

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protect.de la ressource Sol, Eaux, et Environnement

THEME

**CARACTÉRISATION CHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE DU
COMPLEXE TERMINAL DANS LA CUVETTE D'OUARGLA**

Présenté par :

Melle. Ben chaa Halima et Seddiki Nourelhouda.

Soutenu publiquement :

Le 19 /06/2025

Devant le jury :

M. Idder Abde Eh	Président	MCA	UKM Ouargla
Mme .Abour F	Promoteur	MCB	UKM Ouargla
M. Ladjici A	Examineur	MCA	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le bon Dieu qui nous a donné le courage et la patience pour

Terminer ce travail, sans oublier, toutefois, de remercier nos chers parents, que Dieu prolonge

leur vie et les revête de santé et de bien-être.

Nous remercions notre encadrante, le Professeur Mme Abour Fella, Maître de Conférences « B » à l'Université de Ouargla, pour son intérêt et pour avoir consacré une partie de son précieux temps à discuter de nos résultats.

Un grand merci aux membres du jury, au Monsieur IDEER Abdelhak, Maître de conférences « A » à l'Université de Ouargla, pour avoir accepté de présider ce comité

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à Monsieur M. Ladjici Abdelkader, Maître de Conférences « A » à l'Université de Ouargla, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.



Dédicace

À l'âme de mon cher père,

Tu as quitté ce monde, mais jamais mon cœur.

Aujourd'hui, je réalise ce que tu espérais tant me voir accomplir.

*Je t'offre ce diplôme, en priant Dieu qu'il le place dans le registre de
tes bonnes actions et qu'Il te fasse parvenir ma joie, là où tu es.*

À ma chère mère,

Ton amour, ta patience et tes prières m'ont portée à chaque étape.

Merci d'avoir toujours été là, avec tendresse et force.

À mes frères et sœurs,

*Vous avez été mon pilier, mon soutien constant. Grâce à vous, le
chemin a été moins difficile, plus lumineux.*

À mon fiancé,

*Merci pour ta présence, ta patience et tes paroles qui m'ont toujours
donné la force de continuer. Tu as été ma paix au milieu de la
tempête.*

*Et à tous ceux qui m'ont soutenue, par un mot, un geste, un
silence encourageant...*

*Ce succès est aussi le vôtre. Je vous en suis profondément
reconnaissante.*

Halima





Dédicaces

Je dédie ce travail modeste :

À ces mains discrètes et à ce cœur plein de tendresse, à ceux dont les prières sincères m'ont toujours accompagné :

à ma chère mère et à mon père bien-aimé, pour leur soutien inestimable, tant moral que matériel, tout au long de ma vie et de mon parcours universitaire, afin de me voir réussir dans la vie.

À mes frères et sœurs bien-aimés, mon pilier et mon refuge, qui ont toujours été là pour moi avec affection et encouragement.

À toute la famille "Seddiki", pour leur bienveillance, leur générosité et leur présence chaleureuse.

Et à mes fidèles ami(e)s, compagnons de route dans les moments de fatigue comme dans les instants de joie, merci pour votre sincérité et votre soutien constants.

Ce modeste accomplissement est le fruit de vos prières, de votre patience et de votre appui.

Recevez toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

Je prie Dieu qu'Il vous préserve, vous comble de Ses bienfaits, et qu'Il m'accorde la réussite afin de vous rendre un jour tout ce que vous m'avez donné.

Houda

Résumé

Le Sahara algérien dispose de deux grands aquifères profonds non renouvelables — le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal — surmontés d'une nappe superficielle, qui font de la région une importante réserve d'eaux souterraines. À Ouargla, vaste oasis cultivée depuis longtemps, l'agriculture et la petite industrie exploitent intensément ces nappes, accentuant des problèmes de salinité déjà bien documentés. Ce mémoire vise donc à caractériser l'hydrochimie et la qualité potable des eaux du Complexe Terminal, cette eau est caractérisée par forte salinité (conductivité électrique comprise entre 4000 et 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ressource cruciale mais vulnérable pour le développement socio-économique du Sud-Est algérien, à travers trois chapitres consacrés au contexte naturel, à la méthodologie et à l'analyse physico-chimique.

Le report des résultats d'analyses hydrochimiques sur le diagramme de Piper des eaux des montre que le faciès Chloruré sodique est dominant pour les eaux du Complexe Terminal (CT).

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence d'une seule association :

- Est constitué de : CE, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{--}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+) calcium (Ca^{++}) et du magnésium (Mg^{++}). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique, dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio-Pliocène.

Mots Clés : Complexe Terminal, Salinité, Hydrochimie, Conductivité électrique.

Chemical Characterization of Groundwater from the Terminal Complex Aquifer in the Ouargla Basin

Abstract

The Algerian Sahara contains two major deep and non-renewable aquifers — the Continental Intercalaire and the Complexe Terminal — overlain by a shallow water table, making the region an important reservoir of groundwater resources. In Ouargla, a vast oasis cultivated for centuries, agriculture and small industries intensively exploit these aquifers, exacerbating already well-documented salinity problems.

This study aims to characterize the hydrochemistry and drinking water quality of the Complexe Terminal aquifer. The water is characterized by high salinity (electrical conductivity ranging between 4000 and 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), representing a crucial but vulnerable resource for the socio-economic development of southeastern Algeria. The work is divided into three chapters addressing the natural context, the methodology, and the physico-chemical analysis.

The Piper diagram plotting the hydrochemical analysis results shows that the sodium-chloride (NaCl) water type is dominant in the Complexe Terminal (CT) aquifer.

The Principal Component Analysis (PCA) of the Complexe Terminal (CT) aquifer revealed the existence of a single association consisting of electrical conductivity (EC), chlorides (Cl^-), sulfates (SO_4^{--}), sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{++}), and magnesium (Mg^{++}). This association represents the mineralization axis, indicating a predominantly evaporitic origin, with halite (NaCl) as the dominant mineral. This feature generally characterizes the Mio-Pliocene aquifer.

Keywords: Complexe Terminal, Salinity, Hydrochemistry, Electrical Conductivity.

التوصيف الكيميائي للمياه الجوفية للطبقة المائية التابعة للمركب الطرفي في حوض ورقلة

الملخص

يحتوي الصحراء الجزائرية على خزانين جوفيين عميقين غير متجددين، هما الخزان القاري السفلي (Continental Intercalaire) والمركب الطرفي (Complexe Terminal)، يعلوهما من الأعلى مستوى مائي سطحي، مما يجعل المنطقة خزاناً هاماً للمياه الجوفية. في ورقلة، وهي واحة واسعة مزروعة منذ زمن بعيد، تُستغل هذه المياه بكثافة في الزراعة والصناعات الصغيرة، مما يزيد من حدة مشاكل الملوحة المعروفة مسبقاً.

يهدف هذا البحث إلى توصيف الخصائص الهيدروكيميائية وجودة مياه الشرب الخاصة بالمياه الجوفية التابعة للمركب الطرفي، والتي تتميز بملوحة مرتفعة (تتراوح الناقلية الكهربائية بين 4000 و6000 ميكروسيمنز/سم). وتُعدّ هذه الموارد المائية ضرورية لكنها هشة بالنسبة للتنمية الاجتماعية والاقتصادية في الجنوب الشرقي الجزائري.

ينقسم العمل إلى ثلاثة فصول تتناول الإطار الطبيعي، والمنهجية المتبعة، والتحليل الفيزيائي-الكيميائي.

أظهر تمثيل النتائج الهيدروكيميائية على مخطط بايبر (Piper) أن الوجه الغالب للمياه هو الوجه الكلوريدي الصوديومي لمياه المركب الطرفي (CT).

أما التحليل بالمركبات الرئيسية (ACP) لمياه المركب الطرفي، فقد بيّن وجود مجموعة واحدة مكوّنة من:

الناقلية الكهربائية (CE)، الكلوريدات (Cl^-)، الكبريتات (SO_4^{--})، الصوديوم (Na^+)، البوتاسيوم (K^+)، الكالسيوم (Ca^{++}) والمغنيسيوم (Mg^{++}).

وتمثل هذه المجموعة محور التمدن وتُظهر عمومًا أصلًا تبخريًا، يهيمن فيه المعدن الهاليت ($NaCl$)، وهو ما يميز عادةً المياه الجوفية لتكوين الميو-بليوسين (Mio-Pliocène).

الكلمات المفتاحية: المركب الطرفي، الملوحة، الهيدروكيميا، الناقلية الكهربائية.

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des abréviations	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la Région d'étude	3
I.1. Introduction :	4
I.2. Situation géographiques:	4
I.3. Géologie	5
I.4. Climatologie	6
I.4.1. La température	6
I.4.2. Les précipitations	7
I.3.3. L'Evaporation	7
I.4.4. Humidité relative	8
I.4.5. Le vent	9
I.4.6. Insolation	9

I.5. Hydrogéologie de la Cuvette d’Ouargla	10
1.5.1. Introduction :	10
I.5.2. Le système aquifère du Sahara septentrional	10
I.5.3. Hydrogéologie de la région d’Ouargla	17
I.6. Conclusion	17
ChapitreII : Methods ET materiel	19
II.1. Introduction	20
II.2. Mesure de pH Carbonates - Bicarbonates- Hydroxyles (OH)	20
II.2.1. PH	20
II.2.2. Conductivité électrique	21
II.2.3. Le résidu sec	22
II.2.4. Détection du taux de chlorures dans l’échantillon Principe	23
II.2.5. Sulfates (SO₄²⁻)	24
II.2.6. Méthode expérimentale	25
II.3. Conclusion	25
ChapitreIII : Hydrochimie	26
III.1. Introduction	27
III.2. Interprétation des résultats physico-chimiques	27
III.2.1. Les paramètres physiques	27

III.2.2. Les paramètres physiques	28
III.2.2.1. Les cations (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+, K^+)	28
III.2.2.2. Les anions (Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{--})	30
III.2.2.3. Titre alcalimétrique Complet CaCO_3	32
III..2.3. Classification chimique des eaux des nappes du CT	33
III.2.4. Traitement et analyse statistique des données hydrochimies des eaux de la nappe Complexe Terminal (CT)	34
III.2.4.1. Statistiques élémentaires	34
III.2.4.2. Analyse en composantes principales (ACP)	35
III.2.5. Etude des rapports caractéristiques	37
III.2.6. Indice d'échange de base (i.e.b.)	39
III.2.7. Conclusion	40
Conclusion générale	41
Références bibliographique	43
Résumé	47

Liste des abréviations

CT	Complexe Terminale
CI	Continental intercalaire
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
ANRH	Agence National des ressources en eau
ACP	Analyse des composants principales
TDS	Total Dissolve Solides
CE	Conductivité électrique

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure 01	Localisation Géographique de la cuvette d'Ouargla	4
Figure 02	Carte géologique de la région d'Ouargla	5
Figure 03	L'évolution des températures mensuelles (2007-2021	6
Figure 04	Évaporation moyennes mensuelles, interannuelles	8
Figure 05	Humidité relative moyenne mensuelle (mm)	8
Figure 06	Situation générale des aquifères du Sahara septentrional	11
Figure 07	Coupe hydrogéologique à travers le Sahara	12
Figure 08	Carte piézométrique de référence du CI (OSS ,2003)	13
Figure 09	La courbe expérimentale de longue durée à la base de la méthode du Theis	14
Figure10	La répartition spatiale de la Transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S) de la nappe de Moi-pliocène	15
Figure 11	La répartition spatiale de la perméabilité K de la nappe Moi-pliocène	16
Figure12	La répartition spatiale de la Transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S de la nappe sénonienne	16

Figure 13	Evolution du ph	27
Figure 14	Evolution de la conductivité électrique	28
Figure 15	Evolution du résidu sec	28
Figure 16	Evolution de calcium	29
Figure 17	Evolution du Magnésium	29
Figure 18	Evolution de Sodium	30
Figure 19	Evolution de potassium	30
Figure 20	Evolution des Chlorures	31
Figure 21	Evolution des Bicarbonates	31
Figure 22	Evolution des Sulfates	32
Figure 23	Evolution d'alcalimétrique complet CaCO_3	32
Figure 24	Diagramme de piper des eaux du Complexe Terminal (CT) Dans la Région d'Ouargla	34
Figure 25	Valeurs Propres des facteurs de Charge.	36
Figure 26	Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1- F2 des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région d'Ouargla.	37
Figure 27	Relation Na^+/Cl^-	38
Figure 28	Relation Na^+/CE	38
Figure 29	Relation Cl^-/CE	38
Figure 30	Indice d'échange de base pour différents Forages	39

Liste des photos

N°	Titre	page
Photo 01	PH-mètre	20
Photo 02 :	conductimètre	21
Photo 03 :	l'étuve	22
Photo 04:	la balance électronique	22
Photo 05 :	chloridomètre	23
Photo 06	: flame photomètre	24

Liste des tableaux

N°	Titre	page
Tableau 01	La répartition des températures mensuelles (2007-2021)	6
Tableau 02	Pluviométrie totale mensuelle de la région d'Ouargla (ANRH2024)	7
Tableau 03	Évaporation moyennes mensuelles période (1991-2006)	8
Tableau 04	Humidité relative moyenne de l'aire (station Ouargla ,1996-2014)	8
Tableau 05	Force du vent max moyen mensuelle en km/h (station d'Ouargla ,1996-2014)	9
Tableau 06	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Complexe Terminal (CT) – région d'Ouargla.	35
Tableau 07	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de la région d'Ouargla	35
Tableau 08	Poids factoriel des paramètres physicochimiques des eaux des forages dans la nappe du complexe terminal dans la région d'Ouargla	36
Tableau 09	Indice d'échange de base dans la nappe Complexe Terminale dans la région d'Ouargla	39

Introduction Générale

Introduction Générale

Les ressources en eau souterraine du Sahara sont principalement constituées de ressources non renouvelables, représentées par deux grands aquifères profonds : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal, surmontés par une nappe superficielle. Ces deux systèmes aquifères font du Sahara algérien une région riche en ressources en eaux souterraines.

La région d'Ouargla est l'une des plus anciennement cultivées. Elle s'étend sur une longueur de 150 km du sud au nord et sur une largeur de 20 à 30 km d'est en ouest (**Zeddouri A., 2009**).

La salinité des eaux et des sols d'Ouargla a fait l'objet de nombreuses études antérieures (**Jean Fabre, 2004 ; Zeddouri A., 2009 ; Nezli I.E., 2004 ; Djidel M., 2008**).

Grâce au développement de l'agriculture, notamment avec la présence d'une cinquantaine d'oasis, ainsi qu'à la petite industrie, la région d'Ouargla a acquis une position stratégique sur le plan économique. Ce développement a entraîné une augmentation de la demande en eau, largement satisfaite par les importantes quantités contenues dans les trois nappes aquifères : le Continental Intercalaire, le Complexe Terminal et la nappe superficielle.

La qualité des eaux de ces aquifères fait l'objet d'études approfondies. Sur la base des données collectées dans la région, l'objectif de ce travail est de définir les caractéristiques hydrochimiques, ainsi que d'évaluer la qualité des eaux de la nappe du Complexe Terminal.

Les eaux souterraines représentent la seule ressource en eau disponible dans la région du Sahara septentrional. Toutefois, leur qualité reste un sujet d'actualité nationale, constituant une préoccupation majeure pour la population et les agriculteurs. Elle est un facteur déterminant pour le développement démographique et économique des régions du sud-est de l'Algérie. Ce sujet a déjà fait l'objet de plusieurs travaux et publications (**Guendouz A. et al., 2003**).

Le présent mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation naturelle de la zone d'étude, en détaillant ses caractéristiques géographiques, géologiques, climatiques et hydrogéologiques.
- Le deuxième chapitre décrit les méthodes et le matériel utilisés pour mener ce travail.
- Le troisième chapitre porte sur la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe du Complexe Terminal (CT).

Chapitre I : Généralités sur la Région d'étude

I.1. Introduction :

Ce chapitre traite du cadre physique de la zone d'étude, en mettant en avant sa localisation géographique ainsi que ses caractéristiques climatiques et géologiques.

I.2. Situation géographique :

La wilaya d'Ouargla est située dans le sud-est de l'Algérie, au cœur du Sahara algérien (**Rezég**). Elle est entourée par Tamanrasset et Illizi au Sud, par les wilayas d'El Oued et Touggourt au Nord, Ghardaïa à l'ouest et par la Tunisie à l'Est (Figure.1). La cuvette d'Ouargla fait partie du grand bassin versant Sahara Septentrional, elle est située dans le lit d'Oued M'ya (Bas- Sahara, Algérie) . La région investiguée est une dépression alluvionnaire occupe une superficie de 25 289 km² (**Kharroubi, 2024**).

Géographiquement :

La cuvette d'Ouargla est repérée par les coordonnées (UTM, Clarke 1880) suivantes :

X min = 710 000 ; Y min = 3 530 000

X max = 730 000; Y max = 3 600 000

Elle s'étend ainsi sur une longueur d'environ **55 km**, orientée sud-ouest / nord-est, et couvre une superficie de l'ordre de **95 000 ha**. Elle est délimitée :

- au nord par **Sebkhet Saffiune**,
- à l'est par les ergs de **Touilet Arifdji**,
- au sud par les dunes de **Sedrata**,
- à l'ouest par le versant est de la **dorsale du M'Zab (Rezég)**.

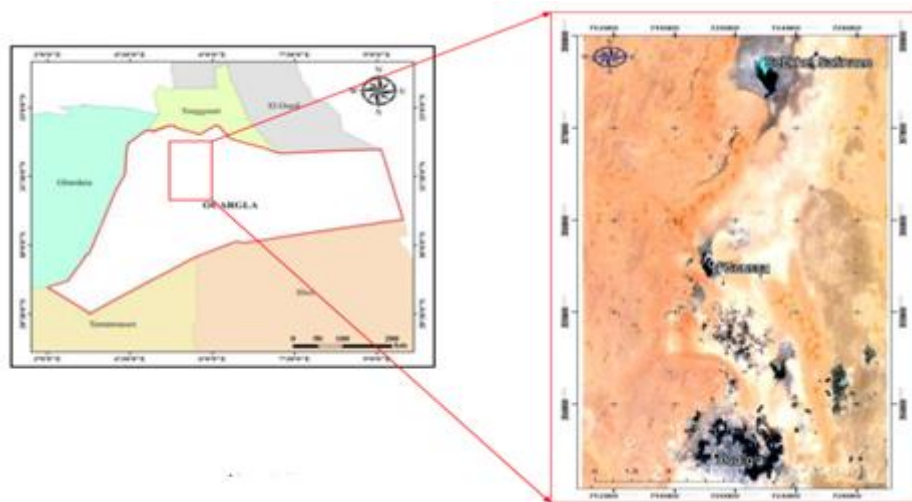


Figure N°01 : Localisation Géographique de la cuvette d'Ouargla (Kharroubi, 2024)

I.3. Géologie

Le territoire de la ville de Ouargla est situé dans l'immense bassin saharien, caractérisé par la prédominance de dépôts plio-quaternaires. Des affleurements éocènes et crétacés se rencontrent néanmoins à l'Est. Il est localisé dans une région très peu accidentée et stable du point de vue tectonique.

Trois régions distinctes peuvent être distinguées :

Le Grand Erg Oriental : vaste dépôt de sable éolien à l'Est et au Sud.

Au centre : région de vallée où prédominent les dépôts alluviaux.

Le plateau du M'Zab à l'Ouest.

Du point de vue lithologique et pétrographique, on rencontre dans les affleurements à travers le territoire de la région des alluvions actuelles, des sebkhas et des croûtes gypso-salines, des calcaires lacustres, des conglomérats, des calcaires marneux à rognons siliceux, des marnes et enfin des calcaires dolomitiques (**Berregui, 2013**).

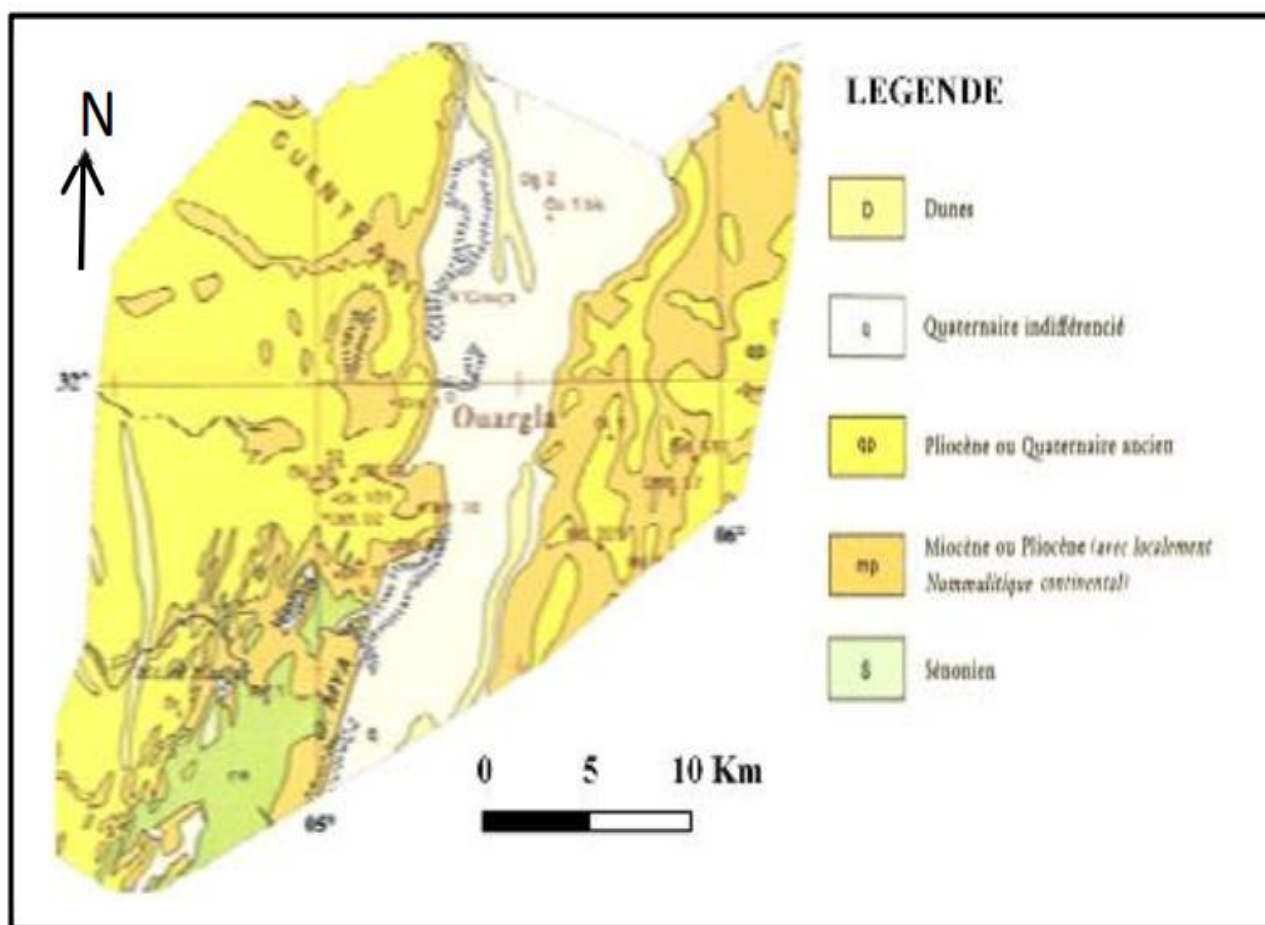


Figure N°02 : carte géologique de la région d'Ouargla (Belkacem et al)

D'après la carte géologique réalisée par B.G. Busson, le relief d'Ouargla est constitué de roches sédimentaires ainsi que d'alluvions et de colluvions dérivées de ces roches:

Marnes jaunâtres, plus ou moins gréseuses, salées ou gypseuses;

Calcaires ocre, gréseux ou marneux;

Argiles sableuses rouges à ocre, salées et gypseuses;

Grès, sables et conglomérats;

Calcaires lacustres;

Sables récents du Quaternaire (Berregui, 2013).

I.4. Climatologie

Le climat de la région d'Ouargla est particulièrement contrasté, malgré sa latitude relativement septentrionale. L'aridité se manifeste non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par une évaporation importante due à la sécheresse de l'air (Chaouki et al).

I.4.1. La température

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

L'analyse des températures a été réalisée à partir des données recueillies auprès de l'ONM pour la période 2007–2021 (Tableau 01).

Selon l'histogramme de la variation mensuelle des températures, la valeur maximale enregistrée est de 43,89 °C en juillet, tandis que la valeur minimale est de 5,2 °C en janvier.

La variation des températures moyennes (Figure 02) au cours de la période étudiée (2007–2021) montre clairement que le mois le plus froid est janvier et le mois le plus chaud est juillet.

Tableau01 : la répartition des températures mensuelles (2007-2021 (Kharroubi, 2024).

Janvier	5,2	19,45	12,33
Février	7,1	21,33	14,21
Mars	10,6	25,61	18,13
Avril	15,3	30,68	23,02
Mai	20,1	35,36	27,71
Juin	24,8	40,44	32,61
Juillet	28,1	43,89	35,98
Août	27,3	42,51	34,93
Septembre	23,8	38,25	31,03
Octobre	17,4	31,70	24,54
Novembre	10,3	24,33	17,31
Décembre	5,7	19,60	12,67

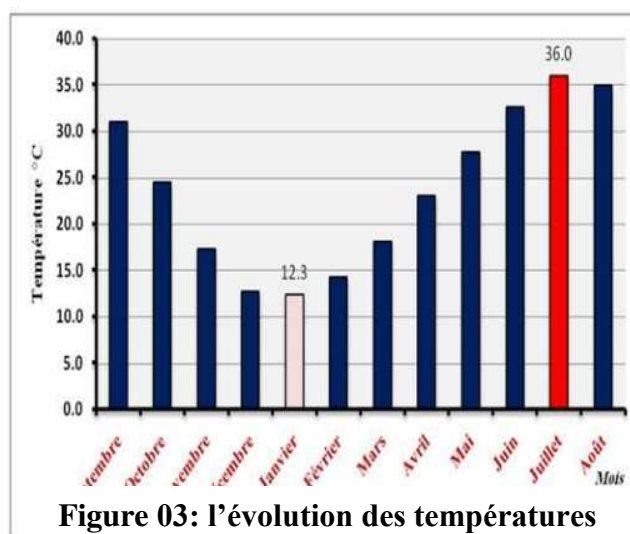


Figure 03: l'évolution des températures mensuelles (2007-2021)

I.4.2. Les précipitations :

Les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluie. Celles-ci sont caractérisées par leur faible importance quantitative, et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes.

L'analyse des moyennes mensuelles de pluie fait ressortir un maximum en mars, avec un minimum en juillet et août. Toutefois, il faut noter que ces valeurs mensuelles peuvent fortement varier d'une année à l'autre (**Nezli**).

Tableau 02 : pluviométrie totale mensuelle de la région d'Ouargla (ANRH2024)

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
2010-2011	0.4	4.1	0	0	0	0.1	7.3	3.8	0.1	0	0	0	15.8
2011-2012	1.3	6.6	0	0	12	4.7	0.4	4	0	0	0	0	29
2012-2013	0.6	0.1	0	0	1.5	0	0	11.1	0	0	0	0	13.3
2013-2014	0	0	0.7	24.9	0	0.2	0	0	10.8	1.6	0	0	38.2
2014-2015	0	0	10	2.5	1.6	12	0.5	0	0	0	0	0	26.6
2015-2016	0.4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.4
2016-2017	0.3	0	0	6.2	0	0	18.8	0.7	0	0.5	0	0	26.5
2017-2018	6.2	15	2	3	0.8	7	0	0	0	0	0	0.5	34.5
2018-2019	26.4	0	0	0	0	0	18.4	2.4	3.4	0	0	0	50.6
2019-2020	0	0	0	0	0	0	2.6	4.2	3.1	0	0	0	9.9
2020-2021	3.2	0	0	0	0.7	0	0	0	9.7	0	0	0	13.6
2021-2022	0	0.5	28	0	0	0	0	1.5	0.3	0	0	0	30.3
2022-2023	0	0	0	0	1.1	1.6	0	0	0.3	0	0	6.3	9.3
2023-2024	0	0	0	1.5	0	0	0.5	66	2				

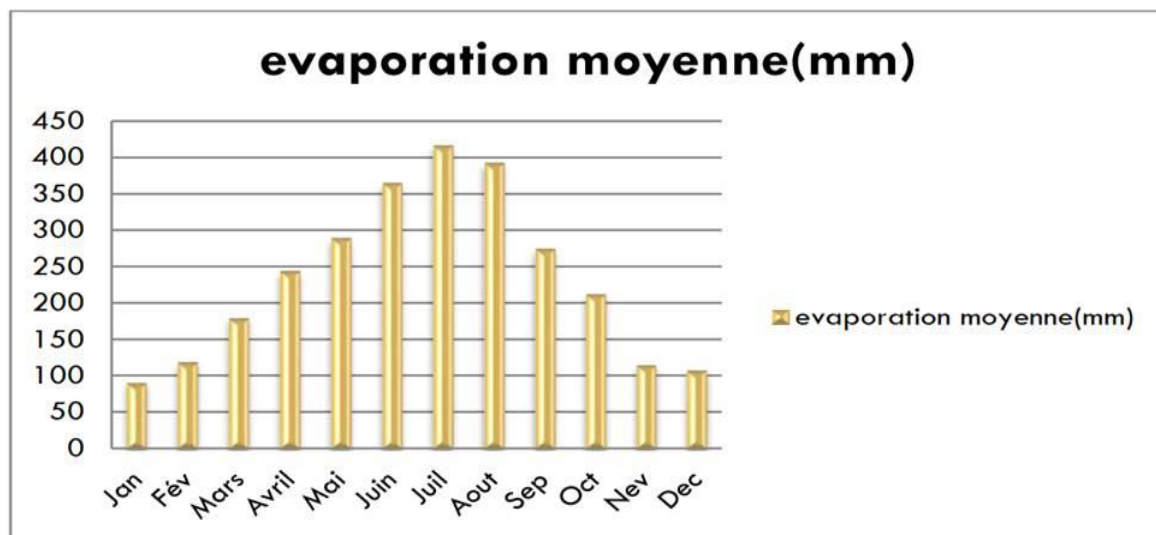
I.3.3. L'Evaporation :

L'évaporation est définie comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur. Il s'agit de l'évaporation physique des plans d'eau.

Dans la région d'Ouargla, l'évaporation a une moyenne de l'ordre de 266,39 mm/an, avec un minimum de 90,8 mm en janvier et un maximum de 415,6 mm en juillet (**Nedjmi & Maamri**)

Tableau03 : évaporation moyennes mensuelles période (1991-2006)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Octo	Nov	Déc
Evapo.moy(mm)	90,8	119,5	179,5	244,4	289,2	364,8	415,6	392,4	274,8	212,8	115,2	107,9

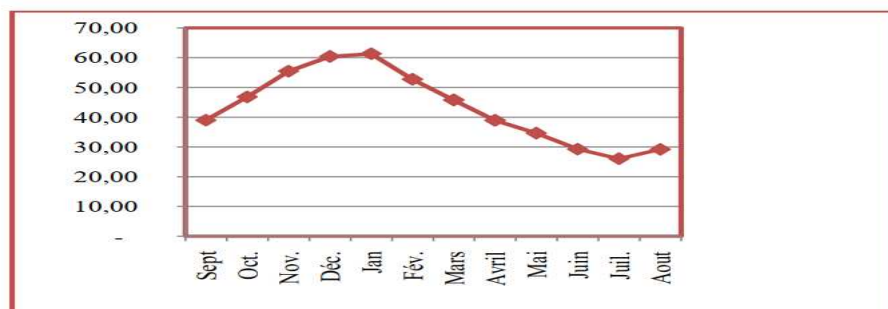
**Figure 04 : évaporation moyennes mensuelles, interannuelles****I.4.4. Humidité relative :**

L'humidité relative est le rapport entre la pression réelle de la vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante à la même température.

Le tableau ci-dessous présente la moyenne mensuelle de l'humidité mesurée à Ouargla pendant la période 1996 – 2014(Khouildi)

Tableau04 : humidité relative moyenne de l'aire (station Ouargla ,1996-2014)

mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
H en %	38,97	46,79	55,43	60,38	61,27	52,71	45,76	38,92	34,63	29,25	26,04	29,17

**Figure N° 05 : humidité relative moyenne mensuelle (mm)**

La station d'Ouargla (Période 1996-2014)

D'après les données du tableau, les mois de décembre et janvier enregistrent les valeurs maximales de l'humidité relative, avec respectivement 61,27 % et 60,38 %. En revanche, le mois de juillet présente une valeur minimale de 34,63 %.

La faiblesse des valeurs de l'humidité relative indique une sécheresse atmosphérique durant une grande partie de l'année.

L'humidité moyenne annuelle ne dépasse pas 43,27 % (**Khouildi**)

I.4.5. Le vent :

Le vent est considéré comme le paramètre climatique le plus régulier dans la région d'Ouargla. Il est caractérisé par sa direction et sa vitesse.

Les vents jouent, et continuent de jouer, un rôle primordial dans la formation des reliefs et des sols à travers l'érosion éolienne, qui transporte les particules sableuses et les dépose sous forme de dunes de sable.

Tableau N°05 : force du vent max moyen mensuelle en km/h (station d'Ouargla, 1996-2014)

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Vent en Km/h	60,53	52,27	51,58	46,72	52,08	57,33	61,12	73,87	70,31	56,95	64,64	58,44

On remarque que les vents les plus forts soufflent entre les mois d'avril et de juillet, avec un maximum de 73,87 km/h enregistré en mai. Durant le reste de l'année, la vitesse du vent reste faible, avec un minimum de 46,72 km/h.

La vitesse moyenne annuelle du vent est de 58,81 km/h.

En général, les vents les plus fréquents sont orientés du sud vers le nord (S-N) et du sud-ouest vers le nord-est (SO-NE). En revanche, les vents orientés vers le sud et le sud-ouest ne dominent qu'au mois de janvier.

On peut supposer que l'orientation grossièrement nord-sud de la vallée influence la direction des vents (**Khouildi**).

I.4.6. Insolation

Le maximum d'insolation est enregistré au mois de juillet avec 331,83 heures, tandis que le minimum est de 208,17 heures au mois de décembre. La moyenne annuelle est de 270,63 heures (**Hammou**).

I.5. Hydrogéologie de la Cuvette d'Ouargla

1.5.1. Introduction :

Le sud algérien renferme d'importantes réserves d'eaux souterraines. Cette eau est regroupée en deux grands aquifères : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu du système aquifère du Sahara septentrional (SAAS), en abordant sa superficie, son étendue, ses limites, sa recharge et la piézométrie des nappes exploitées. Nous nous basons essentiellement sur celles du Complexe Terminal **Haned**).

1.5.2. Le système aquifère du Sahara septentrional

Le système aquifère du Sahara septentrional Les études géologiques et géophysiques permettent de localiser les aquifères de la région étudiée. L'étude hydrogéologique comporte dans son contenu plusieurs éléments répartis en deux étapes essentielles :

- Définition des différentes nappes aquifères de la région et l'évolution des niveaux piézométriques.
- Détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères (transmissivité, perméabilité.....).

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye. Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) (**Bencheikh, Mansouri, & Bouselsal, 2019**).

- **Le Continentale intercalaire :**

Le réservoir du Continental Intercalaire (CI) est contenu dans les formations continentales du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien). Il est composé essentiellement de grès, de sables et d'argiles. Ce réservoir s'étend sur environ 600 000 km². Il est continu du nord au sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et au Hoggar, et d'ouest en est, depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert libyen.

Au nord-est de la dorsale du M'Zab, le toit de l'aquifère, constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomanién, est continu sur l'ensemble du bassin.

La profondeur de l'aquifère augmente du sud vers le nord : d'environ 1000 m dans le Bas-Sahara à environ 2000 m sous les chotts, ce qui provoque une forte charge piézométrique sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué de formations argilo-sableuses, argileuses ou carbonatées, d'un âge de plus en plus récent du sud vers le nord (**Kharroubi, Bouselsal, & Hadj Said**)

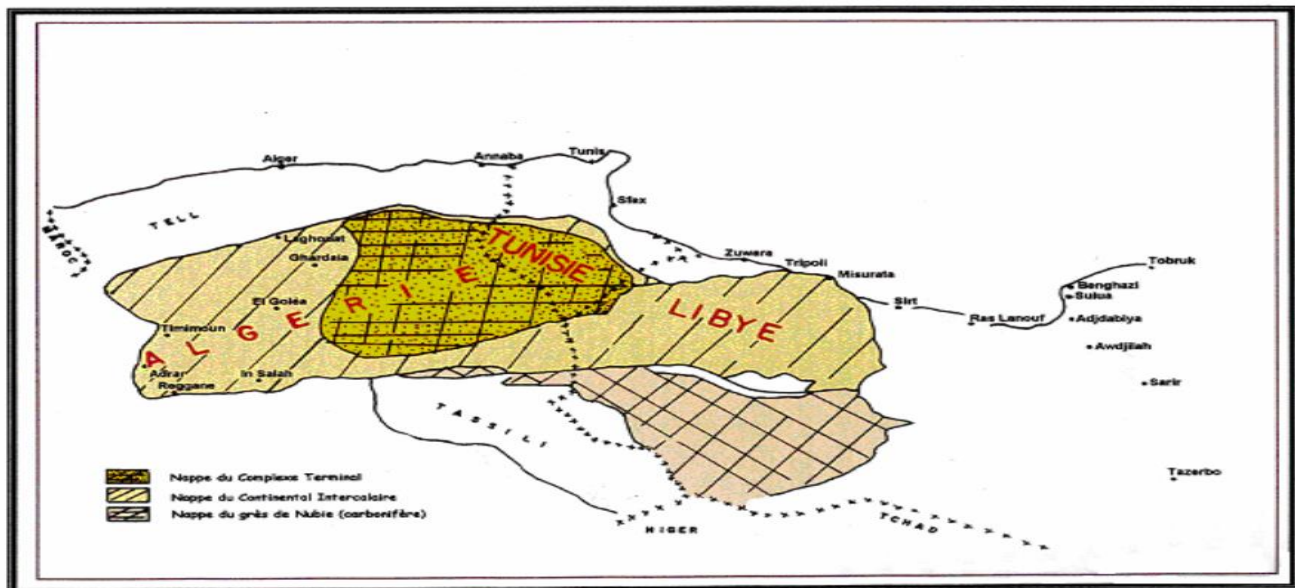


Figure N°06 : Situation générale des aquifères du Sahara septentrional

- **Limites et morphologie du Continental Intercalaire**

Le Continental Intercalaire est limité au nord par l'Atlas Saharien, à l'ouest par l'axe Béchar–Reganne, et au sud par l'axe Reganne–Aïn Amenas (Figure 07). À l'est, il s'étend au-delà des frontières algéro-libyenne et algéro-tunisienne. Il est partagé par la dorsale du M'Zab en deux bassins :

Le bassin occidental

Le bassin oriental (**Abdeldjebar**).

- **Exutoire**

Les zones d'exutoire sont :

- * Les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt ;
- * L'exutoire tunisien, marqué par la faille d'El-Hamma ;
- * L'exutoire libyen, situé au niveau d'Aïn Tawargha(**Menad**).

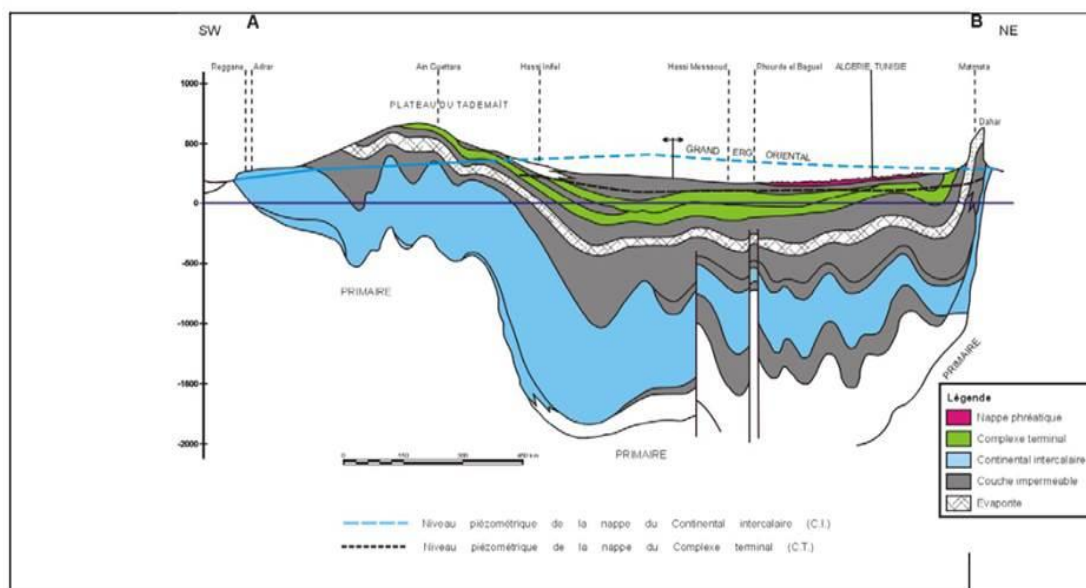


figure N°07 : coupe hydrogéologique à travers le Sahara (Youcef)

• Etude piézométrique du (CI) :

Étude piézométrique du Continental Intercalaire (CI)

D'après la carte piézométrique établie par l'étude de l'OSS (2003), l'écoulement général des eaux se fait du sud-ouest (SW) vers le nord-est (NE).

La carte piézométrique du niveau albien montre que le niveau piézométrique moyen, dans la cuvette de Ouargla et ses environs (Haoud Berkaoui, Guellala, etc.), est de l'ordre de 330 m. L'écoulement des eaux de l'Albien se fait localement vers les zones de forte exploitation, comme la ville de Ouargla.

Concernant la recharge, l'essentiel des ressources de ce vaste réservoir provient des infiltrations d'eau survenues durant les périodes pluvieuses du Quaternaire. Il s'agit donc d'une ressource fossile. Toutefois, une recharge actuelle s'effectue de façon directe par infiltration des ruissellements sur les zones d'affleurement, notamment : au piémont de l'Atlas Saharien au nord-ouest, sur le massif du Dahar à l'est, sur les rebords ouest (Touat et Gourara), et sur le plateau de Tadmaït au sud.

Au niveau du Grand Erg Occidental, l'infiltration se fait de manière indirecte, à travers les sables dunaires et, par endroits, à travers les formations du Complexe Terminal (CT), lorsqu'il n'existe pas de séparation imperméable entre les deux réservoirs (Bencheikh, Mansouri, & Bouselsal, 2019).

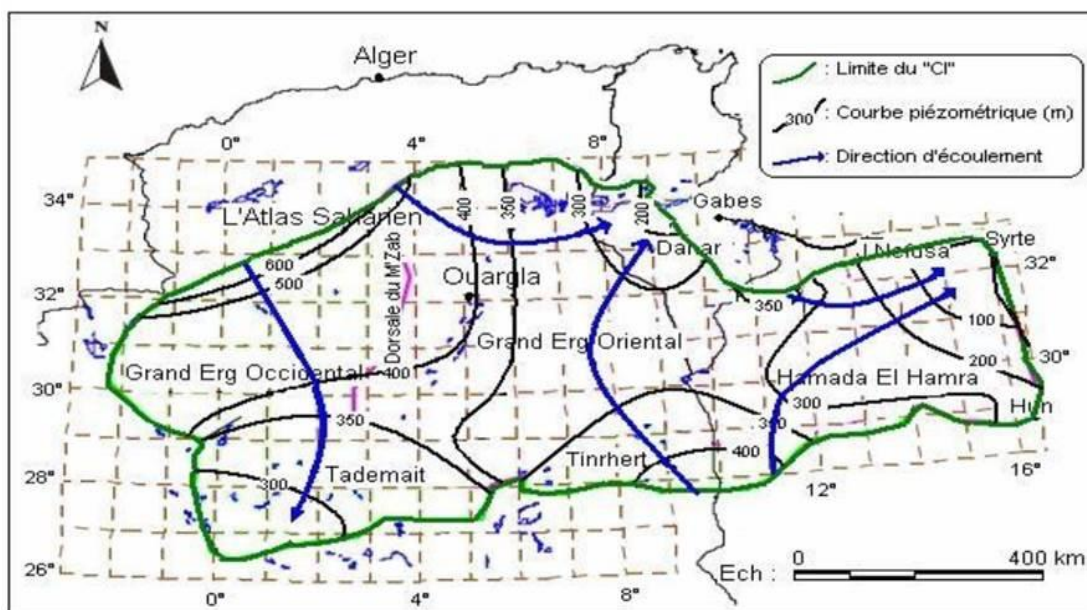


Figure N° 08 : carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003) (**Bennahia, Boulfoul, & Gasmi, 2015**)

- **Caractéristiques:**

* L'aquifère devient de plus en plus profond vers le nord-est, où le toit de la nappe se situe entre 1500 et 2000 m. En périphérie, la nappe est ascendante, peu profonde et à température modérée.

* La nappe affleure dans les régions d'Adrar et d'Aïn Salah. Les eaux y sont chaudes, notamment dans le nord-est du bassin, avec une température moyenne de 60 °C.

* L'alimentation est faible, estimée à environ 268 millions de m³/an, provenant principalement des épandages des oueds descendant de l'Atlas Saharien et de l'infiltration des pluies dans le Grand Erg Occidental.

* En plus des foggaras et des forages, qui constituent les exutoires artificiels de la nappe albienne, l'eau s'écoule principalement vers le sud et l'ouest, en direction des zones évaporatoires du Touat, du Gourara et du Tidikelt. Une autre direction d'écoulement s'oriente vers le nord-est, vers la zone côtière tunisienne, à travers les failles d'El Hamma et de Médenine (**Limane, 2016**).

- **La nappe du complexe terminal (CT) :**

La nappe du Complexe Terminal (CT) se situe dans le Sahara occidental et s'étend sur une superficie d'environ 350 000 km², avec une profondeur oscillant entre 100 et 500 m.

Cette nappe regroupe deux systèmes aquifères, appelés : la nappe des sables et la nappe des calcaires.

Le Complexe Terminal est constitué de formations d'âges et de lithologies différents (**Hmidi & Hamza**). À la base, on trouve le Sénonien-Éocène carbonaté, et au sommet, le Mio-Pliocène sablo-argileux (**Haned**).

- **La nappe du mio-pliocène**

L'exploitation de la nappe du Mio-Pliocène est extrêmement ancienne. Elle se trouve à une profondeur variant entre 60 et 200 m. Sa salinité varie entre 1,8 et 4,6 g/l, tandis que sa température est d'environ 25 °C. L'eau s'écoule du sud-ouest vers le nord-est, en direction du Chott Melrhir (**Rezeg**).

- **Piézométrie de Mio-pliocène**

Les cartes piézométriques ont été établies à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3. La carte piézométrique de 2014 montre que la partie amont de la nappe du Mio-Pliocène se situe au sud-ouest, au niveau de Khefdji, avec des altitudes comprises entre 128,8 m et 142,7 m (Figure 09). En revanche, la partie aval se situe vers le nord-ouest, au niveau de N'Goussa, avec une altitude d'environ 112 m. La direction d'écoulement de l'eau est donc orientée du sud-ouest vers le Nord-Est.

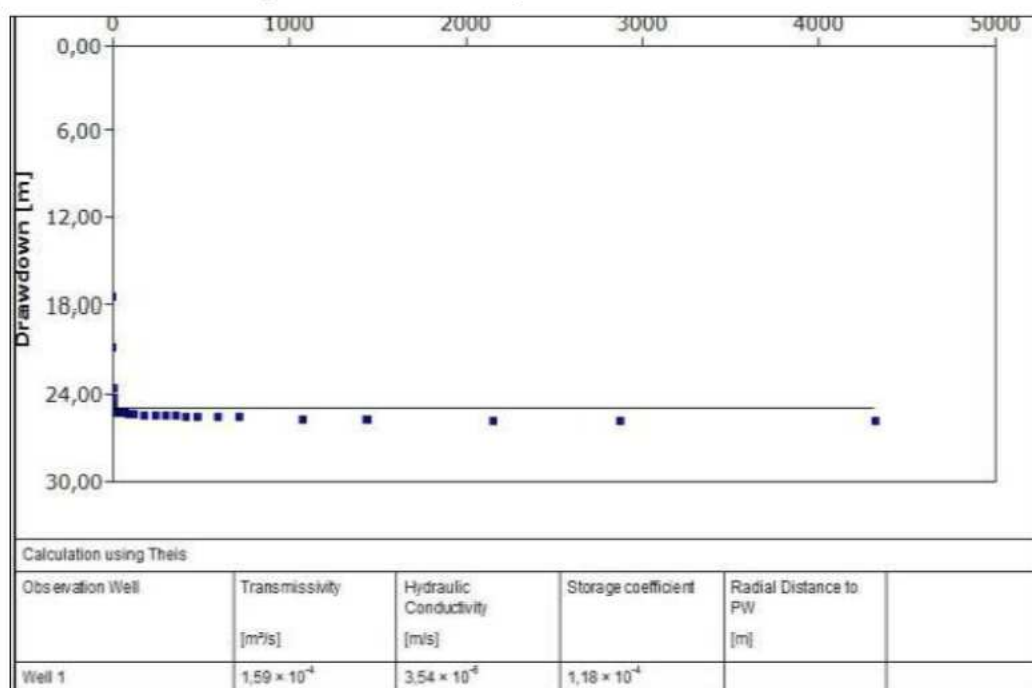


Figure N °09 : la courbe expérimentale de long durée à la base de la méthode du Theis.

- **Carte piézométrique du Mio-Pliocène (2017)**

La carte piézométrique du Mio-Pliocène (2017) montre que la côte supérieure de la nappe se situe au sud-ouest, au niveau de Bamendil et Rouissat, avec une altitude de 170,4 m (Figure 10). En revanche, les points les plus bas se trouvent vers le nord-est, dans quelques forages à proximité de la ville d'Ouargla, avec une altitude de 44,76 m.

Les dépressions piézométriques observées sur les cartes confirment la surexploitation de l'aquifère. Le gradient hydraulique est passé de 2,5 ‰ à 4 ‰ lors de la campagne de 2014, et de 4 ‰ à 7 ‰ lors de celle de novembre 2017 (**Kharroubi, 2024**).

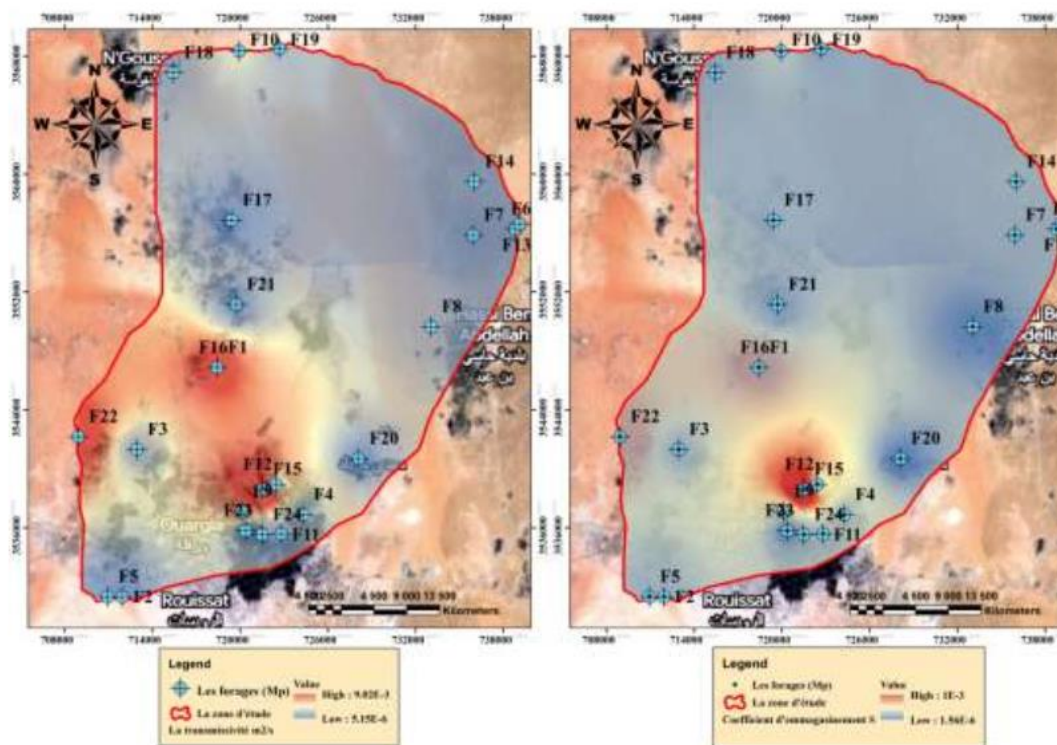


Figure 10: la répartition spatiale de la Transmissivité (T) et le coefficient d'emménagement (S) de la nappe de Moi-pliocène

• Nappe du sénonien

Cette seconde nappe artésienne de la vallée de l'Oued Mya se caractérise par une salinité variant entre 1,8 et 4,4 g/l, et une température avoisinant les 30 °C. Elle se trouve à des profondeurs comprises entre 180 et 350 m (**Bouguetit & Benhamida, 2015**).

• Piézométrie de Sénonien

La carte piézométrique de la nappe sénonienne de 2014 (Figure 11) montre que le sens d'écoulement de la nappe est orienté du sud-ouest vers le nord-est, ainsi que du nord-ouest vers l'est. Dans la partie sud de la cuvette, l'eau s'écoule du point le plus haut (249,3 m), situé au sud-ouest de la ville d'Ouargla, vers le point le plus bas (45,19 m), situé au centre de la ville. Les zones de forte exploitation se trouvent principalement dans la ville d'Ouargla.

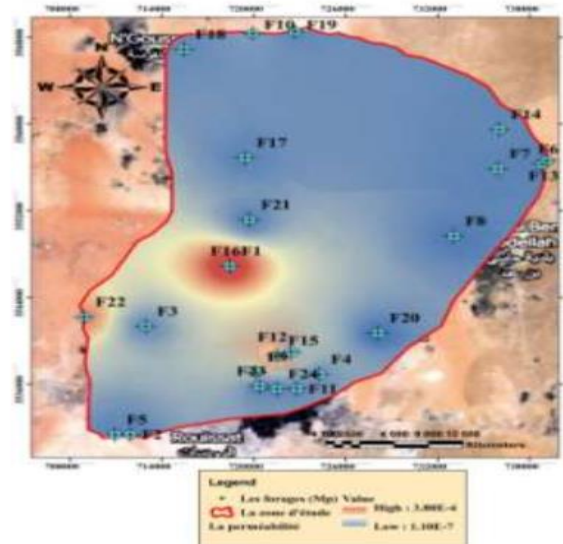


Figure N°11 : la répartition spatiale de la perméabilité K de la nappe Moi-pliocène

- **Carte piézométrique du Sénonien (2017)**

La carte piézométrique du Sénonien de 2017 (Figure 12) présente une configuration similaire à celle réalisée en 2014. La partie supérieure de la nappe se situe au sud-ouest de Rouissat et Khedji, à une altitude de 155,5 mètres. En revanche, la partie basse de la nappe se trouve au centre-ville (41 m) ainsi qu'au sud-est (70,21 m), indiquant une diminution notable du niveau piézométrique. (Kharroubi, 2024)

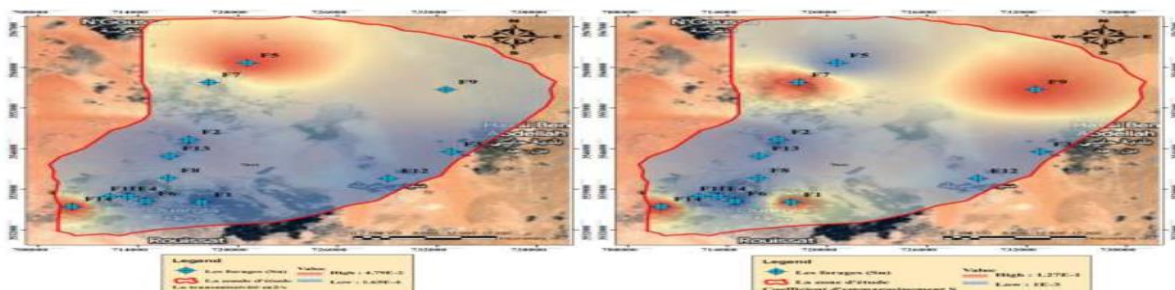


Figure 12 : la répartition spatiale de la Transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S de la nappe sénonienne

- **Alimentation à partir de l'Atlas saharien :**

Entre Biskra et la frontière tunisienne, les courbes isopièzes sont parallèles à l'Atlas, ce qui suggère que l'alimentation de la nappe peut provenir de deux origines possibles :

À travers la flexure sud-atlasique (Hammou)

- **Alimentation par le plateau de Tadmaït et de Tinhert**

Les eaux infiltrées sur les plateaux de Tadmaït et de Tinhert s'écoulent vers le nord et convergent vers l'exutoire principal : la zone des chotts Marouane et Melrhir (**Bencheikh, Mansouri, & Bouselsal, 2019**).

- **Alimentation par les monts du M'Zab :**

L'alimentation de la nappe des sables mio-pliocènes se fait lors des crues exceptionnelles des oueds N'sa et M'Zab, qui atteignent la sebkha Safioune au nord de la cuvette. Le versant oriental du M'Zab présente un réseau très dense d'oueds, ce qui joue un rôle important dans l'alimentation de la nappe (**Khouildi**).

- **Les exutoires**

Les exutoires sont constitués principalement des grandes cuvettes d'évaporation : le Chott Melrhir et le Chott Merouane (**Bencheikh, Mansouri, & Bouselsal, 2019**).

I.5.3. Hydrogéologie de la région d'Ouargla:

Le complexe terminal à l'échelle de la cuvette :

Le système aquifère du complexe terminal, à l'échelle de la cuvette, est composé des formations lithostratigraphiques reconnues à l'échelle du bassin, à savoir : Les sables argileux du Mio-Pliocène ; Les formations carbonatées du Sénonien.

D'après l'ANRH (2010), des centaines de forages ont été réalisés :

123 forages exploités dans le Mio-Pliocène ;

28 forages exploités dans le Sénonien-Éocène.

Dans la zone d'étude, le complexe terminal est composé de deux nappes :

La nappe Sénono-Éocène : elle se situe entre 120 et 200 mètres de profondeur. Elle est formée de calcaires poreux à silex très coquilliers, gris jaunâtre, avec des intercalations de marnes blanches et de dolomies.

La nappe des sables Mio-Pliocènes : elle se situe entre 20 et 100 mètres de profondeur. Elle est constituée de sables fins à grossiers, parfois graveleux, avec des intercalations de calcaires blancs tendres, de marnes sableuses, d'argiles sableuses roses, de grès et de gypses (**Limane, 2016**).

I.6. Conclusion:

La région d'Ouargla est située dans le sud de l'Algérie, à 650 km de la capitale Alger, et couvre une superficie de 163 230 km². Elle se caractérise par des formations géologiques s'étendant du Cambrien au Quaternaire. La zone d'étude fait partie du Bas Sahara et se présente sous la forme d'une cuvette synclinale dissymétrique. Elle est constituée de dépôts sédimentaires alternant entre terrains perméables et imperméables. Les formations perméables constituent un important réservoir hydrique, dont le complexe terminal représente l'objet principal de cette étude.

La région connaît un climat extrêmement aride, avec des précipitations très faibles et irrégulières. Elle est également marquée par une forte évaporation, l'un des facteurs climatiques dominants. Les températures sont très élevées, avec d'importantes amplitudes thermiques. Enfin, les vents dominants soufflent dans la direction sud-ouest / nord-est (SW-NE).

Le Sahara algérien constitue un vaste réservoir d'eaux souterraines. Ce réservoir est formé de deux principaux systèmes aquifères : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal.

Dans notre zone d'étude, la nappe du Continental Intercalaire se caractérise par une profondeur variant entre 1100 et 1400 mètres. Elle est exploitée avec un débit d'environ 100 l/s.

Le Complexe Terminal, quant à lui, comprend deux sous-nappes :

- La nappe Sénonien–Éocène, située entre 120 et 200 mètres de profondeur ;
- La nappe Mio-Pliocène, située entre 20 et 100 mètres de profondeur.
- L'écoulement de cette dernière nappe se fait du sud-ouest vers le Nord-Est.

ChapitreII:

Methods et materiel

II.1. Introduction :

L'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) est un établissement public à caractère administratif, à vocation scientifique et technique. Elle a été créée par le décret n°81/167 du 25 juillet 1981, complété par le décret n°129 du 19 mai 1987. Cette agence est chargée de l'analyse des eaux de toutes sortes. Après prélèvement des échantillons, ceux-ci sont analysés à travers divers calculs permettant de déterminer avec précision les minéraux qu'ils contiennent. Les résultats de ces analyses sont en suite enregistrés.01

II.2. Mesure de pH Carbonates - Bicarbonates- Hydroxyles (OH)

II.2.1. pH

Définition du pH: Le pH est une mesure qui permet de déterminer si un liquide est acide, neutre ou basique.

Principe : Les ions carbonates (CO_3) n'existent qu'à un pH supérieur à 8,3, tandis que les bicarbonates (HCO_3) sont présents dans une plage de pH comprise entre 4,4 et 8,3.

Lors d'un dosage acido-basique, couplé à une mesure du pH, on peut identifier à quel moment ces ions sont encore présents ou ont disparu dans l'échantillon (Annamalai & Hariharan, 2023 ; Li et al., 2022).



Photo01 :PH-mètre

Description de l'appareil : L'appareil de mesure du pH fonctionne en mesurant la différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans la solution.

L'électrode de référence possède un potentiel constant, tandis que l'électrode de verre a un potentiel qui varie de manière linéaire en fonction du pH de la solution.

II.2.2. Conductivité électrique

Définition CE : La conductivité électrique est définie en siemens par mètre u (S.m). Il s'agit du rapport de la densité de courant par l'amplitude du champ électrique. On mesure la conductivité électrique avec un conductimètre. La conductivité électrique est désignée par la lettre sigma

Principe de mesure de la conductivité :

La conductivité mesure la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. Elle dépend des ions présents. On applique un courant alternatif entre deux électrodes et on mesure la résistance. Cette valeur est convertie en conductivité (Zhang et al., 2023 ; Ahmed & Kumar, 2022).

Appareil de mesure (conductimètre):



Photo02 : conductimètre

II.2.3. Le résidu sec :

Est la quantité de matière solide (dissoute ou en suspension) qui reste après évaporation complète de l'eau contenue dans un échantillon liquide.

Principe: Le principe consiste à chauffer une quantité connue d'un échantillon 1050C jusqu'à évaporation complète de l'eau. Le résidu restant, après séchage et refroidissement, est pesé pour déterminer la concentration en matière sèche (résidu sec) dans l'échantillon (**Rodier et al., 2009**).



Photo03 : l'étuve



Photo04: la balance électronique

II.2.4. Détection du taux de chlorures dans l'échantillon Principe :

L'ion chlorure (Cl^-) est un des ions négatifs majeurs présents dans les eaux naturelles. Lorsqu'il est associé au sodium, il forme le chlorure de sodium (sel de table), ce qui donne à l'eau un goût salé. Les sels de chlorures se distinguent par leur forte solubilité dans l'eau (APHA, 2017).

Réactifs:

Solution saturée de thiocyanate mercurique : Dissoudre 2 g de $\text{Hg}(\text{SCN})_2$ dans 2 litres d'eau bi distillée. Solution d'alun ferrique :

Dissoudre 67g d'alun ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{NH}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ dans 430 ml d'acide nitrique concentré, puis compléter le volume à 1000 ml avec de l'eau distillée.

Solutions étalons de chlorures:

Prélever successivement 100, 80, 65, 50, 35, 20, 10 et 5 ml de la 1^{ère} mère contenant des ions Cl^- , solution 1000 ml avec de l'eau distillée pour obtenir des solutions étalons de concentrations croissantes.



Photo05 :chloridomètre

II.2.5. sulfates (SO_4^{2-}) :

Concernant les ions sulfates (SO_4^{2-}), la méthode de travail reste similaire. Mais les réactifs utilisés sont différents.

Spectrométrie de flamme spectrophotométrie d'émission atomique :

La spectrométrie de flamme est une méthode d'analyse permettant de déterminer la concentration de certains cations métalliques (comme Ca^{2+} , Na^+ , K^+) en mesurant l'intensité de la lumière émise par ces ions lorsqu'ils sont excités dans une flamme.

Lorsqu'une solution contenant des ions métalliques est introduite dans une flamme, les atomes s'excitent sous l'effet de la chaleur et émettent une lumière caractéristique.

Chaque élément émet une lumière à une longueur d'onde spécifique. L'intensité de cette lumière est proportionnelle à la concentration de l'ion dans l'échantillon.

On compare cette intensité à celle obtenue avec des solutions étalons de concentrations connues (Skoog et al., 2017)



Photo06: flame photomètre

II.2.6. Méthode expérimentale :

- Préparer des solutions étalons contenant des concentrations connues de Ca^{2+} , Na^{+} , et K^{+} .
- Allumer l'appareil et stabiliser la flamme.
- Rincer le nébuliseur avec de l'eau distillée.
- Introduire successivement les solutions étalons dans la flamme et noter l'intensité lumineuse émise.
- Tracer une courbe d'étalonnage (intensité vs concentration).
- Introduire ensuite l'échantillon inconnu
- Lire l'intensité lumineuse mesurée et déduire la concentration à l'aide de la courbe d'étalonnage.

II.3. Conclusion :

En définitive, ce stage au sein du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H) d'Ouargla a été une expérience enrichissante à plusieurs niveaux. Il nous a permis non seulement d'approfondir nos connaissances théoriques acquises à l'université. Mais aussi de les mettre en pratique dans un environnement professionnel réel. Grâce à cette immersion, nous avons pu corriger plusieurs idées préconçues et mieux comprendre certains concepts qui nous semblaient auparavant flous. Ce contact direct avec les équipements modernes et les techniques d'analyse de l'eau a considérablement élargi notre vision du domaine. Ainsi, cette formation nous a dotés d'un bagage solide et précieux, qui renforcera sans aucun doute notre parcours académique et professionnel. Nous espérons vivement pouvoir renouveler ce type d'expérience pour continuer à progresser et à nous perfectionner.²

ChapitreIII :

Hydrochimie

III.1. Introduction :

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour (**Hem ,1985**). Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques (Ca^{++} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^-).

La concentration de ces éléments naturels est conditionnée par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (**Droubi et al ., 2005**). L'intérêt principal de cette partie est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la nappe Complexe Terminal dans la région d'Ouargla et sa distribution dans l'espace et son évolution dans le temps.

L'interprétation des analyses hydrochimiques est basée sur les données collectées en 2025 pour les nappes du CT.

III.2. Interprétation des résultats physico-chimiques :

III.2.1. Les paramètres physiques :

➤ Le potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du potentiel d'hydrogène (pH) varient légèrement de 7.22 à 7.96 pour le complexe terminal. Elles restent aux normes algériennes (Figure13).

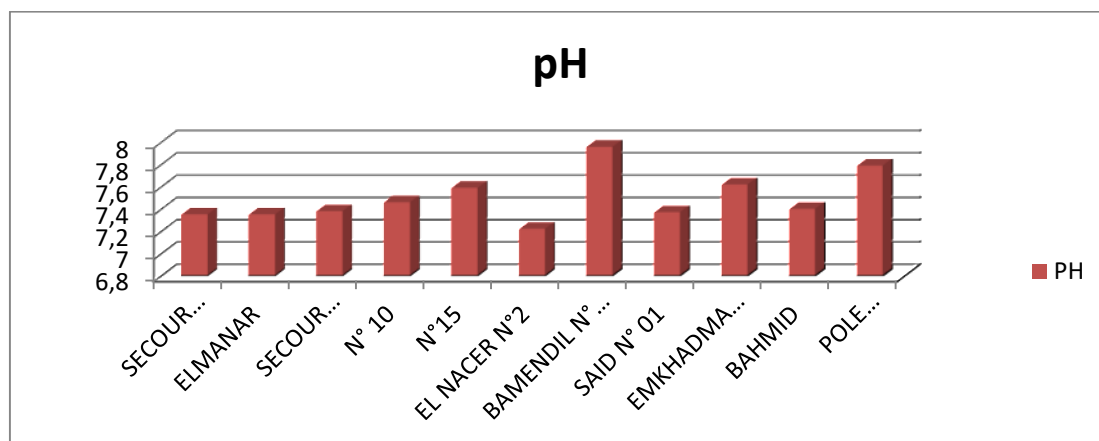


Figure 13 : Evolution du ph

La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) du Complexe Terminal varie entre 2460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 6400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les eaux de la nappe du Complexe Terminal ont une forte minéralisation qui dépasse dans la plupart des forages les normes algériennes.

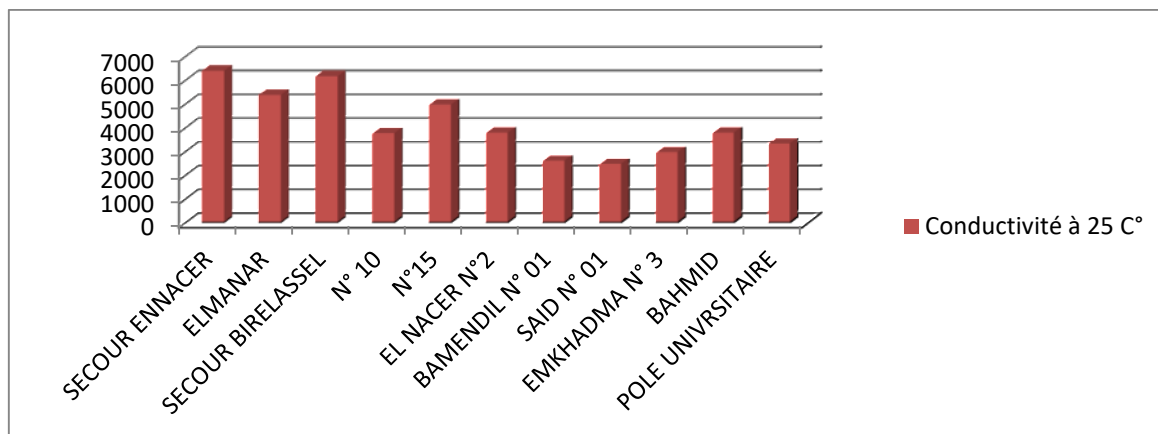


Figure 14 : Evolution de la conductivité électrique

Le résidu sec (TDS)

Le résidu sec des eaux souterraines du complexe terminal varie entre de 250 à 4600 mg/l (Figure 15).

On remarque que les concentrations dans la plupart des forages dépassent les normes algériennes.

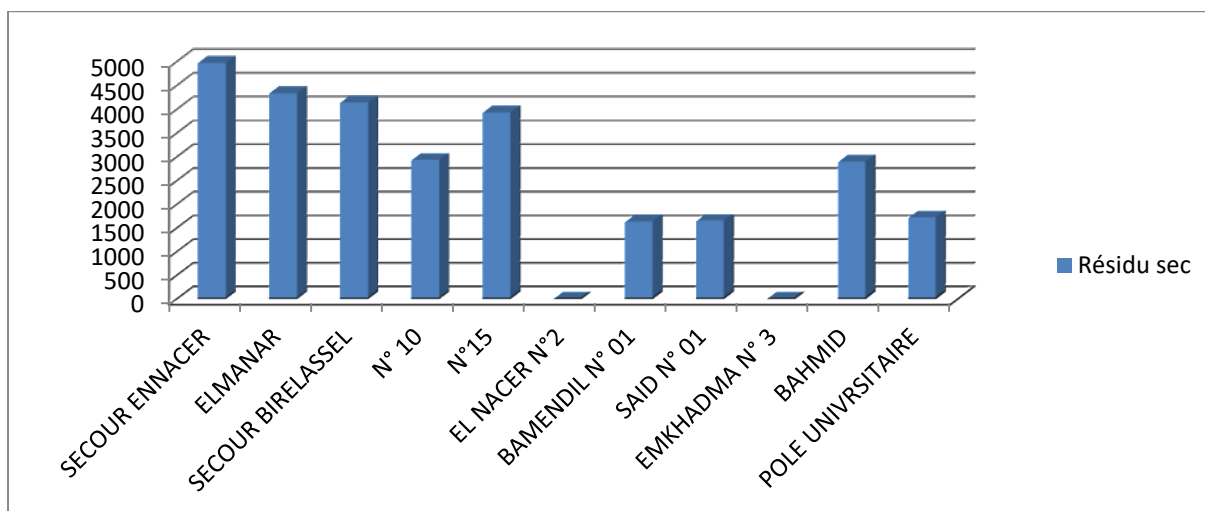


Figure 15 : Evolution du résidu sec

III.2.2. Les paramètres chimiques :

III.2.2.1. Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)

➤ Le Calcium (Ca^{++})

Les niveaux de calcium (Ca^{2+}) varient entre 140 et 360.72 mg/l selon les échantillons analysés, avec des augmentations notables dans certains sites, traduisant une interaction de l'eau avec les roches calcaires ou gypseuses. Des concentrations élevées de calcium peuvent provoquer la dureté de l'eau, ce qui impacte son usage domestique et industriel (Appelo & Postma, 2020).

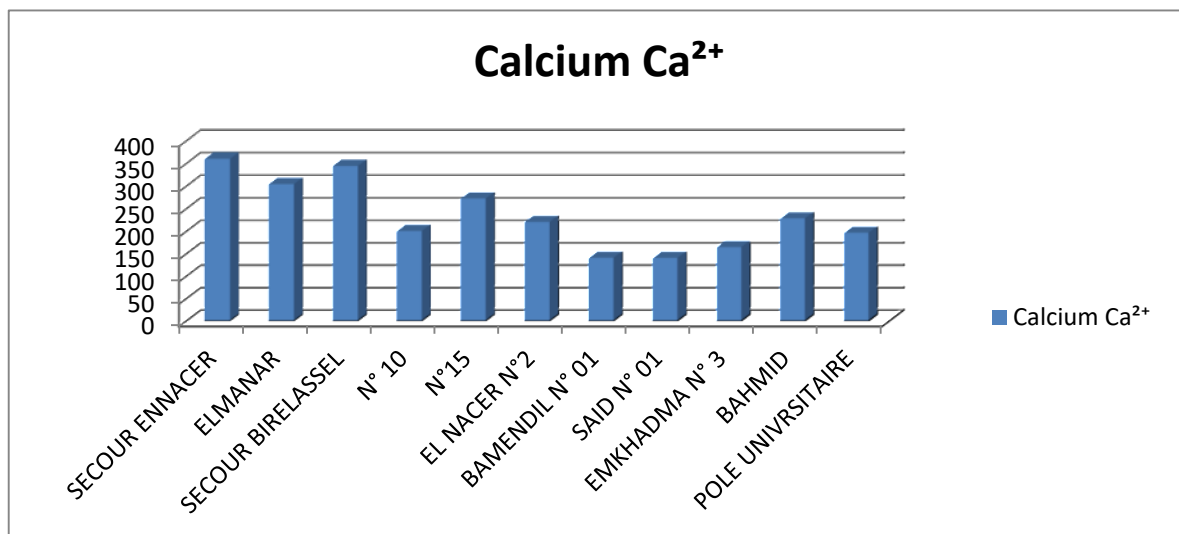


Figure 16 : Evolution de calcium

➤ Le Magnésium (Mg^{++})

Quant au magnésium (Mg^{2+}), ses concentrations sont variables et souvent associées également à la dureté de l'eau. Sa présence élevée peut indiquer une interaction avec des roches dolomitiques ou des sols riches en magnésium.

Les teneurs entre 85.06 et 211.45 mg /L

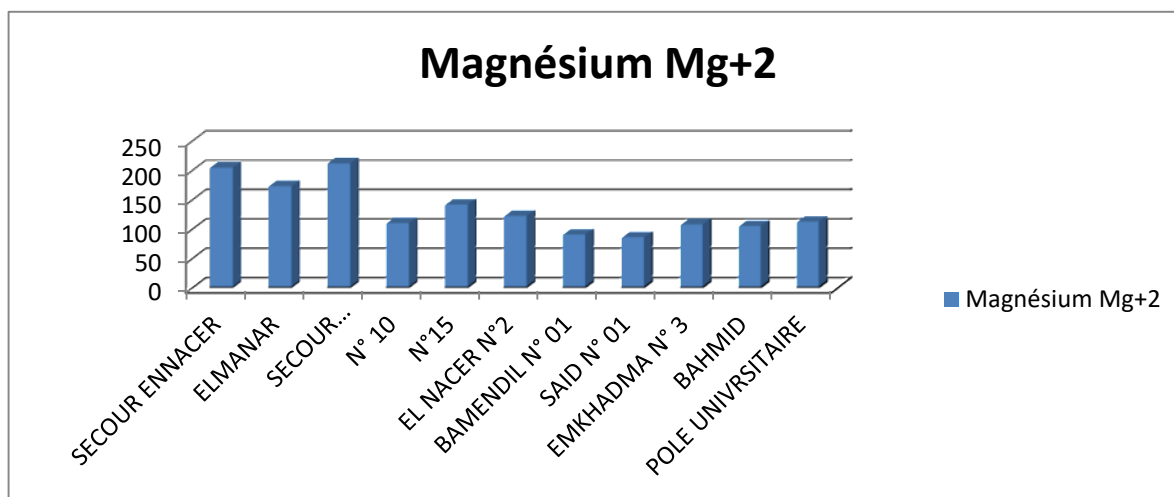


Figure 17 : Evolution du Magnésium

➤ Sodium Na^+

Les concentrations de sodium (Na^+) ont également été relativement élevées, notamment dans les échantillons de SECOUR ENNACER et SECOUR BIR EL ASEL, avec des valeurs variant entre 600 et 650 mg/L. Ces niveaux peuvent résulter de processus d'échange ionique

ou d'infiltrations d'origine saline (Tode&Mays,2005), affectant ainsi la qualité de l'eau destinée à l'irrigation et à la consommation(WHO,2017)

Les teneurs entre 220 et 600mg / L

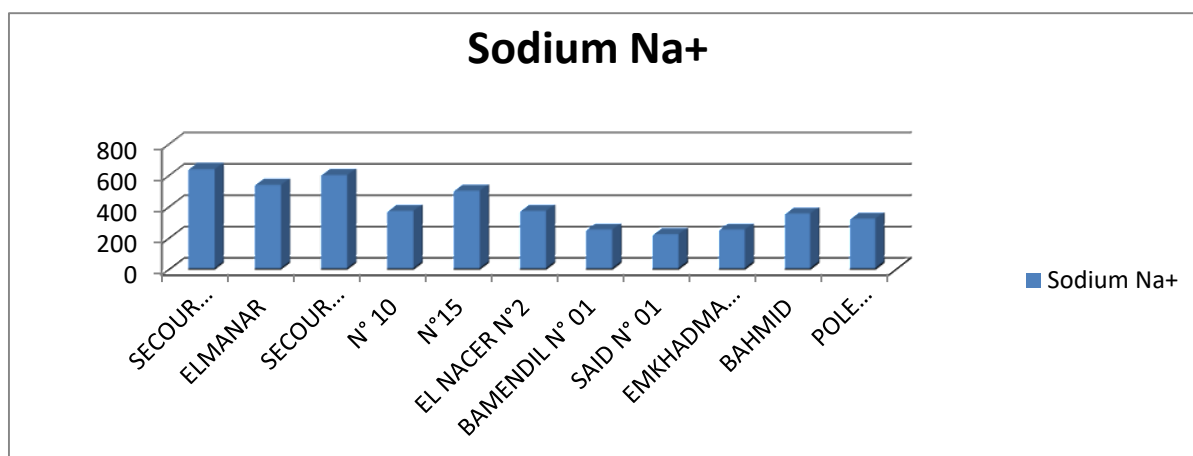


Figure 18 : Evolution de Sodium

➤ Potassium (K⁺)

Enfin, le potassium (K⁺) est apparu à des concentrations relativement faibles, comme prévu. Ce n'est généralement pas un ion dominant dans les eaux souterraines, et sa présence est souvent liée aux infiltrations d'engrais ou de matières organiques.

Les teneurs entre 17 et 45 mg/L

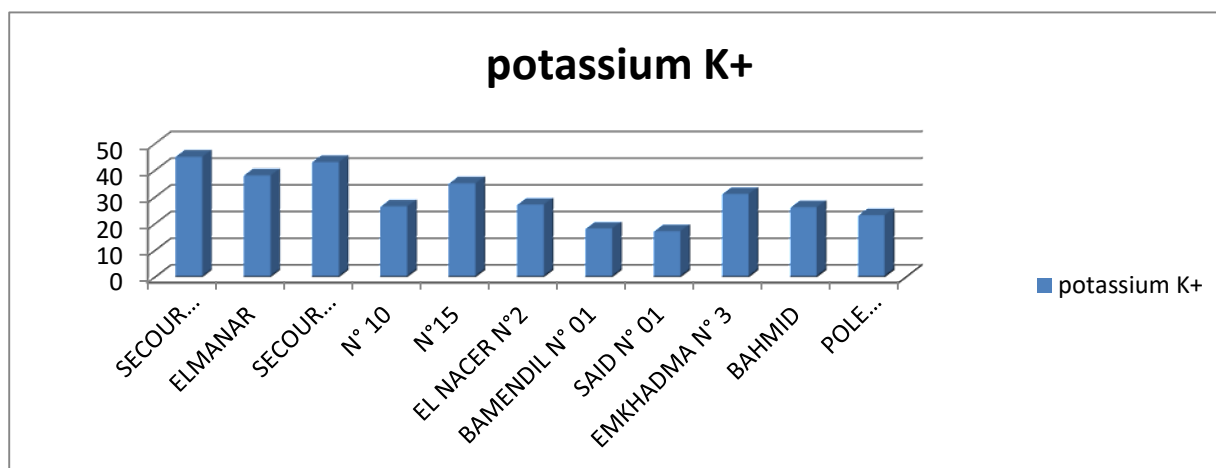


Figure 19 : Evolution de potassium

III.2.2.2. Les anions (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻)

➤ Les chlorures (Cl⁻)

Les concentrations de chlorures (Cl⁻) ont montré une augmentation notable dans certains points, notamment à SECOUR BIR EL ASEL et EL NACER N°2, où les valeurs ont dépassé 1200 mg/L. Cela indique des influences possibles d'eaux salines ou d'infiltrations d'origine

géologique ou anthropique. Ces niveaux élevés réduisent la potabilité et l'utilisabilité de l'eau pour l'irrigation sans traitement préalable. Les teneurs entre 466.56 et 1300.31 mg/L

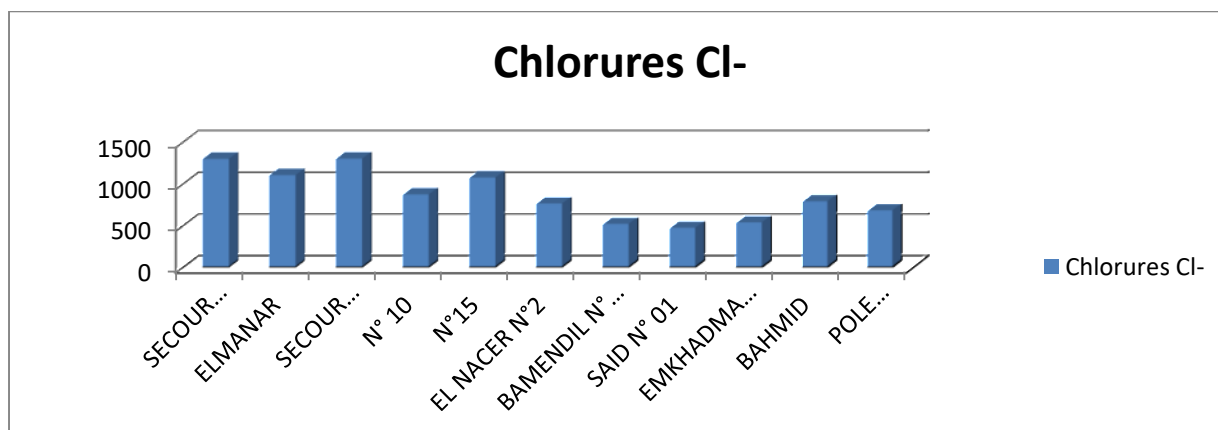


Figure 20 : Evolution des Chlorures

➤ Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates (HCO_3^-) présentent des concentrations modérées, variant entre 120 et 165 mg/L. Cela reflète un certain équilibre du système carbonaté dans les eaux souterraines et joue un rôle important dans la régulation du pH, ce qui traduit une stabilité chimique.

Les teneurs entre 117.12 et 180.56 mg/L

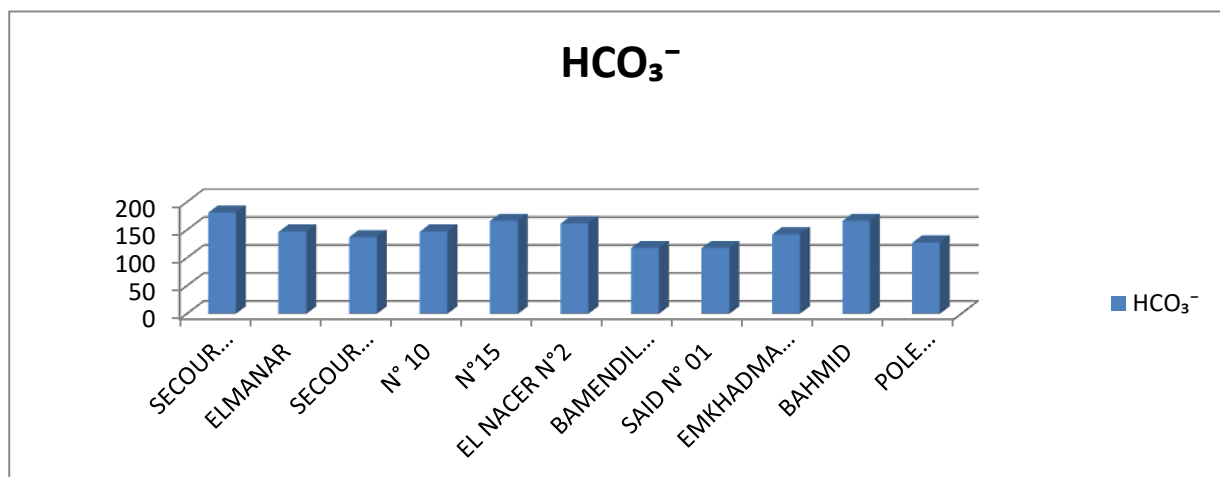


Figure 21 : Evolution des Bicarbonates

➤ Les sulfates (SO_4^{2-})

En ce qui concerne les sulfates (SO_4^{2-}), des valeurs très élevées ont été observées dans plusieurs sites, notamment à SECOUR ENNACER et ELMANAR, avec des concentrations dépassant 1000 mg/L. Cela peut s'expliquer par l'influence de roches gypseuses ou d'activités

anthropiques telles que l'usage d'engrais ou les rejets d'eaux usées, ce qui contribue à l'augmentation de la salinité.

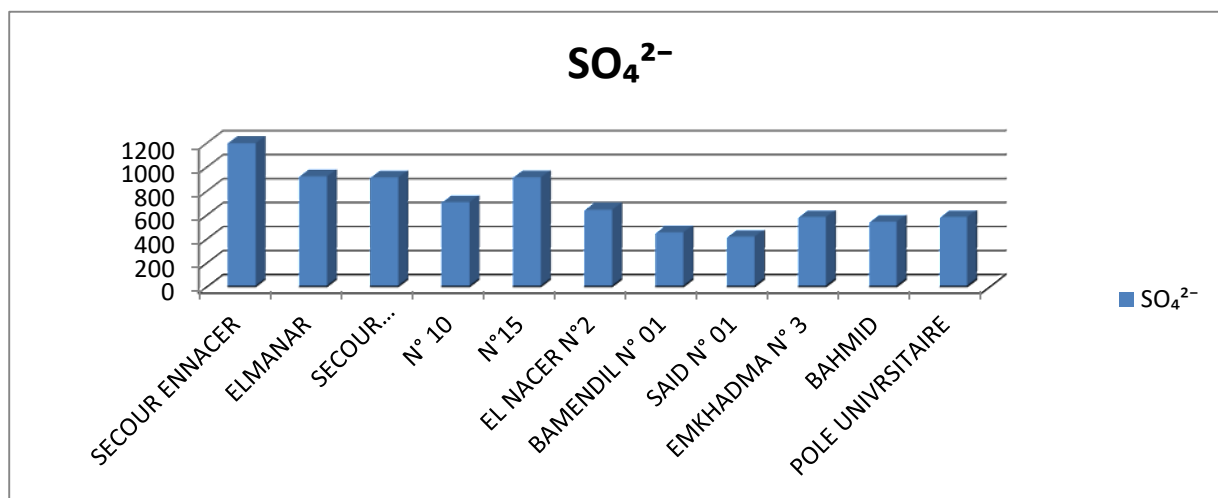


Figure 22 : Evolution des Sulfates

III.2.2.3. Titre alcalimétrique Complet CaCO₃

L'alcalinité totale (CaCO₃) varie entre 100 et 140 mg/L, indiquant la capacité de l'eau à résister aux changements de pH grâce à la présence de carbonates et de bicarbonates (**Hem,1985**). Cette propriété est particulièrement importante pour maintenir la stabilité chimique dans les environnements arides (**Chapman,1996**).

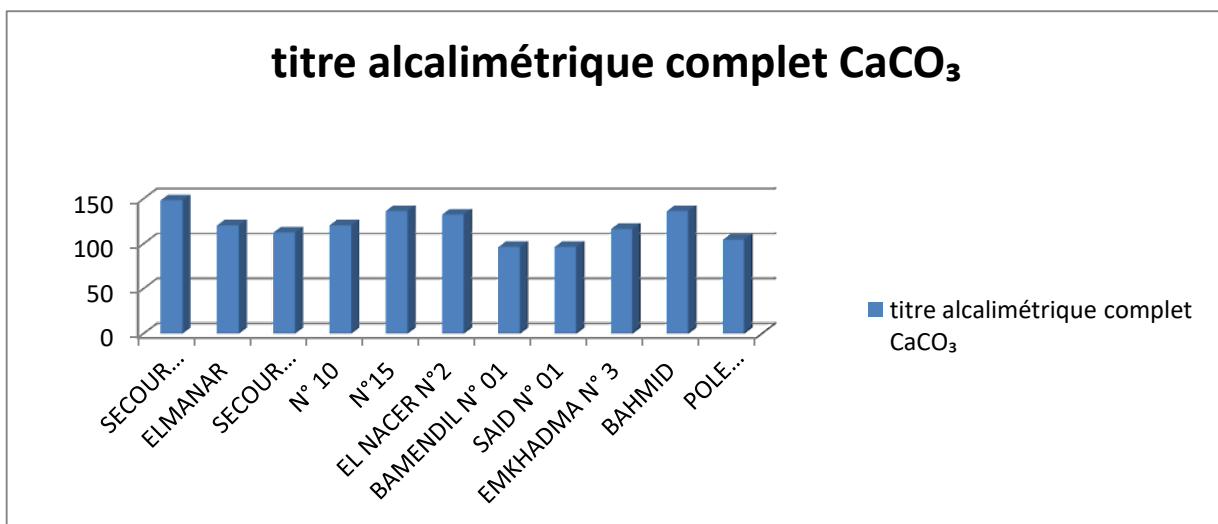


Figure 23 : Evolution d'alcalimétrique complet CaCO₃

III..23. Classification chimique des eaux des nappes du CT :**➤ Représentation graphique des eaux sur le diagramme de PIPER**

Le diagramme de Piper est une représentation graphique de la chimie d'un ou plusieurs échantillons d'eau. Les anions et les cations sont représentés dans deux diagrammes ternaires distincts. Les sommets du diagramme ternaire des anions sont le sulfate, le chlorure et le carbonate plus l'hydrogénocarbonate. Les sommets du diagramme ternaire des cations sont le magnésium, le calcium et sodium plus le potassium. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un losange qui représente est une matrice de passage du graphique des anions (sulfate + chlorure/total des anions) et des cations (sodium + potassium/total des cations). La projection des cations et des anions en % de mg/l sur le losange détermine le faciès chimique.

La projection sur le diagramme de piper des cations et des anions des eaux souterraine des forages du Complexe Terminal (CT) montre que les eaux sont un faciès chimique à dominance chlorurée-sodique. Ce faciès est engendré par le contact de l'eau avec les formations géologiques constituées en partie de roches évaporitiques.

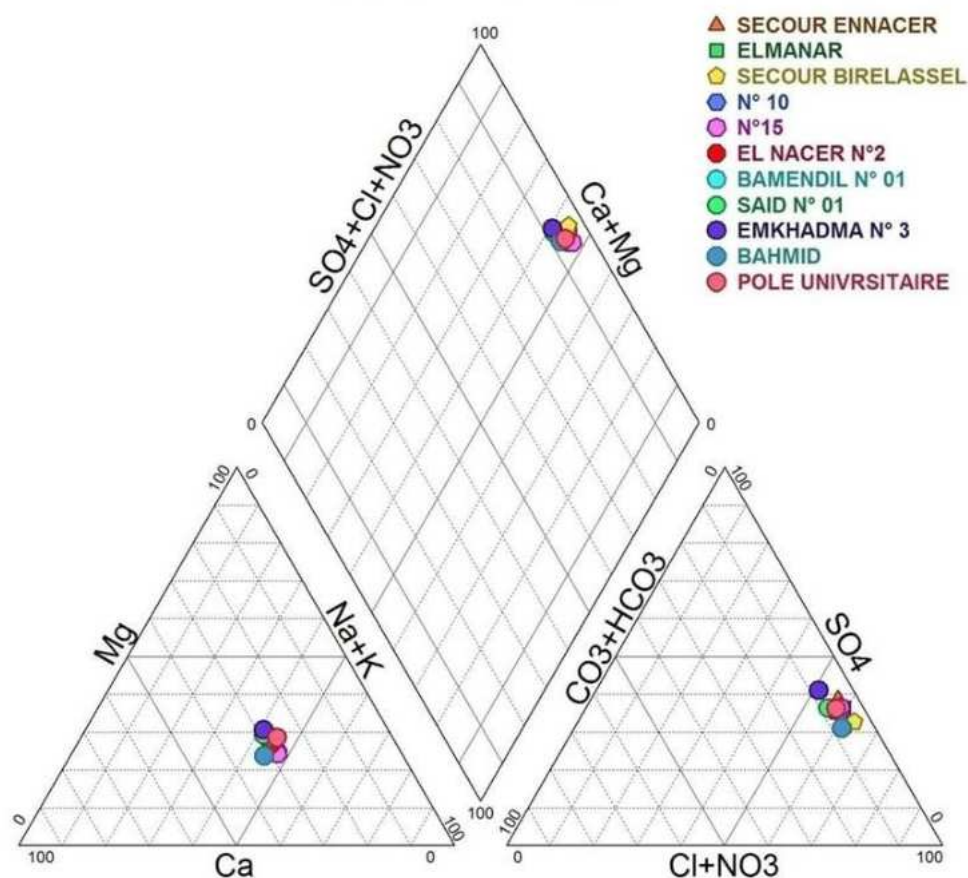


Figure 24 : diagramme de piper des eaux du Complexe Terminal (CT) dans la Région d'Ouargla

III.2.4. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de la nappe Complexe Terminal (CT) :

III.2.4.1. Statistiques élémentaires

Le tableau statistique est établi sur la base des données issues des analyses physico-chimiques des eaux du Complexe Terminal (Tableau 06).

L'interprétation des données a montré que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 4143.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Ces valeurs dépassent les normes algériennes de la potabilité des eaux.

Les concentrations moyennes de Sodium (Na^+), Sulfates (SO_4^{2-}), Calcium (Ca^{++}) sont figurent dans le tableau ci-dessous, mais dépassent les normes algériennes dans les deux cas.

Tableau 06: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du Complexe Terminal (CT) – région d'Ouargla.

Elément chimique	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca ⁺⁺	11	140	360.72	231.44	82.12
Mg⁺⁺	11	85.06	211.45	132.57	46.44
K⁺	11	17	45	29.94	9.92
Na⁺	11	220	638	400.73	152.40
Cl⁻	11	466.56	1300.31	852.23	312.52
SO₄⁻⁻	11	415	1200	714	264.78
HCO₃⁻	11	117.12	180.56	145.96	22.16
CE	11	2460	6400	4143.64	1441.68
pH	11	7.22	7.96	7.50	0.24

III.2.4.2. Analyse en composantes principales (ACP)

➤ Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation a été calculée pour les éléments physico-chimiques de 11 échantillons collectés dans les forages de la nappe du Complexe terminal de la région d'Ouargla (Tableau 07).

Tableau 07 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de la région d'Ouargla.

Variables	Ca2+	Mg2+	K+	Na+	Cl -	SO4- -	HCO3-	CE
Ca2+	1							
Mg2+	0,9629	1						
K+	0,9439	0,9484	1					
Na+	0,9759	0,9558	0,9237	1				
Cl -	0,9745	0,9384	0,9113	0,9806	1			
SO4- -	0,9307	0,9159	0,9336	0,9579	0,9343	1		
HCO3-	0,6255	0,4570	0,5823	0,5892	0,5653	0,5997	1	
CE	0,9910	0,9708	0,9463	0,9862	0,9861	0,9501	0,5782	1

La matrice de corrélation montre que la conductivité (CE) est corrélée positivement avec le Sodium (Na⁺), les chlorures (Cl⁻) et les sulfates (SO₄⁻⁻). La signification du coefficient de corrélation linéaire simple est liée étroitement avec le nombre des échantillons selon la formule de Student $R = 2/\sqrt{n-1}$. Le coefficient de corrélation (r) reporté dans le tableau est significative lorsque (r) égale ou supérieur à R il est marqué en gras si non il est sans signification. Ce n'est pas une question de dépendance ou indépendance. C-a-dire je peux avoir un $r = 0.8$ calculé sur la base de 4 échantillons !! (C'est fortement dépendant mais sans signification) par contre $r = 0.4$ calculé sur 200 échantillons (c'est faiblement dépendant mais

il a plus de signification que celui calculé sur 4 échantillons). Avec le logiciel on calcule la corrélation et sa signification liée au nombre de données utilisées en non pas aux degrés (nulle, faible ou forte).

➤ Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges. Les deux premiers axes, qui ont été pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables, détiennent à eux seuls 96,84 % de l'information totale avec respectivement 88,68 % pour l'axe F1 et 08,15 % pour l'axe F2 (Tableau 08) et (Figure 25).

Tableau 08 : Poids factoriel des paramètres physicochimiques des eaux des forages dans la nappe du complexe terminal dans la région d'Ouargla.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	7,0951	0,6521	0,1136	0,0866	0,0305	0,0126	0,0060	0,0035
Variabilité (%)	88,6889	8,1511	1,4197	1,0831	0,3814	0,1569	0,0753	0,0436
% cumulé	88,6889	96,8400	98,2597	99,3428	99,7242	99,8811	99,9564	100,0000

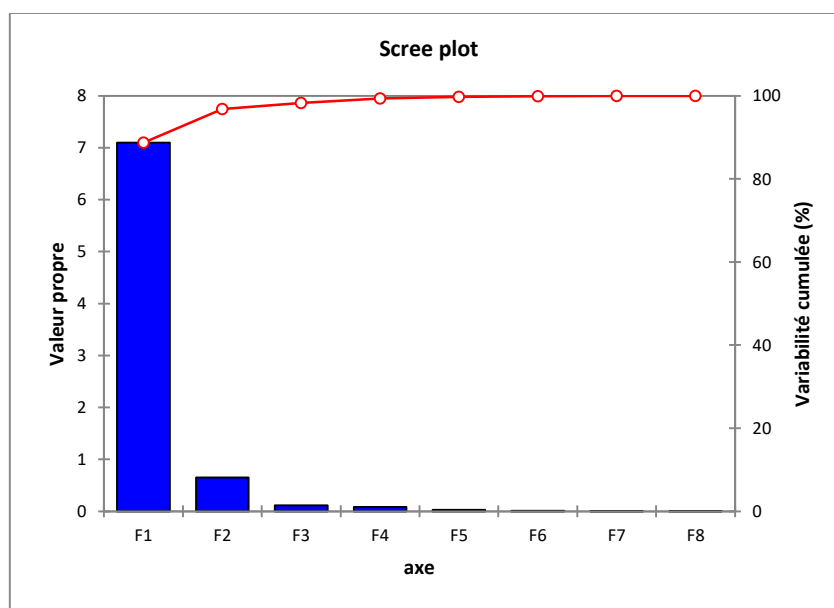


Figure 25 : Valeurs Propres des facteurs de Charge

➤ Cercle des corrélations et projection des individus

Le cercle de corrélation a été tracé sur le plan des facteurs F1-F2 (Figure 26). Elle montre l'existence d'une seule association physico-chimique à savoir, corrélée positivement avec le facteur F1, regroupe les paramètres suivants : CE, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Sodium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}) et Potassium (K^+). Ce sont les éléments

qui représentent l'axe de la minéralisation. Cette association montre globalement une origine évaporitique, dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl).

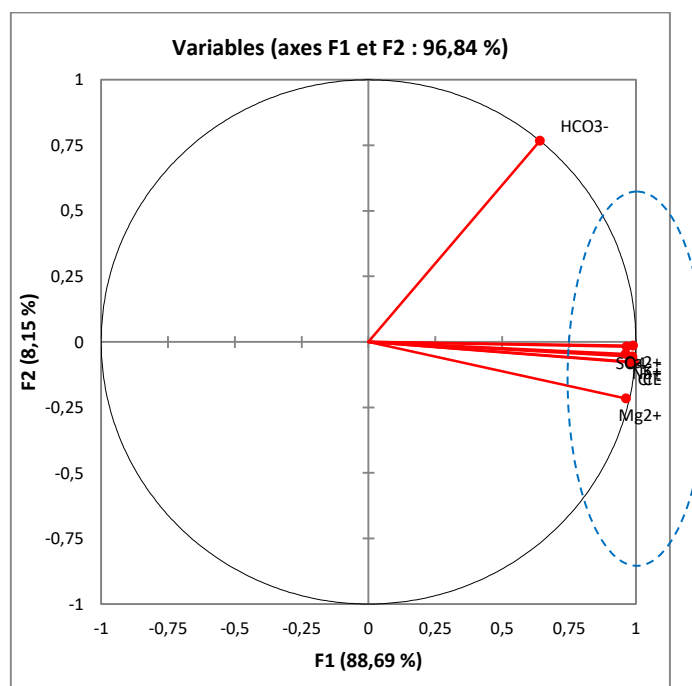


Figure 26 : Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1- F2 des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région d'Ouargla.

III.2.5. Etude des rapports caractéristiques.

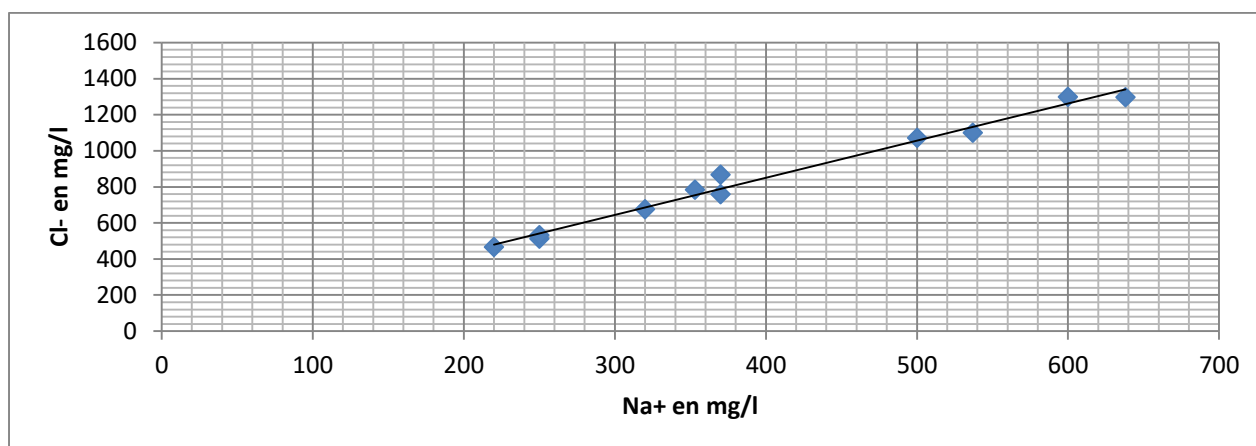
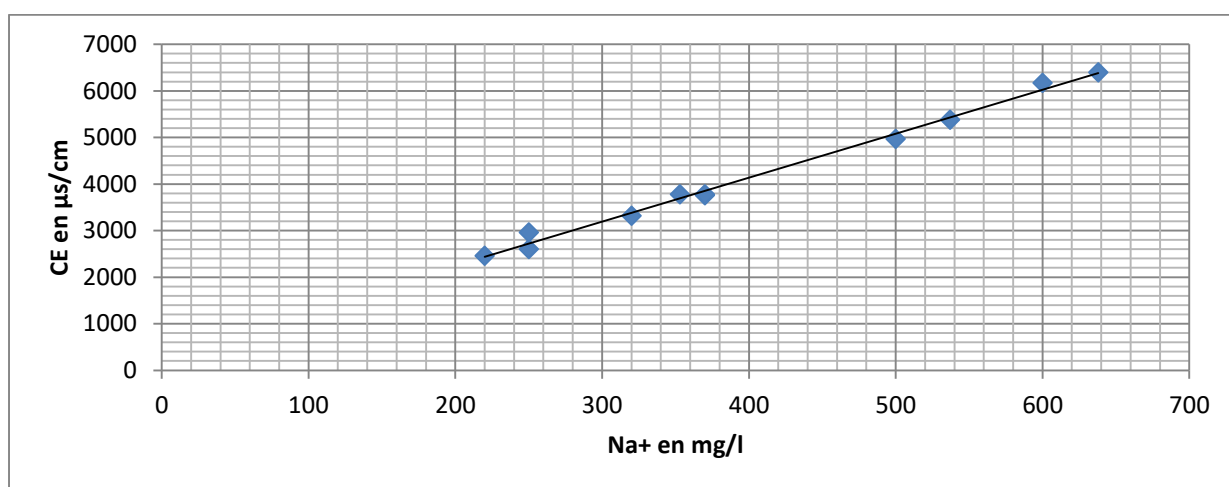
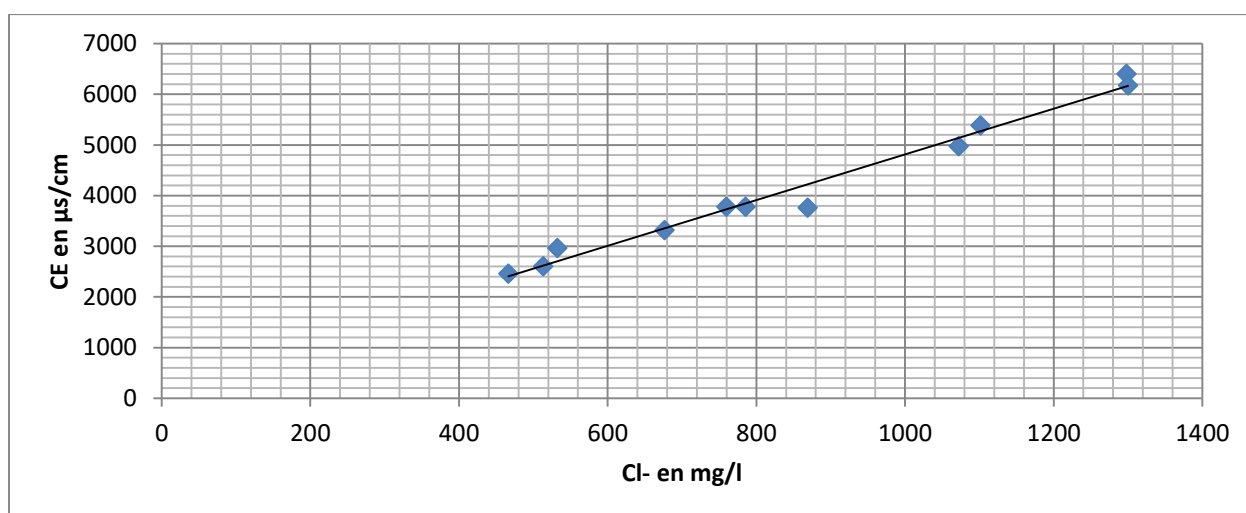
L'étude des rapports caractéristiques a permis de déterminer l'origine géologique des éléments chimiques et de la liaison qui existe entre eux.

➤ Le couple Na^+/Cl^- .

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution du sodium est étudiée en fonction des teneurs en chlorure. La figure 27 montre un alignement des points sur la droite de dissolution de l'halite, ce qui est caractéristique de la dissolution de l'halite dans les eaux de la nappe et confirme l'existence du faciès chloruré sodique. Cependant quelques points présentent un excès en sodium, par contre d'autres en chlorures.

➤ Le Couple Na^+/CE

Les figures 27 et 28 Montrent la forte corrélation entre Na^+ , Cl^- et CE indique la présence des formations caractérisées par une forte salinité (faciès chloruré sodique).

Figure 27: Relation Na⁺/Cl⁻Figure 28: Relation Na⁺/CEFigure 29: Relation Cl⁻/CE

III.2.6. Indice d'échange de base (i.e.b.) :

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterrain entre en relation avec différentes roches ayant la propriété d'échanger des ions avec ceux contenus dans les eaux.

D'après **Schoeller (1943)**, l'indice d'échange de base est exprimé par la formule suivante :

$$i.e.b. = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si $i.e.b. > 0 \Rightarrow$ les eaux échangent des ions de $Na^+ + K^+$ contre les ions de Ca^{++} et Mg^{++} du terrain encaissant.

$i.e.b. = 0$ donc il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et l'encaissant.

$i.e.b. < 0 \Rightarrow$ l'encaissant libère les ions de $Na^+ + K^+$ et fixe les ions de Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau.

Pour la région d'Ouargla les eaux de la nappe du Complexe Terminal ont un indice d'échange de base positif dans la majorité des puits, indiquant un échange de $Na^+ + K^+$, de l'eau contre Ca^{++} et Mg^{++} de l'encaissant.

Tableau 09: indice d'échange de base dans la nappe Complexe Terminale dans la région d'Ouargla.

Forages	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
i e b	0.47	0.47	0.50	0.54	0.50	0.47	0.47	0.49	0.47	0.51	0.49

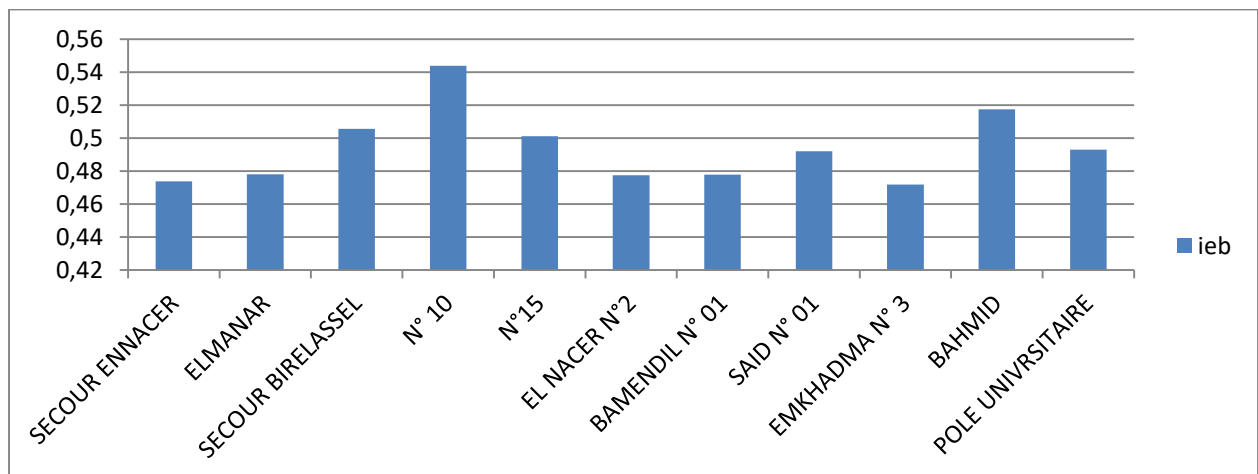


Figure 30 : indice d'échange de base pour différents Forages

III.2.7. Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux a permis de mettre en évidence la forte concentration des anions et des cations des eaux souterraines du Complexe Terminal (CT).

Le diagramme de Piper a permis la détermination des types de faciès chimiques des eaux dans les nappes. Le faciès dominant est: Le faciès chloruré sodique pour le Complexe Terminal (CT).

La typologie des eaux a été faite à l'aide de l'application de l'analyse statistique des données monovariées et multivariées avec l'ACP sur les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT), les eaux du Complexe (CT) sont caractérisées par une forte minéralisation.

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence une seule association : est constitué de : CE, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{--}), Sodium (Na^+), Calcium (Ca^{++}), Magnésium (Mg^{++}) et Potassium (K^+). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio Pliocène.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La région d'Ouargla se situe au Sud-est du pays, plus précisément au Nord-Est du Sahara.

L'étude géologique montre que la région d'Ouargla se présente comme une cuvette synclinale du Bas Sahara qui fait partie d'une large fosse de direction N-S.

La série géologique permet de distinguer deux ensembles hydrogéologiques, Post Paléozoïques importants : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal.

Cette zone est caractérisée par l'irrégularité et la faiblesse des précipitations.

Le report des résultats d'analyses hydrochimiques sur le diagramme de Piper des eaux des montre que le faciès Chloruré sodique est dominant pour les eaux du Complexe Terminal (CT).

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence d'une seule association :

- Est constitué de : CE, Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+) calcium (Ca^{++}) et du magnésium (Mg^{++}). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique, dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio-Pliocène.

Références bibliographiques

- 1. Abdeldjebar, T. O. (n.d.).** Contribution à l'étude des origines des eaux souterraines dans la région de Ouargla et Touggourt Est (Sud Est Algérien) [Doctoral dissertation].
- 2. Agence Nationale des Ressources en Eau. (1981).** Décret n°81-167 du 25 juillet 1981 relatif à la création de l'ANRH.
- 3. Ahmed, S., & Kumar, D. (2022).** Advances in electrochemical sensors for water quality monitoring: A review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 414(7), 2335–2347.
- 4. Annamalai, P., & Hariharan, R. (2023).** Recent advances in solid-state pH sensors: From materials to device applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 379, 133214.
- 5. Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2020).** *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). CRC Press.
- 6. Belkacem, A. I. S. S. A. N. I., Boutarika, R., Nezli, I. E., Oubira, S., & Aboub, K.** Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux et des formations de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla – Algérie.
- 7. Bencheikh, A., Mansouri, A., & Bouselsal, B. (2019).** Caractéristiques et évolution de la piézométrie de la nappe du Complexe Terminal de la cuvette de Ouargla [Doctoral dissertation].
- 8. Bennahia, A., Boulfoul, A. E., & Gasmi, B.** Étude hydrogéochimique comparative entre les eaux de la nappe du Mio-Pliocène et celle du Sénonien dans la cuvette de Ouargla [Doctoral dissertation].
- 9. Berregui, A. (2013).** Les ressources en eaux et leurs conséquences sur l'environnement oasien: cas région de Ouargla [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- 10. Bougoutit, K., & Benhamida, N. (2015).** Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla (cas de la nappe du Continental Intercalaire) [Doctoral dissertation].
- 11. Chaouki, M., Chaouch, N., Brais, A., & Boukhris, I.** Cartographie du degré de la pollution chimique des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région de Ouargla (Algérie).
- 12. Chapman, D. (1996).** *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). UNESCO/WHO/UNEP.
- 13. Djidel, M. (2008).** Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie) [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba].
- 14. Droubi, A., Foster, S., & Hirata, R. (2005).** *Groundwater quality: A key to sustainable development*. UNESCO Publishing.

- 15. Fabre, J. (2004).** Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines : La couverture phanérozoïque (Rééd. orig. 1976). SNED.
- 16. Guendouz, A., & Moulla, A. S. (2003).** Hydrochemical and isotopic evolution of groundwater in the Complex Terminal aquifer, Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal*, 11(4), 483–495.
- 17. Hamidou, H.** Origine du chimisme des eaux de la nappe de sable de Complexe Terminal dans la cuvette d'Ouargla [Doctoral dissertation].
- 18. Hammou, A.** Géochimie des eaux de la nappe superficielle de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla) [Doctoral dissertation].
- 19. Hem, J. D. (1985).** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd ed.). U.S. Geological Survey.
- 20. Hmidi, N., & Hamza, A.** Étude géochimique de la pollution organique et minérale des eaux souterraines du Complexe Terminal (CT) de la cuvette de Ouargla [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- 21. Kharroubi, M. (2024).** Étude hydrogéochimique et gestion de l'aquifère de Complexe Terminal de la cuvette d'Ouargla (SE Algérie) [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- 22. Kharroubi, M., Bouselsal, B., & Hadj Said, S.** Contribution à l'étude hydrogéologique de l'aquifère du Complexe Terminal de la cuvette d'Ouargla.
- 23. Khouildi, F.** Aspects quantitatifs et qualitatifs de la nappe du Continental Intercalaire (CI) de la région d'Ouargla [Doctoral dissertation].
- 24. Limane, A. (2016).** Étude géochimique des nappes du Complexe Terminal (CT) dans la cuvette d'Ouargla [Doctoral dissertation].
- 25. Menad, I.** Géochimie et minéralogie des formations et des eaux de nappes du Complexe Terminal du bassin oriental du Sahara septentrional algérien.
- 26. Nedjmi, A., & Maamri, L.** Contribution à l'amélioration des eaux de la nappe phréatique pour être utilisées en irrigation.
- 27. Nezli, I. E., Brinis Nafaa, & Labar, S. (2004).** Origines de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). *Journées Scientifiques Algéro-Françaises*, Ouargla.
- 28. Nezli, I. E.** Géochimie des eaux de la nappe superficielle de la région d'Ouargla [Doctoral dissertation].

- 29. Rezeg, R.** Étude hydrogéochimique de la pollution minérale des eaux souterraines du Complexe Terminal (CT) de la région de Ouargla Sud-Est Algérien [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- 30. Rodier, J. et al. (2009).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9^e éd.). Dunod.
- 31. Schoeller, H. (1943).** Le comportement des eaux dans le terrain et les indices d'évolution. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 7, 241–248.
- 32. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017).** Principles of Instrumental Analysis (7th ed.). Cengage Learning.
- 33. Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005).** Groundwater hydrology (3rd ed.). Wiley.
- 34. World Health Organization. (2017).** Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press.
- 35. Youcef, K. A. M. B. A.** Synthèse sur les nappes de la région de Ouargla.
- 36. Zeddouri, A., Derradji, F., & Hadj-Saïd, S. (2009).** Origine de la salinité des eaux du Complexe Terminal dans la région de Ouargla (Sud-Est algérien). *Physical and Chemical News*, 53, 62–69.
- 37. Zhang, Y., Liu, M., & Chen, Q. (2023).** Development of high-sensitivity conductivity sensors based on nanocomposite electrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical* 384, 1346.