

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA –
FACULTE 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
En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER
en Hydrogéologie

Présenté par

Hafsi Hibet errahamene

Thème

**Hydrochimie des eaux des aquifères de
l'Oued Righ (Sud algérien) : Analyse
statistique classique et approche
compositionnelle**

Soutenu le 26/06/2024, devant le jury composé de :

M. Houari Idir Menad	M.C.B – Univ. Ouargla	Président
M. Rabah Kechiched	Professeur – Univ. Ouargla	Promoteur
M. Med Salah Belksier	Professeur – Univ. Ouargla	Co-promoteur
M. Imed Eddine Nezli	Professeur – Univ. Ouargla	Examineur

Année Universitaire : 2023-2024

Sommaire

Chapter 1. Généralités sur la zone étudiée	
Introduction	14
1 Localisation géographique	14
2 Aspects socio-économiques	15
2.1 Végétation	16
2.2 Topographie et géomorphologie	17
3 Les sols de la vallée de l'Oued Righ	17
Chapitre 2 : cadre géologique	
Introduction	19
1 Cadre géologique du Sahara Septentrional	19
2 Litho-stratigraphie	20
2.1 Albien	20
2.2 Vraconien	21
2.3 Cénomanién	21
2.4 Turonien	21
2.5 Sénonien	22
2.6 Eocène	22
2.7 Mio-Plio-Quaternaire	22
3 Tectonique régionale	23
4 Paléogéographie	24
Conclusion	25
Chapitre 3 .Cadre hydrogéologique	
Introduction	27
1 Définition des aquifers	27
1.1 Nappe phréatique	28
a) Géologie de la nappe	28
b) Piézométrie de la nappe superficielle	28
1.2 Complexe Terminal (C.T)	29
a) Géologie de la nappe	29
b) Alimentation de la nappe	30
c) Piézométrie	31
1.3 Le Continentale Intercalaire	32
a) Alimentation et exutoires	32
b) Piézométrie de la nappe continentale intercalaire	32
Conclusion	33
Chapitre 4 : Cadre climatique	
Introduction	36
1 Station de mesure	36
2 Facteurs climatiques	37
2.1 Température	37
2.2 Précipitations	39
2.3 Le vent	41
2.4 Evapotranspiration	42
2.5 Coefficient pluviométrique	42
2.6 Durée d'insolation	43

2.7	L'humidité de l'air	44
2.8	L'évaporation	44
3	Rapport précipitation-température	45
3.1	Courbe pluviothermique (Gausсен et Bagnouls)	45
	Conclusion	46
Chapitre 5. Hydrochimie et statistique		
	Introduction	48
1	Continental intercalaire	48
1.1	Les paramètres physiques (Ce, pH)	48
1.1.1	Le Ph	48
1.1.2	Conductivité électrique (Ce)	49
1.2	Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)	51
1.2.1	Le Calcium (Ca^{++})	51
1.2.2	Le Magnésium (Mg^{++})	52
1.2.3	Sodium (Na^+)	53
1.2.4	Potassium (K^+)	54
1.3	Les Anions (Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-)	55
1.3.1	Les chlorures (Cl^-)	55
1.3.2	Les sulfates (SO_4^-)	56
1.3.3	Les bicarbonates (HCO_3^-)	57
2	Complexe terminal	58
2.1	les paramètres physiques (Ce, pH)	58
2.1.1	Le Ph	58
2.1.2	Conductivité électrique (Ce)	59
2.2	Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)	60
2.2.1	Le Calcium (Ca^{++})	60
2.2.2	Le Magnésium (Mg^{++})	61
2.2.3	Sodium (Na^+)	62
2.2.4	Potassium (K^+)	63
2.3	Les Anions (Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-)	64
2.3.1	Les chlorures (Cl^-)	64
2.3.2	Les sulfates (SO_4^-)	65
2.3.3	Les bicarbonates (HCO_3^-)	66
3	Caractéristiques chimiques des eaux	67
4	Analyse Statistique	68
4.1	Données prisé en compte	68
4.2	Statistique d'étude de la nappe du continental intercalaire	68
4.2.1	Statistique élémentaire	68
4.2.2	Calcul de la matrice de corrélation	69
4.2.3	Diagonalisation de la matrice de corrélation	70
4.2.4	Interprétation des composantes	70
4.3	Statistique d'étude de la nappe du complexe terminal (CT)	71
4.3.1	Statistique élémentaire	71
4.3.2	Calcul de la matrice de corrélation	72
4.3.3	Diagonalisation de la matrice de corrélation	73
4.3.4	Interprétations des composantes principaux	73
	Conclusion	74
Chapitre 6 .Analyse par approche compositionnell		
	Introduction	77

1	Analyse statistique par approche compositionnelle (CODA) –Analyse en composantes principaux	77
2	Résultats de l'analyse ACP	78
2.1	Continental Intercalaire	78
2.2	Complexe terminal	79
	Conclusion	80

Listes des figure

N° des Figures	Titre	Page
1	Limite administrative d'Oued Righ	15
2	Carte de localisation géographique de la Vallée d'Oued Righ	16
3	Carte géologique du bas Sahara (d'après G-Busson G, 1967)	20
4	Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien (Sonatrach et Schlumberger, 1990).	23
5	Coupe hydrogéologique synthétique de sahara septentrionale (UNESCO 1972)	28
6	Carte piézométrique de la nappe superficielle (Octobre 2015) (Belksir, 2017)	29
7	Coupe hydrogéologique transversale du CT (UNESCO 1972)	30
8	Carte piézométrique du Complexe Terminal de l'Oued Righ en 2013 (belksir, 2017)	31
9	Carte piézométrique du Continentale Intercalaire de l'Oued Righ en 2013 (Belksir, 2017)	33
10	Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse	37
11	Courbe de distribution de la température moyenne annuel – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017)	38
12	Histogramme de distribution de la température moyenne mensuelle – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).	39
13	courbe de distribution de la précipitation somme moyenne annuelle – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).	40
14	Histogramme de distribution de la précipitation (Pré) moyenne mensuelle _ station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).	40
15	Histogramme de distribution de la vitesse du vent moyenne mensuelle de la station Touggourt, période (2008 – 2017).	41
16	Histogramme de la distribution des Evaporations moyennes mensuelles de la station de Touggourt, période (2008 – 2017).	42
17	Histogramme de la Durée d'insolation (INS) da la station de Touggourt période (2008_2017)	43
18	Histogramme de l'humidité de l'air de la station de Touggourt, période (2008_2017)	44
19	Histogramme de l'évaporation (EVA) de la station de Touggourt, période (2008_2017)	45
20	Courbe pluviothermique – station de Touggourt durant La période (2008_2017).	45
21	Histogramme (A) et variation (B) de pH de la nappe du continentale intercalaire	49
22	graphe de probabilités de pH de la continentale intercalaire	49
23	Histogramme (A) et variation (B) de conductivité électrique (Ce) de la nappe du continentale intercalaire	50
24	graphe de probabilités de la conductivité électrique (Ce) de la continentale intercalaire	50
25	Histogramme (A) variation (B) de le calcium (Ca) de la nappe du continentale intercalaire	51

26	Graphes de probabilités de le calcium (Ca) de la continentale intercalaire	51
27	Histogramme (a) et variation (b) du magnésium (Mg) de la nappe du continentale intercalaire	52
28	Graphes de probabilités de le magnésium (Mg) de la continentale intercalaire	52
29	Histogramme (a) de la variation (B) de Sodium (Na) de la nappe du continentale intercalaire	53
30	graphes de probabilités de Sodium (Na) de la continentale intercalaire	53
31	Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation de Potassium (K) de la nappe du continentale intercalaire	54
32	Graphes de probabilités de Potassium (K) de la continentale intercalaire.	54
33	Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation de chlorure (Cl) de la nappe du continentale intercalaire	55
34	graphes de probabilités de chlorure (Cl) de la continentale intercalaire	55
35	Histogramme (A) et variation (B) de Sulfate (SO ₄) de la nappe du continentale intercalaire	56
36	graphes de probabilités de Sulfate (SO ₄) de la continentale intercalaire	56
37	Histogramme (a) et variation (B) de Bicarbonate (HCO ₃) de la nappe du continentale intercalaire.	57
38	graphes de probabilités de Bicarbonate (HCO ₃) de la continentale intercala	57
39	Histogramme (a) et variation (b) de pH de la nappe du complexe terminal	58
40	graphes de probabilités de PH de la nappe du complexe terminale	59
41	Histogramme (a) et variation (b) des conductivités électriques la nappe du complexe terminal	59
42	le graphes de probabilité des conductivités électriques (Ce) de la nappe du complexe terminal	60
43	Histogramme (A) la variation (B) de calcium (Ca) au niveau du complexe terminal.	60
44	le graphes de probabilité du calcium (Ca) de l'aquifère du complexe terminal	61
45	Histogramme (A) et variation (B) du Magnésium (Mg) de l'aquifère complexe terminal.	61
46	Graphes de probabilité du Magnésium (Mg) de l'aquifère du complexe terminal	62
47	Histogramme (a) et variation (B) de Sodium(Na) de l'aquifère du complexe terminal	62
48	le graphes de probabilité de Sodium (Na) da la nappe du complexe terminale	63
49	Histogramme (A) et variation (B) de potassium (K) au niveau du complexe terminal.	63
50	Graphes de probabilité de potassium (K) la nappe du complexe terminal	64
51	Histogramme (A) et variation (B) du chlore (Cl ⁻) de l'aquifère du complexe terminal	64
52	Graphes de probabilité pour le chlore (Cl ⁻) de l'aquifère du complexe terminal.	65
53	Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation les Sulfates (SO ₄) de la nappe du complexe terminal.	65
54	Graphes de probabilité des sulfate (SO ₄) au niveau de l'aquifère du complexe terminal.	66
55	Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation les bicarbonates (HCO ₃) de la nappe du complexe terminale	66
56	Graphes de probabilité de bicarbonate (HCO ₃) de l'aquifère du complexe terminale	67
57	Diagramme de piper du continental intercalaire (A) et complexe terminal (B) de la région d'Oued Righ.	68
58	Composantes chimiques des eaux du continental intercalaire de la région d'Oued Righ.	71
59	Composantes chimiques des eaux du complexe terminal de la région d'Oued Righ.	74
60	Acp sur les données converties en CLR du la nappe continental intercalaire (CI)	69
61	Acp sur les données converties en CLR du la nappe complexe terminal (CT)	80

Liste des tableaux

N° des tableaux	Titre	Page
1	Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)	24
2	Températures moyennes annuel (°C) pour la station de Touggourt, période (2008– 2017).	38
3	Températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Touggourt période (2008– 2017).	38
4	Vitesses de vent moyennes mensuelles (m/s) pour la station de Touggourt, period (2008– 2017).	41
5	Coefficient pluviométrique données de la station de Touggourt période (2008– 2017)	43
6	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI).	69
7	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de continental intercalaire de la région d'Oued Righ	69
8	Facteurs de charges (composantes) sur les paramètres physico-chimique dons la nappe du continental intercalaire de la région d'Oued Righ	70
9	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du complexe terminal (CT).	72
10	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de complexe terminal de la région d'Oued Righ.	72
11	Component landing sur les paramètres physico-chimique dons la nappe du complexe terminal de la région d'Oued Righ.	73
12	Utiliser la matrice de corrélation des donnée transformées en CLR de la nappe continental intercalaire (CI).	78
13	Utiliser la matrice de corrélation des donnée transformées en CLR de la nappe complexe terminale (CT).	79

شكر و تقدير :

يارب حمدا من القلب أسديهِ ، لكن أضاء دربي بنور أستمده
أستاذي راجح قشيشد ، أهديك شكري ، يامنار العلم و يامن تعلم و ترشد شكرا على
كل النصائح و دعمك المستمر

و شكر خاص الاستاذ بلقصور محمد صالح على مساهمته و تتبعه لهذا العمل
شكر آخر لأستاذ بن حميدة سليمان على المعلومات المقدمة من أجل إكمال هذا العمل ،
وكل عمالها على معلومات المقدمة من طرفهم و على حسن ANRH وكذلك شركة ال
المعاملة و الإستقبال

وفي رحلتي هذه، لم أكن وحدي

إلى عائلتي الكريمة ، وأصدقائي الأعزاء و زملاء الدراسة شكراً لكونكم نعم الأهل والسند
وفي الختام أقول من قال أنا لها نالها

Dédicaces

Aux camarades de la première et de l'avant-dernière étape, à ceux qui, pendant les années de soudure, étaient des nuages de pluie, je suis reconnaissant

المخلص

يتميز وادي ريغ، الواقع شمال شرق الصحراء الجزائرية، بوجود طبقتين من المياه الجوفية هما الطبقة المائية (CI) المتداخل القاري ، CT مركب النهائي). حيث تهدف هذه الأطروحة الى دراسة السلوك الهيد وكيميائي للمياه طبقتي المياه الجوفية باستخدام أساليب الاحصائية الكلاسيكية و الطرق التي تعتمد على نهج تحليل البيانات التركيبية. جعل التحليل الذي أجراه ACP على البيانات الجديدة الذي تم تحويل الى التي تؤثر CLR من الممكن التمييز بين العوامل التي تؤثر على كيمياء المياه و تصنيف نقاط المياه . يبدو ان التكوينات المبخرة هي الاكثر تأثيرا على تمعدن المياه .

الكلمات المفتاحية: طبقة المياه الجوفية، المجمع الطرفي، المقحم القاري، الكيمياء الهيد وكيميائية، النهج التركيبي، وادي ريغ

Summary

The Oued Righ valley, located in the northeast of the Algerian Sahara, is characterized by the presence of two aquifers, namely the aquifers of the Continental intercalary aquifer (CI) and the terminal complex aquifer (CT). This dissertation aims to investigate the hydrochemical characteristics of the waters of the two aquifers using classical statistical methods and methods based on the CODA. The ACP analysis on the new data transformed into CLR made it possible to distinguish the factors influencing the chemistry of the waters and the classification of water points. Evaporitic formations appear to be the most influential on the mineralization of water.

Key words: aquifer, terminal complex, continental intercalary, hydrochemistry, compositional approach, Oued Righ

Résumé

La vallée de l'Oued Righ, située au Nord-Est du Sahara algérien, se caractérise par la présence de deux aquifères à savoir des aquifères de la nappe Continental intercalaire (CI) et la nappe du complexe terminal (CT). Ce mémoire est pour objectif d'étudier le comportement hydrochimique des eaux des deux aquifères à l'aide des méthodes statistiques classiques et les méthodes qui reposent sur l'approche de l'Analyse des données compositionnelle CODA. L'analyse par ACP sur les nouvelles données transformées en CLR a permis de distinguer les facteurs influençant le chimisme des eaux ainsi la classification des points d'eau. Les formations évaporitiques apparaissent comme étant les plus influentes sur la minéralisation des eaux.

Mots clés : aquifère, complexe terminal, continental intercalaire, hydrochimie, approche compositionnel, Oued Righ.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau joue un rôle essentiel et important dans le développement durable des régions arides en particulier, pour satisfaire les besoins domestiques et pour répondre à la demande croissante des activités agricoles en plein d'expansion dans le Sahara algérien.

La région de l'Oued Righ est une région désertique, avec un climat sec, caractérisé par de faibles précipitations et des températures élevées surtout durant les mois d'été, ce qui en fait une région aride.

Le bassin de l'Oued Righ s'étend le long de la frontière entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Notre zone étudiée, l'Oued Righ, contient deux grands systèmes aquifères, les nappes continentales intercalaire (CI) et complexe terminal (CT), surmontés d'une nappe phréatique de surface.

Dans la région, ces deux systèmes ont également fait du désert algérien une zone riche en ressources en eaux souterraines. Ce mémoire présenté vise une étude hydrochimique des eaux du CI et CT à l'aide de l'application des méthodes statistiques. Plusieurs méthodes statistiques ont été appliquées et interprétées. Il s'agit de :

- L'analyse en composantes principales (ACP) pour mettre en évidence les relations entre les variables.
- Déterminer les relations entre les variables hydro chimiques à l'aide d'analyses de corrélation.
- Comparaison entre les deux aquifères : Continental Intercalaire (CI) et Complexe Terminal (CT).

Les résultats de cette étude ont été présentés en 6 chapitres à savoir :

Chapitre 1 : Généralités sur la zone étudiée.

Chapitre 2 : Cadre géologique.

Chapitre 3 : Cadre hydrogéologique.

Chapitre 4 : Cadre climatique.

Chapitre 5 : Hydrochimie et statistique.

Chapitre 6 : Analyse multivariée par approche compositionnelle.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur la zone étudiée

Chapitre 1 :

Généralités sur la zone étudiée

Introduction

Dans ce chapitre, l'étude sera menée sur la zone étudiée représentée par l'Oued Righ en termes de localisation géographique et de topographie de la zone. D'autant plus un aperçu sur les caractéristiques économiques sociales et pédologiques de la zone, sera présenté.

1. Localisation géographique

La vallée de l'Oued Righ est située au Nord-Est du Sahara algérien, en bordure du Grand Erg Oriental et au Sud de l'atlas Saharien (**Fig. 1**). Elle s'étend sur un axe d'environ 150 km. Géographiquement, elle est limitée par les coordonnées suivantes:

$$X1 = 04^{\circ} 58' 55'' \quad \text{à} \quad X2 = 06^{\circ} 28' 41''.$$

$$Y1 = 32^{\circ} 45' 22'' \quad \text{à} \quad Y2 = 34^{\circ} 33' 47''.$$

Cette zone débute à Goug à environ 30 km au Sud de Touggourt et se termine dans la commune d'Oum Etiour le long de la nationale N°2. Administrativement, la vallée chevauche entre de deux wilayas (Ouargla et El-Oued). Elle est constituée de 15 communes regroupées dans 4 daïras (Fig. 2).



Fig.1 : Limite administrative d'Oued Righ.

2. Aspects socio-économiques

Dans cette région, le secteur agricole représente la principale activité économique de la région, mais il est confronté à des défis tels que le faible rendement des palmiers, causé par la salinisation des sols et des eaux, la remontée de la nappe phréatique et le vieillissement des palmiers. De plus, il y a un manque d'intérêt pour l'agriculture par rapport aux emplois mieux rémunérés offerts par les sociétés pétrolière. Les principales espèces cultivées sont la variété Deglat Nour, suivie de Ghars et Degla Bayda. En ce qui concerne l'élevage, on trouve principalement des ovins et des caprins, élevés pour leur lait et leur viande (belksier 2017).

Dans le secteur industriel, on trouve plusieurs petites usines telles que des briqueteries près des sources de matières premières, des complexes de transformation des hydrocarbures, des usines de transformation des plastiques, des usines d'aluminium et des entreprises de conditionnement de dattes (Boussaâda N. 2007).

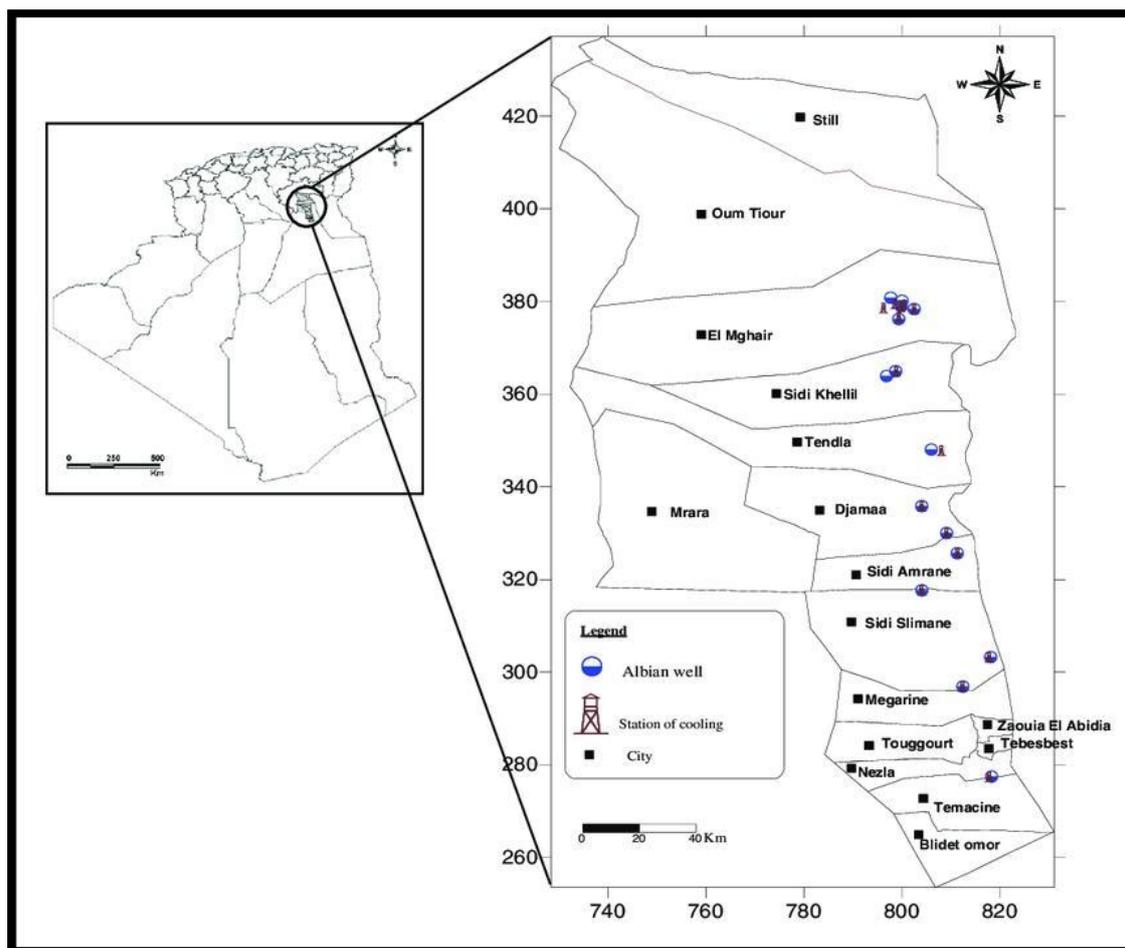


Fig. 2: Carte de localisation géographique de la Vallée d'Oued Righ.

2.1. Végétation

Comme dans tout le Sahara, la végétation est rare et composée principalement de plantes xérophytes adaptées aux conditions arides. Les plantes vivaces et ligneuses ont des systèmes racinaires profonds pour accéder à l'eau et aux nutriments nécessaires à leur survie. Les dunes de sable abritent une végétation pérenne qui a développé des adaptations spécifiques pour prospérer dans ce milieu hostile (Quezel, 1958, cité par Dutil 1971).

La culture du palmier dattier est prédominante dans la région d'Oued Righ, occupant une partie significative de la superficie. Sur les reliefs, la végétation est quasi inexistante, mais on peut trouver une végétation herbacée dans les lits des oueds. Du point de vue de la géomorphologie, la région d'Oued Righ est principalement plate,

avec une altitude moyenne de 46 mètres. Le relief varie entre 105 mètres à Touggourt et -20 mètres à Oued Righ, avec une pente moyenne de 1% (Belksier, 2017).

2.2. Topographie et géomorphologie

La région de l'Oued Righ est appelée le désert inférieur en raison de ses dépressions et de ses élévations, car sa hauteur varie entre 105 mètres à Touggourt, le point le plus élevé, et -20 mètres à Oued Righ, le point le plus bas.

La région d'Oued Righ est également caractérisée par une dépression s'étendant du sud au nord, cette dernière étant caractérisée par des dépressions fermées telles que la shotta et la sabkha, qui représentent les points les plus bas de la vallée, car leur hauteur est inférieure au niveau de la mer (Belkacem b , et al, 2014).

3. les sols de la vallée de l'oued Righ:

Les sols de la vallée de l'Oued Righ, située dans la zone saharienne d'Algérie, présentent des caractéristiques particulières liées à l'environnement désertique. Notant que le faible taux de précipitation et de l'absence d'infiltration profonde des eaux, ces sols contiennent des quantités importantes de sels solubles (Halilet ,1998).

Le paysage saharien de la région se compose généralement de sols sableux éoliens peu profonds avec une croûte gypseuse en amont, et de sols sableux éoliens plus profonds avec un encroûtement de nappe gypseuse plus récent en aval. Notant que Sogreah (1971) et Abid (1995) ont indiqué que l'origine des sols dans la vallée de l'Oued Righ est généralement alluvionnaire, colluviale et éolienne. D'autant plus Guyot et Durand (1955), ont montré que les sols de la vallée de l'Oued Righ contiennent des proportions élevées de gypse à cause de à la précipitation du gypse provenant des sels contenus dans la nappe aquifère et les ruissellements.

CHAPITRE 2 :
Cadre géologique

Chapitre 2 :

Cadre géologique

Introduction

La zone d'étude appartient au bassin du désert oriental qui fait partie du bassin du Trias. L'étude géologique a une importance primordiale qui représente la base des études hydrogéologiques. Il s'agit de faire une description détaillée de la roche et formations stratigraphiques permettant d'identifier les ces couches renfermant d'eau souterraine. Dans ce chapitre, nous allons présenter les aspects géologiques généraux de la plateforme désertique.

1. Cadre géologique du Sahara Septentrional

Au sud de de la flexure sud-atlasique qui s'étale d'Agadir au Golfe de Gabès, s'étend le bouclier africain formé de roches éruptives et métamorphiques où se sont déposés plusieurs milliers de mètres de terrains sédimentaires allant du Cambrien au Quaternaire (Cornet, 1964).

Ce domaine est subdivisé en deux (02) sous domaines à savoir le bassin occidental et le bassin oriental. Ces deux sous domaines sont séparés par l'anticlinal du M'Zab. La région d'Oued Righ se trouve dans cet immense bassin sédimentaire oriental occupant dès le secondaire, l'emplacement de l'actuel Sahara septentrional (Gouscov, 1952) (Fig. 3).

Il s'agit d'une couverture sédimentaire s'étendant de l'âge paléozoïque jusqu'au récent. Le bassin oriental est délimité à l'ouest par la dorsale du M'zab et au sud par les plateaux du Tadmait et du Tinrhert, s'étirant vers l'est en Tunisie et en Libye. À sa base se trouvent des sédiments paléozoïques plissés, résultant de l'orogénèse hercynienne, surmontés en discordance par des sédiments variés (marins et continentaux) du Secondaire et du Tertiaire sur une épaisseur d'environ 2000 mètres (Houari, 2012).

Ce bassin se présente comme un vaste synclinal ouvert vers le nord. Dans sa moitié sud, on observe un important axe anticlinal Nord-Sud, abritant plusieurs

gisements pétroliers tels que le haut-fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus visible dans les formations du Mio-Pliocène, avec même une inversion de relief où l'axe actuel du synclinal se superpose à l'ancien haut-fond.

Dans le bassin du Sahara septentrional, une seconde zone haute s'est développée entre le Cénomaniens et le Mio-Pliocène, entre Hassi-Messaoud et la frontière tunisienne. Cette structure orientée Est-Ouest sépare la fosse des chotts au nord du reste du bassin et semble jouer un rôle crucial dans l'hydrogéologie de la région (Fig. 3).

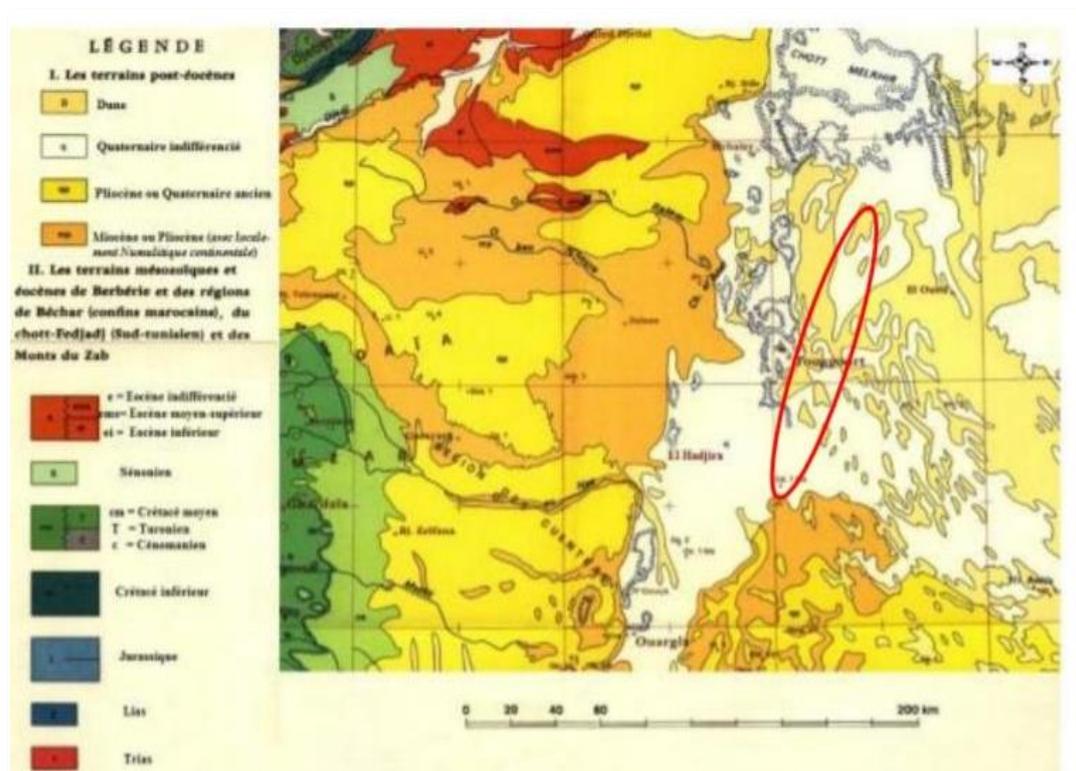


Fig. 3: Carte géologique du bas Sahara (d'après G-Busson G, 1967).

2. Litho-stratigraphie

Nous présentons dans ce bref aperçu lithostratigraphique qui marque les aquifères dans la zone d'étude (Fig. 4).

2.1. Albien

L'Albien est caractérisé par une série très épaisse composée d'une alternance de couches gréseuses et d'argiles schisteuses.

2.2. Vraconien

Le Vraconien est une formation qui marque la transition entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (base du Complexe Terminal). Il se compose d'une alternance de niveaux argileux pélitiques et dolomitiques, ainsi que d'argiles sableuses.

2.3. Cénomaniens

Le Cénomaniens se caractérise par une succession de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites, avec des bancs d'une épaisseur variant de 1 à 5 mètres environ.

Dans la partie sud du bassin, le Cénomaniens est principalement composé d'argiles et de marnes, avec parfois de l'anhydrite voire du sel, tandis que les carbonates sont rares. En revanche, dans la partie nord, les carbonates deviennent plus abondants et alternent avec des évaporites, avec une diminution des argiles. La présence fréquente d'évaporites et d'argiles rend le Cénomaniens imperméable.

2.4. Turonien

Le Turonien est une formation sédimentaire bien identifiable grâce à sa résistance électrique élevée sur les diagraphies. Il se compose principalement d'une épaisse barre de calcaire et de dolomie, qui se distingue nettement des évaporites et des argiles du Cénomaniens en dessous et du Sénonien au-dessus.

Dans le bassin oriental, on observe trois zones caractéristiques du Turonien savoir :

- Dans la zone sud, entre El Goléa et Djamaâ, le Turonien est composé de deux barres distinctes : une barre calcaire-marneuse et une barre calcaire-dolomitique, séparées par un niveau marneux souvent vert.
- Entre El Goléa et Djamaâ, le Turonien est principalement constitué de calcaires et de dolomies, sans la présence des marnes vertes. L'épaisseur utile de la barre turonienne représente généralement 85% ou plus de l'épaisseur totale, qui est d'environ 80 mètres. Au nord de Djamaâ, le Turonien change à nouveau de faciès pour devenir marneux, avec un épaissement significatif. L'épaisseur cumulée des niveaux potentiellement perméables devient alors inférieure à 25%.

2.5. Sénonien

Le Sénonien est composé de deux formations lithologiques superposées : le Sénonien lagunaire à la base et le Sénonien carbonaté au sommet. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argiles et de sel, ce qui le rend très peu perméable. Les variations de faciès sont limitées, avec des bancs d'anhydrites atteignant parfois quelques mètres d'épaisseur, des bancs de dolomies pouvant aller jusqu'à 10 à 15 mètres, et des argiles généralement limitées à 1 à 2 mètres. Des bancs de sel peuvent également être présents à la base du Sénonien dans certaines régions. L'épaisseur du Sénonien lagunaire varie de 0 à 500 mètres, augmentant généralement vers le Nord. Le Sénonien carbonaté est principalement constitué de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec des intercalations de marnes, d'argiles et parfois d'anhydrites.

2.6. Eocène

D'un point de vue lithologique, deux ensembles distincts peuvent être distingués à la base :

- Les principaux constituants de l'Éocène Carbonaté sont les dolomies et les roches calcaires .
- Dolomies avec quelques peumarnes, argiles, et même intercalations d'anhydrite Marnes,de sel ,argile, et même intercalations d'anhydrite et de sel .

L'épaisseur varie de 100 à 500 mètres, son épaisseur maximale se situant dans le bas Sahara.

2.7. Mio-Plio-Quaternaire

La couche continentale tertiaire du Sahara pourrait être relativement épaisse (150 m). Dans le sud du Sahara, on trouve des dunes de sable.

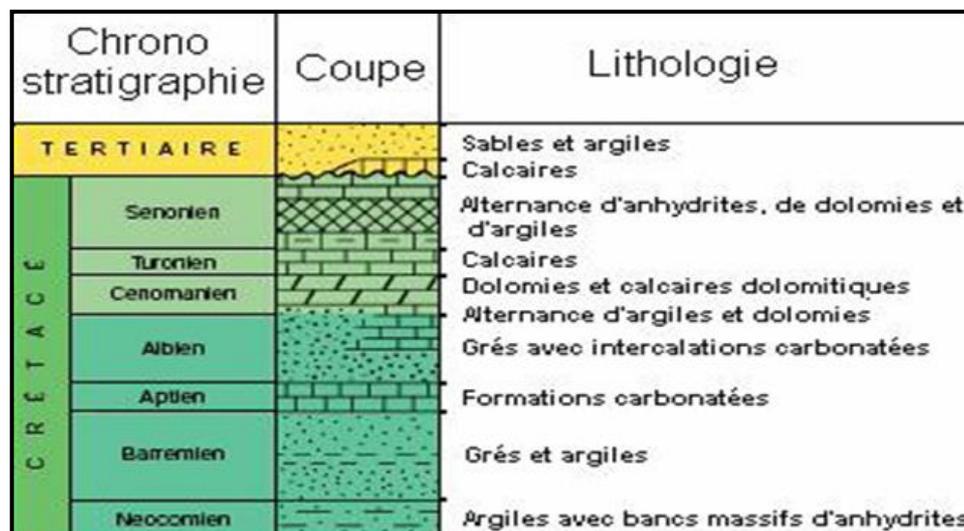


Fig. 4: Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien (Sonatrach et Schlumberger, 1990).

3. TECTONIQUE REGIONALE

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara a été affecté par des mouvements tectoniques hercyniens, tant verticaux qu'horizontaux, suivis de nouveaux mouvements post-triasiques (Bel et Demarge ; 1966).

L'orogénèse atlasique a conduit à l'émergence de déformations à grande échelle, transformant les calcaires du M'Zab en dorsale et ceux de Tadmaït en cuvette. Au Sud, l'axe d'Amguid-El-Biod s'est effondré pour former un axe synclinal méridien prolongé jusqu'à l'Aurès (Bel et Demargne, 1966).

Les formations actuelles du Continentale Intercalaire et du Complexe Terminal du Sahara montrent une géométrie caractérisée par l'absence de déformations tectoniques significatives. Les phases orogéniques au Tertiaire de la chaîne des Maghrébides ont eu des répercussions sur la Plate-forme saharienne, notamment avec les mouvements nets de l'Eocène moyen à supérieur, suivis par la phase du Miocène inférieur qui a donné naissance au Tell et aux Aurès (Karpoff R ; 1952).

La phase Plio-Quaternaire a entraîné l'apparition de fractures orientées Est-Ouest, donnant lieu à la surrection du massif des Aurès et à l'affaissement du Sud, formant le "Sillon Sud Aurésien". Ces fractures influent sur l'écoulement des eaux souterraines et la formation des chotts Merouane et Melghire (Karpoff R , 1952).

La flexure Sud Atlasique sépare deux domaines distincts, avec au Nord les points culminants tels que les Monts des Aurès, et au Sud les points les plus affaissés. Un tableau récapitulatif des événements tectoniques probables dans le Sahara algérien est présenté (Karpoff R., 1952). Le Tableau 1 résume les étapes probables qui ont affecté le Sahara Algérien y compris la zone d'étude.

Tableau 1: Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)

Age	Style
1-Ante cambrien	Plis très aigus, failles.
2-Paléozoïque	Mouvements amples d'axes est-ouest, formations de chaîne orientés N-S, NNE-SSW ou NW-SE sur des axes antécambriens
3-Post Eocène et Ante Miocène	Rejeu des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne
4-Post-Miocène	Premiers plis d'axe NW-SE
5-Post-Pliocène	Mouvements peut être dans la région Nord seule plis en Genoux de l'Aurès d'axe E-W
6-Fini Quaternaire Ancien	Plis affectant le Moi-Pliocène seul ou accompagnés du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux, dont l'axe NW-SE est le principal
7-Neolithique	Mouvements de grande amplitude à plis faibles et localisés.

4. Paléogéographie

Les caractéristiques paléogéographiques du Sahara oriental, du Cénomaniens à la fin de l'Éocène, comprennent une plateforme régulière où de petites fluctuations du niveau de la mer entraînent des changements significatifs dans la sédimentation. Une mer profonde dans le Bas Sahara provoque plusieurs transgressions majeures, notamment au Cénomaniens et au Sénonien supérieur.

À la fin de l'Éocène, la régression de la mer entraîne d'importants bouleversements, avec une érosion affectant les calcaires du Sénonien et de l'Éocène, et un passage d'un régime marin à un régime continental. Au cours de l'ère secondaire, la sédimentation était principalement continentale, avec quelques incursions marines notables.

Le Sahara oriental a pris sa configuration actuelle au cours des époques tertiaires et quaternaires, avec une émergence de plateforme calcaire suivie par des dépôts continentaux durant le Mio-pliocène et le Quaternaire, consécutifs à l'épirogénèse alpine (Bouabdallah, H ET Felkat, O. 2018).

Les caractéristiques paléogéographiques du Sahara Oriental, du mésozoïque à l'actuel, comprennent (Bouabdallah, H ET Felkat, O. 2018)

- Une plateforme très régulière, sur laquelle toute variation du niveau de la mer provoque des changements remarquables dans la sédimentation.
- L'existence d'une mer peu profonde à partir de laquelle se produisent plusieurs transgressions, dont l'une des plus importantes est celle du Cénomaniens.
- La régression définitive de la mer à la fin de l'Éocène, accompagnée de l'érosion d'une partie des calcaires de l'Éocène et du remplacement du régime marin par un régime continental.

Conclusion

Du point de vue géologique, la zone étudiée est caractérisée par deux unités structurales à savoir le socle précambrien, composé de roches éruptives et métamorphiques, surmonté par des milliers de mètres de couches sédimentaires s'étendant du Cambrien jusqu'au Quaternaire.

Chapitre 3

Cadre hydrogéologique

Chapitre 3 :

Cadre hydrogéologique

Introduction

Le Sahara algérien abrite d'importantes ressources en eaux souterraines. Dans les deux aquifères principaux : l'aquifère continental (CI) et le complexe terminal (CT), qui recouvre l'aquifère de surface. Dans ce chapitre, nous allons définir les aquifères de la zone d'étude, Oued Rig, d'un point de vue hydrogéologique.

1. Définition des aquifères

La région d'Oued Righ, située dans l'un des plus grands déserts du monde, possède d'importantes réserves d'eaux souterraines. Ces eaux sont stockées dans des nappes aquifères présentes à différentes profondeurs et épaisseurs dans les horizons géologiques de la région. D'une manière générale, deux des principaux réservoirs d'eau souterraine du Sahara sont les suivants (in Halassa, 2015) (Fig. 5):

- Le Continental Intercalaire (CI) : Il s'agit d'un épisode continental situé entre deux cycles sédimentaires marins. À sa base se trouve le cycle du Paléozoïque, marquant la fin de l'orogénèse hercynienne, tandis qu'au sommet se trouve le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomaniennne.
- Le Complexe Terminal (CT) : Cet ensemble est assez hétérogène et comprend des formations carbonatées du Crétacé supérieur ainsi que des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène.

Ces deux systèmes aquifères renferment plusieurs nappes d'eaux superposées les unes sur les autres, contribuant ainsi à la disponibilité des ressources en eau souterraine dans la région d'Oued Righ. En plus, dans la région de Oued righ, la nappe phréatique est aussi rencontrée.

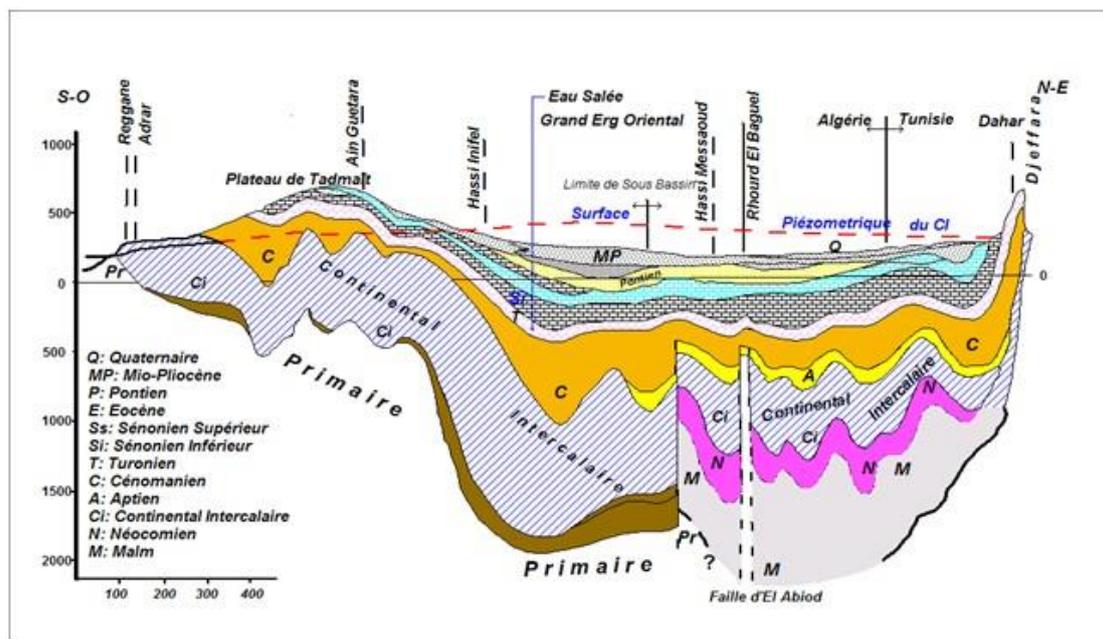


Fig. 5 : Coupe hydrogéologique synthétique de saharas septentrionale (UNESCO 1972).

1.1 . Nappe phréatique

a) Géologie de la nappe

C'est une nappe libre dont la profondeur moyenne varie entre (0 et 50 m). La lithologie dominante est constituée de sables ou sables argileux avec gypse. Ses eaux sont généralement chargées en sels dissous, surtout dans les zones mal drainées. Le résidu sec atteint dans certains endroits les 13 g/l.

L'alimentation de cette nappe provient essentiellement de l'excédent d'eau d'irrigation et un très faible pourcentage des précipitations. Elle est rarement exploitée dans l'Oued Righ, sauf dans les zones hors vallée tels que Barkadjia (El-Meghaier) et Taïbet et ce, pour l'irrigation des petits périmètres éloignés de la palmeraie.

a) Piézométrie de la nappe superficielle

La mesure du niveau des eaux de surface dans le complexe de la station indique un écoulement général du sud vers le nord, suivant les extrêmes, avec des zones de convergence indiquant la libéralisation et l'utilisation des palmeraies et des villages où des données plus récentes ne sont pas disponibles. Basant sur la carte piézométrique établie par Belksier (2017), il a été constaté l'écoulement des eaux sud-ouest – Nord est, ainsi qu'un sens localement Nord vers le centre (Fig. 6).

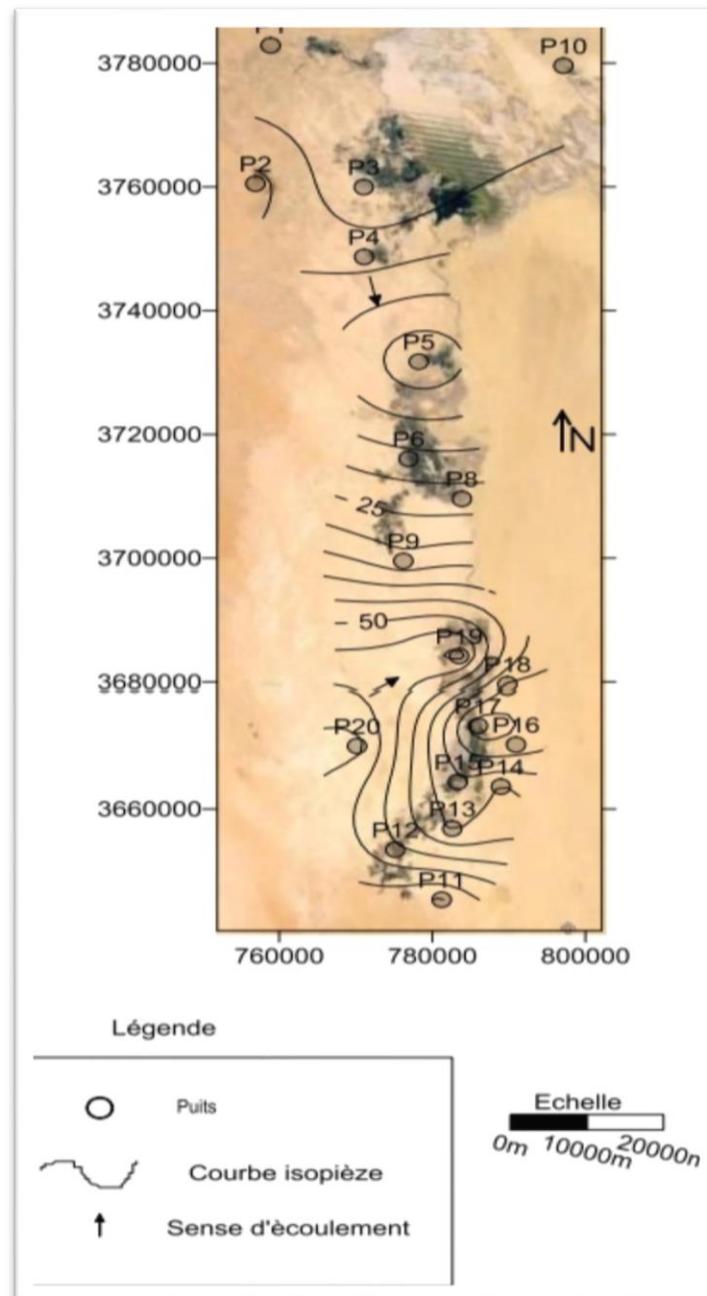


Fig. 6: Carte piézométrique de la nappe superficielle (Octobre 2015) (Belksir, 2017).

1.2. Complexe Terminal (C.T)

a) Géologie de la nappe

Cette nappe est composée de haut en bas respectivement de trois couches aquifères à savoir (Fig. 7):

- CT1 représenté par sables et gravier très exploité en amont de la vallée d'âge pliocène supérieur.
- CT 2 : Ce sont sables hétérogènes d'âge miocène inférieur très exploité dans toute la vallée.
- Le CT 3 : représenté par des calcaires parfois très fissurés d'âge éocène inférieur peu exploité.

Le débit moyen dans le CT varie entre de 25 l/s à 45 l/s en moyenne.. Les résultats déduits ont montrés que cette nappe est très exploitée et parfois même surexploitée dans certains endroits de la zone d'étude Destinée généralement à l'irrigation, cette nappe est captée d'une profondeur variant entre 65 m à 300 m pour le Mio-pliocène et peut atteindre jusqu'à 416 m pour l'éocène (ANRH ,ouargla).

b) alimentation de la nappe

Le concept de recharge et ses conditions s'appliquent à tous les aquifères du Sahara Septentrional (SASS), ce qui inclut le Complexe Terminal (CT). Certains chercheurs suggèrent que les eaux des nappes du Sahara sont anciennes, accumulées au fil des temps géologiques et alimentées par les précipitations du Quaternaire, tandis que d'autres pensent qu'il existe une recharge actuelle des nappes sahariennes. Cette recharge est favorisée par des conditions climatiques, topographiques et géologiques spécifiques, comme des précipitations abondantes et un relief permettant le ruissellement dans les oueds. En outre, l'affleurement de formations perméables est nécessaire pour que cette recharge se produise (Dubief, 1953)

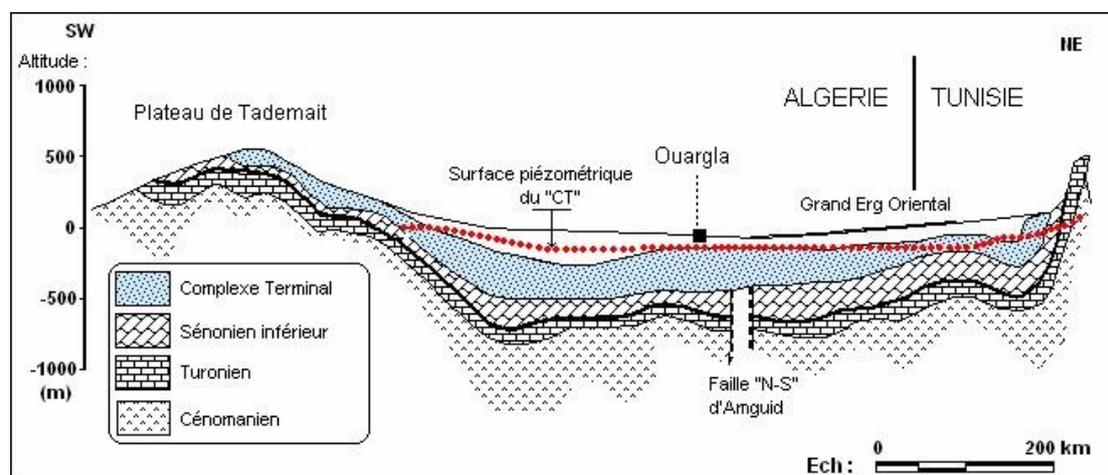


Fig. 7: coupe hydrogéologique transversale du CT (UNESCO 1972).

c) Piézométrie

En l'absence de données récentes sur la pression piézométrique du complexe terminal, nous nous référons à la carte piézométrique de Bleksier (2017). Cette carte, qui date de l'année 2013, montre que la direction principale de l'écoulement dans la zone de l'Oued Righ est dirigée vers le Shott Marouane (un exutoire naturel) (Fig. 8). Dans la région d'Umm Dhuyur au nord, la direction du flux est également dirigée vers la direction NW-SE. Du côté sud, au niveau des localités de Sidi Amrane, Al-Jamaa, Tandala, Sidi Khalil et Al-Mughair, le sens d'écoulement est la direction du sud et du nord.

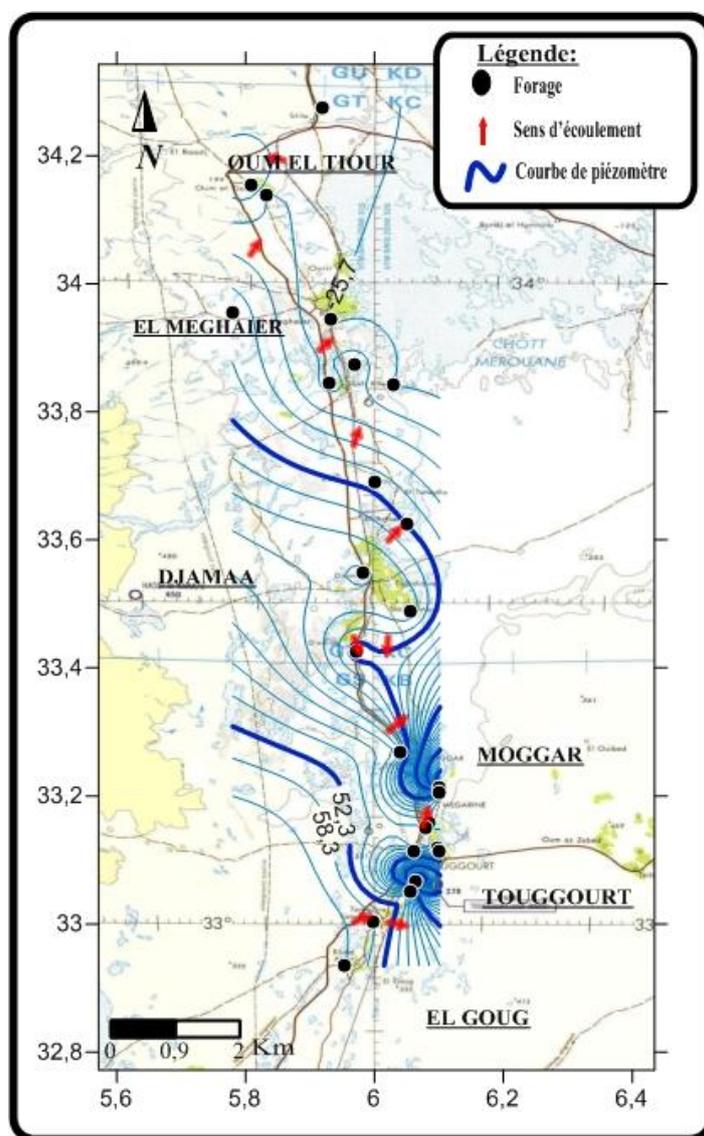


Fig. 8: Carte piézométrique du Complexe Terminal de l'Oued Righ en 2013 (Belksier, 2017).

1.3. Le Continentale Intercalaire

La nature lithologique de cette nappe est du grès hétérogène. Elle est captée à une profondeur de 1760 m au Sud et 2200 m au Nord de la vallée. La qualité chimique de l'eau est légèrement meilleur par rapport à celle du CT. Le résidu sec varie entre (1.6 g/l et 1.9 g/l) pour cette raison son usage est destinée principalement pour l'AEP. L'âge de cette nappe est d'albo-barrémien (ANRH , ouargla).

a) Alimentation et exutoires

La nappe s'est chargée au fil des périodes pluviales du Quaternaire. Actuellement, elle reçoit une recharge limitée, principalement à partir du piémont de l'Atlas Saharien. La quantité d'eau annuellement reçue sur les affleurements du Crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards de mètres cubes par an.

Le volume d'eau stocké dans le Crétacé inférieur est estimé à 3,5 fois 10 à la puissance 10 milliards de m³ Bouznad (2009)

Les exutoires du CI comprennent les foggaras et les puits artésiens, principalement présents dans le bassin oriental. Les sebkhas sont aussi de vastes étendues humides et salines, qui agissent comme des surfaces évaporantes et contribuent significativement au débit total (belksier, 2017) .

b) Piézométrie de la nappe continentale intercalaire

La carte piézométrique de la nappe Continentale Intercalaire établie par Belksier (2017) révèle un sens d'écoulement SE vers le Nord. Dans la région de l'Oued Righ, la carte piézométrique montre trois cônes de dépression autour de Touggourt, Sidi Slimane et Djamaa, indiquant les zones de surexploitation. Ces zones se concentrent principalement dans les grandes palmeraies et les agglomérations urbaines importantes (Fig. 9).

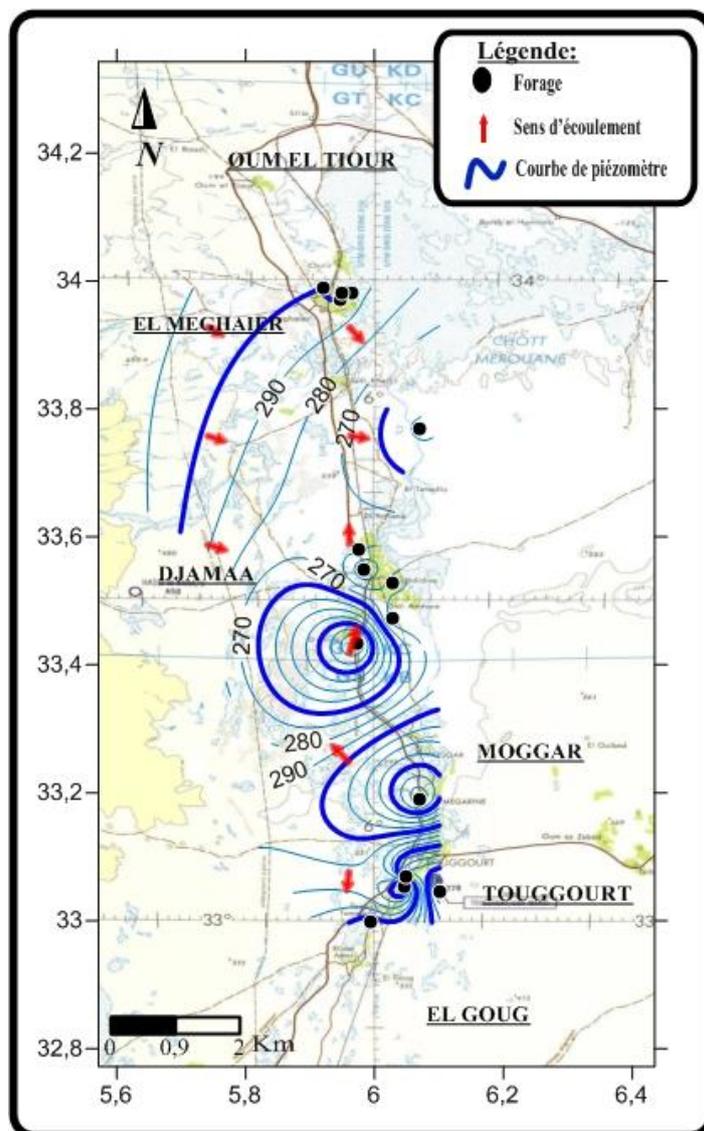


Fig. 9 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire de l'Oued Righ en 2013 (Belksier 2017).

Conclusion

Dans le bassin de l'Oued Righ, comme tout le Sahara septentrional, on trouve deux principaux systèmes aquifères : le Continental Intercalaire (CI), principalement composé de sables et de grès datant, généralement de l'Albien, et le Complexe Terminal (CT). Le CT se compose de deux ensembles distincts : le premier est constitué de formations calcaires datant du Sénonien à l'Éocène (CT3), tandis que le deuxième comprend des sables, des graviers et des grès datant du Mio-Pliocène, comprenant la 1ère nappe (CT1) et la 2ème nappe des sables du Complexe Terminal (CT2). Au-dessus

de ces deux ensembles se trouve un aquifère superficiel constitué de sables fins à moyens datant du Quaternaire à récent.

Chapitre 4

Cadre climatique

Chapitre 4:

Cadre climatique

Introduction

Comme tout le Sahara algérien, le climat de la région de l'Oued Righ est un climat désertique sect. aride, caractérisé par une faible pluviométrie et une forte évaporation. Ce chapitre se concentre également sur les facteurs climatiques les plus importants de la zone. Les données de 9 ans (2008-2017) notamment la température, les précipitations, l'humidité de l'air, l'insolation et la vitesse maximale du vent, ont été utilisées.

1. Station de mesure

La zone d'étude d'Oued Righ est située dans la partie septentrionale du Sahara, avec des coordonnées géographiques de latitude $33^{\circ}11'$ et longitude $06^{\circ}13'$, et une altitude de 85m. La carte ci-dessous montre les différents sous-bassins versants du Sahara algérien, et la zone étudiée appartient au sous-bassin versant N° 04 avec les stations de mesures climatiques correspondantes (Fig. 10).

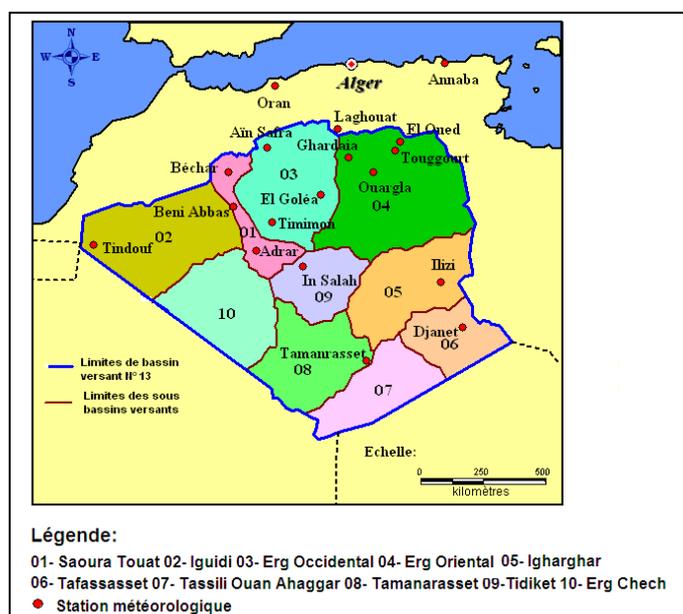


Fig. 10: Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse

A cause la proximité de la station de Touggourt, nous avons utilisés les données disponibles auprès de cette station pour élaborer ce chapitre. Il s'agit d'une compilation de neuf ans (2008-2017) pour la température, les précipitations, l'humidité de l'air, l'insolation et la vitesse maximale du vent.

2. Facteurs climatiques

2.1. Température

La température est un élément clé et essentiel du climat. Les températures élevées favorisent l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une augmentation de la salinité. Elle affecte les processus hydrologiques et environnementaux dans la région d'Oued Righ.

Le tableau (2) et le et le figure (Fig. 11) montrent que la valeur moyenne annuelle la plus élevée soit de 23,6°C observée en 2016, et le niveau le plus bas avec une moyenne de 22,07 °C a été observé en 2015

Tableau 2 : Températures moyennes annuel (°C) pour la station de Touggourt, période (2008–2017).

Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
T moyen annuel	22,6	22,12	22,92	22,19	22,73	22,69	23,28	22,07	23,3	22,36

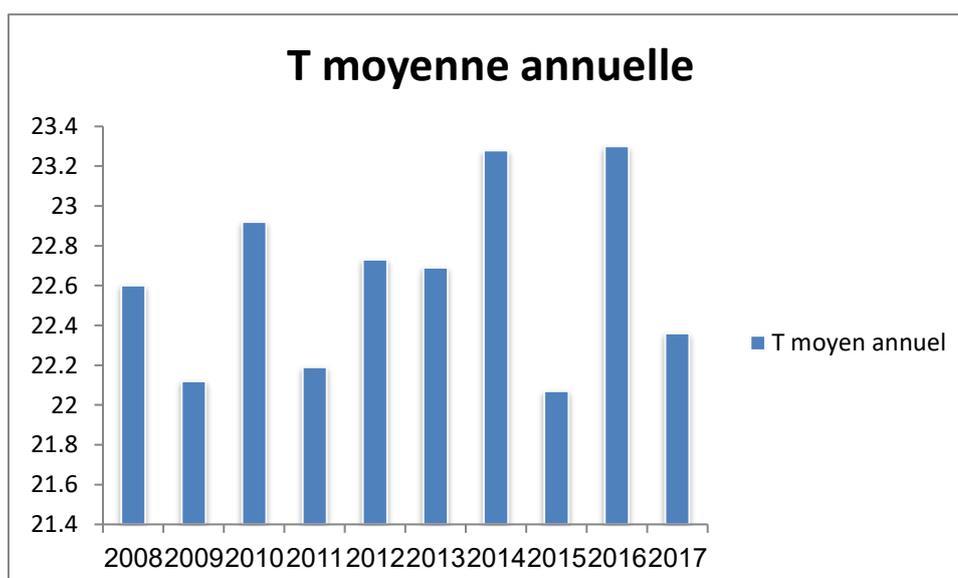


Fig. 11 : Courbe de distribution de la température moyenne annuel – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).

Le tableau (3) et la figure (fig.12) représentent l'évolution mensuelle moyenne de la température sur une période de 9 ans (2008_2017). Les températures maximales ont été enregistrées au cours des mois suivants (Juin - Juillet - Août), qui variaient entre 31,13°C et 33,77 °C. Cependant les plus basses de la saison hivernale pendant deux mois (Décembre - janvier) avec des températures variant de 11,98 °C et 11,69 °C.

Tableau 3 : Températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Touggourt, période (2008 – 2017).

MOIS	Sep	oct	nov	déc	Jan	Fév	mars	avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
T en °C	29,47	23,63	16,65	11,98	11,66	13,13	17,09	21,98	26,46	31,13	34,6	33,77

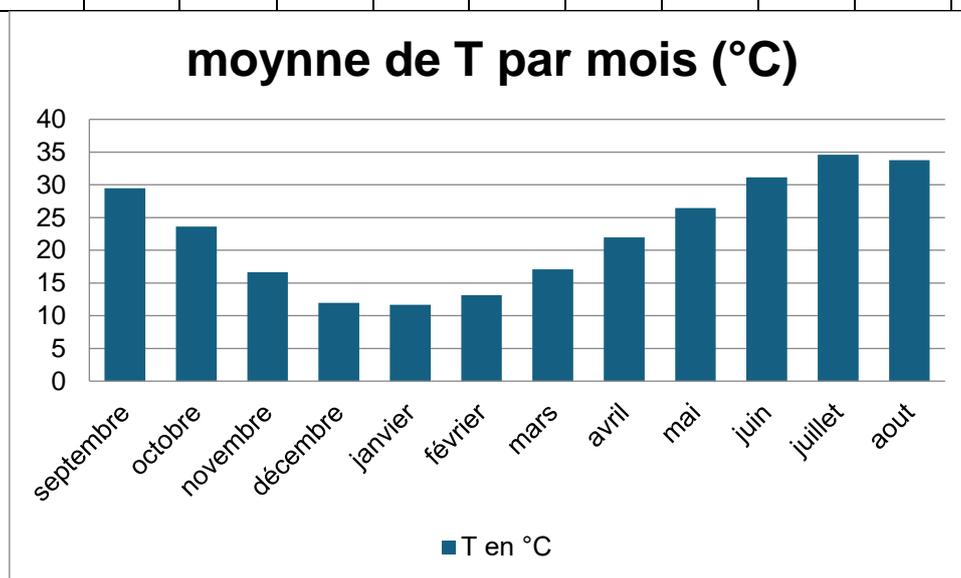


Fig. 12: Histogramme de distribution de la température moyenne mensuelle – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).

2.2. Précipitations

Les précipitations somme moyennes annuelles et mensuelles ont été calculées, et les résultats sont enregistrés dans les figures (fig.13) et (fig.14) sur une période de 9 ans (2008_2017).

La figure (Fig.13) représentant les somme moyennes annuelles des accumulations de précipitations, où il a été enregistré que l'année la plus humide a été 2011, estimée à 50,94 mm, et l'année la plus sèche a été 2012, estimée à 43,02 mm.

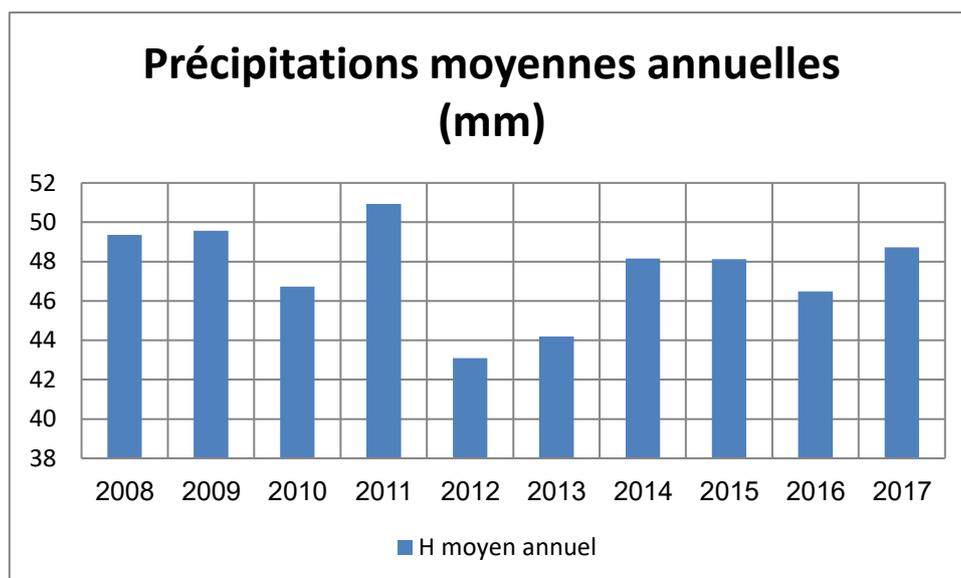


Fig.13 : courbe de distribution de la précipitation somme moyenne annuelle – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).

Les précipitations mensuelles moyennes montrent que la pluviométrie maximale moyenne a été enregistrée en mois janvier avec (11,49 mm) et le minimum en Juillet était de (0,054 mm).

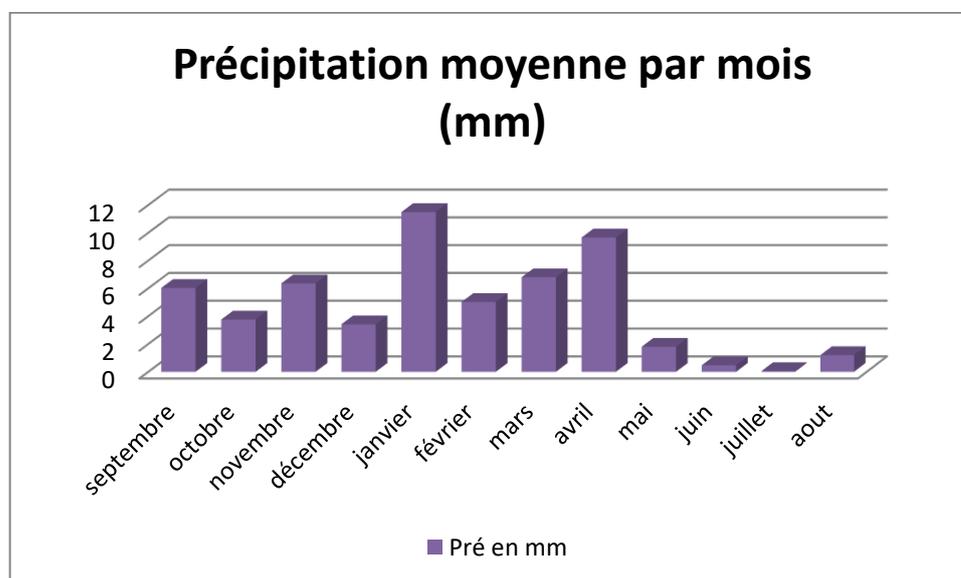


Fig.14: Histogramme de distribution de la précipitation (Pré) moyenne mensuelle _station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).

2.3. Le vent

La région d'Oued Righ est soumise à l'influence de trois types de vents différents. Le vent prédominant vient des directions Est et Nord-Est, souvent appelé EL-BAHRI. Un autre type de vent moins fréquent est le Sirocco, qui souffle des directions Ouest et Sud-Ouest, localement connu sous le nom de CHAHILI (SIRROCO). Ce vent peut durer jusqu'à trois jours et atteindre des vitesses de 40 à 50 km/h, provoquant une diminution de la visibilité en raison de l'entraînement de grains de sable dans l'air, connu localement comme le "vent du sable". Ces vents se produisent généralement pendant la saison du printemps, de février à mars, qui coïncide avec la période de pollinisation des palmiers. Tableau 4 (Fig.15).

En résumé, la région d'Oued Righ est affectée par ces trois types de vents différents, chacun ayant ses propres caractéristiques et impacts sur l'environnement local.

Tableau 4: Vitesses de vent moyennes mensuelles (m/s) pour la station de Touggourt, période (2008 – 2017).

MOIS	sep	oct	nov	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	Juin	Juillet	aout
vent m/s	9,26	7,99	8,13	7,26	8,39	9,39	9,98	10,71	10,48	9,73	9,29	9,11

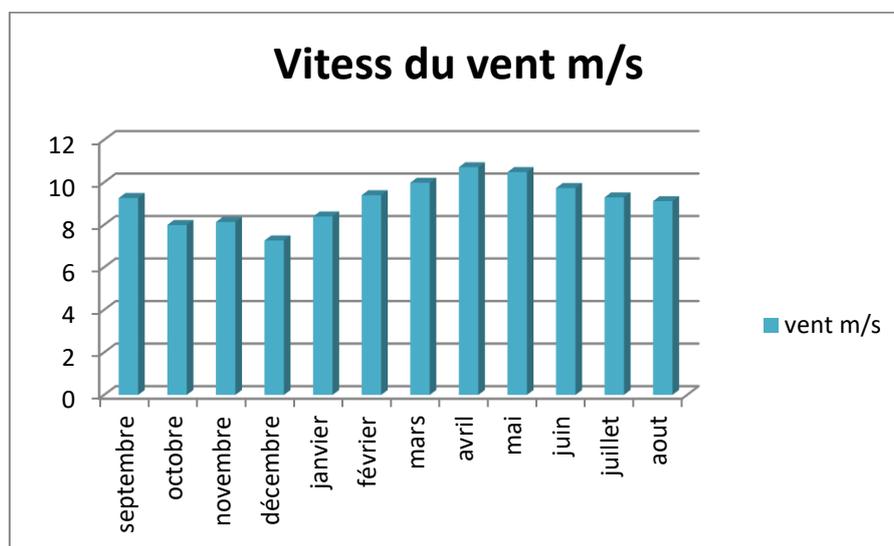


Fig. 15: Histogramme de distribution de la vitesse du vent moyenne mensuelle de la station Touggourt, période (2008 – 2017).

2.4. Evapotranspiration

L'histogramme illustré à la figure (Fig.16) montre que le mois de juillet est caractérisé par la vitesse du vent la plus élevée de 347,7 mm et la vitesse la plus basse enregistrée en décembre, qui était estimée à 90,48 mm.

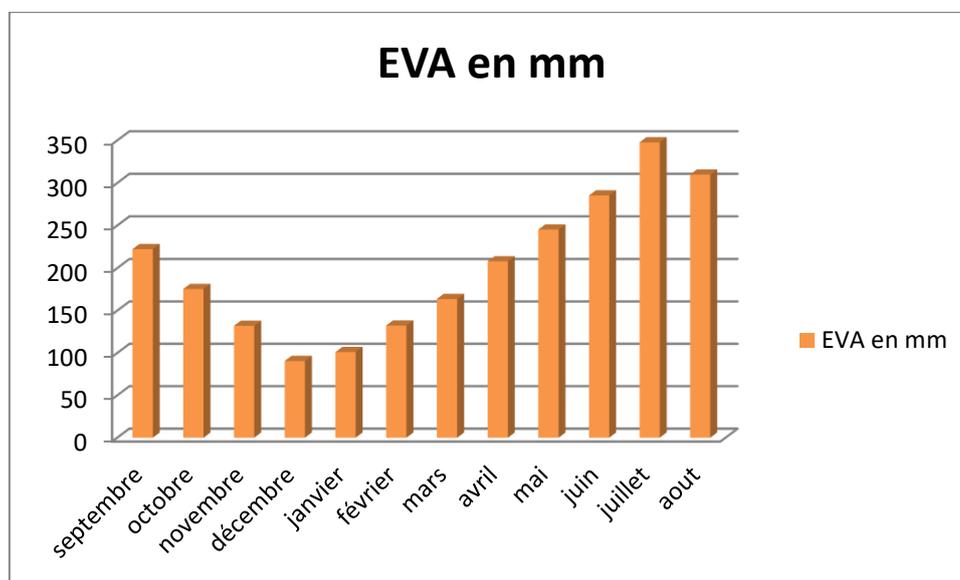


Fig. 16: Histogramme de la distribution des Evaporations moyennes mensuelles de la station de Touggourt, période (2008 – 2017).

2. 5. Coefficient pluviométrique

Le coefficient pluviométrique est le rapport entre la pluviométrie (P) d'une année donnée et la pluviométrie moyenne (P) sur une série de (n) années. Une année est considérée comme excédentaire ou déficitaire en fonction de ce coefficient :

H (tableau 07) Avec: $H = p/p$

- Si $H > 1$. L'année est considérée comme excédentaire (E).

- Si $H < 1$. L'année est considérée comme déficitaire (D)

Les résultats du calcul sont montrés au Tableau (tab.5). Il montre que les années 2009/2015/2017 sont des années excédentaires. Tandis que les années 2008 /2010/2011/2012/2013/2014/2016 sont des années déficitaires.

Tableau 05 : Coefficient pluviométrique – données de la station de Touggourt période (2008/2017).

Année	Coefficient pluviométrique	Caractéristique
2008	0.9961	D
2009	2.7832	E
2010	0.4966	D
2011	0.3806	D
2012	0.3252	D
2013	0.9949	D
2014	0.4411	D
2015	1.1839	E
2016	0.6698	D
2017	1.7281	E

2. 6. Durée d'insolation

L'histogramme représente la durée d'insolation (Fig. 17) , avec la valeur maximale enregistrée en juillet (363,64 heures) et la valeur la plus basse a été enregistrée en mois de décembre (238,58 heures).

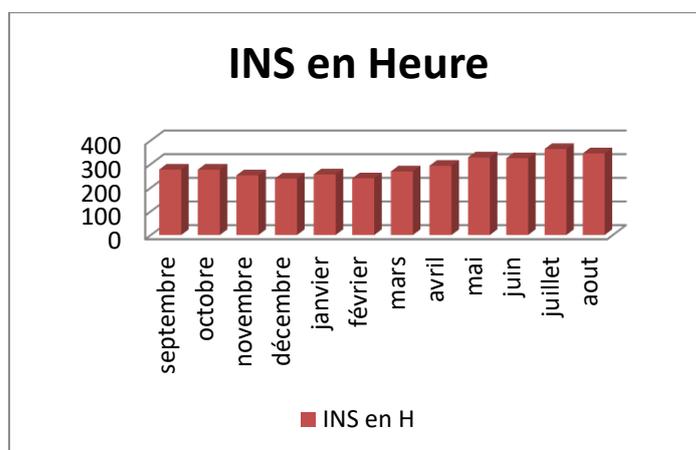


Fig. 17: Histogramme de la Durée d'insolation (INS) da la station de Touggourt, période (2008_2017).

2.7. L'humidité de l'air (Le degré hygrométrique de l'air ou humidité relative) :

Dans la zone d'étude et plus généralement dans la région de Touggourt, l'humidité atmosphérique est faible tout au long de l'année. La figure (fig.18) montre que la valeur maximale était au mois de décembre à un taux de 65,385, et la valeur la plus basse était au mois de juillet à un taux de 33,056.

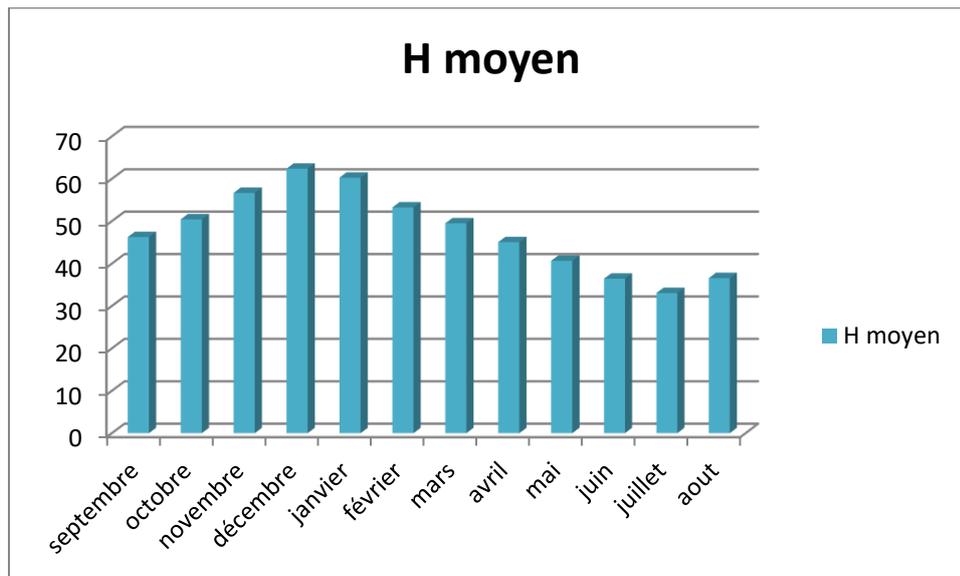


Fig.18: Histogramme de l'humidité de l'air de la station de Touggourt, période (2008 –2017).

2.8. L'évaporation

L'histogramme montre un taux d'évaporation très élevé au mois de Juillet (347,69 mm), tandis que le mois de décembre présente le plus faible taux d'évaporation (90,48 mm). Une évolution inversement proportionnelle à celle de l'humidité, a été constaté (Fig. 19).

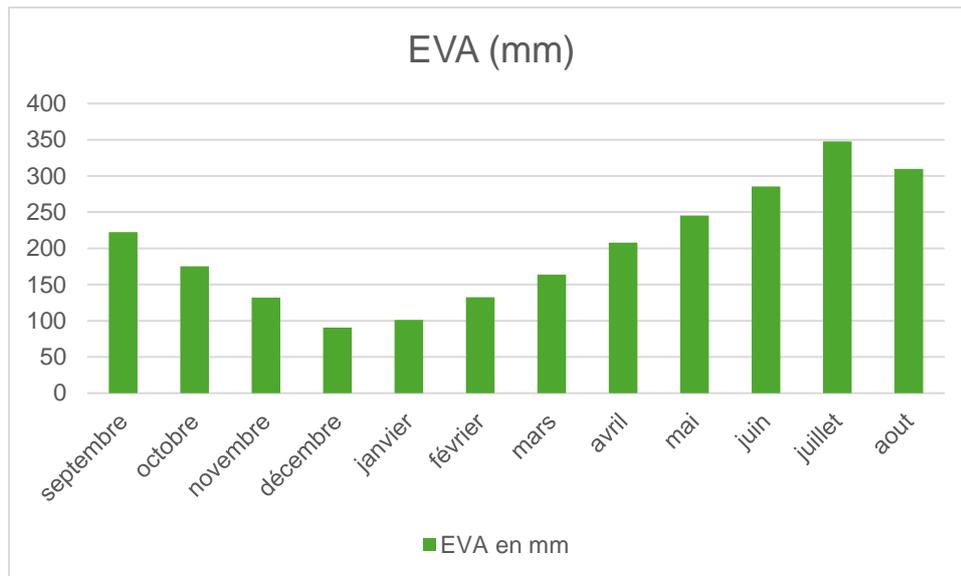


Fig. 19: Histogramme de l'évaporation (EVA) de la station de Touggourt, période (2008 –2017)

3. Rapport précipitation-température

3.1. Courbe pluviothermique (Gausсен et Bagnouls)

Le diagramme combiné des températures (°C) et des précipitations (mm) sur une même échelle double montre clairement que notre zone d'étude est caractérisée par un climat sec. En effet, la courbe des précipitations est généralement basse et irrégulière, ce qui indique une faible quantité de pluie. Parallèlement, les températures sont assez élevées, ce qui renforce l'aspect sec du climat. Ainsi, la période sèche semble prédominer dans cette région (Fig.20).

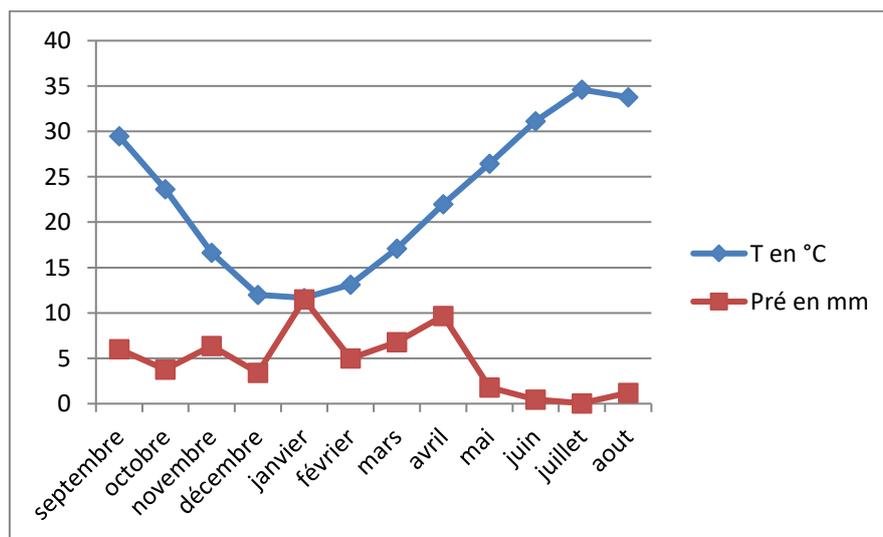


Fig. 20 : Courbe pluviothermique – station de Touggourt durant la période (2008 – 2017).

Conclusion

L'étude est menée dans ce chapitre sur l'aspect climatique de la région de l'Oued Righ car elle se caractérise par son climat chaud et sec, comme c'est le cas dans les zones désertiques.

La température globale moyenne maximale est de 17,09 °C en 2014 et la température minimale 2009.

Les précipitations somme moyennes annuelles est estimée que l'année la plus humide a été 2011, estimée à 50,94 mm, et l'année la plus sèche a été 2012, estimée à 43,02 mm.

Chapitre 5 :

Hydrochimie et statistique

Chapitre 5 :

Hydrochimie et statistiques

Introduction

Dans ce chapitre, les caractéristiques chimiques de l'eau ont été étudiées et déterminées par des facteurs physiques et chimiques pour chacun des aquifères souterrains de la zone d'étude pour le continental intercalaire (CI) et complexe terminal (CT). Ce chapitre vise à suivre quantitativement les paramètres physiques et chimiques, les propriétés chimiques en utilisant l'approche statistique qui vise à étudier la principale caractéristique de l'eau et déterminer sa nature.

Nous avons pris en considération les paramètres suivants :

- Le pH
- La conductivité électrique (CE)
- Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)
- Les anions (Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-)

1. Continental intercalaire

1.1 Les paramètres physiques (Ce, pH)

1.1.1. Le pH

Il s'agit d'une valeur permettant de mesurer la concentration d'ions hydrogène dans l'eau, où une valeur de 7 est considérée comme une valeur neutre. La plus grande valeur de pH a été enregistrée entre 7,78 et 8,20, avec moyenne de 8 ± 0.336 (Fig. 21 a-b).

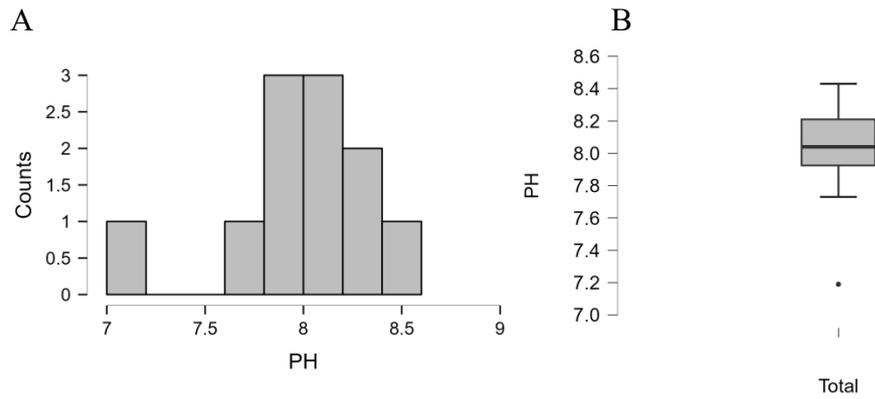


Fig. 21 : Histogramme (A) et variation (B) de pH de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le pH (Fig. 22) représente un point d'inflexion à la valeur (7.8). La première classe d'échantillons avec un pH inférieur à 8 représente 17,18%, et la deuxième catégorie avec un pH dépassant 8 représentent à 72,72%. , qui dépasse (7.8). Ceci indique que les eaux étudiées sont généralement neutres à alcalines.

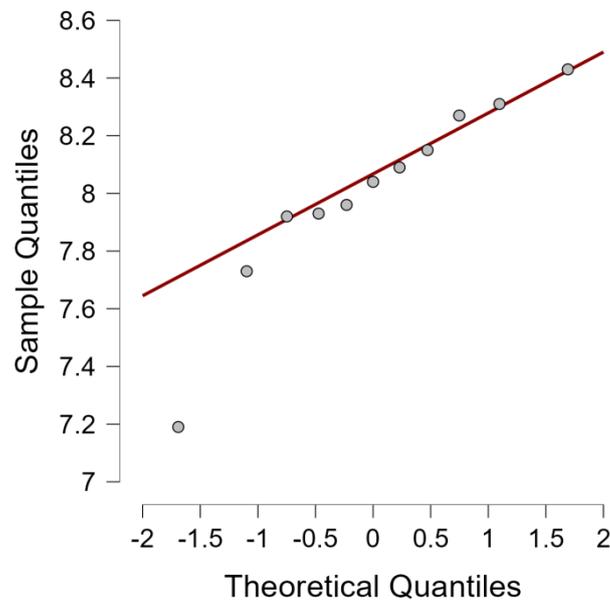


Fig.22: graphe de probabilités de pH de la continentale intercalaire.

1.1.2 Conductivité électrique (Ce)

La conductivité électrique (Ce) de continentale intercalaire enregistrée la plus grande valeur de ce entre (2.5 à 3 ms/cm), avec moyenne de 3.481 ms/cm \pm 1.217 ms/cm (Fig.23 a-b).

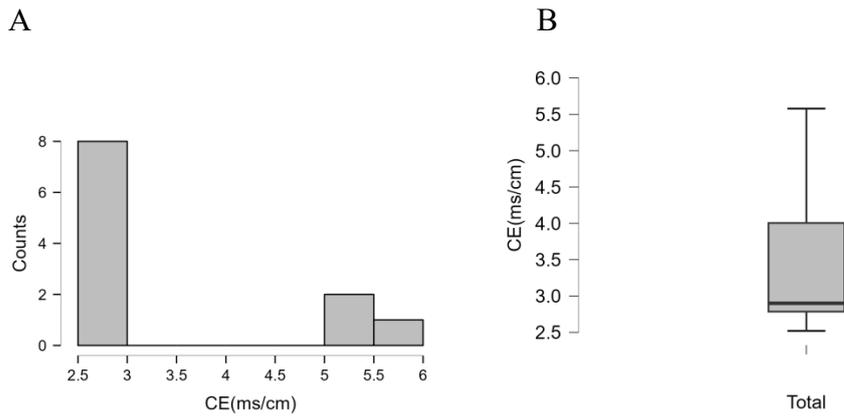


Fig. 23: Histogramme (A) et variation (B) de conductivité électrique (C_e) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le paramètre c_e (Fig. 24) montre un point d'inflexion au niveau de la la valeur (4 ms/cm). La première classe d'échantillons avec des valeurs de C_e inférieures à 4 ms/cm représente 72.72%, et la deuxième classe est C_e dépassant ce seuil de 4ms/cm, estimée à 17.18%.

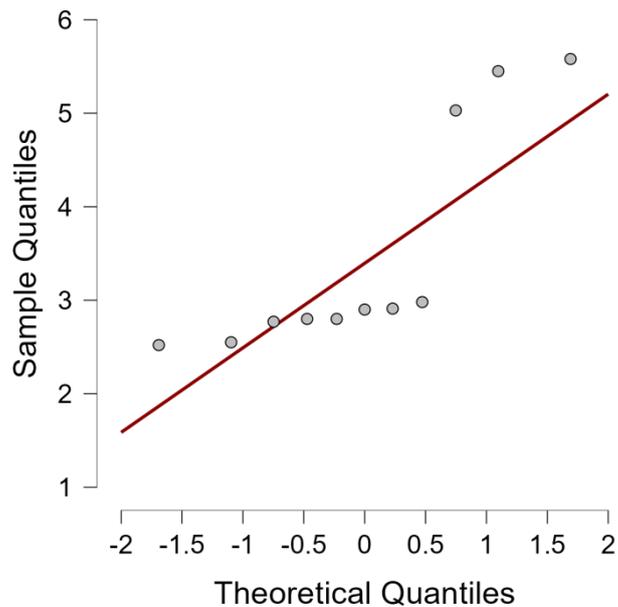


Fig.24 : graphe de probabilités de la conductivité électrique (C_e) de la continentale intercalaire.

1.1 Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)

1.2.1 Le Calcium (Ca^{++})

La plus grande valeur de Ca^{++} a été enregistrée entre (160 à 180 mg/l), avec un moyenne de $183.764 \text{ mg/l} \pm 30.306 \text{ mg/l}$ (Fig. 25 a-b).

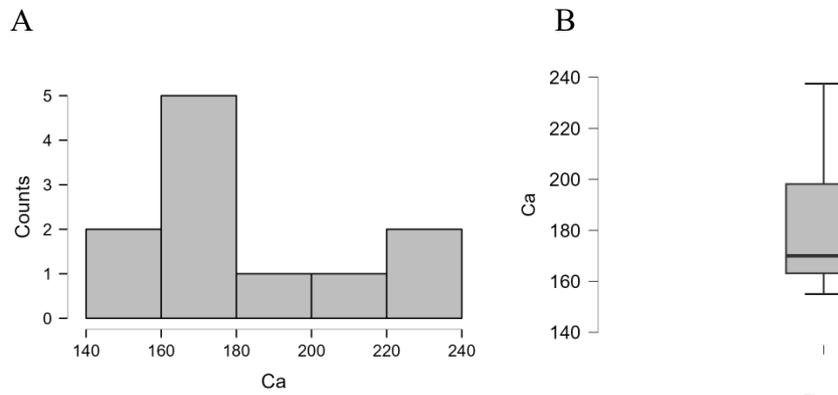


Fig.25 : Histogramme (A) variation (B) de le calcium (Ca) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité du Ca^{++} (Fig. 26) montre un point d'inflexion à la valeur (200 mg/l). La première population d'échantillons avec un Ca^{++} inférieur à 200 mg/l représente 72.72%, et la deuxième population est plus grande, estimée à 17.18%, qui dépasse (200 mg/l). Ce graphe montre l'hétérogénéité des concentrations de Ca de l'aquifère CI.

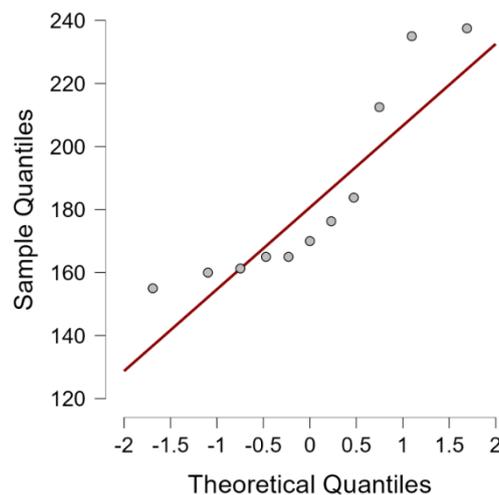


Fig. 26 : Graphe de probabilités de le calcium (Ca) de la continentale intercalaire.

1.2.2 Le Magnésium (Mg^{++})

La plus grande valeur de Mg^{++} a été enregistrée entre (100 à 150) mg/l, avec moyenne de $158.600 \text{ mg/l} \pm 49.154 \text{ mg/l}$ (Fig. 27).

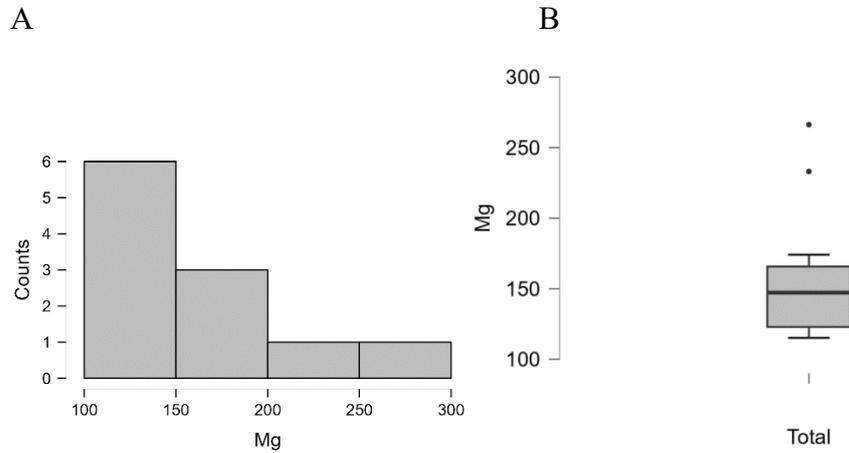


Fig. 27 : Histogramme (a) et variation (b) du magnésium (Mg) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le Mg^{++} (Fig. 28) montre un point d'inflexion à la valeur (175 mg/l). Au niveau de ce point, la première population d'échantillons avec des teneurs Mg^{++} inférieures à 160mg/l représente 81.81%, et la deuxième population de Mg^{++} représentent à 18.19% avec des teneurs qui dépassent (175 mg/l).

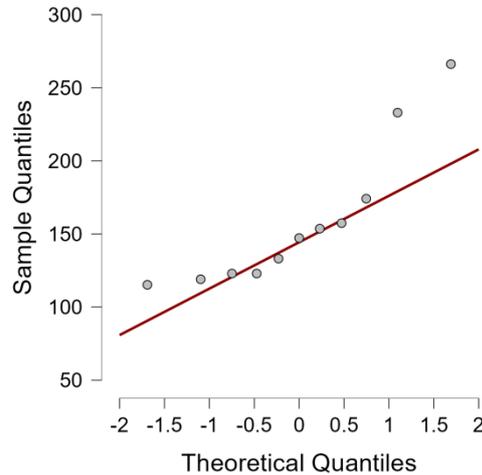
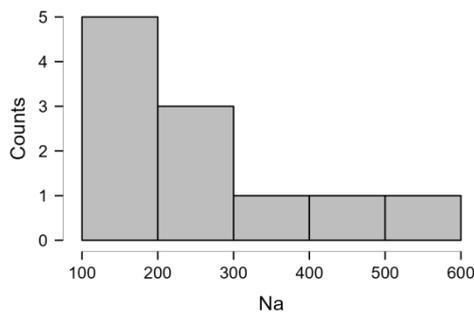


Fig. 28 : Graphe de probabilités de le magnésium (Mg) de la continentale intercalaire.

1.2.3 Sodium (Na^+)

L'histogramme montre que plus grande valeur de Na^+ a été enregistrée entre (100 à 200) mg/l, avec un moyenne de $259.318 \text{ mg/l} \pm 136.876 \text{ mg/l}$ (Fig. 29 a-b).

A



B

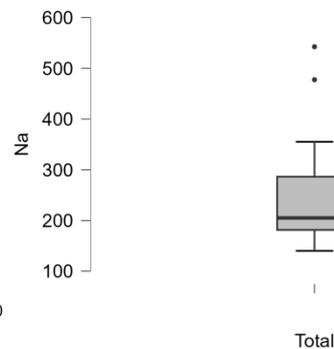


Fig. 29 : Histogramme (a) de la variation (B) de Sodium (Na) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le Na^+ (Fig. 30) montre un point d'inflexion à la valeur (190 mg/l). La première classe d'échantillons avec un Na^+ inférieur à 190 mg/l représente 81.81%, et la deuxième classe est Na^+ représentent à 18.19%. , qui dépasse (190 mg/l).

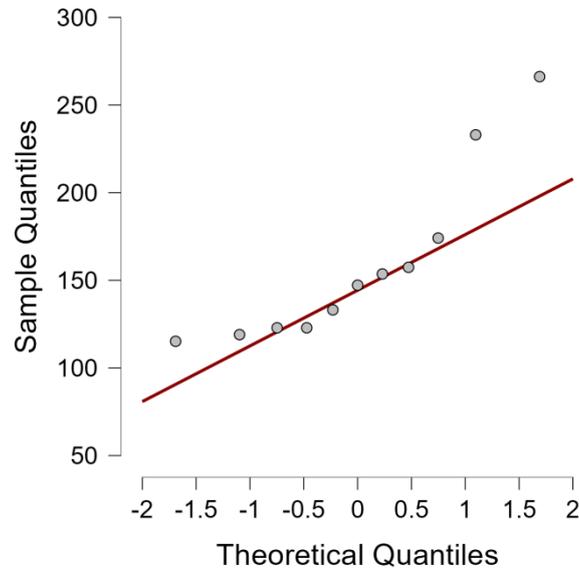


Fig. 30 : graphe de probabilités de Sodium (Na) de la continentale intercalaire.

1.2.4 Potassium (K^+)

A partir l'histogramme, nous constatons que la valeur la plus élevée de K^+ a été observée entre 30 à 35 mg/l , avec un moyenne $28.909 \text{ mg/l} \pm 8.099 \text{ mg/l}$ (Fig. 31).

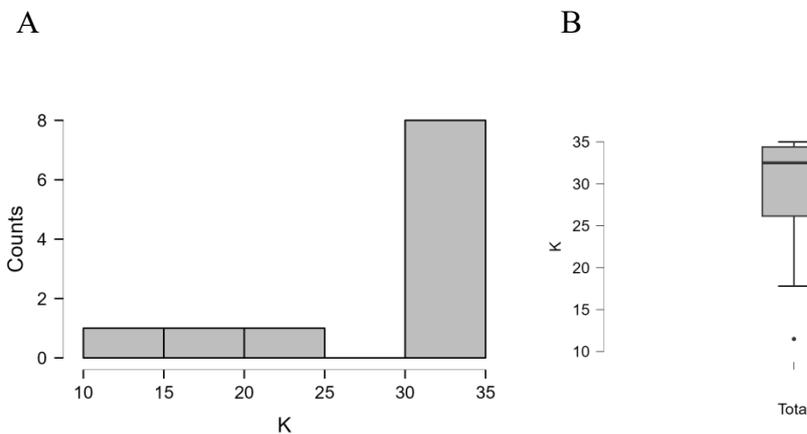


Fig. 31 : Histogramme (a) et variation (b) de Potassium (K) de la nappe du continentale intercalaire

Le graphe de probabilité pour le paramètre K^+ (Fig. 32) montre un point d'inflexion à la valeur (25 mg/l). La première classe d'échantillons avec un K^+ inférieur à 22 mg/l représente 17,18%, tandis que la deuxième classe de K^+ représentent à 72,72%. , qui dépasse le K^+ (2 5mg/).

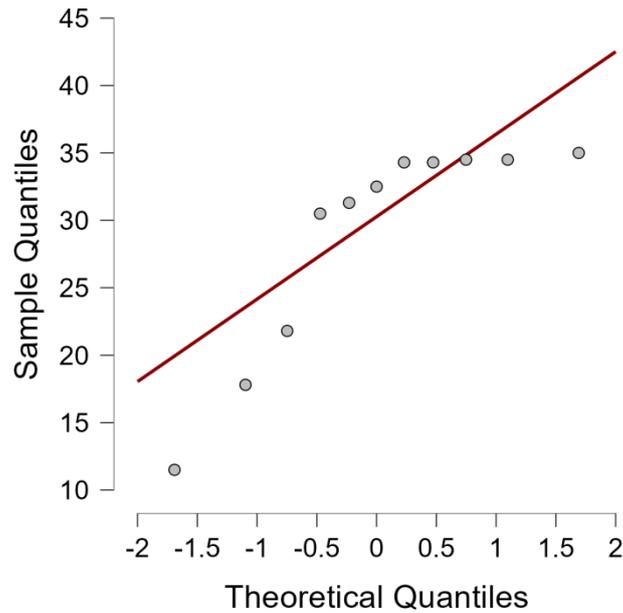


Fig.32 : Graphe de probabilités de Potassium (K) de la continentale intercalaire.

1.3 .Les Anions (Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-)

1.3.1 Les chlorures (Cl^-)

La plus grande valeur de Cl^- a été enregistrée entre (300_400) mg/l, avec un moyenne $463.682 \text{ mg/l} \pm 187.254 \text{ mg/l}$ (Fig. 33 a-b).

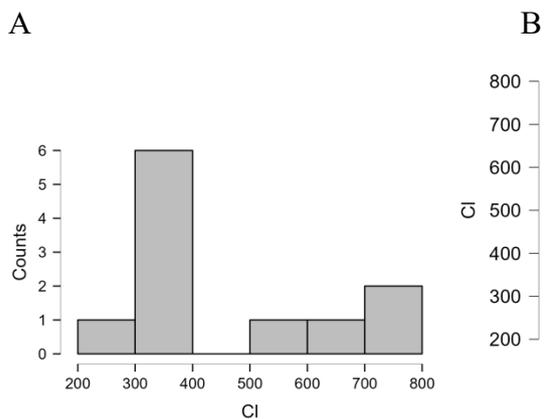


Fig.33 : Histogramme (a) et variation (b) de chlorure (Cl) de la nappe du continentale intercalaire .

Le graphe de probabilité du Cl^- (Fig. 34) montre un point d'inflexion au niveau de la valeur (600 mg/l). La première population d'échantillons avec des teneurs inférieures à 600 mg/l, ce qui représente 72.72% de l'ensemble des données. La deuxième population du Cl^- représentent à 17.18%. montrant les teneurs supérieures à 600 mg/l.

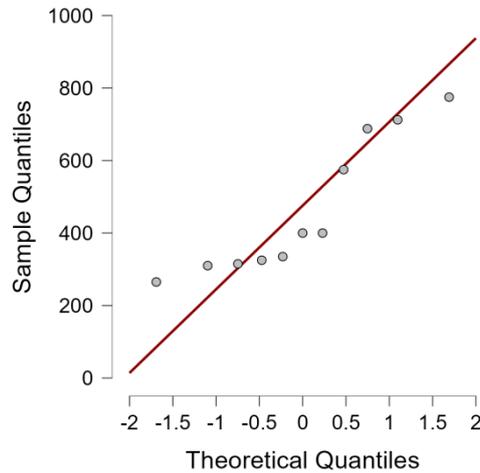


Fig. 34 : graphe de probabilités de chlorure (Cl) de la continentale intercalaire.

1.3.2 Les sulfates (SO_4^-)

La plus grande valeur de SO_4^- a été enregistrée entre (600_800) mg/l, avec le moyenne $824 \text{ mg/l} \pm 299.176 \text{ mg/l}$ (Fig. 35 a-b).

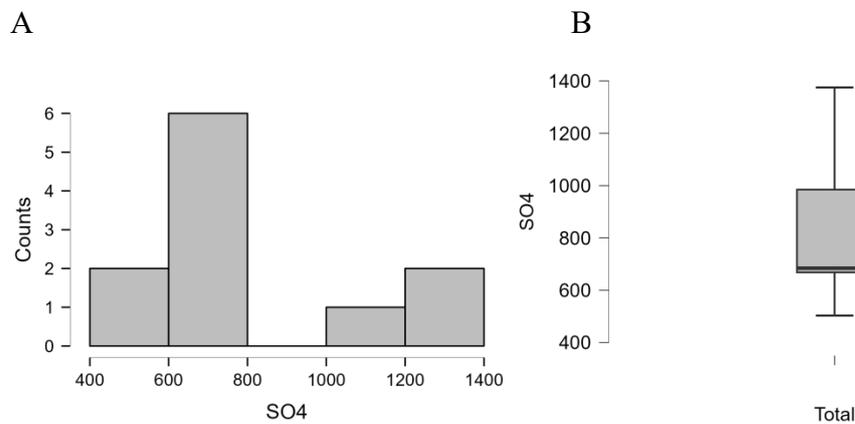


Fig.35 : Histogramme (A) et variation (B) de Sulfate (SO_4) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le paramètre SO_4^- (Fig. 36) représente un point d'inflexion à la valeur (1000 mg/l). La première classe d'échantillons avec SO_4^- inférieures à 1000 mg/l représente 72.72%, et la deuxième classe de la SO_4^- à représente 17.18% dépassant (1000mg/l).

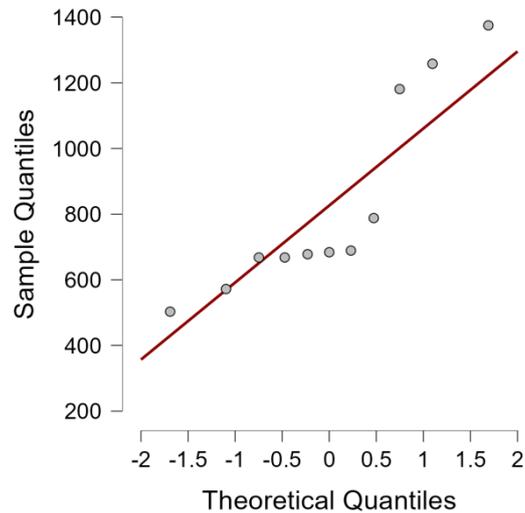


Fig. 36 : graphe de probabilités de Sulfate (SO_4) de la continentale intercalair.

1.3.3 Les bicarbonates (HCO_3^-)

La plus grande valeur de HCO_3^- a été enregistrée entre (180_200) Mg/l, avec moyenne $214.885 \text{ mg/l} \pm 29.393 \text{ mg/l}$ (Fig. 37 a-b).

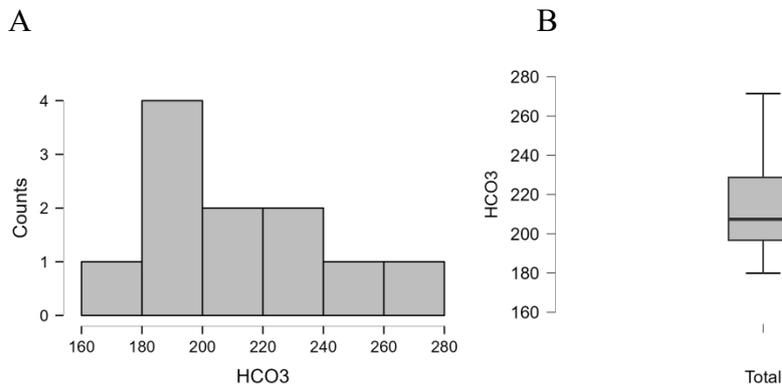


Fig.37 : Histogramme (a) et variation (B) de Bicarbonate (HCO_3^-) de la nappe du continentale intercalaire.

Le graphe de probabilité pour le paramètre HCO_3^- (Fig. 38) montre un point d'inflexion à la valeur (250 mg/l). La première classe d'échantillons avec un HCO_3^- inférieur à 240 mg/l représente 81.81%, et la deuxième classe est HCO_3^- représentée à 18.19% montrant les échantillons ayant qui dépasse (250 mg/).

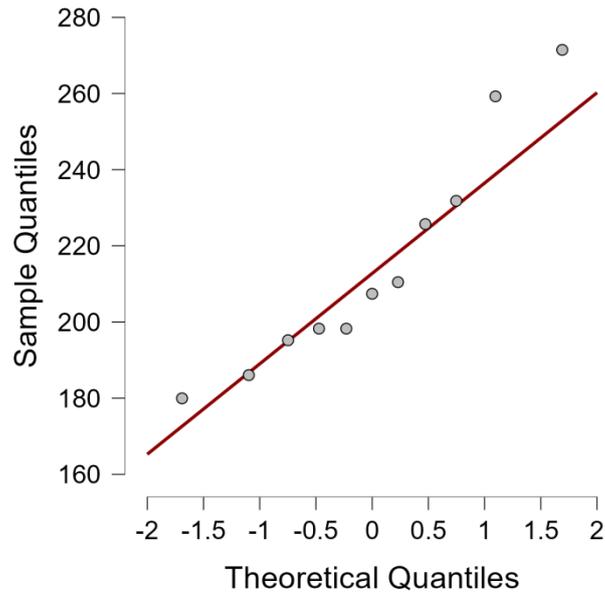


Fig.38 : graphe de probabilités de Bicarbonate (HCO_3) de la continentale intercalare

2. Complexe terminal

2.1 les paramètres physiques (Ce, pH)

2.1.1 le pH :

Dans cet aquifère, la plus grande valeur de pH a été enregistrée entre (8.1_ 8.3) avec un moyenne 8.163 ± 0.20 (Fig. 39 a-b)..

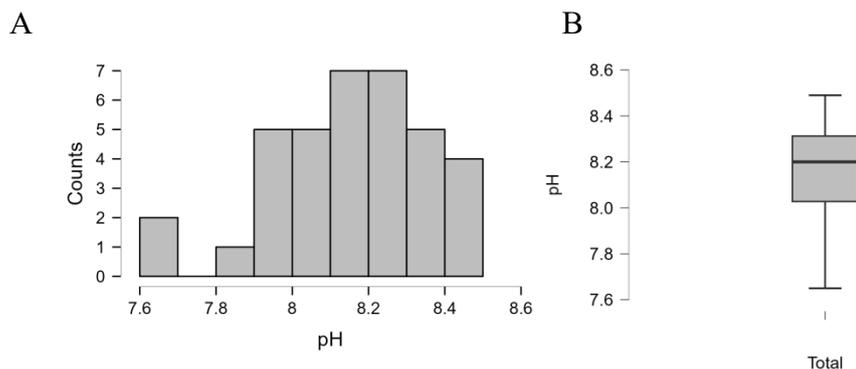


Fig.39 : Histogramme (a) et variation (b) de pH de la nappe du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre pH (Fig. 40) ne montre pas un point d'inflexion remarquable. On peut constater l'homogénéité des données de pH au niveau de CT.

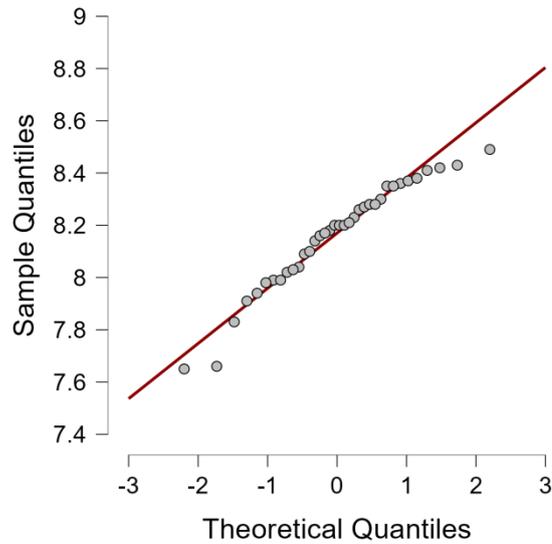


Fig.40 : graphe de probabilités de pH de la nappe du complexe terminale.

2.1.2 La conductivité électrique (Ce)

La plus grande valeur de Ce a été enregistrée entre (5_6) ms/cm, avec moyenne $5.658 \text{ ms/cm} \pm 1.366 \text{ ms/cm}$ (Fig.41 a-b).

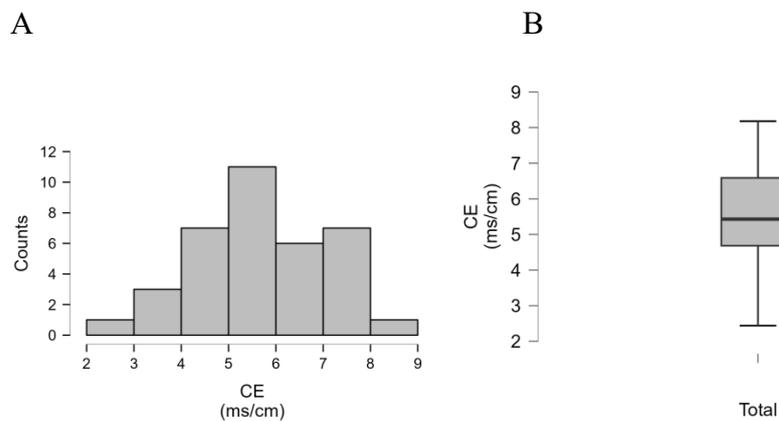


Fig.41 : Histogramme (a) et variation (b) des conductivités électrique de la nappe du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre CE (Fig.42) ne remarque pas de point d'inflexion, ce que signifie qu'il s'agit d'un seul groupe de population et homogénéité des données de CE.

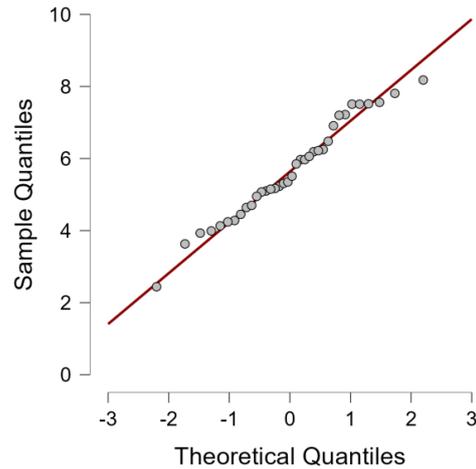


Fig.42 : le graphe de probabilité des conductivités électriques (Ce) de la nappe du complexe terminal.

2.1 Les Cations (Ca^{++} / Mg^{++} / Na^{+} / K^{+})

2.1.1 Le calcium (Ca^{++})

La plus grande valeur de Ca^{++} a été enregistrée entre (300 et 350) mg/l ,avec un moyenne $328.20 \text{ mg/l} \pm 77.144 \text{ mg/l}$. (Fig.43 a-b). L'histogramme montre généralement une seule classe.

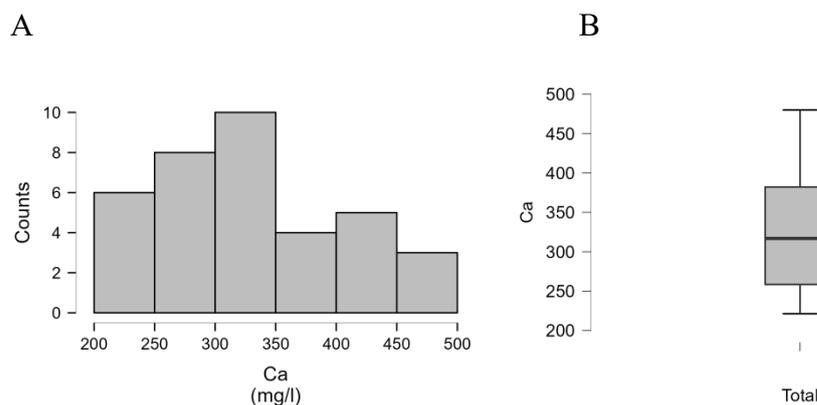


Fig.43 : Histogramme (A) la variation (B) de calcium (Ca) au niveau du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre Ca (Fig. 44) ne montre pas un point d'inflexion, ce que signifie qu'il s'agit d'un seul groupe de population et une homogénéité des données du Ca au sein de l'aquifère CT.

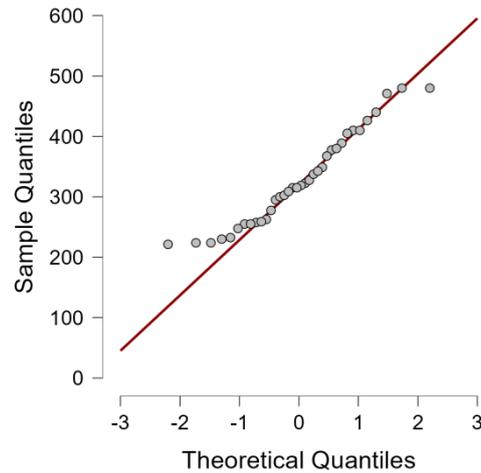


Fig.44: le graphe de probabilité du calcium (Ca) de l'aquifère du complexe terminal.

2.1.2 Le Magnésium (Mg^{++})

La plus grande valeur de Mg^{++} a été enregistrée entre 200 et 250 mg/l, avec moyenne $265.667 \text{ mg/l} \pm 93.255 \text{ mg/l}$. (Fig.45 a-b).

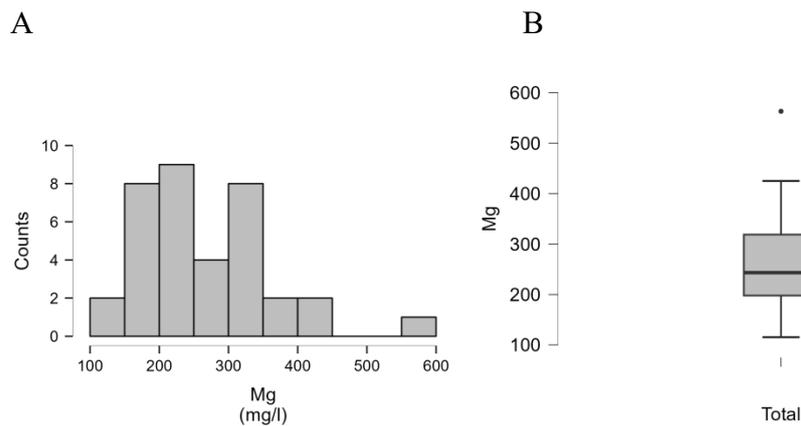


Fig.45: Histogramme (A) et variation (B) du Magnésium (Mg) de l'aquifère complexe terminal.

Comme le Ca, le graphe de probabilité pour le paramètre Mg^{++} (Fig. 46.) ne montre pas un point d'inflexion net, indiquant que ces échantillons se présentent en une seule population. Autrement dit, une homogénéité des données de Mg a été constatée.

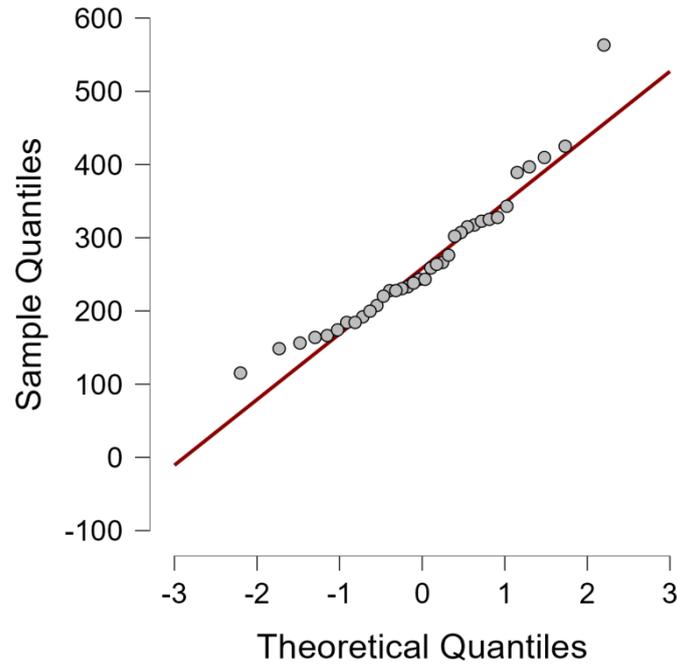


Fig.46 : Graphe de probabilité du Magnésium (Mg) de l’aquifère du complexe terminal.

2.1.3 Sodium (Na^+)

La plus grande valeur de a Na^+ été enregistrée entre 500 et 600 mg/l, avec moyenne (Fig.47 a-b). L’histogramme et multimodale.

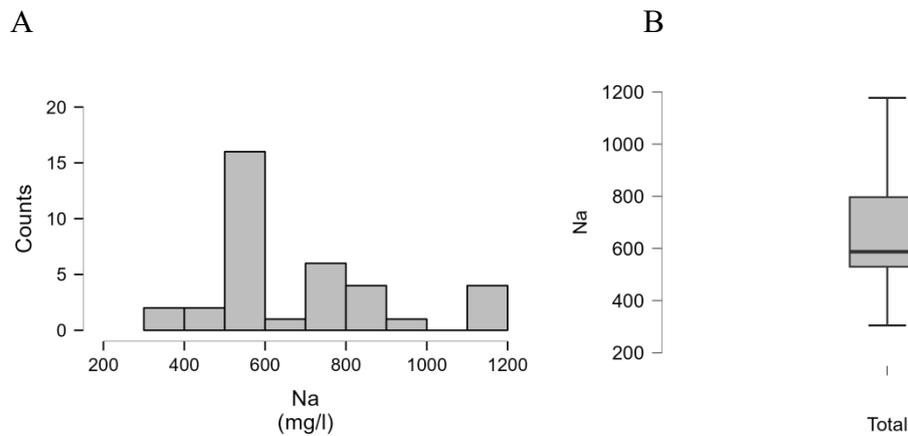


Fig.47 : Histogramme (a) et variation (B) de Sodium(Na) de l’aquifere du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre Na^+ (Fig. 48) représente 2 points d'inflexion. Au niveau du premier point à 500 mg/l et première classe représente 5.5%. La classe entre le premier point et le deuxième point à 1100 mg/l représente 83.5% de l'ensemble des données, tandis que la troisième population ayant des valeurs supérieures à 1100 mg/l représente 11% des données.

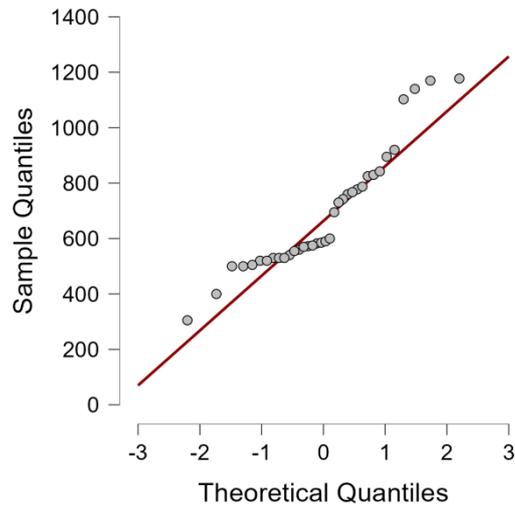


Fig.48 : le graphe de probabilité de Sodium (Na) de la nappe du complexe terminale.

2.1.4 Potassium (K^+)

La plus grande valeur de K^+ a été enregistrée entre 20 et 30 mg/l avec moyenne $28.222 \text{ mg/l} \pm 15.202 \text{ mg/l}$ (Fig. 49 a-b).

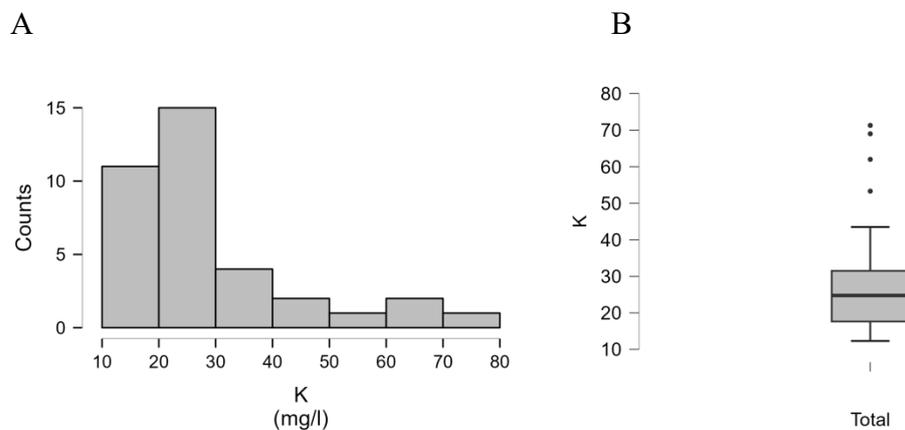


Fig.49 : Histogramme (A) et variation (B) de potassium (K) au niveau du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre K^+ (Fig.50) montre un point d'inflexion au niveau de la valeur 17mg/l. La première population d'échantillons avec des teneurs de K^+ inférieures à 17 mg/l représentent 4.16%, et la deuxième population ayant des concentrations de K^+ qui dépassent 17 mg/l représentant 95.84%.

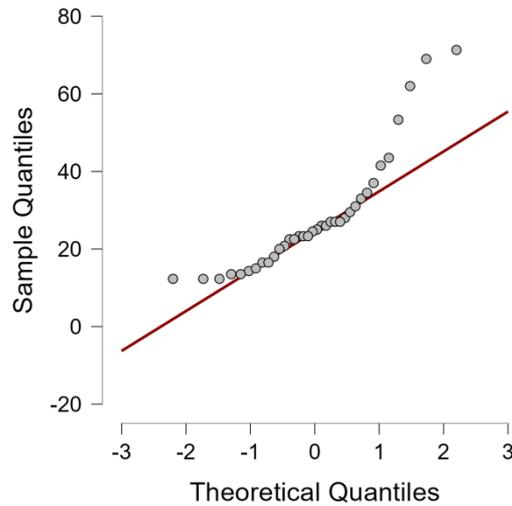


Fig.50 : Graphe de probabilité de potassium (K) la nappe du complexe terminal.

2.3. Les anions ($Cl^-/SO_4^{2-}/HCO_3^-$)

2.3.1. Les chlorures (Cl^-)

La plus grande valeur de Cl^- a été enregistrée entre 500 et 1000 mg/l, avec moyenne $1076.292 \text{ mg/l} \pm 535.075 \text{ mg/l}$ (Fig. 51 a-b).

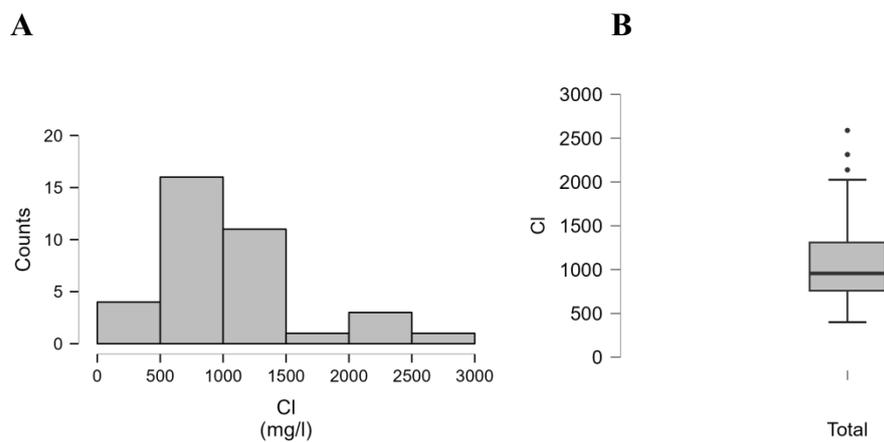


Fig. 51 : Histogramme (A) et variation (B) du chlore (Cl^-) de l'aquifère du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre Cl^- (Fig. 52) montre un point d'inflexion à la valeur (1750mg/l). La première classe d'échantillons avec un Cl^- inférieur à 1500 mg/l représente 88.89%, et la deuxième classe du Cl^- représente 11.11% montrant les échantillons ayant des teneurs dépassant 1750mg/l.

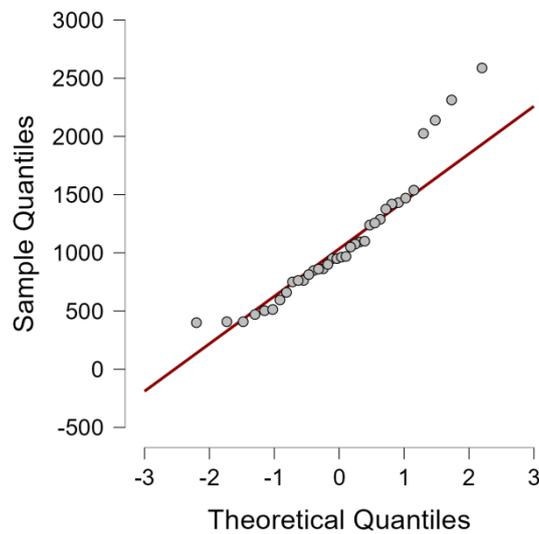
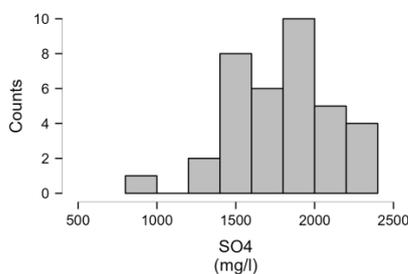


Fig. 52 : Graphe de probabilité pour le chlore (Cl^-) de l'aquifère du complexe terminal.

2.3.2 Les Sulfates (SO_4^-)

La plus grande valeur de SO_4^- a été enregistrée entre 1800 et 2000 mg/l, avec moyenne $1789.722\text{mg/l} \pm 336.550\text{mg/l}$ (Fig.53 a-b).

A



B

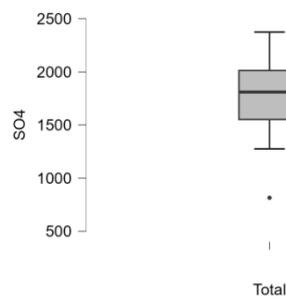


Fig. 53: Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation des Sulfates (SO_4) de la nappe du complexe terminal.

Le graphe de probabilité pour le paramètre SO_4^- (Fig. 54) manifeste un point d'inflexion au niveau de la valeur 1000mg/l. Au niveau de ce point, la première

population d'échantillons avec un SO_4 inférieure à 1000 mg/l représente 2.77%, et la deuxième population du SO_4^- à 97.12% traduisant les concentrations qui dépassent 1200 mg/l.

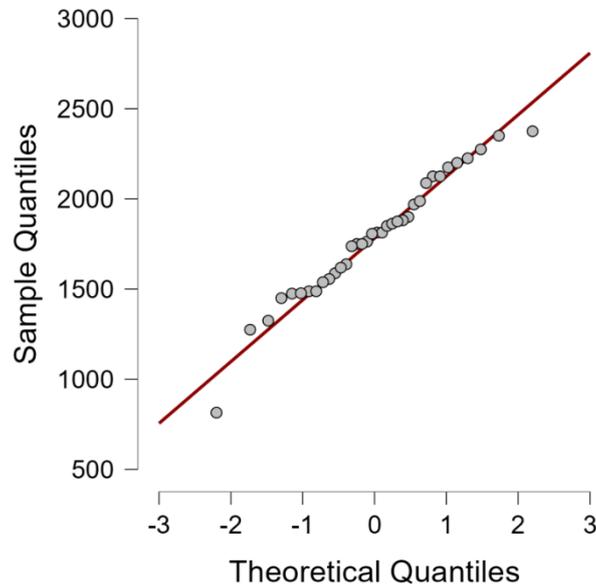


Fig. 54 : Graphe de probabilité des sulfates (SO_4) au niveau de l'aquifère du complexe terminal.

3.3 Les bicarbonates (HCO_3^-)

La plus grande valeur de HCO_3^- a été enregistrée entre 180 et 190 mg/l, avec moyenne $180.207 \text{ mg/l} \pm 17.608 \text{ mg/l}$ (Fig. 55 a-b).

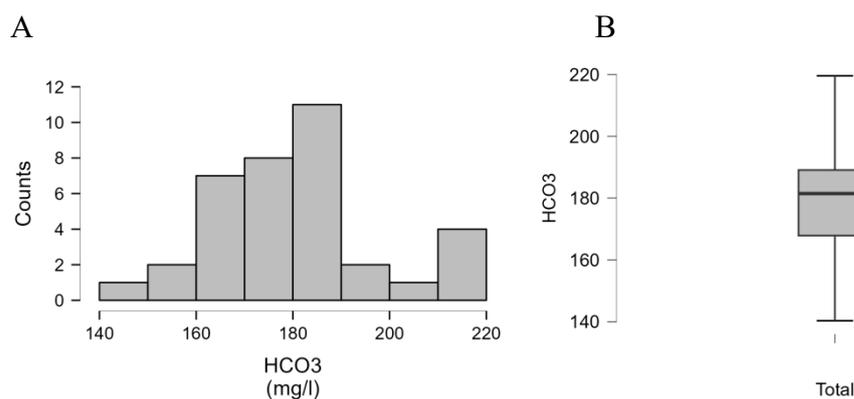


Fig.55 : Histogramme (a) et droit d'henery (b) de la variation des bicarbonates (HCO_3) de la nappe du complexe terminale.

Le graphique de probabilité pour le paramètre HCO_3^- (Fig.56) montre un point d'inflexion 1 à la valeur 143 mg/l. La première classe d'échantillons avec un HCO_3^-

inférieur à 140 mg/l représente 2.77 % , la deuxième point d'inflexion à la valeur 148 mg/l c'est une deuxième classe représente 5.55% , classe ayant des concentrations HCO_3^- supérieures à 160 mg/m représente 91.66%.

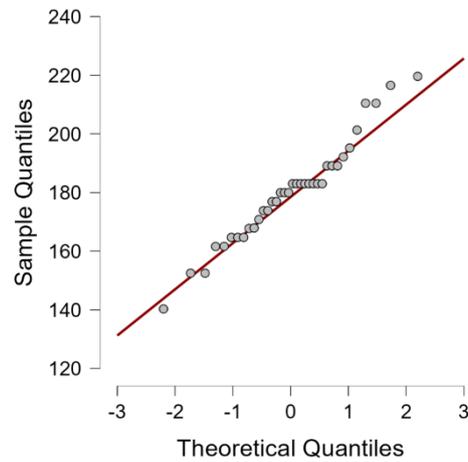


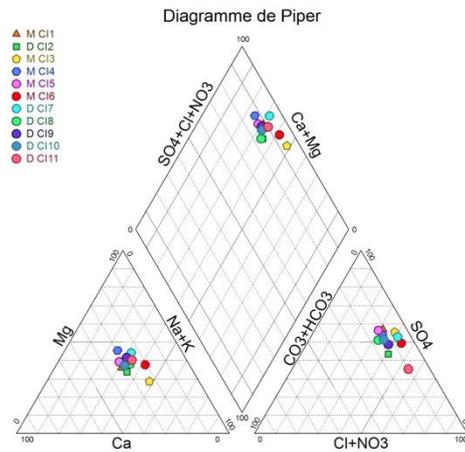
Fig. 56 : Graphe de probabilité de bicarbonate (HCO_3^-) de l'aquifère du complexe terminale.

3. Caractéristiques chimiques des eaux

Sur la base des études antérieures en particulier celles de Belksier (2017) et Bouabdalla sur les aquifères de l'Oued Righ, les résultats ont montré que le faciès dominant est sulfaté magnésien chloruré sodique pour l'ensemble des forages, avec un faciès spécifique sulfaté magnésien pour les eaux souterraines du continental intercalaire.

Nous concluons que la nappe continentale intercalaire a un faciès sulfaté magnésien, et pour la nappe complexe terminal elle a un faciès sulfaté magnésien chloruré sodique.

A



B

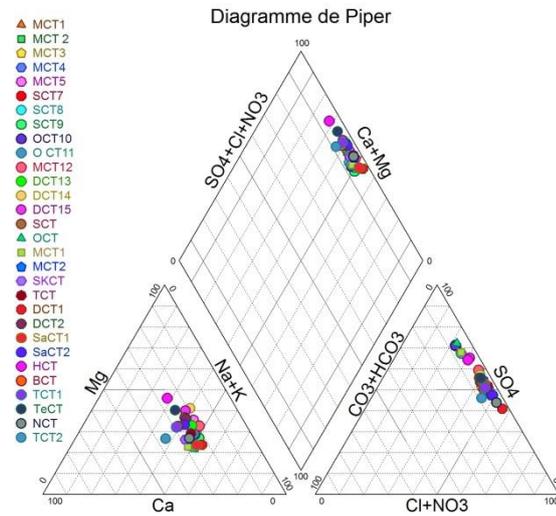


Fig. 57 : Diagramme de piper du continental intercalaire (A) et complexe terminal (B) de la région d’Oued Righ.

4. Analyse Statistique

4.1 Données prisé en compte

Les données utilisées pour la classification statistique comprennent des échantillons d’eau prélevés dans les aquifères du complexe terminal (CT) et dans la nappe continentale intercalaire (CI) de la région Oued Righ. Au total 47 puits ont été analysés pour la période 2016 à 2017. Les paramètres pris en compte dans les analyses comprennent la conductivité électrique (CE en ms/cm), le pH et la concentration en calcium (Ca^{++}), magnésium (Mg^{++}) sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^-), bicarbonate (HCO_3^-). Les analyses ont été réalisées au niveau de l’ANRH de Ouargla.

4.2 Statistique d’étude de la nappe du continental intercalaire

4.2.1 Statistique élémentaire

Les tableaux statistiques ont été faits sur les données issues des analyses physico-chimiques des eaux de continental intercalaire de l’Oued Righ. Comme le montre le tableau (tab.6), la concentration moyenne en sulfate (SO_4^-) est de 824mg/l , ce qui est

une valeur supérieure aux autres paramètres. La conductivité moyenne conductivité électrique (Ce) est estimée à 3.481 ms/cm. Elle est considérée comme la plus petite valeur du tableau (tab.6)

Tableau 06 : Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire (CI).

Variable	N	Moyenne	Ecart Type	Skewness	Kurtosis	Shapiro-Wilk	Etendu	Minimum	Maximum
Ca^{++}	11	183.76	30.30	1.09	-0.37	0.80	82.50	155	237.50
Mg^{++}	11	158.60	49.15	1.44	1.31	0.81	151.00	115.20	266.20
Na^+	11	259.31	136.87	1.39	0.67	0.77	402.50	140.0	542.50
K^+	11	28.90	8.09	0	0.72	0.76	23.50	11.50	35.00
Cl^-	11	463.68	187.25	0.71	-1.30	0.84	510.00	265.00	775.00
SO_4^-	11	824	299.17	1.04	-0,48	0.80	872.00	503.00	1375.00
HCO_3^-	11	214.88	29.39	0.91	-0,06	0.90	91.50	179.95	271.45
TH (F)	11	111.14	26.54	1.42	0.96	0.791	79.50	89.30	168.80
CE(ms/cm)	11	3.48	1.21	1.17	-0,95	0.699	3.06	2.52	5.58
pH	11	8	0.33	-1,37	2.86	0.89	1.24	7.19	8.43

En faisant comparaison avec les normes de OMS, à l'exception du pH, on constate que les paramètres de Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , HCO_3^- dépassent les normes de OMS pour la potabilité de l'eau.

4.2.2 Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation est calculée pour les éléments chimiques analysés (Tableau.7).

Le tableau montre une corrélation positive entre Ca^{++} et SO_4^- ($r = 0.96$) indiquant la dissolution de gypse. Une corrélation négative a été enregistré entre Mg^{++} et K^+ ($r = -0.94$).

Tableau 07 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de continental intercalaire de la région d'Oued Righ

Variables	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^-	HCO_3^-	CE (ms/cm)	Ph
Ca^{++}	1								
Mg^{++}	0,78	1							

Na^+	0,86	0,68	1						
K^+	-0,87	-0,94	-0,79	1					
Cl^-	0,79	0,83	0,88	-0,85	1				
SO_4^-	0,96	0,77	0,89	-0,87	0,76	1			
HCO_3^-	-0,41	-0,48	-0,34	0,41	-0,52	-0,43	1		
CE (ms/cm)	0,97	0,84	0,9	-0,93	0,89	0,95	-0,41	1	-0,04
Ph	-0,10	0,14	-0,03	0,01	0,04	0,00	-0,29	-0,04	1

4.2.3 Diagonalisation de la matrice de corrélation

Les facteurs de charge ont été à partir la diagonalisation de la matrice de corrélation et ils sont présentés au Tableau (tab.08).

Tableau 08 : Facteurs de charges (composantes) sur les paramètres physico-chimique dans la nappe du continental intercalaire de la région d'Oued Righ.

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5
Ca^{++}	0.92	0.10	-0.07	-0.06	-0.08
Mg^{++}	0.04	0.92	0.06	0.04	0.04
Na^+	0.78	-0.19	0.03	0.07	0.49
K^+	-0.33	-0.71	0.04	-0.04	-0.03
Cl^-	0.12	0.29	-0.02	-0.08	0.64
SO_4^-	1.03	0.02	0.06	-0.03	-0.10
HCO_3^-	-0.01	0.02	-0.06	0.99	-0.03
CE(ms/cm)	0.72	0.21	-0.01	0.02	0.14
pH	0.00	0.03	0.96	-0.06	-0.00

4.2.4 Interprétation des composantes

Sur cette figure (Fig. 58) que montre la relation de minéralisation entre les paramètres physico-chimiques de l'eau de l'Oued Righ de la nappe continental intercalaire (CI) et le corrélations (RC1 , RC2, RC3, RC4, RC5).

- La première composante (RC1) : elle représente l'association de 4 paramètres (Ca^{++} , Na^+ , SO_4^- , CE). Cette association reflète la minéralisation des eaux.
- La deuxième corrélation (RC2) : elle représente la corrélation avec 2 paramètres (K^+ , Mg^+). Elle représente la phase dolomitique et les échanges de base de la matrice argileuse.

- La troisième composante (RC3) : qui représente le lien avec un paramètre (pH).
- La quatrième composante (RC4) reflète paramètre (HCO_3^-).
- La cinquième composante (RC5) : elle montre corrélation avec 2 paramètres (Cl^- , Na^+). Cette composante témoigne de la dissolution du sel.

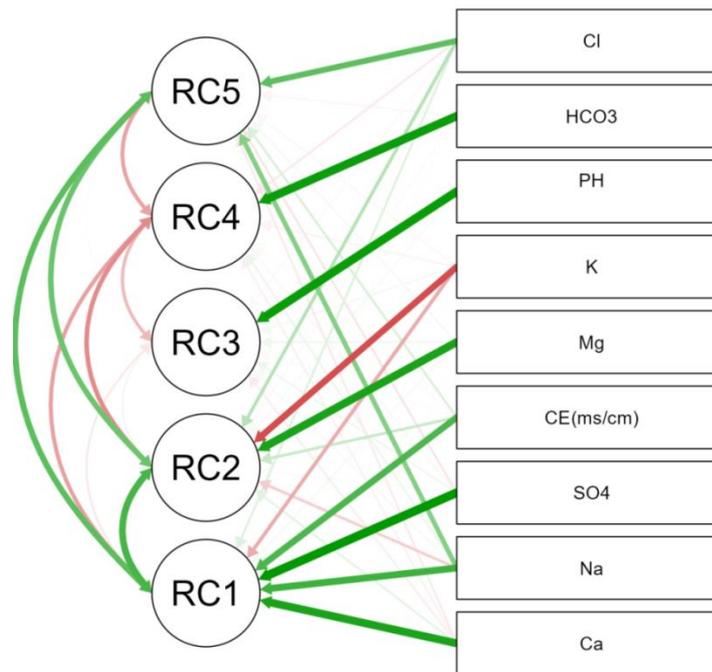


Fig.58 : Composantes chimiques des eaux du continental intercalaire de la région d'Oued Righ.

4.3 Statistique d'étude de la nappe du complexe terminal (CT)

4.3.1 Statistique élémentaire

Les tableaux statistiques ont été faits sur les données issues des analyses physico-chimiques des eaux de complexe terminal de l'Oued Righ. Comme le montre le tableau (tab.9), la concentration moyenne en sulfate (SO_4^-) est de 1789.72 mg/l. La conductivité moyenne conductivité électrique (Ce) est estimée à 5.65 ms/cm (tab.9).

En faisant comparaison avec les normes de OMS, on constate que les paramètres de Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , HCO_3^- dépassent les normes de potabilité des eaux à l'exception du

pH=7.65 et $K^+ = 102.30$ mg/l, qui sont dans les normes. Cela signifie la forte minéralisation des eaux.

Tableau 09 : Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du complexe terminal (CT).

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Deviation
Ca^{++} (mg/l)	36	221,30	480,00	328,20	77,14
Mg^{++} (mg/l)	36	115,20	563,20	265,66	93,25
Na^+ (mg/l)	36	305,00	1177,50	687,01	216,59
K^+ (mg/l)	36	12,30	71,30	28,22	15,20
Cl^- (mg/l)	36	400,00	2588,00	1076,29	535,07
SO_4^- (mg/l)	36	815,00	2375,00	1789,72	336,54
HCO_3^- (mg/l)	36	140,30	219,60	180,20	17,60
CE(ms/cm)	36	2,44	8,18	5,65	1,36
Ph	36	7,65	8,49	8,16	0,20

4.3.2 Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation est calculée pour les éléments chimiques analysés (tab.10).

Le tableau montre une corrélation positive entre Ca^{++} et SO_4^- ($r = 0.54$). Une corrélation négative a été enregistré entre Mg^{++} et HCO_3^- ($r = -0.30$).

Tableau 10 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de complexe terminal de la région d'Oued Righ.

Variables	Ca^{++} (mg/l)	Mg^{++} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	so_4^- (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	CE (ms/cm)	pH
Ca^{++} (mg/l)	1								
Mg^{++} (mg/l)	0,67	1							
Na^+ (mg/l)	0,76	0,62	1						
K^+ (mg/l)	0,54	0,35	0,31	1					
Cl^- (mg/l)	0,86	0,77	0,85	0,55	1				
SO_4^- (mg/l)	0,54	0,62	0,72	-0,09	0,50	1			
HCO_3^- (mg/l)	-0,46	-0,30	-0,20	-0,52	-0,40	-0,04	1		
CE(ms/cm)	0,29	0,65	0,66	-0,04	0,59	0,65	-0,06	1	-0,12
Ph	0,31	0,10	0,13	0,35	0,16	0,11	-0,40	-0,12	1

4.3.3 Diagonalisation de la matrice de corrélation

Les composantes principales de l'analyse en composantes principales ont été calculé (tab.11).

Tableau 11 : Component loading sur les paramètres physico-chimique dans la nappe du complexe terminal de la région d'Oued Righ.

	RC1	RC2	RC3	RC4
CE (ms/cm)	0.98	-0.24	-0.22	-0.19
SO_4^-	0.96	-0.19	0.26	0.13
Mg^{++}	0.69	0.25	-0.10	-0.21
Na^+	0.65	0.45	0.03	0.20
Cl^-	0.44	0.69	-0.11	-0.02
K^+	-0.39	0.97	-0.04	-0.16
Ca^{++}	0.29	0.73	0.15	0.07
HCO_3^-	-0.06	-0.11	-0.20	0.85
Ph	-0.00	-0.01	0.92	-0.19

4.3.4 Interpretations des composantes principales

Sur cette figure (Fig. 59), les composantes des paramètres physico-chimiques de l'eau de l'Oued Righ de la nappe complexe terminale (CT) se présentent comme suit :

- La première composante (RC1) : représente une relation entre 7 paramètres (Ca^{++} , Na^+ , SO_4^- , CE, K^+ , Cl^-). Cette composante reflète la minéralisation des eaux.
- La deuxième composante (RC2) : montre l'association de 3 paramètres (Ca^{++} , K^+ , Cl^-).
- La troisième composition (RC3) : reflète (pH).
- La quatrième composante (RC4) : reflète (HCO_3^-).

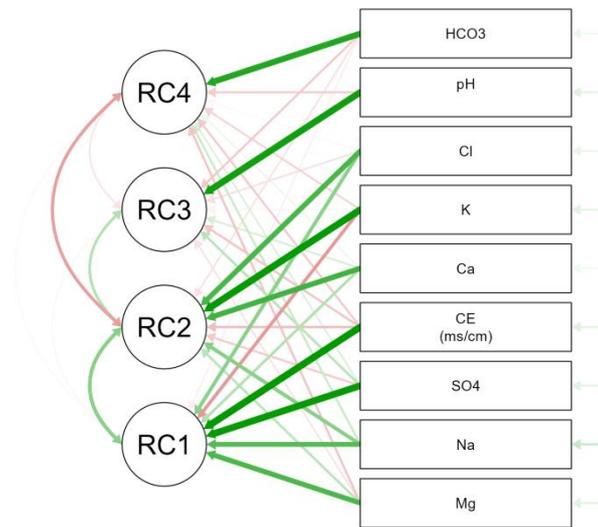


Fig.59 : Composantes chimiques des eaux du complexe terminal de la région d'Oued Righ.

Conclusion

Sur la base de l'analyse statistique l'Oued Righ dans les aquifères des nappes continentales intercalaires (CI), et complexe terminale (CT), il a été démontré que la valeur de pH est basique dans les nappes CI (7.19 _ 8.43) et CT (7.65 _ 8.49) ou il n'y a pas de différence significative entre les deux aquifères.

Je remarque aussi une différence de la conductivité entre les deux aquifères ou le CT montre une valeur élevée (5.65 ms/cm) par rapport au CI (3.48 ms/cm) indiquant la minéralisation des très élevées des eaux de CT.

L'analyse statistique par les graphes de probabilité a montré que Ca et CE sont homogènes pour leur distribution cependant les autres paramètres qui sont hétérogènes et montrent des points d'inflexion. Cette observation a été constatée dans le CI également. De ce fait, l'application de certaines techniques statistiques tels que l'Analyse par composantes principales peut en résulter des conclusions erronées. L'application de l'approche compositionnelle serait alors la meilleure façon pour résoudre ce problème d'hétérogénéité des données.

Chapitre 6 :

Analyse par approche compositionnelle.

Chapitre 6

Analyse par approche compositionnelle.

Introduction

L'analyse statistique au chapitre 5 a montré l'hétérogénéité des données des deux aquifères. Pour résoudre à ce problème qui affecte les résultats, surtout des analyses statistiques comme l'ACP, nous proposons dans ce chapitre une application d'une nouvelle approche d'analyse compositionnelle des données.

Dans ce chapitre les données chimiques (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-) sont utilisées à l'exception du pH et la conductivité électrique (Ce). Les données sont converties en ratios rapport au centre. Ces nouvelles coordonnées dites (Clr – ratios) ont fait l'objet de traitement statistique par le logiciel CoDaPack software (Comas-Cufí and Thió-Henestrosa, 2011).

1. Analyse statistique par approche compositionnelle (CODA) –Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est l'un des traitements statistiques les plus courants utilisés pour réduire la dimensionnalité et peut facilement expliquer les différentes corrélations enregistrées afin de clarifier une structure sous-jacente à un ensemble de données (Davis, 1986). L'application de l'ACP directement sur des données brutes hydrochimiques, qui sont, dans la plupart des cas, asymétriques et ne montrent pas de distribution normale, ce qui a été prouvé dans le chapitre statistique, ou l'ensemble des données montrent des points d'inflexion indiquant hétérogénéité des données. De ce fait, l'application directe de l'analyse en ACP, peut conduire à des résultats erronés, comme l'ont démontré certains auteurs (par exemple, Reimann et Filzmoser, 2000). Ainsi, dans le présent chapitre, avant l'application de l'ACP, les données brutes ont été transformées en ratios logarithmiques centrés (clr) selon la méthode d'Aitchison (1986).

2. Résultats de l'analyse ACP

2.1. Continental Intercalaire

L'extraction des composantes principales a été réalisée en utilisant la matrice de corrélation des données transformées en CLR. Les principales composantes : PC1 et PC2 regroupent 89% de la variance totale (PC1 = 0.80%, PC2 = 0.89%, PC3 = 0.99%, PC4 = 0.99%) (tab.12). Par conséquent, la projection des variables et des individus a été effectuée dans les graphiques PC1 et PC2 (Fig.61).

Tableaux 12 : Utiliser la matrice de corrélation des données transformées en CLR de la nappe continentale intercalaire (CI)

Principal Components:	Clr. HCO_3^-	clr. Ca^{++}	clr. Mg^{++}	clr. Na^+	clr. K^+	clr. Cl^-	clr. SO_4^-	Cum.Prop.Exp.
PC1	0.32	0.01	-0.15	-0.40	0.74	-0.31	-0.21	0.80
PC2	-0.13	-0.22	-0.24	0.35	0.26	0.56	-0.59	0.89
PC3	0.033	-0.00	0.66	-0.54	-0.13	0.33	-0.35	0.96
PC4	-0.81	0.11	0.04	-0.21	0.40	0.14	0.31	0.99
PC5	0.077	0.71	-0.49	-0.31	-0.21	0.30	-0.07	0.99
PC6	-0.25	0.53	0.28	0.35	0.02	-0.46	-0.47	1
PC7	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	1

Dans la Figure 60, les paramètres sont divisés en 3 groupes, le premier groupe CLR. K^+ et CLR HCO_3^- ayant une corrélation positive avec ILR1. Le deuxième groupe comprend CLR. Ca^{++} , CLR. Mg^{++} , et CLR. SO_4^- Avec une corrélation négative avec ILR1 représentant la dissolution du gypse et dolomite. Le dernier groupe englobe CLR. Cl^- CLR. Na^+ Lien positif avec ILR2 représentent la dissolution de l'Halite

Acp sur les données converties en CLR du la nappe continental intercalaire (CI)

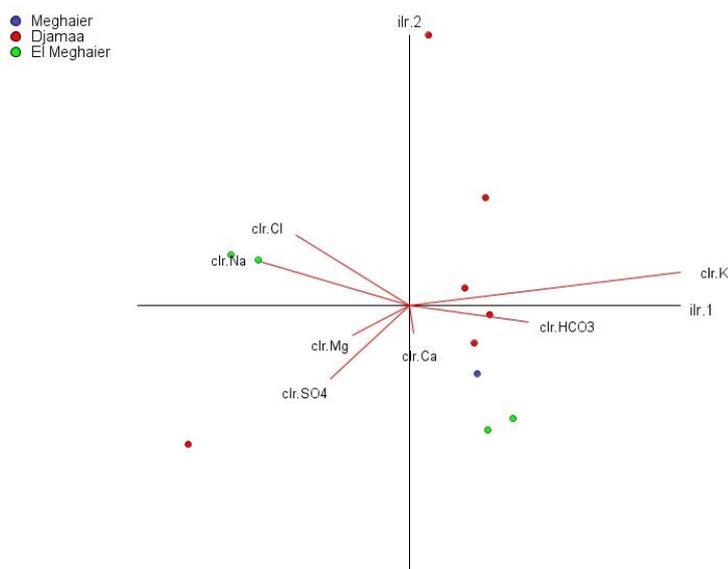


Fig.60: ACP sur les données converties en CLR du la nappe continental intercalaire (CI).

2.2. Complexe terminal

L'extraction des composantes principales a été réalisée en utilisant la matrice de corrélation des données transformées en CLR.

Les principales composantes : PC1 et PC2 regroupent 82% de la variance totale (PC1 = 0.54%, PC2 = 0.82%, PC3 = 0.92%, PC4 = 0.95%) (tab.13). Par conséquent, la projection des variables et des individus a été effectuée dans les graphiques PC1 et PC2 (Fig.61).

Tableaux 13 : Utiliser la matrice de corrélation des données transformées en CLR de la nappe complexe terminale (CT).

Principal Components:	clr.Ca ⁺⁺	clr.Mg ⁺⁺	clr.Na ⁺	clr.K ⁺	clr.Cl ⁻	clr.SO ₄ ⁻	clr.HCO ₃ ⁻	Cum. Prop. Exp.
PC1	0.011	0.06	0.13	-0.64	-0.43	0.40	0.46	0.54
PC2	-0.08	0.39	0.19	-0.57	0.50	0.03	-0.47	0.82
PC3	0.07	-0.70	0.67	-0.06	0.10	0.04	-0.13	0.92
PC4	-0.046	0.22	0.20	0.27	-0.52	0.45	-0.58	0.95
PC5	-0.83	0.20	0.37	0.16	-0.0	-0.15	0.24	0.99
PC6	-0.37	-0.32	-0.39	0.05	0.36	0.68	-0.00	1

La figure 61 montre que les paramètres sont regroupés en 4. Le premier groupe englobe CLR. Mg^{++} , CLR. Na^{++} Et CLR. SO_4^- Montrant lien positif avec ILR1. Ce groupe se localise à la proximité des zones de décharge (comme Djamaa). Le deuxième groupe est représenté par CLR. Ca^{++} et CLR. HCO_3^- Avec un lien négatif avec ILR2. Ce groupe indique l'influence des formations carbonatées. La zone de still en fait partie de ce groupe. Le troisième groupe est constitué de CLR. K^+ Avec une négative avec ILR1 reflétant les échanges de base avec les argiles. Le dernier groupe CLR. Cl^- Lien positif avec ILR2 il montre l'effet de Cl sur les eaux.

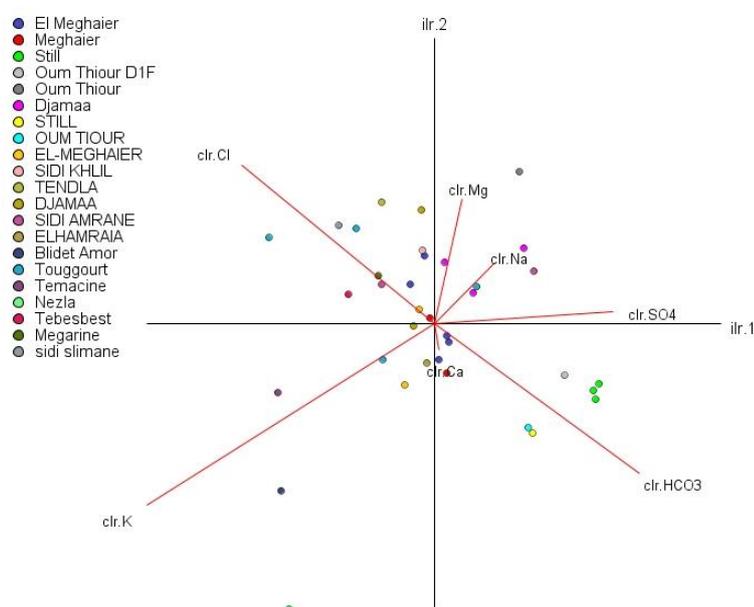


Fig.61 : ACP sur les données converties en CLR du la nappe complexe terminal (CT).

Conclusion

L'application de l'analyse compositionnelle CODA sur les données géochimiques des eaux de CI et CT a été effectuée pour résoudre à la problématique liée à l'hétérogénéité des données comme il a été montré dans les graphes de probabilité. L'analyse par ACP sur les nouvelles données transformées en CLR a permis de distinguer les facteurs influençant le chimisme des eaux ainsi la classification des points d'eau. Les formations évaporitiques apparaissent comme étant les plus influentes sur la minéralisation des

eaux, tandis que les autres facteurs comme les échanges de base dans les argiles viennent en degrés moins.

Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour mettre à niveau les procédés de dessalement des eaux et pour optimiser l'exploitation des eaux en fonction de la chimie de l'eau.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La région de l'oued Righ fait partie du Sahara Septentrional se caractérise par son climat sec, avec précipitations rares et des températures élevées. Cependant, vue sa situation géographique, surtout avec le développement du tissu agricole, ce qui a conduit à une concentration de la population. Cela fait une pression sur les ressources en eaux qui sont nécessaire pour toutes les activités.

Géologiquement, la zone étudiée est caractérisée par deux unités structurales à savoir le socle précambrien, composé de roches éruptives et métamorphiques, surmonté par des milliers de mètres de couches sédimentaires s'étendant du Cambrien jusqu'au Quaternaire.

Cette région est comme tout le Sahara se distingue par des séries géologiques qui renferment d'énormes quantités en eau. Il s'agit des aquifères de la nappe Continental intercalaire (CI) et la nappe du complexe terminal (CT), en plus de la nappe superficielle.

Sur le plan climatique, la région de l'Oued Righ car elle se caractérise par son climat chaud et sec, comme c'est le cas dans les zones désertique. La température globale moyenne maximale est de 17,09 °C en 2014 et la température minimale 2009. La pluviométrie moyenne est de 51 mm et en 2011 elle est considérée comme le maximum.

Ce mémoire qui a fait pour objectif l'étude hydrochimique des eaux à l'aide de l'analyse statistique classique et aussi les nouvelles approches dite compositionnelles (CoDa). Les résultats de ce mémoire ont permis de caractériser les eaux des deux aquifères. D'une manière générale, la nappe continental intercalaire a un faciès sulfaté magnésien, tandis que le nappe complexe terminal elle a un faciès sulfaté magnésien chloruré sodique.

L'analyse statistique par les graphes de probabilité a montré que certains paramètres comme Ca et CE sont homogènes pour leur distribution, cependant les autres paramètres qui sont heterogènes et montrent des points d'inflexions.

Cette observation a été constatée dans le CI également. De ce fait, l'application des certaines techniques statistiques tels que l'Analyse par composantes principales peut en résulter à des conclusions erronées. L'application de l'approche compositionnelle serait alors la meilleure façon pour résoudre à ce problème d'hétérogénéité des données.

L'application de l'analyse compositionnelle CODA sur les données géochimiques des eaux de CI et CT a été effectuée pour résoudre à la problématique liée à l'hétérogénéité des données comme il a été montré dans les graphes de probabilité. L'analyse par ACP sur les nouvelles données transformées en CLR a permis de distinguer les facteurs influençant le chimisme des eaux ainsi la classification des points d'eau. Les formations évaporitiques apparaissent comme étant les plus influentes sur la minéralisation des eaux, tandis que les autres facteurs comme les échanges de base dans les argiles viennent en degrés moins. Ces résultats peuvent être utilisés pour optimiser et mieux exploiter les processus de dessalement en fonction de la composition chimique.

Références

- 1. belksier m (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, thèse de doctorat, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.
- 2.A.N.R.H Ouargla** : Donnée les hydrogéologiques de les nappe de la région d'Oued Righ, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Direction régionale Sud, Ouargla.
- 3. Bouznad,2009**, Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA
- 4. Davis, 1986**: statistics and data analysis in geology. John Wiley& Sons Inc, New York
- 5. Reimann et Filzmoser, 2000** :Normal and lognormal data distribution in geochemistry : death of a myth.Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data . Environ. Geol. 39, 1001-1014.
<https://doi.org/10.1007/s00254990008> .
- 6. Boussaada n., 2007**. Evaluat ion des ressources en eau et modes de gestion dans la vallée d'oued Righ. Mémoire de Magister, option : hydrogéologie. Univ. Annaba, 24p.
- 7. Belkacem b., rabah b., alain m., 2014** : Paysages et sols dans la vallée
- 8. Halillet.m.t, (1998)** : Etude expérimentale de sable additionnée d'argile. Comportement physique et organisation en condition saline et sodique. Thèse doctorat.I.N.A.P.G Paris.250p
- 9. Sogreah (1971)** :articipation à la mise en valeur de l'Oued Righ. Etude agropédologique ,Doc.Poly MTPC.Alger pp7-36.
- 10. Guyot et Durand (1955)** : L'irrigation des cultures dans l'Oued Righ.
- 11.Cornet. A (1964)** : Introduction à l'hydrogéologie saharienne ; volume. VI, fasc.1 ; 5-72
- 12.Bel. F., & demargne f., 1966** : Etude géologique du Continental Terminal ;
- 13.Bouabdallh, H et Felkat, O ,2018** : Actualisation et étude comparative de la typologie physico-chimique des eaux des aquifères de l'Oued Righ (sud algérien) D'Oued Righ, sahara nord oriental, Algérie, Courrier du Savoir – N°18, Mars 2014, pp.103-
DEC, ANRH, Alger, Algérie, 24 planches, 22p.
Trav.de l'I.R.S Univ d'Alger, T.XIII,pp75-130.