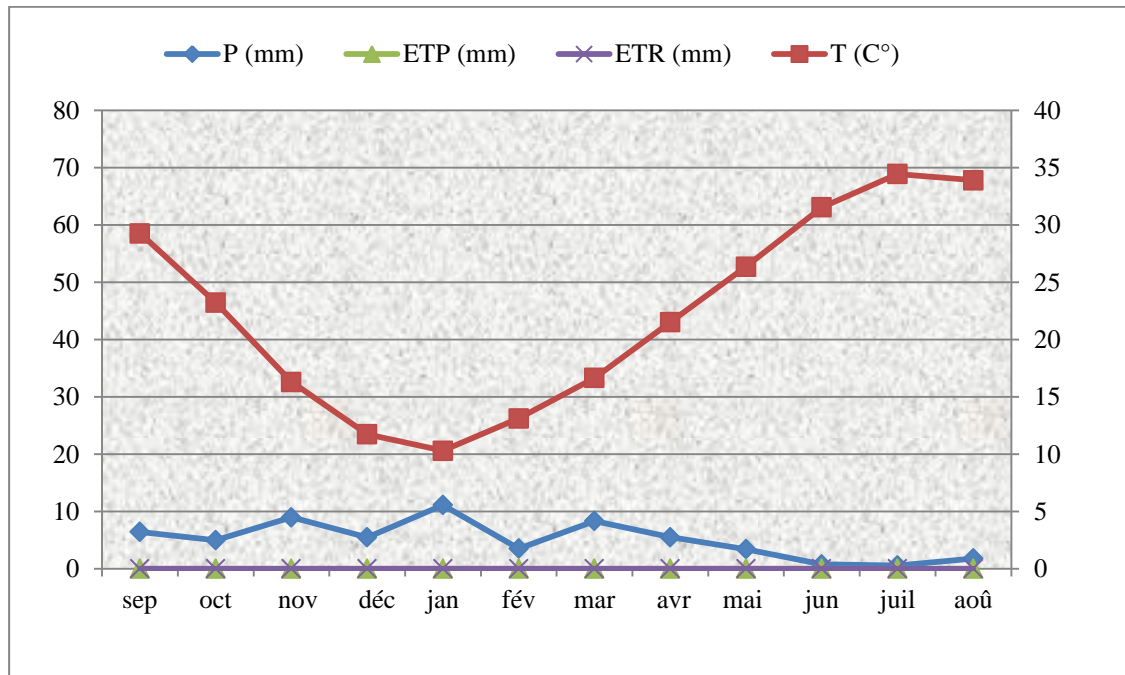


Fig.III.6 : Bilan hydrique selon Thornthwaite (station de Touggourt ; 1975-2020)

III.6.1. Evapotranspiration réelle (ETR)

La somme de l'évapotranspiration réelle et de la transpiration réelle pour une zone donnée est appelée, par définition, évapotranspiration réelle effective. Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle. La formule de Turc permet d'évaluer directement l'évapotranspiration annuelle réelle d'un bassin à partir des précipitations annuelles et de la température moyenne annuelle (tab.III.4).

$$ETR = \frac{P}{0.9 + \sqrt{(P/L)^2}}$$

$$\text{Avec : } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

ETR : évapotranspiration réelle en (mm). **P** : Précipitations moyennes annuelles en (mm)

L : paramètre arbitraire lié à la température. **T** : Température moyenne annuelle (°C).

Tab. III.4: ETR selon Turc à la station de Touggourt (1975 -2020)

Station	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm)
Touggourt	60.79	22.35	1416.96	64.01

Selon les résultats obtenus par méthode de Thornthwaite (*tab.III.3*) et la formule turque (*tab.III.4*) et, les facteurs climatiques de la zone d'étude reflètent un équilibre Hydroclimatiques constant en déficit qui favorise l'évaporation de toute la quantité précipitée ($ETP = P$) avec un déficit moyen d'environ 1127.57mm. Ce témoin est une expression approximative des besoins en eau d'irrigation des cultures, en tenant compte de la formule de Thornthwaite qui tend à sous-estimer l'ETP, notamment dans les régions arides et semi-arides, où elle n'existe pas, sans tenir compte de l'accentuation de l'ETP due aux phénotypes épisodiques (*Bouznad, 2009 ; Rezaiki et Zaghad, 2019*).

III.7.Estimation du ruissellement

On peut définir le ruissellement comme le phénomène physique d'écoulement non organisé de l'eau dans un bassin versant suite à des précipitations. Ce phénomène dépend de la pente du terrain et du réseau d'eau météorique. Une faible quantité de cette eau fera l'objet d'une infiltration qui alimentera les eaux souterraines (*Hireche et Layadi, 2020*). Le calcul du coefficient de ruissellement (R) est effectué par la formule de M.J Tixeront et Berkaloff, avec comme condition ($P < 600\text{mm}$) selon la formule suivante

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

R : Ruissellement. **P** : Précipitations.

ETP : potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite.

Dans le tableau ci-dessous (*tab.III.5*) sont présentées les valeurs d'évapotranspiration et de ruissellement pour la station de Touggourt (1975-2020).

Tab.III.5 : Ruissellement par la formule de Tixeront-Berkaloff

Station	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
Touggourt	60.79	1193.4	0

III.8.Estimation de l'infiltration

On désigne par infiltration la quantité d'eau qui traverse la surface du sol, renouvelant les stocks d'eau souterraine et maintenant le taux d'écoulement des eaux souterraines, après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous-sol. L'infiltration est difficile à calculer, quand elle n'est pas mesurée sur le terrain (*Hireche et Layadi, 2020*), elle a été estimée à partir de l'équation du bilan hydrique :

$$P = ETR + R + I \quad \Rightarrow I = P - R - ETR$$

Avec :

I : l'infiltration .**P**: Précipitations annuelles (mm).

R : Ruissellement annuelle (mm). **ETR**: Evapotranspiration réelle.

Les résultats du calcul de l'infiltration sont donnés dans le tableau suivant :

Tab. III. : Estimation de l'Infiltration en (mm).

Paramètres	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Valeurs	60.79	60.79	0	0

III.9.Conclusion

Le climat de la région d'Oued Righ est caractérisé par un climat désertique extrêmement sec. Il est caractérisé par des hivers doux et des étés secs et chauds, avec des précipitations faibles et irrégulières. Pour la période 1975 - 2020, la zone d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes d'environ 5.06 mm, la température annuelle moyenne d'environ 22.35C° avec un maximum de 34.44C°. L'évapotranspiration potentielle (ETP) et le potentiel d'évaporation réel (ETR) déterminés par la méthode de Thornthwaite sont respectivement de 1188.36 mm et 60.79 mm. En ce qui concerne le bilan, il est déficitaire, l'excédent est nul et la réserve (RFU) reste épuisée tout au long de l'année malgré une valeur de 1.99 mm obtenue en mois de janvier.

Chapitre IV

Hydrochimie et aptitude des eaux à l'irrigation

IV. 1. Introduction

L'eau est un élément très important pour toute activité humaine (activités économiques, agricoles ou industrielles), elle est indispensable au maintien de tous les écosystèmes et de toutes les formes de vie (Aissaoui et Tlidjane, 2020). En effet, dans le Sahara algérien, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande en eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie, nécessite le recours aux ressources en eau profondes (Complexe Terminal « CT » et Continental Intercalaire « CI »), qui sont les seules ressources en eau dans la région du Sahara septentrional (Bouselsal et al. 2014).

Le continentale intercalaire est l'aquifère le plus profond et le plus important dans la région d'oued Righ. Ses eaux sont caractérisées par un gradient thermique variant entre 50-70°C, une dureté excessive et une forte minéralisation atteignant 2 g/l (Zahi et al, 2011), ce qui nécessite un refroidissement de ces eaux avant leur utilisation en irrigation. L'eau d'irrigation, quelle que soit son origine et notamment les eaux souterraines, n'est jamais pure car elle contient des sels dissous qui peuvent affecter le sol et les cultures agricoles en fonction de leur minéralisation. Il est donc nécessaire de suivre les bonnes pratiques en ce qui concerne la nature des sels minéraux. La qualité chimique de l'eau d'irrigation doit être examinée en fonction de son effet sur le sol et les plantes (Ouannas, 2019).

L'objectif de cette section est de vérifier l'aptitude de la nappe continentale intercalaire à l'irrigation, avant et après refroidissement. Dans la vallée de l'oued Righ, cette dernière est exploitée par 26 forages, dont 16 sont utilisés pour l'irrigation et équipés de stations de refroidissement. En effet, pour notre étude, des échantillons ont été prélevés dans seulement 12 forages équipés de stations de refroidissement, soit un total de 24 échantillons (fig.IV.1). Par ailleurs, l'étude Hydrochimique est basée sur l'interprétation des résultats des mesures in situ des paramètres physico-chimiques (pH, Salinité, conductivité électrique et température) à l'aide d'une valise multi-paramètres (Multi 350i/SET) et des analyses chimiques effectuées en laboratoire sur les éléments chimiques majeurs suivants :

- Les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ .
- Les anions : Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-} .

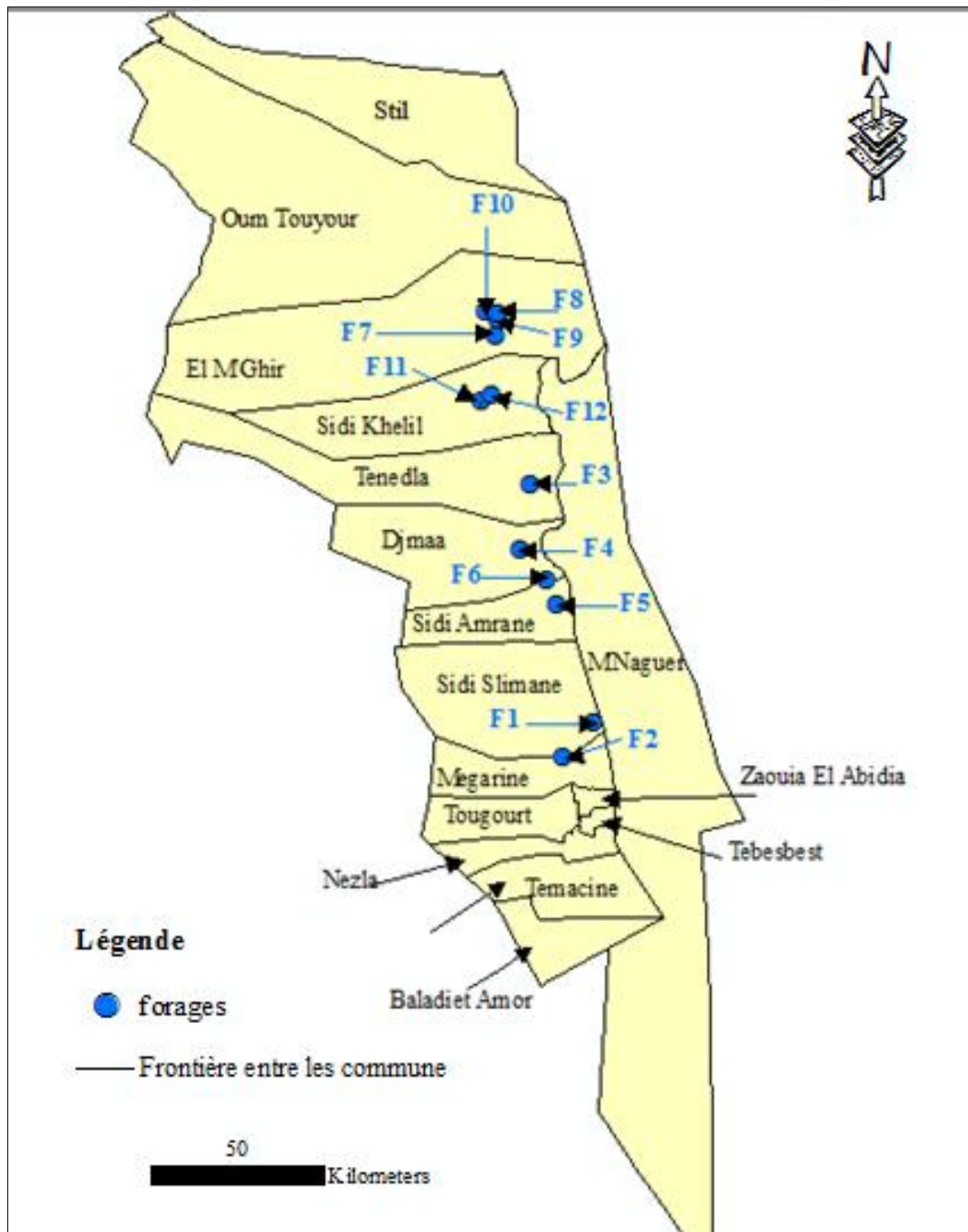


Fig. IV.1 : Inventaire des points de prélèvement dans la vallée d'Oued Righ

IV.2. Caractérisation physiques-chimique

IV.2.1. Faciès Hydrochimique

Afin d'identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication de l'aspect qualitatif des eaux souterraines de la région, l'interprétation des résultats de l'analyse chimique des éléments majeurs Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- était nécessaire. Et pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé la formule ionique pour le calcul des quantités en réaction et ensuite la classification des ions en utilisant le diagramme de Piper et le diagramme de Stiff pour la représentation graphique des résultats (Rezaiki et Zaghad, 2019).

IV.2.2. Formule ionique

Cette formule a pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction (en méq /L) des groupes anioniques et cationiques et de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux et de les classer selon une même origine (Zahi, 2014), elle consiste à calculer le pourcentage de chaque ion (r%) par rapport à la somme des autres ions (C) :

$$r\% = (c \cdot 100) / C$$

Avec : **c** : Concentration de l'ion considéré en méq/l. **C** : Somme des ions en méq /l.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (tab.IV.1), qui représente les faciès chimiques de l'eau chaude et après refroidissement.

Tab. IV.1 : Classification hydrochimique des eaux du CI selon la formule ionique

Echantillon	Formule ionique	Faciès	
F1, S1, F2, F3 F4, S4, F6, S5	r% SO ₄ ⁻² > r% Cl ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ > r% CO ₃ ⁻ r% Na ⁺ > r% Ca ⁺² > r% Mg ⁺² > r% K ⁺	Sulfate	Sodique
F7, S6, F8, S7, F9, S8, F10, S9, F11, S10, S11, S12	r% SO ₄ ⁻² > r% Cl ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ > r% CO ₃ ⁻ r% Ca ⁺² > r% Na ⁺ > r% Mg ⁺² > r% K ⁺		Calcique
F5, S2, F12	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻² > r% HCO ₃ ⁻ > r% CO ₃ ⁻ r% Na ⁺ > r% Ca ⁺² > r% Mg ⁺² > r% K ⁺	Chloruré	Sodique
S3	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻² > r% HCO ₃ ⁻ > r% CO ₃ ⁻ r% Ca ⁺² > r% Na ⁺ > r% Mg ⁺² > r% K ⁺		Calcique
F: Forage		S: station de refroidissement	

IV.2.2.1. Diagramme de piper

Le diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour la comparaison des compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet de représenter les cations et les anions sur deux triangles définis, dont les côtés indiquent les teneurs relatives de chacun des principaux ions par rapport à la somme des ions (Bentadjine et Boutaleb, 2021).

Sur la base du diagramme de Piper, nous avons présenté les données physico-chimiques de la nappe du Continentale Intercalaire de la région de Oued Righ à travers 24 échantillons (12 échantillons d'eau avant refroidissement et 12 stations d'eau après refroidissement). Il en ressort que la famille chimique est essentiellement de nature chlorure- sulfate calcaire et magnésien (Fig.IV.2).

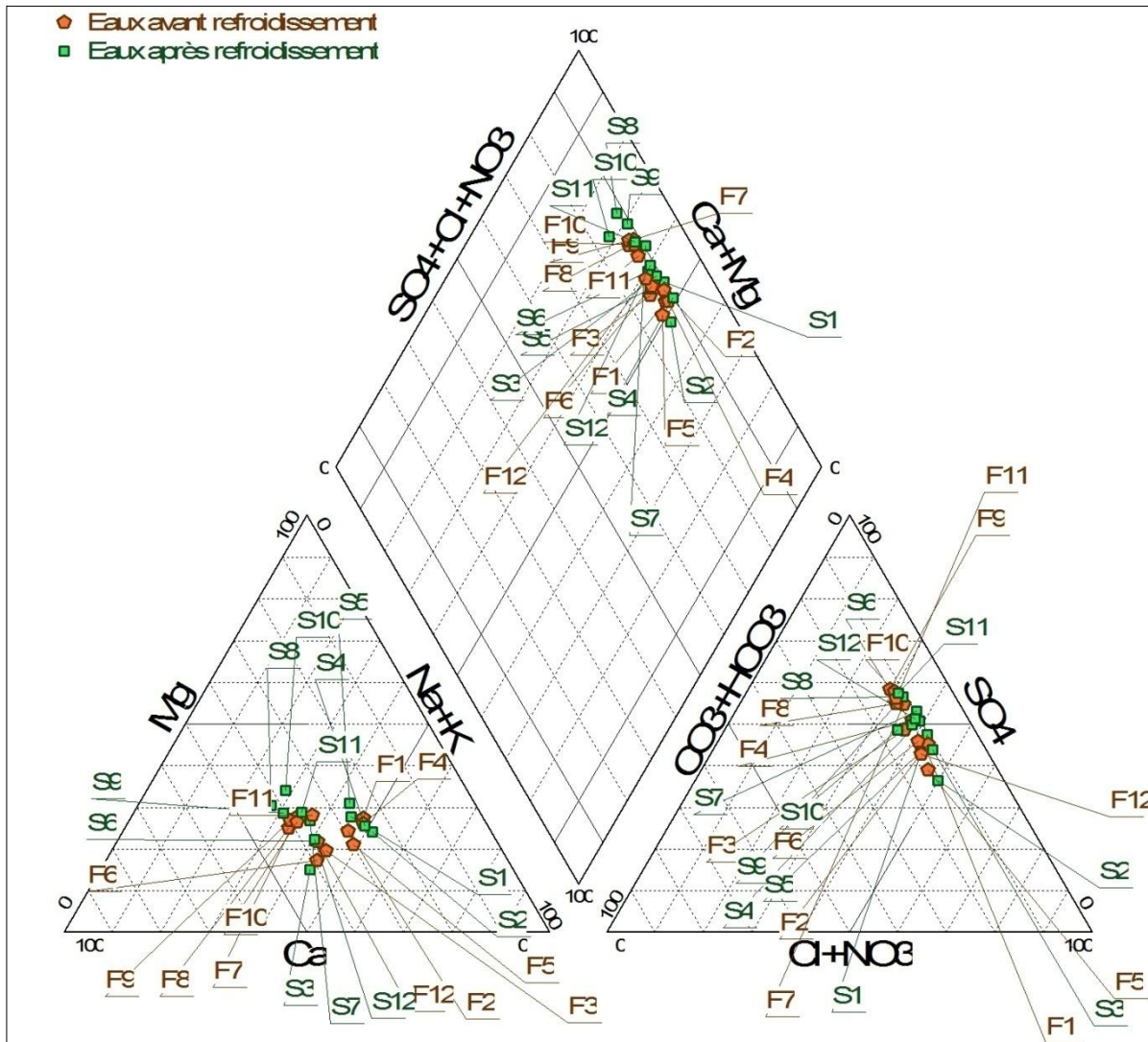


Fig.IV.2.Faciès chimiques des eaux souterraines selon le diagramme de Piper

IV.2.2.2.Diagramme de Stiff

Le diagramme de Stiff est un graphique individuel qui permet de caractériser rapidement la chimie d'une eau en fonction de la concentration en certains éléments majeurs. Il est composé de trois axes horizontaux gradués exprimant les concentrations en méq/l et un axe vertical à l'origine, dont les cations sont représentés à gauche (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2}) et les anions à droite (Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{-2}) (Hadeif et Hizir, 2018). D'après le diagramme Stiff, nous pouvons voir qu'avant le refroidissement, il y a deux faciès, l'un de sulfaté sodique et l'autre sulfaté calcique, alors qu'après le refroidissement, un troisième type d'eau apparaît avec un faciès chloruré sodique (fig.IV.3).

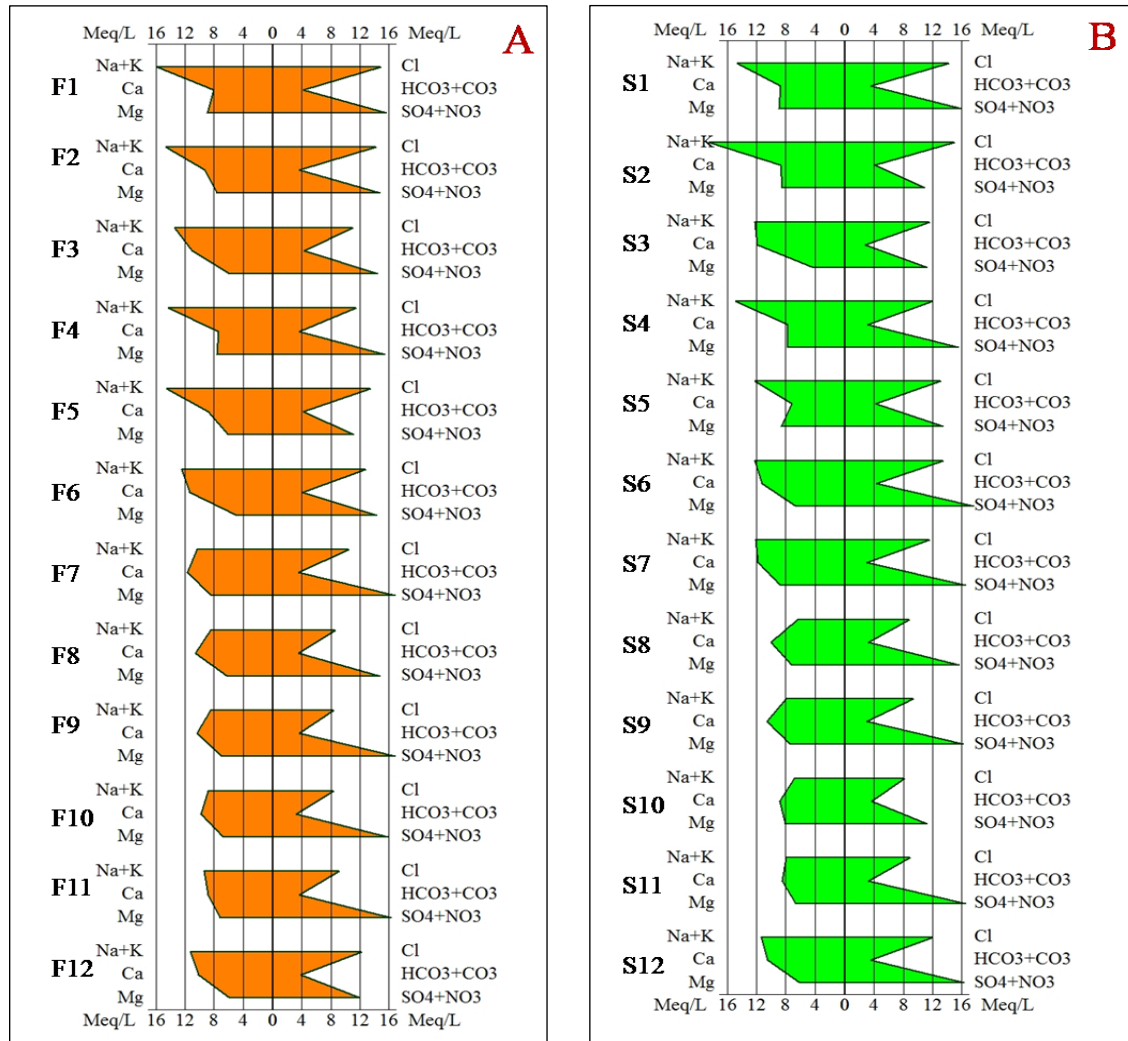


Fig. IV.3. Facies chimique selon le diagramme de Stiff : (A) forage (B) station de refroidissement.

IV.3. Paramètres physico-chimiques

Le tableau IV.2 présente les résultats et les statistiques des eaux souterraines dans la région d'Oued Righ en termes de valeurs maximales (max), minimales (min), d'écart type (SD) et de moyenne.

Tab. IV.2 : Paramètres physico-chimiques

	Unité	Avant le refroidissement				Après le refroidissement			
		Min	Max	Moy	Eca-ty	Min	Max	Moy	Eca-ty
CE	µs /cm	2.11	2.85	2.43	0.23	2.13	2.89	2.49	254.38
pH	/	7.53	9.88	8.85	0.66	7.65	10.51	9.05	0.95
Ca ²⁺	mg/l	150.4	236.8	197.6	26.17	144.8	239.20	194.27	1.58
Mg ²⁺	mg/l	60	108.96	83.6	13.82	51.36	108.48	89.92	1.38
Na ⁺	mg/l	167.59	333.10	242.87	60.94	119.31	395.17	233.10	3.61
K ⁺	mg/l	51.87	56.74	53.777	1.43	51.87	57.28	54.94	0.04
HCO ₃ ⁻	mg/l	200.08	263.52	230.99	20.42	165.92	263.52	208.21	0.52
Cl ⁻	mg/l	298.2	525.4	398.78	81.17	291.10	532.50	409.43	2.24
SO ₄ ⁻	mg/l	534.62	804.91	712.34	84.34	524.73	841.17	707.40	2.38
CO ₃ ⁻	mg/l	0	0	0	0	-	12.00	5.00	0.06

IV.3.1. La température (T °C)

La température de l'eau joue un rôle important, entre autres dans la solubilité des sels et des gaz. En outre, la température accélère les réactions chimiques et biochimiques et l'activité métabolique des organismes aquatiques. En outre, la valeur de ce paramètre est également influencée par les éventuels rejets d'eaux usées chaudes. Il est indispensable de la mesurer sur le terrain, car elle a tendance à s'adapter rapidement à la température ambiante (*De viller et al., 2005*). L'eau souterraine dans la CI est toujours chaude (eau thermale), pour être utilisée pour l'irrigation il faut la refroidir. La température de cette eau avant refroidissement est comprise entre 49.6°C et 61.5°C où la plus élevée est enregistrée au forage F8, tandis qu'après refroidissement elle est comprise entre 20,8°C et 38°C à l'exception des stations S8, S10 et S11 où la température reste supérieure à 50°C en raison de dysfonctionnements techniques au niveau de ces stations (*fig.IV.4*).

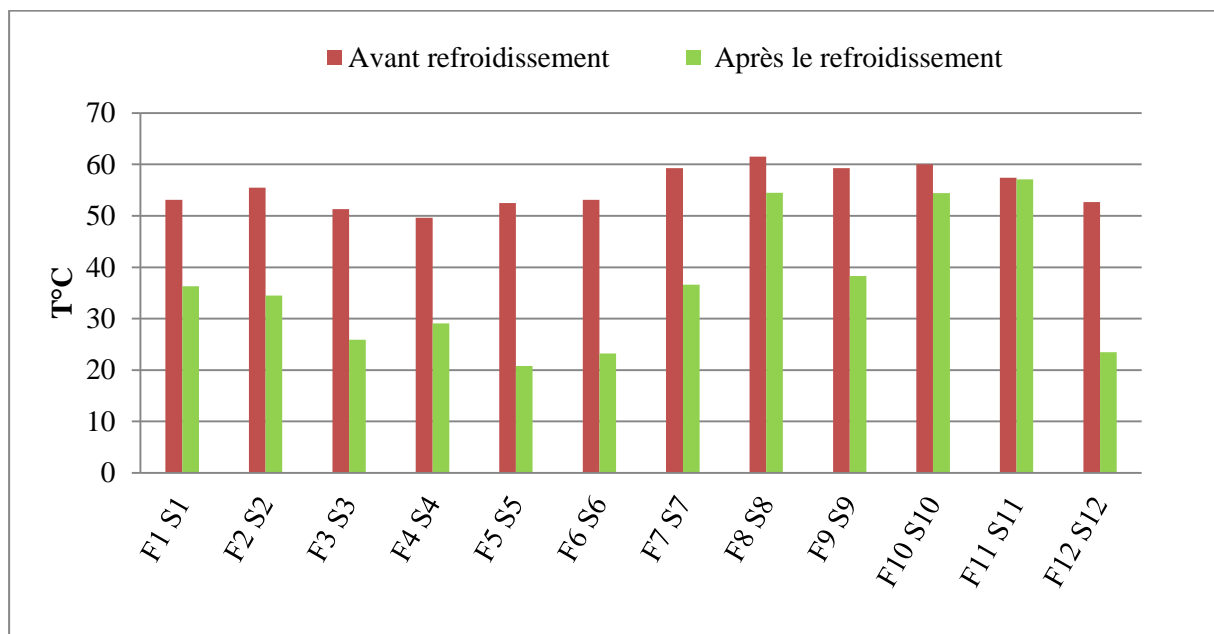


Fig. IV.4. Température des eaux du CI de la région d'Oued Righ (T°C)

IV.3.2. pH

Le pH de l'eau est défini selon la concentration des ions H^+ contenus dans la solution, il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu. Il conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques entre l'eau, le gaz carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates qui constituent des solutions tamponnées conférant à la vie aquatique un développement favorable (*Djouadi et Oubelaid, 2015 ; Hadeff et Hisiri, 2018*). Le pH de l'eau dans les forages est compris entre 7.53 et 9.88, alors qu'après le refroidissement il oscille entre 7.65 et 10.46 (*fig. IV.5*), ce qui signifie qu'il y a une augmentation du pH après le refroidissement en raison de l'augmentation du CO_3 .

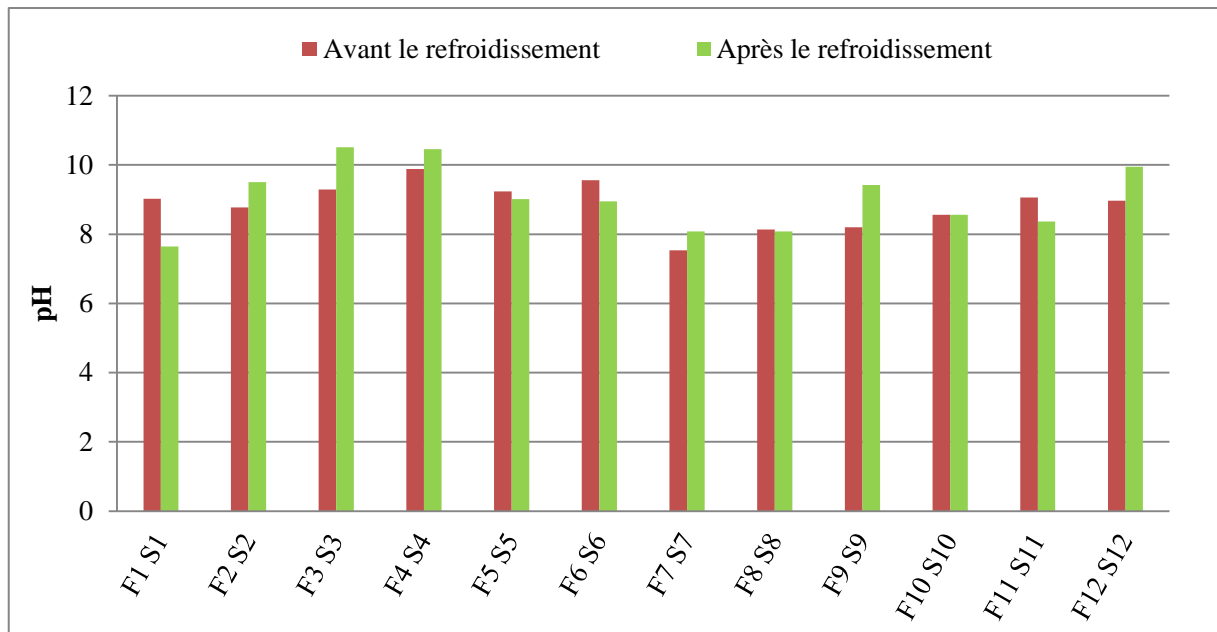


Fig. IV.5. Variation du pH des eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.3.3. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation, car elle reflète la concentration de tous les sels minéraux dissous. La mesure de la conductivité permet donc d'évaluer la quantité de sels dissous dans l'eau et de donner ensuite une idée globale de la minéralisation d'une eau (Hidaoui et Louannas, 2015).

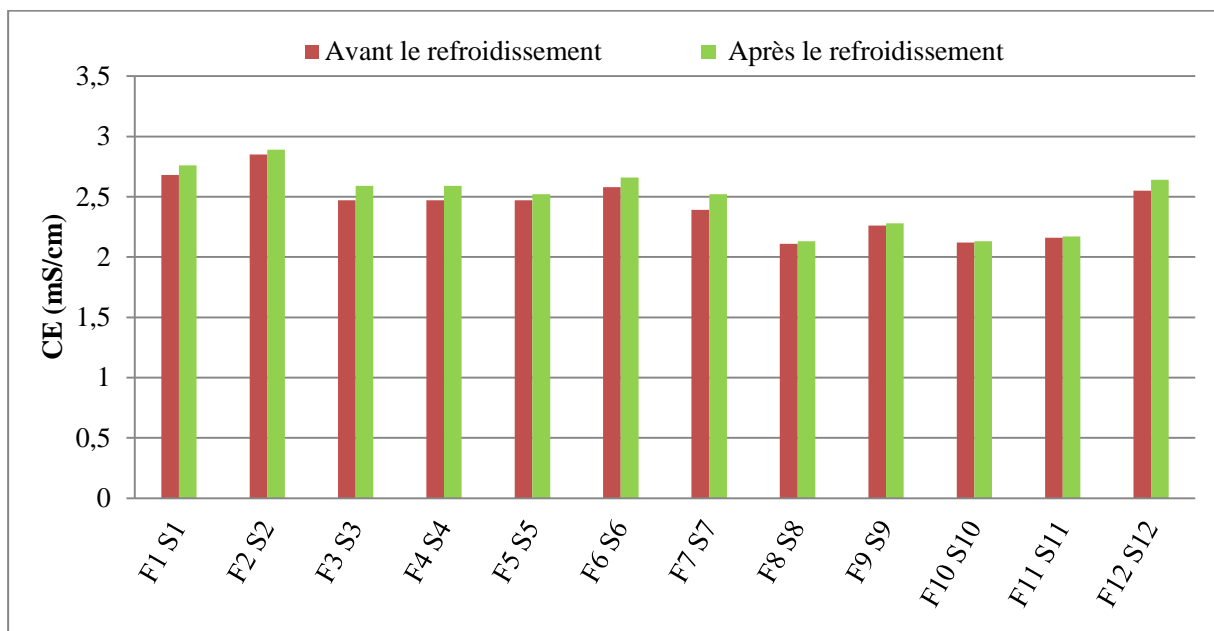


Fig. IV.6. Conductivité électrique des eaux du CI dans la région d'Oued Righ

Dans notre cas, la conductivité électrique varie entre 2.11 mS/cm et 2.85 mS/cm dans les eaux de la plupart des forages, alors qu'elle oscille entre 2.13 mS/cm et 2.89 mS/cm après refroidissement. Elle dépasse la norme de l'OMS (2.8 mS/cm) au niveau du forage (F2) et de leur station de refroidissement (S2) (fig.IV.6).

IV.3.4. La salinité

La qualité chimique de l'eau de l'aquifère continental est principalement définie par la lithologie des terrains traversés en profondeur (Zahi *et al*, 2011). Sa salinité est comprise entre 1.1 g/l et 1.5 g/l dans la plupart des stations et forages, tandis que la valeur maximale (>1.3) est enregistrée au niveau du forage F6 et de leur station de refroidissement S6 (fig. IV.7).

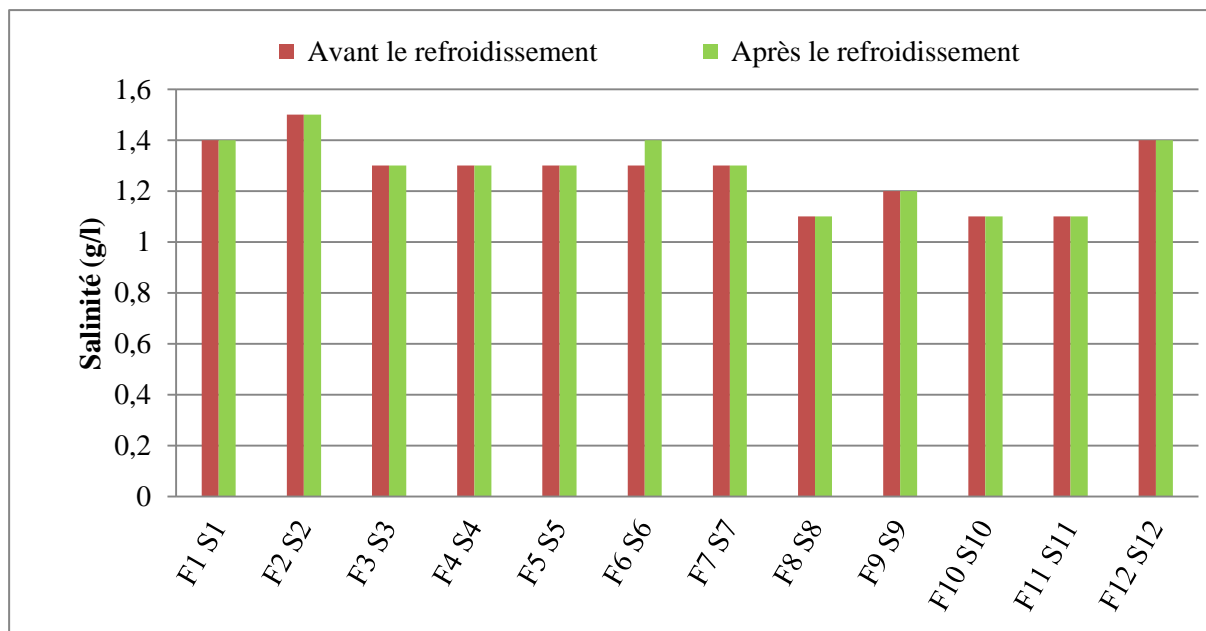


Fig. IV.7. Salinité des eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.4 Les cations

IV.4.1. Le calcium (Ca^{+2})

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature (Djouadi, 2015 ; Rezaiki et Zaghad, 2019). Leur présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) (Hidaoui et Louannas, 2015; Rezaiki et Zaghad, 2019).

Les valeurs de calcium des eaux du CI oscillent entre 150.4 mg/l 236.8 mg/l avant refroidissement et varient entre 144.8 mg/l à 239.2 mg/l après refroidissement (fig. IV.8). Elles ont dépassé la norme algérienne (200 mg/l) dans les forages (F3, F6, F7, F8, F9, F12) et leurs stations de refroidissement (S3, S6, S7, S8, S9, S12).

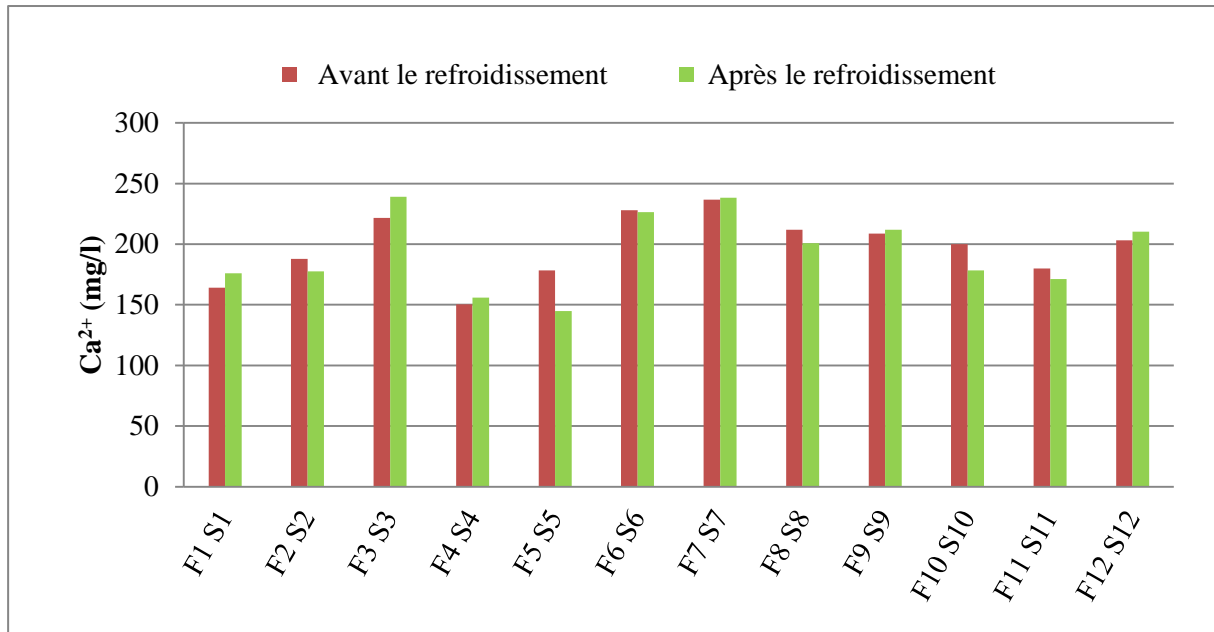


Fig. IV.8. Variation de Calcium des eaux du CI dans la région d'Oued Righ.

IV .4.2. Le magnésium (Mg^{2+})

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitique et des minéraux ferromagnésiens. La variation des concentrations du magnésium est presque similaire à celle du calcium (Gaagai, 2009 ; Rezaiki et Zaghad, 2019). La dureté manganésienne de l'eau représente ordinairement le tiers de la dureté totale (Sari, 2014 ; Rezaiki et Zaghad, 2019).

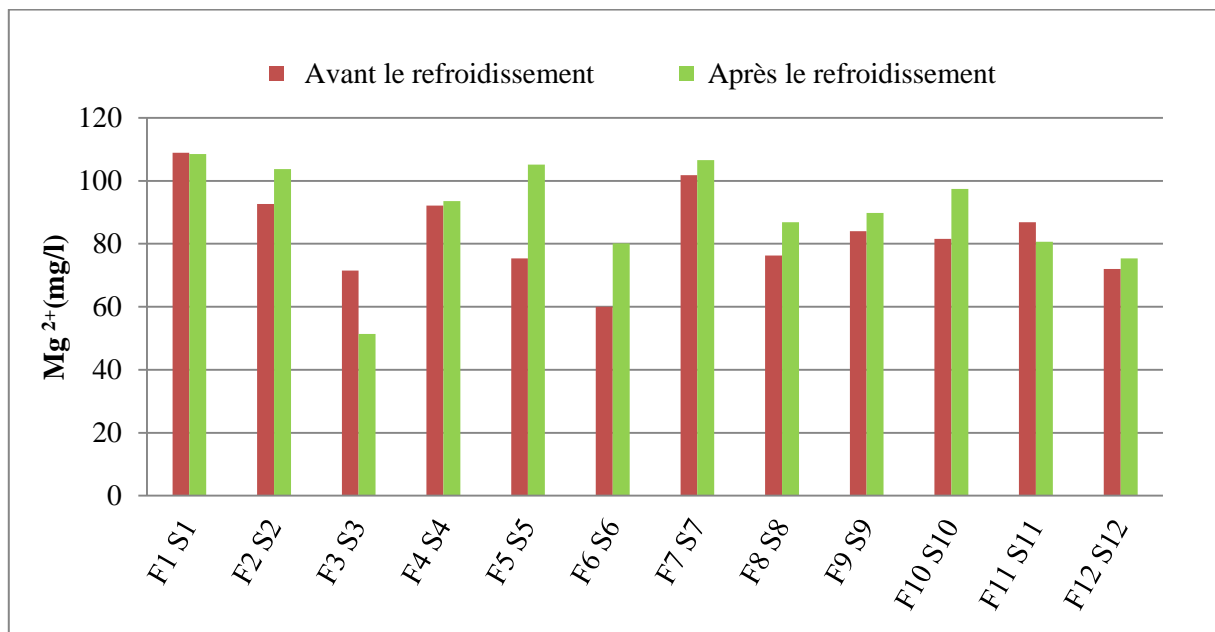


Fig. IV.9. Variation de Magnésium des eaux du CI dans la région d'Oued Righ

D'une manière générale les teneurs en Mg^{2+} sont fluctuantes dans la gamme des normes algériennes (<150mg/l). Elles varient entre 60 mg/l et 108.96 mg/l avant refroidissement, alors qu'aux stations (après refroidissement) elles oscillent entre 51.36 mg/l et 108.48 mg/l (fig.IV.9).

IV.4.3. Sodium (Na^+)

La présence de sodium dans l'eau varie d'une région à l'autre, et son origine est principalement liée au lessivage des dépôts évaporitiques par évaporation et échange de bases (Djouadi, 2015 ; Hadeef et Hizir, 2018). En effet, les eaux très riches en sodium deviennent saumâtres, prennent un goût désagréable et ne peuvent être consommées (Sari, 2014 ; Hadeef et Hizir, 2018).

La teneur en sodium des eaux du Continental Intercalaire dépasse la norme algérienne pour l'eau potable (200 mg/l) dans la plupart des forages à l'exception des forages (F8, F9, F10, F11). La teneur maximale est de l'ordre de 333.30 mg/l enregistrée dans le forage F1, tandis que la valeur minimale est de 167.59 mg/l observée au forage F8.

Suite au refroidissement, une augmentation des teneurs en sodium est observée au niveau des stations suivantes : S2, S4 et S3, S5, S6, S7, avec respectivement des concentrations de 395 mg/l, 312 mg/l et 250.34 mg/l. Cette augmentation de la teneur en Na^+ est due au phénomène d'échange cationique (Chaib, 2013 ; Rezaiki et Zaghad, 2019).

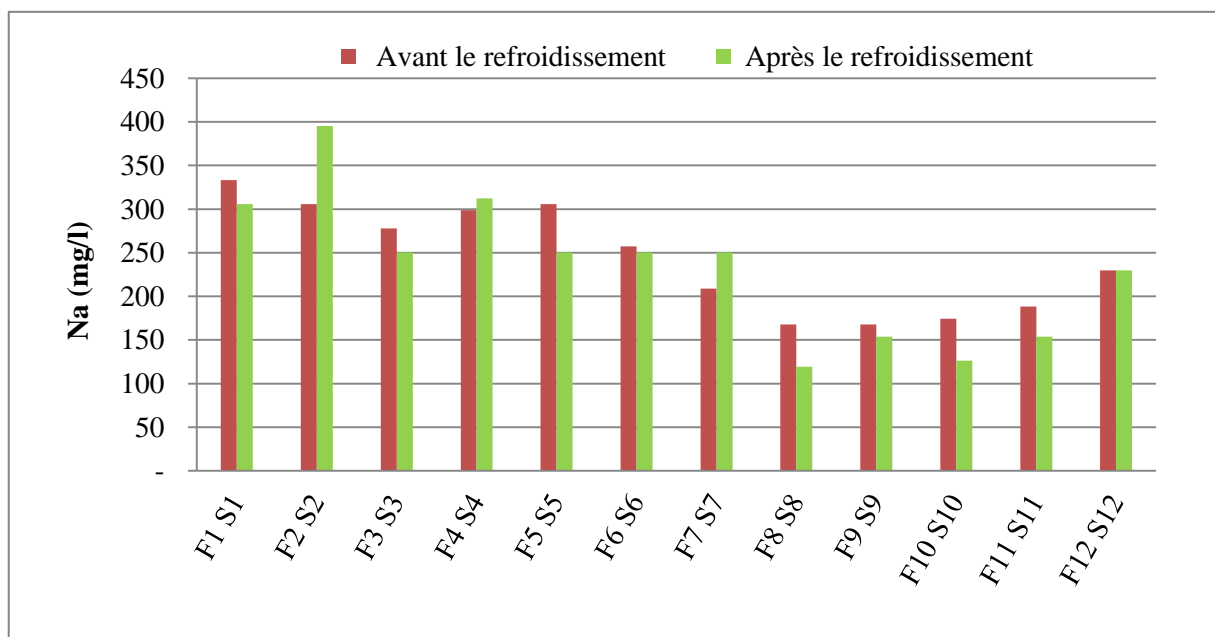


Fig. IV.10. Variation sodium (Na) des eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.4.4. Potassium (K^+)

Très abondant sur terre, le potassium (K^+) est peu présent dans l'eau, en raison de sa facilité à être adsorbé et recombéné dans les sols, notamment sur les argiles. La principale source de potassium est constituée par les roches cristallines, dans des minéraux moins altérables que ceux contenant du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et la dissolution des engrais chimiques (NPK).

Les teneurs en potassium sont quasiment stables dans les eaux du Continental Intercalaire, elles varient entre 51 et 57 mg/l, elles dépassent largement la norme algérienne (12 mg/l) (fig. IV.11),

ce qui traduit un échange entre les formations qui passe d'un niveau essentiellement gréseux à un autre carbonaté dolomitique (Aptien) (Zerrouki, 2017).

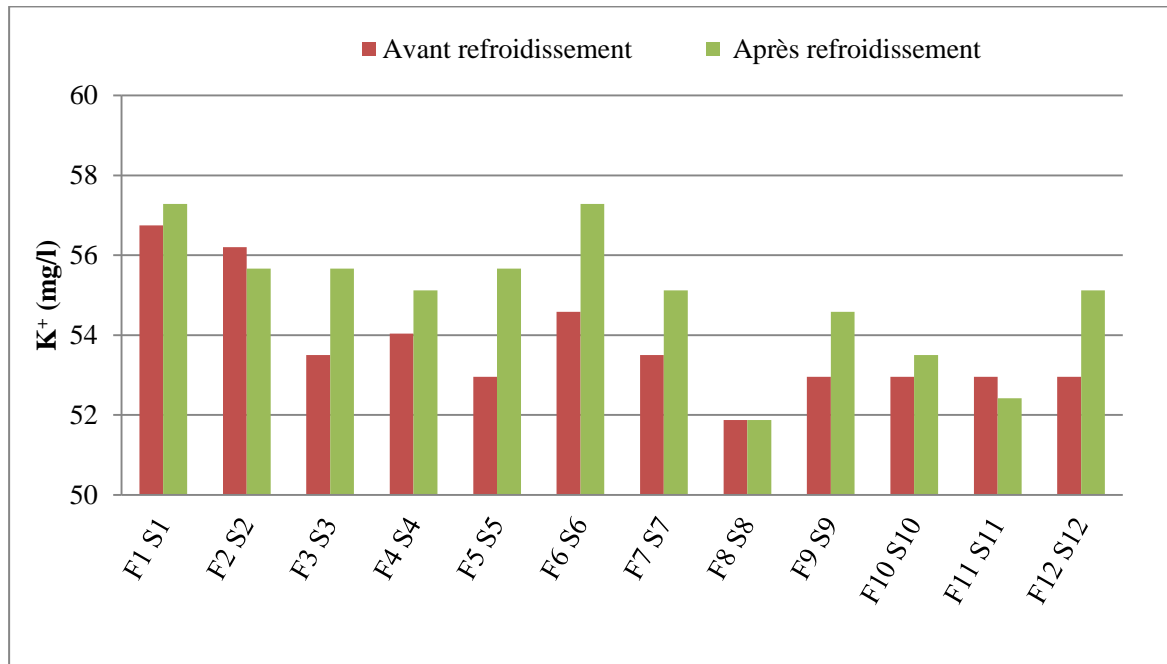


Fig. IV.11. Variation de potassium dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.5.les anions

IV.5.1.Les Carbonates (CO_3^{2-})

La solubilité apparente des carbonates de calcium varie avec le pH, elle commence à précipiter à $\text{PH} = 8.3$ à partir de l'anion carbonate d'hydrogène (Rezaiki et Zaghad, 2019). Les ions carbonates sont directement liés à la température et au pH de l'eau, car ils n'apparaissent qu'après l'abaissement de la température (refroidissement) et l'augmentation du pH pour atteindre ensuite 12 mg/l, sachant que les teneurs sont nulles avant le refroidissement. (Fig.IV.12). Le rôle des ions bicarbonate est important en tant que source d'ions carbonate, qui facilitent la précipitation du Ca^{2+} sous forme de CaCO_3 lorsque la température est abaissée (phénomène d'entartrage).

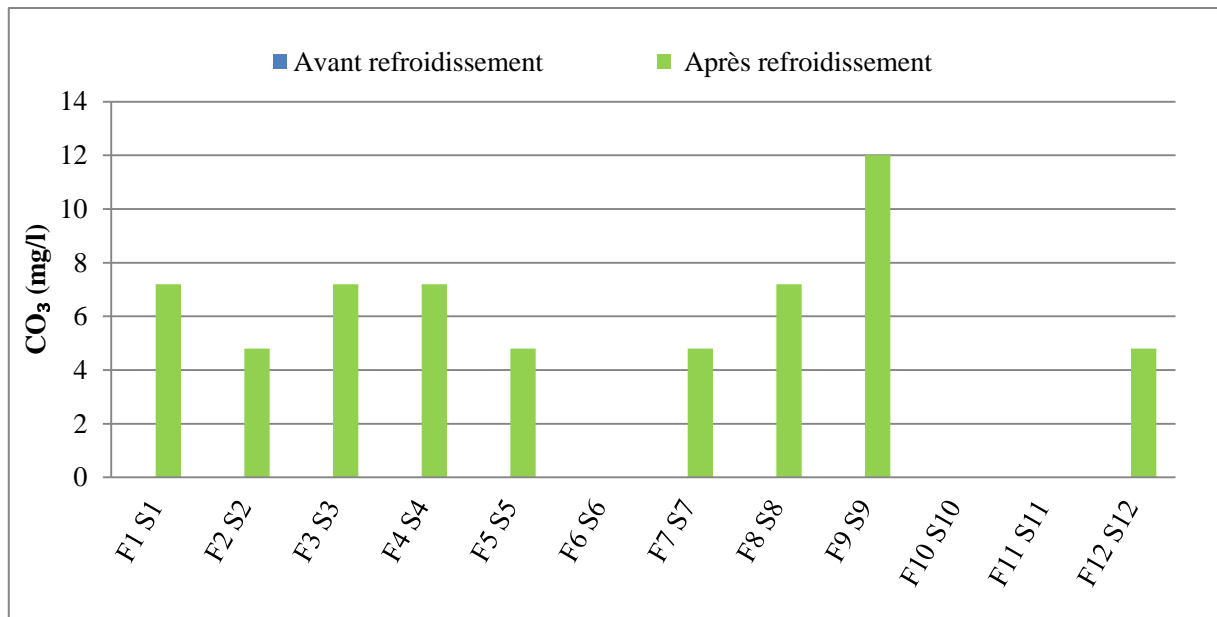


Fig. IV.12. Variation des carbonates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.5.2. Les Bicarbonates (HCO_3)

Les ions bicarbonate proviennent généralement de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le dioxyde de carbone (Hadeef et Hizir, 2018), leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et du gypse. En ce qui concerne les teneurs en bicarbonate, elles oscillent entre 195 et 263 mg/l (fig.IV.13), parfois avec une légère diminution des teneurs après refroidissement, suivie d'une augmentation des valeurs de pH qui dépassent 10 après refroidissement de l'eau. Cette dernière, associée à la pression élevée des eaux, provoque la transformation des bicarbonates en carbonates et la libération de CO_2 .

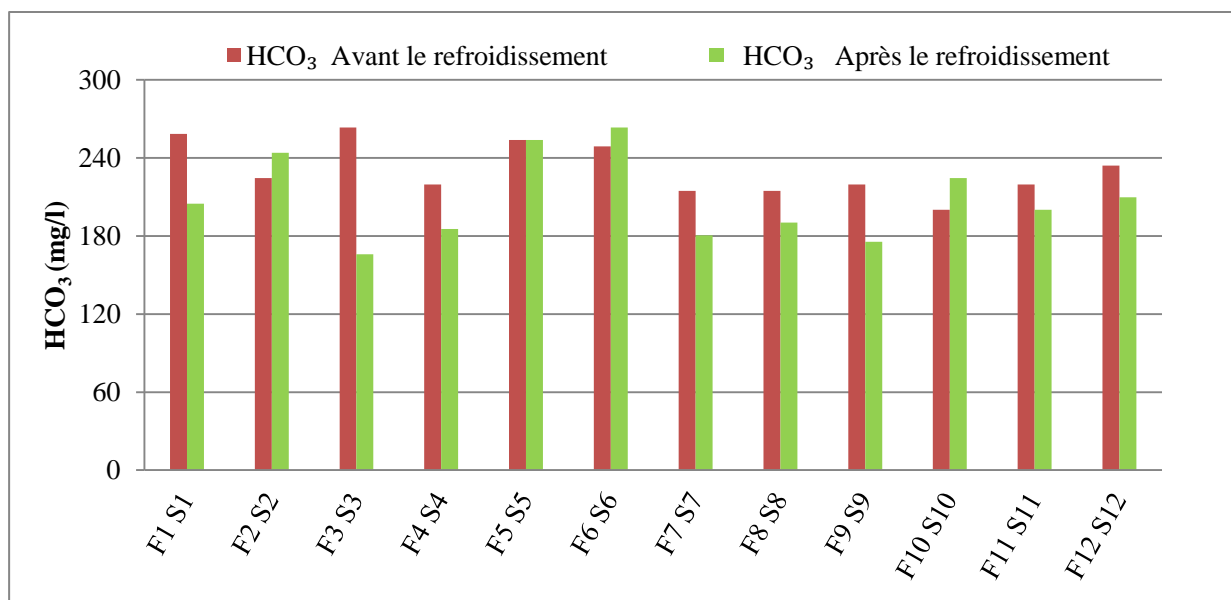


Fig.IV.13. Variation des bicarbonates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.5.3. Les chlorures (Cl⁻)

Cet ion est presque toujours présent dans l'eau en proportions variables, soit par dissolution des sels naturels par lessivage des sols salés, soit par évaporation intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol, soit par les rejets d'eaux domestiques ou industrielles ainsi que les engrais ou pesticides chimiques utilisés pour l'agriculture (Debieche, 2002 ; Hadeif et Hizir, 2018). L'histogramme des teneurs en chlorures (fig.IV.14) montre que les teneurs varient entre 298mg/l et 525mg/l. Elles dépassent la norme algérienne (500mg/l) dans deux forages (F1 et F2), respectivement avec 504 et 525 mg/l. Elles excèdent la norme algérienne (500 mg/l) pour deux forages (F1 et F2), avec respectivement 504 et 525 mg/l. Ces valeurs élevées des teneurs en Cl⁻ sont attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les évaporites (Chaib et al, 2013; Rezaiki et Zaghad, 2019).

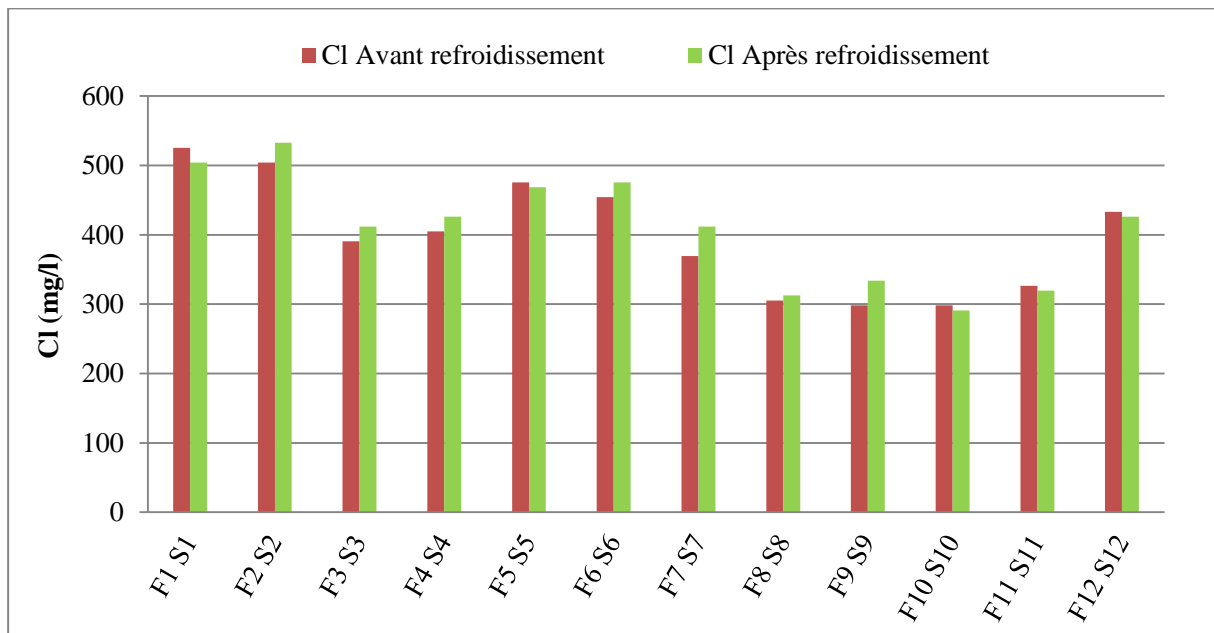


Fig. IV.14. Variation des chlorures dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.5.4. Sulfates (SO₄²⁻)

Les sources de sulfates dans l'eau sont variées et sont associées aux eaux de pluie (évaporation de l'eau de mer) et à la dissolution des roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypsifères. La teneur en sulfates de tous les forages excède la norme algérienne (400 mg/l), avec un maximum de 800 mg/l dans les forages F7 et F9 et un minimum de 534 mg/l à Sidi Amrane (F5) (fig.IV.15). Ces fortes teneurs en sulfates dans l'eau proviennent principalement de la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄, H₂O), de l'anhydrite et des évaporites.

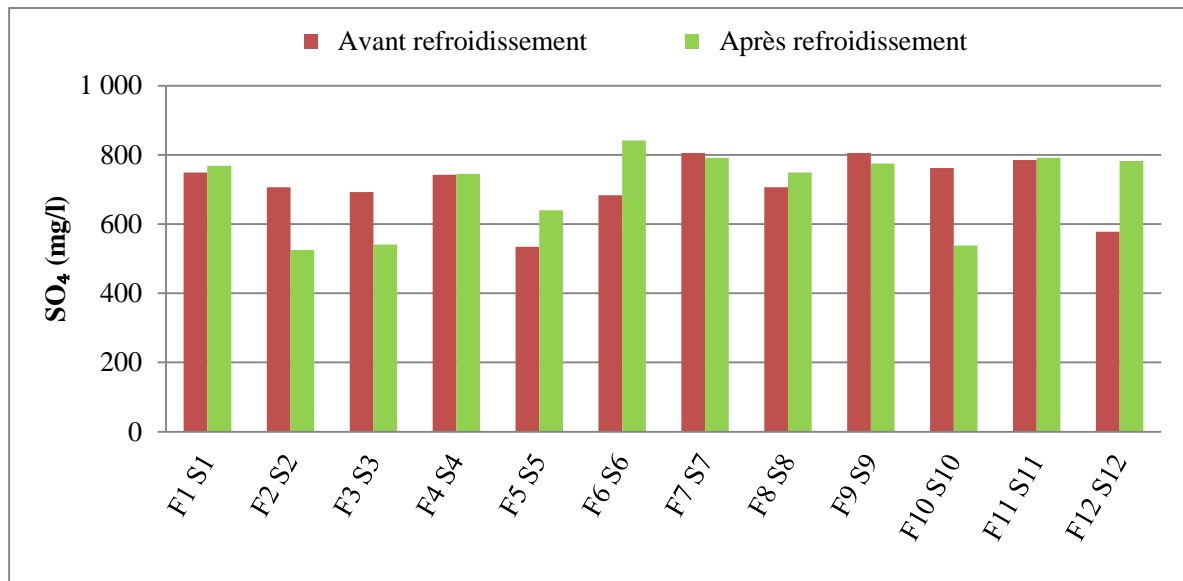


Fig. IV.15. Variation des sulfates dans les eaux du CI dans la région d'Oued Righ

IV.6. Généralité sur l'irrigation

On appelle irrigation l'application d'eau sur le sol dans le but de refroidir le sol et l'atmosphère et d'obtenir ainsi les conditions les plus favorables à la croissance des plantes. Cependant, quelle que soit l'origine de l'eau (rivière naturelle, nappe phréatique, eau de barrage) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression), le problème est de savoir comment répartir cette eau sur le sol afin que les plantes en tirent le maximum de bénéfices. Toutefois, le mode de répartition de l'eau sur le sol ne doit pas toujours répondre à ce critère de production maximale, il faut alors essentiellement envisager un choix détaillé de la méthode et de la technique d'irrigation et une compatibilité avec les contraintes de chaque région (Chikh, 2013 in Kessia, 2020). La plupart des techniques d'irrigation agricole sont des méthodes permettant d'apporter de l'eau aux cultures. Ces techniques sont classées en trois catégories : l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion et la micro-irrigation. Le choix d'une technique d'irrigation ou le passage à une technique plus efficace est compliqué. En ce qui concerne la conservation de l'eau, le choix est simple : les économies d'eau augmentent lorsqu'on passe de l'irrigation de surface à l'irrigation par aspersion et de l'aspersion à la micro-irrigation. Cependant, la réussite d'une technique d'irrigation dépend fortement du site, des facteurs environnementaux ainsi que de la méthode de gestion utilisée. Il faut donc évaluer très soigneusement la technique d'irrigation existante avant de passer à une autre technique (Sekfali et Medouri, 2021).

En zones arides et semi-arides, et plus particulièrement dans la vallée de l'Oued Righ, l'irrigation de surface ou gravitaire est la technique la plus utilisée. Elle consiste à distribuer l'eau directement sur la parcelle cultivée par ruissellement sur le sol dans des sillons (méthode d'irrigation par sillon), par la nappe phréatique (appelée irrigation par planche ou par coin) ou par

submersion contrôlée (irrigation par bassin). Il s'agit de la méthode d'irrigation la plus ancienne (et donc plutôt rudimentaire), mais elle est peu coûteuse en termes d'investissement et c'est la méthode la plus utilisée dans le monde. Traditionnellement, pour ces méthodes, l'eau est amenée au niveau de la parcelle, puis distribuée par des canaux terrestres qui alimentent les sillons, les lits ou les bassins. Les pertes par infiltration et la difficulté de contrôler les débits délivrés entraînent un gaspillage de l'eau et un arrosage hétérogène.

IV.7. Causes de la salinité des sols

Parmi les principaux facteurs qui contribuent à l'augmentation de la salinité sont notamment la rareté des précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec de l'eau saline et les pratiques culturales. La salinisation secondaire, en particulier, aggrave le problème ou des zones agricoles autrefois productives deviennent impropres à la culture en raison de la qualité inférieure de l'eau d'irrigation (Hamim et Menna, 2018). Une salinité excessive affecte la rhizosphère et limite la distribution des plantes dans leur habitat naturel. La rareté des précipitations dans les régions semi-arides et arides augmente la salinisation des zones irriguées et les rendent impropres à la culture (Hamim et Menna, 2018).

IV.8. Aptitude des eaux à l'irrigation

Le caractère approprié de l'eau d'irrigation est principalement évalué sur la base de la présence de sels dissous ou de constituants indésirables. Plusieurs critères de contrôle de la qualité de l'eau destinée à un usage agricole ont été établis. Ils sont principalement fonction des concentrations en sels présents sous forme dissoute : Pourcentage de Sodium (Na%), Taux d'absorption du sodium (SAR), Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), Ratio de Kelly (RK), Indice de perméabilité (IP), Ratio d'absorption de magnésium (MAR), Salinité potentielle (PS), Carbonate de sodium résiduel (RSC). Les résultats analytiques des différents paramètres de qualité de l'eau sont rapportés dans le tableau ci-dessous (tab.IV.3).

Tab.IV.3 : Résultats des différents paramètres d'aptitude des eaux à l'irrigation

	Unité	Avant le refroidissement				Après le refroidissement			
		Min	Max	Moy	Eca-ty	Min	Max	Moy	Eca-ty
SAR	/	2.47	4.93	3.66	0.97	1.76	5.81	3.51	1.23
IP	%	37.14	53.80	45.27	6.49	30.95	55.28	43.01	7.83
KR	/	0.42	0.87	0.64	0.18	0.30	0.98	0.60	0.21
MAR	%	30.49	52.55	41.40	6.24	26.35	54.75	43.16	7.70
NA	%	27.93	44.51	36.28	6.53	21.80	47.56	34.41	8.26
RSBC	még/l	-8.32	-3.92	-6.10	1.37	-9.24	-3.08	-6.28	1.83
RSC	még/l	-16.8	-11.04	-13.18	1.44	-17.76	-11.76	-13.86	1.58
SP	még/l	-8.37	2.26	-3.53	3.51	-7.49	4.07	-2.99	3.38

IV.8.1 Pourcentage de Sodium (Na%)

Elle est basée sur la concentration totale des sels dissous et le pourcentage de sodium par rapport aux autres sels présents dans l'eau (Wilcox, 1955 in Bentadjine et Boutaleb, 2021). Par ailleurs, Wilcox recommande de prendre en compte la conductivité électrique, c'est-à-dire la salinité de l'eau, le danger d'alcalinisation du sol et les concentrations en éléments nocifs pour les plantes. Généralement, les plantes ne supportent pas les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox basée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium de l'eau est définie par la formule suivante :

$$\text{Na \%} = \left[\frac{\text{Na}^+}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \right] \times 100 \text{ (Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L).}$$

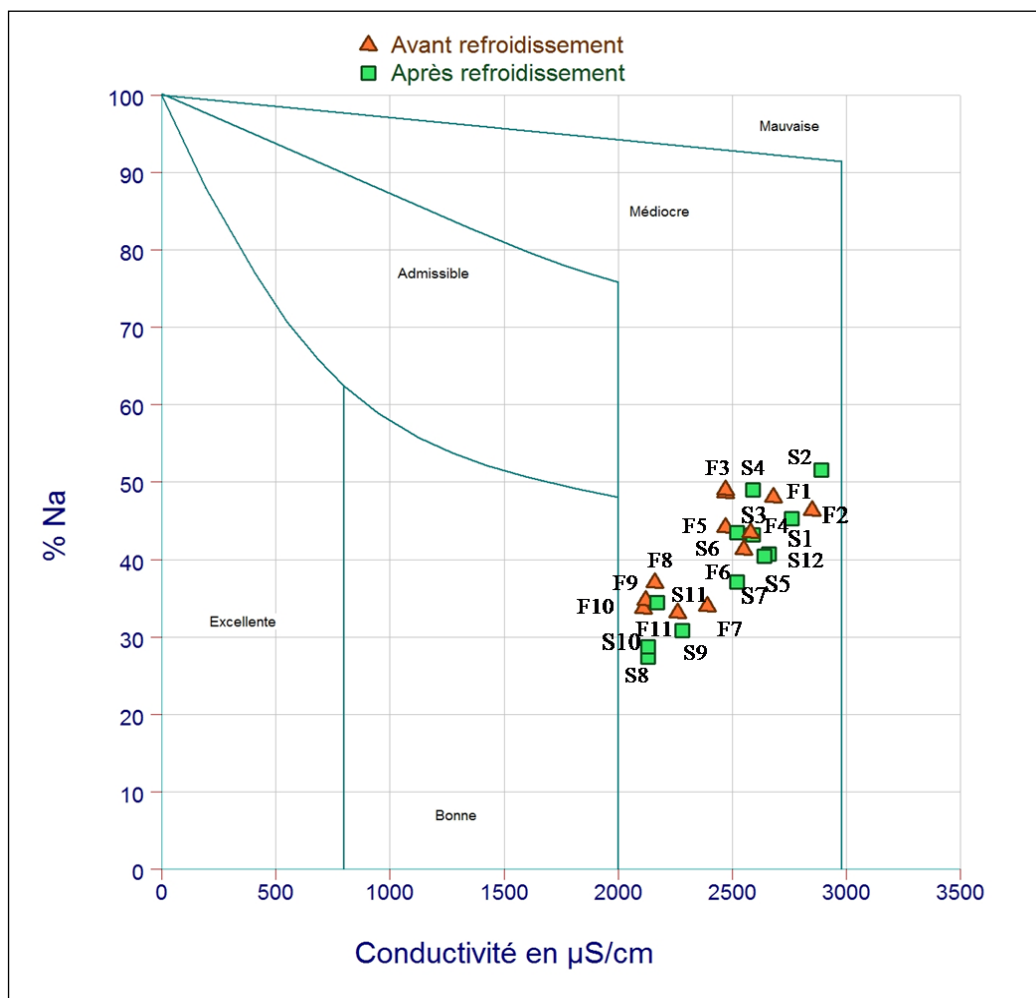


Fig. IV.16. Classification des eaux du CI de la région d'Oued Righ selon le diagramme de Wilcox

Après avoir calculé le Na% des eaux du Continental Intercalaire, les valeurs de (Na%) varient de 27.93% à 44.51% avec une moyenne de 36.28% pour les forages (avant refroidissement), alors qu'elles varient de 21.80 % à 47.56% avec une moyenne de 34.41% après passage dans les stations de refroidissement. D'après le diagramme (fig. IV.16), les eaux du Continental

Intercalaire, que ce soit avant ou après refroidissement, ont une qualité médiocre pour l'irrigation, en raison de la forte salinité contenue dans ces eaux ($2 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 3 \text{ mS/cm}$).

IV.8.2. Taux d'absorption du sodium SAR

Les eaux souterraines peuvent être utilisées aussi bien pour l'irrigation que pour la consommation humaine ou l'industrie. En ce qui concerne l'irrigation, en raison de l'effet de leurs éléments minéraux sur les plantes, il faut tenir compte de ce que l'on appelle le taux d'absorption du sodium (SAR), qui est donné par la relation suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad (\text{Les ions sont exprimés en méq/l}).$$

Le diagramme de salinité (Richards 1954) est une classification qui prend en compte le rapport entre le sodium absorbé et la minéralisation totale en fonction de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S/cm}$) pour démontrer graphiquement l'aptitude de cette eau à l'irrigation. Il met en évidence cinq classes de qualité d'eau : excellente, bonne, acceptable, médiocre et mauvaise (*tab. IV.4*).

Tab. IV.4 : Classification d'eaux d'irrigation selon le diagramme de Richards

Degré	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1 ^{er}	Excellente	C1S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2 ^{ème}	Bonne	C2S1 C1S1	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité.
3 ^{ème}	Admissible	C3S1 C2S2 C3S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur s sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 ^{ème}	Médiocre	C4S1 C4S2 C3S3	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérant aux sels sur sol et bien drainés.
5 ^{ème}	Mauvaise	C3S4 C4S3 C4S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : Sols très perméables, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

Après avoir représenté tous les points d'eau sur le diagramme de Richard (*tab. IV.4*), on constate que toutes les eaux du CI, avant et après le refroidissement, se trouvent principalement dans les classes C4S1 et C4S2 (*fig.IV.17*), qui correspondent à des eaux fortement minéralisées pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels du sol et bien drainées (bonne qualité médiocre).C3S1 cette classe est représentée par un seul échantillon. C'est une eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être cependant contrôlée.

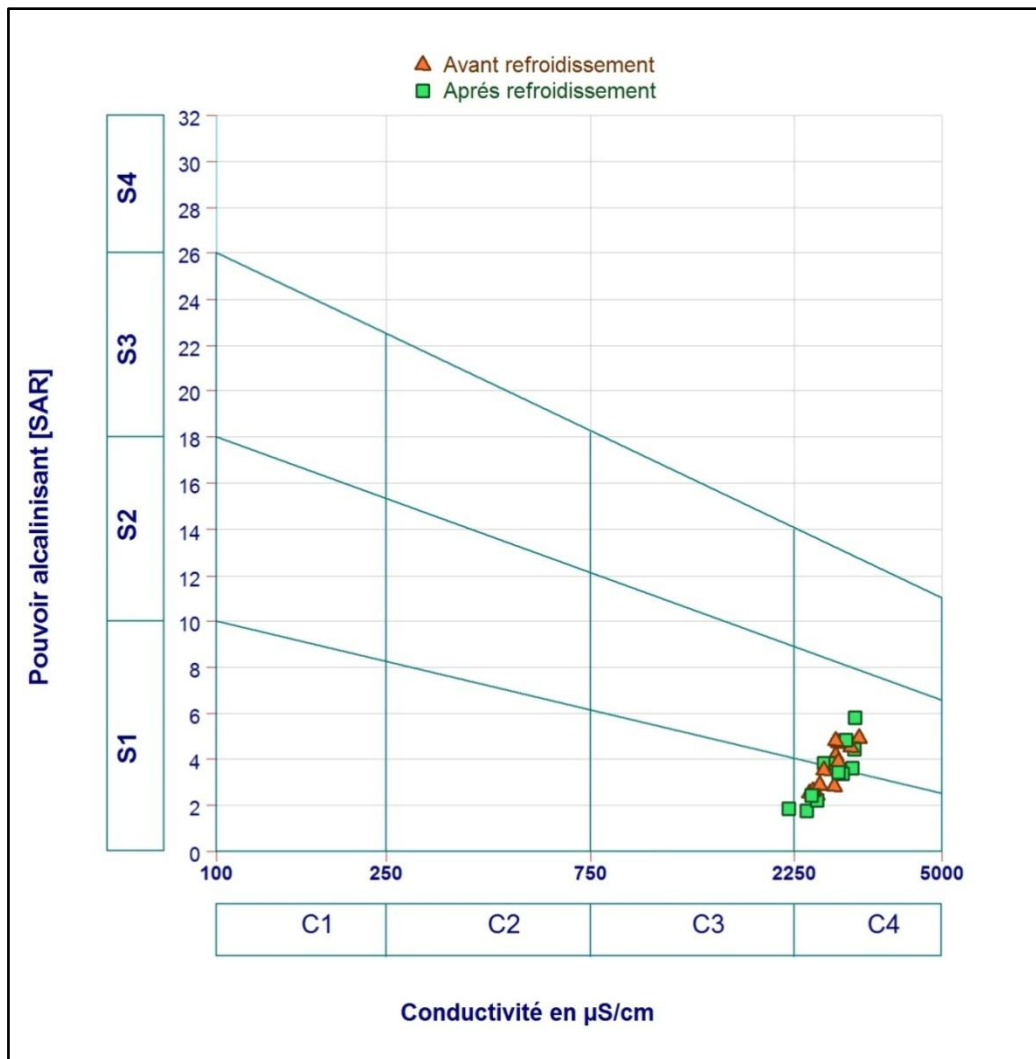


Fig .IV.17. Classification des eaux du CI selon le diagramme de Richards

IV.8.3. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)

La concentration de bicarbonate et de carbonate a une influence sur la qualité de l'eau d'irrigation. En effet, l'eau avec un RSBC élevé et un pH élevé rend le sol irrigué infertile et entraîne un dépôt de carbonate de sodium (*Eaton, 1950*). Le RSBC est calculé par l'équation suivante (*Gupta and Ksienski, 1983*)

$$\text{RSBC} = \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{+2}$$

Avant refroidissement, les valeurs RSBC varient entre -8.32 et -3.92 avec une moyenne de -6.10 alors qu'après refroidissement, les valeurs sont comprises entre -9.24 et -3.08 avec une moyenne de -6.28. Toutes les valeurs du RSBC sont inférieures à 5 (<5) dans les forages et les stations, ce qui signifie que les eaux souterraines de la nappe du Continental Intercalaire sont satisfaisantes pour l'irrigation (*tab. IV.5*).

Tab.IV.5: Classification des eaux selon l'indice de RSBC

Classe d'eau	RSBC	Qualité d'eau	forages	stations	%
1	<5	Satisfaisante	Tous les forages	Toutes les stations	100%
2	05-10	Marginale	0	0	0
3	>10	Insatisfaisante	0	0	0

IV.8.4. Ratio de Kelly (RK)

L'indice de Kelley est le rapport entre Na^+ et la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Un indice de Kelley supérieur à 1 indique un excès de sodium dans l'eau et par conséquent, une eau avec un indice de Kelley supérieur à 1 indique un excès de sodium dans l'eau et par conséquent, une eau avec un indice de Kelley inférieur à 1 est considérée comme appropriée pour l'irrigation. Cet indice est défini par l'équation suivante de Kelley (1963) (Deshpande et Aher, 2012 in Talhi, 2018):

$$KR = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \text{ (Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L).}$$

Tab .IV.6 : Classification des eaux selon l'indice de Kelly(RK).

RK	Qualité d'eau	forages	Stations	%
>1	L'eau bonne à l'irrigation	Tous les forages	Toutes les stations	100%
<1	Marginale	0	0	0

Les valeurs de RK sont comprises entre 0.42 et 0.87 avec une moyenne de 0.64 dans les forages et sont comprises entre 0.30 et 0.98 avec une moyenne de 0.60 dans les stations après refroidissement (tab. IV.6), donc les eaux de tous les forages et les stations ont un indice supérieur à 1 (>1) ce qui indique qu'elles conviennent à l'irrigation.

IV.8.5. Indice de perméabilité (IP)

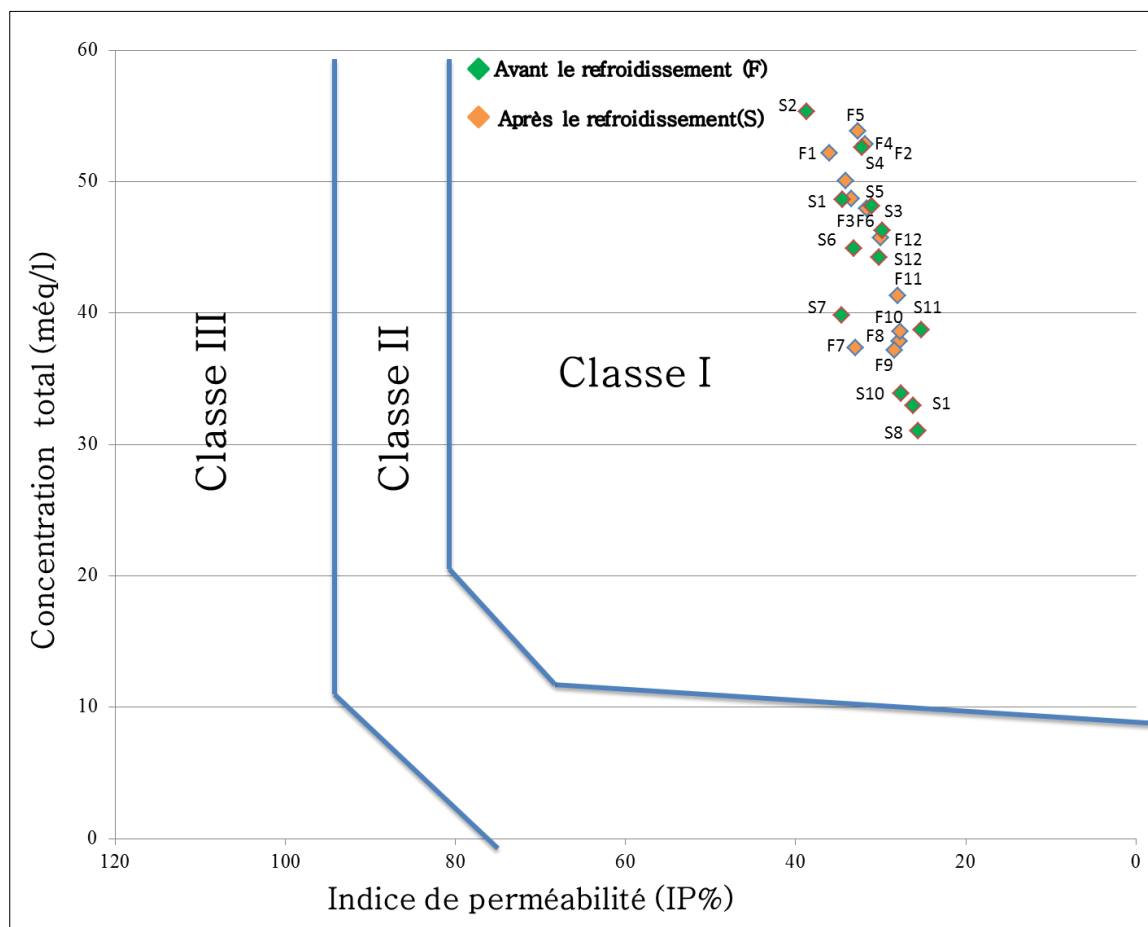
Le sol est également affecté par l'utilisation continue de l'eau d'irrigation sous l'influence de la présence continue de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et HCO_3^- dans le sol. Doneen (1964) et Rangunath (1987) ont développé un critère pour évaluer l'aptitude de l'eau pour l'irrigation basé sur l'indice de perméabilité. En conséquence, la classification des eaux souterraines selon le diagramme de Doneen (1964) peut révéler trois classes de qualité : Excellente, Bonne et Inadéquate (Kaka et al .2011 ; Li et al .2016 ; Singha ,2017 ; Safiur et al .2017 ; Towfiqul Islam et al.2017 ; Singh et al. 2019 ; Sekfali et Medouri, 2021).L'indice de perméabilité est défini par l'équation suivante de (Doneen, 1964) :

$$IP(\%) = \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100, \text{ (Tous les ions sont exprimés en méq/l)}$$

Tab. IV.7 : classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de Doneen (IP)

Classe	IP	Qualité d'eau	forages	stations	%
1	>75%	Excellente	0	0	0
2	25-75%	Bonne	Tous les forages	Toutes les stations	100%
3	<25%	Inappropriée	0	0	0

Les valeurs de l'IP varient de 37.14% à 53.80% avec une moyenne de 45.27% pour l'eau chaude (forages) et varient de 30.95% à 55.28% avec une moyenne de 43.01% pour l'eau froide. Selon le graphique (fig.IV.18) tous les échantillons (forages et stations) ont des valeurs variant entre 25-75% et appartiennent à la classe, ce qui signifie qu'ils sont de médiocre qualité pour l'irrigation.

**Fig.IV.18. Classification des eaux du CI selon le diagramme de Doneen**

IV.8.6 Ratio d'absorption de magnésium (MAR)

On considère que la teneur en magnésium de l'eau est l'un des critères de qualité les plus importants pour déterminer la qualité de l'eau d'irrigation. En général, le Ca^{2+} et le Mg^{2+} maintiennent un état d'équilibre dans la plupart des eaux souterraines. Au cours de l'équilibre, plus de Mg^{2+} dans les eaux souterraines aura un effet négatif sur la qualité du sol en le rendant alcalin, ce qui entraîne une baisse du rendement des cultures (Dhirendra et al., 2009 ; Sekfali et

Medouri, 2021). Le rapport d'absorption du magnésium (MAR) est calculé par la formule suivante (Dhirendra et al.2009 ; Sekfali et Medouri, 2021), de sorte qu'un risque de magnésium de moins de 50 peut être utilisé en toute sécurité pour l'irrigation.

$$\text{MAR} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})} \times 100 \text{ (Toutes les teneurs sont exprimées en méq /L).}$$

Les valeurs MAR sont comprises entre 30.49 et 52.55 avec une moyenne de 41.40 pour les forages, alors que les valeurs pour après refroidissement sont comprises entre 26.35 et 54.75 avec une moyenne de 43.16. Dont la plupart des eaux ont des valeurs qui sont inférieures à 50% (<50) correspond à une qualité acceptable pour l'irrigation, à l'exception des eaux des échantillons F1, F4, S1, S5 qui ont des valeurs supérieures à 50 (>50) de qualité insuffisante pour l'irrigation.

IV.8.7. Salinité potentielle (PS)

Doneen (1954) explique que l'aptitude de l'eau à l'irrigation ne dépend pas des sels solubles. Il est d'avis que les sels faiblement solubles précipitent dans le sol et s'accumulent avec chaque irrigation successive, tandis que la concentration de sels hautement solubles augmente la salinité du sol (Chaib et al.2018). La salinité potentielle (PS) peut être estimée par la formule suivante (Donen, 1961) :

$$\text{PS} = \text{Cl}^- + 1/2 \text{SO}_4^{2-} \text{ , Toutes les concentrations ioniques sont en méq/l}$$

Tab.IV.8: Classification des eaux selon la Salinité potentielle

Classe	PS	Qualité d'eau	forages	stations	%
1	<3	Excellente à bonne	Tous les forages	S1, S3, S4, S5, S6, S7,S8, S9, S10, S11, S12	95.83%
2	3-5	Bonne à nuisible	0	S2	4.17 %
3	>5	Injurieuse à insatisfaisante	0	0	0

Les valeurs de PS des eaux souterraines de la région d'Oued Righ sont comprises entre -8.37 et -2.26 avec une moyenne de -3.53 pour les forages, par contre elles sont comprises entre -7.49 et -4.07 avec une moyenne de -2.99 pour les eaux froides (tab. IV.7). En général, les eaux de tous les forages et stations ont des valeurs de PS inférieures à 3 (<3), ce qui correspond à une qualité excellente à bonne, sauf la station S2 qui a une qualité bonne à néfaste pour l'irrigation.

IV.8.8. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

En complément du SAR et du Na%, l'excès de la somme de carbonate et de bicarbonate dans les eaux souterraines par rapport à la somme de calcium et de magnésium influence également la non-adéquation des eaux souterraines à l'irrigation. Ceci est appelé carbonate de sodium résiduel (RSC) (Richard, 1955 in Chaib et al.2018). Il est calculé par l'équation suivante :

$RSC = (CO_3^- + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$, les concentrations sont rapportées en méq/l

Tab.IV.9 : Classification des eaux selon le carbonate de sodium résiduel

Classe	RSC	Qualité d'eau	Forages	Stations	%
1	<1.25	Bonne	Tous les forages	Toutes les stations	100 %
2	1.25-2.5	Médiocre	0	0	0
3	>2.5	Inadéquate	0	0	0

Le RSC se situe entre -16.8 et -11.04 avec une moyenne de -13.18 pour les forages et il est compris entre -17.76 et -11.76 avec une moyenne de -13.86 pour les stations (tab. IV.8). Les eaux de tous les échantillons ont une valeur de RSC inférieure à 1.25 (<1 .25), ce qui en fait des eaux de bonne qualité pour l'irrigation.

IV.9.Conclusion

Les résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques obtenus, ont montré que les eaux géothermales de la nappe albienne de la vallée de l'Oued Righ sont caractérisées par des températures (48.8 à 65.5°C), un pH assez proche de la neutralité avec une tendance à la basicité après refroidissement, une forte minéralisation atteignant 1.8g/l, avec une dominance de deux faciès chimiques, l'un sulfaté sodique et calcique et l'autre sulfaté sodique et calcique. En ce qui concerne l'étude de l'aptitude des eaux à d'irrigation par les différentes approches à savoir le Pourcentage de Sodium (Na%), Taux d'absorption du sodium (SAR), Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), Ratio de Kelly (RK), Indice de perméabilité (IP), Ratio d'absorption de magnésium(MAR),Salinité potentielle (PS), Carbonate de sodium résiduel (RSC), révèle que les eaux de la nappe albienne ont une qualité admissible et parfois médiocre. Ce sont eaux fortement minéralisées pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés.

Conclusion générale

Conclusion générale

La "vallée de l'Oued Righ" faisant partie du Sahara inférieur, qui est nommée d'après son canal principal. Elle s'étend sur environ 150 km selon un axe nord-sud avec une superficie de 3750 ha. Sa topographie est très plate, approchant 1 ‰. La zone s'étend sur plus d'une cinquantaine d'oasis le palmier dattier constitue la seule ressource socio-économique pour la satisfaction des besoins de la population, qui équivaut à environ 11% de la population du Sahara algérien. De multiples problèmes affectent la région, tels que la surexploitation, le drainage, la montée des eaux, etc. Mais le canal joue un rôle très important dans la région, car il protège l'environnement en évacuant les eaux de drainage et d'égout.

Les sols de la région sont caractérisés par une texture sableuse fine à sablo-limoneuse à forte teneur en sel au nord et grossière à dominante sableuse au sud. Sur le plan géologique, les terrains secondaires discordants sur le socle primaire souvent érodés, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continentale, c'est cette dernière qui offre le nom de Continental Intercalaire, la série stratigraphique très épaisse est caractérisée essentiellement par des formations, allant du Crétacé inférieur au Quaternaire.

La zone d'étude est caractérisée par un climat désertique extrêmement sec avec des précipitations faibles et erratiques. Elle reçoit des précipitations annuelles moyennes d'environ 5,06 mm. L'évapotranspiration potentielle (ETP) et le potentiel d'évaporation réel (ETR) sont respectivement de 1193,40 mm et 60,79 mm, selon la méthode Thornthwaite. Le bilan hydrique est déficitaire avec un excédent nul et une réserve (RFU) épuisée tout au long de l'année malgré une valeur de 1,99 mm obtenue en janvier.

Les résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques obtenus, ont montré que les eaux géothermales de la nappe albienne de la vallée de l'Oued Righ sont caractérisées par des températures (48.8 à 65.5°C), un pH assez proche de la neutralité avec une tendance à la basicité après refroidissement, une forte minéralisation atteignant 1.8g/l, avec une dominance de deux faciès chimiques, l'un sulfaté sodique et calcique et l'autre chloré sodique et calcique.

En ce qui concerne l'aptitude des eaux du Continental Intercalaire à l'irrigation, le diagramme Wilcox révèle que les eaux, que ce soit avant ou après refroidissement, ont une qualité médiocre pour l'irrigation, en raison de la forte salinité contenue dans ces eaux (2 mS/cm < CE < 3 mS/cm). Alors que, le diagramme de Richards montre que tous les échantillons se trouvent principalement dans les classes C4S1 et C4S2, qui correspondent à des eaux fortement minéralisées pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels du sol et bien drainées. Les

eaux ont un RSBC inférieur à 5 et un indice de Kelly (RK) supérieur à 1, un indice de perméabilité (IP) variant entre 25-75%, un rapport d'absorption du magnésium supérieur à 50, une salinité potentielle (PS) inférieure à 3 et un RSC (Carbonate de sodium résiduel) inférieur à 1.25 ce qui signifie que les eaux ont une qualité acceptable à médiocre pour l'irrigation. Donc ce sont eaux fortement minéralisées pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés.

Recommandations

À la fin de ce travail, nous avons jugé utile de formuler quelques recommandations, compte tenu des contraintes liées à l'utilisation de l'eau du Continental Intercalaire, notamment le refroidissement de cette eau et leur aptitude à l'irrigation, à savoir :

- ✓ Le contrôle de la qualité des eaux d'irrigation et l'amélioration du réseau de drainage, pour protéger les sols contre le phénomène de la salinisation.
- ✓ Mettre en veille un réseau de surveillance pour la qualité des eaux de souterraines.
- ✓ Eviter le pompage intensif, ce qui amènerait une modification de la qualité de la nappe.
- ✓ Mélanger les eaux du complexe terminal (7 g/l de salinité) avec les eaux du continental intercalaire (1.2 g/l de salinité et 65 °C de température) afin de diminuer la salinité par dilution du premier aquifère, et d'une part pour abaisser la température du seconde.
- ✓ Transférer les eaux chaudes directement vers les agriculteurs, ensuite le refroidissement sur place par des propres bassins afin d'éviter le dépôt d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

Références Bibliographiques

- Aissaoui, M. Tlidjane, E. (2020)** Quelle culture choisir El pour quel système d'irrigation doit on opter s'il s'agit des eaux usées Epurees. Mémoire de Master en Science, Université Mohamad El Bachir El Ibrahimi B.B.A, 47 p.
- ANRH, (2006)** Agence Nationale des ressources Hydrauliques, étude sur la vallée de l'Oued Righ, p120.
- Bagnouls et Gausson, (1953, 1957)** L'évolution de la qualité des eaux de surface de bassin versant d'oued kébir (Jijel N .E Algérien). Mémoire de master en Science, Université de Jijel 81 p.
- Beddief, H. (2014)** La Qualité Des Eaux Sur Les Conduites De Réseau d'AEP Des régions (HMD-Touggourt).Mémoire de master. Univ, Ouargla.109 p.
- Beggas L., Meissa M. S. (2017)** Etude Hydrochimique des eaux des trois nappes d'oued Righ Nord (impacte sur la santé humaine et la biodiversité), mémoire de master, Filière : science biologique, spécialité biodiversité et environnement, Université El-Oued 58p.
- Bel, F. Dermagne, F. (1966)** Etude géologique du Continental Terminal, Dossier de la direction de l'énergie et des carburants (Ministère de l'industrie et de l'énergie).Alger, 22p
- Belksier, M.S. (2017)** Caractéristiques hydrogéologique de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de salinité sur la qualité de ses eaux. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Annaba p123.
- Belksier, M. S. Chaab, S., Abour F (2016)** Qualité Hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution. Université de Annaba, Rev .Sci . Technol, Synthèse 32 : 42- 57pp.
- Belksier, M. S., Chaab, S., kechiched, R., Halassa, Y., Abour, F., Et Bouselsal, B. (2015)** Caractérisation Hydrochimique des eaux souterraines : Cas Du Nappe Libre Et Complexe Terminal De l'oued Righ Sahara Algérien. International Journal for Environment & Global Climate échange ISSN 2310-6743. Université Ouargla, vol 3 ,1- 8.
- Bellabidi, S. Adaika, N. (2016)** L'utilisation de la cartographie pour déterminer la surexploitation des eaux dans une région Aride (Oued Sud .Est Algérien). Mémoire de master en Hydraulique, Université EL – Oued 104p.
- Ben Ziouch, S. (2006)** L'agriculture dans la vallée de Oued – Righ; Quelques éléments d'analyse, Science Humaine, Univ de Biskra N°10. pp-34
- Benazzedin, A. Meziti, B. (2020)** Mise en évidence d'une pollution anthropique des eaux souterraines de la nappe alluviale d'oued Djandjen. Mémoire de master en Science, Université de Jijel 94 p.
- Bentadjine, A. Boutaleb, I. (2021)** Caractérisation physico-chimique et évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines de la partie aval de l'oued kébir. Mémoire de master en Science, Université de Jijel, 66 p.
- Bouabdallah, H. Falkat, O. (2018)** Actualisation et étude Comparative de la typologie Physico chimique des eaux des aquifères de l'oued Righ (Sud Algérien). Mémoire de master en Science, université d'Ouargla, Ouargla 108 p.

- Bouachiba, A. Boudraa, H. (2020)** L'évolution de la qualité des eaux de surface de bassin versant d'oued kébir (Jijel N .E Algérien). Mémoire de master en Science, Université de Jijel 81 p.
- Bouaichi, N. Ben Abdallah, Y. (2019)** Contribution à l'étude morphologique et dégradation du canal Oued Righ sud. Mémoire de master en hydraulique, Université El oued, 86p.
- Bouakkaz, R. Zentout, w. (2020)** Impact des activités agricoles sur l'environnement ; Cas de la plaine alluviale d'oued Nil (Jijel N – E Algérien), Mémoire de master en Science, Université de Jijel 92 p.
- Bouselsal, B. Kherici, N. Hadj-said, S. Belksier, M. S. (2014)** Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale cas des eaux des aquifères d'el-oued (SE Algérie). Pp 21-31.
- Boussaada, N. (2017)** La télédétection au service des ressources en eaux Application à la gestion des Ressources en eaux dans la vallée d'Oued Righ. Thèse de Doctorat en Science, Université d'Annaba, 190p.
- Boussaada-Maabdi, N., Bousnoubra-Kherici, H., Kherici, N., Hammad, N. (2017)** Mapping of land-cover from remotely sensed images in the valley of Oued Righ (Algerian southeast). Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9(2), 696-712.DOI: [10.4314/jfas.v9i2.6](https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.6)
- Bouterid, Ch. (2021)** Apports des données lithostratigraphiques à la modélisation géologique 3D dans la vallée d'Oued Righ. Mémoire de master en géologie de bassin sédimentaire, Université Oum El Boughi, p82.
- Bouznad, I. E. (2009)** Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ(Ouargla) (Sahara septentrional algérien).Mémoire de Master en Science, Université de Annaba, 155p.
- Bouznad, I.E. (2017)** Ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée d'oued Righ (Sahara Septentrional algérien). Thèse de doctorat en science, université d'Annaba, 202p.
- Busson G, (1967)** Le Mésozoïque Saharien, 1^{ère}partie : l'extrême Sud Tunisien. Ed ., Paris, « Centre Rech .Zone Arides », *Géol.*,8, Ed. CNRS. 194p
- Castany, G. (1968)** Prospection des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris, France. 717p.
- Chaib, W. (2016)** L'effet des eaux chaudes albiennes sur l'homme et l'environnement de la région d'Oued Righ Sud – Est Algérien. Thèse de Doctorat en Science, Université d'Annaba, 288p.
- Chaib, w. Bouchahm, N. Bettiche, F.Mancer, H. (2018)** The Suitability of géothermal waters for irrigation, Oued Righ area, South- easternAlgerien, Journal of Biodiversity and Envirenmental Sciences, Vol. 13, No. 4, 211 – 224 p.
- Chaib, W. Bouchahm, N. Harrat, N. Zahi, F. Bougherira, N. Djabri, L. (2013)** Caractérisation hydrochimique des eaux géothermale de la nappe du continentale intercalaire de la région d'oued Righ. Pp 55- 65.
- Conrad, G. (1969).**L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Centre de recherche sur les zones arides. Géologie, n°10, CNRS, Paris, 527p.
- Cornet, A. (1964).**Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. Rev. Géog phys.et géoldyn, D'une intégration territoriale pour un développement régionale, HAL archive ouvertes. Id :

- De viller et al. (2005)** Etude des processus hydrologiques et hydrochimique des eaux de surface du bassin versant d'Oued Nil (Jijel- NE Algérien), Mémoire de master en Science, Université de Jijel ,2020.pp 85.
- Debieche, T. (2002)** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat, université Franche-Comté France, 199p.
- Dhirendra, M.J. Alok K & Namita, A. (2009).** Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar district. *Rasayan journal of chemistry (2) :195-203.*
- Direction de l'énergie et des carburants (Ministère de l'industrie et de l'énergie).Alger, 22p.
- Djouadi A et Oubelaid A. (2015)** Etude hydrochimique des eaux de la région de Gourara (Timimoune) Algérie. Mémoire de master, Université de Khemis Miliana, 82p.
- Doneen, L. D. (1954).** Amer. Geophys. Union Tran 35(3), 943-950.
- Doneen, L. D. (1962).** Biennial Conf. On Groundwater Recharge 156-163.
- Doneen, L.D. (1964)** Notes on water quality in agriculture. Published as a water science and Engineering, University of California, Davis, Paper 4001.
- Douadi, F. (1991)** La Palmeraie de L'ITAS. Etude est possibilités d'amélioration. Mémoire Ing, I. T. A. S, Ouargla, 78p.
- Dubost, D. (1991)** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algérienne. Thèse de doctorat, Université de Tours, 55p.
- Dubost, D. (1992)** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Ed. 2002, Dépôt légal, 1092 -2002.
- Dubost, D. (2002)** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes.
- Eaton (1950)** Significance of carbonates in irrigation waters. Soil science, 123-134 p. Ed. Centre rech. Sci. Techn. rég. Arides (C. R. S. T. R. A), Biskra, 423p.
- Eress, (1972)** Nappe du Complexe terminal. Appendices, Tunisie. 59p.
- Furon, R. (1964)** Le Sahara : Géologie ; Ressources minérales. Paris. Payot, 2^eéd, 313p.
- Furon, R. (1968).** Géologie de L'Afrique. Paris, Payot, 374p. halshs-00389861, pp1-13.
- Garrels, RM. (1976)** A survey of low temperature water mineral relations. In: Interpretation of environmental isotope and hydrogeochemical data in groundwater hydrology: Vienna, International Atomic Energy Agency 65-84 p.
- Ghendir, L. (2016)** Suivi et étude des forages Hydrauliques de la région d'Oued Righ. Mémoire de master en Science, Université d'Ouargla, 85p.
- Gupta et Ksienski (1983)** effect of mutualcoupling on the performance of adaptive arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation: 785-791.
- Habes, (2013)** Caractéristique chimique d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie. Thèse doctorat en Science, Université de Annaba, 218 p.
- Hadef, S. Hizir, F. (2018)** La qualité des eaux superficielles du sous bassin versant de Guenitra, wilaya de skikda, NE algérien. Mémoire de Master en Science, Université de Jijel. 83 p.
- Hamim, A. Mennaa, H. (2018)** L'effet de deux systèmes d'irrigation aspersion et goutte à goutte sur l'évolution du profil salin du sol le cas de hasi ben abddallah. M2MOIRE DE Master en Science agronomique, Université de Ouargla, 84p.

- Hammadi, A. Brinis, N. Djidel, M. (2022)**Hydrogeochemical behavior associated with a diverse etiology of high salinity in phreatic water along Oued Righ valley in Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10402-0>.
- Haritash, AK. Kaushik, CP. Kaushik, A. Kansal, A. Kumar, YA.(2008)** Suitability assessment of groundwater for drinking, irrigation and industrial use in some 1North Indian villages. *Environ Monit Assess* 145397-406.
- Harkati, Dj. (2018)** Prévion de la Salité de la couche active des sols et optimisation du régime d'irrigation à caractère lessivant des terres mise en valeurs dans le sud – est Saharien : cas de Biskra et d'oued Righ. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Biskra 173 p.
- Hidaoui, A. et Louannas, A. (2015)** Etude du système traditionnel d'irrigation au Sahara, exemple des Foggaras de la région d'Adrar (Touat). Mémoire de master, Université de Tlemcen, 132p.
- Hireche, H. Layadi, M. (2020)** L'apport des conditions hydroclimatologique des sources d'eau de la région d'Ain Makhlouf (wilaya de Guelma). Mémoire de Master en Science, université de Jijel, 86 p.
- IrfanYesilnaca, M et Said Gulluoglu, M. (2008)**Hydrochemical characteristics and the effects of irrigation on groundwater quality in Harran Plain, GAP Project, Turkey. *Environ Geol* (2008) 54, 183-196. DOI: 10.1007/s00254-007-0804-9.
- Kaka, E.A. Akiti, T.T. Nartey, V.K. Bam, E.K.P &Adomako, D. (2011).** Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the southeastern Volta River basin: Manyakrobo area, Ghana. *Elixir Agriculture* 39: 4793-4807.
- Karpoff, R. (1952)** Observation préliminaire sur l'hydrologie du Bas Sahara, in l'hydrologie des Régions arides et subarides, C.R. DU XIX^o Congrès géol . Intern .Alger, sect. VIII, Fasc. VIII.
- Kelly, J. (1963)** "Bitopological spaces". *Proceedings of the London Mathematical Society*3 (1):71-89.
- Kessai, Y. (2020)** Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : échangeur (eau /sol) de forme serpentín. Mémoire de Master en Science et Technique, Université de Biskra, 115 p.
- Khadraoui, A. (2007)** Eau et impact environnementale dans le Sahara algérien. « *Définition – évaluation et perspective de développement* ».299p
- Koul, N, Kherraze, M.E. Ben Zaoui, T. (2014)** Paléo-hydrologie de la région de l'Oued Righ .Centre de Recherches Scientifiques et Technique sur les régions Arides, Touggourt.15p.
- Kouzmine, Y (2009)** L'action publique et les réseaux de transport au sahara Algérien, étapes d'une intégration territoriale pour un développement régionale ; HAL archive ouvertes..Id: halshs-00389861, pp1-13.
- Li, P. Zhang, Y. Yang, N. Jing, L & Yu, P. (2016)** Major ion chemistry and quality assessment of groundwater and around a mountainous tourist town of China. *Exposure and Health* 8: 239-252. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0198-6>.

- Mahboub, A. (2020)** Etude de la qualité des eaux chaudes « CI » et de l'entartrage au niveau des refroidisseurs d'Oued Righ. Cas de djamaa. Mémoire de Master en Science, Université de Biskra, 80 p.
- Medjani, F. (2016)** Variation des paramètres physicochimiques des eaux des sebkhas de la région Ouargla - Touggourt (sud - est algérien). Thèse de doctorat, Univ. Annaba, 131 p.
- Medouri, A. Sekfali, R. (2021)** Aptitude des eaux souterraines de la région du lac du Fetzara à L'irrigation (Annaba, NE Algérien). Mémoire de Master en Science, Université de Jijel, 77p.
- Nesson, C. (1975)** L'évolution des ressources Hydrauliques des oasis du Bas Sahara Algérien .In recherche sur l'Algérie. Ed, CNRS, Paris, pp. 7-100.
- Nesson, C. (1978)** L'évolution des ressources Hydrauliques des oasis du Bas Sahara Algérien .In recherche sur L'Algérie Edition CNRS Paris .pages 68-75.
- ONS**, office national de statistique. 2008.
- Ouali,S. (2006)** Etude géothermique du sud de l'Algérie. Mémoire de magister. Université de, Boumerdes, 84p.
- Ouannas, Kh (2019)** Etude de la qualité des eaux souterraine et leur aptitude à l'irrigation au niveau de la région d'Ouargla. Mémoire de master en Science et Technologie, Université de Ghardaïa 99p.
- Raghunath, I.I.M. (1987)** Groundwater, Second edition; Wiley Eastern Ltd. New Delhi, India:344-369.
- Ramade, F. (1984)** Elément d'écologie – écologie fondamentale. Edition Marc Graw –Hill. Paris, 85P.
- Rezaiki, A. Zaghad, L. (2019)** Les eaux géothermales de la nappe du Continental Intercalaire de la région d'Oued Righ (SE Algérien) : problèmes et intérêt. Mémoire de Master en Science, Université de Jijel, 94p.
- Safiur Rahman, M. Saha, N. Towfiqul Islam, A.R.M. Shen, S & Bodrud-Doza, M. (2017)** Evaluation of water quality for sustainable agriculture in Bangladesh. Water, Air & Soil Pollution 228, 385. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3543-x>.
- Sari, H. (2014)** Contribution à l'étude de la qualité physico- chimique et bactériologique de l'eau de la source « Attar » (Tlemcen). Mémoire de Master, Université Tlemcen, 92p.
- Savornin, J. (1931)** La Géologie Algérienne et Nord-Africaine, *Paris, Masson*.
- Singh, K.R. Goswami, A.P. Kalamdhad, A.S & Kumar, B. (2019)** Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. Environment, Development and Sustainability 22:3119-3132. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z>.
- Talhi, A. (2018)** Étude de l'aptitude à l'irrigation des eaux épurées de la station d'épuration de. Mémoire de master, Lalallik -wilaya de Annaba, 62p.
- Tesco – Viziterv, (1986)** Etude de réaménagement et de l'extension des palmeraies de l'Oued Righ. 74p.
- Toutain, G. (1979)** Eléments d'agronomie saharienne de la recherche développement .Ed : INRA, Paris, 27p.

- Towfiqul Islam, A.R.M. Shen, S. Bodrud-Doza, M & Safiur Rahman, M. (2017)** Assessing irrigation water quality in Faridpur district of Bangladesh using several indices and statistical approaches. *Arabian Journal of Geosciences* 10, 418.
- Unesco, (1972)** Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).
Université de Tlemcen, 111p.
- Zahi, F. Chaïb, W. Bougherira, N. Harrat, N. Rezeg, A. Bouchahm, N. DjabriL, (2011)** Caractéristiques chimiques des eaux géothermales de la nappe albienne dans la vallée d'oued Righ. 2^{ème} Séminaire Maghrébin sur la gestion des ressources naturelles et le développement durable (GRN2D) .UNIV. Sidi Bel Abbés-Algérie.
- Zahi, F. Chaib, W. Bouchahm, N. Harrat, N. Bougherira, N. et djabri, L. (2013)** Caractérisation hydrogéochimique Des eaux Géothermales De la Nappe Du Continental intercalaire De la région de l'oued Righ. *Journal Algérien Des régions Aride*, CRSTRA Division eau et sols, Université de Annaba pp 55-64.
- Zahi, F. (2014)** Contribution à l'étude hydro chimiques du sous bassin versant du lac de Fetzara (Nord –Est algérien). Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de Doctorat, Univ d'Annaba, 193 p.
- Zerrouki, F. Salhi, A. (2017)** Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire de la gouttière de l'oued Righ, Sahara septentrionale. Mémoire de Master,
- UNESCO., 1972.** Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100, *UNESCO, Paris (1972)*.

Résumé

Les besoins en eau dans la vallée de l'Oued Righ (SE Algérie) sont assurés par les eaux souterraines, à savoir la nappe du Complexe Terminal et la nappe du Continental Intercalaire. Les eaux de cette dernière sont caractérisées par des températures comprises entre 48.8 et 65.5°C, un pH assez proche de la neutralité avec une tendance à la basicité après refroidissement et une forte minéralisation atteignant 1,8g/l. Le présent travail a pour objectif d'évaluer l'aptitude à l'irrigation, des eaux géothermales du Continental Intercalaire avant et après refroidissement. Plusieurs indicateurs de qualité ont été utilisés à savoir ; le pourcentage de Sodium (Na%), le taux d'absorption du sodium (SAR), le bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), le ratio de Kelly (RK), l'indice de perméabilité (IP), le ratio d'absorption du magnésium (MAR), la salinité potentielle (PS). Les résultats obtenus révèlent que les eaux de la nappe albienne (Intercalaire Continental) ont une qualité admissible et parfois médiocre pour l'irrigation. Ces eaux sont fortement minéralisées et peuvent convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainées.

Mots clés : Eaux souterraines, continentale intercalaire, eaux géothermales, irrigation, Oued Righ.

Abstract

The needs for water in the Oued Righ valley (SE Algeria) are provided by groundwater resources, namely the aquifer of the Terminal Complex and that of the Continental Intercalary. The waters of the latter are characterized by very high temperatures ranging between 48.8 and 65.5 ° C, a pH close to neutrality with a tendency to basicity after cooling and a high mineralization reaching 1.8g / l. The objective of the present study is to evaluate the suitability for irrigation of the geothermal waters of the Intercalary Continental before and after cooling. Several quality indicators were used namely; the percentage of Sodium (Na%), the Sodium Absorption Ratio (SAR), the Residual Sodium Bicarbonate (RSBC), the Kelly Ratio (KR), the Permeability Index (PI), the Magnesium Absorption Ratio (MAR), the Potential Salinity (PS). The results obtained reveal that the water of the Albian aquifer (Continental Intercalary) has an admissible and sometimes poor quality for irrigation. These waters are highly mineralized and may be suitable for the irrigation of certain species that are well tolerant of salts on soils well drained.

Keywords: Groundwater, Continental Intercalary, Geothermal water, Irrigation, Oued Righ.

المخلص

يتم ضمان متطلبات المياه في سهل واد ريج (جنوب شرق الجزائر) من خلال استغلال الموارد الجوفية للمنطقة، والمتمثلة في مياه المركب النهائي والمتداخل القاري. تتميز مياه هذا الأخير بدرجات حرارة عالية جداً تتراوح بين 48.8 و65.5 درجة مئوية، ودرجة حموضة قريبة من الحياد مع ميل إلى القاعدية بعد التبريد وتمعدن مرتفع يصل إلى 1.8 جم / لتر. إن الهدف من هذه الدراسة هو تقييم مدى ملاءمة الري للمياه الساخنة للمتداخل القاري قبل وبعد عملية التبريد. وقد تم الاعتماد على العديد من مؤشرات الجودة والمتمثلة في: نسبة الصوديوم (%Na) ونسبة امتصاص الصوديوم (SAR) وبيكربونات الصوديوم المتبقية (RSBC) ونسبة كيلي (RK) ومؤشر النفاذية (PI) ونسبة امتصاص المغنيسيوم (MAR) والملوحة المحتملة (PS). بينت النتائج المتحصل عليها أن مياه طبقة المياه الجوفية للمتداخل القاري تتميز بنوعية رديئة للري وأحياناً ذات نوعية مقبولة لتمييزها بتمعدن عالي لكنها قد تكون مناسبة لري بعض أنواع المحاصيل المقاومة للملوحة في تربة جيدة التصريف، ولكنها تتطلب مراقبة مسبقة للتغيرات في الملوحة.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، المتداخل القاري، المياه الساخنة، الري، واد ريج