

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la terre et de l'Univers



Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la terre et de l'Univers

Filière : Sciences de la terre

Spécialité/Option : Hydrogéologie

Département: Sciences de la Nature et de la Vie

Thème :

**Hydrochimie et Qualité Physico-chimique des eaux de
quelques forages de la Taoura (W. Souk-Ahras)**

Présenté par :

Khelifati Ali Yacine

Khelifa Ibrahim

Devant le jury composé de :

Président: Kachi Slimane

Université 8 Mai 1945 Guelma

Examineur: Guettaf Mohamed

Université 8 Mai 1945 Guelma

Encadreur: Nouar Tahar

Université 8 Mai 1945 Guelma

Juillet 2019

REMERCIEMENT

Je remercie DIEU, tout puissant d'avoir donné la force de mener à bien ce travail, à notre prophète MOHAMMED

A chaque travail réaliser qui soit un titre ou un autre œuvre collective même si le signataire est unique, il ne peut jamais oublier tous ceux qui ont orienter, influencer, discuter ses recherches ,pas plus qu'il ne peut oublier tous ceux qui ont témoigner leur sympathie tout le long du travail.

Alor je dois spécialement commencer mon remerciement en premier lieu par mes encadreurs: Monsieur BASSI Mohamed Ettayeb

Monsieur BELABBES Abdelhamid

Monsieur RHAYLIA houssine

Madame SERIDI Samira

qui ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail, pour leurs précieux conseils, suivi, disponibilités et patiences durant toute cette période.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes enseignants qui ont contribué à ma formation de près ou de loin.

Je remercie également tous qui ont m'aider à réaliser ce projet commençant par, docteur El Hadi BOUCHLEGHEM, mon cousin Mohamed Cherif BOUGUERNE, les cadres de la SUC de Hammam Debeigh et la direction du tourisme de la wilaya da Guelma.

Ainsi que tous mes profs et tout mon département d'architecture, les architectes et mes amis qui ont soutenant pendant cette année.

Enfin mon trésor dans la vie, mes parents qui ment aider et encourager soutenu tout le long de mes années d'études.

TABLE DES MATIERES
INTRODUCTION GENERALE
Chapitre1. Cadre général

1.1. Présentation de la zone d'étude	1
1.2- Géologie et Hydrogéologie	1
1.2.1-Géologie	1
1.2.1.1- stratigraphie	2
1.2.1.2-tectonique	3
1.2.1.3-Géomorphologie	3
1.2.2 Hydrogéologie	4
1.3- Cadre Hydroclimatique	4
1.3.1-Station de Mesure	5
1.3.2-Facteurs Climatiques	5
1.3.2.1- Les Précipitations	5
1.3.2.2- La Température	6
1.3.3-Diagramme pluvio-thermique	7
1.3.4-Bilan hydrologique	8
1.3.4.1 -Bilan de Thornthwaite	8
1.3.5- Estimation de Ruissellement	10
1.3.6-Estimation de l'infiltration	11
1.3.7 Calcul d'indice d'aridité	11
Conclusion	13

Chapitre 2- Matériels et méthodes

Introduction	14
2.1Echantillonnage ;	14
2.2Matériel et méthodes de prélèvement :.....	14
2.3 Transport des échantillons :.....	14

2.4 Analyses physico-chimiques	15
2.4.1 Les paramètres physiques	15
2.4.1.1 Potentiel en hydrogène (pH)	15
2.4.1.2 La température (T°C)	15
2.4.1.3 La conductivité (CE):.....	16
2.4.2 Les paramètres chimiques	16
2.4.2.1 Dosage du calcium (Ca²⁺)	16
2.4.2.2 Dosage de magnésium (Mg²⁺)	17
2.4.2.3 Dosage de sodium et potassium (Na⁺ et K⁺)	18
2.4.2.4 Les chlorures (Cl⁻) :.....	19
2.4.2.5 Détermination des sulfates (SO²⁻₄)	19
2.4.2.6TAC/TA	21
2.4.2.7 Dosage de nitrates(NO³⁻).....	23
2.4.2.8 Dosage des nitrates (méthode spectrométrique) :.....	24
Conclusion	26

Chapitre 3. Résultats et discussion

Introduction	27
3.1-Résultats et Discussions	28
3.2-Facies chimique.....	28
3.2.1Diagramme de Piper	28
3.2.2 Diagramme de Chadah	29
3.3-Mécanismes contrôlant le chimisme des eaux souterraines	30
3.3.1-Diagramme de Gibbs	30
3.3.2. -Indice de saturation	31
3.3.4-Pression partielle du CO₂.....	32
3.4-Corrélation entre paramètres	33

3.5-Analyse en Composantes Principales (ACP).....	34
3.5.1-Etude de la contribution des observations aux trois premiers facteurs	34
3.6-Aptitude de l'eau à la consommation humaine et domestique	35
3.6.1-Paramètres physico-chimiques	35
3.6.1.1. pH, CE et TDS	35
3.6.2-La dureté ou Titre hydrotimétrique	35
3.6.3-Variations des Cations et anions	36
3.7-Aptitude des eaux pour l'irrigation	37
3.7.1-Pourcentage en Sodium (Na%)	37
3.7.2-Conductivité électrique (CE)	38
3.7.3-Sodium Adsorption Ratio (SAR)	40
3.7.4-Carbonate de sodium résiduel (RSC)	41
3.8-Les indices de qualité des eaux d'irrigations	42
3.8.1-L'Indice de Kelly	42
3.8.2-Le Magnésium Ratio	42
3.9-Usage industriel	43
3.9.1-Equilibre calco-carbonique	43
3.9.2-Indice de Ryznar	44
Conclusion	45

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP: Analyse en Composantes Principales.

AEP: Alimentation en Eau Potable.

BH : Bilan Hydrique.

CE : Conductivité Electrique.

D.G.R.E : Direction Générale des Ressources en Eau-Tunis (Tunisie).

EDTA : Acide éthylène Diamine Tetra Acétique.

ETP : Evapotranspiration Potentielle.

ETR : Evapotranspiration Réelle.

EXC : Excédent

I : Infiltration

IS : indice de saturation

PAI : Produit d'Activité Ionique.

It : Indice thermique.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

P : Précipitations.

pH : Potentiel en Hydrogène.

R : Ruissellement.

RFU : Reserve en eau Facilement Utilisable.

S.A.R : Le Rapport d'Adsorption du Sodium.

TDS : Teneur en Sel Dissous

الملخص

تقع منطقة التاوره على بعد حوالي ثلاثين كيلومتراً جنوب عاصمة الولاية سوق أهراس. أظهرت الدراسة الجيولوجية أن التكوينات تنتمي إلى العصر الحديث والبلايوسيني. من وجهة نظر تكتونية ، فإنها تتكون من تراكم الصخور الهشة. و من خلال العمليات التي أجريت على 10 آبار عميقة ، سمحت لنا بإنشاء التركيب الفيزيائي الكيميائي للمياه ووجهته، أوضحت الدراسة أن هذه المياه مناسبة للإمكانات الصالحة للشرب والري وبدرجة أقل للاستخدام الصناعي، نظراً لطابعها المتدرج.

الكلمات المفتاحية : هيدروكيميا ، نوعية ، تاوره

Abstract

The Taoura region is located about thirty kilometers south of the capital of souk Ahras District.

The geological study has shown that the formations belong to the Pliocene and Quaternary ego. From the tectonic point of view, it acts of a collapsed syncline with detrital filling.

The study carried out on 10 deep boreholes, allowed us to establish the physicochemical composition of the waters and their destination. The study showed that these waters are suitable for potability, irrigation and, to a lesser degree, industrial use, given their scaling character.

Key words : Hydrochemistry , Quality, Taoura.

Resumé

La région de Taoura est située à une trentaine de kilomètre au sud du chef lieu de la wilaya de souk Ahras.

L'étude géologique a montré que les formations appartiennent au Mio-Pliocène et Quaternaire. Du point de vue tectonique, il 'agit d'un synclinal effondré a remplissage détritique.

L'étude réalisée sur 10 forages profonds, nous a permis d'établir la composition physico-chimique des eaux et leur destination. L'étude a montré que ces eaux sont aptes a la potabilité, a l'irrigation et à moindre degré à l'utilisation industrielle, vue leur caractère entartrant.

Mots Clés : Hydrochimie, Qualité, Taoura

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Souk Ahras	5
Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de souk Ahras (1969/2018)	5
Tableau 3: Température moyenne mensuelle de la station de Souk Ahras (1969/2018)..	6
Tableau 4 : Bilan d'eau de Thornthwaite.....	9
Tableau 5 Terme du bilan hydrologique	11
Tableau 6 Calcul d'indice d'aridité de la station	12
Tableau 7 : Analyse physico-chimique en (mg/l), CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	28
Tableau 8 : Indices de saturation de quelques minéraux et pCO_2	32
Tableau 9 : Statistique descriptive	33
Tableau 10 : Matrice de corrélation de Pearson.....	33
Tableau 11 : Valeurs la dureté (TH) des forages	36
Tableau 12 : Classification d'après Swayer et McCarty, 1964.....	36
Tableau 13 : Classification de l'eau basée sur le pourcentage en Sodium	38
Tableau 14 : Comparaison des valeurs de la conductivité électriques avec la classification de Wilcox (1953).....	39
Tableau 15 : Les résultats de Na%, SAR RSC, KR et Mg^{2+} des échantillons.....	43
Tableau 16 : Valeurs de ΔpH et d'IR.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation géographique du bassin de Taoura	1
Figure 2: Diagramme pluviothermique	8
Figure 3: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite	10
Figure 4: Situation géographique des points de prélèvement	27
Figure 5: Diagramme de Piper	29
Figure 6 : Diagramme de Chadah	30
Figure 7: Diagramme de Gibbs.....	31
Figure 8 : Analyse en composante principale	35
Figure 9: Diagramme de Wilcox	39
Figure10: Diagramme de Richards	41

INTRODUCTION GENIRALE

La pénurie d'eau est devenue un problème crucial vécu par beaucoup des sociétés et en particulier celles des pays en voie de développement. L'accroissement des populations, le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une exploitation de plus en plus intense des ressources en eaux et parfois une dégradation de leur qualité due à certaines pratiques agricoles, aux rejets industriels et domestiques. Dans beaucoup des régions du globe, les eaux souterraines constituent la seule ressource pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. La composition chimique de ces eaux considérées souvent de bonne qualité grâce au pouvoir épurateur du sol dépend de certains facteurs tels que la nature géologique des terrains traversés (concentration, échanges de base, réduction), du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol, du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration, des activités anthropiques (l'épandage d'engrais, les rejets d'eaux usées...) et de l'activité bactériologique (Jain et al,2005). Suivant ces différents facteurs, les eaux souterraines peuvent être surchargées en certains éléments qui les rendent ainsi inaptes à la consommation humaine et/ou à l'irrigation des certaines plantes ainsi qu'à l'usage industriel.

La région de Taoura, située au Nord-Est de l'Algérie renferme dans son sous-sol un potentiel hydrique d'une grande importance qui subit actuellement une pression anthropique de plus en plus inquiétante. Cette région est depuis des décennies une zone agricole (céréales, tomates, pomme de terre, agrumes,...) qui nécessite d'énormes quantités d'eau vu l'augmentation des surfaces cultivées. Cette intensification des activités agricoles associée à l'augmentation de la population qui est passée de 481 800 habitants en 2012 à 518 918 en 2017(O.N.S 2017), ainsi que l'installation de quelques unités pastorales et industrielles ont considérablement influencé les eaux des nappes en entraînant un déséquilibre entre le débit d'exploitation et le débit d'alimentation de ces dernières .

Ce travail s'inscrit dans le cadre de ce projet et a pour but l'utilisation des données existantes accumulées aux cours des travaux précédents de l'université et d'autres chercheurs, des données recueillies sur le terrain lors du stage et des analyses effectuées au laboratoire afin d'établir la physico-chimie des eaux de la nappe Mio-Pliocene et et 2 forages de la nappe calcaire du Maestrichtien et leur qualité pour la consommation humaine ainsi que pour l'irrigation. Ce travail ainsi que les autres travaux qui seront réalisés au cours de ce projet vont permettre de mieux appréhender l'hétérogénéité du milieu, les interventions de l'homme sur ce dernier, l'évolution de la quantité et de la qualité de ces eaux ainsi que leur gestion optimale afin de répondre aux besoins pour l'AEP et pour l'irrigation dans les années à venir.

Ce rapport s'organise comme suit:

- Une première partie décrit le cadre général de la région d'étude (géographie, géologie et hydrogéologie et hydro climatologie).
- Une deuxième partie concerne matériels et méthodes
- enfin une troisième partie concerne l'hydro chimique et qualité des eaux.

Chapitre.1: Cadre général

1.1-Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à trente kilomètres au Sud de la ville de Souk Ahras (Fig.1). Elle est limitée:

- au nord par les communes de Khedara, Ouled Moumen, Ain Zana et Ouled Moumene
- au sud par la commune de Sidi Fredj et la Wilaya de Tébessa, a proximitéb de la ville de Taroura
- à l'est par la frontière algéro-Tunisienne,
- à l'ouest par le chef-lieu de la wilaya, Zarrouria, M'Daourouch et Oued Kebrit.

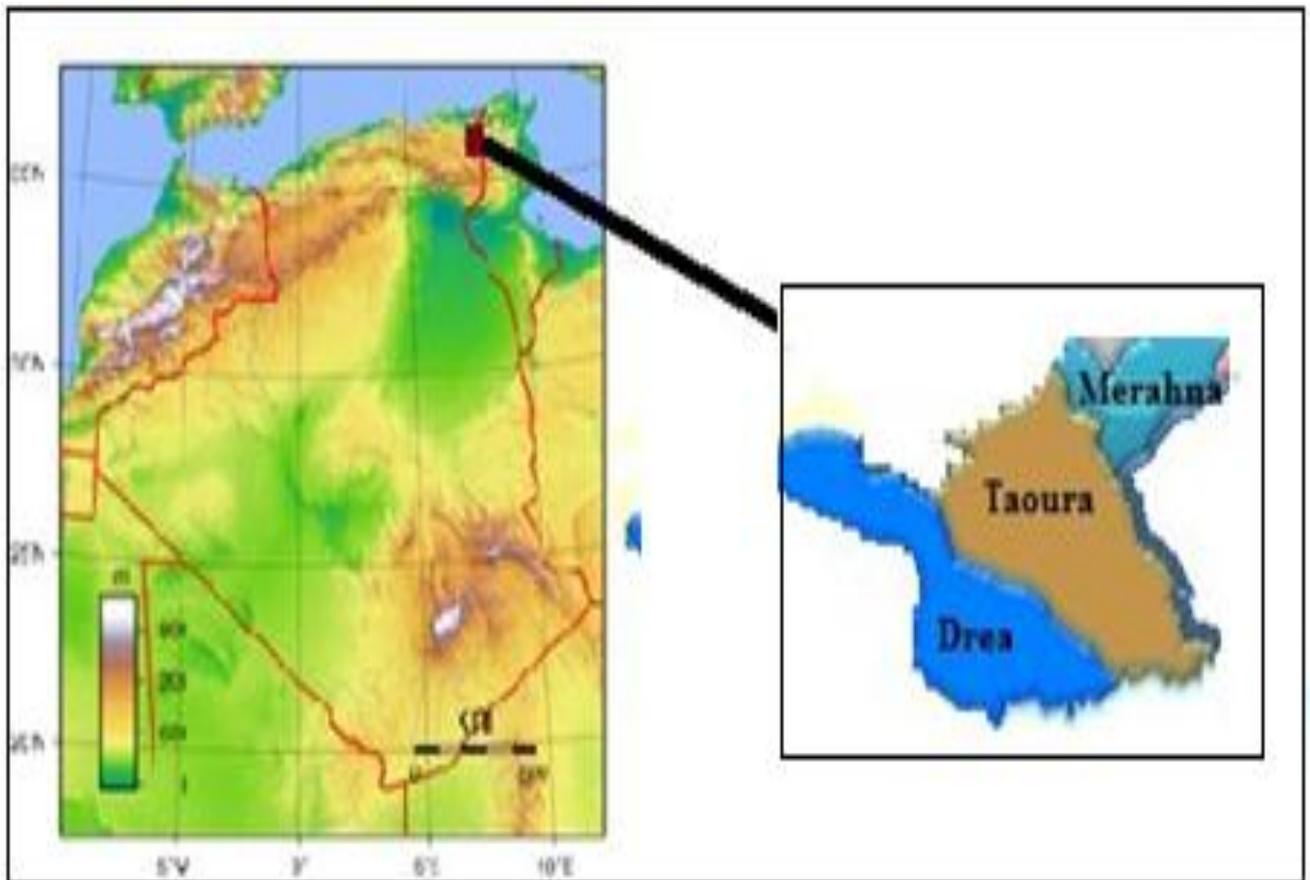


Figure 1: Situation géographique du bassin de Taoura

1.2- Géologie et Hydrogéologie

1.2.1-Géologie

La stratigraphie a été décrite à partir de la carte de M'daourouch et Taoura :

1.2.1.1- stratigraphie :

La série stratigraphie de la zone étudiée se compose suite :

a) - Les formations marines :

-Miocène :

La base constituée par des couches gorses le sommet est caractérisé par des marnes argileuses grises parfois s'intercalent des petites couches très minées de grés quartzeux. Maestrichtien supérieur et base du paléocène calcaire marnes argileuses. Les plus importantes formations sont les calcaires gris à patine jaune de 60-100m d'épaisseur. Le sommet est couronné par des interactions de calcaire marneux et de grés stratifiés à patine blanche. Ces formations constituent la base du paléocène.

-Maestrichtien inférieur :

La série est constituée de calcaire et yeux à strates épaisseur formant les fiances des anticlinaux. A l'intérieur des anticlinaux, une bande de passage progressif de marnes grisâtres et de marnes Argileuse. La série ne de passe pas les 60m.

-Campanien supérieur :

Les marnes argileuses forment les fiances des plus, la partie centrale de les plis est constituée par Des marnes calcaires grisâtres et des marnes argileuses gris verdâtres de 25m d'épaisseurs

-Campanien inférieur :

Calcaire crayeux balances, marnes calcaires et marnes blanchâtres la série fait 50m d'épaisseur.

-Sénonien :

Sommet marnes argileuses et marnes grisâtres, la base est formée par de calcaires marneux marno-calcaire et marnes blanchâtres.

b)-formation continentale :

-Mio- Pliocène :

Très répandu dans la région. La série continentale rouge est constituée par des conglomérats, des graviers, des grès, des marnes argileuse , argiles rouge et des sables.

- ❖ Quaternaire
- ❖ Eboulis de pente
- ❖ Travertins croutes de calcaire et limons
- ❖ Cailloutis et sable lacustre.

1.2.1.2-tectonique :

Il s'agit d'un synclinal faillé dont la partie centrale est comblé par le Mio-Pliocène.

Les failles sont concentrées dans le nord et le sud-est. Par rapporte à la géométrie

De ce synclinal, la direction de ces accidents est la suivante

Longitudinale : SE. NW, SW. NNE

Transversale : NS. NNW à SSE

Oblique : EW. WN, WE et SE.

Des petits plis locaux sont localisés dans la partie sud et nord du bassin.

-Conséquences :

Le bassin de Taoura est très occidentales et où l'effondrement est très confus et peu net. Ces conséquences compliquent de plus en plus la datation.une étude de microtectonique est nécessaire pour la mise en évidence de la phase génératrice de l'effondrement.

1.2.1.3-Géomorphologie

-Description :

Bien qu'il s'agisse d'un synclinal du point de vue géologique, sa géomorphologie interne est parfaitement variable.

Selon cette variation, on distingue deux grandes zones.

-zone est : Khédara - Merahna.

-zone ouest : Taoura - M'daourouch.

L'étude ne se rattache qu'à la dernière zone. Elle correspond au rétrécissement du synclinal plus loin à l'ouest. Le col de Taoura représente le croisement le plus important des lignes de

partage des eaux.

Le bassin est caractérisé par une morphologie assez modérée et se distingue par :

Un flanc nord formé par la chaîne continue de Ain Hallouf et de djebel Sraïa .

Un flanc sud dépassant dans le djebel Boustarine.

Le cœur du bassin est rempli par la formation et où on trouve des fonds étendus et ondulés

De quelques plantations.

1.2.2-Hydrogéologie

Caractéristiques Hydrodynamiques

L'interprétation des données de pompage (6 pompages de longues durées, plus de 48 heures) indique des valeurs de transmissivité, comprises entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ et $0,7 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Les plus fortes valeurs sont déterminées au niveau des forages T4, T7, ces derniers captant les formations du Turonien ; Maestrichtien et Cénomaniens. Ces ouvrages se localisent sur l'axe synclinal de la cuvette de Taoura. En aval de Taoura, au niveau des forages M1 et M2, les caractéristiques hydrodynamiques calculées montrent des valeurs de transmissivité comprises entre $3,4 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $0,2 \cdot 10^{-5}$ m²/s (Lannani et al 2008). Les valeurs ainsi obtenues, différentes des précédentes (plus faibles), indiquent vraisemblablement une variation de la lithologie. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement, varient entre $1,9 \cdot 10^{-3}$ et sont localisées dans la zone de Drea D3 et $2,6 \cdot 10^{-1}$, T7 observées dans la partie du synclinal de Taoura) (Strojexport, 1977). Par ailleurs le coefficient d'emmagasinement calculé $S=2,6 \cdot 10^{-1}$, caractérise une nappe karstique. La valeur de la perméabilité issue du dépouillement des essais par pompage, oscille entre $1,2 \cdot 10^{-5}$ et $2,9 \cdot 10^{-4}$ m/s. Les cartes piézométrique établies par les différents auteurs (Lannani, 2008, Brahmia et al, 2017) Montrent que l'écoulement général se fait du sud vers le nord.

1.3- Cadre Hydro climatique

L'étude des caractéristiques hydroclimatologiques, joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eaux, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. Pour cela, l'élaboration du bilan hydrique est indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydraulique.

1.3.1-Station de Mesure

La période d'observation s'est faite à travers la station de Souk Ahras, allant de 1968/1969 à 2017/2018.

Tableau 1: Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Souk Ahras

Altitude	Longitude	Latitude	Période d'observation
590	7°35'E	36°15'N	1969/2018

1.3.2-Facteurs Climatiques

Les précipitations sont le facteur le plus important dans l'établissement du bilan hydrique, parce qu'elles reflètent la circulation des eaux de surface et souterraines. Toute étude climatologique doit donc prendre en compte une analyse détaillée des précipitations afin de bien caractériser les régimes des cours d'eaux et des nappes.

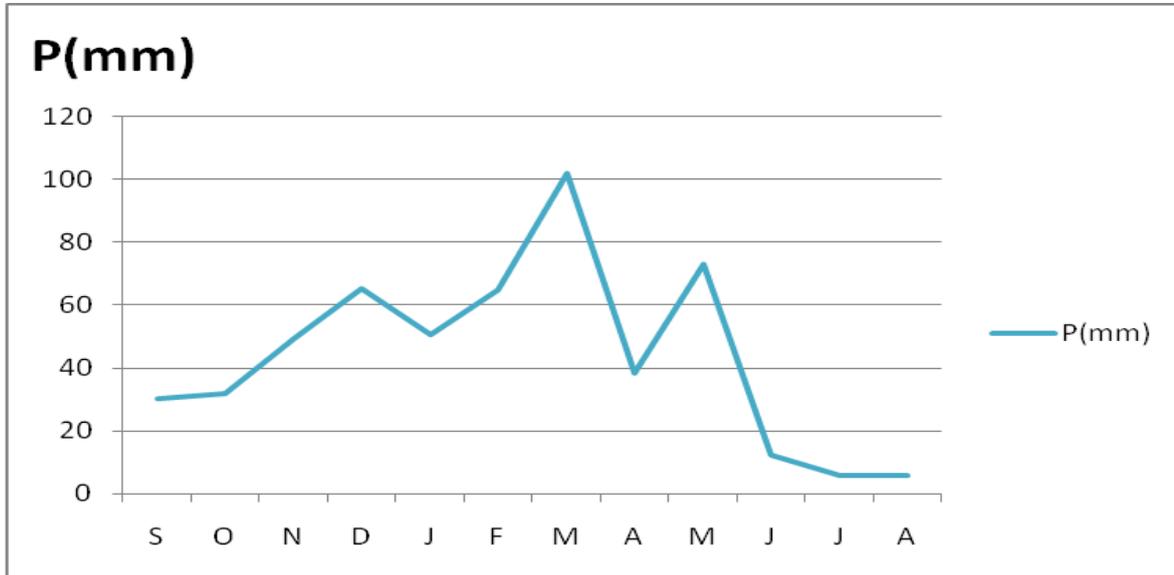
1.3.2.1- Les Précipitations

La pluviométrie dans cette région se caractérise par une forte intensité des précipitations au printemps avec un maximum de 102 mm au mois de mars et d'une diminution des amplitudes pluviométriques en été avec un minimum de 5.9 mm au mois de Juillet (Tableau 2).

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Souk Ahras
(1969/2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	30.50	32.00	49.50	65.50	50.50	65.00	102.00	38.50	73.00	12.50	5.90	6.00

Grphe représente la variation de précipitation



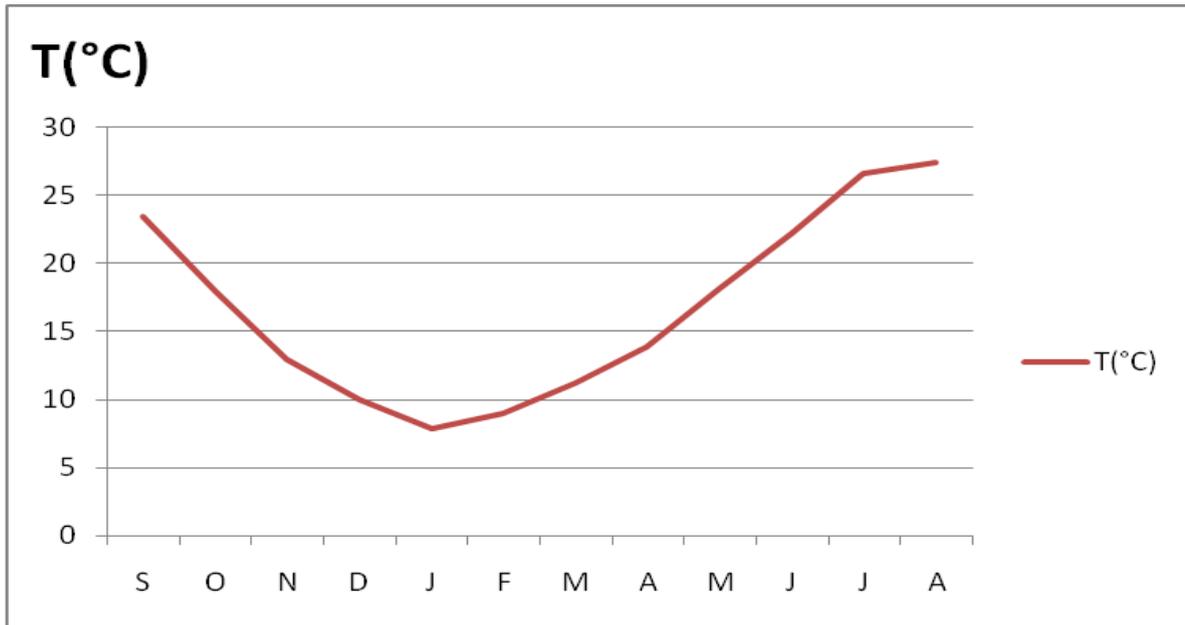
1.3.2.2- La Température

Le second facteur le plus important dans l'étude climatique est la température qui agit sur le phénomène d'évapotranspiration influençant ainsi le ruissellement et l'infiltration dans un bassin versant. On dispose des données des températures moyennes mensuelles de la station de Souk Ahras durant la période (1969/2018). Les données sont condensées dans le tableau 3. D'après le tableau 3, nous constatons que les plus faibles valeurs sont rencontrées aux mois de Janvier et février de 7.88 et 9.02°C respectivement tandis que les plus fortes caractérisent les mois de Juillet et Août avec 26.61 et 27.41 °C respectivement. L'écart thermique entre le mois le plus chaud et le mois le plus sec est de 19.53°C.

Tableau 3: Température moyenne mensuelle de la station de Souk Ahras (1969/2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T(°C)	23.42	18.00	13.00	9.98	7.88	9.02	11.28	13.89	18.14	22.24	26.61	27.41

Grphe représente les variations de températures



1.3.3-Diagramme pluvio-thermique

La combinaison des paramètres température - précipitation permet de déterminer l'alternance des saisons dans une région et aussi de distinguer le climat d'une région à une autre. La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant les mois secs. La saison sèche débute au mois de mai et se termine début septembre. Quant à la saison humide, elle commence à partir d'octobre et se termine en mai.

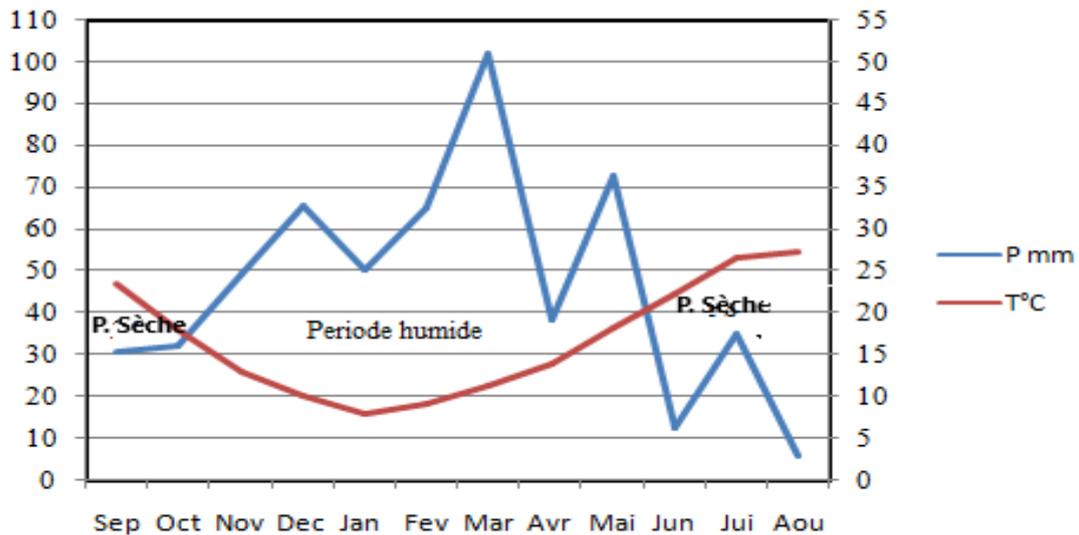


Figure 2: Diagramme pluviothermique

1.3.4-Bilan hydrologique

L'étude du bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des quantités d'eau reçues par un bassin versant entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation). Il est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Où tous les termes sont en mm

1.3.4.1 -Bilan de Thornthwaite

Les données ont permis de dresser le bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite (1948), cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride. Vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule est appliquée. Elle fait ressortir les quatre paramètres qui sont l'évapotranspiration réelle et potentielle, l'excédent et le déficit agricole. L'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule suivante :

$$ETP = 1.6 (10t/T)^a \cdot F(\lambda)$$

Où :

$$I = (t/5)^{1.5}, I = \sum_1^{12} i \text{ et } a = 1.6/100 \cdot I + 0.5$$

t: température moyenne annuelle

i : indice thermique mensuel

I: indice thermique annuel

F(λ): Facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jour, de mois et la Température.

Pour le calcul de l'ETR, deux cas sont considérés :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP, l'ETR est égale à l'ETP ;
- Si les précipitations du mois sont inférieures à l'ETP, l'ETR sera égale à l'ETP aussi longtemps que les réserves en eau du sol demeurent.

Tous ces paramètres sont directement liés à la RFU, en d'autres termes dépendent de sa valeur qui est très difficile à estimer. Dans notre cas la RFU est prise égale à 100 mm (SOGREAH, 1999).

Tableau 4 : Bilan d'eau de Thornthwaite

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
S	23,42	10,4	1,03	111,9	30,5	-81,4	-0,7	0,0	0,0	30,5	81,4	0,0
O	18	7,0	0,97	66,2	32	-34,2	-0,5	0,0	0,0	32,0	34,2	0,0
N	13	4,2	0,86	33,0	49,5	16,5	0,5	16,5	16,5	33,0	0,0	0,0
D	9,98	2,8	0,81	19,5	65,5	46,0	2,4	46,0	62,5	19,5	0,0	0,0
J	7,88	2,0	0,87	13,8	50,5	36,7	2,7	36,7	99,3	13,8	0,0	0,0
F	9,02	2,4	0,85	17,1	65	47,9	2,8	0,7	100,0	17,1	0,0	47,2
M	11,28	3,4	1,03	30,7	102	71,3	2,3	0,0	100,0	30,7	0,0	71,3
A	13,89	4,7	1,10	47,4	38,5	-8,9	-0,2	-8,9	91,1	47,4	0,0	0,0
M	18,14	7,0	1,21	83,7	73	-10,7	-0,1	-10,7	80,4	83,7	0,0	0,0
J	22,24	9,6	1,22	121,0	12,5	-108,5	-0,9	-80,4	0,0	92,9	28,1	0,0
J	26,61	12,6	1,24	168,9	5,9	-163,0	-1,0	0,0	0,0	5,9	163,0	0,0
A	27,41	13,1	1,16	166,5	6	-160,5	-1,0	0,0	0,0	6,0	160,5	0,0
Annuel	16,7	79,3		879,5	530,9	-348,6				412,4	467,1	118,5

-TP: Température mensuelle en °C -P : Précipitation mensuelle (mm)

-i: Indice thermique –RFU : Reserve Facilement Utilisable (mm)

-CL : Coefficient de latitude –ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

-ETPc : Evapotranspiration potentielle corrigée (mm) –Def : Déficit agricole (mm)

–Exc : Excédent (mm)

Formules de vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad \text{A.N: } P = 412.40 + 118.5 = 530.9 \text{ mm}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum \text{Déf} \quad \text{A.N : } ETR = 412.40 + 467.10 = 879.50 \text{ mm}$$

L'analyse du bilan hydrique permet d'observer l'ETR qui représente 77% des précipitations, le déficit agricole commence à partir du mois de juin jusqu'au mois de octobre avec un maximum au mois de Juillet (163.0mm). La reconstitution de la réserve utile commence en novembre et s'épuise au mois de mai. L'écoulement se produit après que la RFU soit satisfaite (RFU=100 mm), il dure 7 mois, de novembre jusqu'à fin mai avec un maximum au mois de février et mars (100 mm).

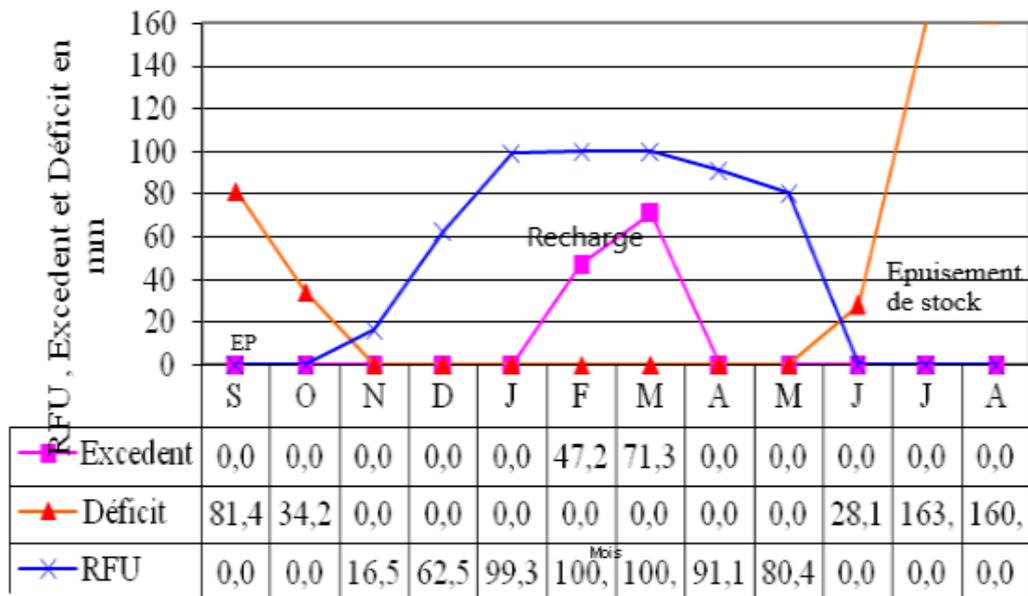


Figure 3: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite

Il en ressort de la figure que l'évapotranspiration maximum se produit aux de mois de juillet (168.9mm) et août (158.7mm), ce qui entraine un déficit agricole (466.70 mm) et nécessite une irrigation pour les zones des cultures. Par contre, pendant les mois de novembre à mai, on observe une recharge de la nappe.

1.3.5- Estimation de Ruissellement

Pour l'estimation de l'écoulement, l'application de la formule de Tixeront-Berkaloff est habituellement utilisée en Algérie pour les précipitations inférieures à 600 mm et sur des très petits bassins versants. L'inconvénient est qu'elle ne tient pas compte de la nature du sol ou des formations traversées. Il faudrait donc faire des corrections en fonction de la nature du sol du bassin et de sa superficie (capacité de rétention, perméabilité, étanchéité...).

La formule est la suivante :

$$\text{Pour } P < 600 \text{ mm/an : } R = P^3 / 3(ETP)^2$$

R : Ruissellement (mm), P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/an).

Le ruissèlement calculé à l'aide de la formule Tixeront-Berkalof est estimé à 64.22mm/an.

1.3.6-Estimation de l'infiltration

La disponibilité des différents facteurs régissant l'équation du bilan hydrologique nous permet de déterminer l'infiltration efficace(I) qui s'écrit comme suit :

$$I = P - ETR - R$$

Le bilan hydrologique est donne par la formule suivante :

$$P = I + ETR + R$$

D'où l'infiltration sera égale $I = P - ETR - R$

La lame d'eau infiltrée est de 54.28mm/an

Tableau 5. Terme du bilan hydrologique

Paramètres	P (mm)	ETr(mm)	R (mm)	I (mm)
Station Souk Ahras	530.90	412.4	64.22	54.28

1.3.7-Calcul d'indice d'aridité :

Défini par MARTONNE(1923) selon la formule et la classification suivantes :

$$I = P / (T + 10) = 530.9 / 16,7 + 10 = 19.88$$

La formule climatique de MARTONNE et appelée indice d'aridité ; il est fonction de la température et de la précipitation :

P : précipitation mm

T : température moyenne annuel °C

Si $A < 5$ le climat est hyperaride

Si $5 < A < 7.5$ le climat est désertique

Si $7.5 < A < 10$ le climat est steppique

Si $10 < A < 20$ le climat est semi-aride

Si $20 < A < 30$ le climat est tempéré

Si $A > 30$ le climat est abondant (climat humide)

L'indice d'aridité calculé à la station de souk Ahras est estimé à 19.88 ce qui traduit que la zone d'étude est situé sous un climat semi-aride (Tableau 6)

Tableau 6. Calcul d'indice d'aridité de la station

La station	P(mm)	T ⁰ c	Indice d'aridité	observation
Souk Ahras	530.90	16.70	19.88	Climat semi-aride

Conclusion :

La région de Taoura est soumise a un climat méditerranéen continental avec des hivers froids et des étés chauds. La température moyenne est de l'ordre de 16.70°C et une hauteur de précipitation de 560.90 mm en moyenne. L'indice de MARTONNE calculé, Classe la région dans l'étage de semi-aridité.

Chapitre 2- Matériels et méthodes

Introduction

Dans le but de procéder à une analyse physico-chimique des eaux de notre zone étude, nous avons procédé à un prélèvement des échantillons de ces eaux dans le respect strict suivant les techniques d'échantillonnage.

Notre étude est fondée sur l'échantillonnage de huit forages, puits et source permettant à la fois une étude de chaque point et leur comparaison sur la base de prélèvements simultanés.

2.1- Echantillonnage ;

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à la quelle le plus grand soin doit être apporté .l'échantillon doit être homogène représentatif et obtenu sans modifier les caractéristique physico-chimique de l'eau, il convient d'avoir des connaissances précises sur les conditions de prélèvement et de son importance pour la fiabilité des résultats.

2.2- Matériel et méthodes de prélèvement :

Le matériel de prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière, pour la physico-chimique, on utilise des bouteilles en plastiques d'une contenance d'un demi-litre. Pour l'analyse physico-chimique, au moment de prélèvement, la bouteille sera rincée plusieurs fois par l'eau à analyse puis remplir jusqu'au bord et la fermer. Les prélèvements doivent être scellés et munis d'une étiquette : la date, l'heure et le point de prélèvement.

2.3- Transport des échantillons :

Pour optimiser un meilleur résultat sur les analyses :

- le délai entre le prélèvement et l'analyse au laboratoire doit être le plus court possible ;
- les échantillons doivent être transportés dans un glacière à une température de 4°C pour les protéger contre le rayonnement solaire.;

2.4-Analyses physico-chimiques

2.4.1- Les paramètres physiques

Quatre paramètres physiques (PH, température, conductivité électrique et TDS) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un multi paramètre de terrain de marque HANNA H19828.

Il faut suivre les procédures suivantes après avoir plané directement la sonde de mesure dans un récipient d'eau échantillonnée.

- Immerger la sonde dans l'échantillon à mesurer en évitant les chocs ;
- Allumer l'instrument ;
- L'instrument affiche les différents paramètres selon la programmation effectuée

2.4.1.1- Potentiel en hydrogène (pH)

Le pH (potentiel en hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. L'alcalinité mesure donc l'ensemble des substances susceptibles de réagir avec les ions hydrogènes. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14.7 étant le pH de neutralité. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

2.4.1.2- La température (T°C)

La température de l'eau est le paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment).

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique bactérien et l'évaporation de l'eau.

La température dépend de :

- la situation géographique,
- la saison ;
- la profondeur (la température des profondeurs est généralement plus faible qu'en surface) ;
- la couleur de l'eau (une eau sombre absorbe plus fortement la chaleur) ;
- le volume de l'eau (plus le volume est élevé moins importantes sont la fluctuation de

température) ;

L'origine des eaux alimentant les lacs, les rivières (les eaux venant de la montagne sont plus froides que les eaux de ruissellement) ;

-les rejets industriels qui généralement élèvent la température de l'eau.

2.4.1.3 La conductivité (CE):

La conductivité électrique d'une eau (γ) est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 à 2 cm² de surface et séparées l'une à l'autre de 1 cm. Elle est directement liée à la teneur en minéraux dissous ionisés. Elle augmente avec la température. Elle est l'inverse de la résistivité (σ)

En mesurant la conductivité, nous essayons d'avoir une estimation de la quantité de sels ionisables dissous.

2.4.2- Les paramètres chimiques

➤ Analyses au laboratoire

On procède à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ ; K^+ ; Cl^- ; SO_4^{2-} ; HCO_3^- , PO_4^{3-}) ainsi que le titre alcalimétrique complet TAC et le titre hydrotimétrique TH.

2.4.2.1- Dosage du calcium (Ca^{2+})

Le calcium s'introduit dans le système d'eau douce sous l'action de la motorisation des roches, particulièrement celle des roches calcium, et par entraînement à partir du sol dans les eaux d'infiltration, par lixiviation et par ruissellement. On a constaté que la lixiviation du calcium à partir du sol augmentait nettement avec l'acidité de l'eau.

a) Principe (méthode par complexométrie)

Le dosage est fait avec le avec le pH élève (entre 12 et 13), le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'intervient pas. Par ailleurs, l'indicateur choisi ne se combine qu'avec le calcium.

b) Réactifs

- indicateur coloré : murexide
- solution d'E.D.T.A(N/50)
- solution d'hydroxyde de sodium à 2N.

c) Mode opératoire

- introduire 50ml d'eau à analyse dans un erlenmeyer au col large,
- Ajouter 2ml de solution d'E.D.T.A jusqu'à virage du rose au violet soit V le volume de solution d'E.T.A jusqu'à virage du rose au violet soit V le volume de solution d'E.D.T.A versé.

d) Expression des résultats

Le facteur de correction F_c est égal :

$$F_c = \frac{\text{volume versé}}{\text{volume théorique (12.5ml)}}$$

$$[Ca^{2+}] \text{ mg/l} = V^{(E.D.T.A)} \times f_c \times 8$$

2.4.2.2- Dosage du magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium se place au huitième rang parmi les éléments naturels les plus abondants. La plus part de ses sels sont très solubles dans l'eau (Rodier, 1996).

Toutes les eaux naturelles en contiennent et il contribue largement à leur dureté.

Les principales sources de magnésium contenu dans ces eaux sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires.

a) Principe

Titration molaire des ions calcium et magnésium avec une solution de sel disodique de l'acide éthylènediaminetétracique.

Le noir érichrome T, qui donne une couleur rouge foncé ou violette en présence des ions Calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur

b) Réactifs

Solution d'E.D.T.A (N/50)

-Noir Eriochrome T

-NH₄OH à pH=10

b) Mode opératoire

-Introduire 50 ml d'eau à analyser dans un erlenmeyer au col large ;

-Ajouter 02 ml de NH₄OH à pH=10 et une pincée d'Eriochrome T.

-Titre par E.D.T.A(N/50) jusqu'au virage de couleur bleu (V₂).

C) Facteur

-50ml de solution mère de CaCl₂

-2 ml de NaOH (2N)

-Une pincée de Murexide

-Titre par E.D.T.A (N/50) Jusqu'au virage violet(V₁).

F=12.5/VEDTAI

D) Expression des résultats

[Mg²⁺] mg/= (V₂-V₁) x Fx4.8

V₂ : Volume titré de calcium et de magnésium

2.4.2.3 Dosage de sodium et potassium (Na⁺ et K⁺)

a)Principe

La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins Li⁺ ; Na⁺ et K⁺.

Le photomètre de flamme est constitué de trois éléments : le bruleur, le monochromateur et d'une cellule photoélectrique ; d'un afficheur.

a) Mode opératoire

-préparation des solutions étalons

- **Solution mère**

Préparer 100 ml d'une solution mère renfermant 0.500 g/l de sodium et 1.500g/l de potassium en prélevant les masses ci-dessous :

NaCl pur pour les analyses : 0.127g

KCl pur les analyses : 0.286g

Eau distillée.

c) Résultats

La lecture se fait directement sur l'écran.

2.4.2.4- Les chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ce sont les océans qui contiennent de loin la plus grande quantité de chlorures dans l'environnement. Dans les eaux souterraines, leur concentration dépend des roches traversées.

a) Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium, la fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

b) Réactifs

- solution de chromate de potassium à 10%
- solution de nitrate d'argent N/10

c) Mode opératoire

- introduire 25ml d'eau à analyser dans un erlenmeyer à col large ;
- Ajouter 02 à 03 gouttes de solution de chromate de potassium à 10%
- verser au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes ;
- soit V le nombre de millilitres de nitrate d'argent N/50 utilisées

d) Expression des résultats

$$\text{Teneur} = V \text{ (ml)} \times 142$$

2.4.2.5- Détermination des sulfates (SO²⁻₄)

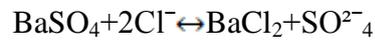
Les sulfates peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfates est l'oxydation des minerais de sulfates, la présence des schistes ou des déchets industriels.

Le sulfate est un des éléments majeurs des composées dissouts dans l'eau de pluie.

a) Principe (Méthode allemande : M.KERN (2010))

L'objet de la présente est de décrire la détermination de sulfate par spectroscopie.

Les ions sulfates sont précipitées et dossées à l'état de sulfate de baryum suivant la réaction :



b) Réactifs

-solution mère de sulfate à 1g/l à partir de Na₂SO₄

Peser 1.47g NaSO₄

1000ml d'eaux distillée

-solution stabilisante

Acide chlorhydrique..... 600 ml

Ethanol 200 ml

Chlorure de sodium 150 ml

Eau distillée..... 1000 ml

-solution de chlorure baryum

Chlorure de baryum..... 150ml

c) expression de résultat

Acide chlorhydrique.....5ml

Eau distillée.....1000ml

d) gamme d'étalonnage

-Prendre 8 béchers de 25 ml

- Laver très bien avec du savon et une lavette
- Rincer abondamment avec l'eau de robinet
- Rincer avec une solution d'acide chlorhydrique
- Rincer avec l'eau de robinet puis avec de l'eau distillée.

e) Mode opératoire

- prendre 20 ml d'eau à analyser puis compléter à 100 ml d'eau distillée ;
- ajouter 5 ml de la solution stabilisante
- ajouter 2ml de chlorure de baryum
- agiter énergiquement pendant 1minute
- passer au spectrophotomètre à $\lambda=420\text{nm}$

f) normes

Normes : PNA=400 mg/l
CMA=400mg/l

g) expression des résultats

$\text{Mg/l SO}_4^{2-} = \text{La valeur lue sur le spectro} \times \text{la dilution}$

2.4.2.6-TAC/TA :

Titre alcalimétrique simple et complet (TA et TAC)

Le titre TAC exprimera l'alcalinité totale de l'eau.

Il a une importance fondamentale dans la connaissance de capacité d'entartrage de l'eau et dans le traitement des eaux des chaudières vapeur.

Les définitions de titres TA et TAC peuvent sembler étonnants mais découlent de la méthode de dosage utilisée qui est un dosage acido-basique.

Les titres alcalimétrique TA et TAC sont mesurés par ajout d'une solution acide titrée (liqueur alcalimétrique) en présence d'indicateurs colorés (ou d'un PH-mètre) dont le changement de couleur indique leur neutralisation.

a) Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

b) Réactifs

- Acides chlorhydrique(HCl) concentré à 37%
- Solution d'acide chlorhydrique (HCl) à 0.01 N

c) matériels :

- pH-mètre ;
- Electrode ;
- Burette manuelle ou burette automatique ;
- Agitateur magnétiques ;
- Béchers de 50 ml.

d) Mode opératoire :

Comme pour toute méthode instrumentale, la méthode d'essai est très étroitement liée aux matériels dont on dispose, se reporter à la notice de l'appareil. Amener 100 ml d'eau à analyser au pH=4.3 ; soit V2 le volume total d'acide employé.

Si le pH est supérieur à 8.3, verser lentement l'acide chlorhydrique pour obtenir cette valeur. Noter le volume V1 au dosimat. Suivre les instructions de l'utilisation du pH-mètre.

e) Mesure et calcul du résultat :

Le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC), exprimés en mg/l sont donnés respectivement par les expressions :

$$-TA=(V1 \times N \times 1000) \times \text{masse molaire des carbonates}/V$$

$$-TAC = (V2 \times N \times 1000) \times \text{masse molaire des bicarbonates}/V$$

-la concentration des bicarbonates sera :

$(\text{HCO}_3) \text{ mg/l} = V_2 \times 61 \text{ volume échantillon} \times N / 1000$

V_2 = Volume de la solution d'acide chlorhydrique à 0.01 N versé de la burette.

N est la normalité de la solution d'acide chlorhydrique = 0.01N.

2.4.2.7- Dosage de nitrates(NO_3^-)

Composé minéral d'azote et d'oxygène, le nitrate représente le dernier stade de nitrification.

a) Principe (méthode salicylate de sodium)

En présence de salicylate de sodium 0.5% (renouvellement toutes les 24 heures).

-Solution d'hydroxyde de sodium 0.5% ; 30g de NaOH dans 100 ml d'eau distillée.

- H_2SO_4 concentré ;

-Tartrate double sodium et de potassium

-Hydroxyde de sodium.....400g

Tartrate double sodium et de potassium.....60g

Eau distillée.....1000ml

Laisser refroidir avant de compéter à 1000ml.

Cette solution doit être conservée dans un flacon de polyéthylène.

-Solution mère d'azote d'origine nitrique à 1000mg/l ;

-nitrate de potassium anhydre..... 0.722g

-Eau distillée..... 1000ml

-Chloroforme..... 1ml

-Solution fille d'azote d'origine nitrique à 5mg/l

Appareillage : Etuve ; spectrophotomètre H.V visible

b) Mode opératoire :

Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser ;

Ajouter 02 à 03 gouttes de NaOH à 30% ;

Ajouter 1 ml de salicylate de sodium ;

Evaporer à sec au bain marie ou à l'étuve 75-88 C.

(Ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir ;

Reprendre les résidus avec 2 ml de H₂SO₄, laisser reposer 10mn

Ajouter 15 ml d'eau distillée ;

Ajouter 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au spectre au 415nm.

c) Expression de résultat

Le résultat est directement lu sur l'appareil en mg/l à une longueur d'onde de 415 nm.

2.4.2.8 Dosage des nitrates (méthode spectrométrique) :

Les nitrates NO₃⁻ sont généralement absents (ou à peine mesurables).

Leur présence est indicatrice d'une pollution due à des rejets d'eau non épurée ou d'un ralentissement du processus de nitrification. Ils sont toxiques à faibles doses (dose létale pour les poissons 3-5 mg/l)

a-Principe

Les ions nitrites réagissent en milieu acide (pH= 1.90) avec la sulfamide en formant sel de diazonium (diazotation) qui forme avec le N-(1-naphtyl)- ethylénediamine-dichlorohydraté un colorant azoïque rouge. $\lambda_{\text{Max}} = 543\text{nm}$

b)-Réactifs

- Solution de nettoyage
Solution d'acide chlorhydrique (à d= 1.12g= 25%)
- Solution du réactif

20g de sulfamide (C₆H₈N₂S) à dissoudre dans un mélange de 50ml d'acide phosphorique d=1.71g/ml=85%de masse et d'eau distillée.

Dans cette solution, dissoudre 1g de N-(1-naphtyl)- ethylénediamine-dichlorohydraté (C₁₂ H₁₆ Cl₂ N₂).

Compléter avec l'eau distillée une fiole jaugée à un volume de 500ml, cette solution est stable

pendant un mois si elle est gardée à l'obscurité (bouteille en verre marron bien fermée) et à au frigo.

➤ **Solution d'acide phosphorique**

Dans une fiole jaugée de 250ml, dissoudre 25 ml d'acide phosphorique (d= 1.71mg/l= 85% en masse) dans 150ml d'eau distillée. Après refroidissement à la température ambiante, on complète à l'eau distillée à 250ml.

➤ **Solution standard de 100 mg/l**

Dissoudre 0.50g \neq 2mg de nitrite de sodium (NaNO_2), sécher pendant 2 heures à 105°C dans 750ml d'eau distillée compléter à 1 litre.

c)prélèvement et préparation des échantillons

Conserver l'échantillon à 4 C et effectuer le dosage dans les six heures qui suivent le prélèvement. En cas d'impossibilité, ajouter une goutte de chloroforme à l'échantillon. Pour les prélèvements, il faut utiliser les bouteilles en verre.

(Dans le cas d'échantillon coloré, il faut également mesurer l'extinction propre de l'échantillon d'eau (sans réactif) mais diluer de la même manière que l'échantillon réel).

d) mode opératoire

-Prendre 50 ml d'eau à analyser ;

-Ajouter 1ml de réactif mixte ;

-Attendre 5 min ;

L'apparition de coloration rose indique la présence des NO_2 .

e) Expression des résultats

Le résultat est directement lu sur l'appareil en mg/l à une longueur d'onde de 543nm

Conclusion

Le respect des principes d'échantillonnage ainsi que l'efficacité des techniques de mesure nous ont permis d'avoir un bon résultat des teneurs en éléments majeurs des eaux d'études, ce qui nous permet de faire une bonne analyse physico-chimique des eaux afin de déterminer leur usage respectif tout en mettant en évidence les corrections à apporter à ces eaux.

Chapitre 3. Résultats et discussion

Introduction

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour. L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux identifier les faciès chimiques des eaux de la nappe, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Cette étude permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine minérale. Par définition, l'eau est un liquide naturel qui se forme par condensation en altitude, puis elle acquiert son chimisme au cours de son trajet, par dissolution des gaz et absorption des composés solubles et insolubles présents dans l'air. Au sol, elle traverse les formations géologiques perméables, ce qui augmente sa minéralisation par lessivages des roches. La figure 4 illustre la position des points d'eau échantillonnés.

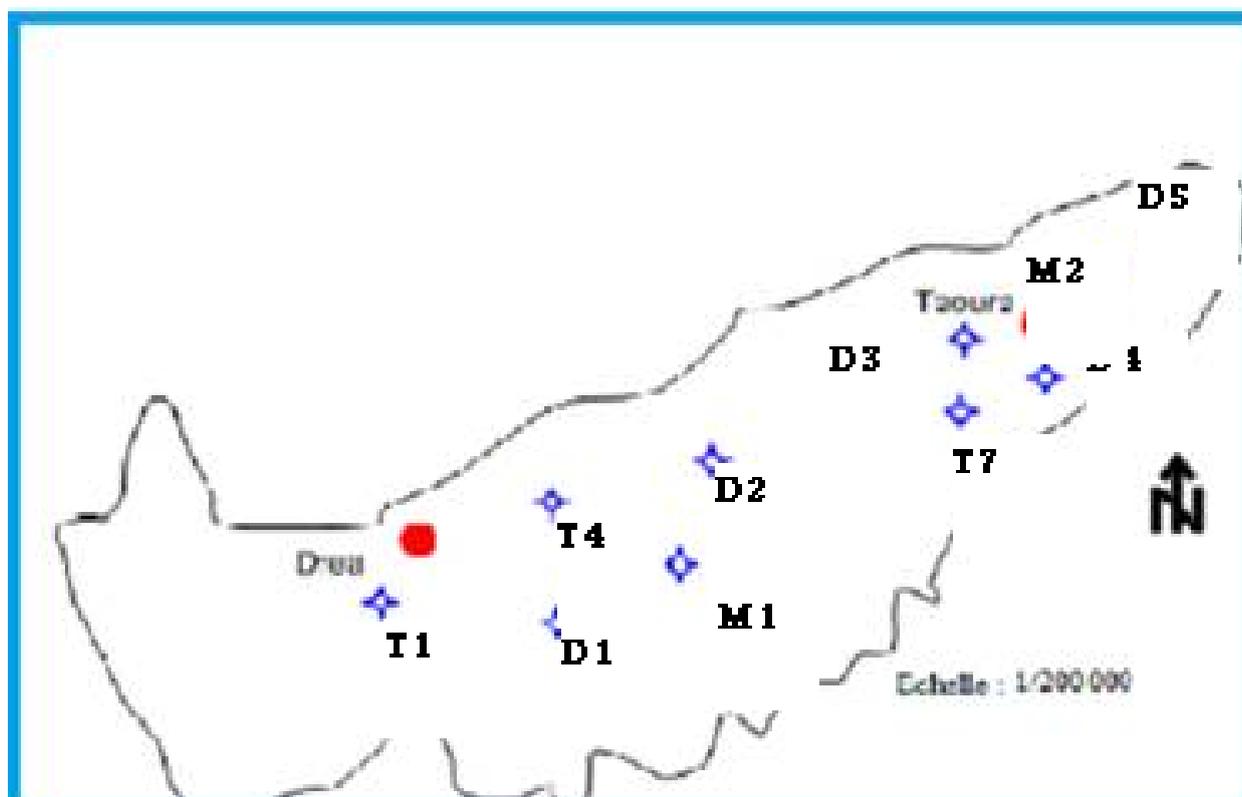


Figure 4: Situation géographique des points de prélèvement

3.1-Résultats et Discussions

Les résultats de la campagne d'analyse physico-chimique réalisée aux mois de mars 2019 sont résumés dans le tableau 7. Les balances ioniques des charges

Tableau 7 : Analyse physico-chimique en (mg/l), CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$

N°	Nom	T°C	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
1	T1	492	7.8	714	64	26	28	6	160	65	114	29
2	T4	610	7.5	879	118	18	29	7	210	112	96	20
3	T7	683	7.2	895	132	12	20	3	250	62	148	56
4	D1	601	8	895	79	22	43	6	149	115	164	23
5	D2	778	7.9	1184	79	29	104	8	213	180	137	36
6	D3	847	8	1305	88	33	130	9	219	213	119	35
7	D4	736	7.8	1102	72	41	82	12	226	155	120	27
8	D5	716	7.8	1008	113	29	43	16	203	78	203	30
9	M1	524	6.5	726	100	22	32	3	200	163	160	50
10	M2	531	7	742	92	18	45	4	232	65	22	52

3.2-Facies chimique

3.2.1- Diagramme de Piper

Pour mieux apprécier les principaux grands traits hydrochimiques et les rapports mutuels, les résultats analytiques ont été représentés sur le diagramme de Piper (1944) en relation avec les anions et cations. Il en ressort de ce diagramme (Figure 5) trois types de facies:

- Facies Bicarbonaté calcique provient des forages M₁ et M₂ présence des calcaires dans cet endroit
- Facies bicarbonaté sulfate calcique (T7) ; présence du gypse et croute calcaire
- Facies chloruré sulfate sodique pour les autres forages.

Ces facies sont liés au contexte géologique de la zone d'étude.

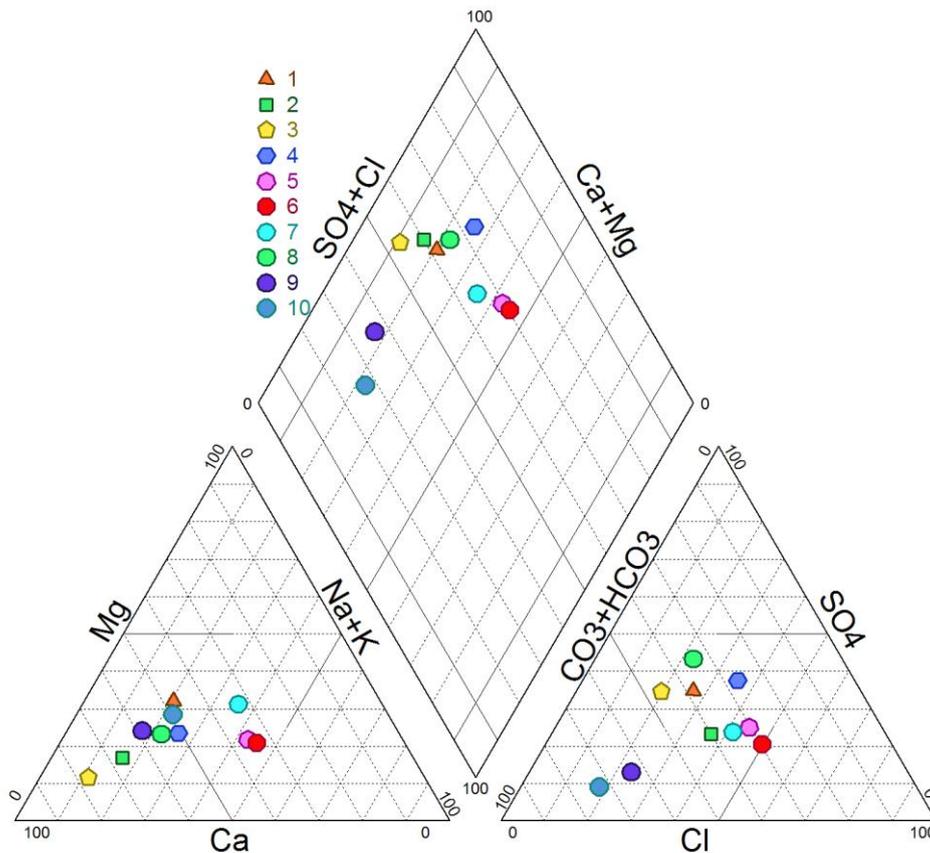


Figure 5: Diagramme de Piper

3.2.2- Diagramme de Chadah

Les anions et cations exprimés en milliéquivalent ont été représentés graphiquement sur le diagramme proposé par Chadha (1999). Huit types d'eau pouvant être identifiés à partir du diagramme dépendent de la relation entre les alcalino-terreux (calcium et magnésium), les métaux alcalins (sodium et potassium), les anions acides faibles (carbonate et bicarbonate) et les acides forts (chlorure et sulfate). La majorité des échantillons (80 %) se trouvent dans la sixième zone, représentant par Ca–Mg–Cl–SO₄ type, où $(Ca + Mg) > (Na + K)$ and $(Cl + SO_4) > (CO_3 + HCO_3)$, alors que le reste exprimant les 2% sont situés sur la première zone.

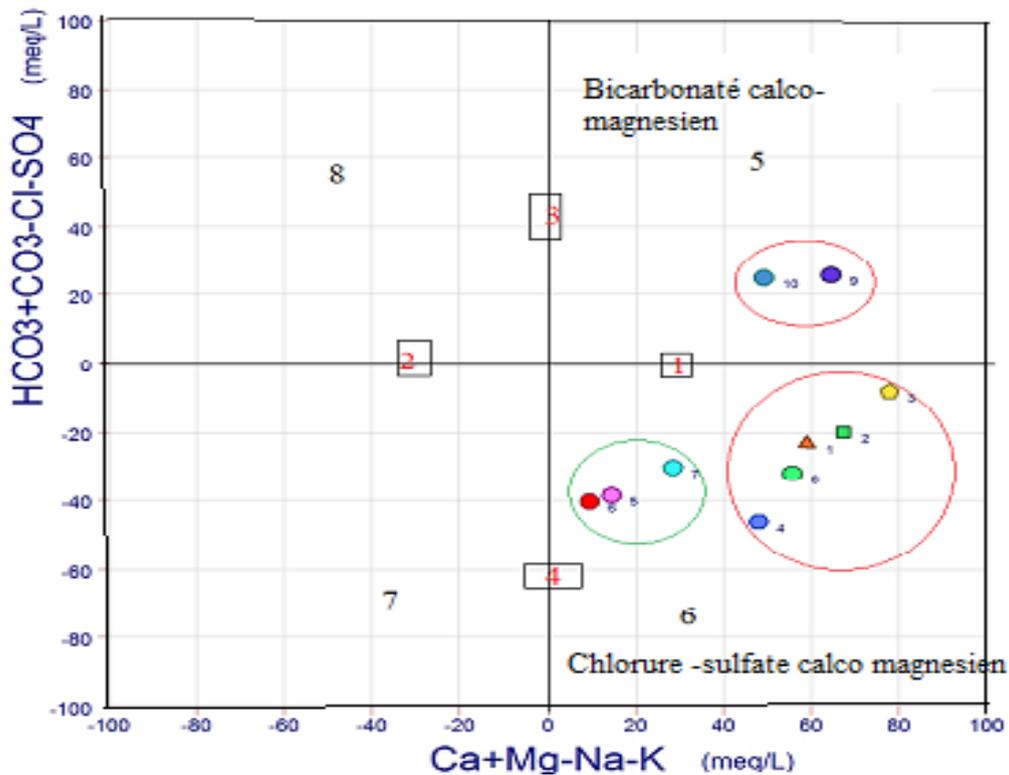
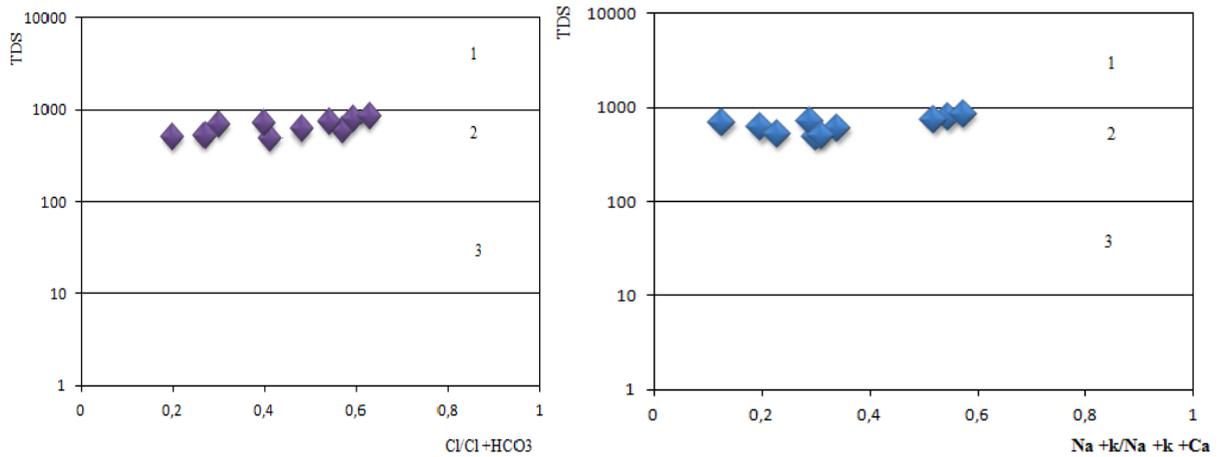


Figure 6: Diagramme de Chadah

3.3-Mécanismes contrôlant le chimisme des eaux souterraines

3.3.1-Diagramme de Gibbs

Pour obtenir un aperçu des processus hydrogéochimiques, Gibbs (1970) a proposé une méthode de diagramme de dispersion illustrant trois mécanismes naturels importants contrôlant le chimisme des ions majeurs dans les eaux souterraines, y compris l'interaction eau-roche, l'évaporation et la précipitation atmosphérique. Pour ce faire, Les concentrations de TDS ont été reportées en fonction des rapports de $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ pour les cations et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ pour les anions (Figure 7). Il a été constaté que la majorité des échantillons prélevés dans la nappe sont dominés par la dissolution des roches ce qui traduit le rôle de ce phénomène sur le chimisme des eaux de la nappe.



- 1- Evaporation et précipitation 2- Dominance de la dissolution de roches 3- Dominance de la précipitation

Figure 7 : Diagramme de Gibbs

3.3.2-Indice de saturation

L'indice de saturation est important pour déterminer le degré d'équilibre entre l'eau et les minéraux et pour reconnaître la dissolution et précipitation des minéraux dans les aquifères. L'indice de saturation est défini par l'équation suivante :

$$IS = \text{Log PAI} / K_{sp}$$

Où PAI est le produit d'activité ionique et K_{sp} est la constante du produit de solubilité.

Le minéral est saturé ou sursaturé par rapport à la solution lorsque l'indice de saturation est positif et a tendance à ne pas se précipiter dans les eaux souterraines. La valeur négative d'IS suggère que l'eau est sous-saturée par rapport au minéral indiquant la dissolution de ce dernier. Le minéral est en équilibre avec les eaux souterraines, si la valeur IS est nulle donc n'a pas tendance à précipiter ou à se dissoudre. L'évaluation de l'IS pourrait être utile pour comprendre les processus géochimiques survenant dans la région et serait en mesure de déterminer l'origine des ions dissous dans les eaux souterraines (Kumar. à 2009). On observe que 80% et 70 % des échantillons sont respectivement saturés en calcite et dolomite et 20 % et 30% sont sous saturés en ces minéraux. Les valeurs des indices de saturation pour le gypse et l'anhydrite sont négatives donc tous les échantillons sont sous saturés en ces éléments, ce qui traduit

l'enrichissement des eaux en sulfates et calcium. Des facteurs tels que l'altération incongrue des minéraux carbonatés et des minéraux silicatés, l'effet des ions communs et l'évaporation, la température et l'exsolution du dioxyde de carbone et le retour des eaux d'irrigation peuvent avoir contribué à la saturation ou à la sursaturation (Aghazadeh et Mogaddam, 2010; Abu Jabal. al 2015).

3.3.4-Pression partielle du CO₂

Les valeurs la pCO₂ calculées varient entre 0.235 à 7.698 10⁻² atmosphères. Ces valeurs sont supérieures à la pression atmosphérique (10^{-3.50} atmosphère), ce qui suggère que les eaux de la nappe sont en contact avec le CO₂ du sol.

Tableau 8 : Indices de saturation de quelques minéraux et pCO₂

Nom	Calcite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	(pCO ₂)10 ⁻² atm	Log (pCO ₂)
T1	0.32	0.59	-1.55	-1.77	0.273	-0.56
T2	0.37	0.27	-1.41	-1.63	0.717	-0.14
T7	0.19	-0.32	-1.19	-1.41	1.705	0.23
D1	0.55	0.89	-1.34	-1.56	1.60	0.204
D2	0.58	1.07	-1.47	-1.69	0.288	-0.54
D3	0.72	1.36	-1.51	-1.73	0.235	-0.62
D4	0.47	0.36	-1.56	-1.78	0.385	-0.41
D5	0.61	0.97	-1.15	-1.37	0.346	-4.60
M1	-0.65	-1.55	-1. 87	-2.09	7.698	0.88
M2	-0.19	-0.49	-2.12.45	-2.34	2.411	0.38

Statistique descriptive

Minimum, maximum, moyenne et écart type sont condensés dans le tableau 9 .

Tableau 9: Statistique descriptive

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
TDS	492	847	649.50	123.77
pH	6.50	8.0000	7.55	0.49
CE	714	1305	942.20	205.53
Ca	64	132	93.70	21.83
Mg	12	41	26.70	8.16
Na	20	130	55.60	36.96
K	3	16	7.40	4.11
HCO3	149	250	207.80	30.84
Cl	32	213	106.	60.26
SO4	22	203	115.90	54.77
NO3	20	56	35.80	12.66

3.4-Corrélation entre paramètres

La matrice de corrélation (Tableau 10) montre que certains paramètres sont bien corrélés entre eux. Habituellement ce sont les éléments solubles, dont la concentration ne peut être affectée par des processus de précipitation, dissolution ou échange ionique qui présentent ces corrélations élevées. Les coefficients les plus forts relient TDS –CE ($r=0.98$), TDS- Na^{2+} ($r=0.78$), TDS- Cl^- (0.84) et a moindre degré TDS- SO_4^{2-} (0.55), Na^+ - Cl^- ($r=0,0.89$). Cependant il existe des relations entre cations et anions.

Tableau 10 : Matrice de corrélation de Pearson

Variabes	TDS	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3
TDS	1,00	0,58	0,98	0,06	0,28	0,78	0,57	0,33	0,84	0,55	-0,18
pH	0,58	1,00	0,65	-0,43	0,27	0,52	0,61	-0,50	0,70	0,72	-0,73
CE	0,98	0,65	1,00	-0,12	0,40	0,88	0,58	0,21	0,92	0,49	-0,28
Ca	0,06	-0,43	-0,12	1,00	-0,65	-0,43	-0,11	0,56	-0,34	0,09	0,37
Mg	0,28	0,27	0,40	-0,65	1,00	0,64	0,54	0,02	0,40	-0,14	-0,19
Na	0,78	0,52	0,88	-0,43	0,64	1,00	0,38	0,15	0,89	0,11	-0,16
K	0,57	0,61	0,58	-0,11	0,54	0,38	1,00	-0,09	0,42	0,62	-0,56
HCO3	0,33	-0,50	0,21	0,56	0,02	0,15	-0,09	1,00	0,00	-0,29	0,64
Cl	0,84	0,70	0,92	-0,34	0,40	0,89	0,42	0,00	1,00	0,34	-0,46
SO4	0,55	0,72	0,49	0,09	-0,14	0,11	0,62	-0,29	0,34	1,00	-0,45
NO3	-0,18	-0,73	-0,28	0,37	-0,19	-0,16	-0,56	0,64	-0,46	-0,45	1,00

3.5-Analyse en Composantes Principales (ACP)

Elle permet de comparer les résultats des différentes eaux des forages et des puits, de synthétiser, de représenter graphiquement les données en se basant sur les corrélations entre les différents paramètres et de réduire un système complexe en un petit nombre de dimensions.

C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

L'ACP peut être calculé à partir de la matrice des covariances ou bien à partir de celle des corrélations. Dans le premier cas, la méthode favorise les paramètres dont les mesures donnent des valeurs élevées au détriment des autres paramètres. Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverse telles que le pH mesuré en unité pH, c'est-à-dire logarithmique, où les concentrations (mg/l), il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice de corrélation qui élimine ces inconvénients (Nouar T, 1997).

3.5.1-Etude de la contribution des observations aux trois premiers facteurs

Une ACP a été pratiqué sur le tableau général des analyses "complètes" réalisées sur l'ensemble des points de mesure (forages). Les deux premiers facteurs fournissent une inertie de 70.72 % (49.38% et 21.33.46 %) qui semble assez bonne compte tenu de l'inertie moyenne. Toutefois le pourcentage cumulé tend lentement vers 100 %, ce qui traduit la complexité des influences qui s'exercent sur le chimisme des eaux. Nous avons aussi sélectionné le 3^{ème} facteur qui représente 16.42% de l'inertie totale.

La répartition des variables dans le plan I-II permet d'attribuer une signification au premier facteur (Figure 8). Il regroupe dans sa partie droite l'ensemble des éléments chimiques TDS, CE, pH, Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- et SO_4^{2-} constituant la minéralisation des eaux et s'oppose à l'élément de la pollution (NO_3^-) dans sa partie gauche. Il convient cependant de noter que NO_3^- contribue aussi significativement au pôle de la minéralisation que les autres paramètres. Les bicarbonates et NO_3^- sont portés par l'axe F2. Selon l'axe F3, il regroupe dans sa partie positive les sulfates et calcium et s'oppose au Mg^{2+} .

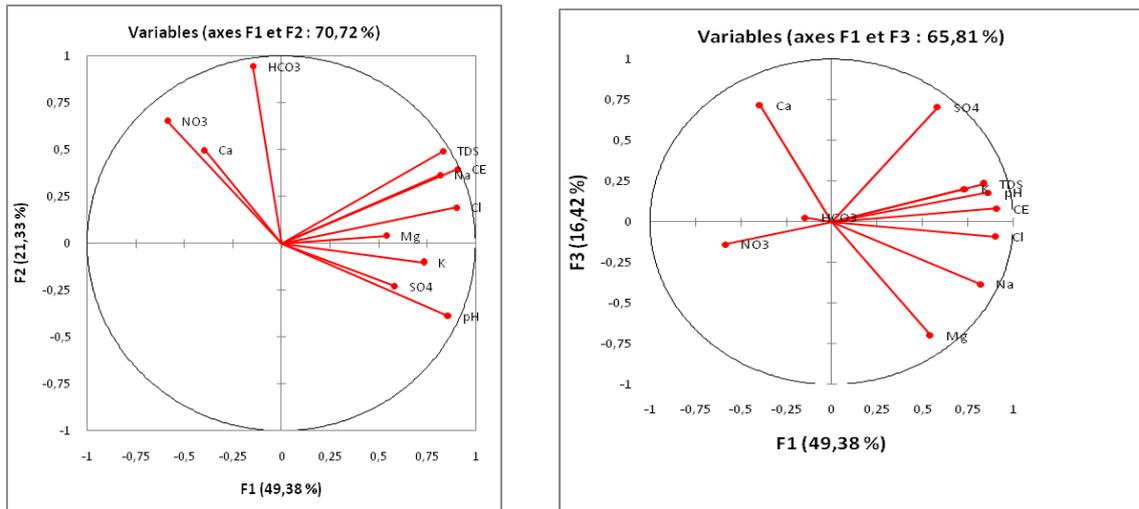


Figure 8: Analyse en composante principale

3.6-Aptitude de l'eau à la consommation humaine et domestique

Les paramètres physico-chimiques et chimiques sont confrontés aux normes de l'OMS de 2008 et 2011 adoptées aux contextes nationaux par le Gouvernement Algérien (annexe).

3.6.1-Paramètres physico-chimiques

3.6.1.1- pH, CE et TDS

Le pH indique le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau. Dans cette étude, le pH de varie entre 6.50 et 8 avec une moyenne de 7.55. Ces valeurs sont en dessous de la limite permise de 8.5 (OMS 2011). La minéralisation de l'eau varie avec la conductivité électrique. La valeur moyenne de la conductivité électrique était de 942.20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un maximum (1305 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qui reste inférieur à la limite permise de 1420 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs totales des sels dissous (TDS) des eaux de la nappe Oscillent entre 492 et 847 avec une moyenne de 649.50. Ces valeurs étaient inférieures à la limite maximale permise par la norme, soit 1500 mg/l.

3.6.2-La dureté ou Titre hydrotimétrique

La dureté est définie comme l'inhibition de l'action du savon dans l'eau en raison de la précipitation de Magnésium et sels de Calcium. Elle peut être temporaire ou permanente. Une

eau dure provoque l'obstruction des canalisations par le dépôt de tarte (sels) et peut nuire à la santé humaine en provoquant des maladies telles que l'insuffisance rénale. Elle est calculée par la formule suivante (Sawyer et McCarthy, 1967) :

$$TH_{CaCO_3} \text{ (mg/l)} = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) * 50$$

Avec (Ca^{2+}) et (Mg^{2+}) en meq/l

Tableau 11 : Valeurs la dureté (TH) des forages

Nom	TH_{CaCO_3} (mg/l)
T1	268
T4	370
T7	380
D1	289
D2	318
D3	357
D4	350
D5	403
M1	459
M2	305

Le TH ou dureté est situé entre 268 et 459 mg/l avec une moyenne de 355 mg/l, en comparaison avec le tableau ci-dessous, les eaux sont très dures.

Tableau 12 : Classification d'après Swayer et McCarty, 1967

TH	< 75 mg/l	Eau douce	Observation
	75-150 mg/l	Eau moyennement dure	-
	150-300mg /l	Eau dure	Toutes les eaux sont dures

3.6.3-Variations des Cations et anions

La concentration en calcium varie entre 64 et 1320 mg/l avec une moyenne de 93.70 mg/l,

Tous les forages présentent des teneurs en calcium inférieures à la limite souhaitable par le standard de l'OMS pour l'eau potable soit (150 mg/l). La concentration moyenne en magnésium varie entre 12 et 41 mg/l avec une moyenne de 26.70 mg/l. Il est évident que les eaux de la nappe ont une concentration de magnésium dans la limite maximale permise de 100 mg/l. La concentration du sodium oscille entre 20 et 130 mg/l avec une moyenne de 55.60 mg/l, tous les échantillons présentent des valeurs de sodium dans la limite permise de 200 mg/l. La concentration moyenne en potassium est de 3 à 16 mg/l avec une moyenne de 7.40 mg/l. La majorité des échantillons présentent des valeurs inférieures à la limite permise de 10 mg/l (OMS, 2011) excepté pour les forages D4 et D5

Les teneurs en bicarbonates varient entre 149 et 250 mg/l avec une moyenne de 207.80 mg/l. Bien qu'il n'y a pas de limites exactes admissibles pour le bicarbonate dans les directives de l'OMS (2011). La présence de HCO_3^- dans l'eau potable ne devrait pas dépasser 500 mg/l afin d'être sans danger pour la consommation humaine. Les concentrations en chlorures dans les eaux de la nappe, oscille entre 32 à 213 mg/l avec une valeur moyenne de 106 mg/l. La limite souhaitable des chlorures pour l'eau potable est spécifiée comme étant de 250 mg/l et tous les échantillons sont en dessous de cette limite. La concentration des sulfates (SO_4^{2-}) varie de 22 à 203 mg/l avec une valeur moyenne de 115.90 mg/l, La majorité des échantillons sont en dessous de dans la limite maximale autorisée de 250 mg/l par le Gouvernement Algérien et peuvent être utilisés pour la consommation. La concentration en nitrates (NO_3^-) des forages varie de 20 à 56 mg/l avec une moyenne de 35.80 mg/l. Un seul échantillon (M2) est hors de la limite permise de 50mg/l (OMS, 2011)

3.7-Aptitude des eaux pour l'irrigation

3.7.1-Pourcentage en Sodium (Na%)

$$\text{Na}^+ (\%) = 100 (\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$$

Ou Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ sont exprimés en meq/l

Le pourcentage en Sodium (Na%) est un paramètre important pour classer les échantillons d'une eau souterraine à des fins d'irrigation. Il est calculé par la formule

proposée par Doneen (1962);

La présence du sodium avec les carbonates forme un sol alcalin; tandis que le sodium avec les chlorures forme un sol salin; les deux cas ne tolèrent pas la croissance des plantes (Pandian et Shankar, 2007). La classification de la qualité de l'eau d'irrigation basée sur les valeurs du pourcentage de sodium proposées par Wilcox (1955) suggère que les eaux souterraines de la zone d'étude sont excellentes, bonnes et utilisables pour la catégorie permise (tableau 13).

Tableau 13: Classification de l'eau basée sur le pourcentage en Sodium

% Na	Classe	Echantillons
20	Excellente	T7, M1
20 - 40	Bonne	T1, T2, et D4
40 - 60	Utilisable	D2, D3 et D4
60 - 80	Médiocre	-
> 80	Mauvaise	-

3.7.2-Conductivité électrique (CE)

Elle mesure la capacité de la substance ou de la solution à conduire le courant électrique. La CE des eaux souterraines augmente avec la température et varie avec la quantité de TDS. La conductivité dans les échantillons d'eau souterraine de la zone varie de 714 à 1305 $\mu\text{S} / \text{cm}$ à 25⁰C indiquant une bonne catégorie d'eau d'irrigation.

La combinaison du taux de sodium et conductivité électrique a permis d'élaborer le diagramme de Wilcox (1955). Il ressort de ce diagramme que les eaux sont classées dans la catégorie excellente à bonne (Figure 9).

Tableau 14 : Comparaison des valeurs de la conductivité électriques avec la classification de Wilcox (1953)

ID	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	observation
Catégorie 1	750 <CE> 2250	Tous les forages
Catégorie 2	2250<CE< 5000	-

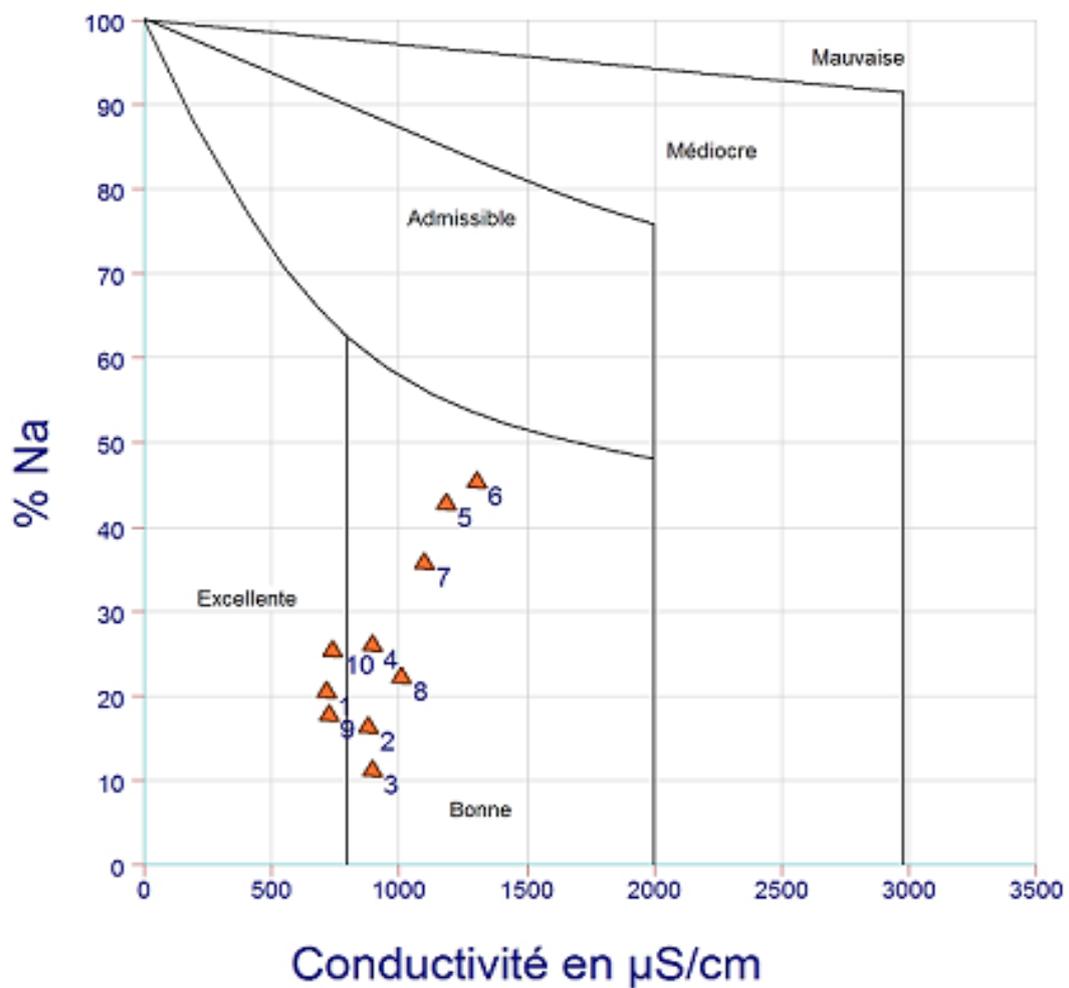


Figure 9 : Diagramme de Wilcox

3.7.3-Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Le degré auquel l'eau d'irrigation a tendance à entrer dans la réaction d'échange de cations dans le sol peut être indiqué par le rapport au degré d'adsorption de sodium (Richards, 1954). Puisque le sodium remplace le calcium adsorbé et le magnésium dans le sol, il est donc exprimé comme suit :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/2)]^{1/2}}$$

Avec Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} en meq/l

L'excès de sodium dans les eaux souterraines s'adsorbe sur les particules du sol, modifiant ainsi les propriétés du sol et réduisant également la perméabilité du sol (Ayers et Bronson, 1975). Selon la classification de (Richard, 1954), l'eau avec un $\text{SAR} \leq 10$ est considérée comme excellente, bonne entre 10 et 18; médiocre entre 18 et 26 et considéré comme impropre à l'irrigation dans sa forme naturelle quand il est supérieur à 26. Comme le montre le tableau 15, Tous les échantillons d'eau souterraine ont un $\text{SAR} \leq 10$; donc excellente pour l'irrigation. Le diagramme de Richards(1954) combine la conductivité et la valeur du SAR. Cette combinaison, a permis d'élaborer le diagramme suivant (figure 10). Les différentes classes du diagramme indiquent la mesure dans laquelle les eaux peuvent affecter le sol en termes de risque de salinité. Ces classes sont: Faible salinité (C1), moyenne (C2), haute (C3) et très forte salinité (C4) et danger de sodium similaire : Faible (S1), moyen (S2), élevé (S3) et très élevé (S4). L'observation de la figure 10 montre que les eaux de la région se répartissent au niveau de la classe C2S1 et C3S1 désignent des eaux bonnes à admissibles. La première catégorie d'eau est utilisée sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plus part du sol. Quand à la deuxième Classe (C3S1), l'eau peut être utilisée seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité, avec une salinité qui doit être contrôlée (Richards, 1954).

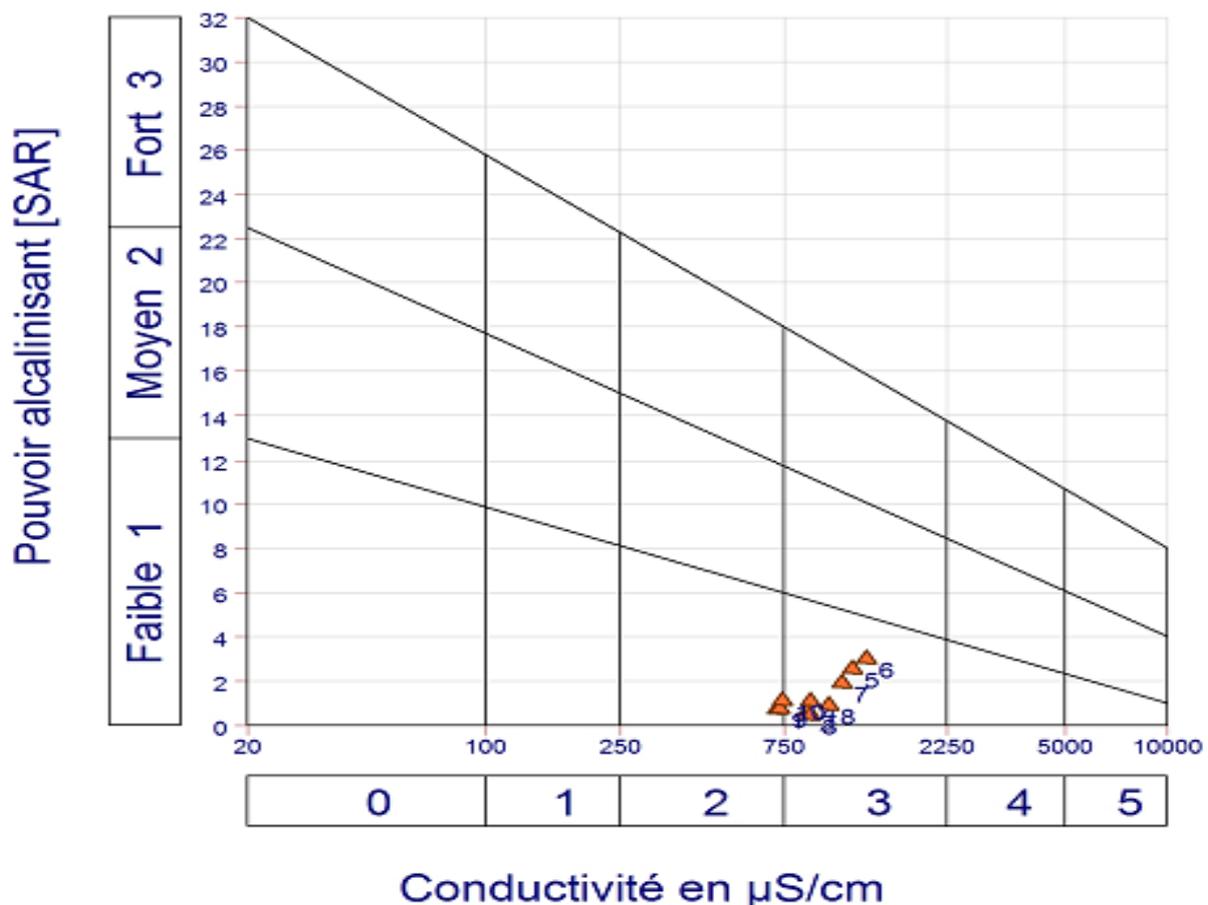


Figure 10: Diagramme de Richards

3.7.4-Carbonate de sodium résiduel (RSC)

La forte concentration d'ions bicarbonate dans l'eau provoque la précipitation du calcium et du magnésium sous forme de carbonates, ce qui permet l'augmentation de la concentration de sodium dans le sol. La RSC est calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\text{RSC} = (\text{HCO}_3^- * 0.0333) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

La concentration de valeurs d'alcalinité en mg / l et $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sont en méq / l. Les valeurs de RSC < 1,25 mg/l sont considérées comme sans danger pour l'irrigation, tandis que celles comprises entre 1,25 mg/l à 2,5 mg/l conviennent marginalement à l'irrigation. Si les valeurs de RSC sont > 2,5 mg/l, l'eau souterraine ne convient pas pour l'irrigation (Eaton ,1950 ; Richards, 1954). Les valeurs RSC des échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude vont de -10.37 à -0.12 mg/l (Tableau 15) donc marginalement adaptées à l'irrigation.

3.8-Les indices de qualité des eaux d'irrigations

3.8.1-L'Indice de Kelly

Le ratio de Kelley (KR) (Kelley ,1963) est décrit comme suit :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Toutes les valeurs sont en meq/l

Si KR est inférieur à 1, cela signifie que les eaux sont aptes à l'irrigation et si $KR > 3$, les eaux sont inaptées à l'irrigation. L'indice de Kelly calculé des eaux souterraines de la zone d'étude varie entre 0.05 et 0.53 meq/l avec une moyenne de 0.47 meq/l (Tableau 15) indiquant que ces eaux sont appropriées à l'irrigation.

3.8.2-Le Magnésium Ratio

En général, le calcium et le magnésium sont à l'état d'équilibre dans l'eau, le taux élevé de magnésium dans l'eau influe sur sa qualité, d'où le danger alcalin (Paliwal ,1972), Il est calculé par l'équation suivante:

$$Mg \text{ ratio} = 100 \times \left[\frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \right]$$

Toutes les valeurs sont exprimées en meq /l.

Les valeurs du magnésium ratio oscillent entre 11.15% et 46.03 %, avec une valeur moyenne de 27.73%. 100% des échantillons sont en dessous de la limite autorisée de 50% indiquant l'effet favorable sur le rendement des cultures et la diminution de l'alcalinité du sol (Tableau 15). Dans notre zone d'étude, toutes les eaux sont utilisées pour des fins agricoles concernant le magnésium ratio.

Tableau 15 : Les résultats de Na%, SAR, RSC, KR et Mg²⁺ des échantillons

Nom	Na ⁺ (%)	SAR	KR	RSC	Mg ²⁺ (%)
T1	27.41	2.95	0.22	-0.53	40.29
T2	20.90	2.181	0.17	-0.40	20.27
T7	13.90	1.66	0.11	0.72	13.15
D1	32.66	4.27	0.32	-0.81	31.66
D2	50.90	10	0.71	0.37	37.89
D3	53.46	11.81	0.79	0.14	38.46
D4	45.41	7.71	0.50	0.51	48.64
D5	29.35	3.60	0.23	-0.49	29.90
M1	17.32	2.47	0.15	-2.52	22.65
M2	30.81	6.93	0.31	1.62	21.12

3.9-Usage industriel

Les eaux destinées à l'utilisation industrielle ne devraient être ni trop incrustante ni agressive afin d'éviter le dépôt de tartre et la corrosion des circuits de canalisations et surtout des chaudières. Pour déterminer ces caractères, le calcul de l'équilibre calco-carbonique s'avère indispensable.

3.9.1-Equilibre calco-carbonique

Le ΔpH , est l'écart entre le pH mesuré et le pH de saturation théorique calculé à partir des teneurs en bicarbonates, sulfates, calcium et magnésium (Bakalowicz. M, 1979).Ce paramètre tient compte de l'ion calcium lié aux bicarbonates et aux sulfates. Le calcul du ΔpH a été réalisé par le programme « équil1 » (Ravarini P, 2006).

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_m - \text{pH}_s$$

Avec : $\text{pH}_m = \text{pH}$ mesuré

- . $pH_s = pH$ de saturation ou d'équilibre
- Si $\Delta pH < 0$ eau agressive vis-à-vis des carbonates ;
- Si $\Delta pH = 0$ équilibre ;
- Si $\Delta pH > 0$ eau entartrante.

3.9.2-Indice de Ryznar

Pour connaître l'agressivité ou l'entartrage d'une eau, on peut aussi calculer l'indice de Ryznar noté IR (Berné, 1991). Il est calculé à partir de la relation suivante :

$$IR = 2 pH_s - pH_m$$

Avec : $pH_s = pH$ de saturation

$pH_m = pH$ mesuré

Si $IR = 6$ eau neutre ;

Si $IR < 6$ eau agressive ou corrosive;

Si $IR > 6$. Eau incrustante ou entartrant.

Tableau 16 : Valeurs de ΔpH et d'IR

Nom	ΔpH	IR
T1	0.30	7.30
T4	0.40	6.82
T7	0.17	6.92
D1	0.49	7.06
D2	0.39	6.85
D3	0.75	6.59
D4	0.50	6.88
D5	0.62	6.59
M1	-0.65	8.02
M2	-0.17	7.25

Nous constatons que les eaux des forages ont des valeurs d'IR supérieur à 6, ce qui traduit le caractère entartrant de ces eaux. Pour les eaux à ΔpH négatif, elles sont agressives vis-à-vis des carbonates, c'est à dire que les carbonates précipités sont aussitôt repris par dissolution. Ces résultats sont confirmés par les valeurs de l'Indice de Ryznar.

Conclusion

L'étude hydro chimique a décelé de déterminer la qualité physico-chimique des eaux pour leurs destinations appropriées. . Nous pouvons conclure que ces eaux sont bonnes à la consommation humaine, comparées aux normes de l'OMS.

Pour l'utilisation agricole, ces eaux peuvent être utilisées sans restriction. En ce qui concerne l'usage industriel, ces eaux sont a majorité entartrantes dont le risque majeur est de colmater les conduites.

CONCLUSION GENERALE

La région de Taoura située au Nord-Est de l'Algérie dispose des potentialités hydriques importantes caractérisées surtout par des eaux souterraines qui sont captées à travers des forages, puits et sources afin satisfaire la demande en eau de la ville de Souk Ahras et les villages de la région.

D'un point de vue géologique, la région de Taoura est considérée comme un bassin subsident à remplissage détritique du Mio- pliocène et quaternaire. La première, libre (d'environ 40 m d'épaisseur) contenue dans les formations Mio-Plio et Quaternaire, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers ... constituant le remplissage du synclinal de Taoura. Cette nappe est surtout captée par les puits domestiques dans la partie Nord-Est et vers Merahna [20].

D'un point de vue hydrogéologique, la première, libre (d'environ 40 m d'épaisseur) contenue dans les formations Mio-Plio-Quaternaire, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers ... constituant le remplissage du synclinal de Taoura. Cette nappe est surtout captée par les puits domestiques dans la partie Nord-Est vers Merahna . la seconde considérée comme captive, constituée par des marnes et des calcaires fissurés, datés du Maestrichtien inférieur au Campanien moyen. La nappe occupe le centre de Taoura et disparaît vers le Sud-ouest lors la formation de la chaîne anticlinale vers Madour. L'exutoire de l'aquifère s'effectue par prélèvement dans les captages pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau de la ville de Souk Ahras et des villages limitrophes, par évaporation et par écoulement souterrain vers les

Du point de vue hydrochimique, les eaux de la nappe présentent plusieurs faciès qu'ils sont liés aux contextes géologiques. Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, la dolomite, l'anhydrite et le gypse ainsi que la pression partielle de CO_2 , montrent que les eaux des points de prélèvement de l'aquifère de Taoura sont surtout sursaturées en calcite et sous saturés en anhydrite et gypse. Les valeurs obtenues de la pression partielle en CO_2 sont supérieures à celle de la pression atmosphérique ce qui suggère la communication de l'aquifère avec l'extérieur.

Les analyses physico-chimiques ont montré que ces eaux sont très dures et doivent être adoucies.

La classification selon Wilcox et Richard (SAR et RSC) permet de voir que ces eaux sont aptes à l'irrigation.

Le calcul du ΔpH a permis de constater que les eaux de notre région d'étude sont à majorité entartrantes, ce qui constitue un risque pour les machines et surtout pour les circuits de canalisations et des chaudières.

BIBLIOGRAPHIE

Aghazadeh, Abu, J., Mohd, S., Ismail, A., Mohd Rémy, R., Hussam, E., 2015. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): hydrochemistry and water quality. *Arabian Journal of Geosciences* , 8: 2203–2215.

Aghazadeh, N., Mogaddam, A., 2010. Assessment of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in the Oshnavieh area, Northwest of Iran. *Journal of Environmental Protection*, 1: 30-40.

Carrayrou J., M. Kern, P. Knabner (2010). Reactive transport benchmark of MoMaS. *Computational Geosciences*. 14, 385-392.

Ayers, R., Bronson, S., 1975. Guidelines for interpretation of water quality for agriculture. University of California, Davis.

Bakalowicz, M., 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification, Thèse d'Etat, Sciences naturelles, Paris.

Doneen, L.D., 1962. The Influence of Crop and Soil on Percolating Water, Biennial Conférence on Groundwater Recharge, Proceedings 1961, Davis.

Doneen, LD., 1964. Notes on water quality in agriculture. Department of Water Sciences and Engineering, University of California, Davis.

Eaton, F. M., 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soils Science*, 69: 23-34.

Gibbs, R.J., 1970. Mechanism controlling world river water chemistry. *Science*, 170 :1088-1090.

Jain, P., Sharma, J.D., Sohu, D., Sharma P., 2005. Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2:373-379.

Kelly, W.P., 1963. Use of saline irrigation water. *Soil Science*, 95:355–391.

Kumar, M., Singh U.K., Kumari, K., Ramanathan., 2009. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab : conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environmental Geology*, 57:873–884.

Lannani. K.,& Abdouni. L., (2008). Etude géo-électrique par sondage électrique dans la région de Taoura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Annaba, 81p.

Nouar, T., Toumi, A., Gueroui, Y., Harida, B., 2016. Hydrochemistry of water springs of the travertine aquifer of Guelma in north-east of Algeria. *International Journal of Advanced Research (IJAR)*, 4 : 1058-1063.

Paliwal, K.V., 1972. Irrigation with saline water. Water Technology Centre, Indian Agriculture Research Institute, New Delhi.

Pandian, K., Sankar, K., 2007. Hydrochemistry and groundwater quality in the Vaippar river basin, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, 69 : 970-982.

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2) : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Report 99-4259, U.S. Geological Survey :Earth Science Information Center, Open-File Reports Section, 288 p.

Piper, A.M., 1944. A graphical procedure in the chemical interpretation of groundwater analysis. *Eos, Transactions - American Geophysical Union*, 25: 914-923.

D. K. Chadha Central Ground Water Board, Government of India, Ministry of Water Resources, Jamnagar House, Mansingh Road, New Delhi 110001, India

Carrayrou J., M. Kern, P. Knabner (2010). Reactive transport benchmark of MoMaS. *Computational Geosciences*. 14, 385-392.

Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Sawyer, C.N., McCarthy, P.L., 1967. Chemistry for sanitary engineers. McGraw-Hill, New York, 2nd edition.

Strojexport Prague., & progress. ;(1977). modéfié Progress (2010). Bureau d'étude Prospection Géophysique sur le synclinal de Taoura-Bordj M'raou, Souk-Ahras .Algeria 87p.

Simler, R., 2003. Hydrochemistry Multilanguage Softwar Free Distribution Laboratory of Hydrogeology. University of Avignon, France software, Avignon.

SOGREAH (Société française d'ingénierie)., 1999. Etude intégrée de la wilaya de Guelma. Rapport final, DHW- 11158-AL, Direction d'hydraulique Guelma (DHW/ Guelma),182p.

Taha, H.D., 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle: application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien, thèse, université de FRANCHE-COMTE.

Throntwaite ,C.W.,1948. An approach towards a rational classification of climate. Geographical review, 38 : 55-596.

WORLD HEALTH ORGANIZATION -WHO., 2011. Guidelines for drinking water quality, World Health Organization, Geneva, 4th edition.

Wilcox, L.V. ,1955. Classification and use of irrigation water. US Department of Agriculture, Circular 969, Washington, DC.

Sites Internet

Ravarini P., 2006. Equilibre calco-carbonique [en ligne].Disponible sur : <http://free.fr/index.html> >, (consulté le 4.04. 2018).