

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des
Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre et de l'univers



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Mémoire de Master Académique

Domaine: science de la terre et de l'Univers

Filière: Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME :

**Évaluation de la qualité des eaux souterraines et des
caractéristiques hydrogéochimiques des eaux
souterraines d'Oued Righ (Sahara algérien)**

Soutenu publiquement par :

KERBOUSSA FIRDAOUS

25 / 06 / 2024

Devant le jury :

Président	STOUH ADEL	Dr. Univ. Ouargla
Encadreur	BOUSELSAL Boualem	Prof. Univ. Ouargla
Examineur	HOUARI IDIR MENAD	Dr. Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir octroyé la force et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Boualem Bouselsal, pour son accompagnement sans faille et ses précieux conseils durant toute la durée de cette recherche,

Un remerciement tout particulier est adressé aux enseignants du département des sciences de la terre et de l'université pour leur engagement et les connaissances partagées tout au long de ma carrière scientifique. Leur influence indélébile dans le développement de mes compétences et de ma personnalité est inoubliable.

Je suis également reconnaissant envers tous les membres du jury qui ont honoré mon travail en acceptant de l'évaluer, ce qui représente un grand honneur pour moi.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de cette recherche.

الاهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمدُ لله ربَّ العالمينَ، والصلاةُ والسلامُ على سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ وَعَلى آلِهِ وصحبِهِ أَجْمَعِينَ .

وبعد قوله تعالى:

{ وَ قُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ } .

أقول الحمد لله بدأ الحمد لله ختاماً والحمد لله دائماً وأبداً الحمد لله ما انتهى درب ولا ختم سعي إلا بفضلته، هاهي السنين قد إنطوت وتعب الأيام قد زال وها انا اليوم أمام حلمي أقف بكل شموخ لما أنا عليه اليوم فلم أجد أجمل من لغتنا فلا الفرنسية ولا الإنجليزية أبلغ من لغة الضاد لأقول لكم وبكل حب: أهدي ثمرة هذا العمل لسندي ومسندي أمني وأماني للقلب الحنون، لمن أشع فخرا وإسمي على إسمه (أبي) . إلى سر وجودي إلى الحب والحنان، غاليتي وصديقة الروح إلى من خجلت الكلمات وخانتني الحروف في طيب ذكرها (أمي حبيبي) .

حفظكما الله لي وأطال من عمركما عمرا.

إلى هديتي ورفيقي في الحياة عزي وقوتي ووحيدتي إليك يا (أخي) أثار الله دربك وأنبتك من واسع فضلته. إليك يا من غيبتك أقدار الله ومشيتته يامن تستحيي المجالس بذكر حسن خصالك حينئذ قلبٌ وحكيمٌ فكرٌ جدي قدوتي (بوحفص البوزيدي) عليك رحمة الله ومغفرته. إلى كل من علمني حرفاً صغيرةً فكيرةً معلّمِي وأساتذتي، إلى صديقاتي في المسكن الجامعي من جمعتنا نفس الظروف والأهداف كل باسمها، إلى أجمل الصدف صديقة الدرب وتوأم الروح (رفقة قيرع) . إلى كل زميل وزميلة من جمعتنا الجيولوجيا وخصصتنا الهيدرو جيولوجي .

إلى أصحاب الأرض والعرض لكل واحد منكم كل من كان له بيت ، قصة وعائلة لكل طموح ضائع وحلم وذاكرة لكل أب وأخ لكل أم ولكل طفل وكل شهدائنا في فلسطين لا نعزيكم بل نعزي أنفسنا فأنتم فخر الأمم وأشرفها فليشهدنا الله نصركم القريب .

وآخر الذكر أهنتني على الصمود وعلى كل شيء وعلى أقوال الدرويش أقول لي :

ضاقت بي الأرض أو لم تضيق قطعت هذا الطريق.

من سقوط ونهوض حتى الوصول فأقول لي شكرا لأنني فعلا أستحق ذلك.

﴿وَأخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

{ الْحَمْدُ لِلَّهِ }



المخلص:

امت هذه الدراسة الهيدروكيميائية بتقييم جودة المياه الجوفية من المركب النهائي (CT) والطبقة المتداخل القاري (CI) في منطقة وادي ريغ، الجزائر، من خلال تحليل 35 عينة لفهم معدنياتها وملاءمتها للاستخدامات المختلفة: الشرب، الري، والاستخدام الصناعي. تم استخدام طرق مثل مؤشر تلوث المياه الجوفية (GPI) للشرب، والمعايير مثل SAR، CE، %Na، SP، IP، RK، PS، و RM للري، بالإضافة إلى مؤشرات لتقييم التآكل والترسب للاستخدامات الصناعية. تم إجراء تحديد خصائص المياه الكيميائية وعمليات المعالجة من خلال استخدام رسم بياني لبيير، مصفوفة الارتباط، وتحليل المكونات الرئيسية. أظهرت النتائج أن المياه الجوفية في منطقة الدراسة شديدة المعدنية وصلبة جداً، مما يجعلها غير مناسبة للشرب. كشف تطبيق طريقة GPI أن 5% من عينات الحوض CT أظهرت تلوثاً عالياً و95% تلوثاً شديداً جداً، بينما للطبقة البينية القارية، أظهر 40% تلوثاً معتدلاً و60% تلوثاً عالياً. بالنسبة للاستخدام الزراعي، أشارت النتائج إلى أن مياه أحواض CT و CI في منطقة وادي ريغ غير مناسبة للري استناداً إلى التوصيل الكهربائي، خطر المغنيسيوم، ورسم بياني لـ USS. علاوة على ذلك، أظهرت الحسابات بناءً على مؤشرات مختلفة لتقييم التآكل والترسب أن معظم الآبار عرضة للتآكل، مع ميل لتكوين رواسب بيكربونات الكالسيوم. بالإضافة إلى ذلك، كشفت الدراسة الهيدروكيميائية وتحليل الإحصاء المتعدد المتغيرات أن التركيب الكيميائي للمياه الجوفية يتأثر بشكل أساسي بعمليات مثل ذوبان البخاربات، تبادل الكاتيونات، والمدخلات البشرية، التي تلعب دوراً رئيسياً في كيمياء المياه لهذه الأحواض. تسلط هذه الدراسة الضوء على الحاجة الملحة لتبني استراتيجيات أكثر فعالية لإدارة الموارد المائية وتطوير ت

Résumé :

Cette étude hydrochimique a évalué la qualité des eaux souterraines des aquifères du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) dans la région d'Oued Righ, Algérie, en analysant 35 échantillons pour comprendre leur minéralisation et leur aptitude à divers usages : potabilité, irrigation et utilisation industrielle. Des méthodes telles que l'Indice de Pollution des Eaux Souterraines (GPI) pour la potabilité, et les paramètres de CE, SAR, %Na, SP, IP, RK, PS et RM pour l'irrigation, ainsi que des indices de corrosion et d'entartrage pour les applications industrielles ont été employés. L'identification des faciès chimiques des eaux et des processus de minéralisation a été menée grâce à l'application du diagramme de Piper, de la matrice de corrélation et de l'analyse en composantes principales. Les résultats ont montré que les eaux souterraines de la zone d'étude sont fortement minéralisées et très dures, ne convenant pas à la consommation. L'application de la méthode GPI a révélé que 5 % des échantillons de l'aquifère CT présentaient une forte pollution et 95 % une pollution très élevée, tandis que pour l'aquifère continental intercalaire, 40 % montraient une pollution modérée et 60 % une pollution forte. En ce qui concerne l'usage agricole, les résultats ont indiqué que les eaux des aquifères CT et CI de la région d'Oued Righ étaient inappropriées pour l'irrigation en se basant sur la conductivité électrique, le risque de magnésium et le diagramme d'USS. De plus, les calculs basés sur différents indices d'évaluation de la corrosion et de l'entartrage ont montré que la plupart des forages étaient sujets à la corrosion, avec une tendance à la formation de dépôts de bicarbonate de calcium. En outre, l'étude hydrochimique et l'analyse statistique multivariée ont révélé que la composition chimique des eaux souterraines est principalement influencée par des processus tels que la dissolution des évaporites, les échanges de cations et les apports anthropiques, qui jouent un rôle prédominant dans la chimie de l'eau de ces aquifères. Cette étude souligne l'urgence d'adopter des stratégies de gestion des ressources en eau plus efficaces et de développer des technologies de traitement avancées pour rendre l'eau des aquifères d'Oued Righ utilisable de manière durable.

Mots clés : Oued Righ, CI, CT, GPI, irrigation, corrosion.

ABSTRACT:

This hydrochemical study assessed the quality of groundwater from the Terminal Complex (CT) and Continental Intercalary (CI) aquifers in the Oued Righ region, Algeria, analyzing 35 samples to understand their mineralization and suitability for various uses: potability, irrigation, and industrial use. Methods such as the Groundwater Pollution Index (GPI) for potability, and parameters like CE, SAR, %Na, SP, IP, RK, PS, and RM for irrigation, as well as indices for corrosion and scaling for industrial applications were employed. The identification of water chemical facies and mineralization processes was conducted through the use of the Piper diagram, correlation matrix, and principal component analysis. The results showed that the groundwater in the study area is highly mineralized and very hard, making it unsuitable for consumption. The application of the GPI method revealed that 5% of the samples from the CT aquifer showed high pollution and 95% very high pollution, while for the Continental Intercalary aquifer, 40% showed moderate pollution and 60% high pollution. Regarding agricultural use, the results indicated that the waters of the CT and CI aquifers in the Oued Righ region were unsuitable for irrigation based on electrical conductivity, magnesium risk, and the USSL diagram. Moreover, calculations based on various indices for evaluating corrosion and scaling showed that most boreholes were prone to corrosion, with a tendency to form deposits of calcium bicarbonate. Furthermore, the hydrochemical study and multivariate statistical analysis revealed that the chemical composition of the groundwater is primarily influenced by processes such as the dissolution of evaporites, cation exchange, and anthropogenic inputs, which play a predominant role in the water chemistry of these aquifers. This study highlights the urgency of adopting more effective water resource management strategies and developing advanced treatment technologies to make the water from the Oued Righ aquifers usable in a sustainable manner.

Keywords: Oued Righ. CT. CI. GPI. irrigation. corrosion.

Liste des figures

Figure	Titre	page
Chapitre 1: présentation de la zone étudiée		
Fig.1	Situation géographique d'Oued Righ.	16
Fig.2	Répartition des superficies cultivées en Km ² par communes.	18
Fig.3	Cartographie de l'occupation du sol de l'Oued Righ (<i>Boussaada et al.2017</i>).	20
Fig.4	Histogramme des températures moyennes mensuelles (2010-2022).	22
Fig.5	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (2010-2022).	23
Fig.6	Diagramme Ombro-thermique de la région d'Oued Righ.	24
Fig.7	Histogramme de l'évaporation moyenne annuelle (2010-2022).	25
Fig.8	Histogramme d'humidité moyenne mensuelle (2010-2022).	26
Fig.9	Histogramme de la durée d'ensoleillement moyen mensuel (2010-2022).	27
Fig.10	Coupe géologique N-S passant par la vallée d'oued righ.	29
Fig.11	Carte géologique d'Oued Righ extrait de la carte géologique de l'Algérie.	30
Fig.12	Log stratigraphique synthétique.	31
Fig.13	Coupes hydrogéologiques dans le Sahara septentrional (UNESCO 1972).	34
Fig.14	Extension des formations aquifères du SASS (OSS, 2003).	35
Fig.15	Coupe hydrogéologique du complexe terminal de la région d'Oued Righ.	36
Fig.16	Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI (Tuohir M et Tarmoune ,2014).	38
Chapitre 2: Matériels et méthodes		
Chapitre 3 : Qualité des eaux souterraines des eaux souterraines d'Oued Righ		
Fig.17	Histogramme de variation du pH des eaux du CI et CT d'Oued Righ.	51
Fig.18	Histogramme de variation de CE des eaux du CI et CT de l'Oued Righ.	52
Fig.19	Histogramme de variation de TDS des eaux du CI et CT de l'Oued Righ.	53
Fig.20	Histogramme de variation de la température dans les eaux du CI.	54
Fig.21	Histogramme de variation du calcium dans les eaux du CI et CT de l'Oued Righ.	55
Fig.22	Histogramme de variation du Magnésium dans les eaux du CI et CT.	55
Fig.23	Histogramme de variation du potassium dans les eaux du CI et CT.	56
Fig.24	Histogramme de variation du sodium dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	57

Fig.25	Histogramme de variation du Chlorures dans les eaux du CI et CT.	58
Fig.26	Histogramme de variation du Sulfates dans les eaux du CI et CT.	59
Fig.27	Histogramme de variation du Bicarbonates dans les eaux du CI et CT.	60
Fig.28	Histogramme de variation du NO ₃ dans les eaux du CI et CT.	61
Fig.29	Histogramme de variation du TH dans l'eaux du CI et CT.	62
Fig.30	Histogramme de variation du PIG dans l'eaux du CI et CT.	63
Fig.31	Histogramme de variation du SAR dans l'eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	65
Fig.32	Diagramme d'USSL pour les eaux souterraines d'Oued Righ.	66
Fig.33	Histogramme de variation du %Na dans les eaux du CI et CT .	67
Fig.34	Histogramme de variation du RK dans l'eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	67
Fig.35	Histogramme de variation de IP dans eaux de CI et CT de du l'Oued Righ.	68
Fig.36	Histogramme de variation du PS dans les eaux du CI et CT.	69
Fig.37	Histogramme de variation du RM dans les eaux du CI et CT.	70
Fig.38	Histogramme de variation de LI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	72
Fig.39	Histogramme de variation de RSI dans l'eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	73
Fig.40	Histogramme de variation de LSI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	74
Fig.41	Histogramme de variation de IP dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	75
Fig.42	Histogramme de variation de AI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	76
Fig.43	Histogramme de variation de RI dans l'eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	77
Fig.44	Histogramme de variation de CSMR dans l'eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.	77
Fig.45	Diagramme de Piper pour les eaux souterraines d'Oued Righ.	79
Fig.46	Analyse en composantes principales : (a) complexe terminal et (b) continental intercalaire.	82

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Chapitre 01: présentation de la zone étudiée		
Tableau.1	Réservoirs de stockage et leurs capacités.	21
Tableau.2	Température moyennes mensuelles (2010-2022).	22
Tableau.3	Précipitation moyennes mensuelles (2010-2022).	23
Tableau.4	Données utilisées pour la construction du diagramme Ombro-thermique.	24
Tableau.5	L'évaporation moyenne mensuelle (2010-2022).	25
Tableau.6	Humidité relative moyennes mensuelles (2010 – 2022).	25
Tableau.7	Durée d'ensoleillement moyen mensuel (2010-2022).	26
Tableau.8	Le bilan hydrologique selon Thornthwaite (période 2010-2022).	28
Chapitre 2: Matériels et méthodes		
Tableau.9	Inventaire des forages utilisés dans l'étude hydrochimique.	42
Tableau.10	Normes de potabilité établie par OMS (WHO 2017).	43
Tableau.11	Paramètres pour calcul de GPI.	44
Chapitre 3 : Qualité des eaux souterraines des eaux souterraines d'Oued Righ		
Tableau.12	Les données chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.	51
Tableau.13	Statistique des paramètres d'irrigation des eaux de CI et CT d'Oued Righ.	70
Tableau.14	Statistique des paramètres d'irrigation des eaux de CI et CT d'Oued Righ.	78
Tableau.15	Statistique des paramètres d'irrigation des eaux de CI et CT d'Oued Righ.	80
Tableau.16	La matrice de corrélation des éléments chimiques dans les eaux de CI.	81

Liste d'abréviations

ANRH : Agence national des ressources hydrauliques
CE : Conductivité électrique
CI : Continental intercalaire.
CT : Complexe Terminal
DA : Déficit agricole
ERESS : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional
ETR : Evapotranspiration réelle.
Ex. : Excédante (mm)
IP: Indice de perméabilité
KR: Rapport de Kelly
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel
Ph : Potentiel d'hydrogène
Pr : Précipitation annuelle (mm)
PS: Potentiel salinité
RM: Risque de magnésium
RU : réserve facilement utilisable
SAR: Sodium Adsorption Ratio
SASS : Système aquifère du Sahara septentrional.
TH : Titre Hydrotimétrique ;
Tp : Température annuelle en(C°)
PIG : l'indice de pollution des eaux souterraines

Liste des unités

°C : Degré Celsius ;
°F : Degré français ;
m³/s : mètre cube par seconde ;
méq/l : Milliéquivalent par litre ;
mg/l : Milligramme par litre ;
µS /cm : Micro Siemens par centimètre.

SOMMAIRE

Remerciement	I
Dédicaces	II
Résumé	III / IV
Liste des figures	VI / VII
Liste des tableaux	IIX
Liste des abréviations	IX
Liste des unités	IX
Introduction générale	XIII
Chapitre 01: Présentation de la zone d'étude	
Situation géographique de la zone d'étude	16
Contexte socioéconomique	17
Population	17
l'agricole	17
l'industrie	19
Occupation du sol dans la région	19
Les ressources en eau	20
hydro-climatologiques les caractéristiques	21
Température	22
Précipitation	23
Diagramme ombro-thermique de gaussen	/24 23
Evaporation	24/25
Humidité	25/26
Ensoleillement	26/27
Bilan hydrique	27/28
géologique Contexte	28
Géologie régionale	28/29
Géologie locale	29/30
Mésozoïque	31
Cénozoïque	33
Quaternaire	34

Contexte hydrogéologique	34
Présentation du SASS	34
Hydrogéologie d'oued righ	35
La nappe phréatique	35
Complexe Terminal	35
Continental intercalaire	37
Conclusion	38/39
02: Matériels et méthode chapitre	
Echantillonnage et méthode d'analyse	41/42
Qualité des eaux pour différents usages	43
Potabilité de l'eau	43/44
évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation	45
évaluation de la qualité de l'eau industrielle	46
Hydrochimie des eaux souterraines	47
Le faciès chimique	47
multi variés l'analyse	47
La matrice de corrélation	47
L'analyse en composantes principales	47/48
logiciels utilisés	48
Excel	48
Diagramme	48
conclusion	49
Chapitre 3 : Qualité des eaux souterraines des eaux souterraines d'Oued Righ	
Les paramètres physiques et chimiques	51
Potentiel d'hydrogène (PH)	51
La conductivité (CE)	52
TDS	52/53
Température	53/54
Calcium Ca⁺	54/55
Magnésium Mg²⁺	55
Potassium (K) et Le sodium Na⁺	56/57
Chlorure (Cl)	58/57

Sulfate SO_4^{2-}	58/59
Bicarbonate HCO_3^-	59/60
Le nitrate NO_3	60/61
Qualité des eau pour la consommation humaine	61
Application de l'indice de pollution des eaux souterraines(PIG)	62
Qualité des eaux de CI pour l'irrigation	63
Conductivité électrique	63/64
Taux d'absorption de sodium(SAR)	64/65
Le pourcentage de sodium(% Na)	66/67
Rapport de Kelly (RK)	67
Indice de perméabilité (IP)	68
Salinité potentielle(PS)	68/69
Risque de magnésium (RM)	69/70
Qualité des eaux pour l'industrie	71
l'ndice de saturation de lange lier (LI)	72
l'ndice de stabilité ryznar (RSI)	73
l'indice de larson-skold (LSI)	73/74
l'indice de pukorius (IP)	74/75
l'indice Agressivité (AI)	75/76
l'indice de Revelle (RI)	76/77
Le rapport massique chlorure- sulfate (CSMR)	77
Facies chimique des eaux	78
Hydrogeochemical facies	78/79
La matrice de corrélation	79
Le complexe terminal (CT)	79/80
le continental intercalaire (CI)	80/81
Analyse en composantes principales	81
Le complexe terminal (CT)	81
Le continental intercalaire (CI)	81/82
Conclusion	83
Conclusion Générale	85/86
Références bibliographiques	88

Introduction Générale

Introduction Générale

L'Algérie, reconnue pour son climat aride, a été confrontée ces trente dernières années à des défis concernant non seulement la quantité mais aussi la qualité de ses ressources en eau mobilisables. Le Sahara algérien abrite d'importantes réserves d'eau souterraine contenues principalement dans les deux grands aquifères du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT), essentiels pour soutenir toutes les activités agricoles, industrielles, et les besoins en eau potable de la vallée d'Oued Righ.

Bien que ces eaux souterraines soient abondantes, leur qualité reste une préoccupation majeure qui influence le développement démographique et économique du sud de l'Algérie. Cette recherche vise principalement à analyser la composition chimique de l'eau des aquifères CI et CT afin d'évaluer son utilisation potentielle pour la consommation humaine, l'irrigation et les applications industrielles. Elle cherche également à comprendre les processus hydrochimiques affectant la minéralisation de ces ressources en eau.

- **Chapitre 01** : Présentation de la zone d'étude : Ce chapitre décrit la géographie, l'utilisation des sols, les contextes socio-économique, climatique, géologique et hydrogéologique d'Oued Righ.

- **Chapitre 02** : Matériaux et méthodes : Ce chapitre détaille les indicateurs et techniques employés pour évaluer la qualité de l'eau, déterminer son faciès chimique, et expose les principes de l'analyse statistique multivariée utilisée. Il précise également les logiciels utilisés dans cette étude.

- **Chapitre 03** : Qualité des eaux souterraines d'Oued Righ : Ce chapitre examine les paramètres physicochimiques des eaux du CI, évalue la qualité de l'eau pour différents usages, et explore la caractérisation hydrogéochimique et l'origine de la minéralisation des eaux à l'aide de diagrammes de Piper, d'analyses de matrices de corrélation et d'analyses en composantes principales (ACP).

La recherche se terminera par une conclusion qui résume les résultats obtenus, offrant des perspectives nouvelles sur la gestion des ressources en eau dans cette région critique.

Chapitre 01

Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique de la zone d'étude

La région se situe dans le sud-est de l'Algérie, plus précisément au nord-est du Sahara, à la limite nord du Grand Erg Oriental et à la frontière sud du massif des Aurès. Elle s'étend du village d'El Goug (Touggourt) au sud, jusqu'au village d'Oum-Thiours à 100 km de la wilaya de Biskra, sur une distance de 150 km vers le nord. La largeur de la zone varie entre 20 et 30 km. Elle est limitée par les coordonnées UTM : 3640 000 et 3740 000 Nord et 221000 et 260000 Est (Belksier 2017 ; Bouznad 2017). Administrativement, la vallée d'Oued Righ est partagée entre deux wilayas : Touggourt et El Meghaier.

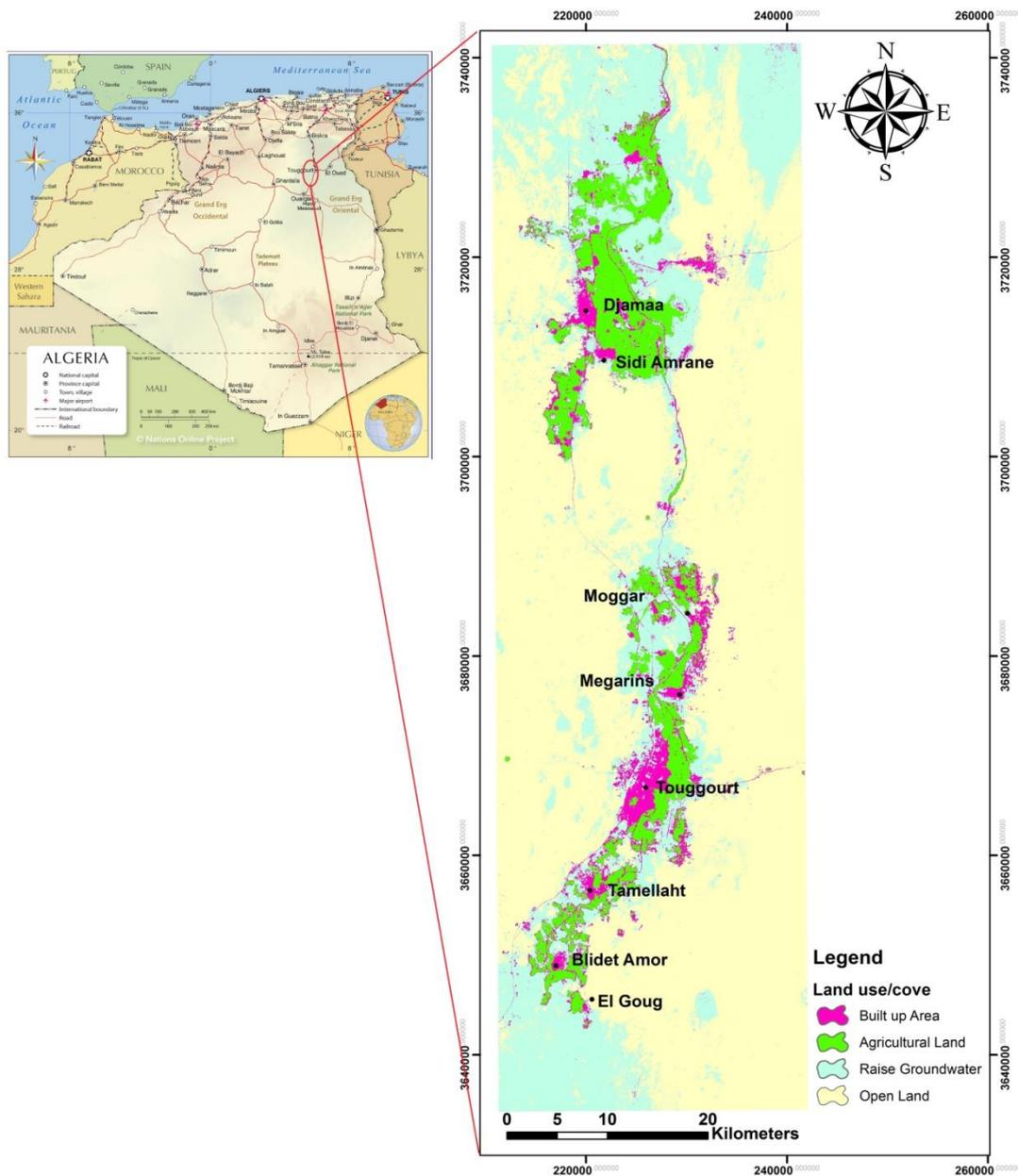


Figure 1. Situation géographique d'Oued Righ.

La vallée d'Oued Righ traverse six daïras du Sud au Nord : Témacine, Touggourt, Sidi Slimane et Mégarine qui font partie de la wilaya d'Touggourt, et Djamaa et El Meghaier qui font partie de la wilaya El Meghaier. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Biskra et la commune de Tolga, au Sud-Ouest par les oasis d'Ouargla, et à l'Est par la vallée de l'Oued Souf.

2. Contexte socioéconomique

2.1. Population

La population de la région connaît une évolution démographique significative par rapport aux années précédentes, en raison des nombreux atouts de la région (les secteurs des services et de l'agriculture notamment) et de la main d'œuvre qu'elle offre. Elle était de 1 874 habitante en 2008 et est devenue 611 354 habitante en 2020.

2.2. Agriculture

Actuellement, l'agriculture, qui est la principale activité dans le domaine agricole, est quelque peu négligée en raison de la faible productivité des palmiers. Cette situation est principalement due à la salinisation des eaux et des sols, ainsi qu'à d'autres problèmes tels que la remontée de la nappe phréatique et le vieillissement des palmiers. En outre, les sociétés pétrolières offrent des emplois mieux rémunérés que l'agriculture, ce qui contribue également à cette situation. Les principales espèces cultivées sont la variété de Deglat Nour, suivie de Ghars et Degla Bayda.

Il convient également de noter qu'il y a de l'élevage, principalement des ovins et des caprins, avec des chèvres élevées pour leur lait et des brebis élevées pour leur viande. Dans le secteur industriel, il existe plusieurs petites usines, notamment des briqueteries situées à proximité des sources de matières premières, ainsi que des installations de transformation des hydrocarbures, de plastiques, d'aluminium et des entreprises de conditionnement de dattes.

Les régions agricoles et leur découpage communal peuvent être divisés en quatre zones distinctes, allant du Nord au Sud :

2.2.1. Zone d'El M'Ghair : Cette région se situe en périphérie des Grands Chotts et est caractérisée par une faible altitude. L'eau y est abondante mais souvent salée, et le drainage y est difficile. C'est une zone propice à la culture des dattes, entourée de steppes salées avec une végétation abondante. Les principales communes de cette zone sont Still, Oum el Thiour et Sidi Khellil.

2.2.2. Zone de Djammaa : Cette partie centrale d'Oud Righ est exclusivement dédiée à la culture des dattes. Les sols y sont généralement salés à très salés, ce qui nécessite

l'utilisation de la nappe phréatique du Continental Intercalaire. Les principales communes de cette zone sont Tenedla, Djamaa et Sidi Amranc.

2.2.3. Zone de Touggourt : Située au sud d'Oued Righ, cette région constitue l'arrière-pays immédiat de la ville de Touggourt, qui est divisée en communes : Touggourt, Nezla, Tebesbest et Zaouia El Abidi. Les conditions y sont moins favorables à la culture de la variété de dattes Deglet Nour par rapport aux deux zones précédentes, et l'eau artésienne a disparu. Le drainage dépend du fonctionnement du Grand canal collecteur. En plus de l'ensemble de Touggourt, les communes de Sidi Slimane, Mégarine, Temacine et Balidat Ameer font également partie de cette zone.

2.2.4. Le flanc : est de la vallée s'étend sur le plateau min-plain, et comprend du nord au sud les communes de M'Rara, El Alia et El Hadjira. Cette zone offre des conditions de sol et de drainage particulièrement favorables, ce qui en fait une zone propice à l'extension des périmètres irrigués, à l'instar de M'Rara qui est une daya. La répartition des superficies agricoles est illustrée dans le schéma ci-joint.

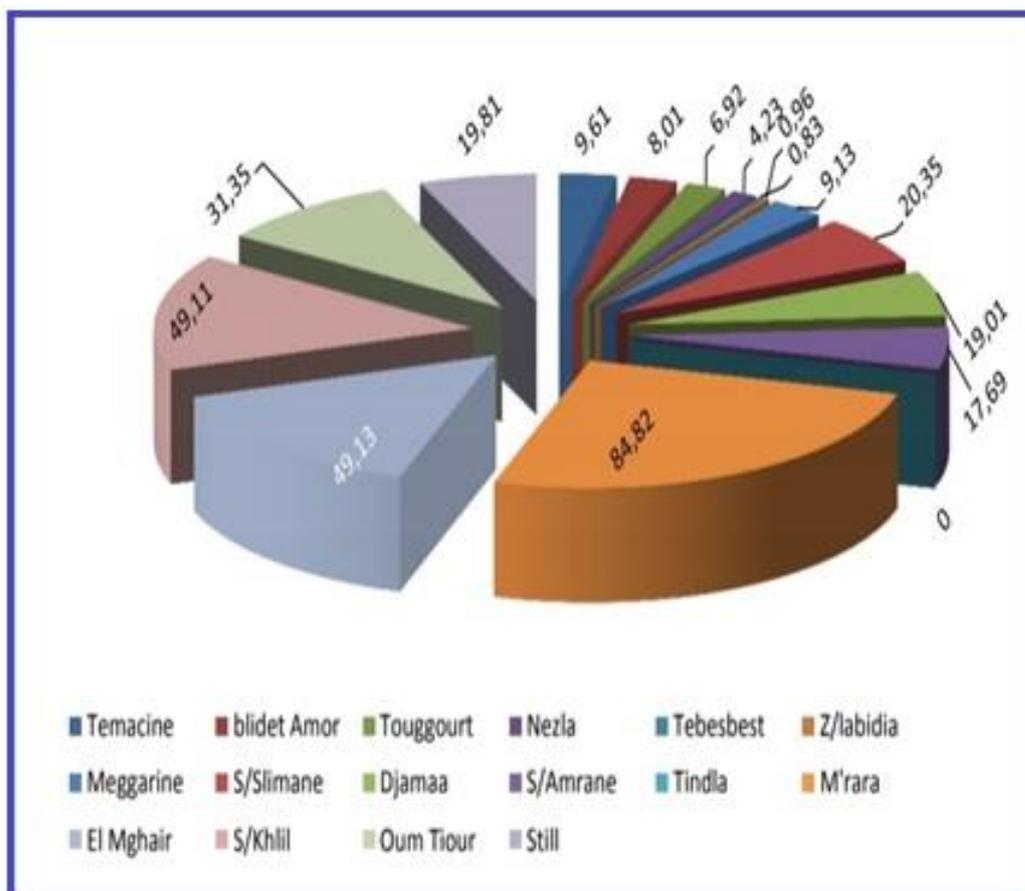


Figure 02. Répartition des superficies cultivées en Km² par communes.

3. Industrie

Dans ce contexte, le nombre de projets d'investissements industriels approuvés dans la région d'Oued Rig s'est élevé à 579 projets, dont 121 projets sont en phase d'exécution, selon de précédentes précisions. Ces projets, qui couvrent une superficie totale de 719 hectares dans différentes municipalités d'Oued Righ, créeront plus de 1 300 emplois directs et indirects, selon les données des autorités locales. Ces investissements concernent plusieurs secteurs économiques tels que l'industrie des matériaux de construction, notamment la production de briques, les industries alimentaires et manufacturières, les services, etc. La région, riche en ressources naturelles, dont l'argile, le sable et le gypse, vise à renforcer ses capacités industrielles, afin d'ajouter de la valeur à l'économie locale et nationale.

4. l'Occupation du sol

La région présente différentes occupations du sol selon une analyse des images satellitaires de la vallée Oued Righ. Voici les différentes catégories ([Boussaada et al. 2017](#)):

- Les surfaces d'eau, y compris les chotts tels que le chott Mérouane.
- Les zones de sol humide qui correspondent à des dépressions où la nappe phréatique est proche de la surface du sol.
- Les dépressions salées éloignées des sources d'alimentation humaine telles que les canaux d'irrigation et les eaux usées.
- Les effets partiels des vents de sable qui peuvent recouvrir partiellement les cristaux de sel formés dans la frange capillaire et en surface.
- La végétation, principalement située à proximité des agglomérations, comprenant des palmeraies et des roseaux.
- Les zones urbaines, comprenant les villes, les agglomérations et les routes.
- Les zones de sol nu, constituées de grès rouges et de sable.

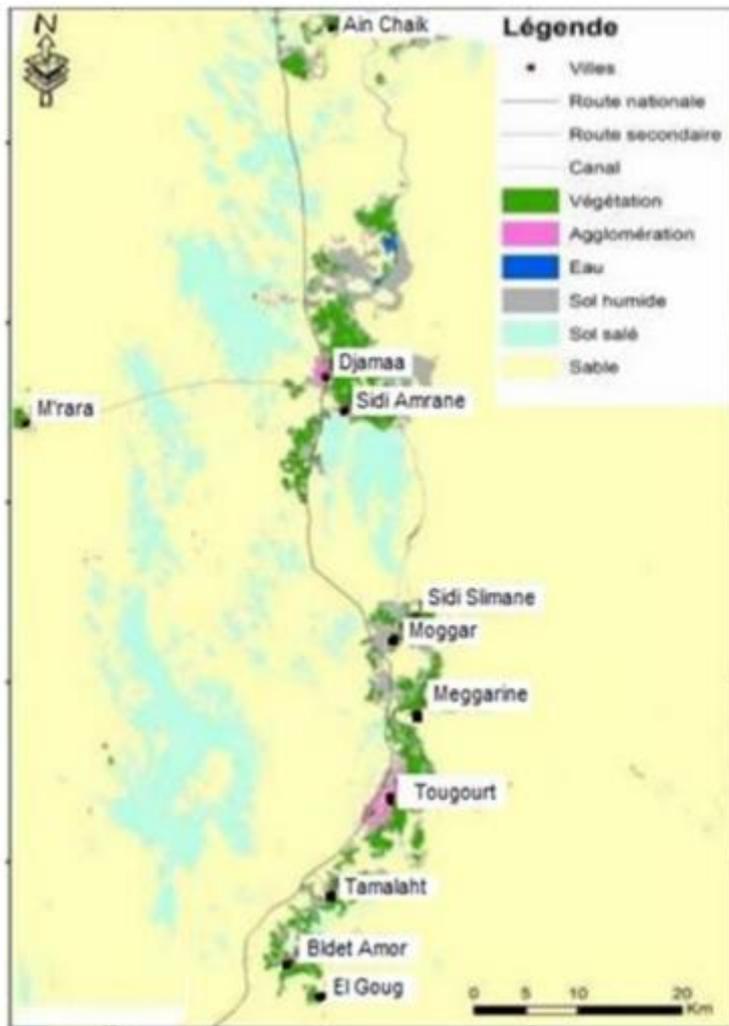


Figure 3. Cartographie de l'occupation du sol de l'Oued Righ (Boussaada et al.2017).

5. Les ressources en eau

L'exploitation des ressources en eau dans la région d'Oued Righ est résumée comme suite:

- D'après le rapport de l'ANRH, la région d'Oued Righ compte plus de 1000 forages captant les nappes du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI).
- Ces forages sont utilisés pour fournir de l'eau potable, pour l'irrigation et pour alimenter quelques unités industrielles dispersées dans la région.
- La vallée d'Oued Righ est la zone où la nappe du Complexe Terminal est la plus exploitée, avec des profondeurs de captage allant de 30 à 240 mètres et des débits de 10 à 40 litres par seconde par forage. Le volume total prélevé est de 263,76 millions de mètres cubes par an pour le Complexe Terminal.

- En ce qui concerne la nappe du Continental Intercalaire, elle est exploitée par 35 forages pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP), avec un débit moyen d'environ 130 litres par seconde par forage.
- En ce qui concerne les réservoirs de stockage, le secteur de l'eau a bénéficié d'une priorité depuis de nombreuses années, ce qui a permis de développer un ensemble d'infrastructures hydrauliques comprenant 17 réservoirs de différentes tailles, offrant une capacité totale de stockage de 12 655 mètres cubes. Ces infrastructures jouent un rôle crucial dans la sécurité hydrique et alimentaire de la vallée d'Oued Righ, et apportent d'importants services au secteur socio-économique.

Tableau 1. Réservoirs de stockage et leurs capacités.

Commune	Nombre de réservoir	Capacité (m ³)
Temacine	1	300
Blidet Amor	2	550
Touggourt	5	10000
Nezla	2	350
Tebesbest	1	150
Zaouïa	1	750
Megarine	3	105
Sidi Slimane	2	550

6. Les caractéristiques hydro-climatologiques

Le climat de l'Algérie est marqué par une diversité géographique et une grande variabilité interannuelle des précipitations. Deux éléments principaux se distinguent : une variabilité pluviométrique entre l'ouest (350 mm de pluie en moyenne), l'est (1000 mm) et les reliefs élevés (2000 mm). Les précipitations deviennent quasi inexistantes à partir du Sahara (moins de 100 mm) et se concentrent principalement de décembre à avril, période durant laquelle l'évaporation est la plus faible (Bouznad, 2017).

Parmi les différents paramètres, le climat est le facteur le plus déterminant pour les ressources en eau. Ainsi, mesurer la hauteur des précipitations est essentiel pour connaître les ressources en eau et les besoins en irrigation. Les mesures de température sont également nécessaires pour déterminer les cultures appropriées. Le climat saharien est bien connu pour ses températures maximales très élevées, son caractère continental et sa grande sécheresse, ce qui classe l'Algérie parmi les régions chaudes.

Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude sont obtenues à partir des données de la station météorologique de Touggourt, sur une période allant de 2010 à 2022. Les coordonnées

géographiques de la station de Touggourt sont : latitude 33°04'N et longitude 06°05'E, avec une élévation de 92 mètres par rapport au niveau de la mer

6.1. Température

La vallée d'Oued Righ se caractérise par un climat saharien, où la température joue un rôle crucial en influençant d'autres facteurs météorologiques tels que l'évaporation et l'humidité. Elle est particulièrement importante pour évaluer le déficit d'écoulement, ce qui est essentiel pour l'estimation du bilan hydrologique. Les relevés mensuels moyens des températures ont été enregistrés sur une période de 13 ans (de 2010 à 2022) par la station météorologique de Touggourt.

Selon les données de tableau 2 et la Figure 4 de Variation des températures moyennes mensuelles. On enregistre une moyenne annuelle des températures de l'ordre de 22.58°C. Les variations moyennes mensuelles des températures montrent qu'elle est maximale au mois de juillet avec une valeur d'ordre de 34.78 °C et minimale au mois de janvier avec une valeur d'ordre de 11.21 °C.

Tableau 2. Température moyennes mensuelles (2010-2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Temp min (°C)	22,80	16,99	9,97	5,45	4,78	6,12	10,35	14,66	19,16	23,96	27,31	26,46
Temp max (°C)	35,97	30,47	23,31	18,14	17,63	19,50	24,25	28,97	33,58	38,61	42,24	41,17
Temp moy (°C)	29,38	23,73	16,64	11,80	11,21	12,81	17,30	21,82	26,37	31,28	34,78	33,82

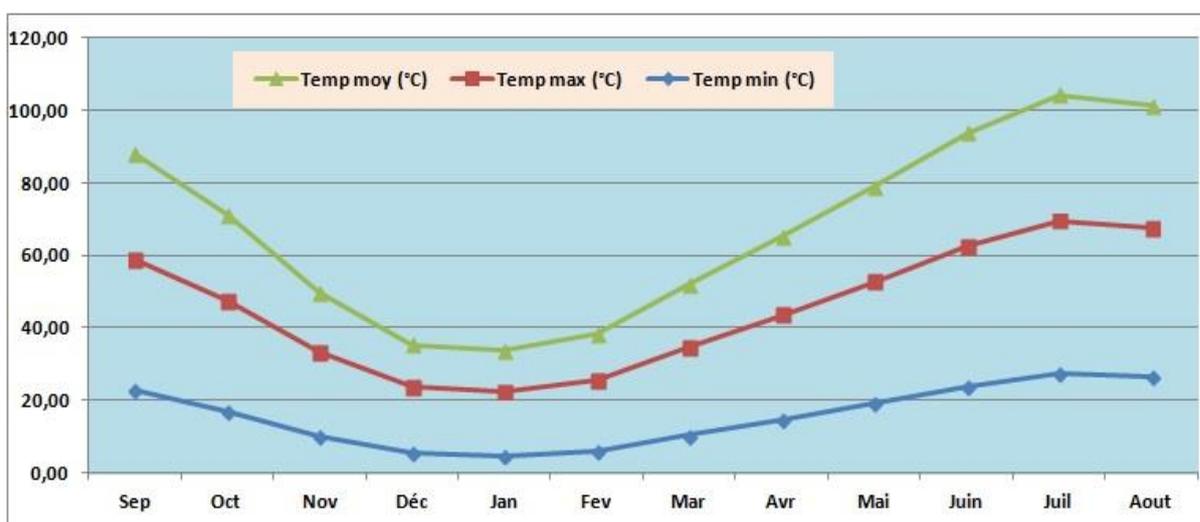


Figure 4. Histogramme des températures moyennes mensuelles (2010-2022).

6.2. précipitation

La pluviométrie est le paramètre climatique majeur pour la recharge des nappes phréatiques et le développement des réseaux hydrographiques. Pour étudier les précipitations, nous utiliserons les séries chronologiques enregistrées sur une période de 10 ans (de 2013 à 2022) par la station météorologique de Touggourt. Dans la vallée de Touggourt, les précipitations sont irrégulières d'une année à l'autre et leur répartition au cours de l'année n'est pas homogène.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 54.71 mm. Pour les précipitations moyennes mensuelles et selon le tableau 3 et la figure 5, le mois le plus pluvieux est le mois de janvier, avec une précipitation de 15.06 mm, tandis que les plus faibles précipitations sont enregistrées en juillet, avec seulement 0.07 mm.

Tableau 03. Précipitation moyennes mensuelles (2010-2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	total
Précipitation (mm)	6,15	5,28	2,33	4,57	15,06	1,07	4,56	9,48	1,50	0,73	0,07	3,91	54,71

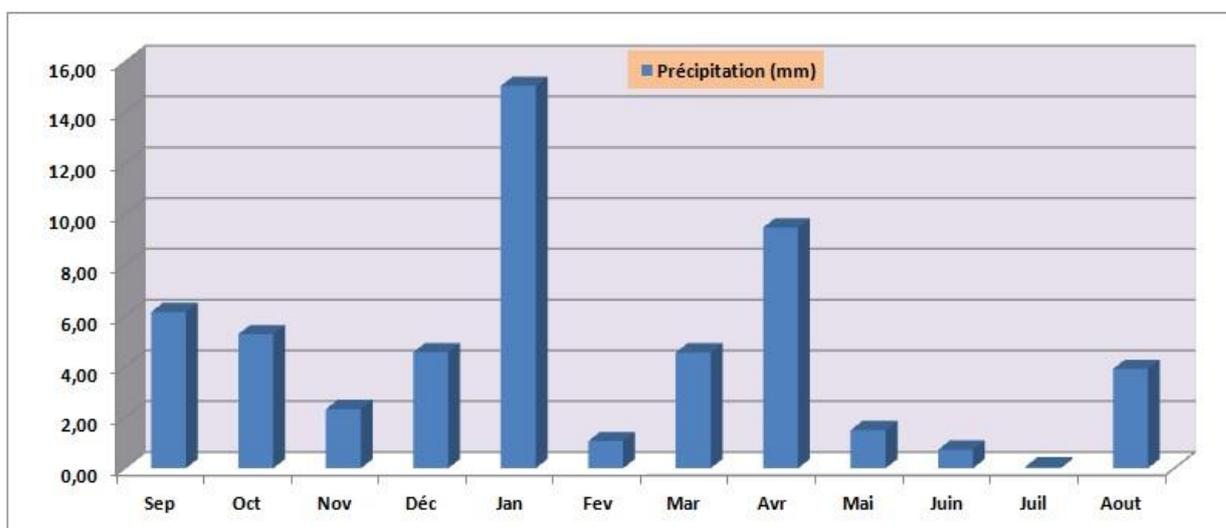


Figure 5. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (2010-2022).

6.3. Diagramme Ombro-thermique de Gaussen

Les indices bioclimatiques, permettent de caractériser le niveau de sécheresse ou d'aridité d'un lieu ou d'un climat. La méthode la plus couramment utilisée est le diagramme ombre-thermique. Cette méthode décrite dans cette étude prend en compte les moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et des températures (T en °C) pour évaluer la sécheresse estivale en termes de durée et d'intensité.

Dans la région étudiée, ce diagramme montre que pour un climat saharien, une période déficitaire en s'étale toute l'année. Cela signifie que les précipitations sont insuffisantes pour

compenser les pertes en eau causées par des températures élevées, entraînant ainsi des Le diagramme établi représente les précipitations en eau fonction de double de températures. Il met en évidence les périodes sèches. Selon Gaussen et Bagnouls, un mois est considéré comme sec lorsque la totalité des précipitations est inférieure ou égale au double de la température moyenne de ce mois ($P \text{ mm} \leq 2Tc^\circ$). La période déficitaire en eau, ou sèche, correspond à la zone où la courbe des températures est au-dessus de la courbe des précipitations. En revanche, la période humide correspond à la zone où la courbe des températures est en dessous de la courbe des précipitations.

conditions arides tout au long de l'année.

Tableau4. Données utilisées pour la construction du diagramme Ombro-thermique.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
2 Temp (°C)	58,77	47,45	33,28	23,59	22,41	25,62	34,60	43,63	52,74	62,57	69,55	67,63
Précip (mm)	6,15	5,28	2,33	4,57	15,06	1,07	4,56	9,48	1,50	0,73	0,07	3,91

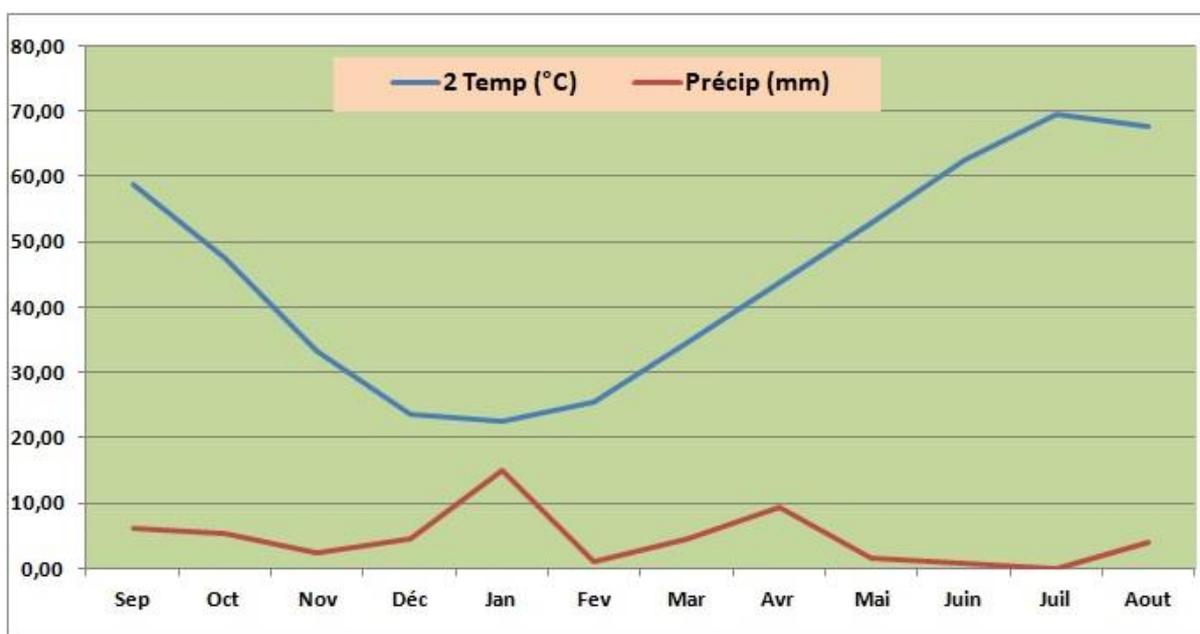


Figure.6 Diagramme Ombro-thermique de la région d'Oued Righ.

6.4. Evaporation

Dans les régions arides, l'eau se perd principalement par évaporation et évapotranspiration. Dans les bassins arides fermés, ces mécanismes sont les seuls responsables des pertes d'eau. La région étudiée présente des taux d'évaporation élevés, avec une moyenne annuelle de 2225 mm par an d'eau évaporée entre 2010 et 2022. Les variations mensuelles montrent une évaporation minimale de 76.95 mm en janvier (période humide) et une maximale de 322.12 mm en juillet (période sèche), indiquant une influence saisonnière marquée. Pendant la

période humide, les pertes d'eau sont réduites en raison de l'humidité atmosphérique accrue, tandis que la période sèche, plus chaude et moins humide, voit une augmentation significative de l'évaporation.

Tableau 05. L'évaporation moyenne mensuelle (2010-2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	total
Evaporation (mm)	215,59	170,10	125,10	84,35	76,95	113,37	148,30	191,66	228,01	272,32	322,12	277,24	2225

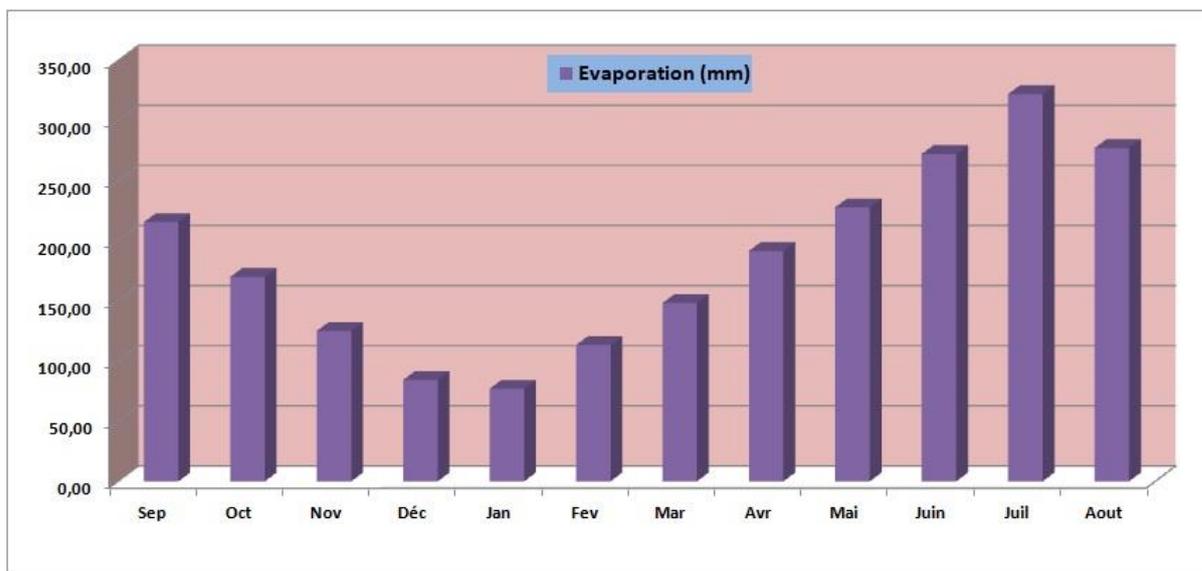


Figure 7. Histogramme de l'évaporation moyenne annuelle (2010-2022).

6. 5. Humidité :

L'humidité représente le pourcentage de l'eau existant dans l'atmosphère. Les niveaux d'humidité varient en fonction de la température et de la pression atmosphérique. L'humidité moyenne de la région (Fig. et Tab.) est minimum pendant le mois de juillet avec une valeur de l'ordre de 32.19 % et maximum pendant le mois de décembre avec une valeur de 65,33 %. L'humidité relative est de 62.44 % en hiver et de 34.26 % en été.

Tableau 6. Humidité relative moyenne mensuelle (2010 – 2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	total
Humidité (%)	43,40	49,28	56,60	62,08	64,28	54,07	47,41	42,61	36,74	32,50	29,79	33,50	552,26

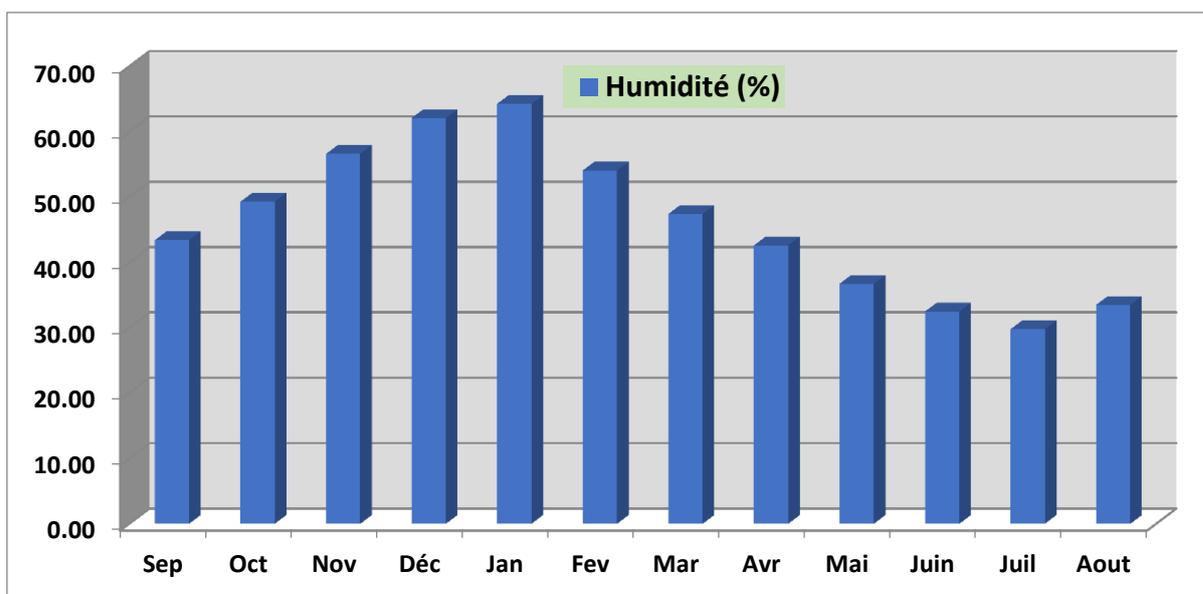


Figure 8. Histogramme d'humidité moyenne mensuelle (2010-2022).

6.6. Ensoleillement

Le Sahara, avec ses impressionnantes 3000 à 3500 heures d'ensoleillement par an, détient le record mondial incontesté de lumière solaire, éclipsant largement les 1600 heures enregistrées à Paris. Pendant la saison sèche, le ciel se pare d'une clarté éblouissante, à condition que le vent ne vienne pas troubler cette tranquillité, ce qui est rarement le cas. Cependant, durant la saison des pluies, le ciel adopte un aspect plombé et les nuages peuvent se rassembler pour former une étendue continue, offrant un spectacle impressionnant qui est d'autant plus remarquable dans ces vastes horizons sahariens (Ould Baba Sy 2005).

Notre région, quant à elle, se distingue par une moyenne de 3081 heures d'ensoleillement par an au cours de la période de 2010 à 2022. Cette abondance de soleil confirme sans conteste le caractère aride et sec de notre climat saharien. Les données de la figure 13 montrent clairement que la luminosité saisonnière est marquée par une intensité solaire particulièrement élevée, atteignant environ 322 heures au mois de juillet. En revanche, durant la période froide, qui s'étend d'octobre à février, l'ensoleillement moyen diminue jusqu'à 215.51 heures au mois de février.

Tableau 7. Durée d'ensoleillement moyen mensuel (2010-2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	total
Insolation (h)	247,25	251,65	226,66	216,10	221,39	215,51	234,98	254,83	297,08	288,71	322,27	304,65	3081



Figure 9. Histogramme de la durée d'ensoleillement moyen mensuel (2010-2022).

6.7. Bilan hydrique

Le bilan hydrique d'Oued Righ (Tableau 1), dans la période (2010-2022) suivant la méthode de Thornthwaite est déficitaire, la quantité d'eau précipitée sera vite évaporée parce que évapotranspiration potentiel (ETP) est plus importante que les précipitations, sauf au mois de janvier, le réserve facilement utilisable (RFU) est nulle pendant les onze mois de l'année (Fig.10). Le déficit agricole (Déf) est présent pendant onze mois de l'année, elle atteindra son maximum au mois de juillet 257.19 mm.

L'évapotranspiration réelle (ETR), calculée selon la méthode de Thornthwaite et en tenant compte des réserves facilement utilisables (RFU) de 100 mm, s'établit en moyenne à 54,71 mm par an. Elle atteint un maximum de 10,88 mm en janvier et un minimum de 0,07 mm en juillet. L'évapotranspiration réelle correspond à 100 % de la pluviométrie moyenne annuelle.

Le bilan hydrique de la région d'étude montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable, la recharge de la nappe est faite par les eaux la ré-infiltration due à l'irrigation et les eaux urbaines (les eaux usées domestiques).

Tableau 08: Le bilan hydrologique selon Thornthwaite (période 2010-2022).

Paramètre	Temp	Préc	ETPC	RFU	ETR	Déf
Sep	29,38	6,15	140,68	0,00	6,15	134,53
Oct	23,73	5,28	77,95	0,00	5,28	72,66
Nov	16,64	2,33	28,67	0,00	2,33	26,34
Déc	11,80	4,57	11,50	0,00	4,57	6,93
Jan	11,21	15,06	10,88	4,18	10,88	0,00
Fev	12,81	1,07	14,81	0,00	5,25	9,56
Mar	17,30	4,56	37,80	0,00	4,56	33,24
Avr	21,82	9,48	71,78	0,00	9,48	62,30
Mai	26,37	1,50	126,38	0,00	1,50	124,88
Juin	31,28	0,73	194,67	0,00	0,73	193,94
Juil	34,78	0,07	257,26	0,00	0,07	257,19
Aout	33,82	3,91	224,52	0,00	3,91	220,61
Annuel	22,58	54,71	1196,91	00,00	54,71	1142,19

7. Contexte géologique

7.1. Géologie régionale

La reconnaissance géologique de la région d'étude est une étape essentielle pour toute étude hydrogéologique. Elle permet de déterminer la nature lithologique et la description stratigraphique des formations, distinguant ainsi celles susceptibles de contenir des aquifères souterrains. Pour identifier les caractéristiques géologiques du réservoir, nous examinerons d'abord les aspects géologiques régionaux, puis nous nous concentrerons sur l'échelle locale propre à la région d'Oued Righ.

La région de Touggourt, située dans le Bas Sahara, se trouve entre la faille sud de l'Atlas et les premiers contreforts des monts Aurès au nord, avec la falaise sud de Tinhert au sud. Les affleurements crétacés du Dahar se situent à l'est, et la crête du Mzab à l'ouest (Busson 1970).

Le Bas Sahara se distingue par sa topographie extrêmement simple. À l'exception du côté nord, les autres frontières sont de hauteur modérée et s'inclinent doucement vers la zone déprimée, marquée par l'axe SSW-NNE et traversée par les oueds Mya et Righ.

Cependant, au nord, se trouve une haute barrière composée des monts Ouled Nail, Aurès et Nemamcha, bordant une dépression longitudinale occupée par des chotts dont le fond est en dessous du niveau de la mer. Cette région couvre une superficie de 720 000 km².

Le Bas Sahara apparaît comme un bassin synclinal, avec des reliefs allant du Cambrien au Tertiaire largement masqués par le Grand Erg oriental. Quelques affleurements sont toutefois

observés en bordure (Busson 1967 ; OSS 2003). Des terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux du Tademaït et du Tinghert, et le massif du Hoggar.

Les gisements mésozoïques et cénozoïques constituent les principaux affleurements aux confins du Bas Sahara. Les dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaire occupent le centre du bassin.

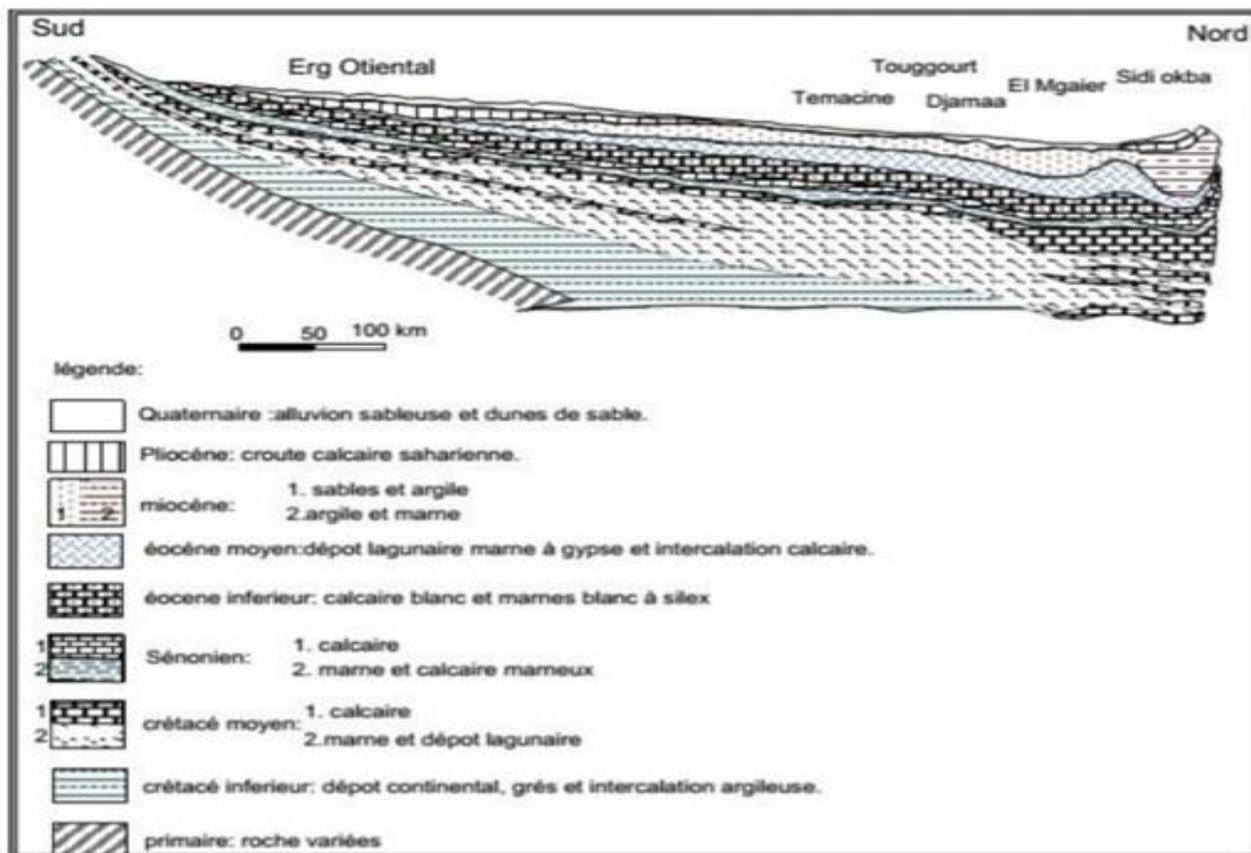


Figure 10. Coupe géologique N-S passant par la vallée d'Oued Righ.

7.2. Géologie locale

La géologie locale d'Oued Righ, telle que représentée sur la carte géologique, est caractérisée par diverses formations quaternaires qui affleurent dans la région. Ces formations incluent les dunes récentes de Meggarine, Sidi Slimane et Erg es-Sayah. On y trouve également le quaternaire continental à Merdjadja et les alluvions actuelles à Temacine et Zaouia. La détermination de la géologie de la région est possible grâce à l'interprétation des données provenant des sondages pétroliers et des forages d'eau. Les formations géologiques sont décrites dans un ordre chronologique, en commençant par les plus anciennes et en progressant vers les plus récentes.

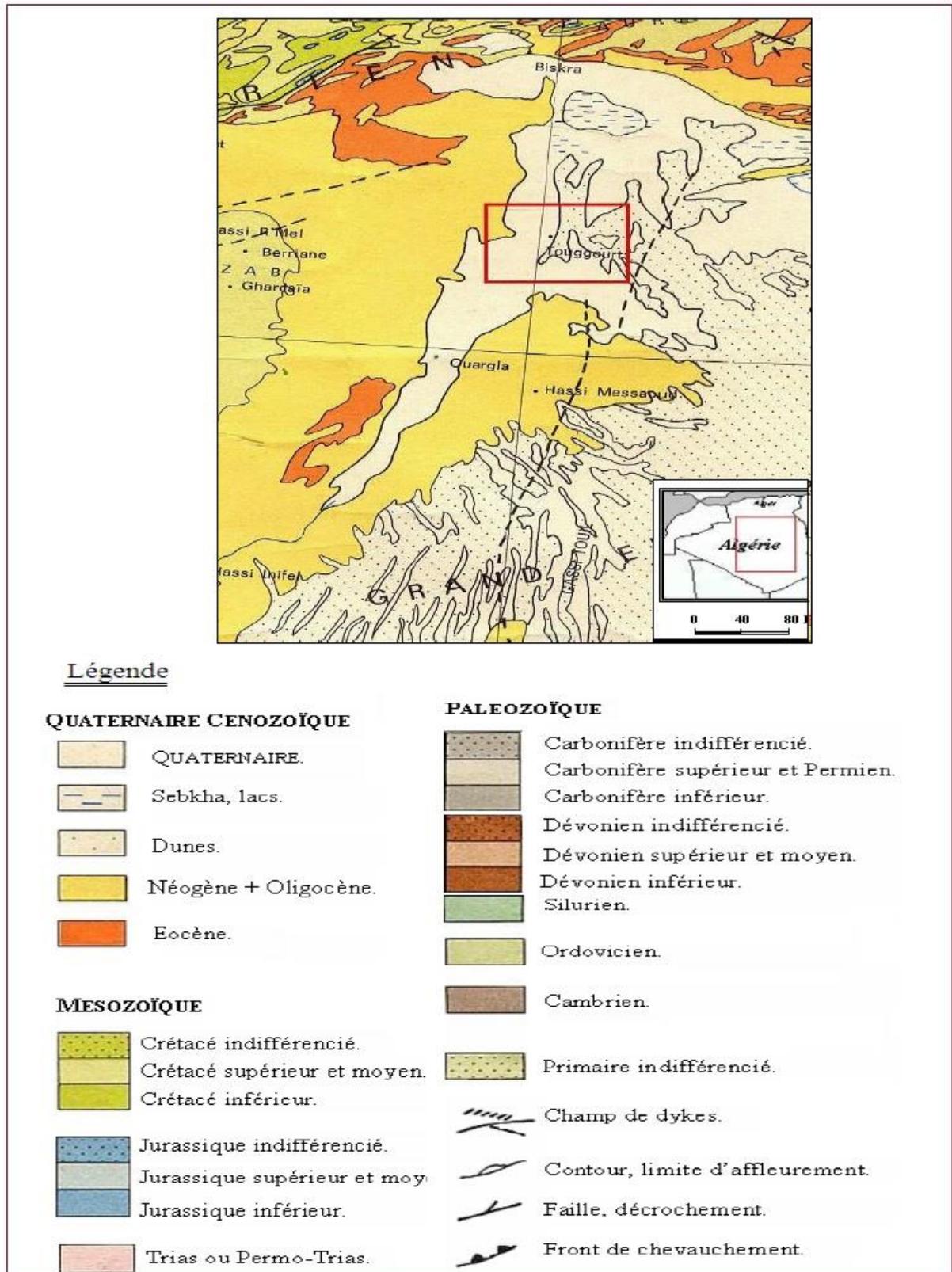


Figure 11. Carte géologique d'Oued Righ extrait de la carte géologique de l'Algérie.

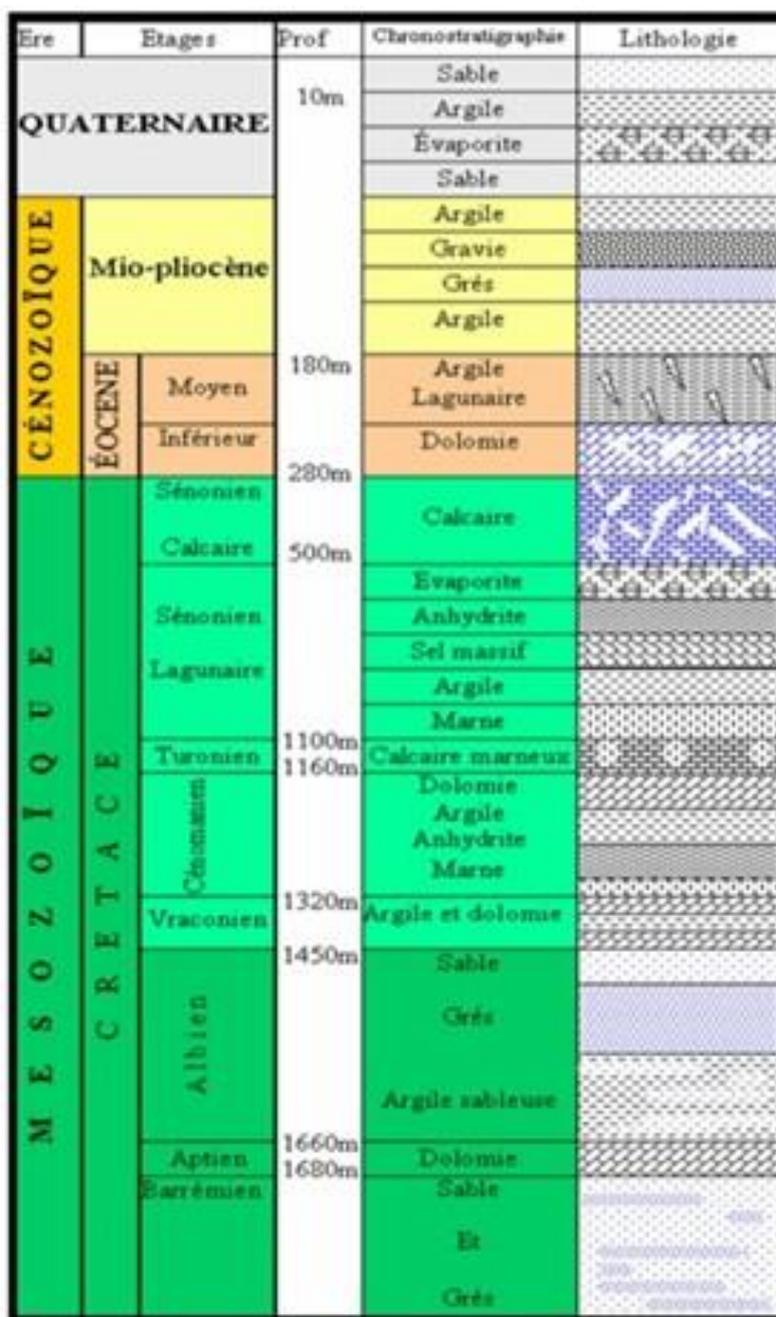


Figure 12. Log stratigraphique synthétique.

7.2.1. Le Mésozoïque :

a. Le Crétacé :

Cette période géologique présente un intérêt particulier pour deux raisons. Premièrement, le Crétacé est visible le long des frontières du Bas Sahara et repose sur un substrat primaire constitué de diverses roches telles que des schistes, des grès et du calcaire. Deuxièmement, les affleurements crétacés sont très étendus dans l'est de l'Algérie. Le Crétacé se compose principalement de couches continentales alternant entre des grès et des argiles (Busson 1970 ; 1967 ; Bouznad 2017).

b. Le Néocomien : Le Néocomien se divise en deux séries :

La série inférieure est principalement composée d'argiles grises et vertes, riches en particules sédimentaires, avec des intercalations de dolomies microcristallines et cristallines.

La série supérieure comprend deux ensembles distincts : le premier est constitué de dolomies et de calcaires microcristallins avec des intercalations d'argiles, de pélites et de marnes blanches et grises; le second est principalement anhydritique avec des intercalations d'argiles anhydritiques, de couleur grise, verte et rouge, qui se transforment en marnes avec des couches dolomitiques. L'épaisseur du Néocomien est de 350 mètres.

c. Le Barrémien :

Son épaisseur varie entre 150 et 200 mètres. Il est composé de grès fins à moyens avec un ciment argileux, des traces de quartz blanc laiteux, ainsi que des intercalations de sable et de grès arkosique. Cette série détritique poreuse constitue un important aquifère du Complexe Intercalaire.

d. L'Aptien :

L'Aptien est un terrain semi-perméable dont l'épaisseur varie de 28 à 31 mètres.

e. L'Albien :

L'Albien est principalement composé de grès friables avec un ciment argileux et des argiles sableuses. Les grès et sables sont fins à très fins, parfois présents sous forme de pélites, tandis que les argiles sont souvent pélitiques et de couleur grise ou verdâtre. Les carbonates diminuent d'est en ouest, avec une épaisseur croissante de 200 à 300 mètres.

f. Le Vraconien :

Il est constitué d'une alternance irrégulière de niveaux argileux et dolomitiques, d'argiles sableuses et, plus rarement, de grès à ciment calcaire. Le Vraconien est imperméable et son épaisseur est d'environ 110 mètres.

g. Le Cénomaniien :

À Touggourt, le Cénomaniien est caractérisé par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites, avec une épaisseur de 200 à 250 mètres.

h. Le Turonien :

Dans cette période, la mer atteint son extension maximale dans la région du Bas Sahara. Le Turonien se compose principalement de calcaire et de dolomie, avec une base marneuse et une partie supérieure dolomitique ou calcaire, son épaisseur est d'environ 90 à 100 mètres.

i. Le Sénonien :

Dans le Bas Sahara, le Sénonien se compose de deux ensembles lithologiques distincts : le Sénonien lagunaire à la base et le Sénonien carbonaté au sommet. Le Sénonien carbonaté est constitué principalement de dolomies et de calcaires micro-fissurés, parfois intercalés de marnes ou d'anhydrites, avec une continuité lithologique vers l'Eocène carbonaté. Le Sénonien lagunaire se compose d'une alternance de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argiles et de sels, jouant le rôle d'une couche imperméable de base.

7.2.2. Le Cénozoïque :

a. L'Eocène : se divise en deux parties :

**L'Eocène inférieur* (carbonaté) se compose de bancs de dolomies, de calcaires dolomitiques, de calcaires contenant des nummulites et des nodules de silex, avec une épaisseur atteignant 120 mètres.

**L'Eocène moyen* (évaporitique) comprend des alternances de calcaires et de marnes rouges riches en gypse, ainsi que de l'argile et des anhydrites.

L'Oligocène n'est pas observé dans la région saharienne. Pendant cette période, le Sahara était une plateforme émergée avec une sédimentation continentale similaire à celle du Miocène, rendant difficile la distinction des étages géologiques.

b. Le Mio-Pliocène :

Il correspond au Complexe Terminal, un ensemble puissant de sables et d'argiles s'étendant sur l'ensemble du Sahara, reposant en discordance sur des formations géologiques plus anciennes. Son épaisseur varie de 140 mètres au sud à 280 mètres au nord.

Niveau 01: Argileux et peu épais, il se trouve uniquement dans la zone centrale du Sahara Oriental, suivant une bande nord-sud. Ces argiles forment une barrière très peu perméable entre la nappe du Sénonien et de l'Eocène carbonaté et celle des sables du Niveau 02.

Niveau 02: Grés-sableux, c'est le niveau le plus épais et le plus constant à sa base. On y trouve parfois des graviers, tandis que le sommet devient progressivement plus argileux pour passer au Niveau 03. Il atteint 400 mètres au sud de Gassi Touil. Le Niveau 02 constitue le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène.

Niveau 03: Formation argilo-sableuse aux limites inférieures et supérieures assez mal définies. Cette couche imperméable n'existe que dans certaines zones et n'est épaisse et constante que dans la région des chotts.

Niveau 04: Deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène, parfois en continuité avec le Niveau 02. Le sommet du Niveau 04, affleurant sur de grandes surfaces, est souvent constitué

d'une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne). L'épaisseur de cet horizon est d'environ 300 mètres.

7.2.3. Le Quaternaire :

Le Quaternaire est constitué de sables éoliens et argileux résultant de l'érosion des falaises du Mio-Pliocène. On y trouve localement des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Ces sables forment de grandes accumulations dans le Grand Erg Oriental et contiennent la nappe phréatique, avec une épaisseur pouvant atteindre une dizaine de mètres.

8. Contexte hydrogéologique

8.1. Présentation du SASS

Le Système Aquifère Saharien Septentrional (SASS) est composé de deux principales couches aquifères : l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) et l'aquifère du Complexe Terminal (CT) (OSS 2003 ; Satouh et al. 2021 ; UNESCO 1972 ; Castany 1982 ; Cornet 1964 ; Bouselsal 2017). L'aquifère du CI est la plus profonde, tandis que l'aquifère du CT est fortement sollicité dans certaines régions, notamment l'Oued Rhig, le Souf, le Djérid, la Nefzaoua et le golfe de Syrte.

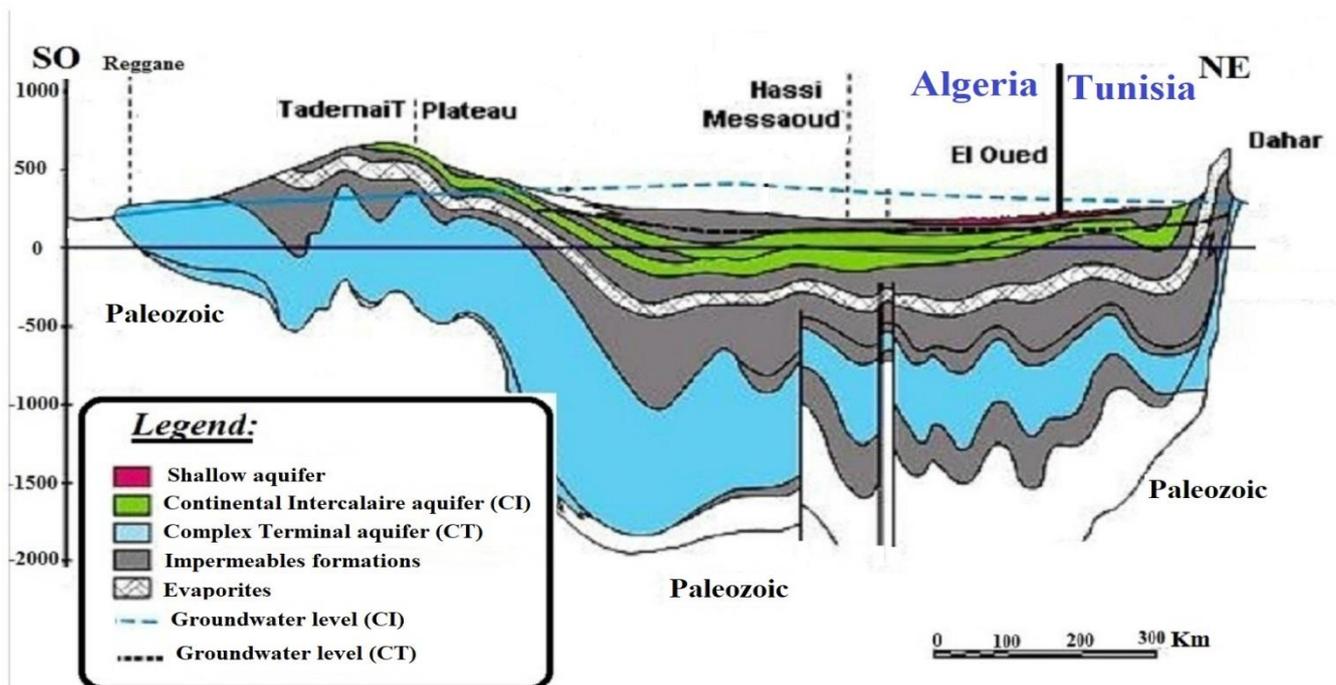


Figure 13. Coupes hydrogéologiques dans le Sahara septentrional (UNESCO 1972).

Ce système couvre une superficie de plus d'un million de kilomètres carrés, dont 60 % se trouvent en Algérie (700 000 km²), 10 % en Tunisie et 30 % en Libye (OSS, 2003).

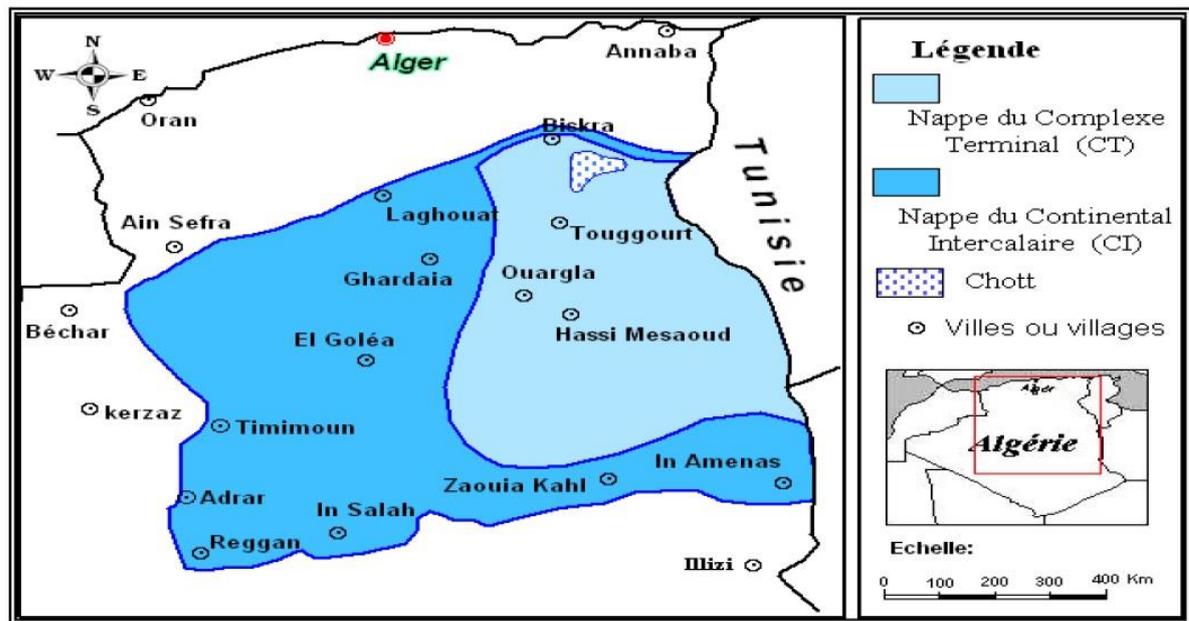


Figure 14. Extension des formations aquifères du SASS (OSS, 2003).

8.2. Hydrogéologie d'Oued Righ :

L'hydrogéologie de la région d'Oued Righ est caractérisée par la superposition de trois aquifères, à savoir l'aquifère phréatique, l'aquifère du Complexe Terminal (CT) et l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) (Belksier 2017 ; Bouznad 2017 ; OSS 2003).

8.2.1. La nappe phréatique :

Elle est composée de sables de différentes tailles et d'argile gypseuse. Sa base est constituée d'argile qui forme également le toit de la première nappe du Complexe Terminal (CT). L'épaisseur de la nappe phréatique varie de 7 à 60 mètres. Elle se caractérise par des niveaux élevés de salinité, avec une conductivité électrique généralement comprise entre 10 et 36 mS/cm. En conséquence, cette nappe n'est plus exploitée actuellement.

8.2.2. L'aquifère du Complexe Terminal (CT) :

Dans la région d'Oued Righ, cet aquifère est composé de trois nappes ayant des âges et des compositions lithologiques différentes. Ces nappes sont séparées par des formations semi-perméables ou imperméables (Sayah Lambarak 2008 ; OSS 2003 ; ANRH 2008 ; Bouselsal and Belksier 2018).

a. La première nappe (CT₁) : Proximité de la surface : Épaisseur variant de 50 à 100 mètres.

Composition : Principalement constituée de sable fin à moyen, de sable argileux et de grès, datant de l'âge Mio-Pliocène. La composition sableuse varie latéralement.

Caractéristiques : Repose sur une couche d'argile et est recouverte par des argiles et des évaporites, ce qui en fait une nappe captive.

Exploitation : Autrefois largement exploitée avec des débits d'eau allant de 20 à 40 litres par seconde. Actuellement, moins utilisée en raison de la salinité élevée de l'eau.

b. La deuxième nappe (CT₂) :

Composition : Formations géologiques similaires à CT₁, avec un âge Mio-Pliocène. Principalement constituée de grès, de gravier et de sable, avec quelques zones argileuses.

Épaisseur : Varie de 20 à 36 mètres.

Exploitation : Fournit des débits allant de 25 à 45 litres par seconde. Repose sur des argiles calcaires et des marnes, recouverte d'argiles et d'argiles sableuses.

Alimentation : Localement par les précipitations rares, les eaux de surface s'infiltrant (nappe phréatique et canal de l'Oued Righ), et les eaux souterraines provenant des nappes artésiennes sous-jacentes. Prélèvements d'eau effectués uniquement par des forages.

c. La troisième nappe (CT₃) :

Composition : Composée de carbonates datant de l'Éocène inférieur et du Sénonien supérieur. Couches de calcaire, calcaire dolomitique ou mameux, anhydrite, gypse.

Épaisseur : Varie de 200 à 350 mètres à Touggourt et environ 360 mètres à Meghaier.

Exploitation : Seule la deuxième couche de sable est exploitée pour l'approvisionnement en eau souterraine, principalement dans le nord.

Stratification : Substratum lagunaire du Sénonien à la base et couche principalement argileuse au sommet.

Ces trois nappes constituent un système complexe et varié, essentiel pour comprendre et gérer les ressources en eau de la région d'Oued Righ.

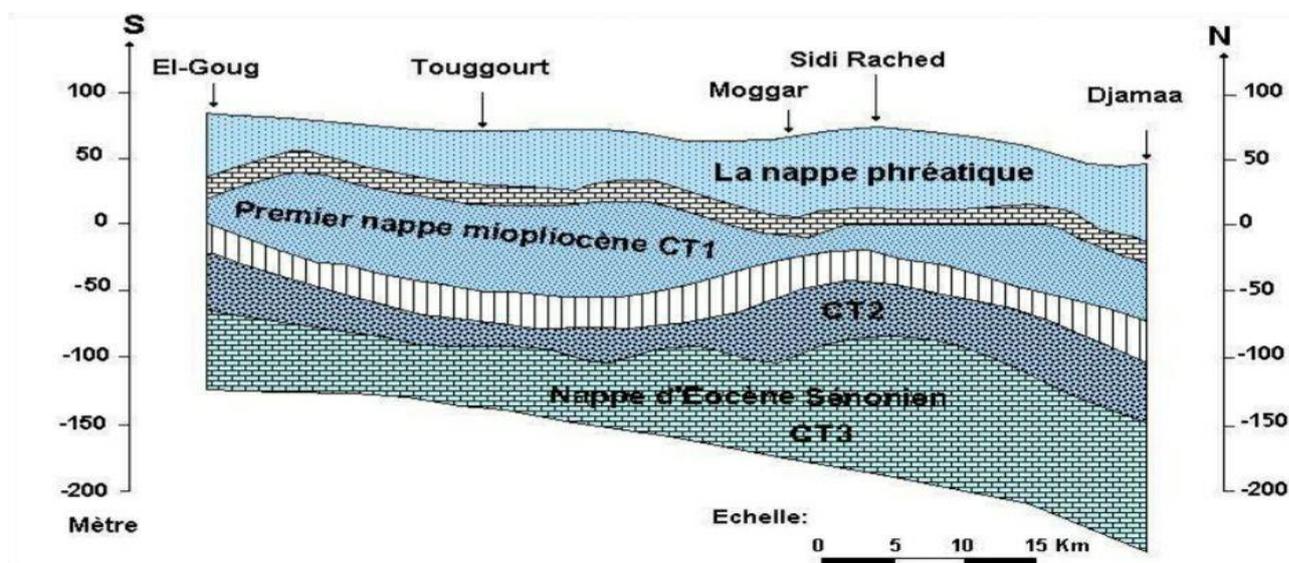


Figure 15. Coupe hydrogéologique du complexe terminal de la région d'Oued Righ.

8.3. Continental Intercalaire(CI)

Le terme "*Continental Intercalaire*" (CI) fait référence à l'ensemble des couches de sédiments déposées au Sahara pendant le Mésozoïque supérieur, entre deux cycles marins (OSS 2003 ; UNESCO 1972 ; Edmund 2003). Cet aquifère est le plus important du Sahara, avec une épaisseur allant de 250 à 1000 mètres, et il se trouve à une profondeur de plus de 1800 mètres dans la région d'Oued Righ. Principalement composé de sables gréseux ou argileux, les zones les plus épaisses se situent à l'est d'El Goléa, atteignant entre 750 et 1000 mètres. Dans la vallée de l'Oued Righ et les Zibans, les épaisseurs sont légèrement inférieures, environ 350 mètres.

Le Continental Intercalaire est limité au nord par l'Atlas Saharien, à l'ouest par l'axe Béchar-Réggan, et au sud par l'axe Réggan-Ain Amenas. À l'est, il s'étend au-delà des frontières algéro-libyennes et algéro-tunisiennes. Il est divisé en deux bassins par la dorsale du M'zab : le bassin occidental-oriental et le bassin oriental, qui englobe le Bas Sahara.

La transgression cénomanienne confère au Continental Intercalaire une limite supérieure plus uniforme que sa limite inférieure. En périphérie, le CI se termine en pente sur les anciens reliefs hercyniens, mais il atteint rapidement une grande épaisseur dans les anciennes cuvettes d'accumulation. Le toit du CI commence généralement au niveau du toit de l'Albien, situé à environ 2000 mètres au-dessus du sol, tandis que le mur du CI correspond à la discordance hercynienne sous les plateaux du Tadmait et du Tinhert.

Pendant les périodes pluviales du Quaternaire, le Continental Intercalaire s'est enrichi en eau. Actuellement, il reçoit une recharge faible, principalement à partir du piémont de l'Atlas Saharien. L'eau s'infiltré dans le système aquifère par plusieurs moyens : l'infiltration des eaux de ruissèlement provenant des reliefs environnants et les précipitations sur les affleurements. Les apports d'eau proviennent du piémont de l'Atlas Saharien au nord et du plateau de Tinhert au sud.

On estime que la quantité d'eau qui tombe annuellement sur les affleurements du Crétacé inférieur continental est d'environ 2,5 milliards de mètres cubes. Cependant, il est difficile de déterminer un coefficient d'infiltration pour ces formations en raison des conditions climatiques, notamment des faibles précipitations et d'une évaporation intense.

Les exutoires de l'eau incluent les puits artésiens dans le bassin oriental, les foggaras dans le bassin occidental, ainsi que les sebkhas et les chotts (Ould Baba 2005).

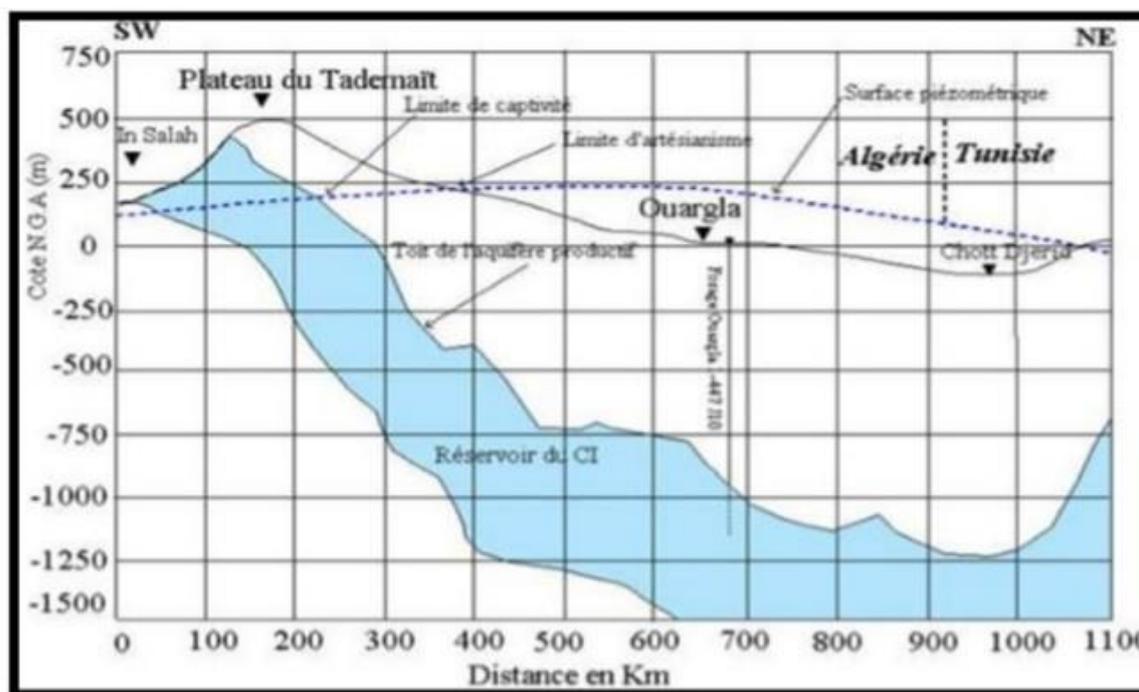


Figure 16. Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI (Tuohir M et Tarmoune ,2014).

9. Conclusion

La région d'Oued Righ se localise dans le sud-est de l'Algérie, au nord-est du Sahara, à la limite nord du Grand Erg Oriental et à la frontière sud du massif des Aurès. La population de la région atteignait 611 354 habitants en 2020, attirée par les opportunités offertes par les secteurs des services, de l'agriculture et de l'industrie, notamment la production de briques et la transformation des hydrocarbures. Le climat saharien de la région se distingue par des températures élevées, avec une moyenne annuelle de 22,58°C, atteignant un maximum de 34,78°C en juillet et un minimum de 11,21°C en janvier. La pluviométrie est faible et irrégulière, avec une moyenne annuelle de 54,71 mm, concentrée principalement de décembre à avril. L'évaporation élevée, atteignant une moyenne annuelle de 2225 mm, accentue les conditions arides.

La géologie de la région est caractérisée par une succession de couches sédimentaires présentant un intérêt hydrogéologique allant du Crétacé au Quaternaire, avec des affleurements marqués par des dunes récentes et des alluvions. Les principaux aquifères de la région, à savoir la nappe phréatique, l'aquifère du Complexe Terminal (CT) et l'aquifère du Continental Intercalaire (CI), jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau. La nappe phréatique, cette nappe constituée de sables et en argile gypseuse, n'est actuellement plus exploitée en raison de sa haute salinité, avec une conductivité électrique variant entre 10

et 36 mS/cm. L'aquifère du CT, composé de plusieurs nappes distinctes, présente des épaisseurs variant de 50 à 360 mètres et reste partiellement exploité malgré les défis de salinité. L'aquifère du CI, le plus profond et le plus important, présente des épaisseurs allant jusqu'à 350 mètres à Oued Righ et se trouve à une profondeur de plus de 1800 mètres dans la région d'Oued Righ. Ce dernier est essentiel pour l'approvisionnement en eau pour les différents usages, y compris l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie.

Chapitre 02:

Matériels et méthode

1. Echantillonnage et méthode d'analyse

Pour garantir une distribution uniforme et obtenir les meilleurs résultats possibles, des forages d'eau souterraine ont été sélectionnés dans diverses zones de la région de l'Oued Righ, captant à la fois l'aquifère de complexe terminal (CT) et l'aquifère de continental intercalaire (CI). Cependant, des contraintes ont empêché la collecte d'échantillons dans certaines zones, soit en raison du manque de forages d'exploitation, soit en raison de difficultés d'accès à certains sites de forage. Pour cette étude, 35 échantillons d'eau provenant de forages captant différents aquifères CT et CI ont été sélectionnés. La répartition de ces échantillons analysés est présentée dans le tableau ci-dessous, comprenant 15 échantillons d'eau provenant de l'aquifère CI et 20 échantillons d'eau provenant de l'aquifère CT.

Les paramètres physico-chimiques tels que le pH et la conductivité électrique ont été mesurés in situ à l'aide d'un multiparamètre portable. Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en polyéthylène après filtration pour chaque point d'eau. Les échantillons pour les cations ont été filtrés puis immédiatement acidifiés à un pH inférieur à 2 en ajoutant de l'acide nitrique, tandis que les échantillons pour les anions n'ont pas été acidifiés. Les analyses ont été réalisées au laboratoire d'ANRH Ouargla, où le calcium, le magnésium et le chlore ont été dosés par titrimétrie, le sulfate par photo-colorimétrie, et le sodium ainsi que le potassium ont été mesurés au moyen d'une spectrométrie d'absorption atomique à flamme (Rodier 1996).

La Balance Ionique (IB) a été utilisée pour vérifier la validité des résultats analytiques des eaux. Lorsque la valeur de la Balance Ionique, calculée selon la formule 1, est inférieure ou égale à 5 %, les résultats des analyses sont considérés comme valides, ce qui permet de poursuivre l'interprétation des données.

$$\text{La Balance Ionique (IB)} = [(\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}) / (\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions})] * 100 \quad (1)$$

Tableau 09. Inventaire des forages utilisés dans l'étude hydrochimique.

Nom	Designation	Nappe
F 1	Albien Ain Sahra Touggourt	CI
F 2	Albien Tarfait Salah SM3 Meghaier	CI
F 3	Albien Mansoura Tamerna Sidi Amrane Djamaa	CI
F 4	Albien Djamâa D13 F3	CI
F 5	Albien Ain Abane CI2 SM4 El Meghaier	CI
F 6	Albien El Khadra CI 1 SM4 El Meghaier	CI
F 7	Albien Tarfait Salah CI 12 SM3 El Meghaier	CI
F 8	Albien N° 3 Choucha Sidi Amrann Djamaa	CI
F 9	Albien N°5 M'rara	CI
F 10	Albien N°3 M'rara	CI
F 11	Albien Nouveau M'rara	CI
F 12	Albien Blidet Amor Témacine	CI
F 13	Albien Mégarine D31	CI
F 14	Albien Sidi Mahdi III Touggourt	CI
F 15	Albien Ain Sahra Touggourt	CI
Pz9	Still	CT
Pz7	Oum tiour	CT
Pz5	Barkadjia	CT
Pz6	El-meghaier	CT
Pz4	Sidi khlil	CT
Pz8	El-bared	CT
Pz3	Djamaa	CT
Pz17	Route el-oued	CT
Pz2	Sidi Amrane	CT
Pz1	Choucha	CT
Pz25	Elhamraia	CT
Pz1	El goug	CT
Pz2	Blidet Amor	CT
Pz3	El bhour	CT
Pz4	(INRA) Sidi Mahdi	CT
Pz5	Hai Rimel	CT
Pz6	Tebesbest	CT
Pz7	Benhadda	CT
Pz8	Megarine	CT
Pz9	Harhira	CT

2. Qualité des eaux pour différents usages

2.1. Potabilité de l'eau

Pour garantir la sécurité de la consommation d'eau, des critères de qualité très stricts sont établis par les autorités sanitaires. Ces normes varient en fonction de la législation en vigueur et du niveau de développement des pays. Les pays développés comme les États-Unis, le Canada et l'Union européenne ont généralement des normes plus rigoureuses que les pays en développement tels que l'Algérie, l'Égypte et la Tunisie, où les moyens techniques de traitement de l'eau sont souvent moins accessibles. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) établit des normes moins sévères que celles des pays développés. Il existe environ 63 critères pour qu'une eau soit considérée comme propre à la consommation. Ces critères, basés sur le principe de précaution maximale visant à protéger les individus les plus vulnérables, portent sur divers paramètres. Dans le cas des eaux souterraines des nappes captives et semi-captives, les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique (CE), la teneur en éléments dissous totaux (TDS) et les éléments majeurs sont particulièrement pris en considération. Dans cette étude, les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) de 2017 sont utilisées comme référence (Tab.1).

Tableau 10. Normes de potabilité établie par OMS (WHO 2017).

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	pH	CE
	mg/l									/	μS/cm
NORME OMS (2017)	75-200	50-150	200	12	200-400	200-500	300-500	45	500-1000	6.5-8.5	500-1500

L'évaluation de la qualité chimique des eaux à la consommation humaine a été effectuée en premier lieu par comparaison avec les valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO 2017) (Boussaada et al. 2023 ; Hammad et al. 2023), et en deuxième lieu par l'utilisation de la méthode de l'indice de pollution des eaux souterraines (GPI).

L'indice de pollution des eaux souterraines (GPI) a été initialement proposé par Subba Rao début 2012 et a depuis été largement utilisé pour évaluer les variations de la qualité des eaux souterraines causées par divers facteurs géochimiques (Subba Rao, 2012).

Le calcul du GPI comporte cinq étapes: La première étape consiste à attribuer un poids relatif (RW) à chaque paramètre chimique, généralement compris entre 1 et 5, en fonction de son impact sur la santé humaine. Les paramètres chimiques tels que CE, TDS, SO₄²⁺ et NO₃⁻ se voient attribuer le poids maximum de 5, tandis que K reçoit le poids minimum de 1.

Tableau 11 . Paramètres pour calcul de GPI.

Paramè	Poids relatif	Poids
pH	5.00	0.13
TDS	5.00	0.13
TH	2.00	0.05
Ca ²⁺	2.00	0.05
Mg ²⁺	2.00	0.05
Na ⁺	4.00	0.10
K ⁺	1.00	0.02
HCO ₃ ⁻	3.00	0.07
Cl ⁻	4.00	0.10
SO ₄ ²⁻	5.00	0.13
NO ₃ ⁻	5.00	0.13

Dans *un deuxième temps*, le paramètre de poids (WP) est calculé pour chaque paramètre chimique afin d'évaluer sa contribution à la qualité globale des eaux souterraines. WP est calculé à l'aide de l'équation :

$$Wp = R_w / \sum R_w$$

La *troisième étape* consiste à estimer l'état de concentration (SC) à l'aide de l'équation :

$$S C = C / DS$$

Où : C représente la concentration du paramètre chimique et DS est le paramètre standard de qualité de l'eau potable (Tab.1).

Dans *la quatrième étape*, la qualité globale des eaux souterraines (OW) est calculée en multipliant WP par SC, comme le montre l'équation :

$$OW = WP * SC$$

Enfin, dans *la cinquième étape*, le GPI est estimé à l'aide de l'équation :

$$GPI = \sum OW$$

En se référant à la valeur de l'Indice de Pollution des Eaux Souterraines (GPI), les eaux souterraines peuvent être classées en cinq catégories distinctes, à savoir:

1. **GPI < 1.0** : La pollution n'est donc pas perceptible.
2. **1.0 < GPI < 1.5** : La pollution faible.
3. **1.5 < GPI < 2.0** : La pollution modérée.
4. **2.0 < GPI < 2.5** : La pollution forte.
5. **GPI > 2.5** : La pollution très forte.

2.2. Évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation

L'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation revêt une grande importance pour soutenir l'économie nationale en favorisant la croissance agricole et en assurant la sécurité alimentaire. Une eau d'irrigation de mauvaise qualité peut compromettre la fertilité des sols, la qualité des cultures et la santé humaine et animale. Il est crucial, notamment dans les régions dépendantes de l'agriculture, de déterminer la viabilité des sources d'eau disponibles pour l'irrigation.

Pour améliorer la productivité agricole, il est recommandé d'adopter une gestion efficace de la qualité de l'eau d'irrigation. Différents indices, tels que le rapport d'absorption du sodium (SAR), le risque de magnésium (MH), le pourcentage de sodium (%Na), l'indice de perméabilité (IP), la salinité potentielle (SP) et le rapport de Kelly (RK), sont utilisés pour évaluer l'aptitude des échantillons d'eau à l'irrigation (Arfa et al. 2022 ; Kebili et al. 2022).

Ces paramètres sont déterminés à l'aide d'équations spécifiques :

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

$$MH = \frac{Mg^{2+} \times 100}{(Ca^{2+}+Mg^{2+})} \quad (3)$$

$$Na\% = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)} \times 100 \quad (4)$$

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \times 100 \quad (5)$$

$$SP = Cl^- + (SO_4^{2-} / 2) \quad (6)$$

$$RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (7)$$

$$KR = \frac{Na^+}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \quad (8)$$

2.3. Évaluation de la qualité de l'eau industrielle

L'évaluation de la qualité de l'eau industrielle est cruciale pour le développement économique de nombreux pays en développement qui s'efforcent de s'industrialiser. L'un des principaux défis à relever est d'assurer un approvisionnement en eau adéquat pour soutenir le secteur industriel en pleine croissance. Les principales problématiques analysées dans les eaux industrielles sont la corrosion et le tartre. Ces problèmes ont des effets néfastes sur les foyers et les industries. Il est donc impératif d'évaluer la qualité de l'eau industrielle, en particulier dans les zones industrialisées des régions en développement.

Divers indices tels que le rapport massique chlorure-sulfate (CSMR), l'indice de Revelle (RI), l'indice de Larson Skold (LSI), l'indice de Langelier (LI), l'indice d'agressivité (AI), l'indice de stabilité de Reynal (RSI) et l'indice d'échelle de Puckorius (PSI) sont utilisés pour prédire les tendances à l'entartrage ou à la corrosion (Bouselsal and Johnbosco 2024).

Des explications détaillées et des équations pour ces indices :

$$CSMR = \frac{Cl^-}{SO_4^{2-}} \quad (9)$$

$$RI = \frac{Cl^-}{(HCO_3^-)} \quad (10)$$

$$LSI = \frac{(Cl^- + SO_4^{2-})}{(HCO_3^-)} \quad (11)$$

$$LI = PH - PHS \quad (12)$$

$$PHS = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (13)$$

$$A = (\log_{10}(TDS) - 1) / 10 \quad (14)$$

$$B = -13.12 \times \log_{10}(T + 273) + 34.55 \quad (15)$$

$$C = \log_{10}(Ca^{2+}) - 0.4 \quad (16)$$

$$D = \log_{10}(ALK) \quad (17)$$

$$AI = PH + \log_{10}(ALK \times H) \quad (18)$$

$$RSI = 2PHS - PH \quad (19)$$

$$PSI = 2PHS - PHeq \quad (20)$$

3. Hydrochimie des eaux souterraines

3.1. Le facies chimique

Le diagramme de Piper est utile pour comprendre la chimie des eaux souterraines et ses processus d'évolution. Il permet de déterminer le facies chimique d'eau (Piper 1944). Le diagramme se constitue d'un champ en forme de losange au centre et de deux champs triangulaires sur les deux côtés. Les cations et anions sont exprimés en pourcentage du total des cations (Ca, Mg and Na+K) et anions (Cl, SO₄ et HCO₃+CO₃) présents en meq/l. sur le triangle de gauche il est représenté les cations tandis que sur le triangle droit, les anions sont représentés. Les points présentés sur les triangles sont ensuite projetés dans le champ central en forme de losange qui détermine le faciès de l'eau. Dans la présente étude le logiciel Diagramme a été utilisé pour réaliser le diagramme de Piper.

Le diagramme de Piper se révèle être un outil puissant pour identifier les sources d'eau, détecter la présence d'eaux de mer ou saumâtres, et évaluer la qualité de l'eau. Il s'avère particulièrement précieux dans la gestion des ressources en eau et la prévention de la contamination des aquifères.

3.2. L'analyse multivariés

3.2.1. La matrice de corrélation

Une matrice de corrélation est une représentation tabulaire qui montre les corrélations (relations statistiques) entre les variables d'un ensemble de données. Chaque variable est listée à la fois sur les lignes et sur les colonnes de la matrice, et les cellules contiennent les coefficients de corrélation entre les paires de variables correspondantes. Ces coefficients de corrélation indiquent la force et la direction de la relation linéaire entre les variables : un coefficient proche de +1 indique une corrélation positive parfaite, -1 une corrélation négative parfaite, et 0 une absence de corrélation linéaire. Une matrice de corrélation est souvent utilisée pour explorer les relations entre les variables chimiques et pour identifier les schémas de dépendance dans les données.

3.2.2. L'analyse en composantes principales :

L'analyse en composantes principales est l'une des méthodes les plus largement utilisées pour analyser des données multivariées. Cette méthode permet l'étude d'ensembles de données à dimensions multiples et variables quantitatives. Ils sont largement utilisés dans des domaines tels que la biostatistique, le marketing, la sociologie, etc.

L'analyse en composantes principales est une méthode de réduction dimensionnelle ; Les dimensions des variables sont réduites des dimensions initiales p aux dimensions inférieures k

(où $k < p$). Autant d'informations que possible (la variance totale des données) sont conservées dans les dimensions initiales. Les dimensions dans l'analyse en composantes principales sont également désignées par d'autres termes tels qu'axes ou facteurs. Si le premier, le deuxième ou le troisième axe représente une grande proportion de la variance totale des données, les observations peuvent être représentées dans une disposition 2D ou 3D, ce qui les rend beaucoup plus faciles à interpréter.

Par conséquent, l'analyse en composantes principales peut être considérée comme un moyen d'extraire facilement des informations à partir de grands ensembles de données. Ils peuvent être utilisés à plusieurs fins, notamment:

- Étudier et visualiser les relations entre les variables pour déterminer quelles variables seront mesurées plus tard.
- Obtention de facteurs non corrélés, qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine, à utiliser dans des techniques de modélisation telles que la régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante.
- Visualisez des notes dans un espace 2D ou 3D pour identifier des groupes de notes homogènes ou des notes atypiques.

4. Logiciels utilisés

4.1. EXCEL :

Microsoft Office Excel est un programme utilisé pour créer des feuilles de calcul, des listes, des budgets et des graphiques. Il est utile pour traiter les données et peut être utilisé pour effectuer des calculs avancés. Dans notre cas, l'EXCEL est utilisé pour effectuer les statistiques élémentaires sur les données chimiques et climatologiques (minimum, maximum, moyen et écart type), le calcul des pourcentages, le calcul du bilan hydrique et l'établissement des histogrammes des différents paramètres étudiés.

XLSTAT fournit une fonctionnalité complète et flexible d'analyse en composantes principales pour explorer les données directement dans Excel ([XLSATA 2014](#)). XLSTAT propose plusieurs options standards et avancées qui vous permettent d'avoir une vue complète de vos données chimiques.

4.2. Diagramme :

L'illustration, graphique ou diagramme, est utilisée dans les sciences naturelles et dans diverses de l'ingénierie, de l'économie et de la gestion de projets. Son objectif est de montrer des informations sous forme de dessin, pour les rendre plus faciles à comprendre. Il diffère

d'un graphique et d'un graphique en ce sens qu'il montre non seulement les données mais également la relation entre les éléments ou les étapes.

5. Conclusion

Afin de juger de la qualité de CT et CI d'Oued Righ pour les différents usages, 35 forages sont analysés (15 forages captent l'aquifère de CI et 20 forages captent l'aquifère de CT). Pour évaluer l'eau destinée à la consommation humaine nous avons employé la méthode l'indice de pollution des eaux souterraines (GPI). Cette méthode synthétise ces données en un seul indicateur simplifiant ainsi la communication des résultats au grand public. En ce qui concerne l'évaluation de l'aptitude de l'eau souterraine à l'irrigation nous avons examiné divers facteurs ayant un impact sur la qualité des sols et des plantes. Cela englobe des paramètres tels que la conductivité électrique (EC), le rapport d'adsorption de sodium (SAR), le risque de magnésium (MH), le pourcentage de sodium (%Na), l'indice de perméabilité (IP), la salinité potentielle (SP), le carbonate de sodium résiduel (RSC) et le rapport de Kelly (RK). En ce qui concerne l'utilisation industrielle de l'eau nous sommes particulièrement penchés sur deux aspects cruciaux l'entartrage et la corrosion. Divers indices dont le rapport massique chlorure-sulfate (CSMR), l'indice de Revelle (RI), l'indice de Larson Skold (LSI), l'indice de Langelier (LI), l'indice d'agressivité (AI), l'indice de stabilité de Reynal (RSI) et l'indice d'échelle de Puckorius (PSI) peuvent être employés pour évaluer ces phénomènes. L'identification de facies chimique des eaux et processus de minéralisation a été menée grâce à l'application de diagramme de Piper, de la matrice de corrélation et l'analyse en composantes principales.

Chapitre 03:
Qualité des eaux souterraines
d'Oued Righ

1. Les paramètres physico-chimiques

Les résultats des analyses chimiques des points d'eau échantillonnés sont reportés dans le tableau 1, qui montre la variabilité et l'ordre de grandeur des différents variables physico-chimiques des échantillons des eaux souterraines collectées, ainsi que les normes de potabilité des eaux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

Tableau 12 . Les données chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Aquifère	Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	pH	CE
		mg/l										/
CT	Moy	377.44	282.62	749.25	35.70	1280.70	1834.05	173.10	16.30	3358	8.24	5247
	Max	480.00	563.20	1177.5	71.30	2588.00	2350.00	201.30	28.00	4838	8.49	7560
	Min	258.80	115.20	305.00	13.50	470.00	815.00	140.30	3.80	1561	7.65	2440
	Ecartype	62.57	108.94	259.85	16.48	604.24	369.64	14.33	6.62	922	0.22	1441
CI	Moy	145.48	174.34	244.59	30.17	482.03	772.80	189.59	4.58	2028	8.12	3170
	Max	237.50	266.20	542.50	38.00	775.00	1375.00	271.45	9.30	3571	8.87	5580
	Min	30	115.20	140.00	11.50	265.00	485.00	88.00	1.30	1280	7.19	2000
	Ecartype	74.59	47.97	120.47	7.30	120.47	272.03	52.01	2.29	3.91	0.38	765
NORME OMS (2017)		75-200	50-150	200	12	250-500	250-400	300-600	45	500-1000	6.5-8.5	500-1500

1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH (potentiel de l'hydrogène) correspond à la concentration en ions hydrogène, et il mesure l'acidité ou la basicité de l'eau. La valeur du pH varie en fonction de la force ionique de la solution : milieu neutre pH = 7, milieu acide pH < 7 et milieu basique pH > 7. Les valeurs potentielles de pH dans le complexe terminal varient entre 7,65 et 8,49, l'eau Continental Intercalaire est reconnue comme alcaline, et son pH se situe entre 7,19 et 8,87. Selon les normes de l'OMS, les valeurs mesurées sont agréées (Figure 17).

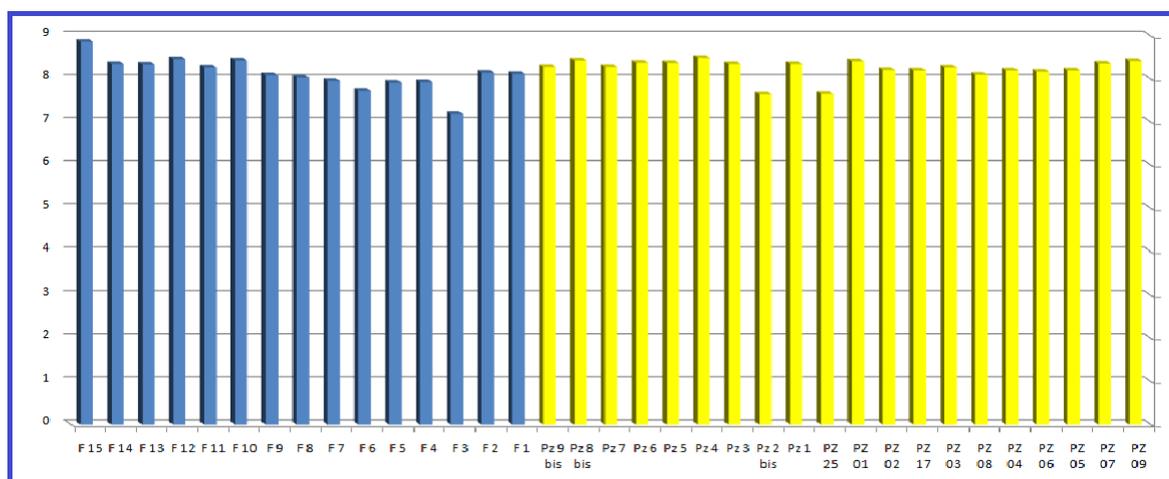


Figure 17. Histogramme de variation du pH des eaux du CI et CT d'Oued Righ.

1.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) joue un rôle essentiel en hydrogéologie, offrant une méthode précise et rapide pour évaluer la quantité et la concentration des sels dissous dans l'eau. La diversité des valeurs de conductivité électrique est directement liée à la nature et à la concentration de ces sels. Dans notre zone d'étude, les valeurs de conductivité électrique pour les eaux des aquifères CI et CT dépassent la norme établie par l'Organisation mondiale de la santé (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (WHO 2017).

Les valeurs de conductivité électrique (CE) pour les eaux de l'aquifère de complexe terminal varient entre 2440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7560 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 5247 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pour l'aquifère de continental intercalaire, les valeurs de CE varient entre 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 5580 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 2820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 18).

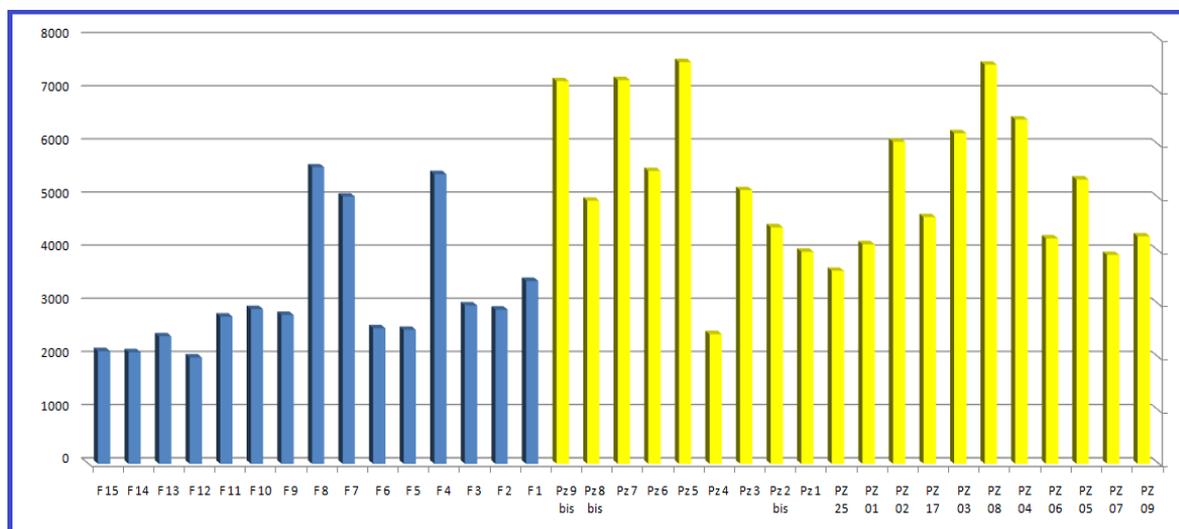


Figure 18. Histogramme de variation de CE des eaux du CI et CT de l'Oued Righ.

1.3. TDS

Les matières solides dissoutes totales dans les eaux souterraines comprennent toutes les matières solides présentes, qu'elles soient ionisées ou non. L'eau contient plusieurs solutés inorganiques, dont la plupart sont des ions, des solutés d'oligo-éléments et des gaz dissous. Elle est principalement constituée de sels inorganiques, y compris le sodium, le magnésium, le calcium, le potassium, les sulfates, les chlorures et les bicarbonates, et seule une trace de matières organiques est dissoute dans l'eau (la valeur TDS est directement liée à celle-ci). La valeur TDS des eaux souterraines a tendance à être supérieure à celle des eaux de surface. Les eaux souterraines entrent en contact avec une surface minérale beaucoup plus grande sur une période beaucoup

plus longue. L'eau n'est pas destinée à la consommation humaine si la concentration en TDS dépasse 1 000 mg/l. D'après les données de tableaux 2 tous les forages analyses dépassent la norme de potabilité établie par l'OMS (figure 19).

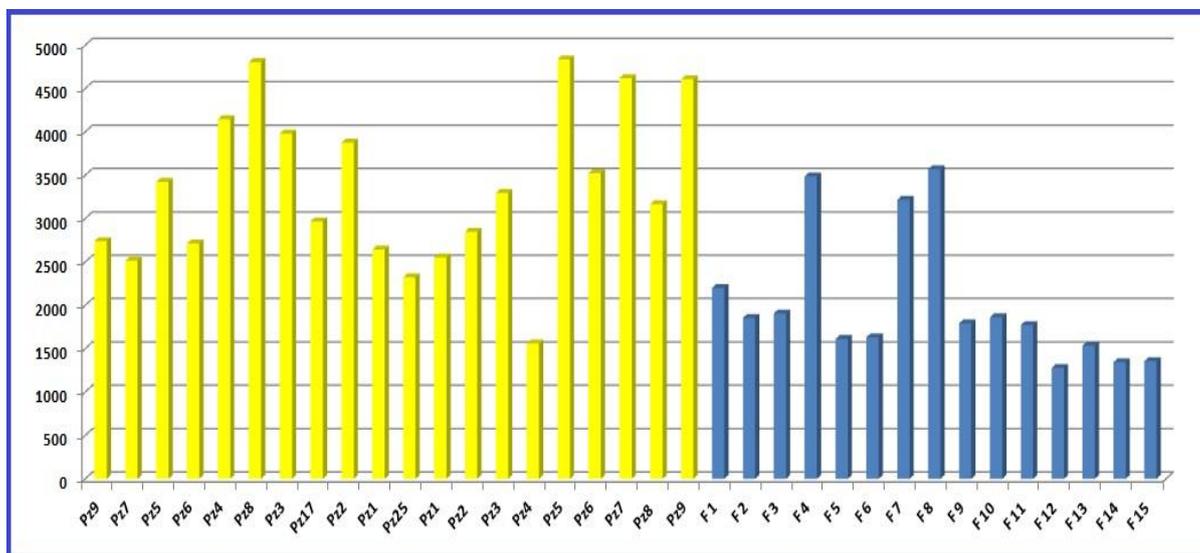


Figure 19. Histogramme de variation de TDS des eaux du CI et CT de l'Oued Righ.

1.4. Température

La température symbolise la quantité de chaleur contenue dans un liquide, en ce cas précis, dans les eaux souterraines. Elle est mesurée en degrés Celsius (°C) et constitue une indication directe de l'agitation thermique des molécules au sein de l'eau. Dans le contexte des eaux souterraines, la température revêt une importance primordiale en fournissant des indications précieuses sur les conditions environnementales en cours ainsi que sur les processus hydrogéologiques qui s'y déroulent. Elle peut influencer la solubilité des minéraux, la cadence des réactions chimiques, la diversité biologique aquatique et les échanges thermiques avec les formations géologiques environnantes.

La source de la température dans les eaux souterraines est multifactorielle, dépendant de paramètres tels que la température ambiante, la profondeur de l'aquifère, la géothermie locale et les interactions avec les eaux de surface. Les eaux souterraines ont tendance à refléter en partie les variations saisonnières de la température extérieure. Les valeurs de température des eaux souterraines peuvent varier considérablement en fonction des caractéristiques géographiques et environnementales. Généralement, dans les aquifères peu profonds, les températures des eaux souterraines oscillent entre quelques degrés Celsius et environ 25-30 °C.

Cependant, à mesure que la profondeur augmente, ces températures peuvent grimper, atteignant parfois des seuils de l'ordre de 60 °C, voire davantage, dans les régions géothermiquement actives. Les valeurs extrêmes sont souvent liées à des phénomènes géothermiques ou volcaniques spécifiques.

Dans la région d'Oued Righ, les températures des eaux souterraines varient selon leur origine. Les eaux provenant de l'aquifère de complexe terminal (CT) affichent des températures comprises entre 24 et 27 °C. En revanche, celles issues de l'aquifère continental intercalaire (CI) présentent des températures plus élevées, allant de 41 à 61 °C. Cette différence de température est attribuable à la profondeur considérable de l'aquifère CI, situé à plus de 1800 mètres sous terre (figure 20).

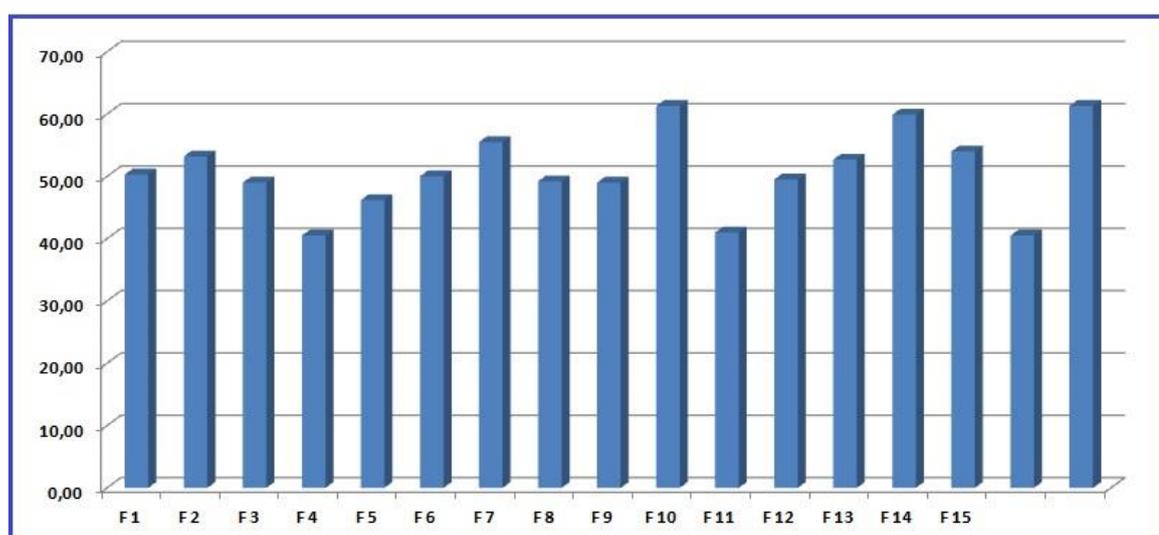


Figure 20. Histogramme de variation de la température dans les eaux du CI.

1.5. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est le cation le plus abondant dans toutes les eaux, sous forme d'ions Ca^{2+} (Leurs sources naturelles comprennent les roches, les minéraux et les sols. Le calcium est dissous dans les principales roches naturelles riches en minéraux de calcium. (Ces roches contiennent des amphiboles, des feldspaths, des pyroxènes, de l'aragonite et des minéraux argileux. Par exemple, les précipitations acides peuvent accélérer la perte de calcium se trouve dans les pyroxènes, les amphiboles, la magnétite, l'olivine et les minéraux argileux. La limite maximale autorisée de calcium pour l'eau potable est 200 mg/l. La valeur minimale et maximale de calcium étaient respectivement de 258 mg/l et 480 mg/l pour les eaux de l'aquifère de CT et de 115.5 mg/l et 237 mg/l pour les eaux de l'aquifère de CI (figure 21).

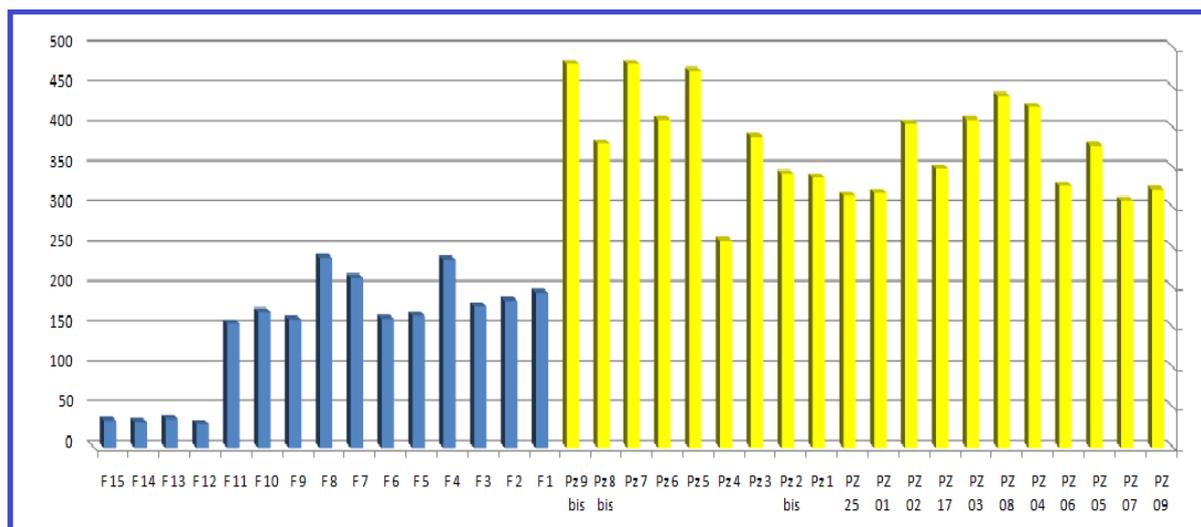


Figure 21. Histogramme de variation du calcium dans les eaux du CI et CT de l'Oued Righ.

1.6. Magnésiums (Mg^{2+})

Le magnésium joue un rôle essentiel dans les eaux souterraines à des fins potables, industrielles et d'irrigation. Il détermine également la concentration de la dureté totale de l'eau. Le magnésium, naturellement présent dans l'eau, dépend des roches, minéraux et autres sources de la région étudiée. L'OMS 2017 recommande que la limite maximale autorisée pour le magnésium soit 150 mg/L. Dans cette étude, l'analyse de la concentration en magnésium a révélé que dans les eaux de CT, elle oscille entre 115 et 563.2 mg/l et dans les eaux de CI elle oscille entre 115 et 266.2 mg/l (figure 22).

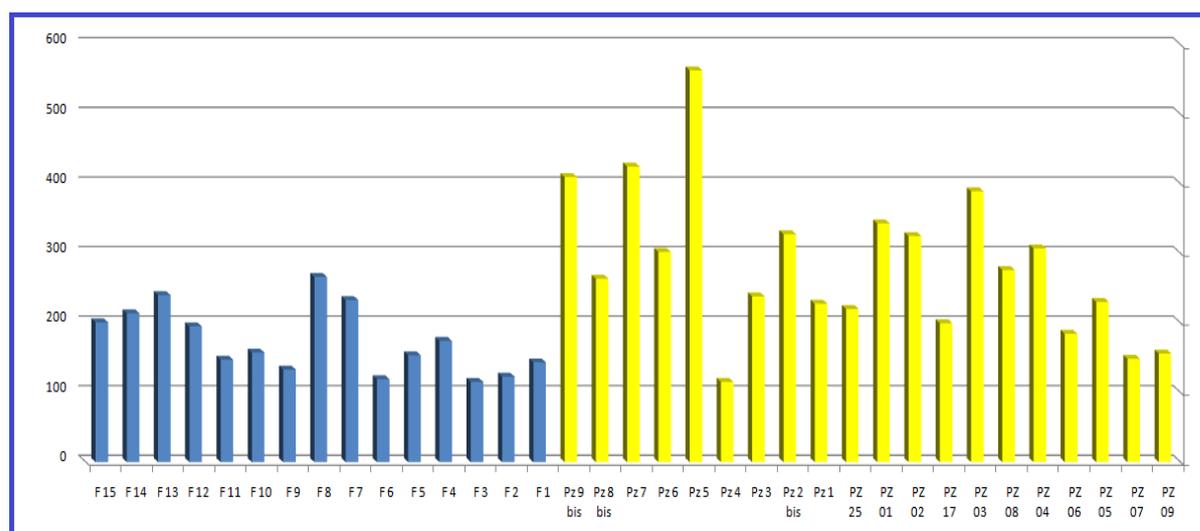


Figure 22. Histogramme de variation du Magnésium dans les eaux du CI et CT.

1.7. Le potassium (K⁺) et le sodium (Na⁺)

Le potassium et sodium sont des cations présents dans l'eau naturelle. On les trouve sous forme d'ions Na⁺ et K⁺. Les matériaux terrestres, tels que les roches, les sols et les minéraux, sont d'importantes sources naturelles de sodium et de potassium. Par exemple, les minéraux argileux et les feldspaths sont des sources de sodium et les sources de potassium sont des feldspaths (orthose, Feldspaths et microcline), des feldspathoïdes, des micas et des minéraux argileux. Les limites maximales admissibles de sodium et de potassium pour la qualité de l'eau potable sont de 200 mg/l et 12 mg/l, respectivement.

La concentration de potassium (K⁺) dans les forages de continental intercalaire (CI) variait entre 11,5 et 38 mg/L, avec une moyenne de 30.71mg/l. pour l'aquifère de complexe terminal (CT), les valeurs varient entre 13.5 et 71.5 mg/l, avec une moyenne de l'ordre de 35.70 mg/l. la majorité des forages analysés dépassent la norme de potabilité (WHO 2017) (figure 23).

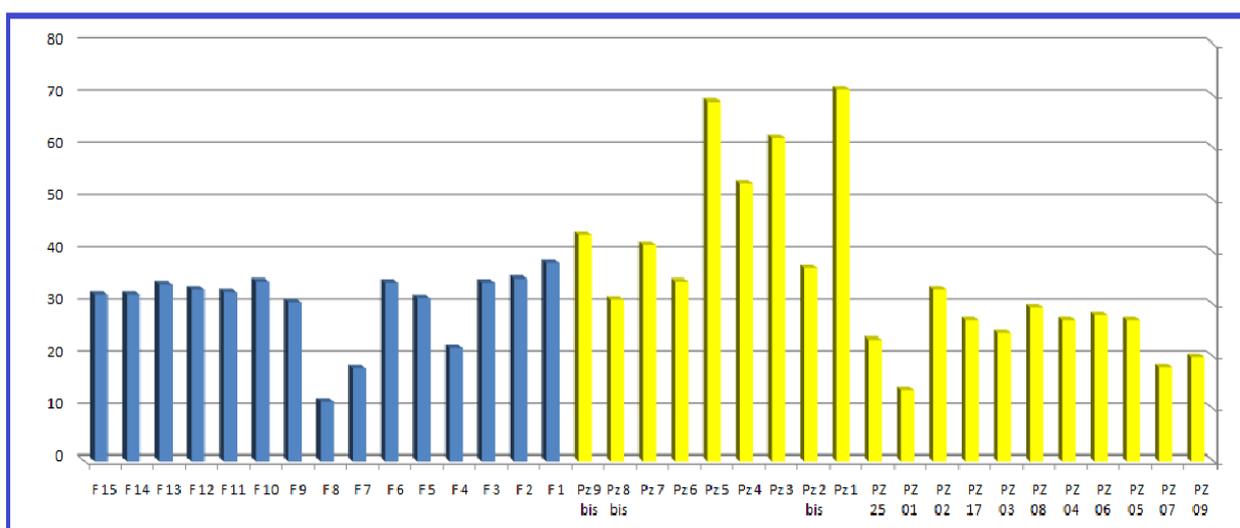


Figure 23. Histogramme de variation du potassium dans les eaux du CI et CT.

Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, il représente 2.83% sous toutes ses formes. Il provient essentiellement de la dissolution de l'Halite. Cet élément est nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs, mais trop de sodium peut augmenter le risque d'hypertension artérielle. On note aussi que les eaux trop chargées en sodium deviennent saumâtres et prennent un goût désagréable (Bouselsal 2016). Pour des considérations liées à des critères gustatifs, l'OMS recommande une valeur limite de 200 mg/l.

Les eaux provenant de l'aquifère CT dans la région d'Oued Righ affichent des concentrations de sodium bien au-delà des normes établies par l'OMS pour l'eau potable, qui est de 200 mg/l. À titre d'exemple, la concentration maximale atteint 1177 mg/l au point de prélèvement PZ9, tandis que la valeur minimale est de 305 mg/l au puits P24. En contraste, les eaux de l'aquifère CI présentent des concentrations de sodium relativement moins élevées que celles de l'aquifère CT, variant entre 140 mg/l (F5) et 542 mg/l (F4). Il est important de noter que seuls quatre forages de CI (F2, F5, F6 et F12) respectent la limite acceptable pour l'eau potable (figure 24).

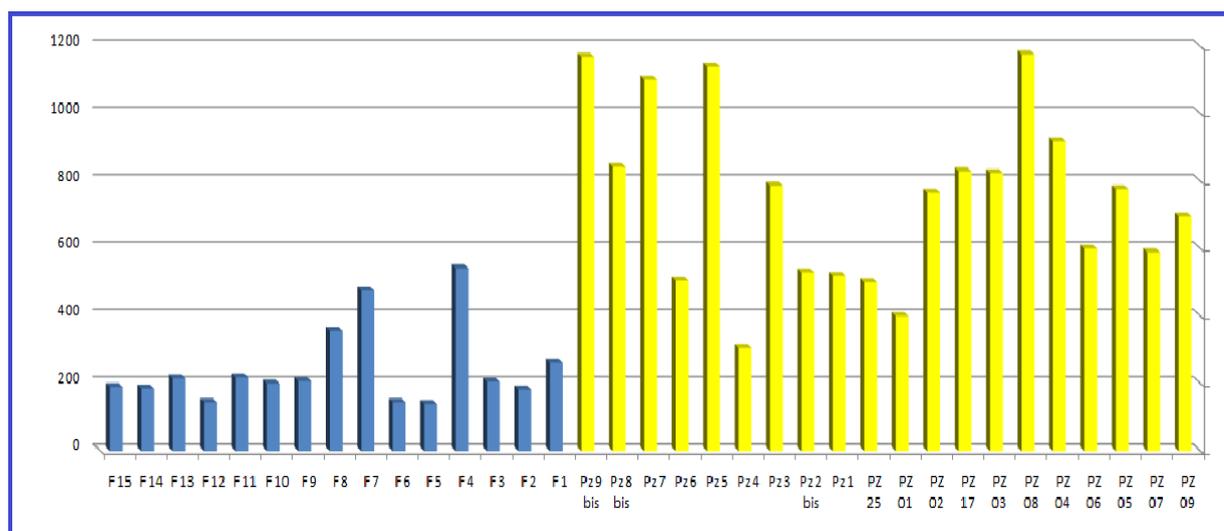


Figure 24. Histogramme de variation du sodium dans les eaux du CI et CT de l'Oued Righ.

1.8. Chlorures (Cl)

Les chlorures sont des éléments conservateurs, ce qui signifie qu'ils sont généralement d'origine météorique. Leur présence dans le système peut être attribuée à diverses sources telles que les sédiments évaporitiques ou la pollution humaine, notamment le salage des routes et les eaux usées. Près des zones côtières, les ions chlorure sont généralement présents en faibles concentrations dans l'eau et ne sont pas considérés comme conservateurs, leur principale source étant externe au système, comme les précipitations atmosphériques.

En revanche, des concentrations élevées de sodium peuvent parfois être observées, résultant de l'intrusion marine actuelle ou fossile. Elles peuvent également provenir de la décomposition des minéraux silicatés dans les aquifères et être échangées avec des minéraux argileux et de la matière organique. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la concentration en chlorure dans l'eau destinée à la consommation humaine ne devrait pas dépasser 500 milligrammes par litre.

Les eaux provenant de l'aquifère CT dans la région d'Oued Righ présentent des concentrations de chlorure largement supérieures aux normes établies par l'OMS pour l'eau potable, avec 90% des points d'eau analysés dépassant ces normes. La concentration maximale atteint 2588 mg/l au point de prélèvement PZ5, tandis que la valeur minimale est de 470 mg/l au puits Pz9. En revanche, les eaux de l'aquifère CI affichent des concentrations de chlorure relativement moins élevées que celles de l'aquifère CT, variant entre 265 mg/l (F6) et 775 mg/l (F7). Toutefois, 53,33% des forages de l'aquifère CI dépassent la limite acceptable pour l'eau potable (figure 25).

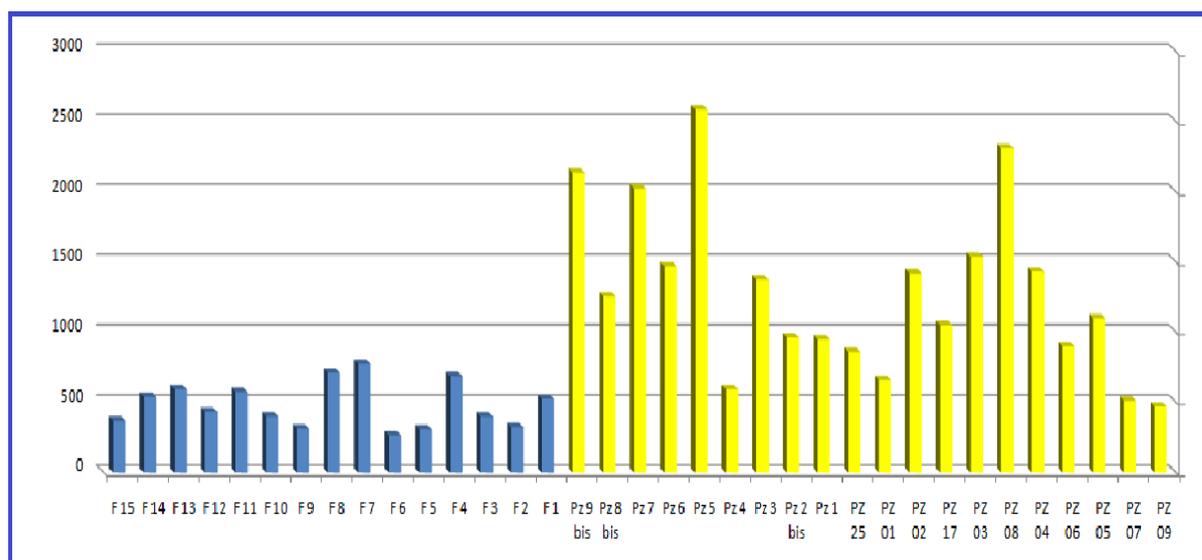


Figure 25. Histogramme de variation du Chlorures dans les eaux du CI et CT.

1.9. Sulfates (SO₄²⁻)

La concentration en sulfates des eaux naturelles des terrains à faibles teneurs en minéraux sulfatés est généralement inférieure à 50 mg/l (Rodier1980). L'augmentation des sulfates peut provenir en grande partie de la dissolution des minéraux évaporitiques, de l'oxydation du soufre des roches sédimentaires et/ou de pollution urbaine, industrielle et agricole. Des concentrations importantes en sulfates peuvent être corrosives pour les tuyauteries en particulier celles en cuivre. Dans les endroits où on trouve des concentrations importantes en sulfates, il est commun d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion, comme des tuyaux en plastique.

L'histogramme des teneurs en sulfates (Fig.10) révèle des valeurs très élevées, allant de 815 mg/l à 2350 mg/l dans l'aquifère de complexe terminal, et de 485 mg/l à 1375 mg/l dans l'aquifère de continental intercalaire. Ces chiffres signalent que les eaux

souterraines de la zone d'étude dépassent la limite fixée pour le sulfate dans l'eau potable, qui est de 400 mg/l selon l'OMS (WHO 2017) (figure 26).

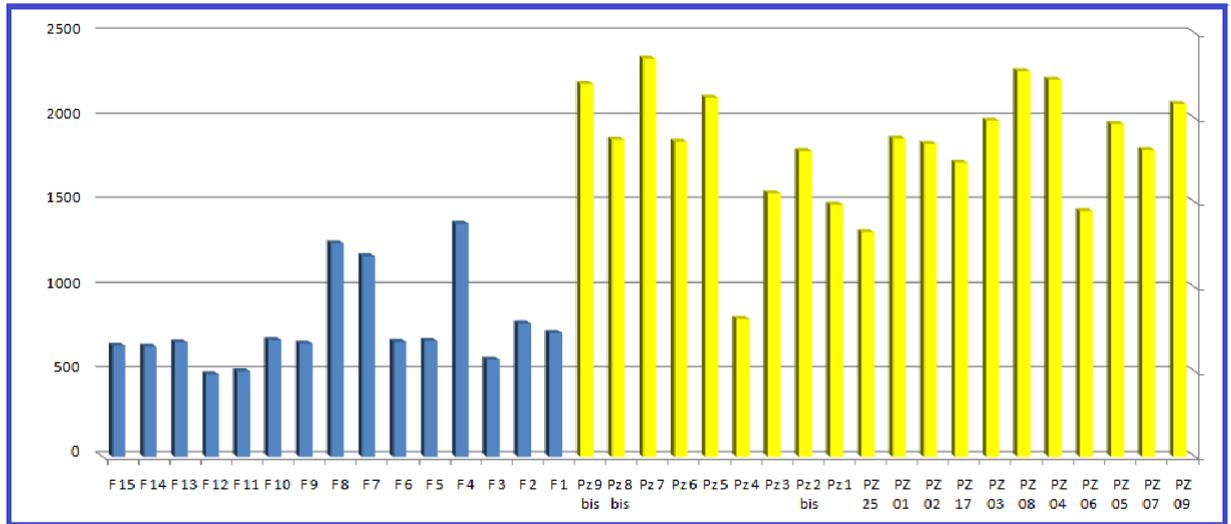
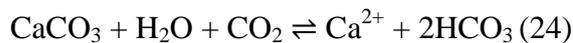


Figure 26. Histogramme de variation du Sulfates dans les eaux du CI et CT.

1.10. Bicarbonates (HCO₃⁻)

La présence de bicarbonates dans l'eau résulte de la dissolution des formations carbonatées telles que les calcaires et les dolomies. Selon l'étude géologique et hydrogéologique, les carbonates se trouvent dans les aquifères étudiés sous diverses formes, notamment le calcaire, la dolomie, le ciment pour les grès, etc. L'eau contenant du dioxyde de carbone (CO₂) est responsable de cette dissolution des formations carbonatées, comme l'illustre l'équation 24. Ce processus stabilise la solubilité du bicarbonate dans l'eau.



Toutes les concentrations mesurées dans la zone d'étude se trouvent dans la norme de potabilité (figure 27).

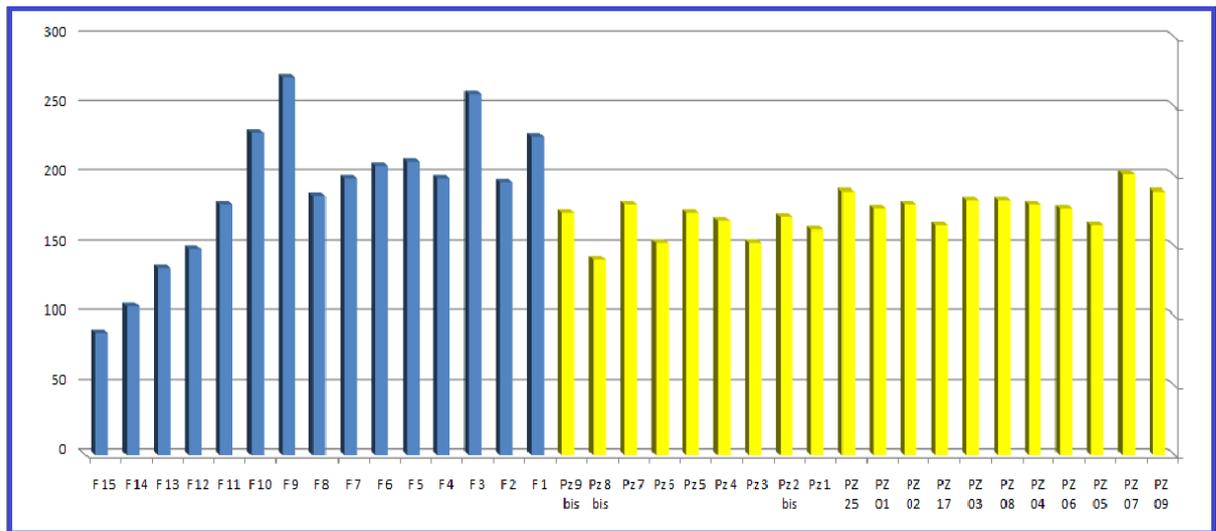


Figure 27. Histogramme de variation du Bicarbonates dans les eaux du CI et CT.

11. Nitrate (NO₃⁻)

Les nitrates représentent les principales formes d'azote présentes dans les eaux et peuvent servir d'indicateurs de pollution chimique. Diverses sources, telles que les engrais chimiques organiques et inorganiques, les élevages d'animaux et les effluents domestiques et industrielles (eaux usées) (Kharroubi et al. 2024 ; Houari et al. 2022), peuvent contribuer à leur présence dans l'eau, en plus du cycle naturel de l'azote.

Dans la zone d'étude, les nitrates dans l'aquifère de complexe terminal (CT) trouvent leur origine dans les activités agricoles et les eaux usées domestiques, tandis que dans l'aquifère de continental intercalaire (CI), les concentrations mesurées sont entièrement naturelles. Les concentrations de nitrates varient entre 1,3 et 9,3 mg/l dans les eaux de CI et entre 3,8 et 28 mg/l dans les eaux de CT. En conséquence, toutes ces valeurs se situent dans les limites établies par l'OMS pour l'eau potable (figure 28).

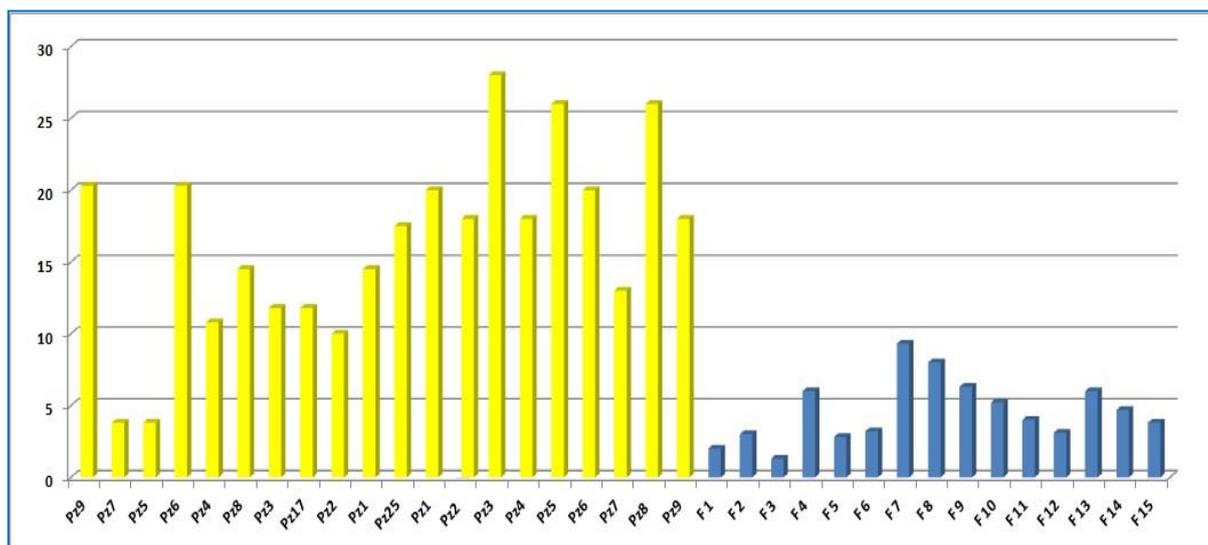


Figure 28. Histogramme de variation du NO₃ dans les eaux du CI et CT.

2. Qualité des eaux pour la consommation humaine

2.1. En référence aux normes de l'OMS

L'évaluation de la qualité de l'eau souterraine d'Oued Righ en termes de potabilité a été réalisée en se référant aux normes établies par l'Organisation mondiale de la santé en 2017 pour l'eau destinée à la consommation humaine (Tab. 4). Cette méthode est couramment employée pour déterminer si les eaux souterraines sont appropriées pour l'approvisionnement en eau potable (Boussaada et al., 2023) et pour identifier les paramètres physiques et chimiques qui doivent être pris en compte lors du traitement de l'eau avant sa distribution.

Le paramètre de dureté totale (TH) joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et domestique. Il est déterminé en mesurant la somme des concentrations de calcium et de magnésium (Freeze and Cherry 1979). Une TH élevée entraîne l'inefficacité du savon et augmente le point d'ébullition de l'eau. La limite maximale admise pour la TH dans l'eau potable est de 500 mg/L. Une dureté supérieure à 300 mg/L peut provoquer des problèmes cardiaques et rénaux. Les eaux souterraines de la zone étudiée présentent des valeurs de TH variant de 837 à 3524 mg/l de CaCO₃, ce qui les classe comme très dures selon la classification de l'USEPA (1994). De plus, tous les forages analysés (CT et CI) dépassent la valeur recommandée pour l'eau destinée à la consommation (500 mg/L). Les paramètres de la conductivité électrique (CE) et des solides totaux dissous (TDS) révèlent que tous les forages analysés dépassent les limites fixées par WHO (Tab.4).

En outre, en se basant sur les résultats chimiques, il est constaté que la majorité des échantillons examinés dépassent les normes de potabilité de l'OMS en ce qui concerne le potassium et les sulfates. Ces conclusions suggèrent que l'eau souterraine de la zone d'étude nécessite un traitement (deminéralisation partielle) avant son utilisation (figure 29).

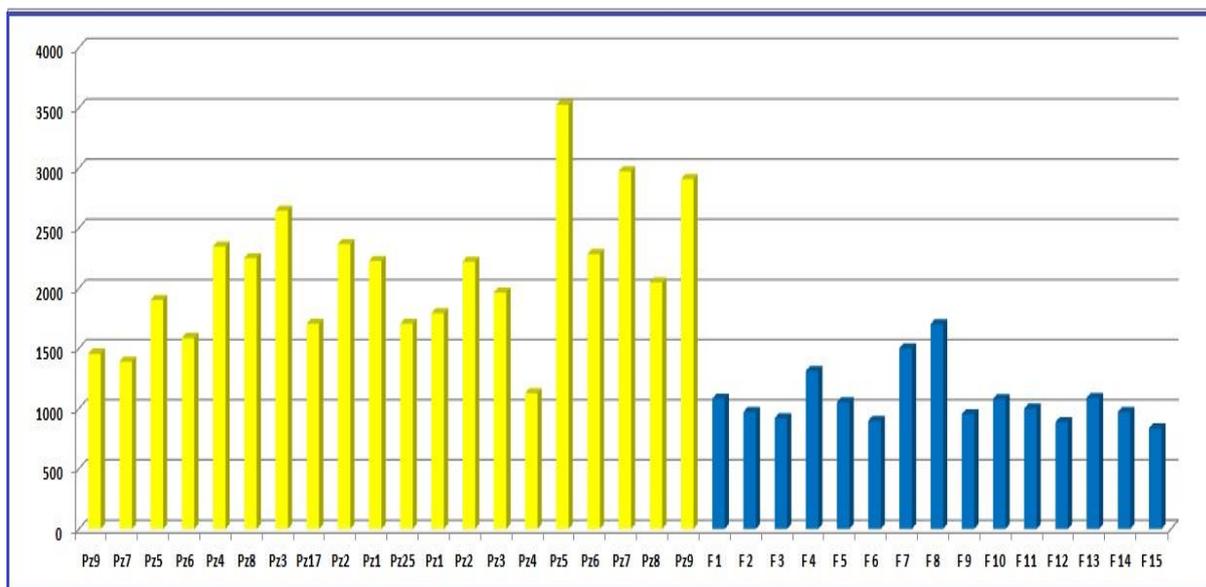


Figure 29. Histogramme de variation du TH dans l'eau du CI et CT.

2.2. Application de l'Indice de pollution des eaux souterraines (PIG)

La méthode de l'indice de contamination des eaux souterraines (PIG) est un outil d'évaluation des paramètres chimiques (pH, TDS, TH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) pour l'estimation de la qualité des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable.

Dans cette étude de cas, les valeurs de l'indice de pollution des eaux souterraines (PIG) varient de 2,14 à 6,36, avec une moyenne de 4,18 pour les eaux de l'aquifère de complexe terminal (CT), et de 1,63 à 3,27, avec une moyenne de 2,13 pour les eaux de l'aquifère de continental intercalaire (CI) (figure 15).

L'application de la méthode de l'Indice de pollution des eaux souterraines (PIG) classe les eaux de l'aquifère CT comme suit : 5 % de l'ensemble des échantillons d'eaux souterraines sont classés comme présentant une "pollution forte" et 95 % comme "très forte". En revanche, pour les eaux de l'aquifère de continental intercalaire, 40 % sont considérées comme présentant une "pollution modérée" et 60 % comme "pollution forte". Cette pollution est principalement d'origine géologique, causée par la

dissolution des évaporites et l'absence de recharge des aquifères par les précipitations dans la zone d'étude (figure 30).

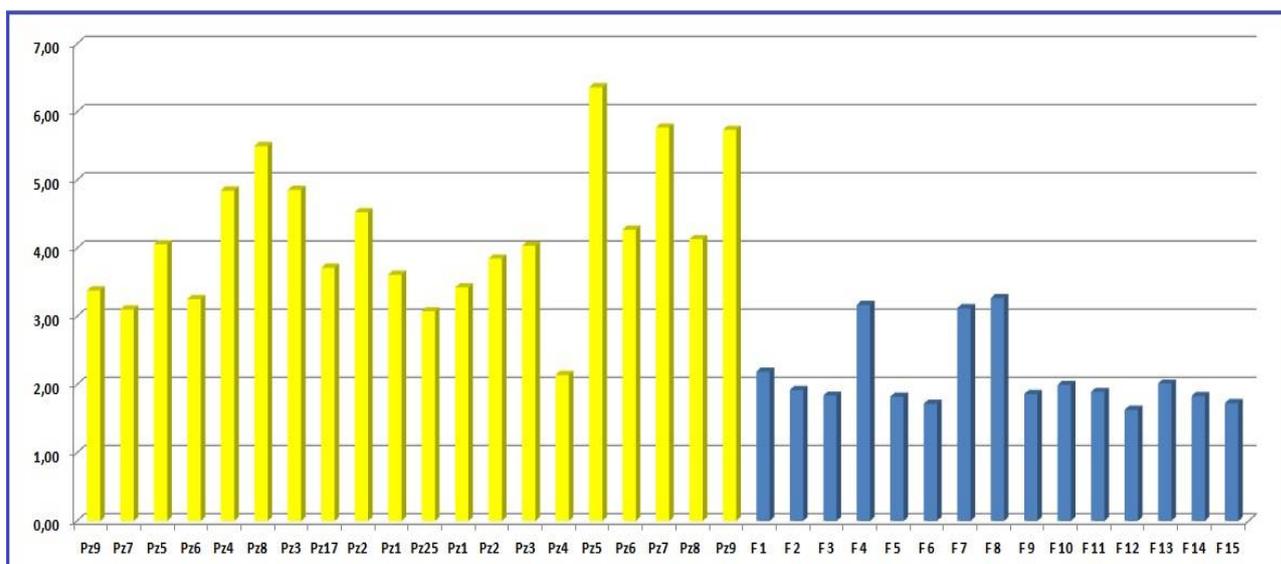


Figure 30. Histogramme de variation du PIG dans l'eau du CI et CT.

3. Qualité de l'eau CI et CT pour l'irrigation

Au fil des années, de nombreux chercheurs ont conclu que l'adéquation des eaux souterraines à des fins d'irrigation dépend principalement de l'influence des minéraux et des plantes formant le sol. Les sels minéraux présents en grande quantité dans l'eau ont des effets néfastes sur les sols et les plantes. Il peut perturber la croissance des plantes, affecter le processus osmotique, provoquer des réactions métaboliques et également provoquer des modifications de la structure du sol (perméabilité et aération), ce qui affecte directement la croissance des plantes (Ayer and Westcost 1985). L'adéquation de l'eau à un usage agricole a été déterminée en étudiant les facteurs potentiels associés à la qualité de l'eau d'irrigation, à savoir la conductivité électrique (CE), le taux d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (Na%), le risque de magnésium (MR), indice de perméabilité (PI) et rapport de Kelly (RK).

3.1. Conductivité électrique (CE)

Les sels présents dans l'eau d'irrigation s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante a absorbé l'eau, ce qui limite la disponibilité de l'eau du sol pour l'agriculture. Pour éviter ce problème, il est crucial de déterminer et de classer la valeur de conductivité électrique de l'eau selon des limites spécifiques (Bouselsal and Saibi 2022 ; Bouselsal 2016) :

- Si la conductivité est inférieure à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'eau est considérée comme sûre pour l'irrigation.
- Si la conductivité est comprise entre 250 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'eau peut être utilisée à condition que le drainage soit adéquat.
- Si la conductivité dépasse 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'eau est considérée comme inadaptée à l'irrigation.

Dans les échantillons mesurés, la conductivité électrique variait entre 2440 et 7560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons CT, et entre 2000 et 5580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons CI. Par conséquent, tous les puits ne sont pas adaptés à l'irrigation selon ces mesures.

3.2. Le Taux d'Absorption de Sodium (SAR)

Le SAR, ou le rapport de sodium adsorbé, est un indice crucial pour évaluer les risques liés à la teneur en sodium de l'eau. Une concentration élevée de sodium dans l'eau d'irrigation peut altérer les propriétés du sol et réduire la productivité des cultures. Selon la classification SAR, l'eau peut être catégorisée comme suit (Richards 1954) :

- SAR inférieur à 10: Excellente qualité d'eau, avec un faible risque d'alcalinité du sol
- SAR entre 10 à 18 : Bien adaptée à l'irrigation, avec un risque modéré d'alcalinité du
- SAR entre 18 à 26 : Eau modérément alcaline, présentant un risque accru d'alcalinité du sol.
- SAR supérieur à 26 : Risque très élevé d'alcalinité du sol.

Les valeurs de SAR calculées dans la zone d'étude variaient de 3,71 à 10,84, avec une moyenne de 7,08 pour les eaux du complexe terminal (CT), et de 1,89 à 6,54, avec une moyenne de 3,17 pour les eaux du continental intercalaire (CI). Ces valeurs ont permis de classer les eaux du CT comme Excellentes (95 %) et Bonnes (5 %) pour l'irrigation. Et de classer les eaux de CI comme Excellentes pour l'irrigation (figure 31).

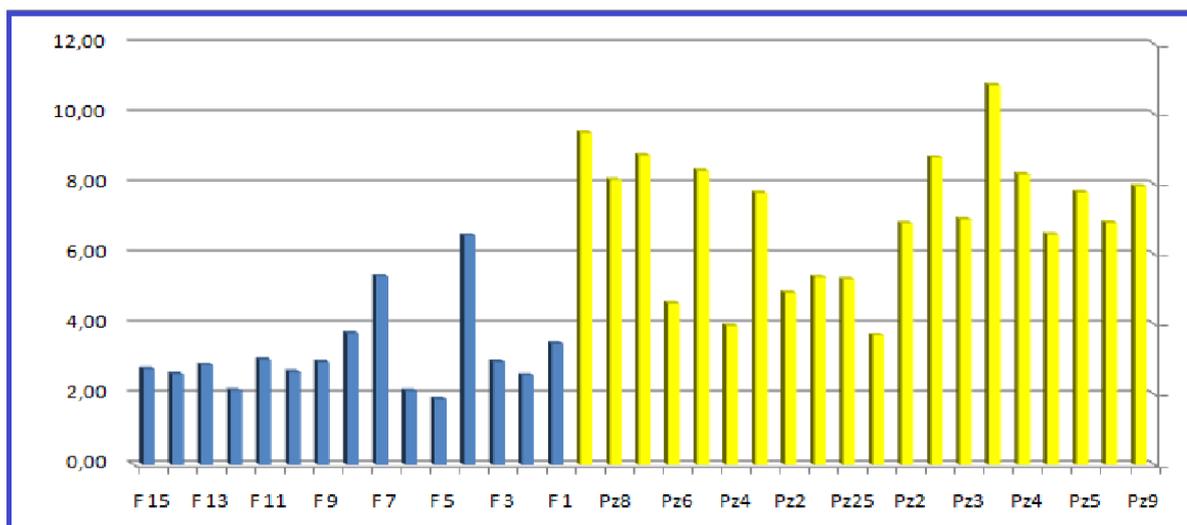


Figure 31. Histogramme de variation du SAR dans l'eau du CI et CT de l'Oued Righ.

Les valeurs de SAR (Sodium Adsorption Ratio) et de conductivité électrique sont tracées sur le diagramme du Laboratoire de Salinité des États-Unis (USSSL 1954). Selon le diagramme de l'USSSL (Fig.17), les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude peuvent être classés en deux catégories distinctes :

20 % des échantillons de CI appartiennent à la classe C_3S_1 indiquent que les eaux souterraines ont une haute salinité et un risque de sodium faible. Cette eau ne peut pas être utilisée sur des sols qui possèdent un drainage limité et, par conséquent, de faibles capacités de lessivage. Même avec un drainage adéquat, une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité peut être nécessaire et les plantes ayant une bonne tolérance au sel doivent toujours être sélectionnées

Tous les échantillons restant (32 forages) appartiennent à la classe C_4 indiquant des eaux de une salinité élevée avec une risque de sodium faible (8 forages de CI), moyen (3 forages de CI et 8 forages de CT) et forte (1forage de CI et 12 forages de CT). Cette eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions ordinaires, mais peut être utilisé occasionnellement dans des circonstances très particulières. Ici, les sols doivent être perméables, le drainage doit être adéquat à bon et l'eau d'irrigation doit être appliquée en excès pour permettre un lessivage important. Seules les cultures très tolérantes au sel devraient être sélectionnées (figure 32).

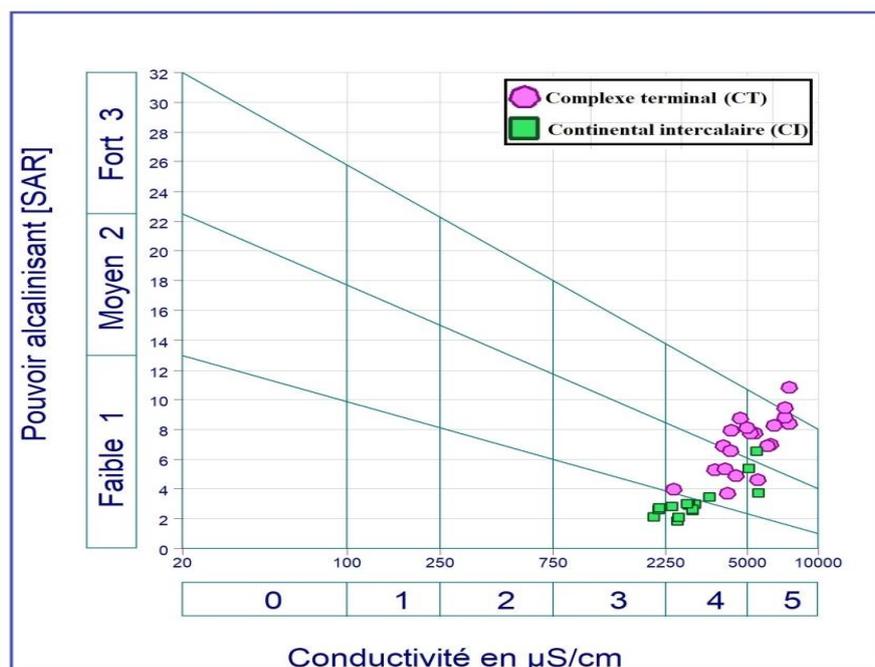


Figure 32. Diagramme d'USSL pour les eaux souterraines d'Oued Righ.

3.3. Le pourcentage de sodium (%Na)

Le pourcentage de sodium est un critère essentiel pour évaluer la qualité des eaux souterraines en vue de leur utilisation en irrigation. Un excès de sodium (Na^+) dans l'eau d'irrigation peut diminuer le gradient osmotique, limitant ainsi l'absorption par les plantes des nutriments du sol. De plus, une concentration élevée de sodium peut stimuler l'échange d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} , ce qui peut entraîner une diminution de la perméabilité du sol.

Selon la classification de Wilcox (Wilcox 1948), les eaux souterraines sont classées en cinq catégories en fonction de leur teneur en sodium : excellentes (0 à 20 %), bonnes (20 à 40 %), acceptables (40 à 60 %), douteuses (60 à 80 %) et impropres à l'irrigation (plus de 80 %).

Dans la zone d'étude, le pourcentage de sodium varie de 28,13 % à 53 % pour l'aquifère de CT, et de 21,94 % à 47,01 % pour l'aquifère de CI. Sur la base de ces valeurs, l'eau des aquifères de CT et de CI est considérée comme bonne à acceptable pour l'irrigation (figure 33).

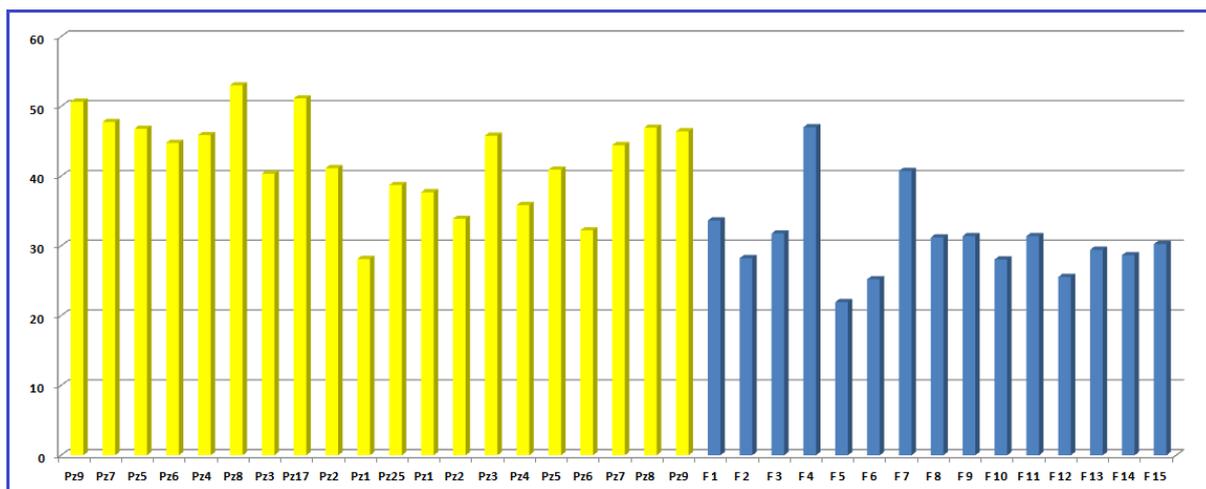


Figure 33. Histogramme de variation du %Na dans les eaux du CI et CT .

3.4. Le rapport de Kelly (RK)

Le rapport de Kelly (Kelly 1963) est un indicateur utilisé pour évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation. Un RK supérieur à 2 indique une qualité inappropriée pour l'irrigation, tandis que lorsque le RK se situe entre 1 et 2, l'eau est considérée comme de qualité médiocre pour l'irrigation, et un RK inférieur à 1 est jugé adéquat. Dans cette étude, la plupart des échantillons d'eau présentent des valeurs inférieures à 1, ce qui signifie qu'ils conviennent à l'irrigation. Les valeurs de RK calculées dans la région d'étude, telles que présentées dans le tableau 13, varient entre 0,39 et 1,15 pour les eaux de CT, et entre 0,29 et 0,91 pour les eaux de CI, indiquant que les eaux de CI sont bonnes pour l'irrigation tandis que celles de CT sont de qualité acceptable (85%) à médiocre (15%) pour l'irrigation (figure 34).

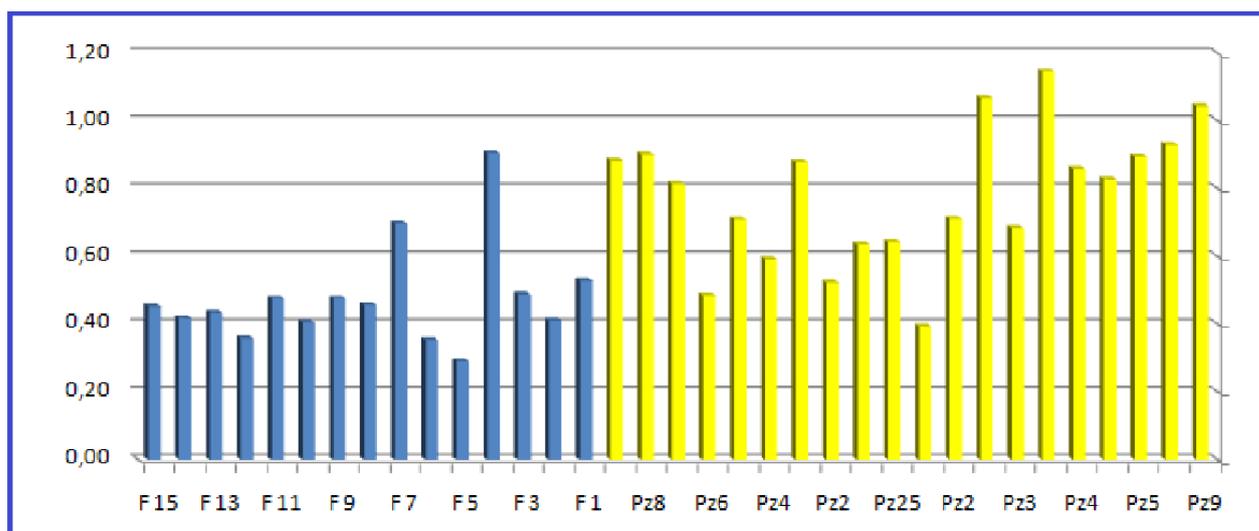


Figure 34. Histogramme de variation du RK dans l'eau du CI et CT de l'Oued Righ.

sol et s'accumulent à chaque irrigation successive, tandis que les concentrations élevées de sels très solubles peuvent accroître la salinité du sol. La salinité potentielle est ainsi déterminée par la concentration en chlorure additionnée de la moitié de la concentration en sulfate.

Selon l'analyse de Doneen, la capacité de l'eau à migrer dans le sol ne dépend pas exclusivement de la concentration des sels dissous. Les sels peu solubles ont tendance à se déposer dans le sol et à s'accumuler lors des irrigations répétées, tandis que les sels hautement solubles peuvent augmenter la salinité du sol. Cette dernière est définie comme la somme de la concentration en chlorure et de la moitié de la concentration en sulfate.

Les valeurs de salinité potentielle varient dans l'aquifère de CT entre 25,25 % et 95,03 %, avec une moyenne de 55,17 %. Dans l'aquifère de CI, elles varient entre 14,52 % et 34,13 %, avec une moyenne de 21,63 %. Sur la base de ces valeurs, l'eau des aquifères de CT et de CI est considérée comme excellente pour l'irrigation (figure 36).

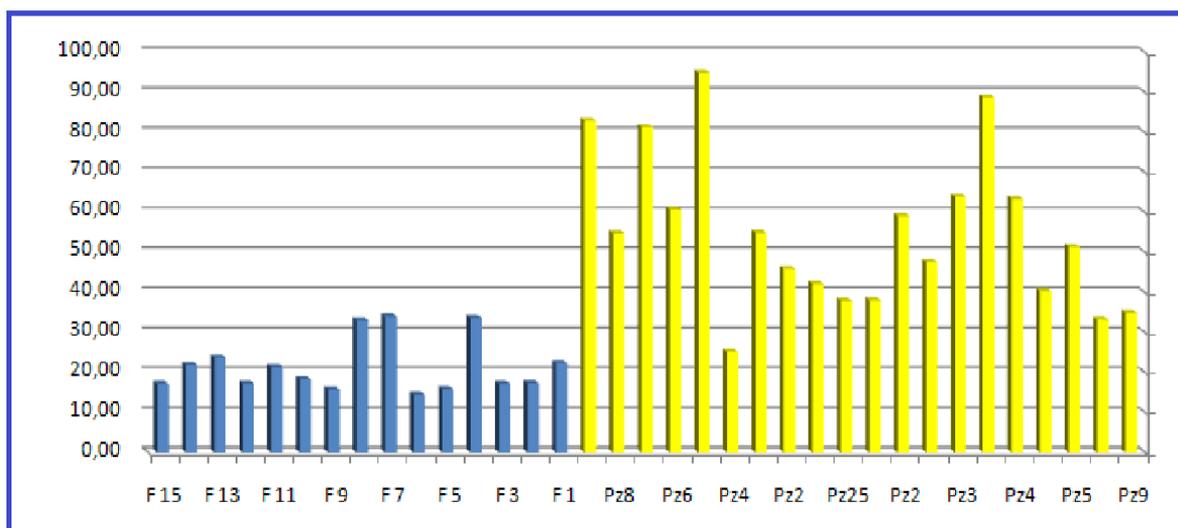


Figure 36. Histogramme de variation du PS dans les eaux du CI et CT.

3.7. Le risque magnésium (RM)

Le risque de magnésium (RM) représente un autre facteur crucial pour évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation, et il est calculé à l'aide de l'équation 3. Un RM élevé dans l'eau peut avoir des répercussions négatives sur la qualité du sol, en le rendant plus alcalin et en réduisant le rendement des cultures. Les valeurs de RM dépassant 50 % sont considérées comme inadaptées à l'irrigation, tandis que celles inférieures à 50 % sont jugées appropriées (Raghunath 1987). Les valeurs de RM

calculées pour les eaux de CT varient de 42,35 % à 66,37 %, tandis que celles calculées pour les eaux de CI vont de 51,88 % à 91,69 %. Ces résultats indiquent que les eaux de CI ne conviennent pas à l'irrigation, tandis que celles de CT sont classées comme convenant (25 %) à inappropriées (75 %) pour l'irrigation.

Les résultats ont mis en évidence que les eaux de complexe terminal et de continental intercalaire de la région d'Oued Righ sont impropres à l'irrigation sur la base de la conductivité électrique, le risque de magnésium et le diagramme d'USSL (figure 37).

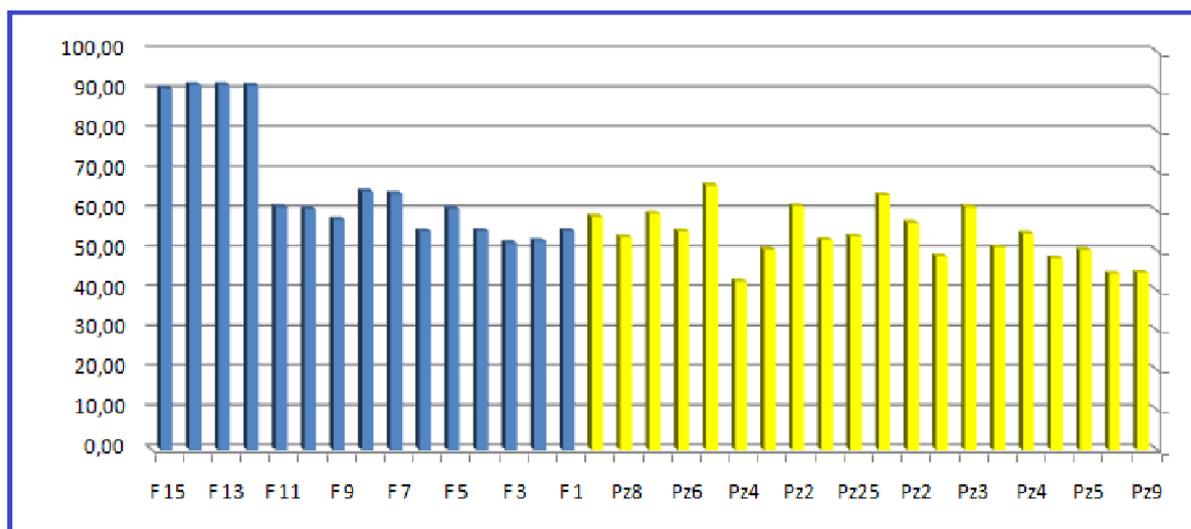


Figure 37. Histogramme de variation du RM dans les eaux du CI et CT.

Tableau 13. Statistique des paramètres d'irrigation des eaux de CI et CT d'Oued Righ.

Paramètre	Gamme	Classe	Aquifère de CI		Aquifère de CT	
			N ^{bre} Echant-	% Echant	N ^{bre} Echant	% Echant
CE (µS/cm) Wilcox 1955	<250	Risque Salinité : Faible	00	00	00	00
	250-750	moyen	00	00	00	00
	750-2250	très élevé	03	20	00	00
	>2250	très forte	12	80	20	100
SAR (meq/l) Richards 1954	0-10	Excellent	15	100	19	95
	10-18	Bonne	00	00	1	5
	18-26	Douteux	00	00	00	00
	> 26	Inapproprié	00	00	00	00
%Na Doneen 1964	0-20	Excellent	00	00	00	00
	20-40	Bonne	13	86.66	01	5
	40-60	Permit	02	13.33	19	95
	60-80	Douteux	00	00	00	00
	> 80	Inapproprié	00	00	00	00
RK Kelley 1963	< 1	Bonne	15	100	17	85
	1-2	médiocre	00	00	03	5
	> 2	Inapproprié	00	00	00	00

IP (%) Doneen 1964	>75	Perméabilité :				
	75-25	Max 100%	00	00	00	00
	<25	Max 75%	15	100	20	100
SP Doneen 1954	>5	Max 25%.	00	00	00	00
	5-10	Excellent	15	100	20	100
	<10	Bonne	00	00	00	00
RM (%) Ragunath 1987	< 50%	insatisfaisant	00	00	00	00
	> 50%	Approprié	00	00	05	25
		Inapproprié	15	100	15	75

4. Qualité des eaux pour l'industrie

Le potentiel des eaux souterraines de la région d'Oued Righ, en particulier l'eau CT, revêt une importance capitale pour les utilisations industrielles ainsi que pour l'industrie pétrolière locale. Bien que la qualité de l'eau destinée à un usage industriel varie considérablement d'un endroit à l'autre, elle joue un rôle crucial dans l'économie tant locale que nationale.

De surcroît, son impact se répercute de manière significative sur les systèmes de distribution d'eau, en particulier sur les infrastructures des réseaux d'eau potable, avec des conséquences directes sur la santé humaine et l'environnement dans son ensemble. Globalement, les problématiques liées à la qualité de l'eau sont confrontées à divers enjeux, parmi lesquels la corrosion et le dépôt de calcaire figurent parmi les plus courants et les plus graves. La corrosion représente un processus chimique ou physique altérant les matériaux en raison de substances corrosives ou de l'environnement. Quant au dépôt de calcaire, il résulte de la précipitation du carbonate de calcium dans l'eau, transformant celle-ci en calcite et en aragonite, sous l'influence de facteurs tels que la température et l'exposition à l'air.

Ces problèmes suscitent de vives préoccupations au sein des industries locales, car ils peuvent entraîner une augmentation des coûts de maintenance et de remplacement des infrastructures, tout en pouvant potentiellement affecter négativement la qualité de l'eau industrielle.

Les phénomènes d'érosion et de dépôt sont influencés par divers facteurs, incluant la structure géologique, le pH, le débit, la température, ainsi que la présence de bactéries, de gaz et de solides. Un ensemble d'indicateurs significatifs est utilisé pour évaluer la qualité de l'eau, en particulier dans les zones industrielles.

Plusieurs indicateurs clés sont employés à cet effet, notamment l'Indice de Langelier (LI), l'Indice de stabilité Rynza (RSI), l'Indice Larson-Skold (LSI), l'Indice d'échelle de Puckorius (PSI), l'Indice Agressivité (AI), l'Indice de Revelle (RI) et Rapport

massique chlorure sulfate (CSMR) (Bouselsal and Johnbosco 2024 ; Egbueri et al. 2020).

4.1. L'indice de saturation de Langelier (LI)

L'indice de saturation de Langelier est l'un des indices les plus couramment utilisés pour déterminer si l'eau est corrosive ou incrustante. Il est calculé selon l'équation (10). Il est basé sur le pH, l'alcalinité totale et la dureté calcique de l'eau. Un (LI) positif indique une tendance à la formation de dépôts de CaCO_3 (entartrage), tandis qu'un (LI) négatif indique une tendance à la dissolution de CaCO_3 (corrosion).

Lorsque l'indice LI se situe entre -0,5 et 0,5, cela signifie que l'eau est équilibrée, et l'état d'équilibre idéal est atteint lorsque LI est égal à 0,0. En revanche, un LI supérieur à 0,5 indique une tendance à l'entartrage de l'eau, tandis qu'un LI inférieur à - 0,5 suggère une forte corrosivité de l'eau. Dans ces deux derniers cas, il est nécessaire de corriger la tendance de l'eau, ce qui peut être réalisé de diverses manières, comme l'ajout d'acides ou d'alcalins, l'utilisation d'adoucissants, d'osmose inverse, ou de désalcalinisants.

Les calculs de LI pour l'aquifère de complexe terminal (CT) varient entre 1.06 et 1.93, avec une moyenne de 1.70, tandis que pour l'aquifère de continental intercalaire (CI), ils se situent entre 1.08 et 2.26, avec une moyenne de 1.68. Tous les échantillons d'eau de ces aquifères sont classés comme sursaturés, ce qui indique une tendance à la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3) (figure 38).

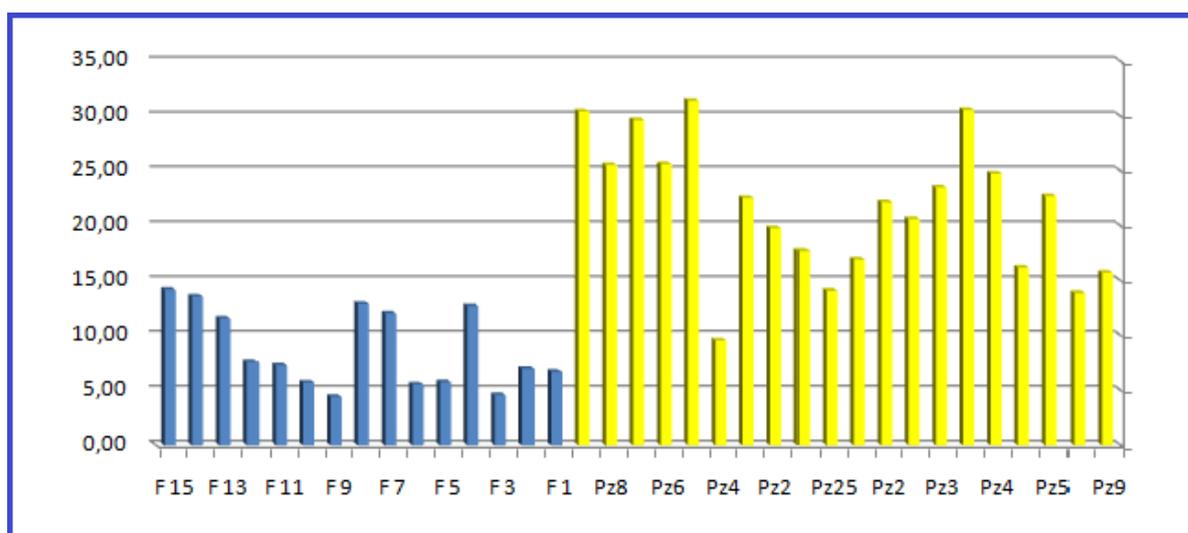


Figure 38. Histogramme de variation de LI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.

4.2. L'indice de stabilité Ryznar (RSI) :

RSI est une adaptation de l'indice de Langelier qui permet d'évaluer la propension de l'eau à l'entartrage ou à l'agressivité. Il est introduit par Ryznar, qui prend en compte le pH et l'alcalinité de l'eau pour évaluer les tendances à la formation de tartre et à la corrosion. Bien que le RSI s'applique principalement aux systèmes en écoulement. Un RSI inférieur à 6,5 indique une inclination à l'entartrage. En revanche, lorsque RSI est supérieur à 7, il indique une potentialité de corrosion.

Les calculs de RSI pour l'aquifère de complexe terminal (CT) varient entre 4.50 et 5.51, avec une moyenne de 4.83, tandis que pour l'aquifère de continental intercalaire (CI), ils se situent entre 3.90 et 6.07, avec une moyenne de 4.75. Tous les échantillons d'eau de ces aquifères sont classés comme sursaturés, ce qui indique une tendance à la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3). Ce résultat confirme ce qu'est déjà conclu pour l'indice de Langelier (figure 39).

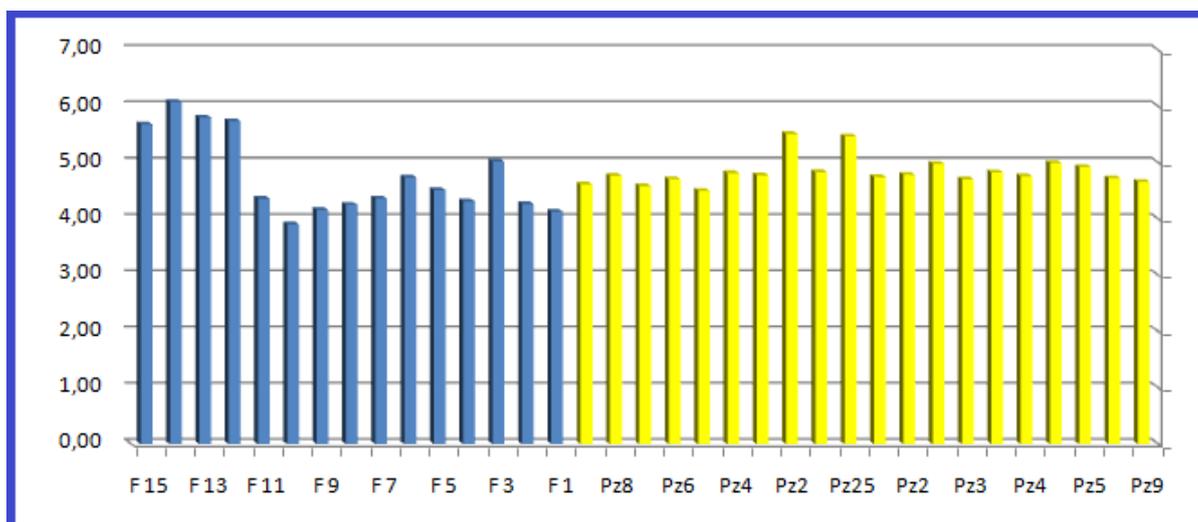


Figure 39. Histogramme de variation de RSI dans l'eau du CI et CT de l'Oued Righ.

4.3. Indice de Larson - Skold (LSI)

Le LSI est une mesure qui évalue la relation entre les anions acides forts tels que Cl et SO_4 , et les anions acides faibles comme CO_2 et HCO_3 , présents dans l'eau. Il a été noté que les anions Cl et SO_4 sont les plus dominants dans les échantillons d'eau. Selon plusieurs études (Larson et Skold, 1958 ; Egbueri, 2020), les solutions aqueuses peuvent être classées en fonction de leur indice de Larson - Skold comme indiqué dans le tableau 14.

Dans les échantillons étudiés, les anions dominants sont les sulfates. Leurs concentrations élevées peuvent rendre l'eau plus acide et ainsi augmenter le potentiel de corrosion des matériaux en contact. Il est donc essentiel de surveiller attentivement ces ions, notamment dans les zones industrielles où la qualité de l'eau a un impact important.

Les calculs de LSI pour l'aquifère de complexe terminal (CT) varient entre 9.55 et 31.42, avec une moyenne de 21.68, tandis que pour l'aquifère de continental intercalaire (CI), ils se situent entre 4.41 et 14.21, avec une moyenne de 8.77. Tous les échantillons d'eau de ces aquifères sont classés dans la catégorie de corrosion élevée (figure 40).

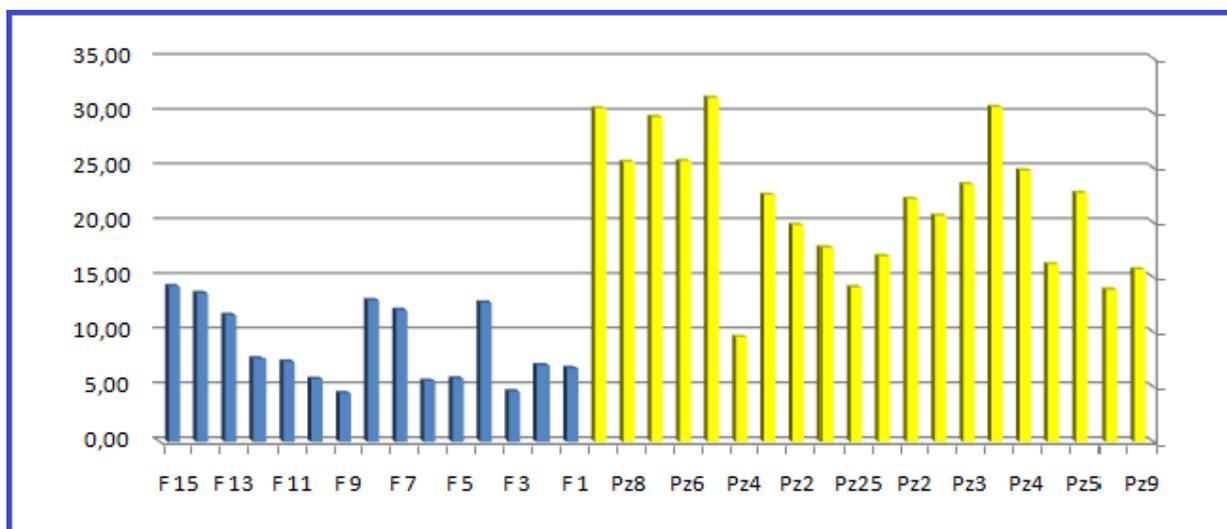


Figure 40. Histogramme de variation de LSI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.

4.4. Indice de Puckorius (IP)

L'indice de Puckorius (IP) est une mesure basée sur la relation entre le pH et l'alcalinité de l'eau, ce qui est essentiel pour évaluer et quantifier la tendance à l'entartrage dans les systèmes domestiques et industriels. En d'autres termes, il s'agit de la capacité d'une eau à tamponner et à précipiter des substances pour atteindre un équilibre (Egbueri, 2020). Cet indice est calculé selon la formule 20.

Selon les directives de l'US-EPA (1984), l'eau peut être classée comme suit en fonction de son indice de Puckorius (IP) : $IP < 6$: Tendance à l'entartrage, $6 \leq IP \leq 7$: Tendance légère à l'entartrage et à la corrosion et $IP > 7$: Tendance significative à la corrosion.

Dans cette étude, tous des échantillons d'eau de la nappe de CT présentent des indices de Puckorius (IP) inférieur à 6, ce qui indique un potentiel de tartre élevé sur les installations. En revanche, 73.33 % des échantillons d'eau de la nappe Continentale Intercalaire (CI), présentant un potentiel de tartre et 13.33 % présentant un fort potentiel de corrosion. Cependant, il est important de noter que l'élévation de la température de l'eau dans la nappe (CI) peut entraîner des réactions chimiques plus rapides, notamment en ce qui concerne la formation de tartre et la corrosion. Pour utiliser cette eau, un refroidissement préalable est nécessaire, souvent réalisé à l'aide de tours de refroidissement. Pendant, le transport de l'eau à travers des canalisations, des refroidisseurs, des tuyaux, et d'autres composants similaires peut favoriser la corrosion et la précipitation de tartre (figure 41).

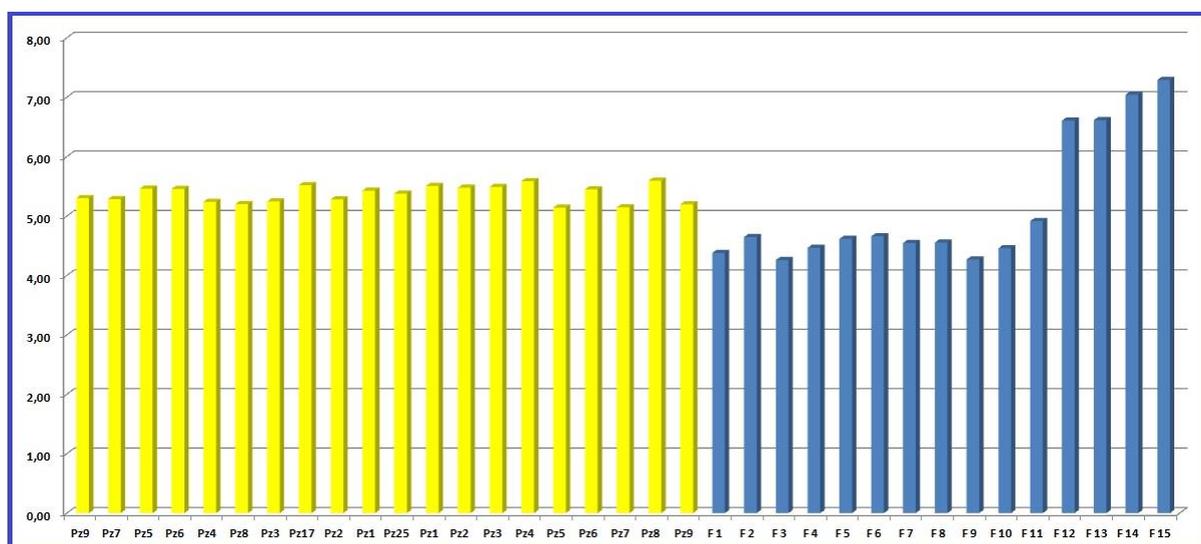


Figure 41. Histogramme de variation de IP dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.

4.5. Indice Agressivité (AI) :

L'indice d'agressivité (AI) est une méthode simplifiée par rapport à l'indice de Langelier (LI). Il se base sur le pH, l'alcalinité totale et la dureté calcique de l'eau, sans nécessiter les valeurs de température et de TDS. Utilisé comme paramètre pour évaluer la corrosivité de l'eau en alternative à l'indice de Langelier, l'AI est considéré comme un indicateur qualitatif plutôt qu'une mesure quantitative, bien qu'il soit moins précis que le LI. Son calcul repose sur la formule 18.

Tous les échantillons d'eaux souterraines provenant des nappes CI et CT présentent des valeurs d'indice d'agressivité comprises entre 12 et 14, ce qui suggère que ces eaux

ont un potentiel d'entartrage et sont non agressives. Cette observation est cohérente avec les résultats de l'indice de Ryznar (figure 42).

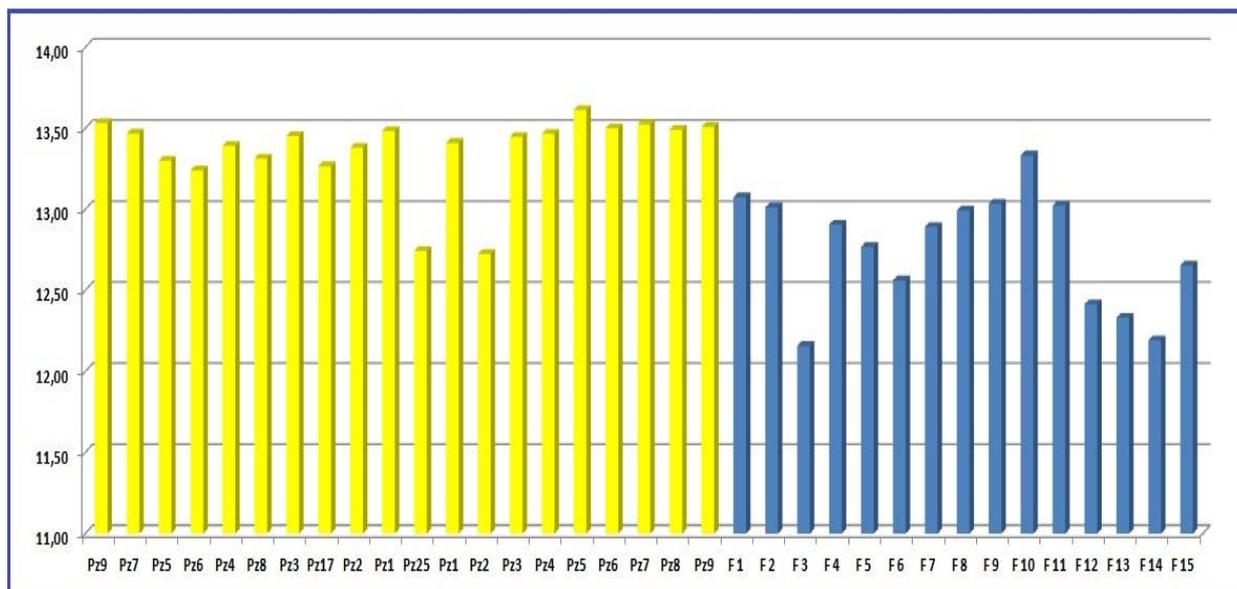


Figure 42. Histogramme de variation de AI dans les eaux du CI et CT de du l'Oued Righ.

4.6. L'indice de Revelle (RI) :

L'indice de Revelle est utilisé pour évaluer l'impact de la salinité sur la corrosion et l'entartrage de l'eau. Une valeur de RI inférieure à 0,5 indique que la composition chimique de l'eau n'est pas significativement influencée par la salinité et à l'inverse lorsque RI est supérieur à 0,5 il indique de la composition chimique de l'eau est influencée par la salinité.

D'après l'analyse des histogrammes, on peut déduire que tous les échantillons d'eau souterraine de l'aquifère de Continental Intercalaire (CI) sont légèrement affectés par la salinité, avec des valeurs d'indice de Revelle comprises entre 0,5 et 6,6.

En revanche, pour l'aquifère de Complex Terminal (CT), les échantillons d'eau sont répartis en deux catégories : 55 % sont légèrement affectés par la salinité et 45 % sont fortement affectés. Cela suggère une plus grande variabilité dans l'impact de la salinité sur la corrosion et l'entartrage dans l'aquifère de CT par rapport à celui de CI (figure 43).

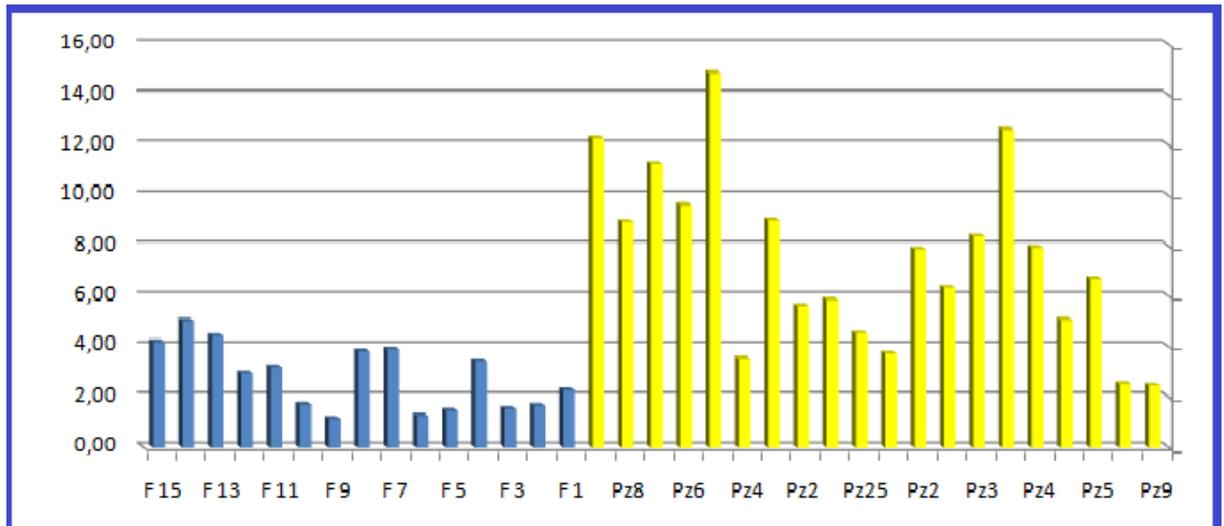


Figure 43. Histogramme de variation de RI dans l'eau du CI et CT de l'Oued Righ.

4.6. Le rapport massique chlorure-sulfate (CSMR)

Le rapport massique chlorure-sulfate indique si l'eau favorise la corrosion galvanique des connexions en plomb dans les canaux de distribution d'eau. Un CSMR supérieur à 0,5 signifie une tendance à la corrosion. Environ 80 % des échantillons d'eaux souterraines (CI) et de (CT) de cette région ont un CSMR supérieur à 0,5 ce qui signifie qu'ils peuvent être corrosifs pour les connexions en plomb (figure 44).

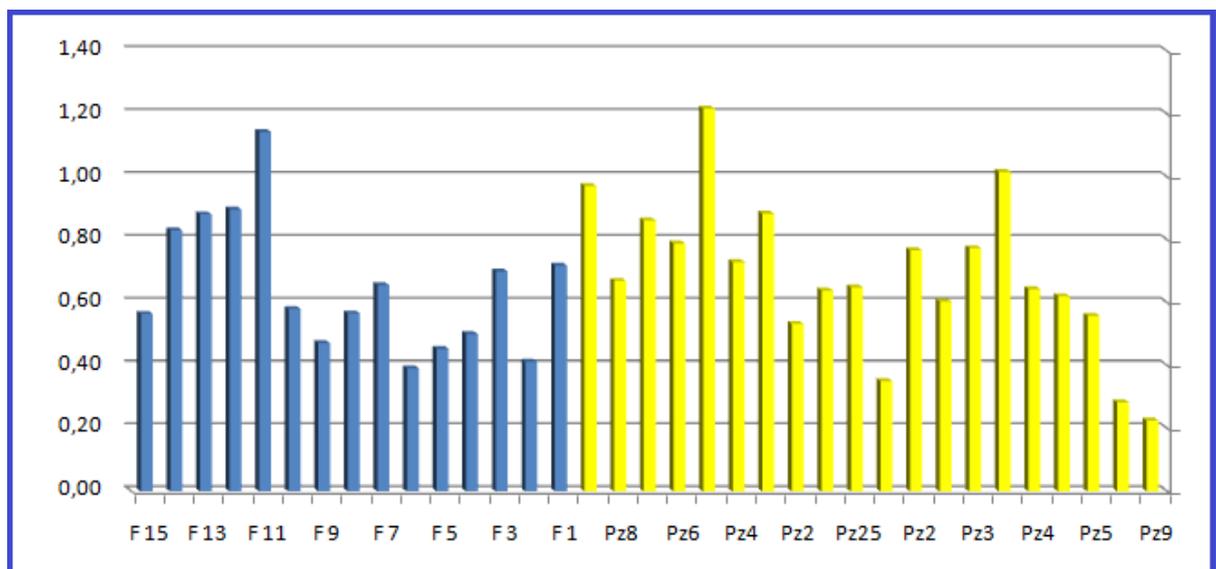


Figure 44. Histogramme de variation de CSMR dans l'eau du CI et CT de l'Oued Righ.

Tableau 14. Variations des indices de qualité de l'eau pour l'industrie.

Paramètres	Intervalle	Indication	Aquifer de CT		Aquifer de CI	
			N ^{bre}	%	N ^{bre}	%
			Echa	Echa	Echa	Echa
Indice de Langelier (LI)	< 0	Sous-saturé a tendance à dissoudre CaCO ₃ solide	00	00	00	00
	0	Saturé la CaCO ₃ et en équilibre.	00	00	00	00
	> 0	Sursaturé a tendance à précipiter le CaCO ₃ .	20	100	15	100
Indice de Stabilité Ryznar (RSI)	< 6	Sursaturé a tendance à précipiter le CaCO ₃ .	20	100	14	93.33
	6-7	Saturé la CaCO ₃ et en équilibre.	00	00	01	6.66
	> 7	Sous-saturé potentiel de Corrosion.	00	00	00	00
Larson-Skold Index (LSI)	< 0,8	Potentiel de tartre.	00	00	00	00
	0,8-1,2	Potentiel de Corrosion.	00	00	00	00
	> 1.2	Taux de corrosion élevés.	20	100	15	100
Indice de Puckorius (PSI)	< 6	Potentiel de tartre.	20	100	11	73.33
	6-7	Eau en équilibre.	00	00	02	13.33
	> 7	Fort potentiel de corrosion.	00	00	02	13.33
Indice d'Agressivité (AI)	IA < 10	Potentiel de Corrosion.	00	00	00	00
	10 < IA < 12	Modérément corrosif.	00	00	00	00
	IA > 12	Potentiel d'entartrage et non agressif	20	100	15	100
Indice de Revelle (RI)	> 0,5	Non affecté par la salinisation	00	00	00	00
	0.5-6.6	Légèrement affecté par la salinisation	20	100	15	100
	< 6.6	Fortement affecté par la salinisation	07	35	15	100
Chloride-sulfate mass ratio (CSMR)	> 0,5	Agressif	16	100	12	100
	< 0,5	non agressif	04	20	3	20

5. Facies chimique des eaux

4.5. Hydrogeochemical facies

A fin de déterminer le facies chimique de la zone d'étude, le diagramme de Piper (1944) à été utilisé. Sur le diagramme de Piper (Fig.30), on constate que dans le triangle des cations, les eaux de la région d'Oued Righ montrent un cas de non dominance, cette situation peut être expliqué par la complexité des processus

géochimiques qui contrôle la chimie des eaux de la zone d'étude. Dans le triangle des anions, les eaux sont caractérisées par une dominance du pôle sulfaté avec une nette tendance vers le pôle chloruré et une faible teneur en ion bicarbonates, ce qui peut être expliqué par le processus de dissolution des évaporites (gypse et halite en particulier). Le losange met en évidence que les échantillons d'eau souterraine prélevés dans la zone d'étude peuvent être classés :

- En trois types principaux pour les eaux de complexe terminal : un type Na-Cl (15 %), un type mixte Ca-Mg-Cl (30 %) et un type Ca-Cl (55 %).
- En deux types principaux pour les eaux de continental intercalaire: un type mixte Ca-Mg-Cl (20 %) et un type Ca-Cl (80 %).

La présence de ces différents types d'eau témoigne de la complexité des processus de minéralisation qui se déroulent dans la région étudiée (figure 45).

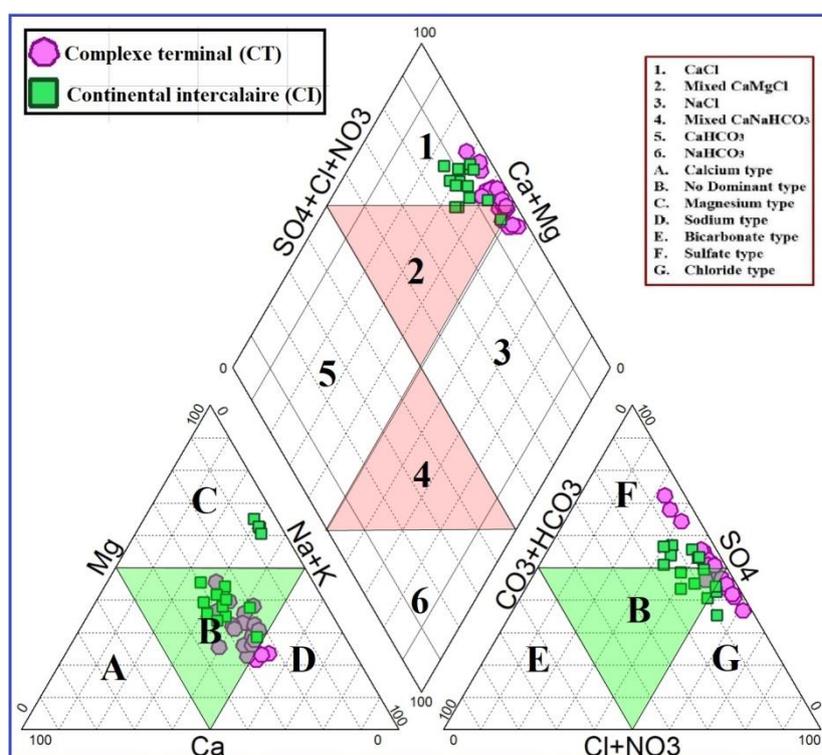


Figure 45. Diagramme de Piper pour les eaux souterraines d'Oued Righ.

6. Analyse multivariés des données hydrochimiques

6.1. La matrice de corrélation

6.1.1. Le complexe terminal (CT)

Les processus géochimiques qui façonnent la composition chimique des eaux souterraines dans un aquifère peuvent être mis en évidence en évaluant les

corrélations entre les différents composants chimiques des échantillons d'eau souterraine de complexe terminale (CT). La matrice de corrélation présentée dans le tableau 15 révèle l'existence d'une relation positive entre Na^+ ($r = \mathbf{0,908}$), Ca^{2+} ($r = \mathbf{0,975}$), Cl^- ($r = \mathbf{0,928}$), SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,830}$) et Mg^{2+} ($r = \mathbf{0,780}$) avec la concentration totale de solides dissous (TDS). Cette forte corrélation découle de la présence élevée d'ions dissous dans l'eau. De plus, des corrélations significativement positives sont observées entre différents ions : Na^+ vs Cl^- ($r = \mathbf{0,855}$), Ca^{2+} vs SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,778}$), Ca^{2+} vs Cl^- ($r = \mathbf{0,931}$) et Mg^{2+} vs SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,614}$). Ces associations témoignent de l'influence de processus hydrogéochimiques complexes sur la composition chimique des eaux. En revanche, la faible ou négative corrélation entre HCO_3^- , K^+ et NO_3^- et les autres ions peut s'expliquer par l'origine anthropique, tels que les rejets domestiques et les fertilisants agricoles pour les nitrates et le potassium, ou encore par la précipitation des carbonate pour HCO_3^- .

Tableau 15. La matrice de corrélation des éléments chimiques dans les eaux de CT.

Variabes	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	TDS	CE	pH
Ca	1										
Mg	0,800	1									
Na	0,879	0,598	1								
K	0,242	0,277	0,155	1							
Cl	0,931	0,792	0,855	0,388	1						
SO ₄	0,778	0,614	0,764	-0,224	0,606	1					
HCO ₃	-0,088	-0,019	0,053	-0,437	-0,104	0,194	1				
NO ₃	0,065	0,158	0,013	0,562	0,188	-0,215	-0,535	1			
TDS	0,975	0,780	0,908	0,143	0,928	0,830	0,045	-0,027	1		
EC	0,975	0,780	0,908	0,143	0,928	0,830	0,045	-0,027	0,990	1	
pH	0,058	-0,024	0,054	0,213	0,016	0,048	-0,258	0,135	0,033	0,033	1

6.1.2. Le continental intercalaire (CI)

La matrice de corrélation présentée dans le tableau 16 révèle l'existence d'une relation positive entre Na^+ ($r = \mathbf{0,909}$), Ca^{2+} ($r = \mathbf{0,774}$), Cl^- ($r = \mathbf{0,723}$) et SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,939}$) avec la concentration totale de solides dissous (TDS). Cette forte corrélation découle de la présence élevée d'ions dissous dans l'eau. De plus, des corrélations significativement positives sont observées entre différents ions : Na^+ vs Cl^- ($r = \mathbf{0,909}$), Ca^{2+} vs SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,633}$) et Na^+ vs SO_4^{2-} ($r = \mathbf{0,901}$). Ces associations

témoignent de l'influence de processus de la dissolution des évaporites (gypse et halite) sur la minéralisation des eaux de CI. En revanche, la faible ou négative corrélation entre les autres éléments chimiques peut être attribué à d'autres phénomène tel que la précipitation des sels et échange cationique.

Tableau 16. La matrice de corrélation des éléments chimiques dans les eaux de CI.

Variabiles	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	TDS	EC	pH
Ca	1										
Mg	-0,250	1									
Na	0,570	0,391	1								
K	-0,465	-0,642	-0,745	1							
Cl	0,246	0,710	0,806	-0,697	1						
SO ₄	0,633	0,441	0,901	-0,841	0,669	1					
HCO ₃	0,731	-0,606	0,107	0,023	-0,209	0,091	1				
NO ₃	0,232	0,695	0,658	-0,797	0,676	0,679	-0,083	1			
TDS	0,774	0,348	0,909	-0,840	0,723	0,939	0,284	0,627	1		
EC	0,774	0,348	0,909	-0,840	0,723	0,939	0,284	0,627	1,000	1	
pH	-0,597	0,411	-0,187	0,124	0,021	-0,190	-0,689	0,161	-0,332	-0,332	1

6.2. Analyse en composantes principales

6.2.1. Le complexe terminal (CT)

L'analyse en composantes principales (A.C.P) effectuée en se basant sur les 12 paramètres où les deux facteurs (F1 et F2) expliquent 74.67% de la variance totale. La projection des variables sur le plan F1-F2 (Fig. 46) montre que :

Le cercle de l'ACP montre trois pôles : (i) pôle 01. Considéré comme un facteur majeur de la minéralisation des eaux, il montre l'interaction des eaux avec la roche encaissante et en particulier les évaporites (NaCl, CaSO₄2H₂O et Na₂SO₄), qui ont joué un rôle important dans l'acquisition de la salinité des eaux (Bouselsal, 2016 ; Ouarekh et al. 2021), (ii) pôle 02. Considéré comme un facteur anthropique, il montre l'influence de l'infiltration des eaux usées domestiques et les eaux agricoles sur le chimisme des eaux de CT. Et en fin, (iii) le pôle 03. Qui montre les processus de précipitations des carbonates (calcite et dolomites) sur la chimie des eaux de CI.

6.2.2. Le continental intercalaire (CI) :

L'analyse en composantes principales (ACP) menée sur les 11 paramètres démontre que les deux premiers facteurs (F1 et F2) expliquent conjointement 85,61% de la variance totale. En examinant le cercle de l'ACP (Fig. 46), on constate que :

- La conductivité électrique présente une forte corrélation avec les principaux ions majeurs, notamment Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} . En revanche, d'autres ions tels que Ca^{2+} et Mg^{2+} montrent une corrélation moindre, probablement en raison du phénomène d'échange cationique.
- Le potassium (K^+), quant à lui, se comporte de manière distincte, étant partiellement associé à d'autres paramètres en raison de l'enrichissement en potassium par les silicates, résultant de l'altération des roches due à l'hydrolyse.
- L'emplacement du pH en opposition à celui du HCO_3^- sur l'axe horizontal indique une corrélation inverse liée aux équilibres calco-carboniques. La dissolution du CO_2 dans l'eau forme de l'acide carbonique (H_2CO_3), libérant progressivement des ions H^+ dans la solution, ce qui abaisse le pH.

Ces résultats concordent parfaitement avec les conclusions tirées de l'analyse de la matrice de corrélation (figure 46).

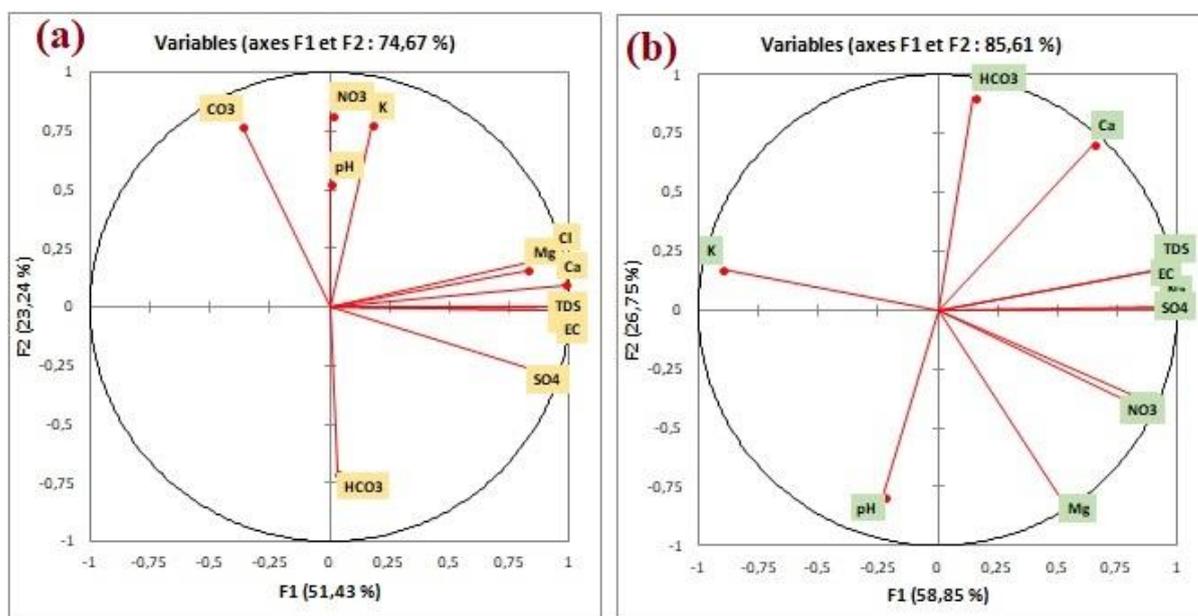


Figure 46. Analyse en composantes principales : (a) complexe terminal et (b) continental intercalaire.

7. Conclusion

Une étude hydrochimique a été menée sur 20 échantillons d'eau provenant de l'aquifère de complexe terminal (CT) et 15 échantillons de l'aquifère de continentale intercalaire (CI). L'objectif était d'évaluer la qualité de l'eau en fonction de ses usages prévus (potabilité, irrigation, et industrie) et d'identifier les processus hydrogéochimiques qui influent sur sa minéralisation. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été utilisées. La méthode GPI a été utilisée pour évaluer la potabilité de l'eau, tandis que l'étude de la qualité de l'eau d'irrigation a été réalisée en analysant les facteurs potentiels tels que la conductivité électrique (CE), le taux d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (Na%), le risque de magnésium (MR), l'indice de perméabilité (PI) et le rapport de Kelly (RK). De plus, l'évaluation de la susceptibilité des eaux souterraines à la corrosion et à l'entartrage dans un contexte industriel a été effectuée en utilisant divers indices, notamment l'Indice de Langelier (LI), l'Indice de stabilité Rynza (RSI), l'Indice Larson-Skold (LSI), l'Indice d'échelle de Puckorius (PSI), l'Indice Agressivité (AI), l'Indice de Revelle (RI) et le rapport massique chlorure sulfate (CSMR).

Les résultats ont montré que les eaux souterraines de la zone d'étude sont fortement minéralisées et très dures, ne convenant pas à la consommation. L'application de la méthode GPI a révélé que 5 % des échantillons de l'aquifère CT présentaient une forte pollution et 95 % une pollution très élevée, tandis que pour l'aquifère de continentale intercalaire, 40 % montraient une pollution modérée et 60 % une pollution forte. En ce qui concerne l'usage agricole, les résultats ont indiqué que les eaux des aquifères CT et CI de la région d'Oued Righ étaient inappropriées pour l'irrigation en se basant sur la conductivité électrique, le risque de magnésium et le diagramme d'USSL. De plus, les calculs basés sur différents indices d'évaluation de la corrosion et de l'entartrage ont montré que la plupart des puits étaient sujets à la corrosion, avec une tendance à la formation de dépôts de bicarbonate de calcium. En outre, l'étude hydrochimique et l'analyse statistique multivariée ont révélé que la composition chimique des eaux souterraines est principalement influencée par des processus tels que la dissolution des évaporites, les échanges de cations et les apports anthropiques, qui jouent un rôle prédominant dans la chimie de l'eau de ces aquifères.

Conclusion Générale

Conclusion général

La région d'Oued Righ, située dans le sud-est de l'Algérie, est caractérisée par un climat aride, caractérisé par des températures élevées, une faible pluviométrie (55 mm/an) et une évaporation intense. Avec une population toujours en croissance, attirée par les secteurs des services, de l'agriculture et de l'industrie, la gestion des ressources en eau devient cruciale pour le développement régional. Cette étude a exploré la qualité des eaux des aquifères du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) d'Oued Righ, évaluant leur aptitude à différents usages : consommation humaine, irrigation, et applications industrielles. Ainsi que la caractérisation hydrogéochimique des eaux de CT et CI.

Le Complexe Terminal (CT), composé de plusieurs nappes superposées avec des épaisseurs allant de 50 à 360 mètres, se trouve à une profondeur relativement accessible. Cet aquifère est principalement formé de sédiments, incluant des sables, des graviers, des calcaires et des argiles, ce qui lui confère une bonne capacité de stockage de l'eau. L'aquifère du Continental Intercalaire (CI), plus profond, varie de 1800 mètres à des profondeurs plus importantes dans certaines zones, avec des épaisseurs atteignant jusqu'à 350 mètres. Sa lithologie est principalement constituée de grès et de sables du Crétacé, souvent intercalés avec des argiles et des couches de calcaire, ce qui favorise un large stockage des eaux souterraines.

Les résultats montrent que les eaux de ces aquifères sont fortement minéralisées et présentent des niveaux de dureté élevés, ce qui les rend généralement inadaptées à la consommation directe sans traitement. L'indice de pollution des eaux souterraines (GPI) indique une contamination significative, particulièrement dans l'aquifère CT où la majorité des échantillons montrent une pollution très élevée. Pour l'irrigation, les analyses révèlent que l'eau de ces aquifères risque de nuire à la santé des sols et des plantes en raison de sa forte salinité et de sa composition ionique.

L'évaluation de la corrosion et de l'entartrage pour les usages industriels a également souligné des défis, avec une forte tendance à la formation de dépôts nuisibles dans les équipements. La composition chimique des eaux souterraines, influencée par la dissolution des évaporites, les échanges de cations et les apports anthropiques, nécessite une gestion prudente et adaptée.

En outre, l'étude hydrochimique et l'analyse statistique multivariée ont révélé que la composition chimique des eaux souterraines est principalement influencée par des

processus tels que la dissolution des évaporites, les échanges de cations et les apports anthropiques, qui jouent un rôle prédominant dans la chimie de l'eau de ces aquifères. Cette étude souligne l'urgence d'adopter des stratégies de gestion des ressources en eau plus efficaces et de développer des technologies de traitement avancées pour rendre l'eau des aquifères d'Oued Righ utilisable de manière durable. Il est essentiel d'intégrer ces connaissances dans les politiques de développement régional pour garantir la sécurité hydrique et la durabilité environnementale de cette région critique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

1. ANRH (2008) Rapport de l'inventaire des forages d'eau de la vallée d'Oued Righ.16 P.
2. Arfa A, Bouselsal B, Zeddouri A, Kebili M (2022) Groundwater Geochemical and Quality of the Continental Intercalary Aquifer in Béni Ounif (Southwest Algeria). *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(9), 1–12. doi.org/10.12911/22998993/151070.
3. Ayers R.S & Westcot D.W (1985) Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1, U. N. Food and Agriculture Organization, Rome.
4. Belksier M.S (2017) Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux. PhD thesis, University of Annaba, Algeria :123p.
5. Bouselsal B, Johnbosco C.E (2024) Graphical, statistical and index-based techniques integrated for identifying the hydrochemical fingerprints and groundwater quality of In Salah, Algerian Sahara. *Environmental Geochemistry and Health* 46, 158 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01931-6>
6. Bouselsal B (2016) Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie). Th. Doctorat Univ.de Annaba, 204p
7. Bouselsal B, Saibi S (2022) Evaluation of Groundwater Quality and Hydrochemical Characteristics in the Shallow Aquifer of El-Oued Region (Algerian Sahara). *Groundwater for Sustainable Development* 17:100747. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100747>.
8. Bouselsal B (2017) Groundwater quality in arid regions: the case of Hassi Messaoud region (SE Algeria). *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2017, 9(1), 528-541.
9. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i1.30>
10. Bouselsal B, Belksier M.S (2018) Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie) . *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*. Volume III - Numéro 1 - Avril 2018. P 74 -80.
11. Boussaada N, Bouselsal B, Benhamida SA, Hammad N, Kharroubi M (2023) Geochemistry and water quality assessment of continental intercalary aquifer in

- Ouargla region (Sahara, Algeria). *J Ecol Eng* 24(2), 279–294. <https://doi.org/10.12911/22998993/156832>.
12. 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). *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2017, 9(2), 696-712.
 13. Bouznad I.E (2017) Ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée de Oued Righ (Sahara septentrional algérienne). PhD thesis, University of Annaba, Algeria : 201p.
 14. Busson G (1967) Le Mésozoïque saharien. 1^{ère} partie : L'Extrême Sud-tunisien. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 8, 194 p. Ed. C.N.R.S.
 15. Busson G (1970) Le Mésozoïque saharien. 2^{ème} partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, 811p. Ed. C.N.R.S.
 16. Castany G (1982) Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifère du Continental Intercalaire et du Complexe terminal. *Bull. BRGM 2 III* (2), 127–147.
 17. Cornet A (1964) Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 61, 5–72.
 18. Doneen L D (1964) "Water Quality for Agriculture", Department of Irrigation, University of California, Davis, 48 p.
 19. Edmund WM, Guendouz AH, Mamou A, Moulla A, Shand P et Zouari K (2003) Groundwater evolution in the continental intercalary aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied geochemistry.*, 18, 805-822.
 20. Egbueri, J.C, Ezugwu C.K, Unigwe C.O, Onwuka O.S, Onyemesili O.C, Mgbenu C.N (2020) Multidimensional Analysis of the Contamination Status, Corrosivity and Hydrogeochemistry of Groundwater from Parts of the Anambra Basin, Nigeria. *Analytical Letters* 0 (0): 1–31. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1843049>
 21. Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Printice-Hall, New Jersey
 22. Hammad N, Bousalsal B, Boussaada N, Satouh A, Lakhdari A.S (2023) Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic

- Aquifer in Ouargla (Algeria). *Journal of Ecological Engineering* 2023 24(5), 36–45 doi.org/10.12912/27197050/163122.
23. Houari I.M, Bouselsal B, Lakhdari A.S (2024) Evaluating Groundwater Potability and Health Risks from Nitrates in the Semi-Arid Region of Algeria. *Ecological Engineering & Environmental Technology* 2024, 25(6), 222–236. <https://doi.org/10.12912/27197050/186954>
 24. Kebili M, Bouselsal B, Gouaidia L (2021) Hydrochemical Characterization and Water Quality of the Continental Intercalare Aquifer in the Ghardaïa Region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering* 22(10):152–62. <https://doi.org/10.12911/22998993/142041>.
 25. Kelly WP (1940) Permissible composition and concentration of irrigation waters. *Proc Amer Soc Civ Engin* 66:607–613
 26. Kharroubi M, Bouselsal B, Ouarekh M, Benaabidate L, Khadri R (2022) Water Quality Assessment and Hydrogeochemical Characterization of the Ouargla Complex Terminal Aquifer (Algerian Sahara). *Arabian Journal of Geosciences* 1–24. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09438-z>.
 27. Ouarekh M, Bouselsal B, Belksier M.S, Benaabidate L (2021) Water quality assessment and hydrogeochemical characterization of the Complex Terminal aquifer in Souf valley, Algeria. *Arabian J. Geosci.* 14, 2239. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08498-x>
 28. OSS (Observatoire Sahara et Sahel) (2010) GEOAQUIFER: Amélioration de la connaissance et de la gestion concertée du système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) par l'utilisation des images satellitaires. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.23p.
 29. Ould Baba SM (2005) Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de doctorat en Géologie, Tunisie, 277p.
 30. Piper AM (1944) Graphical interpretation of water analysis. *Transactions of the American Geophysical Union.*, 25:914 -923.
 31. Raghunath HM (1987) *Groundwater*. Wiley Eastern Ltd., Delhi.
 32. Remini B (2013) Scaling of the potable water network of the Touggourt city (Algeria). *Desalination and Water Treatment*, Volume 52, Issue 22-24, pages 4170-4173.

33. Richards LA (1954) Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Washington, DC: US Department of Agriculture, Handbook no. 60.
34. Rodier J, Brazin C, Broutin JP, Chambon P, Champsaur H, Rodi L (1996) L'analyse de l'eau, 8ème édition. DUNOD, Paris, France.
35. Satouh A, Bouselsal B, Chellat S, Benaabidate L (2021) Determination of Groundwater Vulnerability Using the DRASTIC Method in Ouargla Shallow Aquifer (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 1–8. [Htps ://doi.org/10.12911/22998993/137680](https://doi.org/10.12911/22998993/137680)
36. Sayah Lambarak M (2008) étude hydraulique du canal d'Oued Righ et détermination des caractéristiques hydrauliques. Mémoire de magister. Université d'Ouargla. 82p.
37. Subba Rao, N., 2012. PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. *Hydrological Processes* 26, 3344–3350.
38. Touahri M, Belksier M.S, Boualem B, Kebili M (2022) Groundwater Quality Assessment of Hassi Messaoud Region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(11), 165–178. doi.org/10.12911/22998993/153396.
39. UNESCO (1972) Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. UNESCO, Paris, France.
40. USEPA (1994) Short-Term Methods for Estimating the Chronic Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater Organisms, 3rd ed. EPA/600/491/002. USEPA, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Cincinnati, OH, USA.
41. USSL (U.S. Salinity Laboratory Staff) (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils: U.S. Dept. Agric. Handbook No.60, 160 p.
42. WHO (2017) World Health Statistics 2017: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva: World Health Organization; License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
43. Wilcox LV (1948) The quality of water for irrigation use (No.1488-2016-124600).
44. XLSATAT (2014) Logiciel version 2014.5.03 downloadable at [http://www.xlstat.com / info@xlstat.com](http://www.xlstat.com/info@xlstat.com)