

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA -
FACULTE DES HYDROCARBURES DES ENERGIES RENOUVABLE ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

**Géochimie des eaux de la nappe superficielle de
la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla)**

Réalisé par : **HAMMOU ALI Abdelkarim** Soutenu le : **08 / 06 / 2014**

Devant le jury :

Président	Dr Zeddouri aziez	MCA	Univ Ouargla
Encadreur	Dr NEZLI Imed Eddine	MCA	Univ Ouargla
Examineur	Mr BELLAOUER Abdelaziz	MAA	Univ Ouargla

Année Universitaire : 2013/2014

Dédicas

*Je dédie ce modeste travail à ma
mère qui a sacrifiée sa jeunesse pour
mon auspice, et pour l'esprit pur de
mon père que sa conseilles restent
toujours dans nos mémoires. JE le
dédie aussi à tous mes frères, mes
soeurs, à toute la famille HAMMOU ALI de
proche et de loin, aussi que tous mes
amis sans exception.*





Remerciements

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes.

Nous souhaitons ici les en remercier.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Mr. Nezli qui nous a permis de bénéficier de son encadrement.

Les conseils qu'il nous a prodigués, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résume

Le Sahara Septentrional présente des ressources en eau souterraines importantes, représentées par deux grands aquifères : le Continentale intercalaire et le Complexe Terminal.

Les eaux de la nappe phréatique de la région de Ouargla sont minéralisé à savoir l'impact de la lithologie sur le chimisme des eaux. Le présent travail tend en premier lieu à la caractérisation hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique et leur lithologie à partir des différentes analyses physico-chimiques sur les eaux et de déterminer la minéralogie du sol. Les résultats obtenus montrent que, les eaux de la nappe phréatique est de faciès chloruré sodique, les valeurs des indices de saturation indiquent que ces eaux sont sursaturé vis-à-vis des minéraux carbonatés et évaporitiques. En présence des kaolinites et des illites aucun échange de base n'a été trouvé en raison de leur faible capacité d'échange. L'eau des sables dans la région étudiée sont plus chargées en sels (SO₄, Cl, Na, Mg, Ca).

Mots clés : Ouargla, Sahara Septentrional, hydrogéochimie, nappe phréatique, indices de saturation.

Abstract

The Northern Sahara present the groundwater resources, represented by two major aquifers: The intercalary Continental and Terminal Complex.

The waters of the groundwater in the area of Ouargla are mineralized namely the impact of lithology on the chemistry of the water. The present work tends first the water to hydrogeochemical characterization the waters of groundwater and there lithology from the different physico-chemical analyzes on waters and to determine the mineralogy of soil. The results shows that the waters of the groundwater is chlorinated sodium facies, the value of saturation indices indicate that these waters are oversaturated in the face of the carbonate and evaporite minerals. In the presence of kaolinite and illite no base exchange has been found due to the low exchange capacity. The water sands in the study region are loaded with salts (SO₄, Cl, Na, Mg, Ca).

Key words: Ouargla. Northern Sahara, Hydrogeochemistry, groundwater, indices of saturation

ملخص

الصحراء الشمالية, تتميز بموارد مائية جوفية مهمة ممثلة في الطبقتين. المتداخل القاري والمركب النهائي الطبقة الجوفية السطحية لمدينة ورقلة معدنية.

لمعرفة العلاقة بين التركيبة الصخرية وتأثيرها على كيمياء الماء. نقدم في عملنا هذا نظرة على المميزات الجيوكيمياء المائية للطبقة السطحية وتركيباتها الصخرية انطلاقا من التحاليل الفيزيائية و الكيمائية على المياه وتحديد التركيبة المعدنية للتربة. اظهرت النتائج أن مياه الطبقة السطحية تتميز بشحنة كلوريد الصوديوم. ارتفاع نسبة العناصر الكيمائية الكاربوناتية والايفابوريتية في الماء غياب المبادلات القاعدية في الماء وهذا لوجود الكلولينيت و الإليت لضعف قدرتها التبادلية المياه الرملية لورقلة شعبة بعناصر الاملاح التالية (So₄,cl,Na,Mg,ca)

الكلمات الرئيسية: ورقلة، الصحراء الشمالية، جيوكيمياء، المائية، الطبقة السطحية، مؤشر التشبع

Liste de Figure

Fig0 1 : Situation géographique de la wilaya de Ouargla (Larousse, 2004).....	03
Fig 02: Carte des affleurements géologiques dans la vallée de Ouargla Cornet et Gouskov (1952in Nezli et al (2007).....	06
Fig03 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara (moudjahed n .2011).....	07
Fig04 : Réseau hydrographique de la cuvette de Ouargla	09
Fig05: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	13
Fig06: Carte des ressources en eau souterraines (continental intercalaire et complexe terminal), extrait de recueil des communications, 2002.....	15
Fig07: Carte de profondeur de la nappe à la ville de Ouargla établie par BG en octobre 2004.....	18
Fig08: Carte piézométrique et de localisation des piézomètres échantillonnés dans nappe superficielle.....	20
Fig09: Schéma du bilan hydrique d'après BG (2004).....	22
Fig10: Facies chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (20014).....	32
Fig11 : Facies chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (juin 2002)...	32
Fig12 : Facies chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (Février 2002	
Fig13 : taux de facies chimiques dans les eaux de la nappe superficielle (juin 2002).....	33
Fig14 : taux de facies chimiques dans les eaux de la nappe superficielle (février 2002).....	34
Fig15 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction du facteur de concentration (février 2002).....	35
Fig16 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction du facteur de concentration (juin 2002).....	36
Fig17: diagramme de concentration (Février 2002).....	37
Fig18 : diagramme de concentration (Juin 2002).....	37
Fig 19: La relation entre $[Ca+Mg- HCO_3-SO_4]$ et $[Na+K - Cl]$ dans les eaux(février2002).....	38
Fig20 :La relation entre $[Ca+Mg- HCO_3-SO_4]$ et $[Na+K - Cl]$ dans les eaux(JUIN2002).....	38
Fig21 : La relation entre Log activité Na^+ et Halite et Mérabilite (2014).....	39
Fig22 : La relation entre Log activité Na^{++} et Halite et Mérabilite (Février 2002).....	39
Fig23 : La relation entre Log activité Na^{++} et Halite et Mérabilite (Juin 2002).....	40
Fig24 : La relation entre Log activité Ca^{++} et les élément carbonaté (2014).....	40
Fig 25: La relation entre Log activité Ca^{++} et les élément carbonaté (Février2002).....	41

Fig26: La relation entre Log activité Ca^{++} et les élément carbonaté (Juin 2002).....	41
Fig27 : La relation entre Log activité Mg^+ et IS (2014).....	42
Fig28 : La relation entre Log activité Mg^+ et IS (Juin 2002).....	42
Fig 29: La relation entre Log activité Mg^+ et IS (Juin 2002).....	43
Fig30 : relation entre Log activité K^+ et IS (Février 2002).....	43
Fig31: relation entre Log activité K^+ et IS (Juin 2002).....	44
Fig32 : relation entre Log activité K^+ et IS (2014).....	44

TABLE DE MATIERE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

CHAPPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

I. Introduction	03
I.1- Localisation géographique.....	03
1.2- Cadre géologique régionale et local.....	04
1.3-Tectonique	06
1.4- Climatologie	07
1.5-Réseaux hydrographiques.....	08
1.6-Conclusion	09

CHAPPITRE II : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE

II-1.Introduction.....	11
II-2.Hydrogéologie.....	11
2-1.Nappe du continental intercalaire (C. I.).....	13
2-2.Nappe du complexe terminal (C. T.).....	14
2-2.1.Alimentation à partir de l'Atlas saharien	
2-2.2.Alimentation par le plateau du Tademaït et Tihert	
2-2.3.Alimentation par les monts du M'Zab	
2-3.Nappe superficielle (phréatique).....	16
2-3.1.Généralités sur la nappe phréatique de la région d'Ouargla	
2-4.Le bilan hydrique de la nappe superficielle (phréatique)	21
2-5.Synthèse des travaux sur la nappe superficielle	22
2-6.Conclusion.....	23

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

III -1.Introduction.....	24
III 2.Echantillonnage.....	24
III-3.Méthodes utilisées	24
3-1.Analyse granulométrique et sédimentométrique	
3-2.Diffraction au rayons X ou DRX	
3-3.Outils informatiques	
III-4.Conclusion.....	27

Chapitre IV : Interprétations et discussion des résultats

IV -1.Introduction.....	28
IV -2- paramètres physico-chimiques	29
2. 1. La Température (T)	
2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)	
2.3. Conductivité électrique (CE)	
2.4. Les cations	29
2.5. Les anions	30
IV -3 Classification des eaux	32
3-1. Selon PIPER	
3-2.Pourcentage de Facies chimique	
3-3.Evolution géochimique des eaux de la nappe superficielle (phréatique)	
IV -4.Diagramme de concentration et évolution des ions.....	36
IV -5.Echanges de bases	38
IV -6. Origine de l'élément chimique	39
IV -7.Conclusion.....	45
Conclusion Générale.....	46
La bibliographie	48
Annexs.....	

INTRODUCTION GENERALE

Notre zone d'étude est creusée dans le bassin oriental du Sahara Septentrional algérien, renferment des ressources en eau souterraines importantes, représentées par deux grands nappes aquifères : le Continentale intercalaire et le Complexe Terminal, et de nappes superficielles sus-jacentes.

Les eaux de la nappe superficielle de la région de la basse vallée de l'oued M'ya (cuvette de Ouargla) ont fait l'objet de plusieurs études antérieures pluridisciplinaires du faite des problèmes que présentent ces eaux de cette nappe superficielle ; remontées spectaculaires de son niveau piézométrique, la minéralisation excessive de ces eaux et leurs impacts sur l'homme et l'environnement. Le présent de travail a pour objectif de se focaliser sur un aspect géochimique des eaux de ladite nappe, rarement étudiée, afin de mettre en exergue la faculté naturelle de la détérioration de la qualité chimique des eaux de la nappe en question, et ce par la corrélation entre la composition chimique des eaux et la nature lithologique et minéralogique des formations de la matrice aquifère..

Afin d'atteindre l'objectif ciblé, une approche géochimique basée essentiellement sur :

- ✓ Une étude bibliographique sur : la pédologie, la géologie et l'hydrogéologie, se rapportant à l'aquifère étudié ;
- ✓ Des analyses physicochimiques antérieures et récentes des eaux de la nappe ;
- ✓ Echantillonnage et analyses chimiques et minéralogiques des formations de la matrice aquifère ;
- ✓ Simulations graphique, statistique et thermodynamique des données physicochimiques ;
- ✓ La mise en évidence l'influence des interactions eau/roche sur les eaux de la nappe superficielle en conditions arides.

Le présent mémoire est structuré par les chapitres suivant :

Chapitre 1 : Généralités sur la zone d'étude

ce chapitre, nous nous proposons de présenter les principales données que nous avons recueillies et qui concernent le cadre physique de notre région d'étude.

Chapitre 2 : Aspect Hydrogéologique

Ce troisième chapitre consiste à présenter les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de la nappe superficielle de notre zone d'étude.

Chapitre 3: Approche hydrogéochimique

Dans ce Chapitre nous exposent les différentes méthodes et approches suivies pour étudier du chimisme des eaux en fonction de la lithologie :

- Hydrochimie des eaux

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

I. Introduction :

Au cours de ce chapitre, nous nous proposons de présenter les principales données que nous avons recueillies et qui concernent le cadre physique de notre région d'étude.

I.1- Localisation géographique :

Notre zone d'étude est située dans la wilaya de Ouargla, l'une des principales oasis du Sahara algérien. Elle est située au Sud-est de l'Algérie à une distance de 800 km de la capitale. Elle occupe une superficie de 163 238 km², et limitée au Nord-est par la wilaya d'El Oued, Nord-ouest par la wilaya de Djelfa, au Sud-est par la wilaya d'Illizi et à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa. Ses coordonnées géographiques sont :

les longitudes 5°15' et 5°25' Est et les latitudes 31°55' et 32°00' Nord (fig01) (Brigol-Rouillois, 1975; ANAT, 1995)[26].

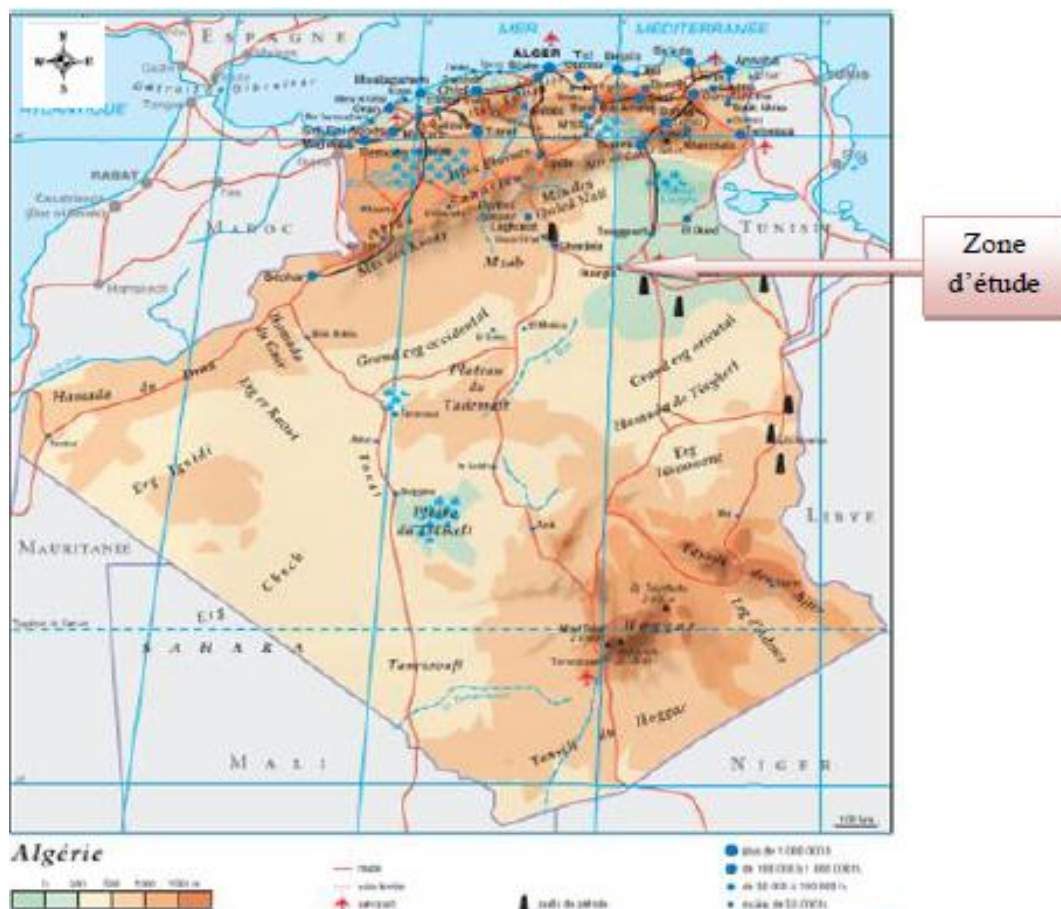


Fig01 : Situation géographique de la wilaya de Ouargla (Larousse, 2004)

1.2. Cadre géologique régionale et local :

La cuvette de Ouargla appartient au sous-bassin saharien, elle correspond à la basse vallée fossile de l'Oued M'ya. Sur le plan géomorphologique la coupe ci-dessous (Fig02) permet de distinguer les unités suivantes (CORNET, 1964):

- **Hamada du Mio-Pliocène :**

Une formation continentale détritique située à l'Ouest de Ouargla, qui descend légèrement d'Ouest en Est. Elle est fortement érodée, laissant une série de buttes témoins ou Goures.

- **Glacis :**

Sur le versant Ouest de la cuvette, les glacis s'étagent en quatre niveaux allant de 200 m à 140 m. les glacis dont les hauteurs varient de 180 à 160 mm sont très visibles et caractérisés par l'affleurement du substrat gréseux du Mio-Pliocène. La pente de ce dernier est faible, et souvent recouverte de sables et de graviers. A l'Est de la cuvette se trouve un vaste glacis alluvial à sable grossier, de 150 m d'altitude.

- **Sebkhas et chotts :**

Constituent le niveau le plus bas. Le chott qui correspond au centre de la sebkha est constitué des sols gypseux en surface. Souvent la nappe phréatique affleure en surface au centre de la sebkha. Au Nord de la ville d'Ouargla (136 m d'altitude), diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à SebkhetSafioune (103 m d'altitude).

La cuvette de Ouargla est creusée dans les formations continentales du Mio-Pliocène. Il s'agit de sables rouges et de grès tendres à stratifications entrecroisées, avec nodules calcaires, entrecoupés de niveaux calcaires ou gypseux que l'on voit affleurer sur ses bords Est et Ouest.

- **Quaternaire :**

À la base du quaternaire, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Ce niveau met en charge les aquifères du Mio-Pliocène à Ouargla. Le niveau le plus superficiel est constitué de sable éolien parfois gypseux et des produits de remaniement des terrains Mio-Pliocène. Les nappes phréatiques sont généralement contenues dans ce dernier niveau (fig02).

Les dunes sont constituées de sable éolien d'origine gréseuse provenant de Hamada Mio-Pliocène. Elles existent dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhas, et sur les versants rocheux.

Après son creusement, la cuvette d'Ouargla a été occupée par un lac au fond duquel se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique, craies, calcédoine et évaporites. Un niveau charbonneux a été daté de – 17 000 ans. Des oueds, descendant de la

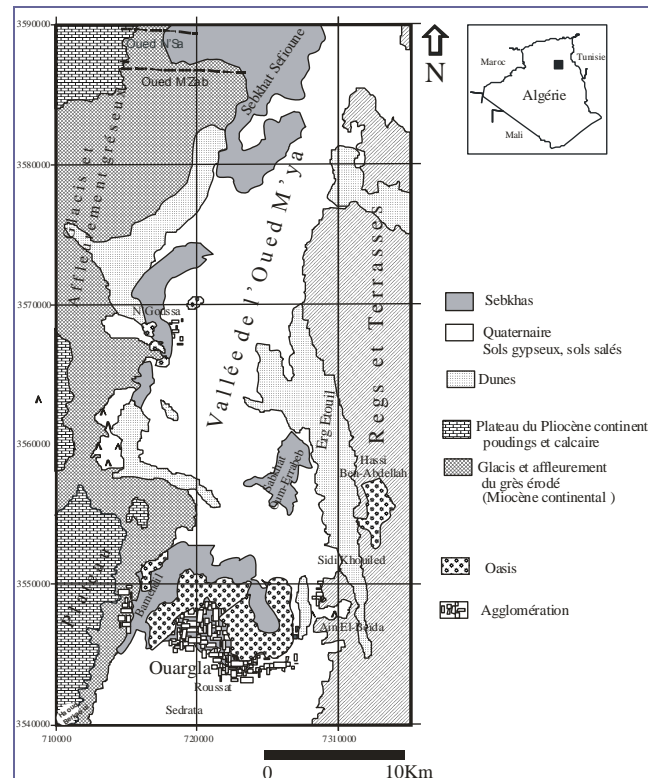
dorsale mozabite à l'Ouest (oueds M'Zab, N'Sa, Z'gag) ou du Tadmaït (oued Mya) au Sud, se déversaient dans ce lac en abandonnant leurs alluvions en larges cônes (AnkDjemel pour l'oued M'Zab) ou barrant la vallée (oueds N'Sa et Z'Gag au Nord de la SebkhetSafioune).

Avec la fin du dernier grand pluvial, le lac s'est retiré. L'oued Mya n'a pu qu'épisodiquement couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de la SebkhetSafioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse [16].

La cuvette d'Ouargla est bien visible au centre de la zone étudiée. Les alluvions des oueds N'Sa et Z'Gag ferment la vallée au nord de la SebkhetSafioune, empêchant un écoulement vers l'aval. Cette fermeture s'est rompue dans sa partie Est et les eaux du lac ont pu s'échapper vers le nord-est, en direction de Touggourt et du Chott Melrhir.

Actuellement, les plus grandes crues de l'oued Mya s'arrêtent à 200 km à l'amont d'Ouargla. Celles de l'oued M'Zab atteignent la SebkhetSafioune deux fois par siècle, alors que celles de l'oued N'Sa semblent plus fréquentes (lors de deux passages en février et en novembre 2002 sur l'oued N'Sa, il a été constaté un écoulement superficiel récent quoique faible dans la partie aval de son cours, dans la région de HassiKhefif).

Les travaux des archéologues confirment que la dépression de l'oued M'ya n'a été drainée par des cours d'eau qu'à une période très ancienne du Quaternaire et que les sebkhas n'étaient pas fonctionnelles à l'époque néolithique car certains gisements reposent sur elles. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand pluvial contemporain de la glaciation de Würm [16].



**Fig 02 : Carte des affleurements géologiques dans la vallée de Ouargla
Cornet et Gousskov (1952) in Nezli et al (2007)**

1.3. Tectonique :

La cuvette d'Ouargla fait partie de la dépression d'Oued M'ya. Cette dernière, occupe la plus grande partie du bas-Sahara. L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire atteint 400 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m. Dans son ensemble la dépression d'Oued M'ya est une structure dissymétrique assez plate.

Les données sismologiques recueillies à l'occasion des recherches pétrolières, montrent que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du Cambrien jusqu'au Sénonien inférieur (Fig03). Ces failles sont orientées Sud-est / Nord-Ouest et traversent la région de Ouargla par l'est. Elles seraient à l'origine des apports profonds dans cette zone [16].

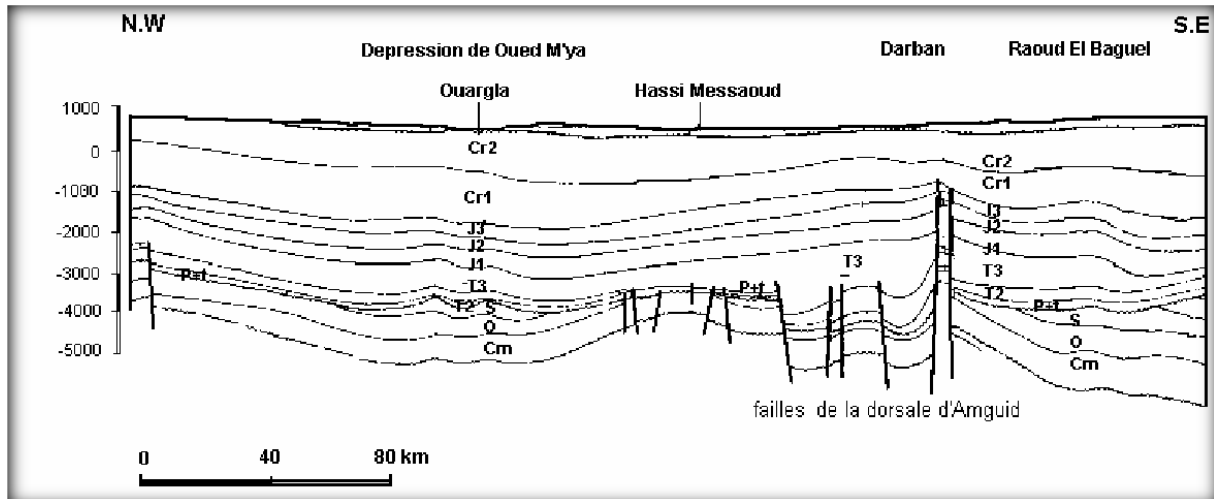


Fig03 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara (moudjahed n .2011).

Les logs de forages, et les coupes géologiques qui ont été établis, nous ont permis de préciser les formations litho-stratigraphiques présentes sur la région de Ouargla, il s'agit :

- du secondaire, avec les formations allant de l'Aptien jusqu'au Sénonien;
- du tertiaire, allant de l'Eocène inférieur jusqu'au Mio-Pliocène constituant les formations du complexe terminal;
- Et enfin du quaternaire qui est constitué d'un matériau détritique et de sables éoliens.

1.4- Climatologie :

1.4.1- Précipitations :

Les précipitations dans la région sont très irrégulières, la moyenne annuelle dans la période étudiée est de 51,76mm, la plus part des précipitations se produisent durant les mois d'hiver par contre la période sèche s'étale sur le reste de l'année.

1.4.2- Températures :

La région de Ouargla est caractérisée par des températures très élevées ; le mois le plus chaud est le mois de juillet avec 43,68°C et le mois le plus froid est de janvier avec 18.82°C. La température annuelle moyenne est de 30.73°C

1.4.3- Vents :

Dans la région de Ouargla les vents sont très variables au cours de l'année avec une vitesse maximale de 4,61m/ ; la vitesse moyenne annuelle des vents est de 36,62m/s, les vents les plus fréquents sont ceux qui ont une direction S-N et SW-NE.

1.4. 4- Evaporation potentielle (ETP) :

L'évaporation est très importante, la moyenne annuelle est de 2854,46 mm.

Le maximum est atteint en période de juin, juillet et août avec une moyenne de 367,02 mm. Les minima sont enregistrés durant le mois de janvier (112,07 mm).

1.4. 5- Humidité de l'air

Généralement, l'air de Ouargla est trop sec avec maximum d'humidité de 59,92% pour le mois de décembre, le minimum d'humidité est de 25,33% pour le mois de juillet. L'humidité annuelle moyenne est de 42,06%

1.4. 6- Insolation

Le maximum est enregistré au mois de juillet avec 331,83 heures et le minimum est de 208,17 heures au mois de décembre ; la moyenne annuelle est de 270,63 heures [16].

1.5- Réseaux hydrographiques

L'hydrographie de la cuvette de Ouargla se caractérise par son endoréisme. Le réseau hydrographique traversant la région est composé des oueds suivants:

- Au Nord-ouest : Oued N'sa qui selon les fréquences peut présenter des crues considérables. Le bassin versant de oued N'sa couvre une superficie de 7800 Km², il reçoit divers affluents dont les plus importants sont le Ballouh et le Soudou qui arroseront l'oasis de Beriane.
- Au Sud : Oued Mya draine la partie orientale du plateau de Tadmaït. Le bassin de l'oued Mya est en forme d'une vaste gouttière relevée du Sud (800 m) avec une inclinaison très faible (0,1 à 0,2 %) vers le Nord-est.

Il s'étend sur 19 800 km², le paléo-lit de l'oued M'ya inférieur est jalonné par de vastes sebkhas jusqu'à Ouargla, distant de 200 km environ du point externe atteint par les

dernières crues. Si l'on admet cependant que l'oued M'ya quaternaire se jetait dans le chott Melrhir actuel, sa longueur devrait atteindre 900 km.

- A l'Ouest : Oued M'Zab, dont la superficie du bassin est d'environ 5000 km², prend la direction Ouest-est sur une distance de 350 Km de la région de Batna Rouilla à une altitude de 750 m jusqu'à Sebkhet Safioune d'une altitude de 104 m. Les crues peuvent atteindre Sebkhet Safioune .

- A l'Ouest : Oued Metlili et oued El Menia, dont le cheminement des eaux se fait par infiltration vers la cuvette durant les périodes de crues. Le bassin de Metlili, limite de l'oasis du même nom ne dépasse pas 400 km². D'une longueur totale de 210 Km, l'oued Metlili est barré à 134 Km de son origine par le cordon dunaire de l'Erg Rhanem où plus en aval une grande partie des eaux de ruissellement est absorbée [16].

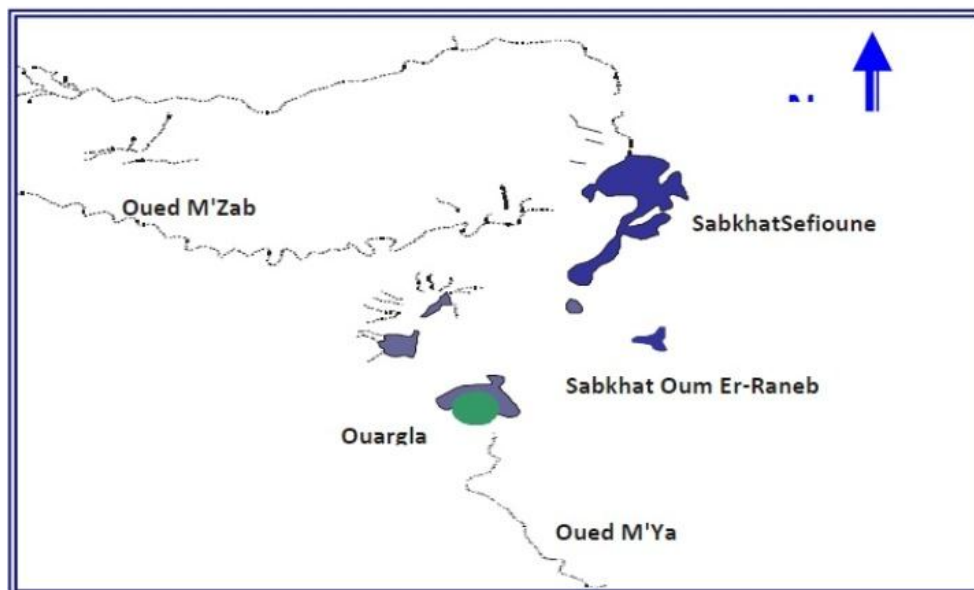


Fig04 : Réseau hydrographique de la cuvette de Ouargla

1-6. Conclusion :

Notre zone d'étude s'inscrit dans un vaste bassin sédimentaire du Sahara Nord-oriental ou, « septentrional ». Elle est creusée dans un dépôt détritique de terrains tertiaires (Mio-Pliocène) et de dépôts détritiques quaternaires de basse vallée fossile de l'oued Mya, dans lequel, les sables dominent avec alternance des argiles, des calcaires et du gypse.

La correspondance entre ces hautes températures et faibles précipitations acquièrent un climat saharien hyper aride à la zone d'étude.

CHAPPITRE II : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE

II-1.Introduction

Le bassin du Sahara septentrional constitue un grand bassin hydrogéologique de 780.000 km² qui se prolonge en Tunisie et en Libye; d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètre environ. Il est limité à l'Ouest par la vallée de la Saoura, au Sud par les bordures des plateaux du Tihert et de Tademaït, à l'Est par la Hamada El Hamra, au Nord- Est par le djebel Dahar et le golfe de Gabes, au Nord par l'Atlas Saharien. On distingue deux bassins hydrogéologiques, à l'Ouest, le bassin de Timimoun (bassin occidental), d'une superficie de 280 000 km², recouvert par les sables du Grand Erg occidental, à l'Est le bassin de la M'ya ou Erg oriental, d'une superficie de 500 000 km² recouvert des sables du grand Erg oriental. Les deux bassins hydrogéologiques sont séparés suivant l'axe Ghardaïa-In Salah par la dorsale Sub-méridienne de M'zab, dans la ligne de partage des eaux, est confirmée par les études isotopique.

Deux grands ensembles post-paléozoïque sont détritiques qui constituent deux systèmes aquifères, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal séparés par d'épaisses séries argileuses ou évaporitiques de la base du Crétacé supérieur.

II .2-Hydrogéologie :

Les eaux souterraines constituent un facteur important, influant sur le comportement géotechnique des sols et l'utilisation des terrains. Ce facteur n'est pas indépendant des autres, puisque les caractéristiques des eaux souterraines dépendent de la perméabilité des roches dans lesquelles elle se trouve, donc de leur texture, de leur structure et de leur fissuration ainsi que de leur composition chimique, c'est-à-dire de leur nature et de leur état. Les eaux souterraines jouent, de plus, un rôle primordial dans le développement de certains phénomènes géologiques: instabilité de pente, phénomènes de dissolution, de tassement et de gonflement de certaines roches. Il n'est pas étonnant que les conditions hydrogéologiques puissent être étudiées indirectement à partir de l'étude d'autres facteurs en particulier de la géomorphologie [16].

Les terrains du Bas-Sahara assurant l'infiltration et la circulation souterraine des eaux sont essentiellement représentés par les formations sablo-gréseuses du Continental intercalaire, les bancs de calcaires marins du Cénomano-Turonien et du Sénonien-Eocène, les accumulations sableuses fluvio-lacustres du Tertiaire continental. Le banc Cénomano-turonien contient une nappe dont les zones d'alimentation se situent à la périphérie du bassin, dans les régions où affleure la formation. Les eaux circulent dans les calcaires, en direction des parties basses de la cuvette, sous le toit imperméable des argiles du Sénonien inférieur qui peut atteindre une épaisseur de 300 mètres. Malgré cette disposition favorisant une mise en charge des eaux, les calcaires du Cénomano-Turonien ne sont pas exploités dans le Bas-Sahara, car leurs couches plongeantes ne peuvent être atteintes qu'après la traversée de 500 à 600 mètres de morts-terrains au moins et leur fissuration faible ou inexistante, s'opposant à une bonne circulation des eaux, n'assure qu'une productivité très aléatoire [16].

Généralement on peut dire que le grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional contient trois principaux aquifères:

- A la base la nappe du continental intercalaire: l'un des plus grands réservoirs captifs du monde ;
- Au milieu la nappe du complexe terminal ;
- Au sommet Les nappes phréatiques.

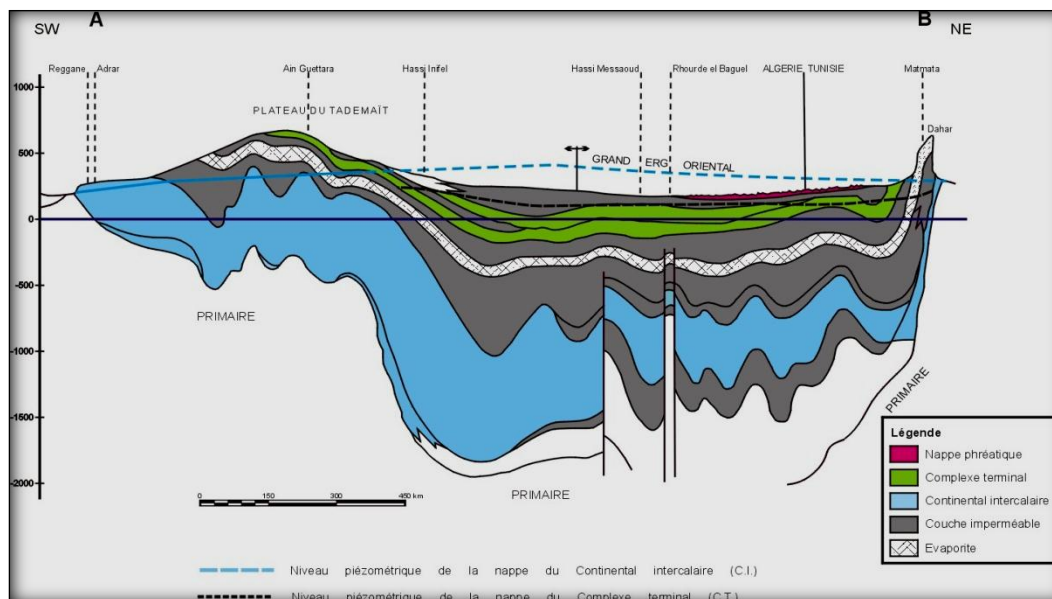


Fig05: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

2-1. Nappe du Continental Intercalaire (C. I.) :

Le réservoir du C.I. est contenu dans les formations continentales du crétacé inférieur (Barrémien et Albien), Composé essentiellement de grès, sables et argiles. Le réservoir s'étend sur environ 600 000 km², il est continu du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et le Hoggar, 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 tout le bassin.

La profondeur augmente du Sud au Nord, de 1000 m au bas Sahara, à 2000 m sous les chotts, provoquant ainsi une forte charge de la nappe sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué de formations argilo-sableuses et argileuses ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord[16].

La carte piézométrique établie lors de l'étude, montre que cette partie orientale de l'aquifère est alimentée par :

- Le piedmont Sud atlasique (au Nord-Ouest de Laghouat);
- Le plateau du Tinrhert. au sud;

- Le plateau du Dahr (Tunisie).

Les eaux en provenance du Nord-Ouest se divisent sur l'axe de la dorsale du M'zab approximativement suivant deux directions: une partie s'écoule vers le Sud et le Sud-ouest (Gourara, Touât et Tidikelt), et l'autre partie s'écoule suivant une direction Ouest-Est vers le golf de Gabes qui constitue son exutoire naturel. Les eaux en provenance du plateau du Tinrhert s'écoulent vers le Nord-est sous l'Erg Oriental en direction de l'exutoire de Tunisie. Sur la région d'Ouargla, la nappe de C.I est captée à une profondeur comprise entre 1300 et 1400 m, le débit exploité par forage est de 100 l/s, en moyenne. Les forages captant cette nappe sont au nombre de 2 destinés essentiellement à l'alimentation en eau potable des agglomérations de Rouissat et Ain El Beida, et caractérisés par une transmissivité de 8.10^{-3} m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 10^{-3} m²/s [16].

2-2.Nappe du complexe terminal (C. T.) :

Le système aquifère du complexe terminal couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350 000 Km². Le terme "nappe du complexe terminal" regroupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes. Cette nappe peut circuler dans l'une ou encore dans les deux formations litho-stratigraphiques suivantes:

- Le Sénonien et l'Eocène carbonatés.
- Le Mio-Pliocène sableux.

La première carte piézométrique de la nappe du complexe terminal a été établie et publiée par CORNET A. (1961). Elle a été reprise et complétée par J.AILLAIRE à l'aide des renseignements fournis par les forages pétroliers lors de l'étude de l'UNESCO(1972).

Cette même carte a été révisée et complétée grâce à la densité des forages pétroliers et hydrauliques. Les axes et les directions d'écoulement sont indiqués sur cette carte piézométrique. L'allure des isopièzes montre que la nappe peut être alimentée par les zones de bordures suivantes :

2-2.1. Alimentation à partir de l'Atlas saharien :

Entre Biskra et la frontière tunisienne, les courbes isopièzes sont parallèles à l'Atlas, l'alimentation peut avoir deux origines :

- A travers la flexure Sud-atlasique.
- Par infiltration des crues des Oueds à l'aval de l'accident atlasique.

2-2.2. Alimentation par le plateau du Tademaït et Tinhert :

Les eaux qui s'infiltrent sur le plateau de Tademaït et du Tinhert, s'écoulent vers le Nord et convergent vers l'exutoire principal : la zone des chotts Merouane et Melhrir.

2-2.3. Alimentation par les monts du M'Zab :

Le réseau très dense des Oueds du versant oriental du M'Zab joue un rôle important dans l'alimentation de la nappe des sables Mio-Pliocène lors des crues exceptionnelles (crues de Oued N'sa et M'Zab qui atteignent Sebkheth Safioune au Nord de la cuvette).

Les exutoires sont constitués principalement par les grandes cuvettes d'évaporation : chotts Melhrir et Merouane[16].

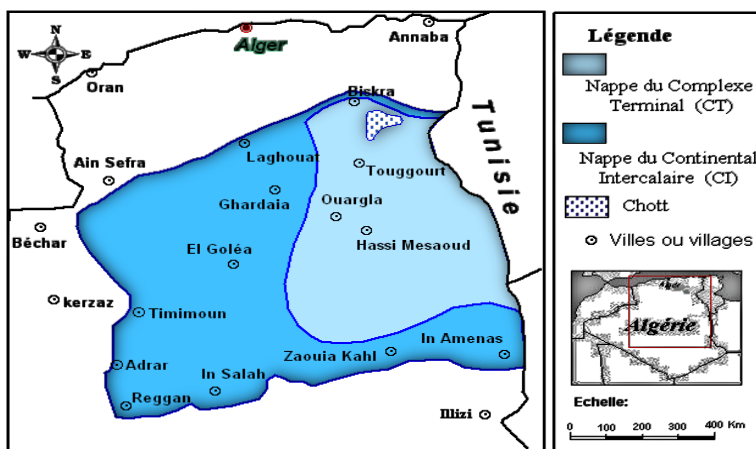


Fig06: Carte des ressources en eau souterraines (CI et CT), extrait de recueil des communications, 2002.

2-3.Nappe superficielle (phréatique) :

Les nappes phréatiques sont partout présentes au Sahara et se situent généralement dans les zones de dépressions ou les vallées. Elles sont alimentées par les pluies, les crues, les eaux de drainage et aussi très souvent par les remontées naturelles (sources) en provenance des aquifères plus profonds ou encore par les fuites dans les ouvrages exploitants ces derniers.

Ces ressources superficielles sont importantes dans tout le Sahara, elles permettent d'irriguer les petites palmeraies, les jardins légumiers et d'abreuver les troupeaux et leurs propriétaires.

Les profondeurs des nappes dites libres au Sahara varient entre 1 et 60 m, sauf dans la région des Ziban où elles peuvent atteindre les 150m. Le résidu sec est très variable selon les zones.

Le recours aux eaux souterraines plus profondes par la multiplication des forages d'exploitation captant les aquifères du CI et du CT destinés aux besoins d'irrigation et d'alimentation en eau potable a accéléré la remontée des niveaux hydrostatiques des nappes phréatiques. Cette situation d'excès d'eau a perturbé l'écosystème oasien et a engendré des problèmes environnementaux nuisibles notamment pour l'agriculture (salinité des sols, dégradation des palmeraies par asphyxie, inondation des ghouts,...).

En outre, l'extension de l'urbanisation dans certaines agglomérations suralimentées en eau (plus de 450 l/j/ habitant) mais insuffisamment couvertes par des réseaux d'assainissement est à l'origine de la formation de lagunes et de la remontée des eaux. Des parties des villes d'Ouargla et d'El Oued subissent depuis plusieurs années les conséquences néfastes de la remontée des nappes phréatiques.

La nappe phréatique est exploitée seulement à l'ouest, au nord d'Ouargla et aussi au sud de l'erg occidental par la technique similaire au ghout (creusement de cratère dans le sable)[16].

2-3.1. Généralités sur la nappe phréatique de la région d'Ouargla :

Au niveau de la cuvette d'Ouargla la nappe superficielle n'est pas exploitée à cause du taux de sels que contiennent ses eaux. Elle est épaisse de 1 à 8m et repose sur un niveau imperméable étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d'Ouargla et l'isole des nappes artésiennes sous jacentes.

Les zones dans lesquelles la nappe phréatique est la plus profonde sont situées à des points hauts de la topographie (Sud- ouest d'Ouargla, Sud de Oum Raneb et versants Nord-est de N'Goussa). La nappe est moins profonde dans les zones à proximité des palmeraies irriguées (Ouargla, N'Goussa. Le point où la nappe se trouve le plus près du sol est au Sud de la Sebkhia Safioune à 45 km au nord de la ville d'Ouargla (fig07)).

Cette nappe a connu une remontée du niveau d'eau ayant provoqué de graves problèmes d'écologie dans les zones urbaines et agricoles. Ce phénomène a engendré des affaissements de terrain et la création d'un milieu anaérobique néfaste pour les cultures et le palmier.

La salinité des eaux varie d'une zone à une autre, elle est de moins de 50g/l dans la ville d'Ouargla et ses environs, la concentration en sel augmente dans le sens des écoulements des eaux où elle peut atteindre plus de 190 g/l dans les zones proches des chotts.

La forte salinité est due essentiellement au lessivage des formations gypseuses et argileuses par les eaux de la nappe, tandis que la faible minéralisation est due à la dilution par les eaux d'irrigation provenant des nappes sous jacentes et à l'absence de niveaux gypseux dans la formation sableuse qui caractérise la nappe phréatique [16].

Une des causes principales de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla est d'ordre morphologique, une topographie très plane conjuguée à un manque d'exutoire naturel. L'alimentation de la nappe provient essentiellement :

- Des rejets d'eaux usées d'origine domestique
- De l'eau excédentaire liée à une irrigation irrationnelle des palmeraies
- Des eaux de ruissellement venant des parties hautes et des apports de crues des trois Oueds dans la cuvette (N'sa, M'Zab et M'ya).

Les effets nuisibles de la remontée des eaux dans la cuvette sont atténués par l'existence des réseaux de drainage par canaux à ciel ouvert dans les palmeraies, ainsi que d'un collecteur d'eaux usées ; l'ensemble de ces eaux de rejet étant évacué par pompage vers la zone d'Oum Raneb située à 8 km au nord de la ville d'Ouargla [16].

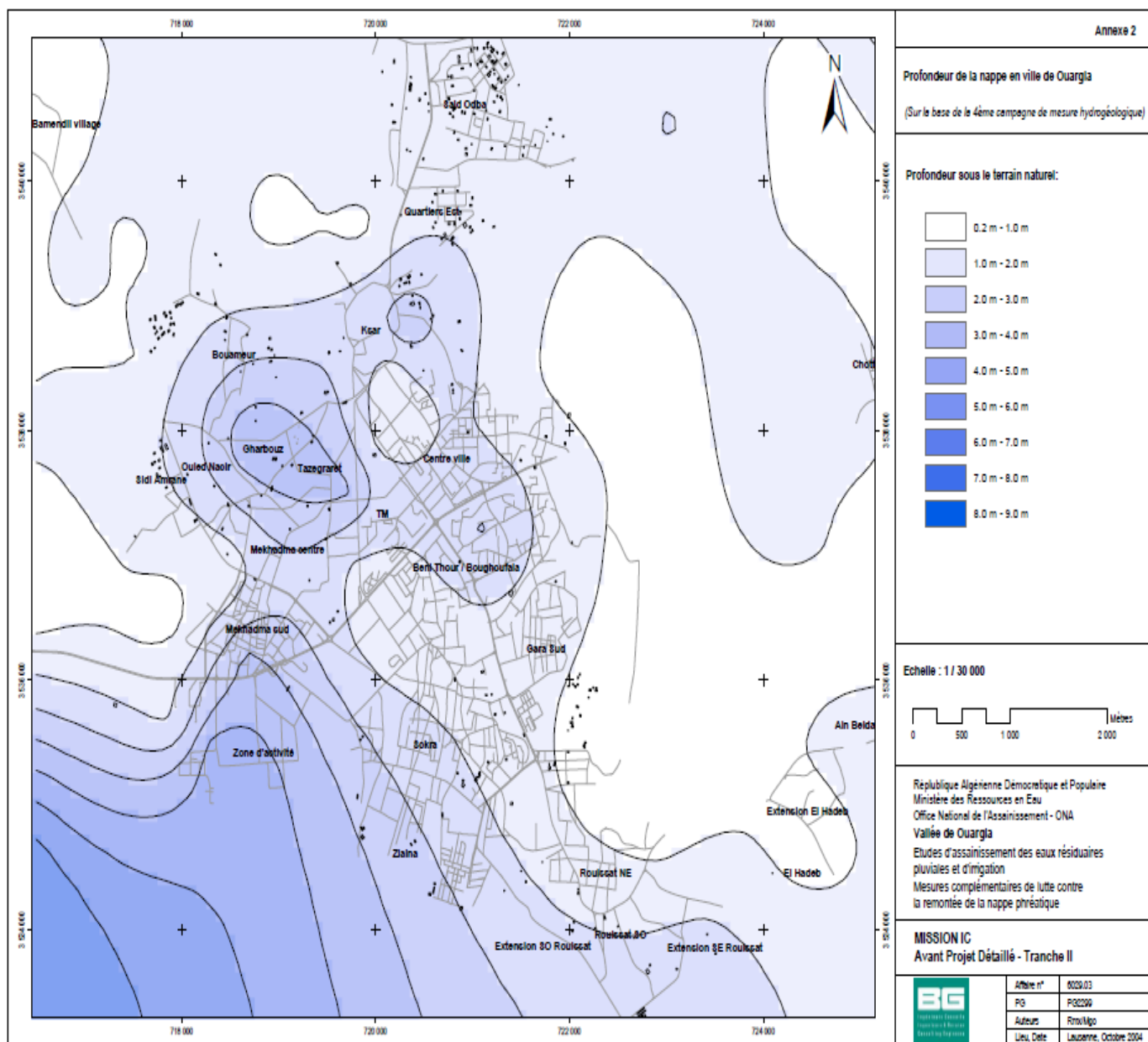


Fig07: Carte de profondeur de la nappe à la ville de Ouargla (BG, 2004)

La nappe est présente partout à l'échelle de la région. Son épaisseur varie de 1 à 8m et repose sur un niveau imperméable étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d'Ouargla. Sa frange capillaire surgie souvent sur la surface du sol sous forme de chotts qu'on trouve de part et d'autre de la ville de Ouargla. Elle est relativement profonde dans les points de haute topographie (Ergs), et moins profonde dans les zones à proximité des palmeraies irriguées.

Les eaux de rejets urbains et agricoles (palmeraies) maintiennent des niveaux piézométriques très élevées par rapport à la topographie du terrain, s'exprimant par une remontée de la nappe en surface (Lelièvre, 1969 ; Idder, 1998 ; BG, 2004 ; Nezli, 2004 ; Nezli, 2007).

La lithologie des formations constitutives de la nappe a été mise en évidence par des sondages (piézomètres) réalisés par l'ENAGEO (1990), ayant des profondeurs allant de 6 à 10 mètres. C'est ainsi qu'au Sud de Ouargla la nappe est constituée de sable fin à moyen argileux, rarement grossier, alors que, plus vers le Nord, (N'Goussa et Sebkhet Safiounes) les sables sont riches en gypse, qui deviennent dominants à Sebkhet Safioune.

Une continuité lithologique existe entre les sables miopliocènes et quaternaires (phréatique), suggère que les deux formations constituent pratiquement le même aquifère.

La carte piézométrique de la nappe établie pendant février 2002, montre, comme d'ailleurs dans tout le bassin oriental du Bas-Sahara (Lelièvre, 1969 ; Nesson, 1978), que le sens de l'écoulement principal des eaux de la nappe phréatique suit celui de la nappe du Complexe Terminal, c'est à dire du Sud vers le Nord de la région (axe Ouargla-Chott Melrhir), et obtient comme exutoire à l'échelle de la zone d'étude Sebkha de Sefioune (Fig.8)[20].

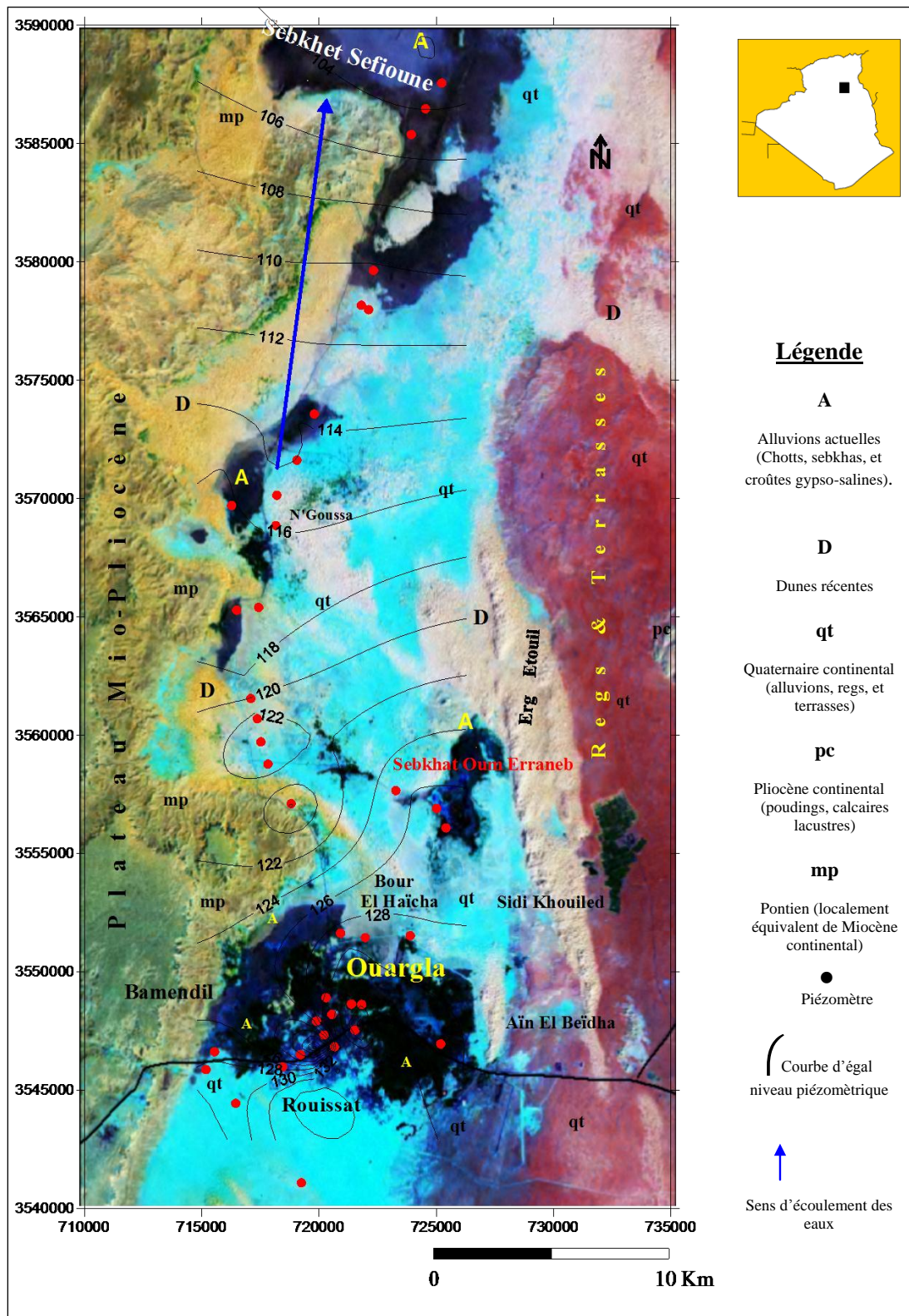


Fig08: Carte piézométrique et de localisation des piézomètres échantillonnés dans nappe superficielle in NEZLI I. (2009).

2-4. Le bilan hydrique de la nappe superficielle (phréatique)

La région d'Ouargla dispose de trois niveaux aquifères distincts :

- La nappe du Continental Intercalaire;
- La nappe du complexe terminal avec ces deux couches : Sénonien et Mio-pliocène;
- La nappe phréatique.

La profondeur du niveau piézométrique de la nappe phréatique est très variable selon les conditions hydrogéologiques et topographiques. Il varie entre 0 et 10 m.

Les cartes piézométriques établies, ont montré que :

- La nappe phréatique est caractérisée par des fluctuations saisonnières et annuelles. On a constaté une diminution moyenne du niveau statique de l'ordre de 16 cm entre 1992 et 1995. Par contre, entre les périodes 1995 et 1998, il y a eu une remontée de 10 cm.
- Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont:
 - Les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes;
 - Les fuites des réseaux de distribution et les rejets d'assainissement;
 - Les précipitations et apports des Oueds: N'sa, M'zab;
 - Drainance verticale, et drainage latéral.

Les caractéristiques hydrochimiques de la nappe phréatique sont:

- La salinité augmente dans le sens d'écoulement de la nappe phréatique et suggère une acquisition de la minéralisation par dissolution des sels lors du parcours des eaux souterraines.

Le bilan d'eau de la zone d'Ouargla a mis en évidence un manque d'irrigation et de drainage des palmeraies. Au cas où ces derniers seraient optimisés pour que les palmiers atteignent un rendement correct, il faudrait s'attendre à une augmentation des rejets de la station Chott atteignant 1,3 fois les rejets actuels (ils passeraient de 26470 m³/jour actuels à 61470 m³/jour). Il devient évident que les eaux usées épurées devraient être utilisées pour l'irrigation des palmeraies avec un complément d'eau des nappes profondes et que la station Chott ne devrait plus évacuer que des eaux de drainage, inutilisables car trop salées. [5]

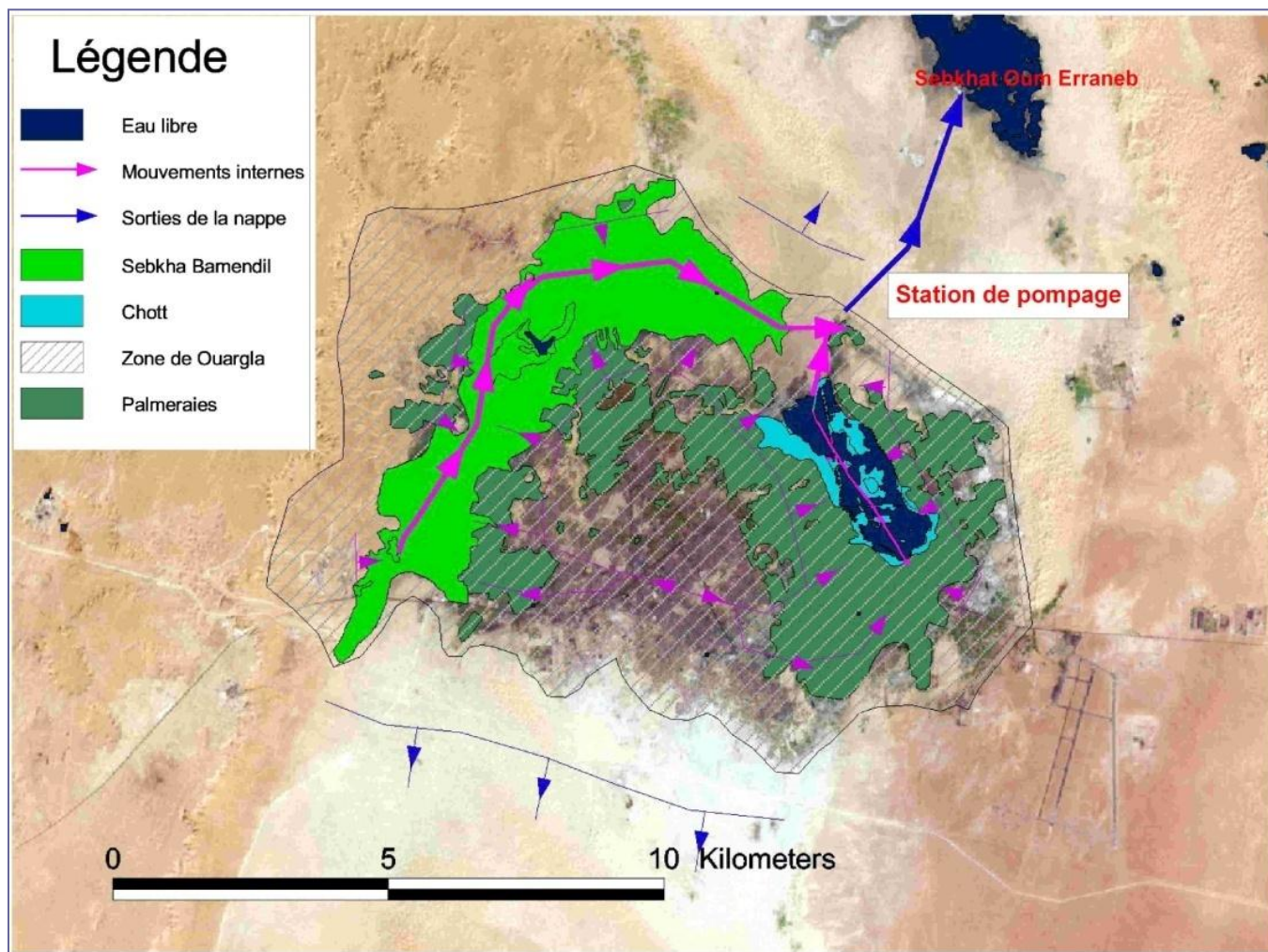


Fig09: Schéma du bilan hydrique d'après BG (2004).

2-5.Synthèse des travaux sur la nappe superficielle :

Le climat de la région de Ouargla est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région.

La température est très élevée en été, avec une moyenne mensuelle du mois le plus chaud (Juillet) qui dépasse 34.63°C et celle du mois le plus froid (Janvier) est de 11.76°C ;

La précipitation moyenne mensuelle est de l'ordre de 6.32 mm, Novembre est le mois le plus pluvieux (13 mm) et Juin plus sec (1 mm) ; L'évaporation est très élevée, elle est en moyenne de 90.6 mm au mois de Janvier et de 418.76 mm au mois de Juillet, soit de 2814.7 mm/an.

L'exploitation des données disponibles a permis d'établir un bilan hydrologique global semble refléter convenablement le phénomène de la remontée des eaux. Ce sont les canaux d'irrigation mal drainés qui favorisent l'élévation du niveau d'eau dans la nappe phréatique.

On remarque aussi l'irrégularité des précipitations qui augmentent de l'Ouest à l'Est et du Nord vers le Sud, ainsi qu'une humidité relative très élevée durant toute l'année.

Les résultats des bilans nous ont permis de remarquer une ETR élevée et un déficit considérable caractérisé par des mois hyper secs.

Les précipitations enregistrées pendant la saison humide peuvent engendrer des inondations remarquables se répétant d'une année à l'autre [16].

2-6. Conclusion

Notre zone d'étude s'inscrit dans un vaste bassin sédimentaire du Sahara Nord-oriental ou, « septentrional ». Elle est creusée dans un dépôt détritique de terrains tertiaires (Mio-Pliocène) et de dépôts détritiques quaternaires de basse vallée fossile de l'oued Mya, dans lequel, les sables dominent avec alternance des argiles, des calcaires et du gypse.

Deux grandes nappes aquifères utilisables pour des fins urbaines et agricoles ont été reconnues dans la région :

-La nappe du **Continental Intercalaire**, ou de l'Albien gréseux et argileux ;

-La nappe du **Complexe Terminal** avec deux niveaux aquifères :

- Le **Sénono-Eocène**, ou nappe des calcaires ;
- Le **Mio-Pliocène**, ou la nappe des sables.

Les précipitations atmosphériques à Ouargla sont très faibles. Elles sont de l'ordre de 64,94 mm/an (1990-2005). La température maximale dépasse souvent les 40°C pendant juillet ($\max_{\text{moy}} 43,5^\circ\text{C}$) et août ($\max_{\text{moy}} 42,44^\circ\text{C}$), traduisant ainsi une forte évaporation (2854,46 mm/an).

La correspondance entre ces hautes températures et faibles précipitations acquièrent un climat saharien hyper aride à la zone d'étude [20].

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III -1.Introduction

On a réalisé une étude minéralogique des échantillons du sol et ainsi les prélèvements des eaux souterraines suivie par une étude hydrochimique de ces eaux afin de comprendre les caractéristiques hydrogéochimiques en domaine des formations et des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla.

et Avant d'exposer les résultats des mesures et d'analyses physico-chimiques obtenus dans les eaux des nappes superficielle nous jugeons utile de présenter les conditions et le mode d'échantillonnage, ainsi que les techniques de mesure et d'analyse de nos échantillons. Des outils informatiques (logiciels), employés pour le traitement de nos résultats, nécessitent d'être brièvement présentés.

III 2.Echantillonnage :

Nous avons implanté (05) piézomètres : à Hassi-Berahla et pôle , à l'ex l'ITAS, à l'air algérie au centre ville de ouargla et à ksar. puis on a effectué des prélèvements des échantillons du sol pour les analyse des diffraction aux rayons X au laboratoires de l'université de Laghouat et à Biskra, hélas notre demande n'a pas eu de réponse positive. C'est pour cette raison qu'on s'est basé sur les analyses effectuées par l'année passée (Oubira 2013)

Ainsi, nous avons établi des analyses chimiques et granulométriques au laboratoire de LTPS afin de confronter lesquelles analyses des eaux et du sol aux données physicochimiques effectuées par Nezli 2004), avec modélisation thermodynamique par le modèle Pitzer.

III-3.Méthodes utilisées :

3-1.Analyse granulométrique et sédimentométrique :

L'essai consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à 80 μm , la séparation se fait par tamisage. Pour les fines inférieurs à 80 μm , on doit pratiquer l'essai de sédimentométrie.

3-2. Analyse granulométrie (méthode par tamisage à sec après lavage) :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs catégories de grains décroissantes.

Mode opératoire

- Le tamisage peut être effectué soit manuellement, soit à l'aide d'un vibro-tamis.
- Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif, ensuite procéder à une prise d'essai conformément à la formule : $200 D < p < 600$; avec D diamètre moyen estimé du plus gros grain.
- Peser l'échantillon.
- Imbiber l'échantillon dans un récipient.
- Éliminer les fines par lavage continu (tamis 0,08mm) jusqu'à ce qu'il ne reste que les éléments propres.
- Sécher le matériau dans une étuve réglée à 1050C, pour les matériaux non gypseux, et 550c, pour les matériaux aux hautes températures.
- Tamiser l'échantillon en versant ce dernier au sommet et d'une série de tamis et en les agitant (10 - 5 - 2 - 1 - 0,4 - 0,2 - 0,1 et 0,08mm).
- Recueillir le refus de chaque tamis et le peser dans une balance de portée pesant au gramme près.
- Rapporter les poids des différents refus, poids initiaux du matériau.
- Calculer le pourcentage des tamis.
- Etablir la courbe granulométrique.

3-3. Diffraction aux rayons X ou DRX :

La diffraction aux rayons X est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, l'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.

Préparation des échantillons

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un

détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, on fait tourner le tube produisant les rayons X.

3-4.Outils informatiques :

Statistica.v6.1 (StatSoft France, 2003)

Nous nous sommes servis de ce logiciel afin de déterminer les paramètres statistiques de nos données physicochimiques. Il s'agit de coefficient de corrélation, les valeurs max, min, ainsi que l'écart type. Une méthode de classification hiérarchique ascendante (CHA), a été réalisée par ce programme qui consiste à classer "**p**" variables, "**n**" observations, par construction d'une matrice de distances entre les variables et les observations. On définit ensuite une règle de calcul de distances entre les groupements disjoints de variables ou d'observations. Les deux groupements dont la distance est la plus faible (selon ce critère) se réunissent et on réitère le processus jusqu'au regroupement complet de classes (Saporta, 1990). On peut représenter la classification ascendante hiérarchique par un dendrogramme ou arbre de classification.

Phreeqci, v, 3.0.6-7757 (Parkhurst and Appelo, 1999)

L'étude géochimique a été effectuée par simulation à l'évaporation naturelle (température de l'échantillon), en utilisant le logiciel thermodynamique chimique, Phreeqci. v, 3.0.6-7757. Le calcul de l'indice de saturation ($IS = \log(Q) / \log(Kps)$) des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye-Hückel, en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de -0,5 à +0,5.

Diagramme v.6.0(Simler, 2013) à l'aide du logiciel nous avons pu réaliser le diagramme de piper qui permet de déterminer le faciès chimique des eaux.

Diagramme Piper

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles témoignant les teneurs relatives en chacun des ions par rapport au total des ions. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle.

III -4 : Conclusion

Afin de concrétiser une étude se rapportant à l'hydrogéochimie des nappes phréatiques de Ouargla, nous avons repéré dans la mesure du possible le maximum des piézomètres d'eau ayant une bonne répartition significative dans toute la vallée de Ouargla. Des mesures in situ et des analyses au laboratoire ont été effectuées et ont porté sur un certain nombre de paramètres physicochimiques. Des programmes informatiques ont été utilisés pour représenter les paramètres sus indiqués et en tirer des renseignements particuliers.

CHAPITRE IV : INTERPRETATIONS ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV -1.Introduction

la nappe superficielle (phréatique) du Sahara septentrional, qui se trouve pelliculaires par rapport à la nappe des sables CT sous-jacente. Selon de nombreuses études et notes techniques pluridisciplinaires élaborées depuis plus d'une vingtaine d'années, cette nappe est soumise aux fuites des réseaux vétustes d'AEP et d'assainissement (urbain et agricole), et par conséquent, elle est sujette à des remontées « spectaculaires » de son niveau piézométrique et vulnérable à des pollutions multiples.

- pollution naturelle, qui est une pollution minérale, due principalement à :
 1. La lithologie : qui joue un rôle principal dans la minéralisation des eaux par dissolution des sels minéraux (Gypse, Halite Sylvite...)
 2. Le climat : par effet de la température élevée, et par conséquent, des évaporations intenses, favorisant des accumulations des sels sus indiqués.
 3. La profondeur de l'eau dans l'aquifère, un facteur catalyseur de l'effet du climat.
- pollution anthropic, c'est une pollution organique, due principalement à aux apports des eaux biodégradables, d'assainissement urbain (domestiques) et agricole (drainage des palmeraies Slimani ; 2006, djidel ; 2009).

Les études faites par nos soins, notamment, dans la zone d'étude Ouargla (Nezli, 2004, Nezli, 2007) se sont focalisées sur la pollution minérale naturelle. Il en résulte que l'évolution hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique, décrite par l'indice de saturation des minéraux prépondérants, montre, également, comme dans les eaux profondes du CI et CT, que la dissolutions des évaporites confère aux eaux de la nappe phréatique de Ouargla, un faciès chloruré sodique en aval synonyme d'une minéralisations excessive [13].

IV -2- paramètres physico-chimiques :

2. 1. La Température (T) :

La température est relativement élevée pour les eaux de surface dans la région d'étude, elle comprise entre 19 et 33°C. Ces variations changent en fonction de la température de l'air, des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. (djidel , 2009)

2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques.

Le pH de l'eau conditionne les équilibre physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est corrigé selon le cas par élimination du CO₂ dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée.

Il a été constaté que dans les basses comme dans les hautes eaux, les valeurs du pH sont nettement plus élevées dans les eaux de surfaces. La période des hautes eaux montre des pH entre 6.0 et 7.8 dans les eaux souterraines. Les eaux de surface montrent une nette alcalinité d'un pH variant entre 7,4 et 8,4 .

2.3. Conductivité électrique (CE) :

L'eau peut être considérée comme une solution électrolytique, car presque tous ses constituants dissous, majeurs et mineurs, sont présents sous forme ionique. Grâce à la présence de ces ions, l'eau devient susceptible de se laisser traverser par un courant électrique (la salinité). Dans les deux périodes d'observation, en hautes comme en basses eaux, on remarque que la différence entre les valeurs de conductivité mesurées, dans les eaux de surface et les eaux souterraines, reste dans le même ordre de grandeur (entre 3-200 mS/cm).

2.4. Les cations :

2.4.1. Le calcium (Ca⁺⁺) :

Le calcium est un des paramètres qui contribuent à la minéralisation des eaux. Il en ressort que les eaux de souterraines comme celles de surface de la région d'étude,

présentent des teneurs assez remarquables en calcium. Cela aurait pour origine la dissolution des formations carbonatées CaCO_3 du Miopliocène située à la limite Ouest de Ouargla, et des formations alluvionnaires gypseuses (CaSO_4) du Quaternaire, situées dans les dépressions.

Les analyses chimiques faites au niveau de la cuvette, montrent que les concentrations en calcium varient en période des hautes eaux de 200 mg/l à 1100 mg/l

2.4.2. Le magnésium (Mg^{++}) :

Il peut provenir de la dissolution des formations dolomitiques en présence du CO_2 ou de la dissolution des dolomies et des formations gypsifères.

Au mois de février les concentrations en magnésium des eaux souterraines varient entre 70 et 20000 mg/l . Pour les eaux de surface entre 250 et 6000 mg/l.

Au mois de juin les concentrations des eaux souterraines varient de 85 à 21000 mg/l et entre 530 et 11000 mg/l pour les eaux de surface.

On constate que les dépressions et chotts sont les plus chargées en sels de magnésium.

2.4.3. Sodium et potassium (Na^+ et K^+) :

En période hivernale les concentrations en sodium dans les eaux souterraines allant de 400 mg/l à 100 g/l et pour les eaux de surface entre 2800 mg/l et 110 g/l.

En période estivale les concentrations en sodium allant de 500 mg/l à 100 g/l dans les eaux souterraines, et entre 3700 mg/l et 110 g/l pour les eaux de surface.

Les concentrations en potassium varient en période des hautes eaux de 20 à 10000 mg/l et de 200 à 4500 mg/l pour les eaux de surface.

En période des basses eaux, les eaux souterraines ont des concentrations allant de 200 à 11000 mg/l.

Les eaux de surface varient de 200 à 3500 mg/l.

2.5. Les anions :

2.5.1. Le chlorure (Cl^-) :

Les chlorures sont rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines et proviennent de la dissolution du sel par lessivage des terrains salifères et du rejet des eaux d'origine industrielle.

En période hivernale les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines allant de 400 mg/l à 200 g/l, et pour les eaux de surface entre 2500 mg/l et 160 g/l .

En période estivale les concentrations allant de 650 mg/l à 200 g/l dans les eaux souterraines, et entre 4000 mg/l et 180 g/l pour les eaux de surface.

2.5.2. Les bicarbonates (HCO_3^-) :

La présence des bicarbonates dans l'eau de la zone d'étude aurait la même origine que celles du calcium et magnésium, citées auparavant. Elle est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique.

Au mois de février les concentrations en bicarbonates des eaux souterraines varient entre 50 à 1000 mg/l . Pour les eaux de surface entre 200 et 2500 mg/l .

Au mois de juin les concentrations des eaux souterraines varient de 140 et 1500 mg/l , et entre 300 et 2600 mg/l pour les eaux de surface.

2.5.3. Les sulfates (SO_4^{2-}) :

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau provient soit :

- De la légère solubilité des sulfates calcium (CaSO_4) dans les formations gypseuses ;
- Du lessivage des terrains argileux et marneux ;
- Des eaux usées contenant de l'acide sulfurique.

Les concentrations en sulfates varient en période des hautes eaux de 1000 à 31000 mg/l (nappe phréatique), et de 5000 mg/l et 50000 mg/l pour les eaux de surface.

- En période des basses eaux , les eaux souterraines ont des concentrations allant de 1000 à 85000 mg/l . Pour les eaux de surface, elles varient de 6000 à 65000 mg/l .

2.5.4. Les Nitrates (NO_3^-) :

Les nitrates sont rarement présents dans les eaux souterraines. Ils proviennent essentiellement de l'azote organique du sol (par l'intermédiaire des bactéries) des engrais chimiques, ainsi que les eaux usées.

IV -3 Classification des eaux

3-1. Selon PIPER :

La représentation des données physico-chimiques sur le diagramme de Piper montre plusieurs faciès chimiques qui dépendent de la nature géologique de l'aquifère, mais également d'autres facteurs climatiques et anthropiques. Le faciès chimique dominant est chloruré sodique à dominance sodique et magnésien. (Fig. 10, 11 et 12)

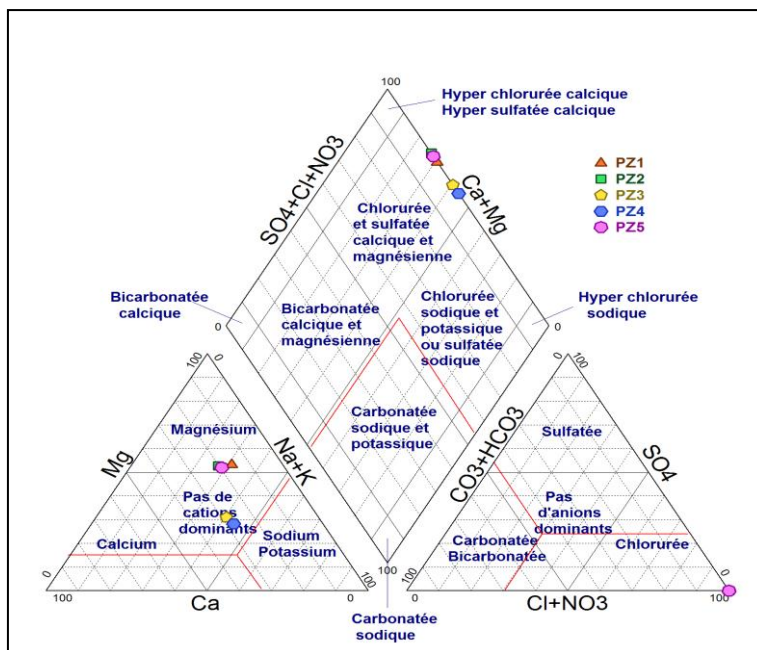


Fig10 : Faciès chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (2014)

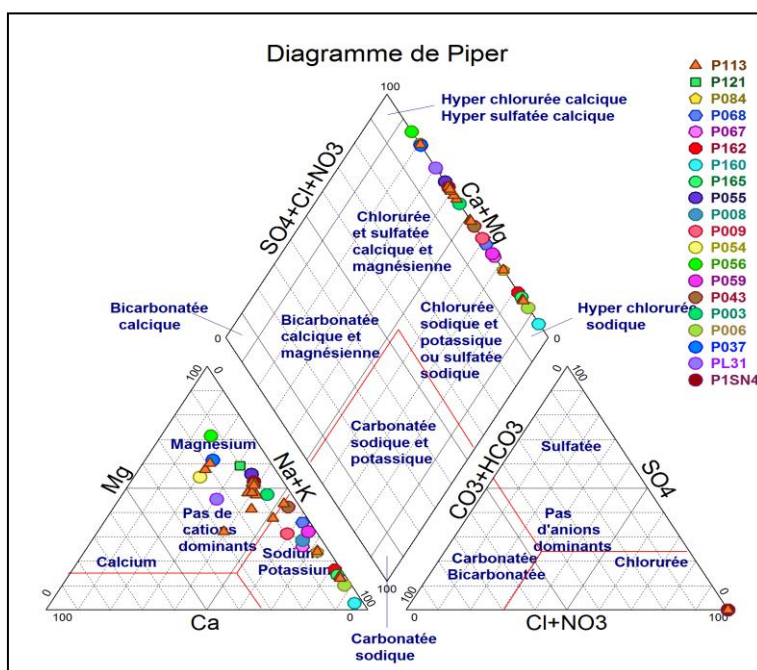


Fig11 : Faciès chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (juin 2002)

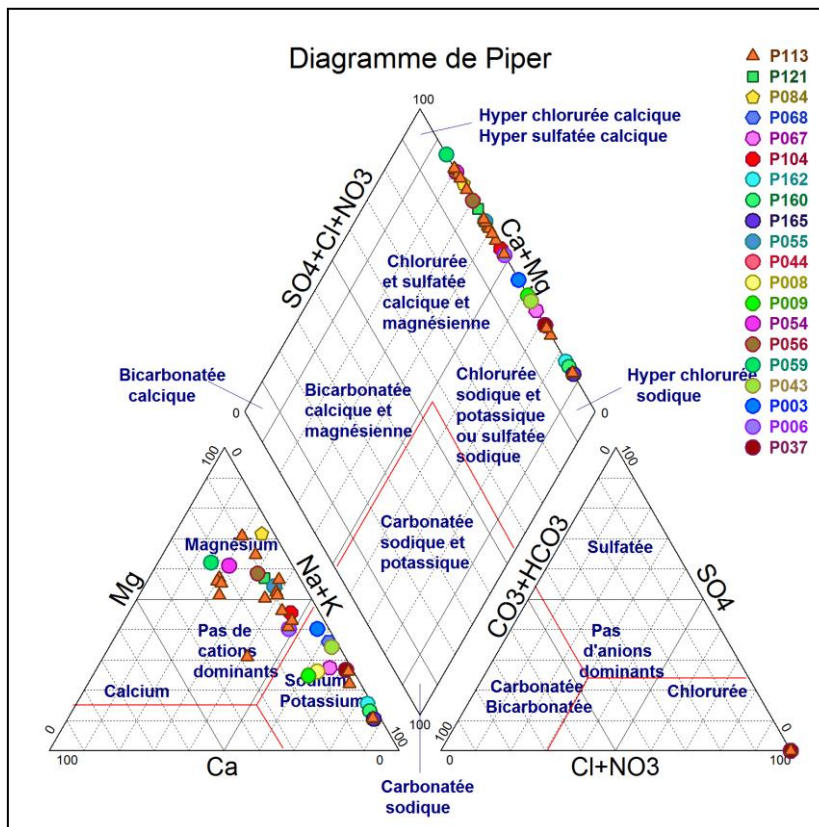


Fig12 : Faciès chimique des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla (Février 2002)

3-2. Pourcentage de Faciès chimique :

Le diagramme en camembert nous donne une vue d'ensemble sur de taux de répartition spatiale des faciès géochimiques au niveau de la nappe superficielle de la basse vallée de l'oued M'ya (Fig.13 et 14).

Il montre que le faciès le plus dominant est chloruré sodique (83% et 65%) des échantillons avec l'apparition d'un faciès sulfaté magnésien de moyenne représentativité (14% et 22% des échantillons des deux compagnes).

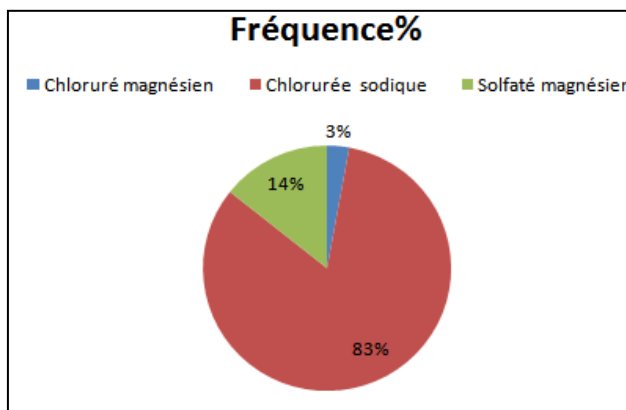


Fig13 : taux de faciès chimiques dans les eaux de la nappe superficielle (juin 2002).

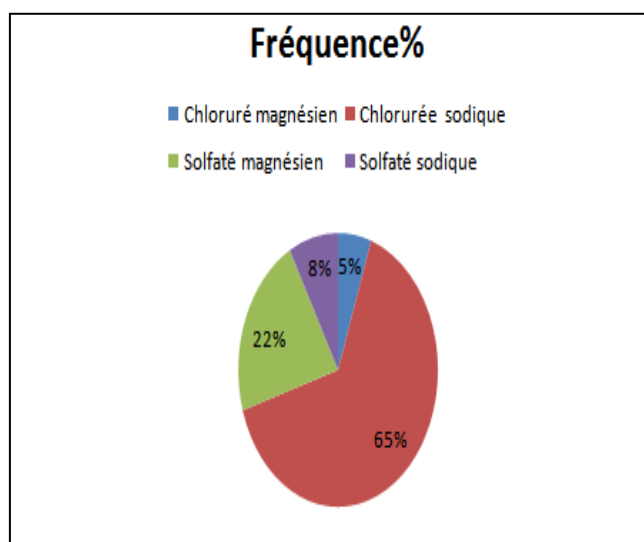


Fig14 : taux de faciès chimiques dans les eaux de la nappe superficielle (février 2002).

3-3. Evolution géochimique des eaux de la nappe superficielle (phréatique) :

D'après le diagramme ci-après (Fig15), nous pouvons constater que, dès le début de concentration ($\log Fc = 0$), les solutions sont déjà saturées (en équilibre) à sursaturées (précipitation) selon les cas : en Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), en Calcite (CaCO_3), et en Aragonite (CaCO_3) ; contribuant ainsi au contrôle de l'alcalinité (bicarbonatée) et des teneurs en calcium et en magnésium, qui ne peuvent augmenter simultanément.

Le gypse atteint son équilibre à partir de $\log Fc = 0,2$ et tend à se précipiter aux alentours de $\log Fc = 2,4$; alors que le minérale de l'halite atteint son équilibre à un facteur de concentration dépassant 2,6.

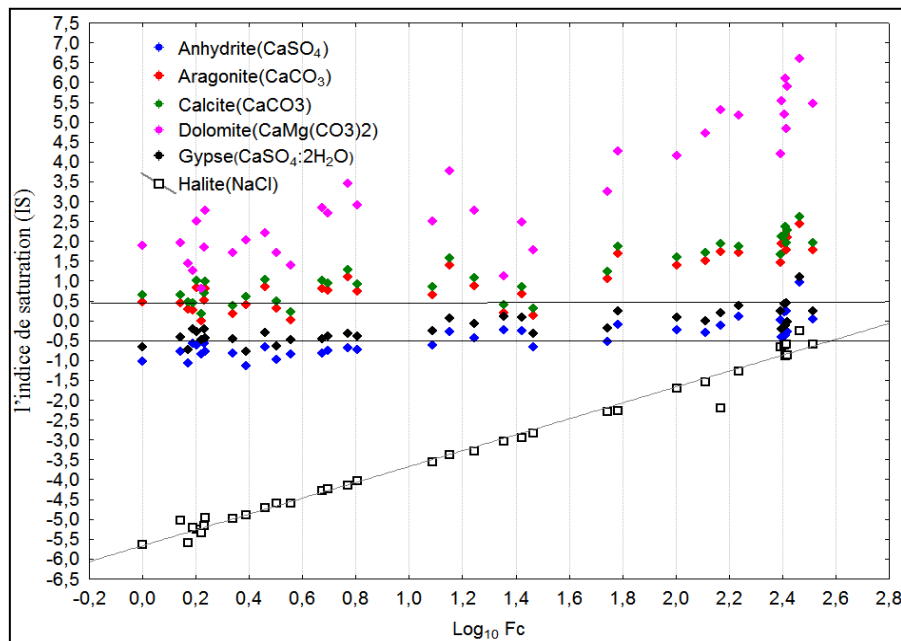


Fig15 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction du facteur de concentration (février 2002).

Dans le diagramme des données de la campagne de février (Fig16), nous remarquons que l'évolution de la précipitation est pratiquement la même que celle du mois de juin avec la simple différence dans la vitesse de précipitation qui s'avère importante selon la pente de la droite de régression des minéraux prépondérants et l'évolution de précipitation du gypse à partir d'un facteur de concentration $\log Fc=2,5$, et la précipitation de l'halite au droit des chotts et sebkhas.

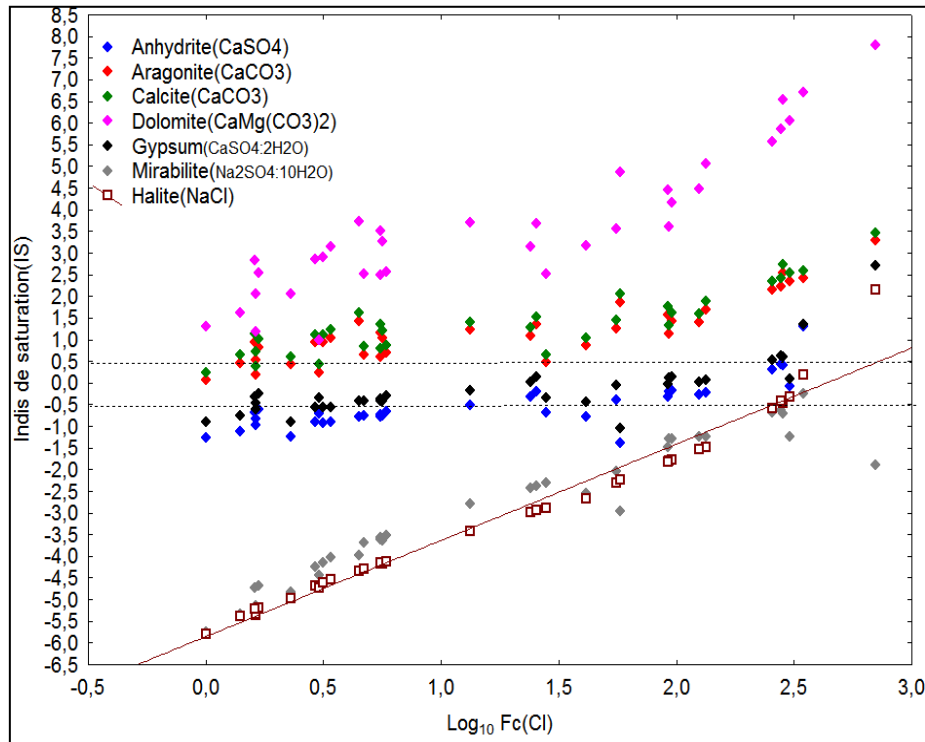


Fig16 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction du facteur de concentration (juin 2002)

IV -4. Diagramme de concentration et évolution des ions:

Dans les diagrammes (Fig17 et 18), l'évolution des molalités des éléments majeurs est identique dans les deux campagnes d'échantillonnage (février et juin 2002). En effet, les teneurs en chlorures paraissent alignées suivant une droite de pente 1. La molalité du sodium augmente proportionnellement au facteur de concentration, avec l'ion chlore, voir l'excès de sodium dans quelques endroits dans les deux campagnes d'analyses, ce qui explique la dominance du faciès chloruré sodique due à la matrice halite (annexe, fig05), et les échanges de bases entre la matrice argileuse (annexe, fig03) et l'eau de la nappe.

La somme des équivalents de calcium et magnésium est supérieure à l'alcalinité bicarbonatée dans la solution. Les concentrations en calcium et en magnésium augmentent mais à un rythme inférieure à celui du facteur de concentrations. L'équilibre avec le Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est atteint à partir log Fc voisin de 0,2. On observe un contrôle simultané entre les bicarbonates et les deux cations Ca et Mg jusqu'à log Fc = 1,4 où les concentrations en calcium semblent en cours de diminution jusqu'à log Fc = 2,5. Le nuage de points exprimant les concentrations du calcium s'incurve vers le bas, traduisant ainsi une consommation du cation, alors que la teneur en sulfate demeure élevée suivi de près par le magnésium. L'excès présence de cet élément par rapport au calcium soulève l'hypothèse de la relation du

magnésium avec le gypse selon schoeller (1962), d'une part et les échanges de bases le potassium évolue mais à un rythme supérieure à celui du facteur de concentrations.

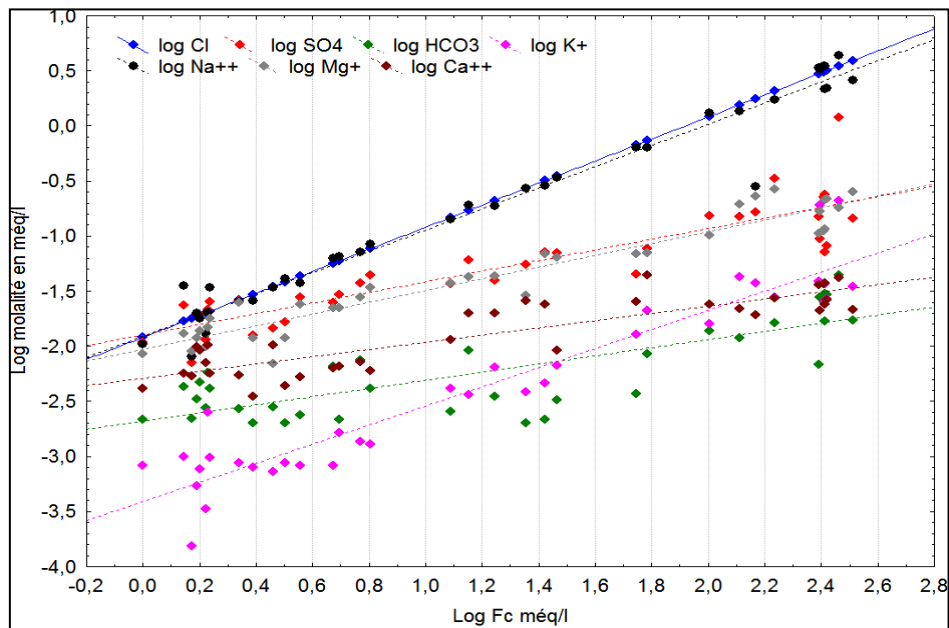


Fig17: diagramme de concentration (Février 2002)

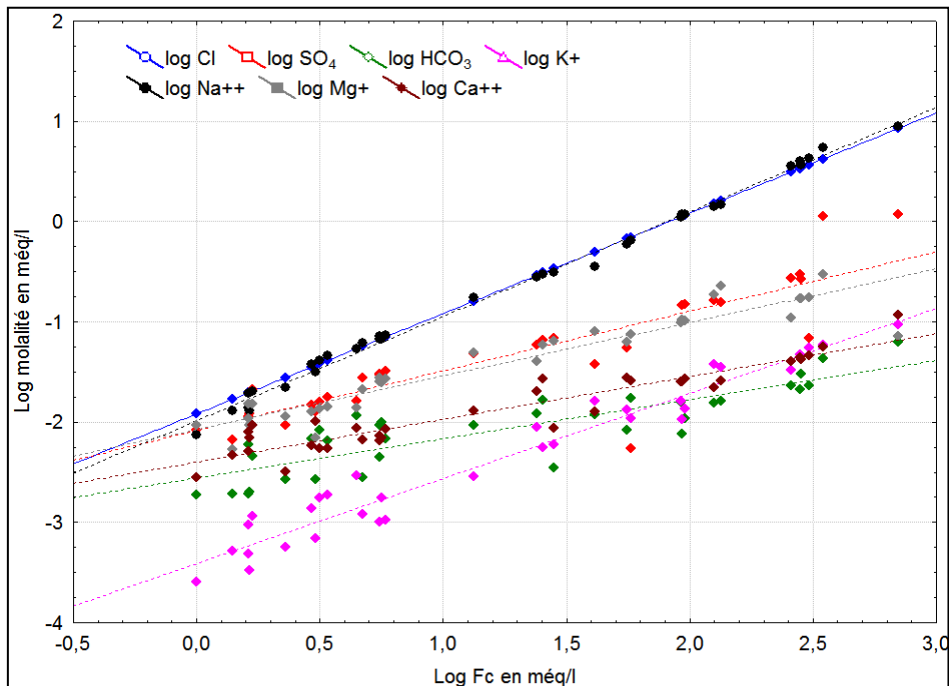


Fig18 : diagramme de concentration (Juin 2002)

IV -5.Echanges de bases :

Bien que le rapport Mg/Ca est souvent supérieur à l'unité on observe, dans le diagramme binaire suivant (fig.19 et 20) qu'une augmentation de Mg et Ca au fur et à mesure qu'une diminution de Na et K et inversement, ce qui confirme à nouveau l'hypothèse d'échanges de bases et de la richesse des eaux en magnésium.

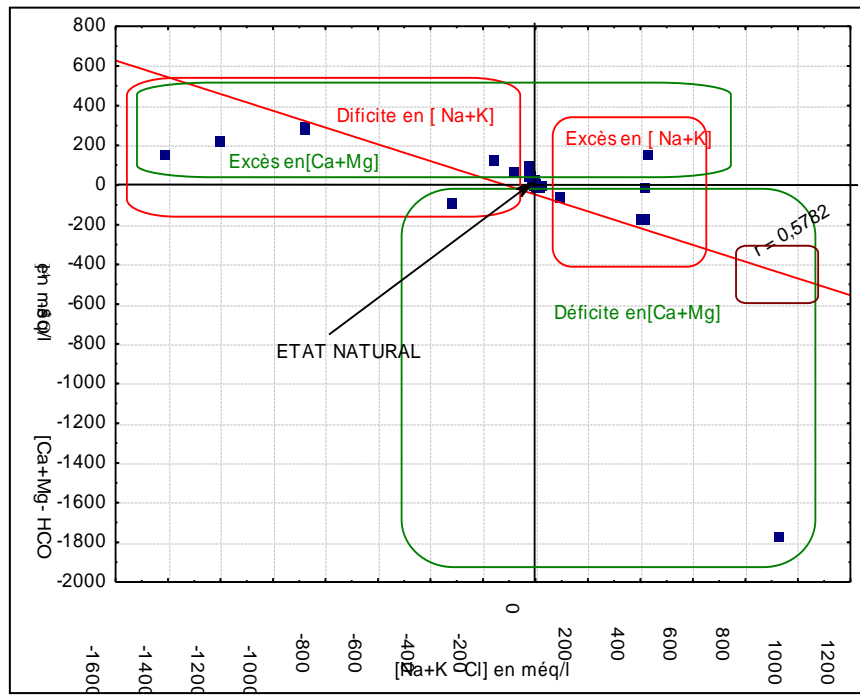


Fig 19: La relation entre $[Ca+Mg- HCO_3-SO_4]$ et $[Na+K - Cl]$ dans les eaux (février2002)

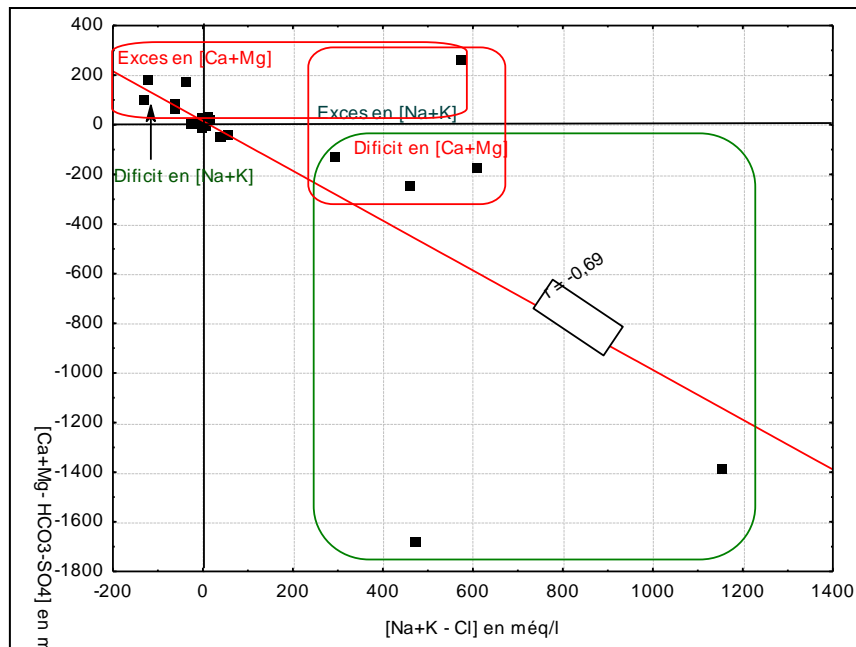


Fig20 : La relation entre $[Ca+Mg- HCO_3-SO_4]$ et $[Na+K - Cl]$ dans les eaux(JUIN2002)

IV -6. Origine de l'élément chimique :

6-1. Origine de Na⁺ :

On remarque dans les graphes (fig. 21, 22 et 23) que l'origine du Sodium est due aux évaporites (Halite), avec une corrélation ($r = 0,92$). La mirabilite est observée dans les chotts et sebkhas.

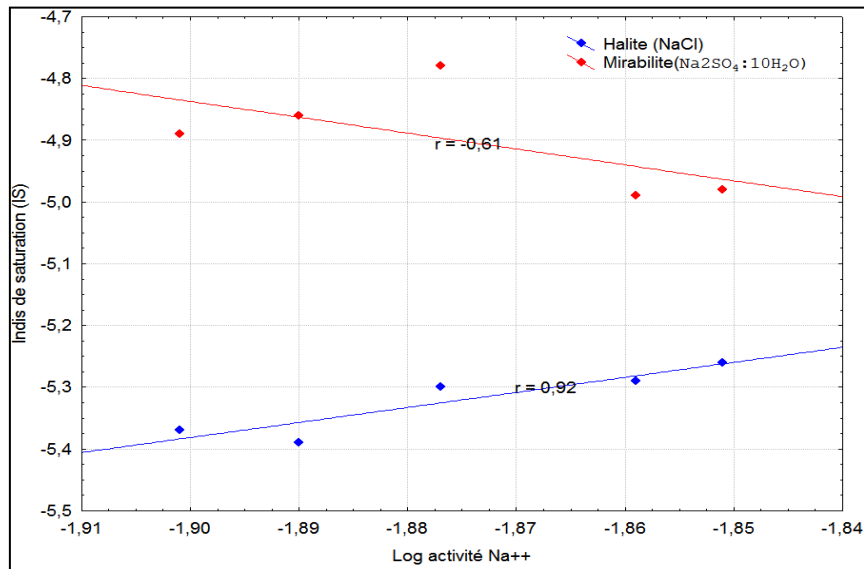


Fig21 : La relation entre Log activité Na⁺ et Halite et MÉRABILITE (2014)

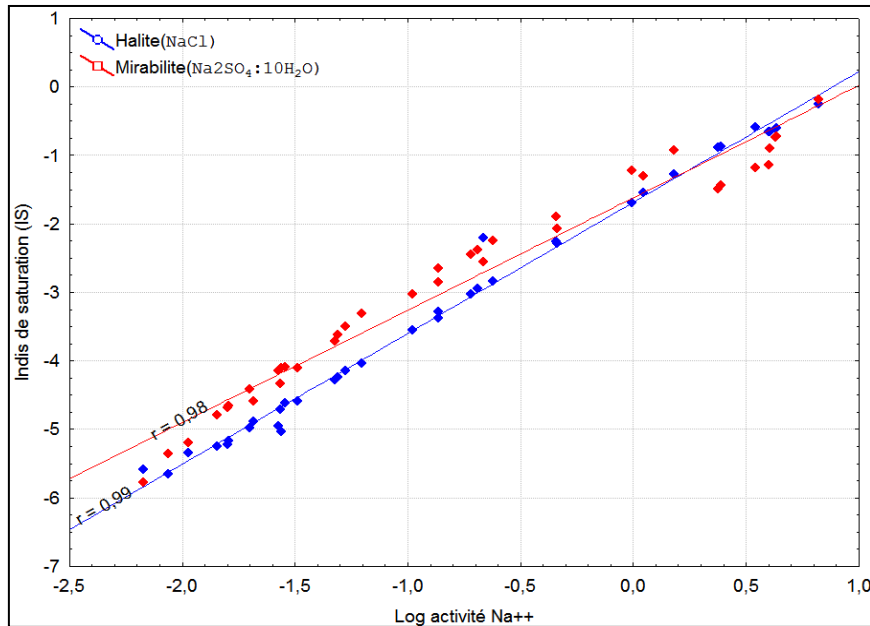


Fig22 : La relation entre Log activité Na⁺ et Halite et MÉRABILITE (Février 2002)

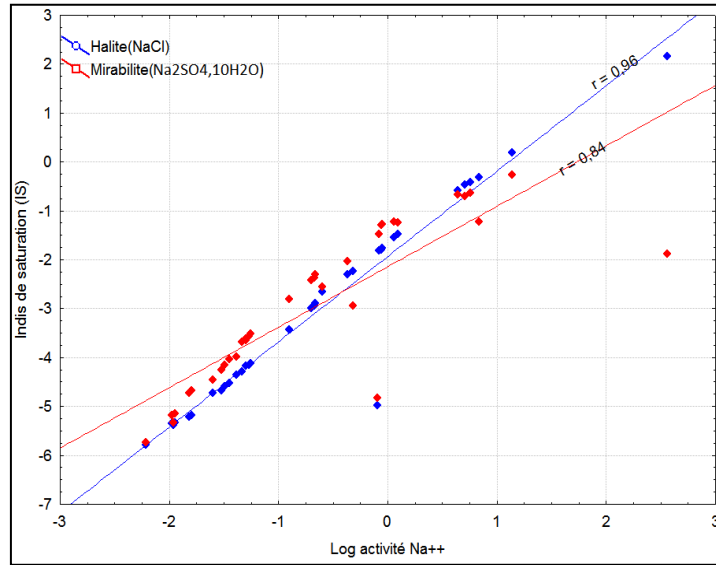


Fig23 : La relation entre Log activité Na^{++} et Halite et MÉRABILITE (Juin 2002)

6-2.Origine de Ca^{++} :

On remarque dans les graphes (fig. 24, 25 et 26), que l'origine du calcium est dû aux évaporites carbonatés (gypse et calcite) (annexe. Tab04 et fig02).

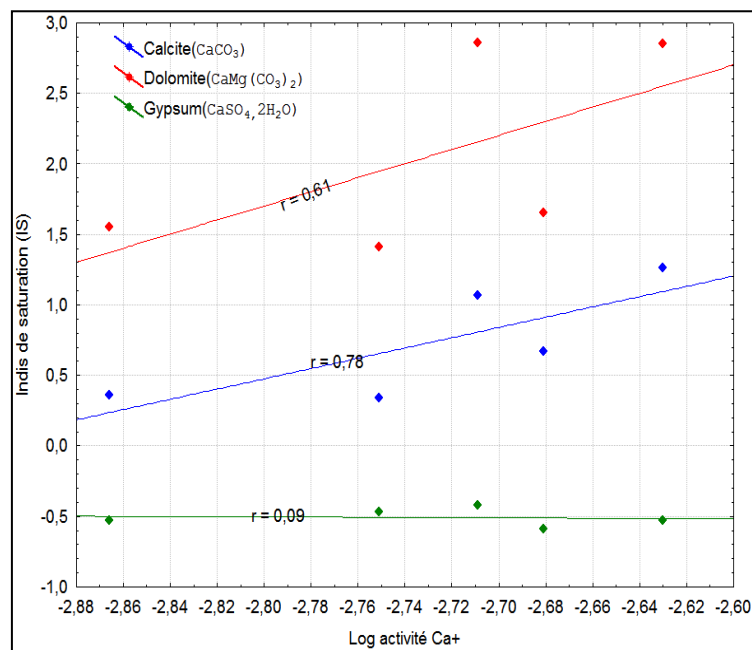


Fig24 : La relation entre Log activité Ca^{++} et les élément carbonaté (2014)

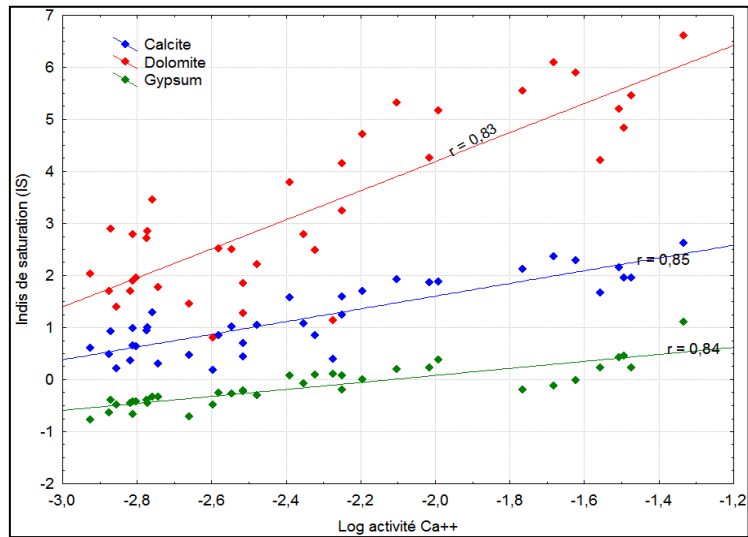


Fig 25: La relation entre Log activité Ca⁺⁺ et les élément carbonaté (Février2002)

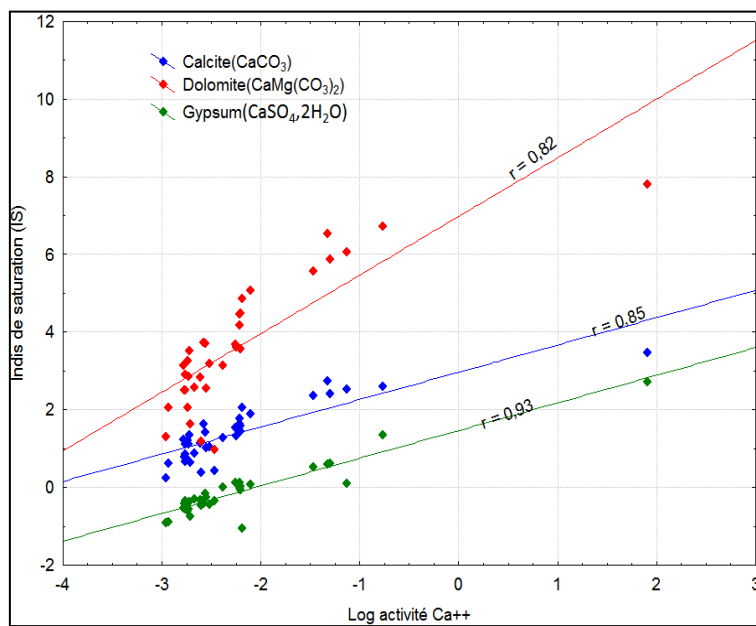


Fig26: La relation entre Log activité Ca⁺⁺ et les élément carbonaté (Juin 2002)

6-3.Orogine de Mg⁺⁺ :

Le graphe (fig. 27.28 et 29) montre que l'origine du magnésium est dû aux évaporites et carbonates (gypse et dolomite).

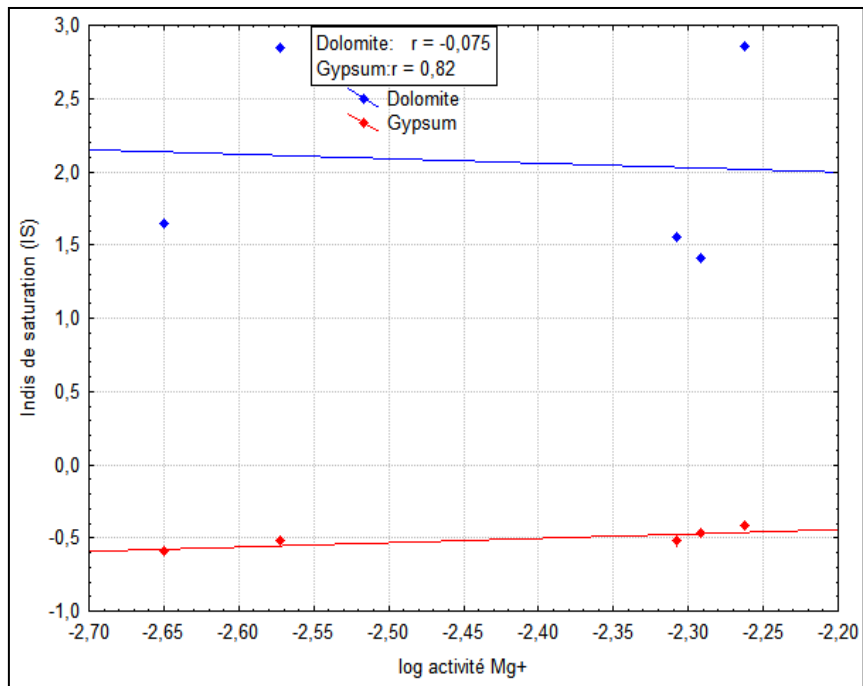


Fig27 : La relation entre Log activité Mg+ et IS (2014)

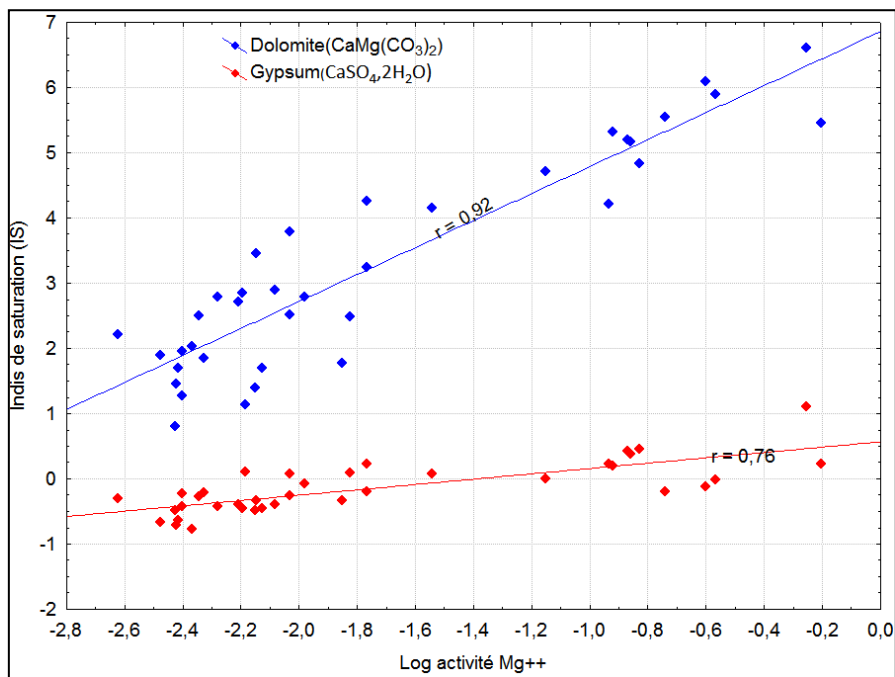


Fig28 : La relation entre Log activité Mg+ et IS (Juin 2002).

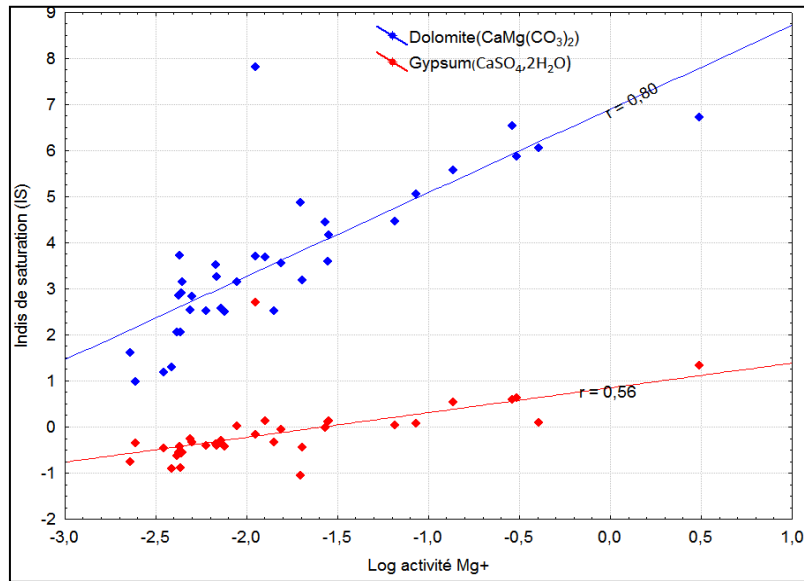


Fig 29: La relation entre Log activité Mg+ et IS (Juin 2002).

6-4. Origine de K+ :

On remarqua (fig. 30, 31 et 32.) que l'origine du potassium peut être anthropique ou géologique, par ce que la nappe est sujette à la pollution organique (NPK), et géologique du fait de la présence d'une matrice argileuse potassique (kaolinite) et une matrice évaporitique et principalement de la Sylvite (annexe. fig03).

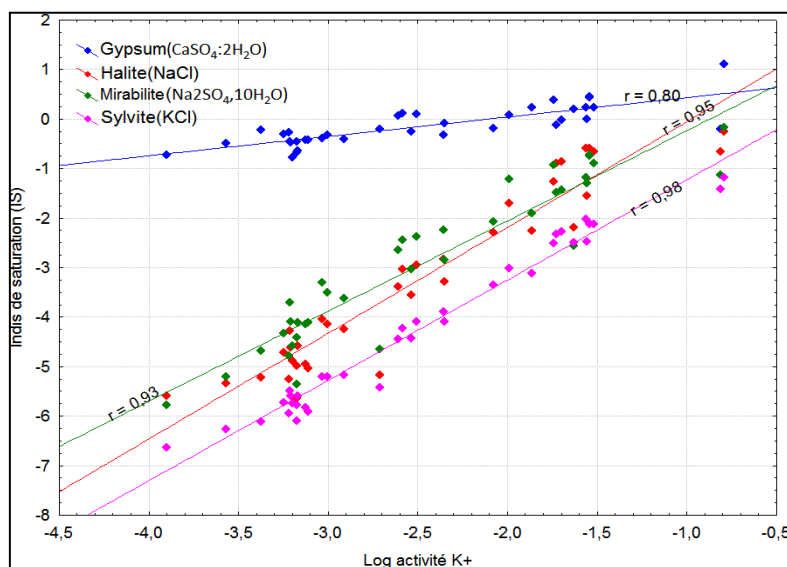


Fig30 : relation entre Log activité K+ et IS (Février 2002)

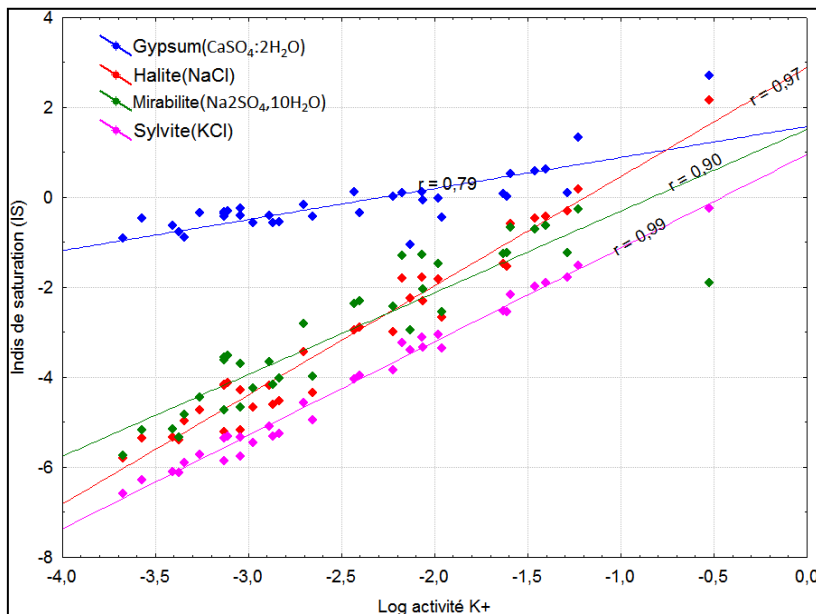


Fig31 : relation entre Log activité K⁺ et IS (Juin 2002)

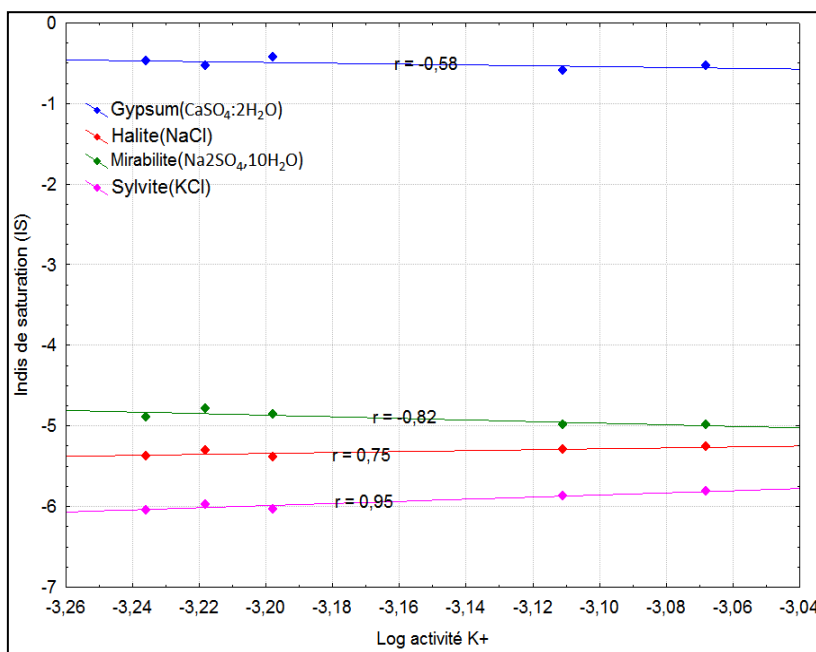


Fig32 : relation entre Log activité K⁺ et IS (2014)

IV -7.Conclusion

L'évolution géochimique de la salinité des eaux de la nappe phréatique, décrite par l'indice de saturation des minéraux par rapport au facteur de concentration, traduit par des valeurs de conductivité électrique élevées (de 17600 à 54000 $\mu\text{s/cm}$) à cause de la lithologie riche en évaporites, et par conséquence : le facies dominant est chloruré sodique.

Dans notre zone d'étude, les formations géologiques sont sédimentaires d'origine détritique. On trouve le quartz qui est dominant par rapport à l'anhydrite, la calcite, la dolomite et gypse et aussi à la kaolinite et l'illite.

D'après le résultat obtenu, les indices de saturations des eaux indiquent que ces eaux sont sursaturées en minéraux évaporitiques et carbonatés.

CONCLUSION GENERALE

La cuvette d'Ouargla, est située dans le prolongement du grand bassin mésozoïque d'Oued Mya dans la partie Nord- Est du Sahara. Avec des caractères climatiques de hautes températures à 40°C pendant les mois juillet et août, ainsi que de précipitation moyenne annuelle de 51,76 mm et une évaporation de l'ordre de 3214.82 mm/an. Des dépôts détritiques quaternaires à prédominance sableux.

Géologiquement, notre zone d'étude appartenant à la plate- forme saharienne, qui présente une tectonique relativement stable. Elle est creusée dans un dépôt détritique de terrains Tertiaires (Mio-Pliocènes), et Quaternaires de la basse Vallée de l'Oued M'ya (bassin Mésozoïques), dans lequel les sables dominants avec alternance des argiles, des calcaires et des gypses.

L'aspect Hydrogéologique deux grands aquifères le complexe terminal et continental intercalaire utilisé pour urbain et agricole, le Continental Intercalaire ou de l'Albien gréseux et argileux.

Le Complexe Terminal avec deux niveaux aquifères :

- Le Sénono-Eocène ou nappe des calcaires
- Le Mio-Pliocène ou la nappe des sables, en continuité lithologique avec les
- sables fins gypseux du Quaternaire renfermant une nappe libre (phréatique).

Notre étude est basée sur la nappe phréatique qui affleure et détermine l'influence entre les formations et les eaux.

Les eaux de la nappe phréatique dans la zone d'étude sont en contact avec une Lithologie riche en évaporites, révèlent une forte minéralisation exprimées par des valeurs de conductivité électrique très élevées (54000 μ S. Cm-1), les concentrations en éléments chimiques dépassent les normes de l'OMS.

Le faciès chimique des eaux de la nappe superficielle au niveau de la région de Ouargla est chloruré sodique, indiquant l'influence de la halite.

Ces résultats permettent de montrer l'importance de la nature lithologique sur les mécanismes d'acquisition du chimisme des eaux de cette nappe mise à part son exposition aux risques anthropiques.

Référence bibliographie

- 1- ANAT (1995) : Maîtrise de la croissance urbaine de la métropole de Ouargla. Réhabilitation de l'écosystème de la Vallée de l'Oued M'ya, 43p.
- 2-BELLAOUER. A (2008) : Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives. Mémoire Magister, Univ. Batna.
- 3- BONNARD & GARDEL. (2004) : Étude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Rapport de la mission II final. Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau. Bonard & Gardel, Lausanne, p11,13, 14,18, 22, 43.
- 4-BONNARD & GARDEL, (2004) :La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. « Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau ». Mission II, Rapport final, 110 p
- 5-BRIGOL M -ROUVILLOIS, (1975) : Le Pays de Ouargla, Sahara algérien, variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Publications de l'Université de Paris-Sorbonne, p.389 .
- 6-BUSSON, G. (1970) : Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol. Ed. C.N.R.S. , p11, 811.
- 7- CASTANY, G. (1982) : Hydrogéologie, principes & méthodes. , Paris, éd. Dunod, p 237.
- 8-Cornet, A. Gouskov, N. (1952): Les eaux du Crétacé Inférieur Continental dans le Sahara algérien (nappe dite albienne). XIX Cong. Géol. Inter. La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie. Tome II. Données sur l'hydrogéologie algérienne, p144 ,169.
- 9-CORNET. A. (1961) : Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours rénoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, 108p.

- 10-Cornet, A. (1964): Introduction a l'hydrogéologie du Sahara, Algérie. Revue géographie physique et de géologie dynamique, Vol. 6, Num-1, p 5,72.
- 11-FABRE. J. (1976) : Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger,p 421.
- 12- Idder, T,(1998): La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et technique de remédiations proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse Doct., Université d'Angers, 284p.
- 13 –DJIDEL.M. (2009) : Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de Doctorat, Univ Badji Mokhtar, Annaba, 165p.
- 14-LAOUINI H ,(2012) :caracterisation geochemique des zones humides entre deux climats, medeteraneen et aride par image satellitaire : cas des lacs d'eltaref et les chott et sebkhas de ouargla,140p.
- 15- Lelièvre, R.F(1969) : Assainissement de la cuvette de ouargla. Ministère des Travaux Publics et de la construction, rapports Géohydraulique n° 2, 18p: n° 3, 84p.
- 16-MOUDJAHED N,(2011) : etude geotechnique ligne de tramway de ouargla.114p.
- 17- NESSON. C. (1978) : L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In : Recherche sur l'Algérie, (ed. CNRS), pp 7-100, Paris.
- 18-NEZLI I. (2004) : Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla). Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar. Annaba, p 45- 47.
- 19-NEZLI I. et al (2007) : Approche hydrogéochimique à l'étude de la fluoruration des eaux de la nappe du Complexe Terminal de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla). Courrier du Savoir Scientifique et Technique. Mars 2009, N°09.
- 20-NEZLI I. (2009) : Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). Thèse de doctorat en sciences hydrauliques, université de Biskra, p 6,11,13.
- 21-OSS(2003) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4: Modèle Mathématique. Projet, SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, p 229.
- 22-PARKHURST. D.L., APPELO. C.A.J.(1999): User's guide to PHREEQC version2: a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and
-
- 49 | Géochimie des eaux de la nappe superficielle de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla).

inverse geochemical calculations. USGS, Water-resources investigations report 99-4259.

23-SAPORTA. G. (1990): Probabilités. Analyse des données et statistiques, Ed Technip,493p.

24-SCHOELLER. H. (1962) : Les Eaux Souterraines., Paris, Masson.

25-SIMLER. R. (2009) : D I A G R A M M E S. Logiciel d'hydrochimie multilingage, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. www.lha.univ-avignon.fr

26-Slimani R,(2006) : Contribution à l'évaluation d'indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla: Cas des eaux de rejets (agricoles et urbaines), 106p.

27-StatSoft France. (2003) : STATISTICA, logiciel d'analyse de données. www.satsoft.com

28- UNESCO(1972) :Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture,Paris, p100 .

Tab01 :Statistiques descriptives (février 2002 mg/l)

	N Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Ca ²⁺	37	656,59	140,000	1750,0	447,5
Mg ²⁺	37	1800,27	168,000	6139,0	1845,3
Na ⁺	37	19219,08	186,000	89000,0	27532,8
K ⁺	37	792,81	6,000	7300,0	1626,8
HCO ⁻³	37	558,14	122,000	2410,0	575,1
Cl ⁻	37	32502,38	425,000	130000,0	43454,0
SO ²⁻⁴	37	9335,62	675,000	102510,0	17129,3
NO ⁻³	37	25,81	4,000	57,0	12,9
pH	37	7,94	7,290	8,5	0,3
CE	37	93855,95	2230,000	817850,0	161233,8

Tab02 :Statistiques descriptives (juin 2002 mg/l)

	N Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Ca	35	768,37	111,000	3800,0	742,72
Mg	35	1584,03	129,000	6323,0	1615,96
Na	35	23587,43	170,000	167998,0	39496,11
K	35	539,83	10,000	2971,0	748,79
Cl	35	33602,86	427,000	245270,0	54314,33
HCO ₃	35	719,40	115,000	3153,0	649,90
SO ₄	35	11364,00	520,000	95048,0	21847,41
NO ₃ ⁻	35	17,74	0,000	46,0	9,81
pH	35	7,97	7,430	8,5	0,21
CE	35	44713,80	2610,000	250000,0	60081,74

Tab02 :Statistiques descriptives (2014 mg/l)

	N Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Ca	5	227,000	180,000	255,000	30,2799
Mg	5	286,420	137,500	398,800	122,9286
Na	5	378,200	359,000	395,000	14,2373
K	5	33,620	28,600	41,100	5,2855
HCO ₃	5	152,500	140,300	167,800	10,8046
Cl	5	602,800	538,000	650,000	46,2136
SO ₄	5	1502,200	936,000	1987,000	500,5958
NO ₃	5	51,700	39,000	58,500	8,6067
CO ₃	5	1,800	0,000	6,000	2,6833
Conductivity	5	4562,000	3800,000	5010,000	570,2806
pH	5	8,060	7,710	8,470	0,3644

2- Matris de Corrélations :

Tab1 : Matris de Corrélations (Février 2002)

	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	HCO-3	Cl-	SO2-4	NO-3	pH	CE
Ca2+	1,00									
Mg2+	0,59	1,00								
Na+	0,74	0,69	1,00							
K+	0,48	0,52	0,74	1,00						
HCO-3	0,60	0,78	0,82	0,77	1,00					
Cl-	0,70	0,85	0,94	0,65	0,85	1,00				
SO2-4	0,55	0,47	0,65	0,74	0,70	0,55	1,00			
NO-3	-0,17	0,05	0,01	0,02	0,22	0,04	0,14	1,00		
pH	0,01	0,25	-0,02	0,10	0,16	0,04	0,11	0,29	1,00	
CE	0,50	0,69	0,78	0,60	0,64	0,85	0,48	0,03	-0,03	1,00

Tab2 : Matris de Corrélations (Juin 2002).

	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO_3	SO_4	NO3-	pH	CE
Ca	1,00									
Mg	0,59	1,00								
Na	0,95	0,64	1,00							
K	0,92	0,76	0,96	1,00						
Cl	0,96	0,63	1,00	0,97	1,00					
HCO_3	0,94	0,62	0,93	0,91	0,93	1,00				
SO_4	0,84	0,56	0,87	0,81	0,85	0,87	1,00			
NO3-	0,14	0,26	0,08	0,12	0,08	0,06	0,23	1,00		
pH	0,02	0,18	0,10	0,10	0,11	0,10	-0,01	-0,04	1,00	
CE	0,95	0,72	0,99	0,97	0,99	0,93	0,89	0,14	0,10	1,00

Tab : Matris de Corrélations (2014).

	Ca	Mg	Na	K	HCO_3	Cl	SO_4	NO_3	CO_3	Conductivity	pH
Ca	1,00			0,49	-0,51	-0,51	-0,43	-0,43	0,73	-0,28	0,81
Mg	-0,24	1,00	-0,77	-0,89	-0,13	-0,50	0,98	0,91	0,24	0,99	-0,20
Na	0,04	-0,77	1,00	0,85	0,69	0,75	-0,67	-0,85	-0,03	-0,70	0,39
K	0,49	-0,89	0,85	1,00	0,24	0,43	-0,91	-0,99	0,15	-0,86	0,59
HCO_3	-0,51	-0,13	0,69	0,24	1,00	0,82	0,04	-0,27	-0,16	-0,02	0,03
Cl	-0,51	-0,50	0,75	0,43	0,82	1,00	-0,33	-0,51	-0,57	-0,40	-0,22
SO_4	-0,43	0,98	-0,67	-0,91	0,04	-0,33	1,00	0,91	0,10	0,98	-0,32
NO_3	-0,43	0,91	-0,85	-0,99	-0,27	-0,51	0,91	1,00	-0,04	0,87	-0,50
CO_3	0,73	0,24	-0,03	0,15	-0,16	-0,57	0,10	-0,04	1,00	0,21	0,88
CE	-0,28	0,99	-0,70	-0,86	-0,02	-0,40	0,98	0,87	0,21	1,00	-0,20
pH	0,81	-0,20	0,39	0,59	0,03	-0,22	-0,32	-0,50	0,88	-0,20	1,00

Tab03 : Analyse chimique sommaire % de sol (2014).

SONDAGE	PROFONDEUR EN M	INSOL	GYPSE	CARB	Cl-	NaCl
SS1 SPT	4	88,99	2,11	8	0,04	0,066
SS2 SPT	1,5	93,65	1,69	3	0,59	0,96
SS2 SPT	3	94,22	1,84	3	0,014	0,023
SS3 SPT	1,5	87,82	1,98	9	0,042	0,069
SS3 SPT	3	93,86	2,48	2	0,011	0,019
SS3	7,5	95,32	1,17	3	0,013	0,022
SS4	1,5	87,61	8,87	1	0,039	0,065
SS4	18	92,41	2,15	4	0,748	1,227
SS4	23	10,11	2,17	87	0,323	0,532
SS5	1,8	45,12	44,78	6	0,025	0,041
SS5	4,5	84,95	6,26	7	0,041	0,022
SS6	2,6	42,64	44,95	1	0,07	0,116
SS6	5	7,82	78,13	4	0,012	0,02
SS6	10,75	42,03	34,17	11	0,081	0,133
SS6	14,5	97,43	1,25	0	0,03	0,049
SS6	20,4					
SS7	2,4	35,76	53,55	7	0,353	0,579
SS7	8,6					
SS8 SPT	1,5	65,37	17,07	16	0,081	0,133
SS8 SPT	3	84,98	1,56	12	0,015	0,026
SS9	4,5					
SS9	11	90,77	1,25	7	0,018	0,03
SS10	4,5	87,29	8,99	3	0,014	0,023
SS10	16,3	80,84	15,18	2	0,024	0,039
SS10	8,5	78,74	13,87	7	0,02	0,034
SS10	5,5	92,29	5,17	2	0,031	0,051
SS10	15,5	78,47	17,18	2	0,101	0,166
SSII	4,5	90,17	4,16	5	0,024	0,039
SSII	11	91,58	1,47	6	0,036	0,06
SS13	5,6	93,54	2,67	2	0,024	0,039
SS13 SPT	1,5	17,77	62,78	13	0,04	0,066
SS13 SPT	3	81,87	15,43	1,5	0,023	0,038
SS13	10,6	93,23	1,67	4	0,022	0,037

Tab04 : Analyse chimique de l'eau de la nappe

Paramètre ou substance	Teneurs des échantillons analysés (mg/l)				
	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5
Calcium (Ca ²⁺)	180	252,5	255	222,5	225
Magnésium (Mg ²⁺)	363,22	398,8	169	137,52	363,58
Sodium (Na ⁺)	382	369	395	386	359
Potassium (K ⁺)	30	31,3	41,1	37,1	28,6
Chlorure (Cl ⁻)	588	538	638	613	575
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	1987,5	1850	988	936	1750
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	167,75	146,4	158,6	149,45	140,3
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	00	06	03	00	00
Nitrate (NO ₃ ⁻)	57	57,5	39	46,5	58,5
Dureté totale (°F)	194,3	227,4	133,2	112,2	205,7
Résidu sec à 110°C	2862	4106	431,8	4094	3720
Conductivité (mS/cm)	3,79	4,64	4,92	4,74	4,34
PH	7,77	8,43	8,47	7,92	7,71
Turbidité (FTU) EB	117	12	20	01	24
Turbidité (FTU) ED	07	02	03	00	05

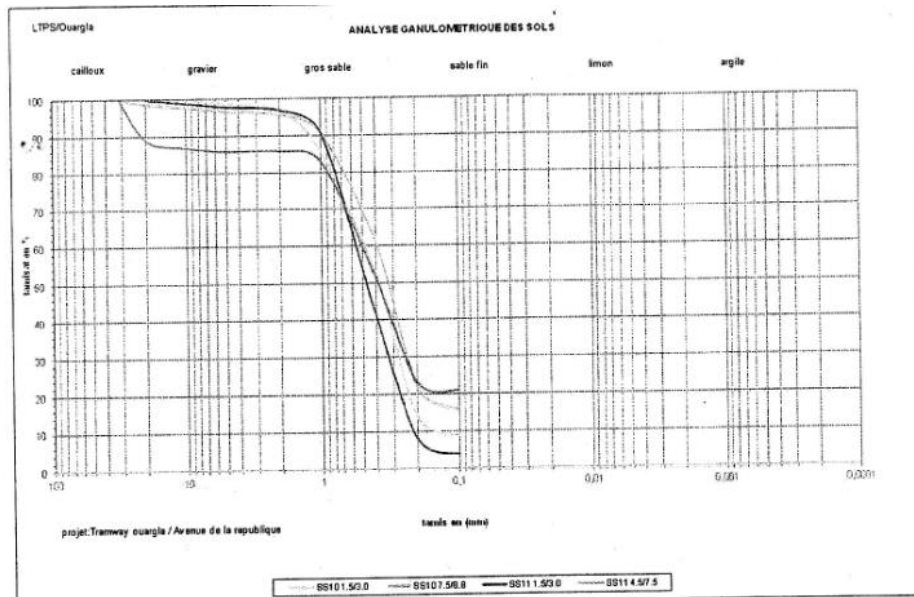


Figure. 5-3: courbes granulométriques de la zone avenue de la république

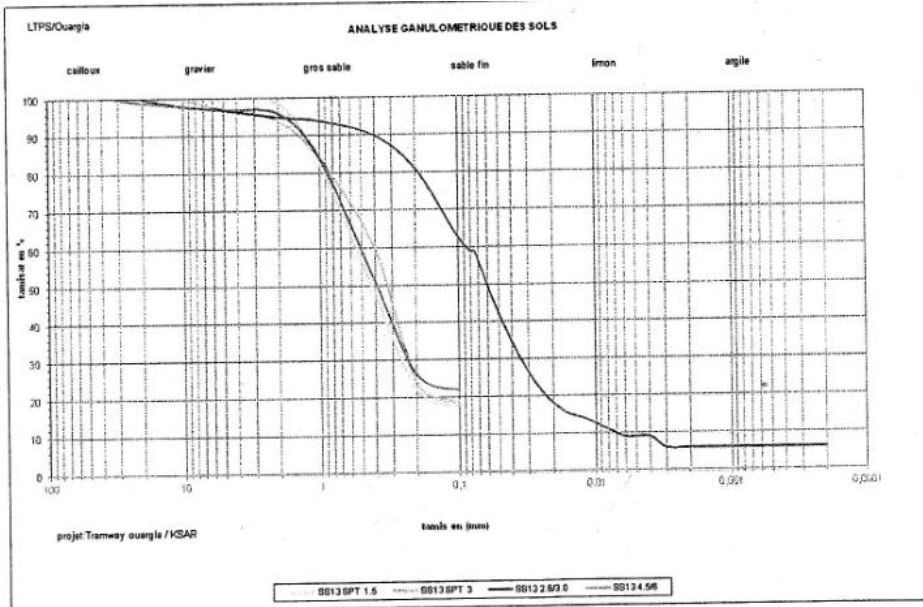


Figure. 5-4: courbes granulométriques de la zone K'sar

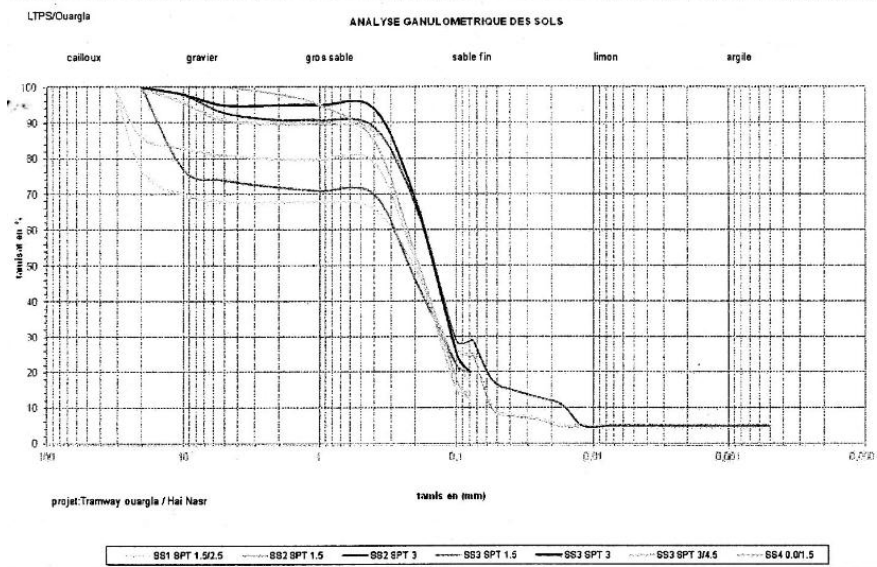


Figure. 5-1: courbes granulométriques de la zone Hai Ennasr

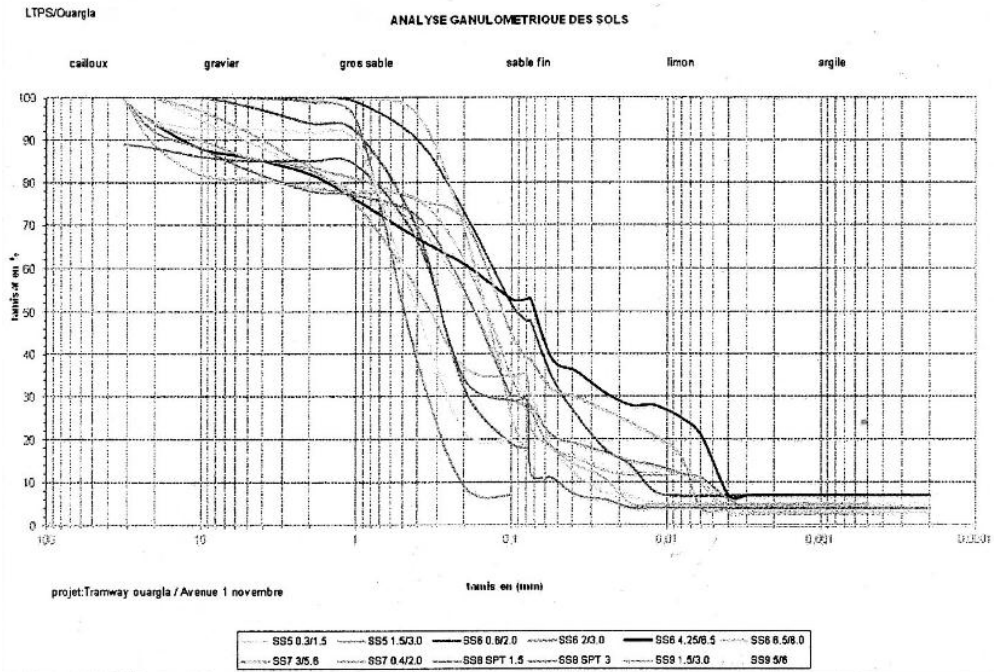


Figure. 5-2: courbes granulométriques de la zone avenue 1^{er} novembre

Résultats et interprétation des rayons X (DRX) (Oubira 2013) :

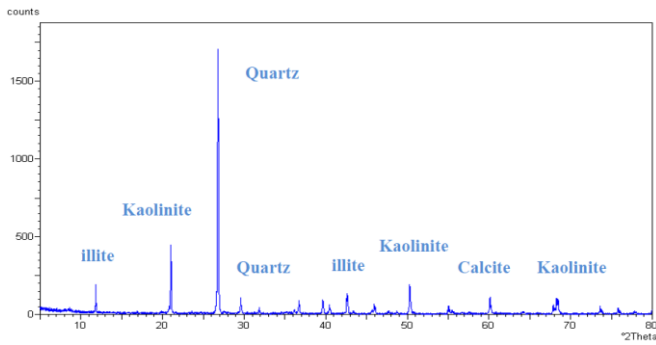


Fig.01- Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P1

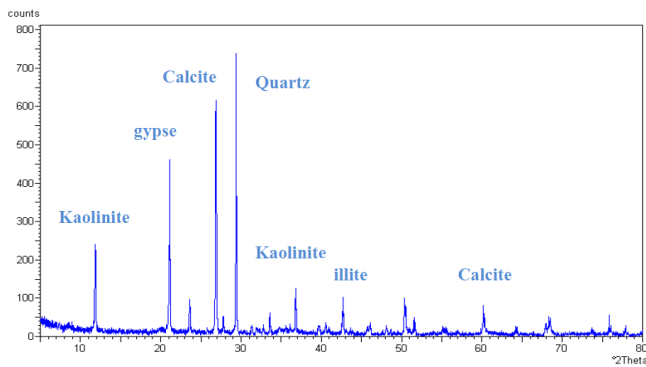


Fig.02- Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P2

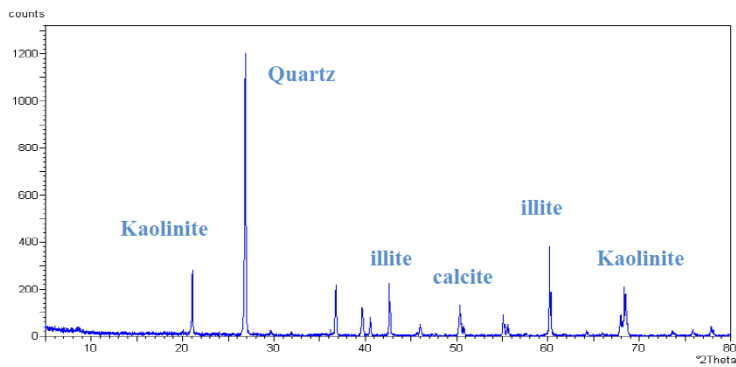


Fig.03 Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P3

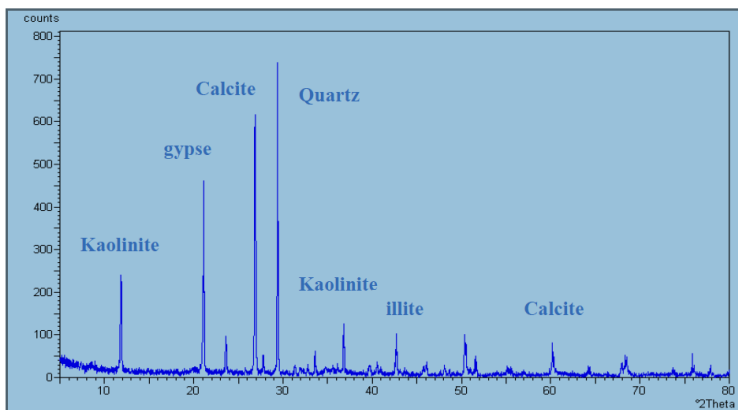


Fig.04- Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P4

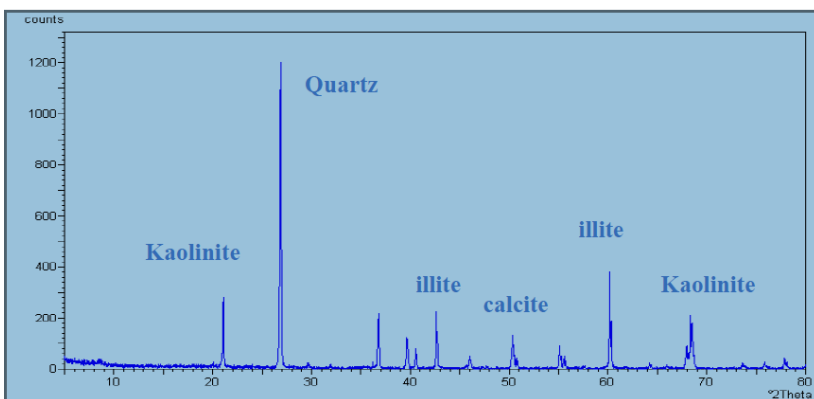


Fig.05- Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P5

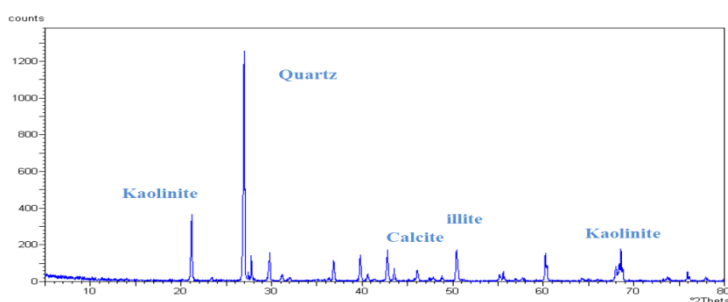


Fig.06- Spectre de diffraction et minéraux du sol de piézomètre P6



Fig07 : carottage de sol (les argile) LTPS



Fig08 : précipitation de sal sur la nappe superficielle