



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ENERGIES RENOUVELABLES
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Thèse de doctorat
Spécialité : Géologie

Thème :

Contribution à l'étude des origines des eaux souterraines
dans la région de Ouargla et Touggourt Est
(Sud Est Algérien)

Présenté par : **TOUAHRI Abdeldjebar**

Soutenu publiquement le 10/12/ 2020

Devant le jury composé de :

Mr. NEZLI Imed Eddine	Pr. Université d' Ouargla	Président
Mr. HACINI Messaoud	Pr. Université d' Ouargla	Promoteur
Mr. LABAR Sofiane	Pr. Université d' el Tarf	Examineur
Mr. BOUDJEMAA A.RAZAK	MCA. Université de Tlemcen	Examineur
Mr. CHELLAT Smaine	MCA. Université de Constantine1	Examineur
Mr. KCHICHED Rabeh	MCA. Université d' Ouargla	Examineur

Année universitaire. 2019/2020



Remerciement

Je remercie en premier lieu, le professeur M. HACINI Messaoud sans qui ce travail n'aurait pas lieu. Il est infiniment remercié de ses efforts, sa disponibilité pourtant ses tâches innombrables, de sa patience, de ses orientations méthodologiques et scientifiques, de ses conseils précieux qui n'ont pas seulement mené ce travail à terme, mais ont aussi enrichi mes savoirs et mes savoir-faire, et ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de l'application des techniques géochimique de mélange entre les eaux en particulier et dans le domaine de la recherche scientifique en général.

Est infiniment remercié aussi le professeur FERNANDO Sola Gomez qui codirigé ce travail à l'étranger je le présente toutes mes gratitudes de m'avoir accepté au sein de laboratoire d'investigation à l'université d'Almeria, Espagne.

Je tiens à remercier le directeur du laboratoire JOSE Maria, pour l'accueil et ses remarques en ors et surtout en coté administratif.

Mes remerciements s'adressent également à Pr.ANTONIO Pullido pour ces remarques et ces orientations très intéressantes. Sans oublier aussi les gens de laboratoire d'investigation, dont je cite ANGEL, fernando G. sont à leur tour remerciés de leur collaboration durant notre stage.

Les collègues et les agents du laboratoire Géologie Du Sahara , le directeur et les responsables de ONM Ouargla sont aussi remerciés pour l'offert des données et documentations importantes.

Nos remerciements sont aussi à tous les membres du jury: Mr NEZLI Imed Eddine comme président de jury et Mr. LABAR Sofiane , Mr. BOUDJEMAA A.RAZAK, Mr. CHELLAT Smaine, et Mr. KCHICHED Rabeh qui examinent profondément cette thèse et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Remerciement.....	2
Sommaire.....	3
Résumé.....	5
Abstract:.....	6
ملخص.....	7
Liste des Figures.....	8
Liste des Tableaux.....	10
Introduction générale.....	1
Chapitre 1	
Contexte global de la région d'étude	
1- Localisation géographique.....	6
2-Géomorphologie.....	6
3- Géologie et aperçu sur la tectonique.....	10
3-1-Paléozoïque.....	11
3-2-Mésozoïque.....	13
3-2-1-Trias.....	13
3-2-2-Jurassique.....	13
3-2-3Crétacé.....	14
3-3-Cénozoïque.....	15
3-3-1-Tertiaire.....	15
3-3-2-Quaternaire.....	15
Chapitre 2	
Climatologie	
1-Température de l'air.....	18
2-Évaporation.....	19
3-Précipitations.....	20
4-Humidité de l'air.....	21
5-Vitesse du vent.....	22
6-Durée d'ensoleillement.....	23
7-L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	24
Chapitre 3	
Hydrogéologie	
1-Aperçu sur l'hydrogéologie générale de la plateforme saharienne.....	27
1-1-Le Continentale intercalaire.....	28
1-1-1-Limites et morphologie du Continental Intercalaire.....	28
1-1-2-Alimentation du CI.....	30
1-1-3-Les exutoires.....	31
1-1-4-Piézométrie.....	31
1-1-5-Le continental intercalaire à l'échelle de la région d'étude.....	32
1-2-Nappe du complexe terminal.....	35
1-2-1-Piézométrie.....	36
1-2-2-Le complexe terminal à la région d'étude.....	37
Chapitre 4	
Matériels et méthodes	
1-Le travail au terrain.....	43
1-1-Campagnes d'échantillonnage.....	43
1-1-a-Campagne 2017.....	43
1-1-b-Campagne 2018-2019.....	43
1-1-c-Eau de pluie.....	44

2-1-Analyses chimiques des eaux.....	46
2-1-1 Laboratoire géologie du Sahara LGS.....	46
2-1-2- Laboratoire de l'université d' Almería	50
2-2- les analyses isotopiques (isotopes stables de l'eau) (^{18}O ^2H)	51
2-2-1-LAMA Montpellier, France.....	51
2-2-2 Laboratoire :université d'Almeria Espagne.....	51
3-les données et les logiciels utilisées	54

Chapitre 5 Géochimie isotopique

1-Généralité	57
2-Historique.....	58
3-Techniques isotopiques	59
4-Isotopes stables de l'eau (^{18}O ^2H).....	59
4-1-Variation isotopique naturelle.....	60
4-2-Abondance isotopique ou notion Delta pour mille (δ ‰).....	60
4-3-Standards internationaux.....	61
4-4-Composition isotopique lors d'échange de base.....	61
4-4-1-Condensation	61
4-4-2-Évaporation.....	63
4-5-Application de la relation δ $^2\text{H}/\delta$ ^{18}O	63

Chapitre 6 Résultats et discussion

1- Étude hydrochimique	66
1-1-Résultat d'analyse chimiques	66
1-1-1-La zone 1: La cuvette d'Ouargla	67
1-1-2-La zone 2: Hdjira	68
1-1-3-La zone 3: Taibet.....	69
1-1-4-La zone 4: Melrhir	70
1-2-Facies chimique des eaux.....	71
1-3-Origine de la minéralisation.....	72
1-4-Rapports caractéristiques	74
1-5-Simulation de mélange et évaporation par PhreeqC	78
1-5-1-Simulation de mélange	79
1-5-2-Simulation d' évaporation.....	80
2- Étude isotopique.....	84
2-1-Cuvette d' Ouargla	84
2-1-1-Campagnes 1992-1994 de CRNA	84
2-1-2- Campagne 2018-2019.....	86
2-2-Hdjira	96
2-3-Taibet	100
4-Melrhir.....	109
Conclusion générale	114
Références bibliographiques	117
ANNEXE 1.....	117
ANNEXE 2.....	124

Résumé

La région d'étude fait partie du grand Erg oriental du Sahara septentrional, elle est caractérisée par un climat aride avec faiblesse et irrégularité des précipitations, température élevée et évaporation forte. La reconnaissance géologique et hydrogéologique faite sur cette région a permis de distinguer trois(3) niveaux aquifères qui sont ; le continental intercalaire, le complexe terminal et la nappe superficielle et cette zone contient aussi de chotts et sebkha.

Quant à l'hydrochimie , les eaux de trois nappes ont généralement des facies chimiques homogènes ; le facies dominant est de type Chloruré sodique calcique et magnésien.

Les résultats isotopiques de ^{18}O et ^2H Pour la Nappe du continentale intercalaire montrent: les valeurs de ^{18}O sont homogènes et prennent le caractère appauvri, elles varient entre -7,88 et -8,02 ‰ Vs SMOW et pour le ^2H , les valeurs sont autour de -60 ‰ Vs SMOW, elles se différent aux valeurs des teneurs des eaux de pluie récentes qui sont enrichies, ces eaux sont anciennes dite fossile , accumulées pendant des périodes pluvieuses humides anciennes.

Pour la nappe du complexe terminal ; les valeurs des teneurs d' ^{18}O sont autour de -5 à -6‰ Vs SMOW, elles sont aussi appauvries, et on a constaté qu'uniquement à la zone de Ouargla que les eaux ont des teneurs autour de -8 ‰ VS SMOW qui sont très similaires aux eaux de la nappe de CI.

Pour la nappe phréatique; les valeurs des teneurs d' ^{18}O oscillent entre -8,84 et +3,42‰ Vs SMOW, elles montrent en général un caractère assez enrichi, témoignent de leur caractère évaporé et confirment ainsi le processus d'acquisition de la minéralisation.

Ces résultats montrent des zones de mélanges des eaux en surface par la présence de différentes masses d'eaux, l'infiltration des eaux d'irrigations des forages qui captent les nappes profondes en générale et par endroit par drainance verticale –cas de la cuvette –.

L'expérimentation d'évaporation au laboratoire des eaux de pluie et celles de Continental intercalaire confirment la même tendance de droite d'évaporation réelle.

Mots clés: la région d'étude , isotopes stable , continental intercalaire , complexe terminal. La cuvette d' Ouargla

Abstract:

The study region is part of the great eastern Erg of northern Sahara, it is characterized by an arid climate with irregular and very low precipitation, high temperature and high evaporation. The geological and hydrogeological recognition made on this region allows to distinguish three (3) aquifer levels which are; the continental intercalaire, the complex terminal and the surface water and this area contains also chotts and sebkha.

As for hydrochemistry, the waters of three aquifers generally have homogeneous chemical facies; the dominant facies is of the sodium chloride calcium and magnesium type.

The isotopic result of ^{18}O and ^2H For the Continental shows:

the values of ^{18}O are homogeneous and assume the impoverished character, they vary between -7.88 and -8.02‰ Vs SMOW and for the ^2H ; the values are also homogeneous, are around of -60‰ Vs SMOW, they differ from the values of recent rainwater which is enriched, these waters are ancient -called fossil-, accumulated during old wet rainy periods.

For the complex terminal; the values ^{18}O vary from -5 to -6‰Vs SMOW and take the impoverished character, We found that only in Ouargla zone the which the values are around -8‰ VS SMOW, it's very similar to the C I aquifer waters.

For the water table: the values of ^{18}O oscillate between -8.84 and + 3.42‰ Vs SMOW, it generally show a fairly enriched character, testifies to their evaporated character and thus confirm the process of acquisition of the mineralization.

These results show areas of surface water mixtures by the presence of different masses: the infiltration of irrigation water from water wells targeting deep aquifers in general and by leakage by – Ouargla basin case -.

The evaporation experiment in the laboratory for the rainwater and Continental intercalaire water confirm the same trend of real evaporation line.

Keyword: *study region, stable isotopes, continental intercalaire, complexe terminal, Ouargla basin*

ملخص

منطقة الدراسة هي جزء من العرق الشرقي الكبير في شمال الصحراء ، وتتميز بمناخ جاف مع تهاطل غير منتظم ومتدني للغاية ، ودرجة حرارة عالية وتبخر مرتفع. يسمح الاستطلاع الجيولوجي والهيدروجيولوجي في هذه المنطقة بالتمييز بين ثلاثة (3) مستويات من طبقات المياه الجوفية ؛ المتداخل القاري، المركب النهائي والمياه السطحية ، وهذه المنطقة تحوي أيضا شطوط وسبخ. وعن كيميائية المياه ، فإن مياه الثلاث طبقات لها سحنة كيميائية متجانسة في العموم، فالوجه السائد هو من نوع كلوريد الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم.

النتائج النظرية للأوكسجين 18 و الدتريوم للمتداخل القاري تؤكد أن قيم الأوكسجين 18 متجانسة ذات طابع مفقتر ، وتتراوح بين 8.8- و 8.02% بالنسبة SMOW وأن الدتريوم له قيم متجانسة أيضًا ، وهي حوالي 60% بالنسبة SMOW ، وهي تختلف عن قيم مياه الأمطار الحديثة المخصبة ، وهذه المياه هي أحفورية قديمة ، تراكمت خلال حقبات المياه الرطبة القديمة.

وعن المركب النهائي فالقيم تتراوح بين 5- إلى 6- % بالنسبة SMOW وتأخذ الطابع المفقتر ، وقد لوحظ أنه فقط في منطقة منخفض ورقلة تكون القيم مساوية 8- % بالنسبة SMOW ، فهي مشابهة جدًا لمياه المتداخل القاري .

بالنسبة لمياه السطوح فقيم الأوكسجين 18 تتأرجح بين 8.84- و 3.42+ % بالنسبة SMOW ، وهي تُظهر بشكل عام خاصية مخصبة إلى حد ما ، وتشهد على طابعها التبخيري و تؤكد حصول التمدن.

تظهر النتائج مناطق مزيج المياه في السماط السطحي من خلال وجود كتل مختلفة : لتسلل مياه آبار الري بشكل عام ومن خلال التصاعد العمودي - حوض ورقلة - .

تؤكد تجربة التبخير في المختبر لمياه الأمطار والمياه المتداخل القاري نفس اتجاه منحى خط التبخر الحقيقي.

كلمات مفتاحية: المنطقة المدروسة المتداخل القاري المركب النهائي، السماط السطحي حوض ورقلة

Liste des Figures

Fig.1. Localisation de la région d'étude.....	6
Fig.2. Relief de la cuvette d'Ouargla	7
Fig.3. Sebkhass et chotts (cuvette d'Ouargla).	8
Fig.4. localisation de la zone du Souf.	9
Fig.5. carte géologique du SASS	10
Fig.6. Carte simplifiée les climats mondiaux et la position de la région étudiée	17
Fig.7. Température moyenne mensuelle (1997-2018).....	19
Fig.8. L' évaporation moyenne mensuelle(1997-2018).....	20
Fig.9. Histogramme de précipitations moyennes mensuelles (1997-2018).....	20
Fig.10. Histogramme des précipitations annuelles (cumule) (1997-2018).	21
Fig.11. Graphique de l'Humidité moyenne mensuelle1997-2018.	22
Fig.12. Graphique de vitesse du vent mensuel moyen (1997-2018)	23
Fig.13. L'ETP mensuelle annuelle calculée (1997-2018) par la formule de Thornthwaite.	25
Fig.14. Situation générale des aquifères du Sahara septentrional	27
Fig.15. Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional.....	29
Fig.16. Carte piézométrique du Continental Intercalaire	31
Fig.17. Colonne litho-stratigraphiques du CI dans zone d' Ouargla.....	33
Fig.18. Coupe stratigraphique synthétique du chott Melrhir	34
Fig.19. Carte des épaisseurs du CT	36
Fig.20. Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal	37
Fig.21. Colonne litho stratigraphiques du CT dans la région d'étude –zone de Ouargla	38
Fig.22. Colonne litho stratigraphique de CT à Oued Souf	39
Fig.23. Représentation schématique montrant les zones de la région d'étude.....	42
Fig.24. Localisation des points d'eau(campagne 2017).....	43
Fig.25. Localisation des points d'eau de campagne 2018-2019	44
Fig.26. Matériel simple utilisé pour la collecte d'eau de pluie.	45
Fig.27. Multi-paramètre type WTW.....	45
Fig.28. Dosage des ions sulfate par gravimétrie.....	47
Fig.29. Photomètre de flamme Jenway.	48
Fig.30. Courbes d'étalonnage pour photomètre de flamme Jenway.....	49
Fig.31. Potentiomètre Titrimètre 716 Metrohm.	50
Fig.32. Spectrométrie de fluorescence des rayons X Almería Espagne.....	50
Fig.33. Spectromètre de Masse pour Rapports Isotopiques Isoprime.	51
Fig.34. Spectromètre de masse L2140-i Picarro Almería Espagne.....	52
Fig.35. Expérience d'évaporation des eaux au laboratoire.	53

Fig.37. Henri Becquerel.....	58
Fig.38. Processus de fractionnement isotopique au cours de l'évaporation et condensation.....	60
Fig.39. Relation $\delta^2\text{H}$ avec $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations mondiales	62
Fig.40. Domaine de répartition des eaux naturelles sur diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$	64
Fig.41. Facies chimiques des eaux.	71
Fig.42. Rapport de Na et Cl dans les zones d'étude.....	75
Fig.43. Rapport de Ca en fonction de SO_4 des eaux de la région d'étude.....	76
Fig.44. Couple Ca^{++} en fonction HCO_3 des eaux.	77
Fig.45. TDS en fonction de Cl des eaux de la région d'étude.....	78
Fig.46. Répartition des teneurs en ^{18}O des eaux de la cuvette d'Ouargla.....	85
Fig.47. Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des eaux dans cuvette d'Ouargla.....	87
Fig.48. Fractionnement isotopique des eaux de CI avant leur infiltration à la nappe de surface. .	88
Fig.49. Teneurs de ^{18}O des eaux de forage de CT.	89
Fig.50. Représentation schématique de toit et mur de CT par corrélation (zone d'Ouargla).	90
Fig.51. Cartographie des âges d'eaux de CT	91
Fig.52. les teneurs de ^{18}O des eaux de CT et CI à la zone de Taibet (2018).	92
Fig.53. Les teneurs en ^{18}O des eaux de CT et CI à Melrhir (2018).	92
Fig.54. Schéma simplifié le mélange des eaux entre le CT et CI à la zone d'étude.	93
Fig.55. Carte géologique de Oued M'ya présentant les failles et leurs extensions possibles	95
Fig.56. Localité de Hassi lekfif.	97
Fig.57. Le forage de CI Gueddachi à Hassi maamer , (Hdjira).	98
Fig.58. Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des eaux (Hdjira).....	99
Fig.59. Localisation des points d'eau échantillonnés.....	100
Fig.60. Relation 2H - ^{18}O des eaux à Taibet.	102
Fig.61. Complexe terminal dans la zone de Taibet(2020).	103
Fig. 62. Relation 2H Vs ^{18}O ; les eaux de pluie à Taibet 2019	104
Fig.63. L'interface NOAA utilisé pour la reconstitution d'origine et trajectoire des masses atmosphériques.	106
Fig.64. Résultat de programme NOAA des eaux de pluies à Taibet.....	107
Fig.65. Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations modifiée	108
Fig.66. Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux de Melrhir.	109
Fig.67. CT à Sief Lemnadi	110
Fig.68. Expérimentation d'évaporation des eaux au laboratoire.....	111
Fig.69. Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des eaux utilisées pour l'évaporation Ech 57 et Ech 56.....	112
Fig.70. Comparaison entre les eaux des zones d'étude.....	113

Liste des Tableaux

Tab.1. L'évaporation interannuelle ONM Ouargla (2007-2018).....	19
Tab.2. La durée de l'ensoleillement interannuelle ONM 1997-2018.	23
Tab.3. L' ETP moyennes mensuelles et annuelles (1997-2018).....	25
Tab.4. Les échantillons collectés lors des précipitations à Taibet.....	44
Tab.5. Représente les suivis d'essais d'évaporation au laboratoire.....	54
Tab. 6. les résultats d'analyses chimiques des eaux de différentes nappes de la région d'étude de la campagne 2018-2019	67
Tab.7. Simulation de mélange par PhreeqC.	79
Tab.8. Simulation d' évaporation par PhreeqC.	80
Tab. 9. Résultats d'analyses isotopique 2018-2019	86
Tab.10. Caractéristiques hydrodynamiques de CT (cuvette d'Ouargla).....	90
Tab. 11. Résultats d'analyses isotopique des eaux 2018-2019 Hdjira.	97
Tab. 12. Résultats des analyses isotopiques des eaux 2018-2019 Taibet.....	101
Tab. 13. Résultats des analyses isotopiques des eaux 2018-2019 Melrir.....	109

Introduction générale

Les ressources en eaux souterraines du Sahara septentrional sont représentées par deux grands systèmes aquifères superposés : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). La région d'étude, située au sud-est de l'Algérie, fait partie de ces systèmes. Elle se caractérise par ces deux nappes captives à semi-captive profondes, CI à la base, CT au milieu et la nappe superficielle (phréatique) au sommet. L'exploitation irrationnelle de ces ressources par plusieurs forages et points d'eaux a créé certains nombres de risques (dégradation de qualité des eaux, pollution, disparition et/ou affaiblissement de l'artésianisme et le déséquilibre des écosystèmes). Le secteur étudié fait partie de cette zone saharienne qui est caractérisée par un climat désertique, aride, sec, et chaud, et des amplitudes thermiques importantes, une pluviométrie très faible et aléatoire, et une forte évaporation.

Le chimisme de ces eaux, le mécanisme de recharge et l'âge de ces eaux ont fait l'objet de plusieurs travaux dont nous citons le projet ERESS qui a été initié pour traiter les ressources en eaux du Sahara (Unesco, 1972), le travail précieux de GUENDOZ en 1985, qui a initié les bases de données chimiques et isotopiques en couvrant du Sahara Est- Septentrionale [(GUENDOZ, 1985)] ; l'organisation intergouvernementale OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) à vocation africaine créé en 1992 se spécialise dans la surveillance environnementale et la gestion des ressources naturelles et à appuyer ses pays membres à travers ses projets sur les eaux, notamment SASS. Les recherches de OULD BABA SY sur l'alimentation des ces nappes et la reconstitution de la recharge [(ENAGEO, 1993)] ; notant bien, des études géologiques et hydrogéologiques ont été effectuées par les pétroliers [(OSS, 2003)] [(Guendouz et all, 1996)][(OULD BABA SY, 2005)], et s'ajoutent à ceci les recherches qui se focalisent sur pollution et la vulnérabilité des nappes d'eau[(DJIDEL, 2008)] [(NEZLI, 2009)].

Le présent travail consiste à étudier et prospector ce secteur en complétant les travaux antérieurs, afin de connaître l'origine de ces ressources en eau (la nappe de CI, le CT et les nappes superficielles et de montrer le mécanisme du contact eau-roche et entre les différentes masses d'eau, tout en employant les démarches scientifiques hydrochimiques et isotopiques pour les eaux souterraines et les eaux de pluie.

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail consiste à déterminer des paramètres hydrochimiques et isotopiques des différents aquifères de la région d'étude pour faire ressortir les caractéristiques chimiques et isotopiques de chaque masse d'eau. Ces derniers nous guideront pour connaître l'origine de ces eaux et de déduire les zones de mélange

En fait, on peut subdiviser les différentes masses d'eau comme suit:

Les eaux de la nappe de CI, celles de CT, la nappe phréatique, eaux de surface, chott, sebkha, et les eaux de pluie.

Donc sur terrain on a prélevé les échantillons en faisant quelques mesures in situ comme le pH, conductivité, dosage du carbonate...etc. Puis les échantillons d'eaux prélevées sont acheminés vers les laboratoires dans lesquels on a fait les analyses isotopiques et chimiques.

En fait, plusieurs campagnes ont été faites sur le terrain. En 2017 on a prélevé 9 échantillons dont l'analyse chimique a été faite au Laboratoire de Géologie du Sahara LGS (Algérie) et l'analyse isotopique a été faite au laboratoire de Montpellier (France). En 2018-2019 une deuxième campagne a permis de prélever 25 échantillons qui sont acheminés vers les laboratoires d'analyses chimiques et isotopiques à l'Université d'Almeria (Espagne). Finalement une autre collecte pour les eaux de pluie a été faite, malgré la difficulté pratique pour ce dernier.

Cette étude a pour objectif d'appliquer les techniques géochimiques, isotopiques, par l'utilisation des isotopes du milieu, et hydrochimiques par l'utilisation des éléments majeurs (cations, anions en plus des paramètres physicochimiques température, pH, conductivité électrique, etc.) des eaux des nappes (phréatique, CT et CI) dans la région d'étude, et une reconstitution des trajectoires des masses d'eau de pluie avec l'aide du programme NOAA.

La structuration de ce mémoire repose sur :

- passer en revue les travaux antérieurs ayant porté sur le même axe. Donc, apporter une analyse critique et une interprétation des diverses données existantes
- Une synthèse des travaux qui concerne la localisation de la zone d'étude ainsi un aperçu sur la géomorphologie, géologie, climatologie dont en traitant les paramètres climatiques et hydrogéologiques
- Une méthodologie de travail est proposée dans la réalisation du travail.
- Interprétation et discussion de l'ensemble de la base de données existante.
- Une synthèse est proposée en dernière partie. Elle intègre les résultats de l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères avec les différentes interprétations tirées des traitements hydrochimiques et isotopiques.

En fait, La structuration de cette thèse est scindée en six chapitres :

Dans le premier chapitre (1), nous abordons tout d'abord le contexte général de la région d'étude, notamment l'emplacement géographique, la description de principales formations et quelques aspects généraux du Sahara. Dans le deuxième chapitre (2) on traitera les conditions climatiques de la région d'étude tout en utilisant les séries de mesures fournies par les institutions météorologiques couvrant une période allant de 1997 à 2018 ; les paramètres

climatiques sont température, pluviométrie, évaporation, durée de l'ensoleillement parmi d'autres.

Le troisième chapitre (3) est consacré à l'aspect hydrogéologique qui caractérise notre région étudiée; par ailleurs, cette région est très connue par la présence d'énorme richesse en eau souterraine représentée par trois nappes qui sont citées ci-dessus.

Le quatrième chapitre (4) aborde les matériels et méthodes adoptés en montrant les travaux faits sur le terrain (campagnes d'échantillonnage et mesure in-situ, principalement) et ceux aux laboratoires, tels que les techniques d'analyse chimiques et isotopiques, les données utilisées et les logiciels informatiques aidant le traitement des résultats.

Dans le cinquième chapitre (5) nous traitons théoriquement la géochimie isotopique, en passant par la caractérisation des isotopes stables de l'eau et ses intérêts dans le domaine de l'hydrologie, hydrogéologie et science de l'eau en général.

Enfin, dans le dernier chapitre (6), nous procéderons à :

-présentation de différents résultats chimiques et isotopiques des eaux par zones (la cuvette d'Ouargla, Hdjira, Taibet, et Melrhir) et par nappes (le CI, le CT et les nappes phréatiques).

Ainsi nous passons à l'interprétation des résultats en utilisant les programmes informatiques dont nous citons "Diagramme" pour déduire les faciès chimiques des eaux, et PhreeqC pour faire le mélange entre les différentes masses d'eaux. Une discussion en détails sur les origines de chaque masse d'eau déduite par les techniques isotopiques ^{18}O et ^2H tout en dessinant les graphiques conçus pour comparer par les eaux mondiales, dans ce dernier chapitre; nous expliquerons les zones de mélanges d'eaux dans la région étudiée partout et dans la cuvette en particulier, s'ajoutant les résultats d'évaporation d'eaux au laboratoire.

En fin dans ce travail nous récapitulons le travail dans les conclusions générales résumant les résultats les plus importants.

Chapitre 1

Contexte global de la région d'étude

1- Localisation géographique

La région d'étude fait partie du Sahara Nord d'Algérie, géographiquement, sa position latitudinale est approximativement de N 31° 50' à N 34° 09' et longitudinale sont de E 5° 06' à E 6° 33'. Elle est située dans la partie nord du système aquifère du Sahara septentrional SASS, ce dernier est un grand bassin ayant plus de 1000000 km² partagés par trois pays (Algérie, Libye, Tunisie), dont les réserves en eau sont considérables et peu renouvelable, mais à caractère quasi fossile [(OSS, 2003)] (Figure 1). Cette région occupe une partie du bas fond de la dépression de M'ya, et s'étend au nord jusqu'à chott Melrir, elle est limitée au nord par la wilaya de Biskra, au Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa, la coté Est par la frontière Algéro-tunisienne et une partie de Souf ,et au sud par la partie sud de wilaya d'Ouargla.

La région d'étude est une zone aride caractérisée par un climat désertique, chaud et sec dont les précipitations sont rares et aléatoires.

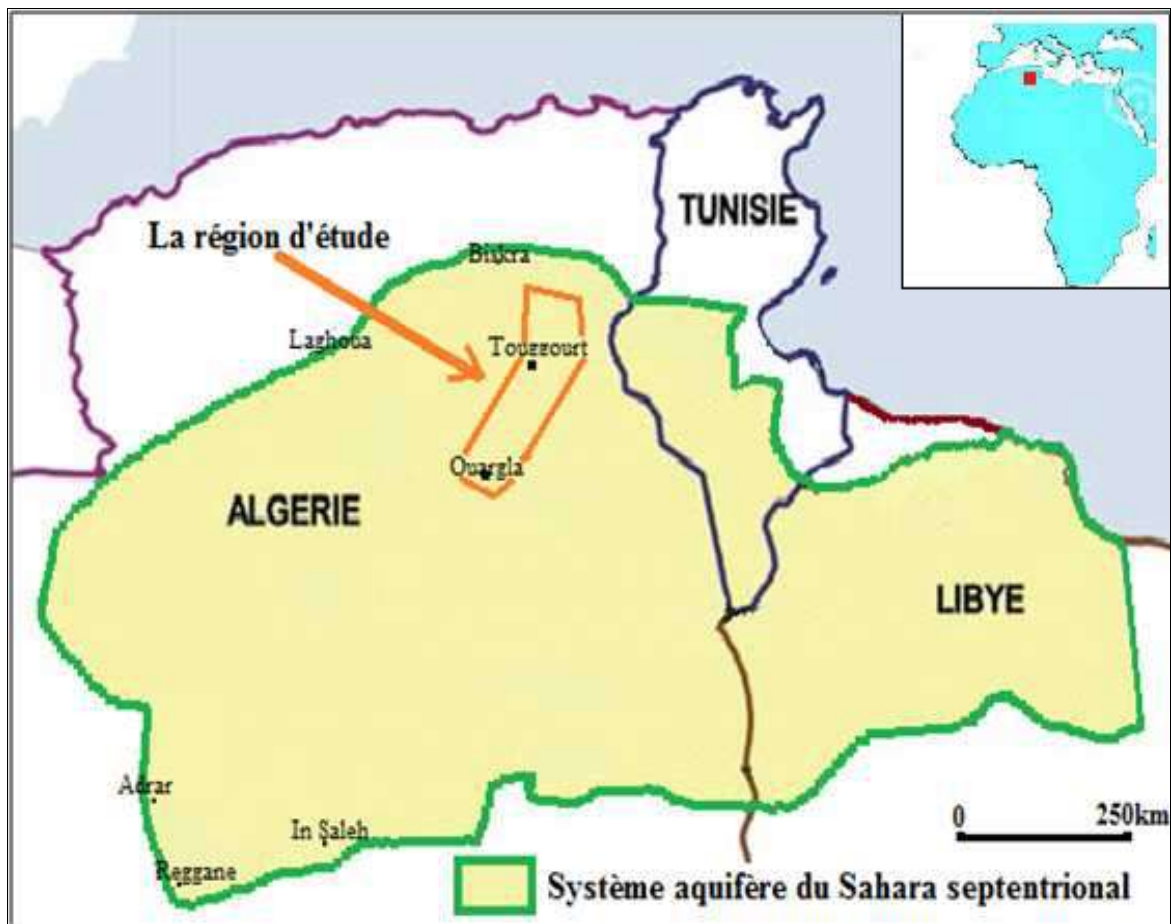


Fig.1. Localisation de la région d'étude In[(CHABOUR, 2006)].

2-Géomorphologie

On peut subdiviser notre région d'étude en deux parties:

La partie sud qui correspondent la cuvette d' Ouargla et ses environnements dont la géomorphologie est constituée par les éléments suivants :

-Les hamadas de Mio-Pliocène et Plio-Quaternaire : formation continentale détritique qui forme des plateaux dont l'altitude est de 200 m en moyenne (Figure 2) [(BG, 2004)].

Les terrains du Mio-Pliocène sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires sous forme d'Ergs et Dunes.

-Les étendues alluviales correspondant au bas de la dépression de oued Mya selon un axe SW-NE.

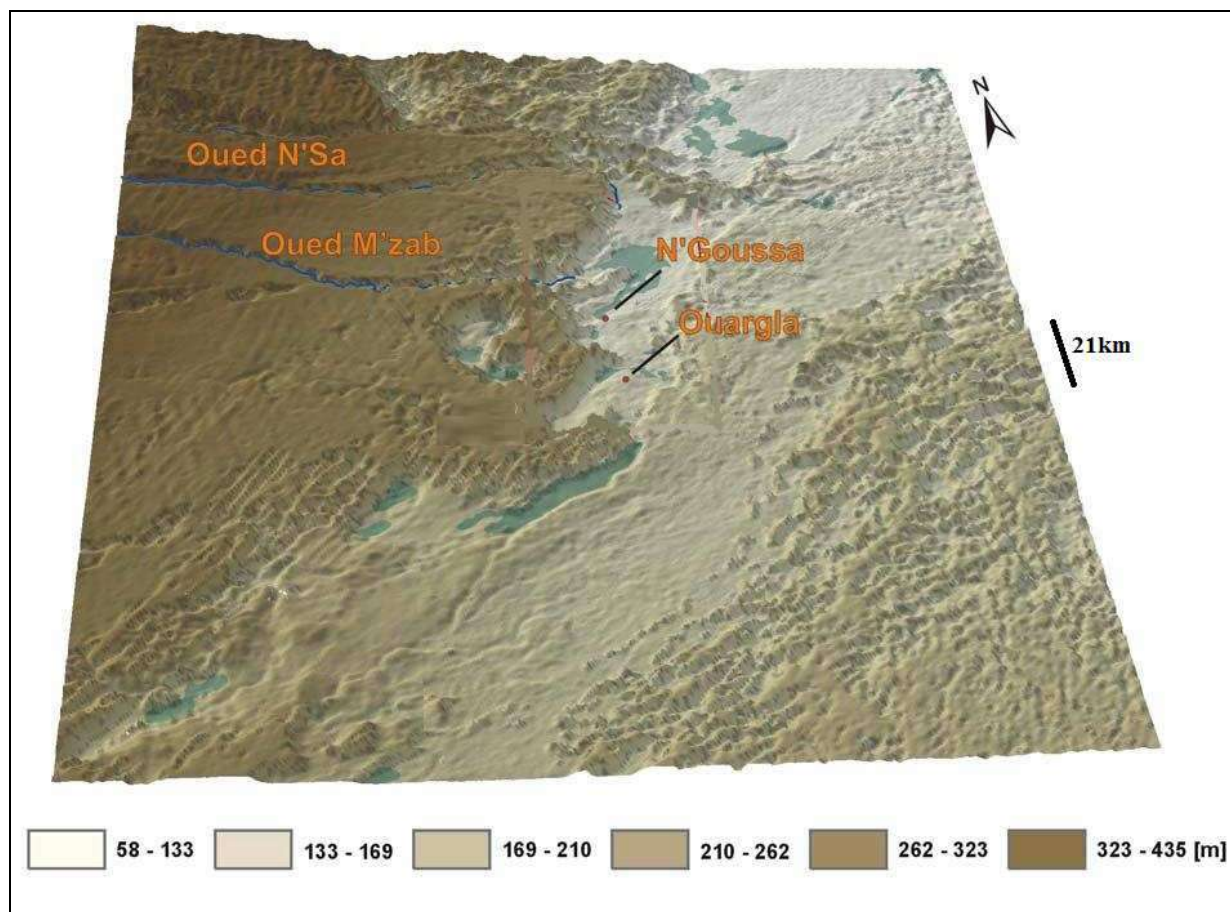


Fig.2. Relief de la cuvette d'Ouargla[(BG, 2004)].

- Sebkhass et chott ; dont nous citons (figure 3):

Chott de Ain Beida: il est situé à 8 Km Est de la ville d'Ouargla, une dépression saline dont la partie inondée est constituée par la Sebkhha, allongée en direction Nord-Ouest, Sud- Est sur une longueur de 5,3 km, sa largeur varie de 1 à 1,5 km. Il est parcouru par un réseau de drains qui canalisent les eaux excédentaires de la nappe phréatique de la palmeraie de Ouargla.

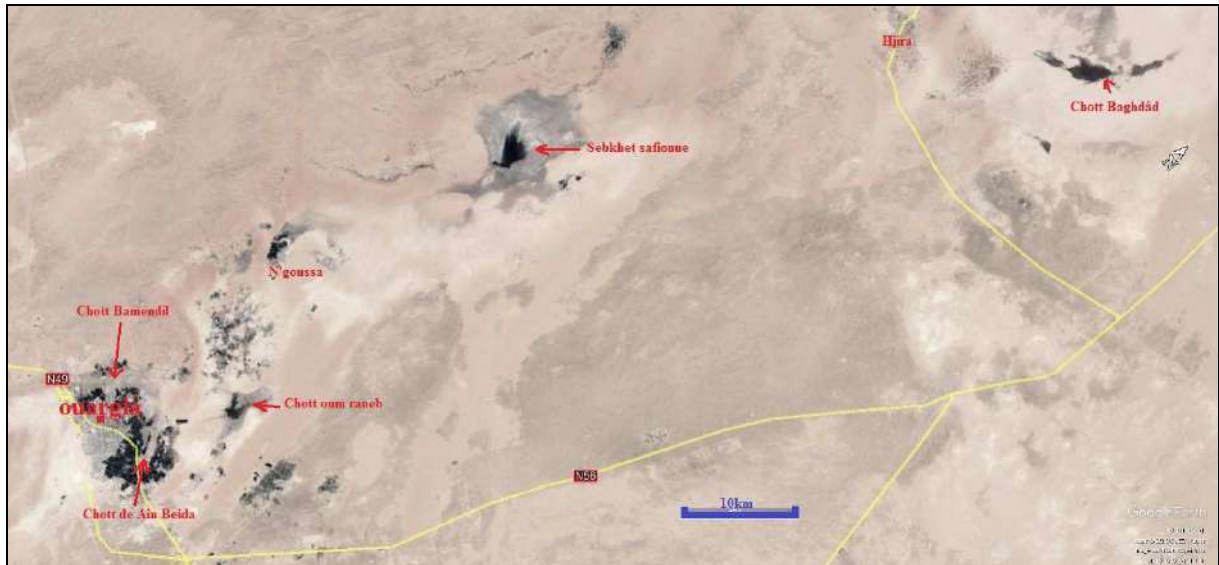


Fig.3. Sebkhass et chotts (cuvette d'Ouargla).[(Google earth, 2018)]

Chott Oum Raneb; actuellement utilisé comme un exutoire pour les eaux de drainage agricole des palmeraies des alentours.

Sebkhet Safionue : se situe au nord de la cuvette , les eaux usées et les eaux de drainage sont évacuées dedans.

Chott Baghdâd est disposé de direction NE-SO, il est situé au plein de désert et n'est pas envahis par l'eau qu'au cours de la saison pluvieuse et lors des inondations. En été, par contre, il s'assèche et il est le siège d'une déflation éolienne parfois notable.

Le réseau hydrographie de Ouargla est composé par : (Figure 2)

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.

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 Batma E'Rouilla à une altitude de 750 m jusqu'à Sebkhâ Safiounne d'une altitude de 104 m.

Quant à la partie nord qui correspond la région de Souf et Melhir (figure 4) ; cette zone est caractérisée par un ensemble dunaire repose sur une formation quaternaire de plusieurs dizaines de mètres de sable éolien fin. Une nappe phréatique est contenue dans cette formation dont le niveau piézométrique ne cesse d'augmenter depuis la dernière décennie.

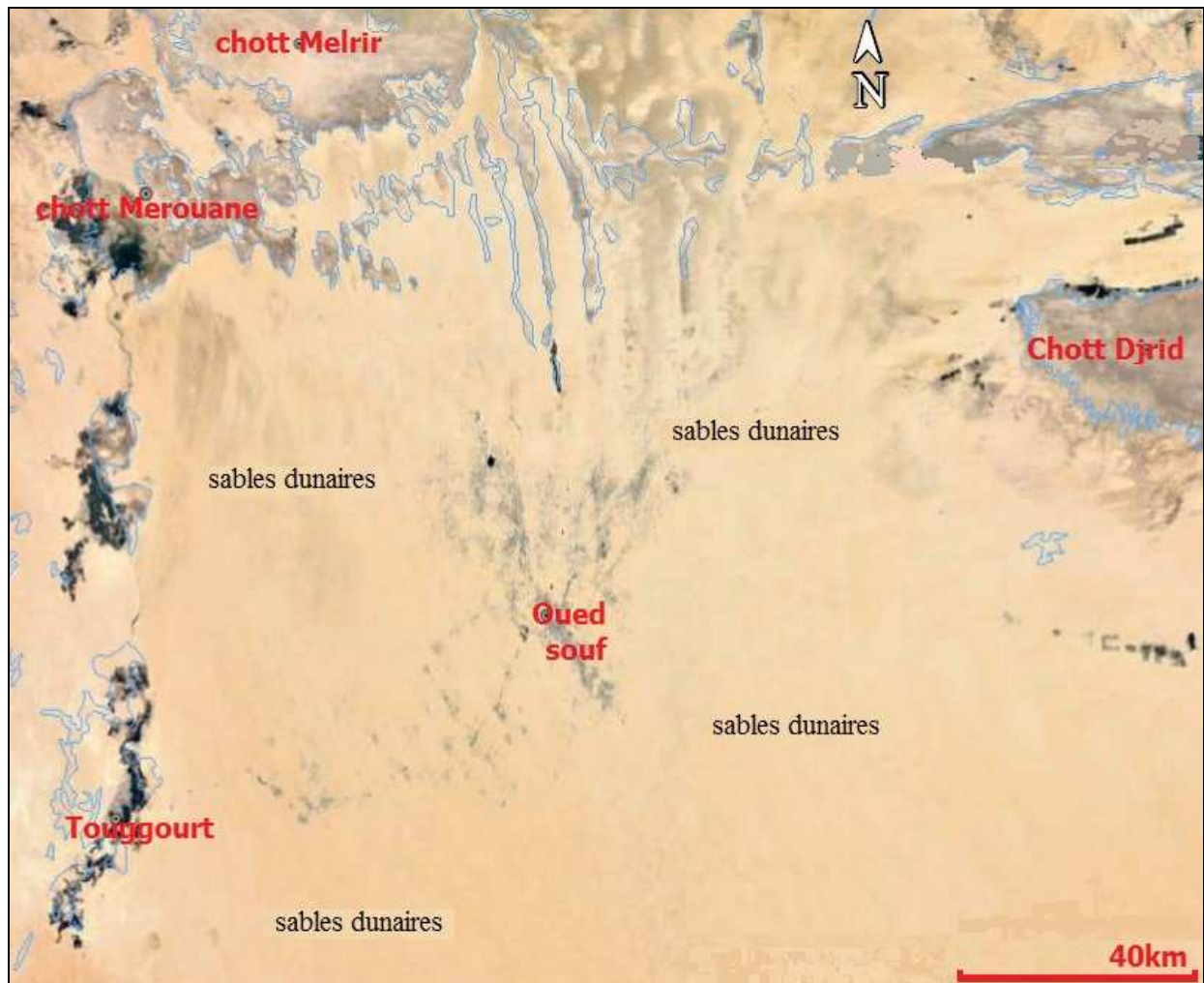


Fig.4. localisation de la zone du Souf. [(Google earth, 2018)]

Les résultats de l' étude géophysique à Oued Souf permettent de caractériser quatre horizons :

- 1 Terrain superficiel, d' une épaisseur variable, allant de 30 à 50 m, correspondant aux sables dunaires ;
- 2 Terrain ayant une épaisseur variable, allant de 50 à 80 m, correspondant aux sables argileux et aux argiles sableuses ;
- 3 La troisième couche n' existe pas dans toute la région, son épaisseur est plus importante et varie entre 5 à 90 m, elle correspond aux argiles sableuses ;
- 4 La quatrième couche correspond au substratum argileux.

Le sillon de Melrhir, qui porte le grand bassin hydrologique de Melrhir dans lequel se trouvent les plus grands chotts de l'Algérie;

Chott Melrir: c'est le chott le plus grand en Algérie avec une surface d'environ 6 700 km² (wikipedia, 2020) et il se trouve à 35 m sous le niveau de la mer. À cause d'une forte évaporation, il devient régulièrement un désert de sel.

Chott Mérouane, est situé au nord-est du Sahara septentrional, à environ 9 km du chef-lieu de la daïra d'El M'Ghaïr, dans la vallée de N'sigha, ce chott, moins important et moins connu que le chott Melrhir, il couvre une superficie de l'ordre de 333,7 ha(wikipedia, 2020).

3- Géologie et aperçu sur la tectonique

Le secteur étudié fait partie du Bas-Sahara, (figure 5), elle occupe la marge septentrionale des zones sahariennes cette partie est connu sous le nom province triasique qui est s'inscrit dans le cadre de la subdivision lithostratigraphique de la plateforme saharienne par les pétroliers en trois provinces ; occidentale, orientale et triasique , elle se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du Mzab, au Sud par les hamadas du Tadmaït et de Tinghert, à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien et au Nord par les monts des Ouled Nail, de l'Aurès et des Nememcha In [(ZATOUT, 2017)].

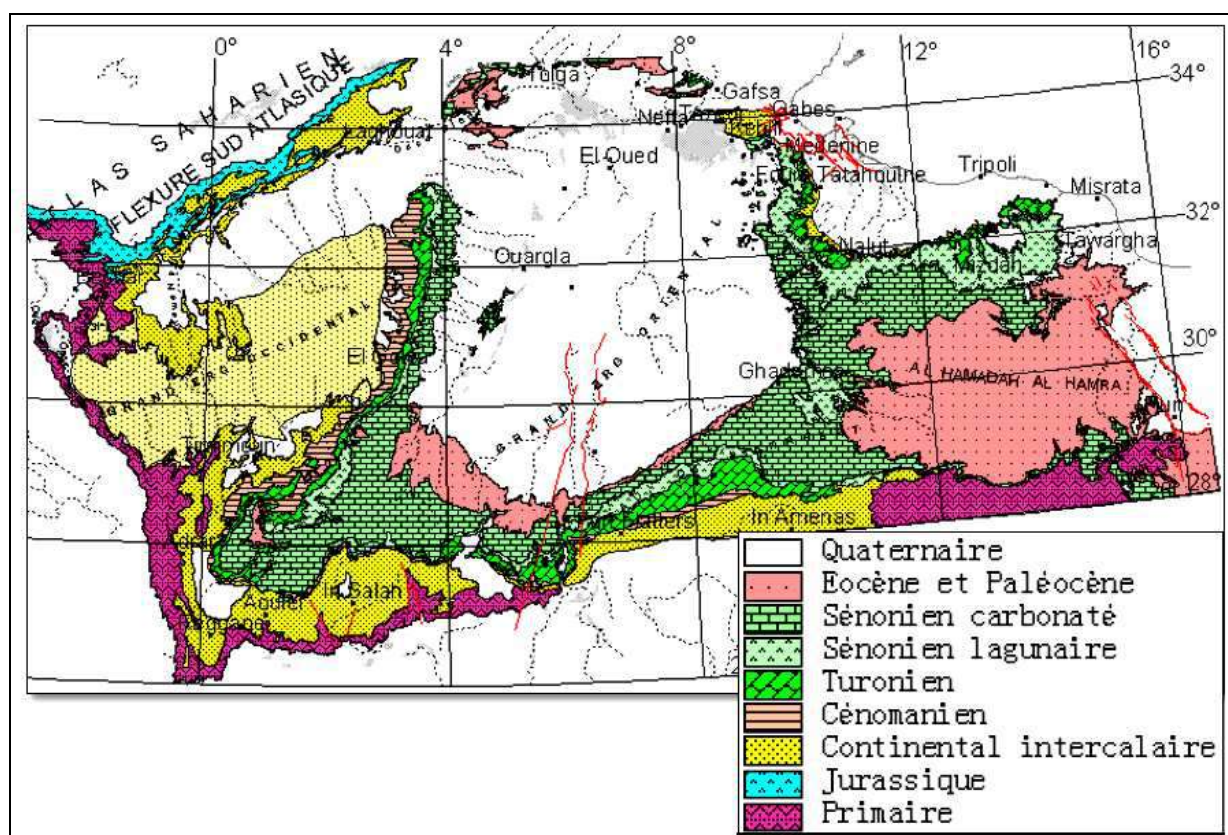


Fig.5. carte géologique du SASS [(OSS, 2003)].

La série stratigraphique est représentée par dépôts paléozoïque souvent érodé, le mésozoïque qui repose en discordance sur le paléozoïque, ce dernier renferme une série sédimentaire complète (trias , jurassique et crétacé) et le cénozoïque englobant le tertiaire et le quaternaire La série lithostratigraphique est représentée par :

Socle[(BOUDJEMAA, 1987)]

Il est établi que le socle compte six unités lithostratigraphique qui sont:

- Unités d'âge archéen (>2700 MA) Unités d'âge protérozoïque inférieur (2000 à 2700 MA)
- Unités d'âge protérozoïque moyen (1000 à 2000 MA)
- Unités d'âge protérozoïque supérieur (800 à 1000 MA)
- Unités d'âge protérozoïque supérieur (650 à 800 MA)
- Unités d'âge Eo-Cambrien à Cambrien (800 à 1000 MA)

3-1-Paléozoïque

3-1-1-Cambrien

Il est représenté par trois termes:

Terme R3: grès grossiers à conglomératiques à la base, mal classés, feldspathiques et argileux.

Terme R2: grès généralement moyen à grossier, mal classés, très argileux à nombreuses passées d'argile.

Terme Ra: grès grossier à fin, anisométriques, quartzitiques avec passées d'argile.

Le passage entre le Cambrien et l'Ordovicien n'est pas net, c'est pourquoi on peut distinguer une zone de passage appelée Cambro-ordovicien.

Cambro-ordovicien

Ce terme comprend la zone Ri et la zone des alternances.

-La zone Ri: grès isométriques bien classés, glauconieux avec abondance de Tigillites et de lingulidae .

-La zone des alternances: constitué d'une alternance d'argiles et de grès.

3-1-2-Ordovicien

Ce système est subdivisé en huit formations qui sont, de bas en haut:

-Argiles d'El Gassi: argiles noires, parfois verdâtres ou rougeâtres, carbonatées, glauconieuses.

-Grès d'El Atchane: grès feldspathiques et localement conglomératiques, glauconieux.

-Quartzites de Hamra: quartzites à rares intercalations d'argile, azoïques.

-Grès de Ouargla : grès fin à moyen, quartzitiques, argileux.

-Argiles d'Azzel: argiles noires, micacées, riches en fossiles.

-Grès de l'Oued Saret: ils sont argileux ou quartzitiques à bancs d'argiles et à zones conglomératiques. Au sommet, un banc de calcaire ou de dolomie fossilifère.

-Argiles microconglomératiques: argiles noires, silteuses, à nombreuses dragées de quartz.

-Grès de Ramade: ils sont parfois subdivisés en deux sous-membres: la série de grès de Taboulet, à la base, représentée par des grès quartzitiques, et de fines passées d'argiles, et la dalle de M'Kratta, au sommet, constituée de grès quartzitiques.

3-1-3-Silurien

Il est constitué d'argiles noires, riches exclusivement en graptolites. Les trilobites sont rares et ne se rencontrent qu'à de rares niveaux particuliers. Ces argiles sont riches en matière organique qui donneront plus tard l'une des roches-mères du pétrole saharien.

3-1-4-Dévonien

Il est érodé sur une grande partie du bassin triasique, il n'est épargné que dans la partie Nord-Ouest où il recouvre en discordance par les formations de Westphalien de la région de Bordj-nili (Nord de HassiR'mel).

-Dévonien inférieur (Gédinnien-Siegénien)

Dans la partie Nord-Ouest du bassin triasique, il est représenté par deux membres:

A la base, la Formation des Argiles de Mehaiguen qui comprend une série d'argiles, suivie d'une autre argilo-gréseuse.

Au-dessus, la Formation des grès et des argiles de Oued Namouss, constituée à la base par des argiles et devenant gréseuse vers le haut.

-Emsien dans les zones septentrionales du Sahara, il est représenté par des dépôts argileux à argilo- carbonatés de facies pélagique.

-Dévonien moyen (Eifelien-Givetien) Il est caractérisé par un dépôt argileux comporte des intercalations de niveaux carbonatés fossilifères.

-Dévonien supérieur: Il est représenté par une série argileuse et à sa base par quelques bancs de carbonates, la partie supérieure devient beaucoup plus gréseuse.

3-1-5-Carbonifère

Dans les zones septentrionales du bassin, le Carbonifère n'est présent que dans la région de Bordj-Nili. Il est représenté par une série argilo-gréseuse, suivie de calcaires à Fusulines et d'argiles dolomitiques. Il repose en discordance sur les différents terrains du Paléozoïque.

Discordance hercynienne

On s'intéresse ici par ses effets sur le dépôt sédimentaire de la zone étudiée; les travaux de recherches et d'exploration de la SONATRACH ont permis la création de bases de données bien précises en géologie; référant à ce dernier on constate que la zone de Berkaoui (sud Ouargla) le Trias (série inférieure) repose sur le dévonien inf. donc l'absence de dépôt de dévonien moyen, dévonien supérieur et Carbonifère qui se sont érodés et la zone étendue de

Hassi Messaoud à Touggourt EST, le trias repose en discordance sur l'ordovicien exactement sur le quartzite alhamra donc l'absence de dépôt .

3-2-Mésozoïque

3-2-1-Trias

Le Trias est caractérisé[(SONATRACH, 2010)] par des dépôts volcano-détritiques et lagunaires. Dans le secteur d'Oued Mya, qui forme une vaste dépression NE-SW, située entre deux axes structuraux, le haut fond du M'Zab-Talemzane au NW et celui d'El Gassi-Hassi Messaoud au SE. Il comprend

*** La série inférieure**

Dans le secteur Sud-Est, les roches éruptives reposent directement sur le substratum faillé paléozoïque , tandis que vers le Nord-Ouest, la série se complète par sa base en matériel détritique pour devenir complètement argilo-gréseuse. Dans la zone intermédiaire, la série est représentée par :

-une alternance d'argile silteuse brune à verte, et de grès blanc, brun rouge à verdâtre, fin d'origine fluviatile en provenance de SE (relief de Hassi Messaoud).

-une épaisse série de roches éruptives gris-foncé à vert-sombre, dures et parfois brun-rouge lorsqu'elle est altérée.

*** Niveaux T1 et T2**

Ce sont des niveaux grés-argileux caractéristiques de dépôts fluviatile et les Grès sont brun-rouge, fin, parfois moyen et les argiles sont brun-rouge, silteuses et légèrement dolomitiques.

*** Niveau argilo-salifère**

De la base au sommet, il comporte deux termes :

-une série d'argiles brun-rouge tendres, parfois indurées, légèrement dolomitiques et salifères au sommet ;

-une série de sel blanc à translucide avec passées d'argile brun-rouge plastique.

3-2-2-Jurassique

Il comprend de bas en haut

-L' argileux supérieur

Il est constitué par des argiles brun-rouge, légèrement dolomitiques, plastiques avec quelquefois quelques passées de sel.

- niveau S3

Il est représenté essentiellement par des sels massifs, translucides avec quelques fines passées d'argile brun-rouge plastiques.

-niveau S1+S2

C'est un complexe évaporitique, formé par d'alternances d'anhydrite blanche à beige, de sel et d'argile brun-rouge plastique.

-Horizon B

Représenté par des dolomies, des calcaires parfois oolitiques, avec intercalations de marnes il forme un bon repère diagraphique par la nature individualisée de sa lithologie entre deux séries évaporitiques.

-Niveau salifère

Constitué de sel avec des intercalations d'argiles brun-rouge et gris-verdâtre.

-Niveau anhydritique

Bien développé dans la partie centrale et septentrionale du bassin, il devient argilo-gréseux avec quelques passées d'anhydrite vers le Sud.

-Dogger

Le Dogger est subdivisé en deux formations ; lagunaire à la base et argileux au sommet, il est représenté par un faciès détritique avec de rares passées d'anhydrite.

-Malm

Il est caractérisé par les dépôts d'argiles et de marne avec des intercalations des bancs de calcaire et dolomie accompagnés de quelques traces d'anhydrite.

3-2-3 Crétacé

-Néocomien: Il est constitué à la base par des grès et de quelques passées d'argile, et au sommet par d'argiles grises, pâteuses avec de nombreuses intercalations de calcaire et de dolomie surtout au Nord.

On assiste donc à une sédimentation détritique généralisée, déjà amorcée au cours du Malm par l'arrivée d'éléments détritiques dans le Nord du bassin.

-Barrémien: Il est caractérisé par une sédimentation surtout gréseuse, régulière sur l'ensemble du bassin.

-Aptien: Il est représenté par une barre carbonatée présente sur l'ensemble du bassin avec une augmentation de faciès détritiques sur les bordures.

-Albien: Il est représenté essentiellement par des grès fins et des argiles dans la majeure partie du bassin. Dans les zones septentrionales et orientales, sa partie supérieure est envahie par des faciès carbonatés. Il présente une variation de faciès, depuis les dépôts détritiques au Sud-Ouest

à des dépôts argilo-gréseux et en fin carbonatés au Nord et Nord-Est. Cette période correspond au dernier épandage détritique important mésozoïque et constitue un immense réservoir d'eau douce.

-Cénomaniens: Il est présenté par une série lagunaire de marnes à gypse avec passées d'anhydrites et de bancs carbonatés sur l'ensemble du bassin.

-Turonien: Il est représenté par un banc de calcaire fossilifère assez homogène sur une grande partie du bassin. Cette période est caractérisée par un milieu marin franc sur l'ensemble du bassin.

-Sénonien: Il comporte de bas en haut:

-série lagunaire ou sénonien lagunaire, elle est caractérisée par la présence des bancs massifs de sel et des alternances d'anhydrite, dolomie et d'argile grise,

-série carbonatée ou sénonien carbonaté présentant des bancs de calcaire dolomitique argileux et des bancs d'anhydrite.

3-3-Cénozoïque

3-3-1-Tertiaire

le Tertiaire [(SWEZEY, 2009)] In [(ZATOUT, 2017)]est constitué de carbonates, d'argiles marines, de sables, d'argiles continentales, de gypse et de conglomérats.

Le Paléocène est représenté par des argiles marines à la base, surmontée par des carbonates dans la partie médiane et une épaisse série d'argile et/ou de calcaire phosphatés au sommet.

L'Éocène présente un niveau de carbonates à la base, et un autre plus épais de gypse au sommet.

L'Oligocène inférieur est formé essentiellement d'argiles terrestres

Le Miocène supérieur est constitué de trois niveaux, un niveau sableux à la base, épais, deux autres nettement moins épais de gypse et d'argiles continentales.

Le Pliocène inférieur est sableux.

3-3-2-Quaternaire

Le quaternaire est représenté par des dépôts argilo-gréseux à la base, formant une croûte ancienne, de sables éoliens parfois gypseux et des remaniements des terrains Mio-Pliocène dans la partie sommitale.

Chapitre 2
Climatologie

Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée, la caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent. Sont également pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels.

Ces analyses permettent de classer les climats des différentes régions du monde selon leurs caractéristiques principales, les différents climats mondiaux sont montrés dans la figure 6 dans laquelle on voit bien que la région étudiée fait partie du climat aride .

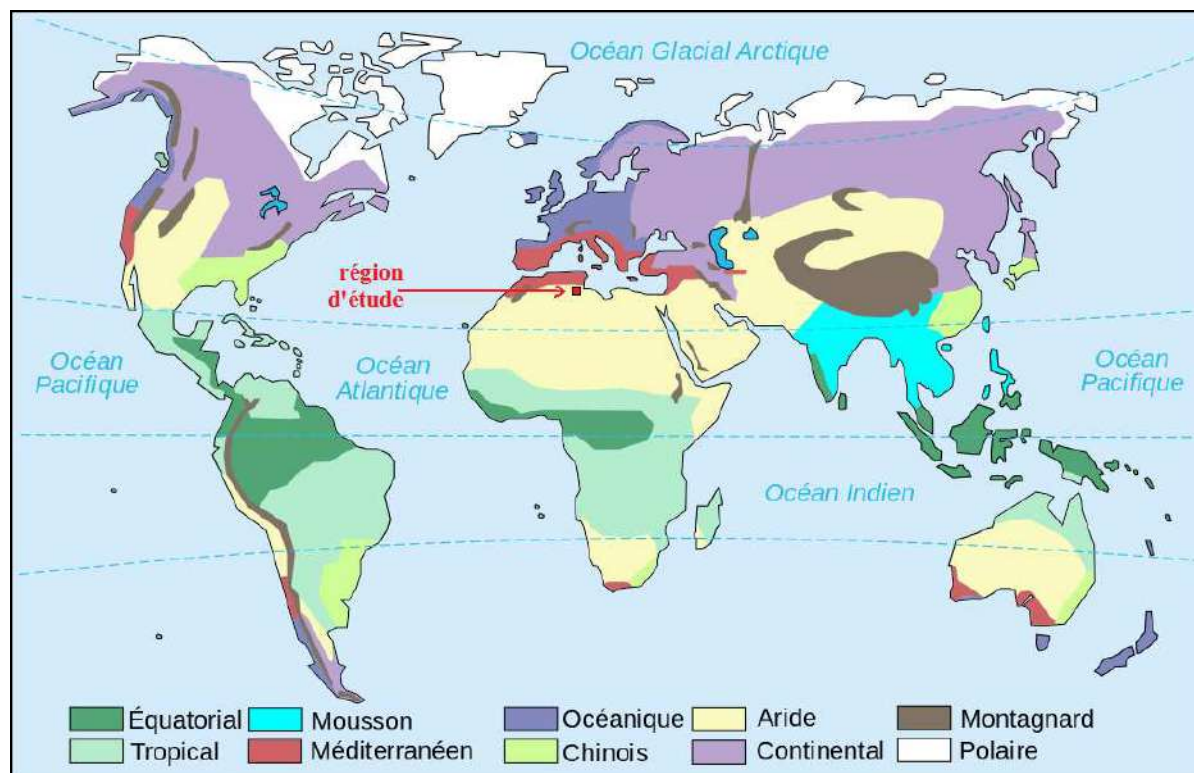


Fig.6. Carte simplifiée les climats mondiaux et la position de la région étudiée (wikipedia, 2019).

Le climat de Bas Sahara est en général désertique aride, sec, et chaud caractérisé par des amplitudes thermiques importantes, une pluviométrie très faible et aléatoire, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème . Il est à souligner que ce type de climat se distingue par une forte insolation et une luminosité, dont la moyenne annuelle peut atteindre les 3000 heures.

Quant, à la région d'Ouargla il est du type saharien hyper aride, à hivers tempéré et d'une sécheresse permanente; où les précipitations ne dépassent guère 45 mm/an, et l'évaporation annuelle dépasse presque 60 fois celui de la pluviométrie(wikipedia, 2019).

L'analyse des de différents paramètres climatiques fournis par l'Office National de météorologie ONM -station d'Ouargla- et station de pendant la période 1997-2018 montre que

la zone d'étude est caractérisée par un climat saharien hyper aride à hivers tempérés, et d'une sécheresse permanente, l'aridité s'exprime par des températures élevées en été, la faiblesse et la rareté des précipitations, et l'évaporation intense due à la sécheresse de l'air. Ces particularités climatiques de la région d'étude sont discutées avec un peu de détail dans ce suit:

1-Température de l'air

La température de l'air présente un facteur limitant de toute première importance, car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la reproduction, l'activité et la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère. Le fonctionnement biologique d'un milieu aquatique est étroitement lié à la climatologie et plus particulièrement à la température de l'air et de l'énergie solaire dont les variations saisonnières conditionnent les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux. Les radiations calorifiques sont absorbées par les couches les plus superficielles, l'eau ainsi réchauffée reste en surface puisque la densité de l'eau varie avec la température. Les vents induisent des courants, des vagues et des phénomènes de turbulence variant qui assurent un mélange plus ou moins prononcé des couches superficielles sur une certaine épaisseur.

La figure 6 représente les températures mensuelles moyennes durant la période (1997 à 2018). Station de Ouargla ; La température présente une grande amplitude thermique et la moyenne du mois le plus froid (Janvier) oscille entre 4,8°C et 21,6 °C. La température la plus basse enregistrée est de -3.7 °C le 16 janvier 2001- et celle du mois le plus chaud (Juillet) entre 30,6 °C et 48,6 °C, on voit bien dans l'histogramme (figure 7) que les mois les plus froids dans cette série climatique sont ceux de décembre, janvier et février dont les valeurs de températures sont autour de 12 C°. Les mois les plus chauds sont ceux de juin, juillet et aout dont les valeurs de la température sont autours de 35C°.

Quant à station de oued Souf ; les données fournies par ONM Guemmar montrent que les mois les plus froids sont Janvier et Décembre avec 15,07 et 15,76 °C. Les températures les plus élevées varient entre 37,82 et 37,63 °C, et correspondent aux mois de Juillet et Août.

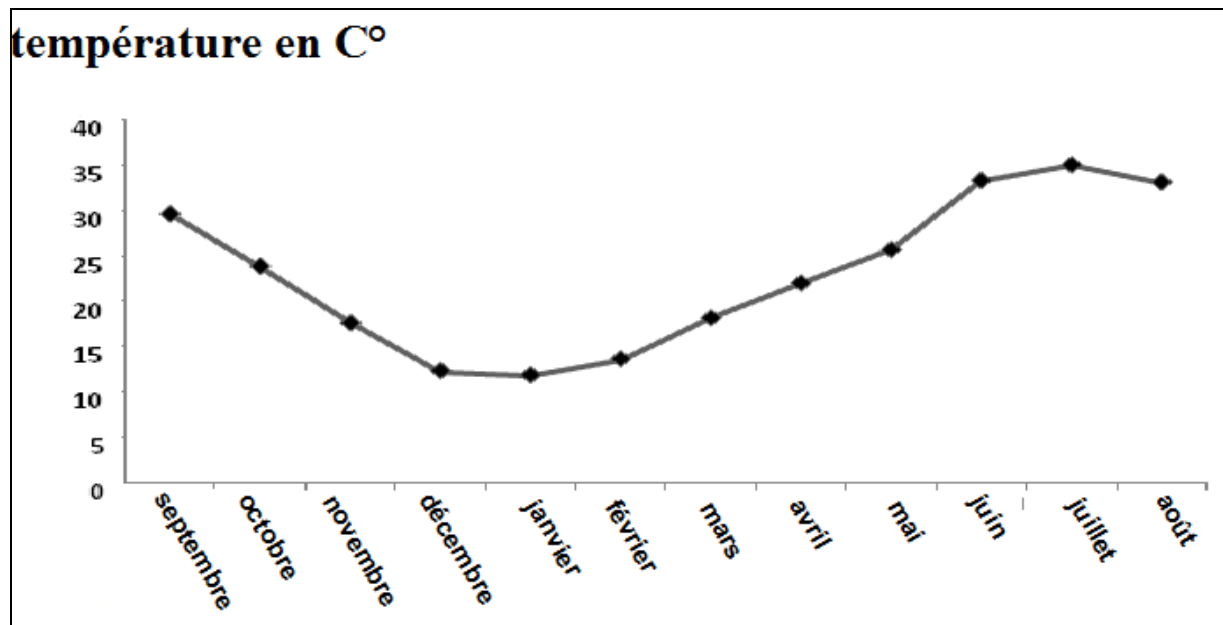


Fig.7. Température moyenne mensuelle (1997-2018).

2-Évaporation

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive qui a pour effet d'absorber des calories et donc de réduire la température de l'environnement [(wikipedia, 2019)]. Elle est définie comme étant la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère et dans les milieux arides, l'évaporation est toujours plus importante sur une surface nue que sous couvert végétal surtout en été. Cela s'explique par les fortes températures et le fort pouvoir évaporant de l'air et des vents desséchants.

Les valeurs mensuelles interannuelles de l'évaporation dans la région d'Ouargla sont reportées dans l'histogramme suivant (figure 8), ces valeurs sont enregistrées durant la période 1997-2018. On voit bien que pendant cette série l'évaporation a une moyenne de l'ordre de 3150 mm/an (Tableau 1).

Quant à la station de oued Souf, L'évaporation est de l'ordre de 2360.6 mm/an comme moyenne annuelle avec un maximum mensuel de 309 mm au mois de Juillet et un minimum de 73 mm en décembre. Les chiffres de l'évaporation pour notre région d'étude sont très importants et jouent un rôle primordial dans les paramètres climatiques qui affect le climat notamment le cycle de l'eau.

Tab.1. L'évaporation interannuelle ONM Ouargla (2007-2018).

Année	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Évaporation mm	2870	3157	3852	3285	3120	3378	3468	3726	3789	3796	3610
année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Évaporation mm	2759	2418	2766	2510	2748	2618	2835	2578	3522	3316	2890

Pour l'évaporation mensuelle (figure 7) on constate des valeurs minimales autour de 100 mm enregistrées en mois de décembre et des chiffres maximaux de 463 mm en mois les plus chauds notamment juillet en premier ordre et août, juin en deuxième.

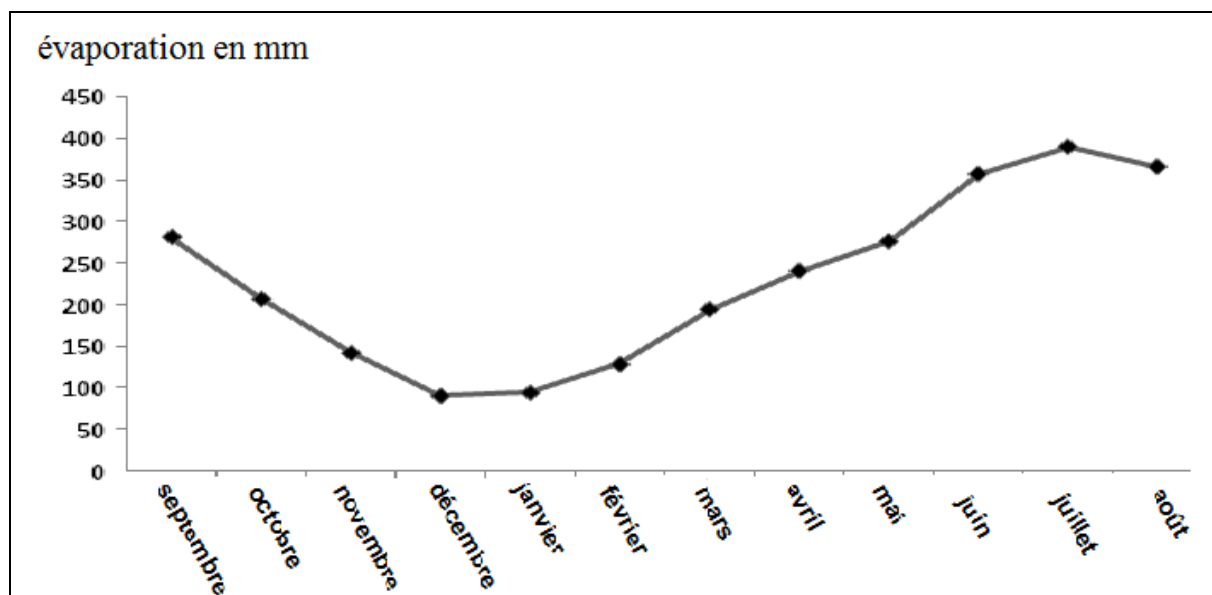


Fig.8. L' évaporation moyenne mensuelle(1997-2018).

3-Précipitations -Mensuelles

La figure montre les précipitations moyennes mensuelles observées durant la période de (1997-2018).

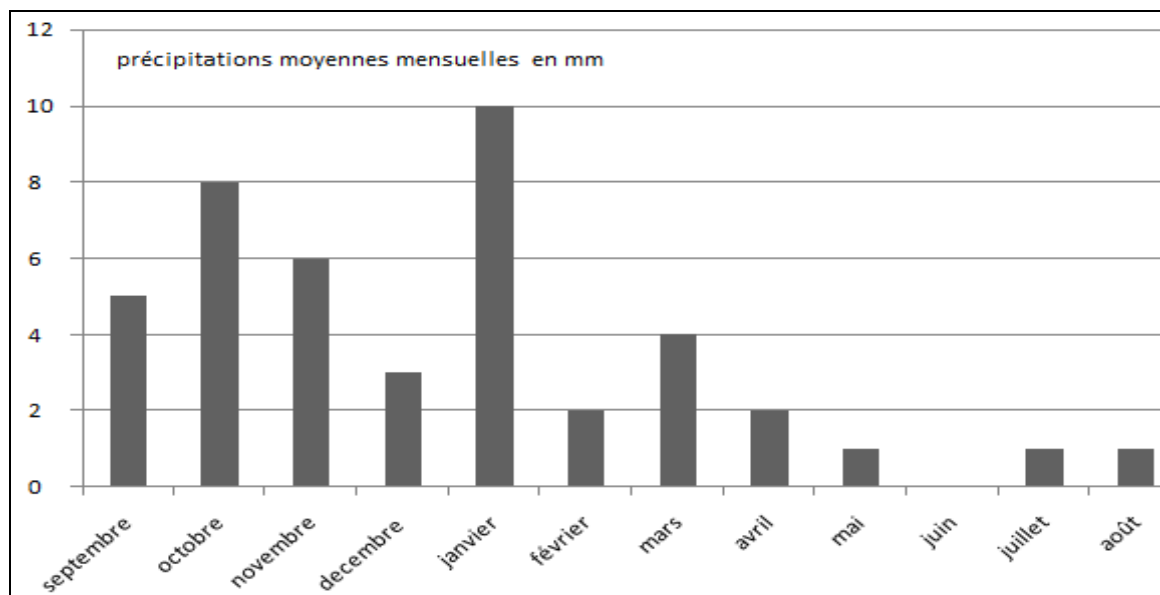


Fig.9. Histogramme de précipitations moyennes mensuelles (1997-2018).

Les précipitations mensuelles (figure 9) sont irrégulières et montrent de faibles hauteurs, les pluies se produisent essentiellement au printemps et en automne par un maximum au

janvier ce sont surtout les mois septembre jusqu'à janvier qui constituent le maximum de pluviométrie durant l'année, le mois le plus arrosé est le mois de janvier durant lequel la pluviosité atteint 10 mm tandis que le mois de juillet est le mois le plus sec.

Concernant la zone d' Oued Souf les précipitations sont très faibles en mois de Mai jusqu'au mois d' Août, et le chiffre élevé enregistré en mois de Janvier avec 17,6 mm.

-Interannuelle

La moyenne des précipitations interannuelles (figure 10) calculées dans cette série allant de 1997 à 2018 est 44 mm cette pluviométrie est caractérisée par l'irrégularité en quantité de précipitation d'une année à l'autre , l'année le plus arrosée est celle de 2006 , l'année la plus sèche est 2001 et le reste de la majorité de la série ont une valeur moyenne qui ne dépasse guère 50 mm/an.

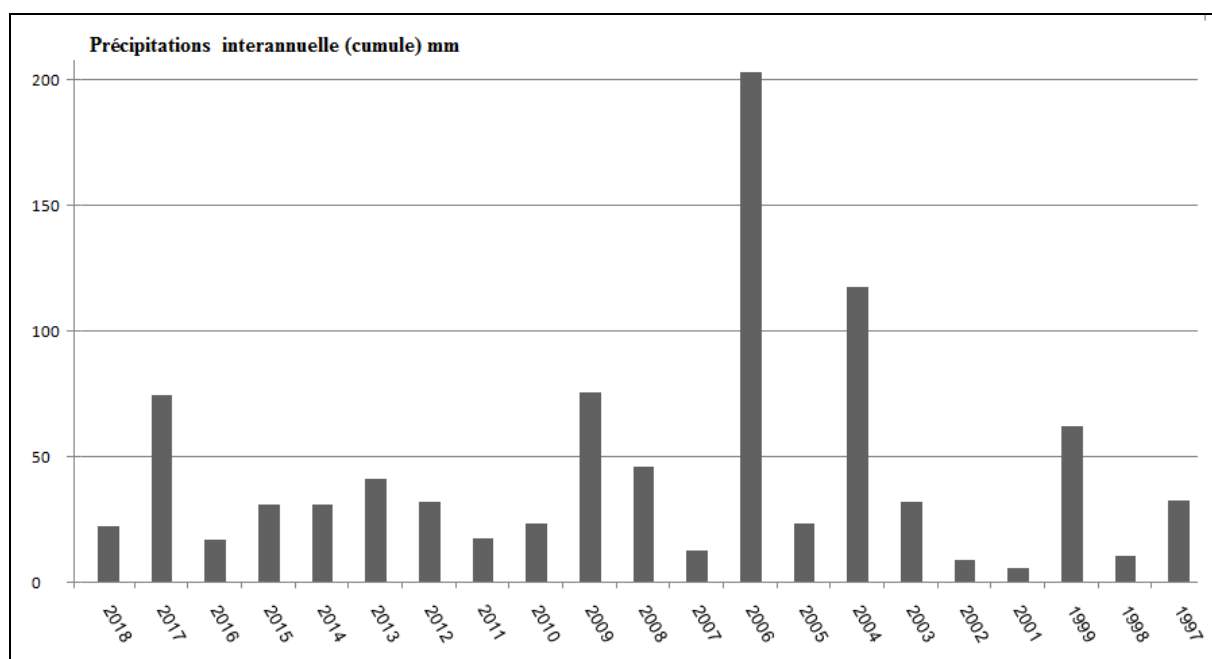


Fig.10. Histogramme des précipitations annuelles (cumule) (1997-2018).

4-Humidité de l'air

L'humidité relative de l'air (figure 11) ou degré hygrométrique, correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

Les données de mesure fournies par ONM pendant la période de 1997-2018 montrent que l'humidité moyenne mensuelle relative de l'air est faible, elle varie sensiblement en fonction des saisons. En effet pendant l'été, elle chute jusqu'à 23 % au mois de juillet et elle s'élève en

hiver pour atteindre au mois de décembre 60%. Et pour la station d' Oued Souf, la moyenne la plus forte est le mois de décembre par 66,36% et la plus faible est celle de juillet de 32%.

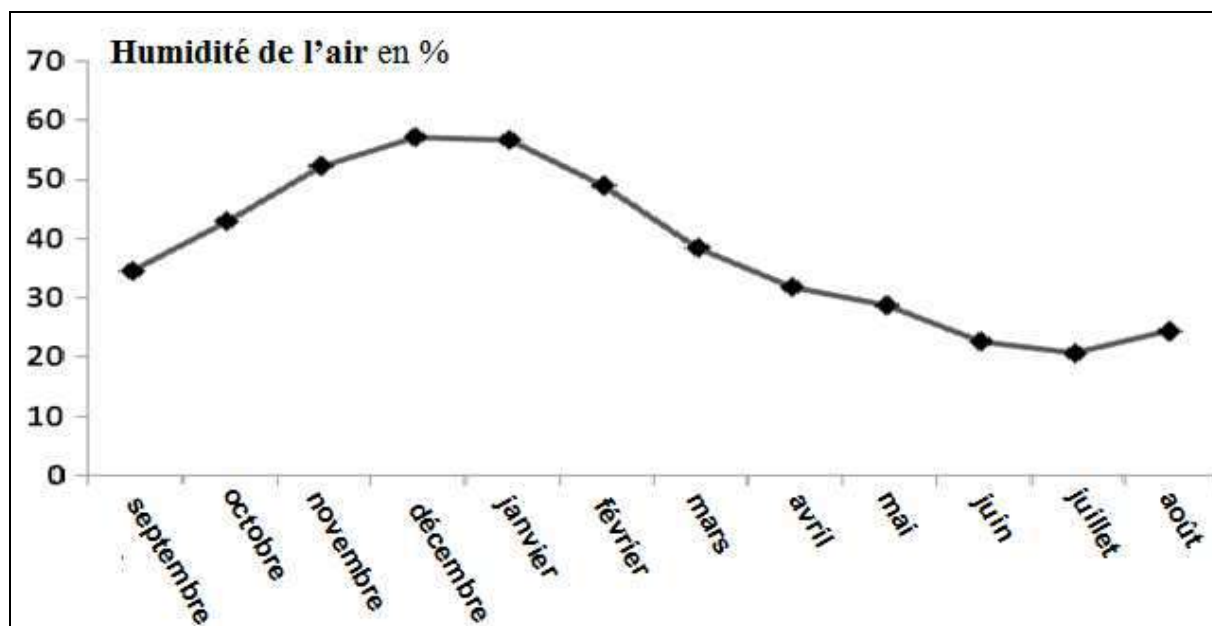


Fig.11. Graphique de l'Humidité moyenne mensuelle 1997-2018.

5-Vitesse du vent

Le vent est le mouvement au sein d'une atmosphère, masse de gaz située à la surface d'une planète, d'une partie de ce gaz. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire), et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent est mécaniquement décrit par les lois de la dynamique des fluides, comme les courants marins. La fréquence et l'intensité des vents sont également un des caractéristiques majeures du climat Saharien. Il joue un rôle considérable, en provoquant une déflation et une corrosion sur les reliefs, ainsi que sur les plantes surtout sur les parties aériennes, il s'agit en accentuant l'évaporation. le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année.

Dans les régions d'étude, les vents soufflent pendant toute l'année avec une vitesse variable allant de 4 m/S en à 6 m/S comme moyenne mensuelle (figure 12). Pour la station d' Ouargla les vents les plus fortes se produisent durant les mois d'Avril à Juillet avec un maximum de 7 m/S, tandis que le reste des mois les vitesses de vent ont une moyenne autour de 6m/S. Généralement, les vents les plus fréquents sont ceux qui ont une direction S-N et SW-NE, tandis que les vents dirigés vers le Sud et le Sud-ouest ne dominent qu'au mois de Janvier. Et pour la station de oued Souf les vents les plus forts sont enregistrés dans les mois d'Avril, Mai et Juin qui dépassent 4m/S et le reste des mois les vitesses sont entre 2.16 et

3.6m/S. On peut penser que l'orientation grossièrement N-S de la vallée joue un rôle dans la direction des vents. La vitesse moyenne annuelle du vent est de 6m/s pendant toute cette série de mesure .

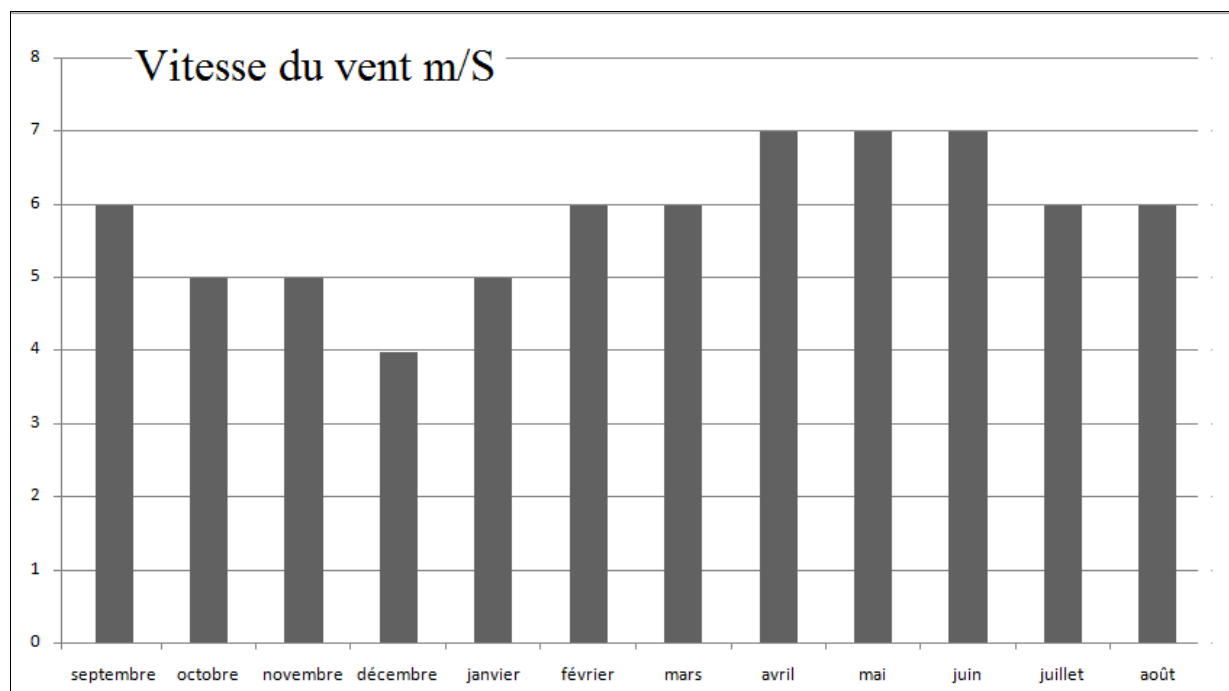


Fig.12. Graphique de vitesse du vent mensuel moyen (1997-2018)

6-Durée d'ensoleillement

la durée moyenne d'ensoleillement journalière est supérieure à 8 h/j. Elle peut dépasser légèrement 11 h/j en Été, tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h en Hiver. (Tableau 2)

L'insolation mensuelle, est élevée aux mois les plus chauds, dont ; Juin, juillet, et Août. Les valeurs minimales sont enregistrées dans la période allant de novembre jusqu'à février.

La durée moyenne de l'insolation interannuelle dans cette série qui s'étale de 1997 à 2018 est de 3226 h/an.

Tab.2. La durée de l'ensoleillement interannuelle ONM 1997-2018.

année	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
durée insolation h	3225	3162	3216	3187	3351	3250	3249	3225	3128	3241	2929
année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
durée insolation h	3132	3426	3162	3369	3318	3272	3236	3296	3194	3234	3178

La durée de l'ensoleillement mensuelle montre des valeurs élevées en mois d' Août qui sont environ 328 heures alors que les durées minimales sont enregistrées en mois de décembre qui sont 220 heures.

7-L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou potentiel d'évaporation d'un sol est défini comme la quantité d'évaporation qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant. Si l'évapotranspiration réelle considère la demande nette de l'atmosphère en humidité par rapport à une surface et la capacité de cette surface à fournir l'humidité, l'ETP est une mesure de la demande. La surface, les températures de l'air, l'ensoleillement et le vent influencent tous le phénomène. Une zone aride est un endroit où le potentiel annuel d'évaporation excède les précipitations annuelles. L'évapotranspiration est déterminée par l'ensemble des processus d'évaporation (phénomène physique) et de transpiration (phénomène biologique) on distingue alors l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) qui correspond à la quantité d'eau pouvant être restituée par la transpiration des végétaux et l'évaporation à partir du sol et l'évapotranspiration réelle (ETP) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée [(Dubief, 1959)].

De nombreux auteurs ont établis des formules empiriques donnant une approximation de l'évapotranspiration (ETP) potentielle à partir des paramètres climatiques facilement accessibles

Formule de Thornthwaite :

Thornthwaite a défini l'évapotranspiration potentielle à partir d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour permettre l'évaporation de la quantité maximale d'eau permise par les conditions climatiques. Elle s'oppose à l'évapotranspiration réelle qui mesure l'évapotranspiration à partir d'une surface compte tenu de son état d'humidité. La formule de Thornthwaite est :

$$\text{ETP} = 16(10 t / I)^a \cdot k \dots\dots\dots 1$$

ETP: évapotranspiration mensuelle en mm,

t = température moyenne mensuelle, I =Indice thermique annuelle soit la somme des indices de Chaleur Mensuelles $I = \sum i. \quad i = (t/5)^{1,514}$

$$a = 6,75(10^{-7})I^3 - 7,71(10^{-5})I^2 + 1,79(10^{-2})I + 0,49 \dots\dots\dots 2$$

K : coefficient d'ajustement mensuel;

Tab.3. L'ETP moyennes mensuelles et annuelles (1997-2018).

MOIS	T °C	i	K	a	ETPc mm
Janvier	12,1	3,8	0,89	3.06	40
Février	13,9	4,7	0,86		44
Mars	18,2	7,1	1,03		70
Avril	23,7	10,5	1,08		95
Mai	27,8	13,5	1,19		123
Juin	33,0	17,4	1,19		146
Juillet	35,5	19,4	1,21		159
Août	33,9	18,1	1,15		144
Septembre	30,2	15,3	1,03		116
Octobre	25,3	11,7	0,98		92
Novembre	17,2	6,5	0,88		56
Décembre	12,5	4,0	0,87		40
Moy	24				
Cumul		132			1085

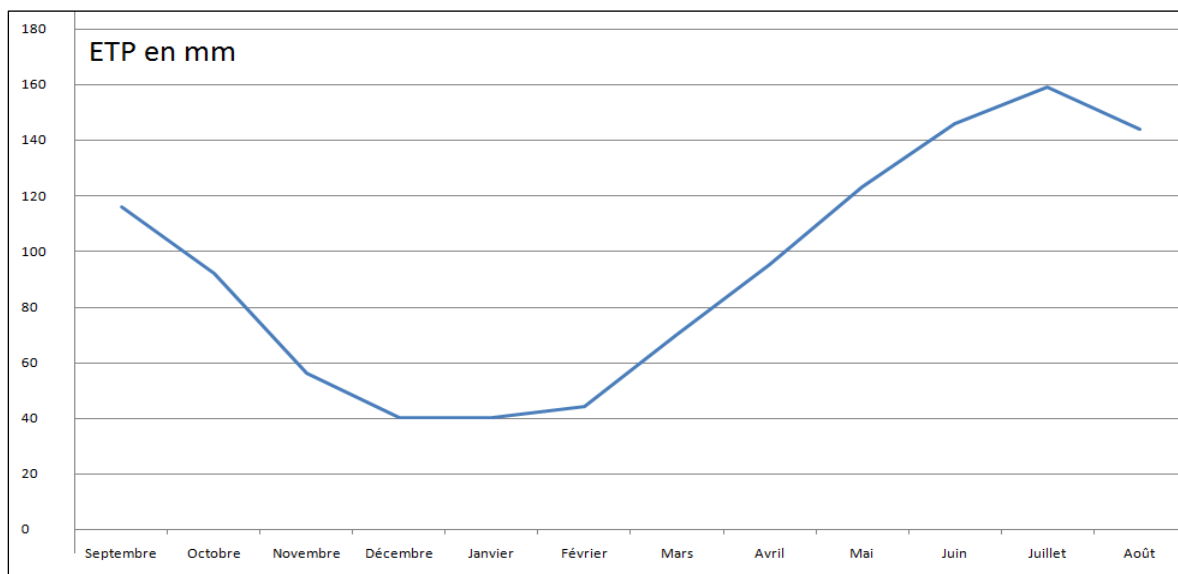


Fig.13. L'ETP mensuelle annuelle calculée (1997-2018) par la formule de Thornthwaite.

L'ETP calculées selon la formule de Thornthwaite (figure 13) est minimale en octobre à avril, et les valeurs élevées sont dans les mois d'été, avec un maximum en juillet (159 mm).

Le cumul des moyennes mensuelles annuelle est 1085 mm /an dans cette série.

Chapitre 3
Hydrogéologie

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » (figure 14) [(Unesco, 1972)] [(OSS, 2003)] s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye. Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Le domaine du SASS (système aquifère du Sahara septentrional) couvre une superficie d'environ 1.000.000 de km² et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye. Ce bassin se subdivise en trois sous-entités : les deux sous-bassins du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental qui sont des cuvettes à écoulement endoréique aboutissant dans des dépressions fermées «chotts et sebkhas», et le plateau de la Hamada El Hamra.

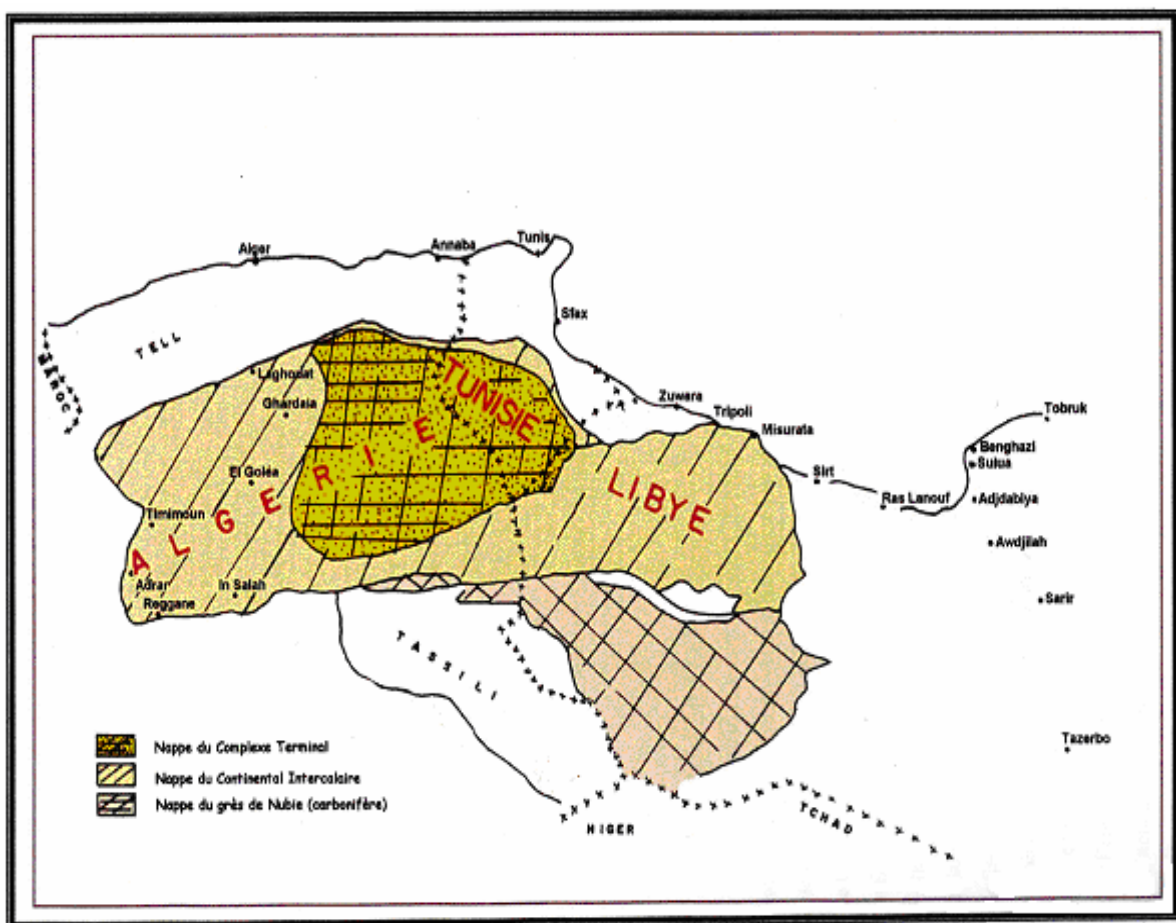


Fig.14. Situation générale des aquifères du Sahara septentrional In [(CHABOUR, 2006)].

1-Aperçu sur l'hydrogéologie générale de la plateforme saharienne

C'est en 1968 que l'UNESCO a entrepris une étude d'évaluation des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESS), cette étude a été achevée en 1972 [(Unesco, 1972)]. Elle concerne un vaste territoire, d'une surface de 800 000 km² et englobe à l'époque le Sahara

algérien et une partie de la Tunisie. Son objectif est la détermination des ressources en eau en vue d'aboutir à une politique cohérente de gestion des ressources relatives aux deux importantes nappes du Sahara : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

La méthodologie adoptée consiste en :

- évaluation des besoins globaux en eau du Sahara à l'horizon 2000
 - confrontation de ces besoins avec les capacités d'investissements et de réalisation
 - construction de modèles mathématiques et analogiques des différentes nappes du Sahara
 - réalisation de simulations exploratoires, pour déterminer les limites techniques des débits à ne pas dépasser par zones
 - formulation définitive des hypothèses forte et faible en répartissant les prélèvements futurs dans chaque zone en tenant compte des résultats des simulations exploratoires.
 - simulation des hypothèses forte et faible et traduction des résultats en données économiques
- avec l'intégration du territoire libyen, l'étude du système aquifère du Sahara Septentrional (SASS) a été confiée à l'observatoire du Sahara et du sahel. A cette échelle, ce système couvre une étendue de plus d'un million de km² dont 700 000 se trouvent en Algérie, près de 80 000 en Tunisie et 250 000 en Libye [(OSS, 2003)].

Les synthèses hydrogéologiques en 2006 font part de 8 800 points d'eau (forages et sources) : 3 500 au Continental Intercalaire et 5 300 au Complexe Terminal [(CHABOUR, 2006)].

1-1-Le Continentale intercalaire

Le continental intercalaire est un aquifère transfrontalier partagé entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye. La partie algérienne s'étend sur environ 600 000 Km², renfermant d'importantes quantités d'eau estimées à 60 000 milliards de m³ [(Unesco, 1972)] [(OSS, 2003)]. Dans la région d'Ouargla la nappe est située à plus de 1000 m de profondeur, cette nappe est plus connue sous la dénomination d' « Albien », nom de l'étage géologique qui renferme la couche aquifère supérieure du « Continental Intercalaire », qui est la plus exploitée. Le terme de continental intercalaire, par contre, désigne l'ensemble des couches détritiques qui se sont déposées au Mésozoïque inférieur au Sahara, entre deux cycles marins.

1-1-1-Limites et morphologie du Continental Intercalaire

Le continental intercalaire est limité au nord par l'Atlas saharien, à l'ouest par l'axe Béchar-Regagne et au sud par l'axe Regagne Ain Amenas (Figure 15). À l'est, il se prolonge au-delà des frontières algéro-libyenne et algéro-tunisienne, il est partagé par la dorsale du M'Zab en deux bassins:

Le bassin occidental et oriental,

Vu que notre zone d'étude se situe sur la partie orientale du bassin nous nous limiterons à sa description uniquement sur celle-ci.

À la périphérie du Sahara, le continental intercalaire se termine en biseau sur les anciens reliefs hercyniens, mais il atteint très vite une grande puissance dans les anciennes cuvettes d'accumulation.

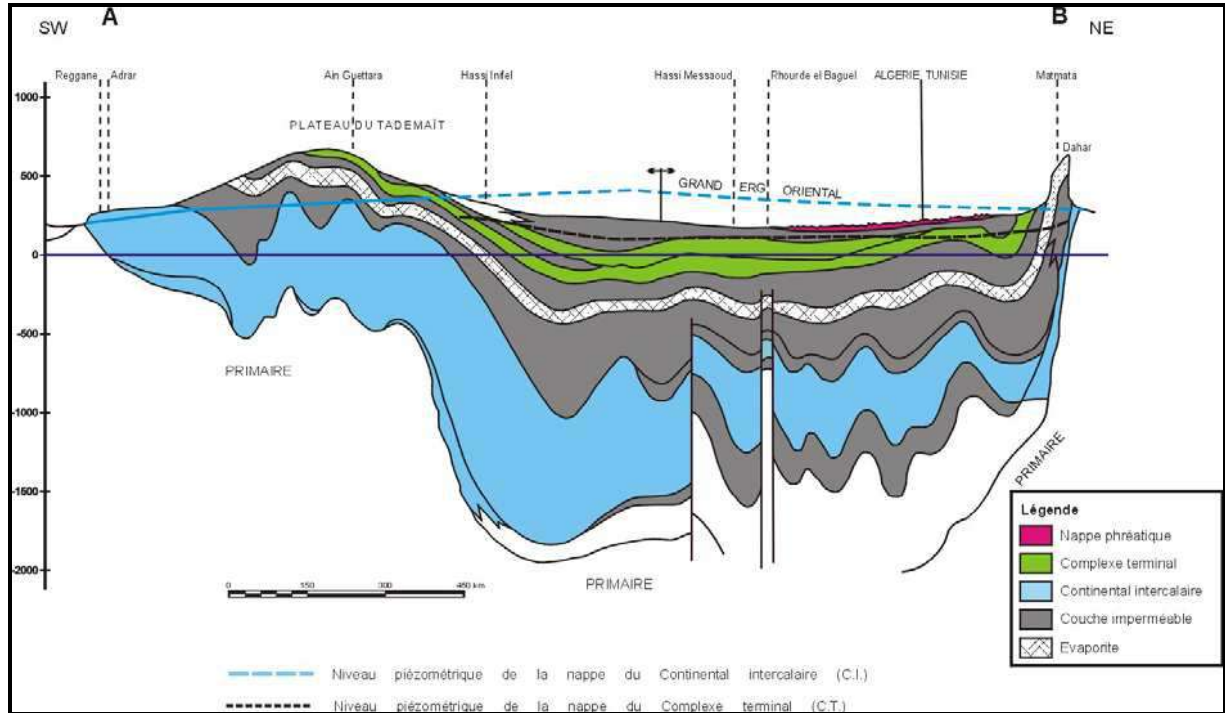


Fig.15. Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional[(Unesco, 1972)].

Le continental intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. La définition donnée par [(Unesco, 1972)] est que la limite aux formations clastiques (argilo gréseuses) véritablement continentales et susceptibles de constituer un ensemble aquifère homogène sur le plan lithologique.

Le CI ainsi défini peut occuper une position variable dans l'échelle stratigraphique (figure 15) si le toit est défini comme la base du céno-manien argileux (sauf dans le nord-ouest), il n'en est pas de même pour le mur qui est situé, suivant les régions, entre la discordance hercynienne et le Barrémien.

Le CI n'est pas constitué uniquement d'horizons perméables. La composante argileuse peut représenter en proportion une place importante. Il a alors été effectué une distinction du réservoir utile. Ainsi, dans la lithologie du Continental Intercalaire, on distingue:

- Les grés, quand les couches renferment moins de 10% d'argiles,
- des grés argileux, s'il y a de 10 à 50% d'argiles,

- des argiles, quand il y a plus de 50% d'argiles.

De haut en bas, le CI débute presque toujours au toit de l'Albien. Le mur du CI coïncide avec la discordance hercynienne sous les plateaux de Tademaït et du Tinhert. La porosité moyenne de cette nappe se situe entre 22 et 29%.

Le toit de cette nappe varie selon les régions : à l'ouest (Gourara, Touat), il est en surface et l'aquifère forme une nappe libre captée par les foggaras. A l'est, le toit plonge progressivement sous d'épais terrains, jusqu'à atteindre son maximum de profondeur dans la dépression d'oued Righ. Une même morphologie du substratum est observée dans le sens méridien, qui atteint son maximum au Nord, en bordure de l'Atlas saharien.

1-1-2-Alimentation du CI

Plusieurs hypothèses ont été émises concernant la recharge des aquifères sahariens, notamment celui du continental Intercalaire qui a été longtemps considéré comme étant une nappe fossile d'où la notion de Paléorecharge. La plupart des études [(Unesco, 1972)], [(GUENDOZ, 1985)], [(OSS, 2003)] et [(Guendouz et al, 1996)], confirment que la partie la plus importante des réserves du Continental Intercalaire a été emmagasinée durant les périodes pluvieuses notamment à la fin du Pléistocène.

Il s'agit donc de recharge paléoclimatique. Cependant, il est de plus en plus admis, qu'en plus de ces réserves générées pendant les derniers humides, il existe des apports continus à partir des limites du bassin. Les cartes piézométriques font ressortir les zones d'alimentation et les zones de vidange, alors que les résultats des analyses isotopiques traduisent la répartition spatiale des âges des eaux.

La carte piézométrique établie par UNESCO [(Unesco, 1972)] montre que cette partie orientale de l'aquifère peut être alimentée par :

- le piémont Sud atlasique du NW.
- le plateau de Tinhert.
- le Dahar en 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 Tinhert s'écoulent vers le Nord-est sous l'Erg Oriental en direction de l'exutoire de Tunisie.

Dans l'ensemble ; ces formations sont faiblement alimentées : environ 1 milliard m³/an au total [(OSS, 2003)] essentiellement aux piémonts de l'Atlas Saharien en Algérie.

1-1-3-Les exutoires

Ils sont constitués par:

- Les foggaras: longues galeries drainant, fonctionnent sous un faible rabattement et utilisant la topographie locale pour permettre l'écoulement libre de l'eau vers des points bas (cas du bassin occidental),
- Les puits artésiens (bassin oriental),
- Les sebkhas: vastes étendues humides et salines, surfaces évaporantes dont le débit total n'est pas négligeable.

1-1-4-Piézométrie

Des cartes piézométriques ont été établies par Cornet en 1964 [(CORNET, 1964)], Unesco en 1972 [(Unesco, 1972)], et l'observatoire du Sahara et du Sahel(OSS) en 2003 [(OSS, 2003)] et font apparaître deux grands bassins sahariens séparés par la dorsale du M'Zâb. Sur la carte établie en 2003 (Figure16) par l'OSS, il en ressort 3 domaines hydrogéologiques : le bas Sahara à écoulement d'Ouest en Est ; le grand erg occidental, le Touat-Gourara et le Tidikelt à écoulement du Nord vers le Sud et le Sud-ouest. Dans le bassin oriental, bassin en général artésien, avec des pressions d'artésianisme très fortes comprises entre 5 et 25 bars [(Guendouz et al, 1996)], le sens d'écoulement semble être du Nord-Ouest vers le Sud-est pour être repris ensuite par un sens d'écoulement du Sud vers le Nord-est. Les eaux convergent vers l'exutoire tunisien par la faille de Médenine.

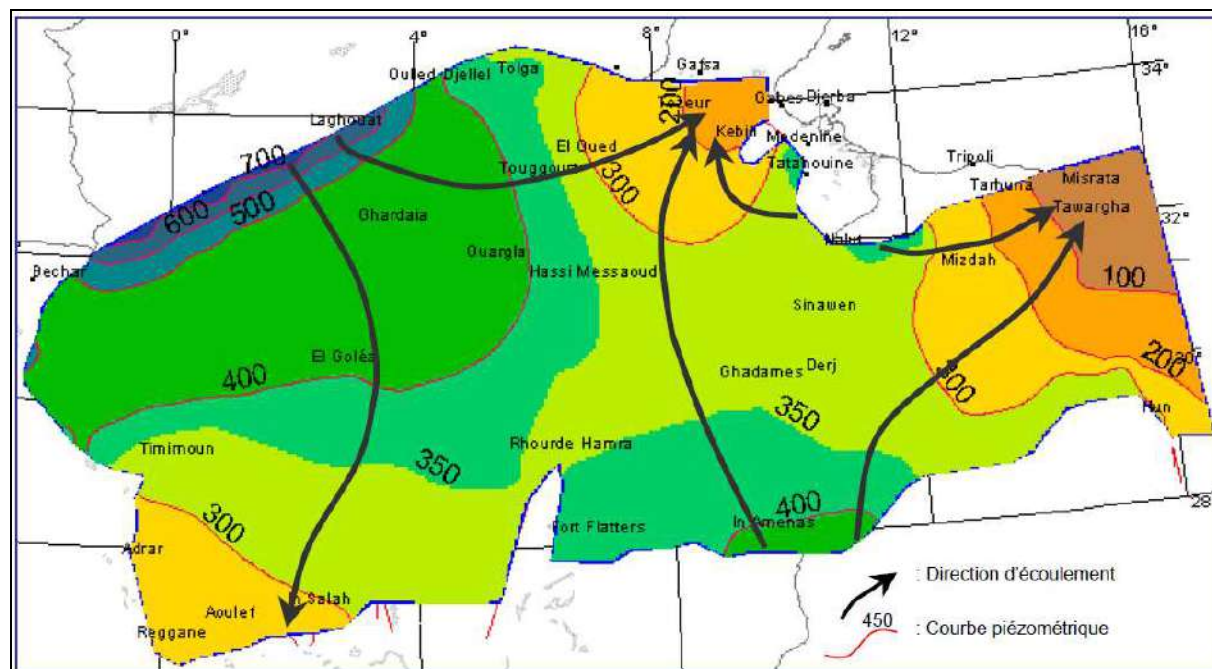


Fig.16. Carte piézométrique du Continental Intercalaire [(OSS, 2003)].

1-1-5-Le continental intercalaire à l'échelle de la région d'étude

Pour la partie sud (zone d'Ouargla) de la région d'étude le CI est situé à une profondeur de 1100 à 1400 mètres, avec une épaisseur utile près de 640 mètres, elle est jaillissante et exploitée par des forages destinés à l'A.E.P. [(NEZLI, 2009)] , Le débit exploité par forage est de 100 l/s, en moyenne. Les forages captant cette nappe fournissent un débit annuel de 7 Hm³ avec une transmissivité de 8.10^{-3} m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 10^{-3} m²/s [(DJIDEL, 2008)].

Le faciès lithologique (figure 17) de la nappe albienne dans la zone d'étude est formé d'un dépôt gréseux continental à ciment argileux ou carbonaté et des passées d'argiles, connu sur une épaisseur de 400 m en moyenne.

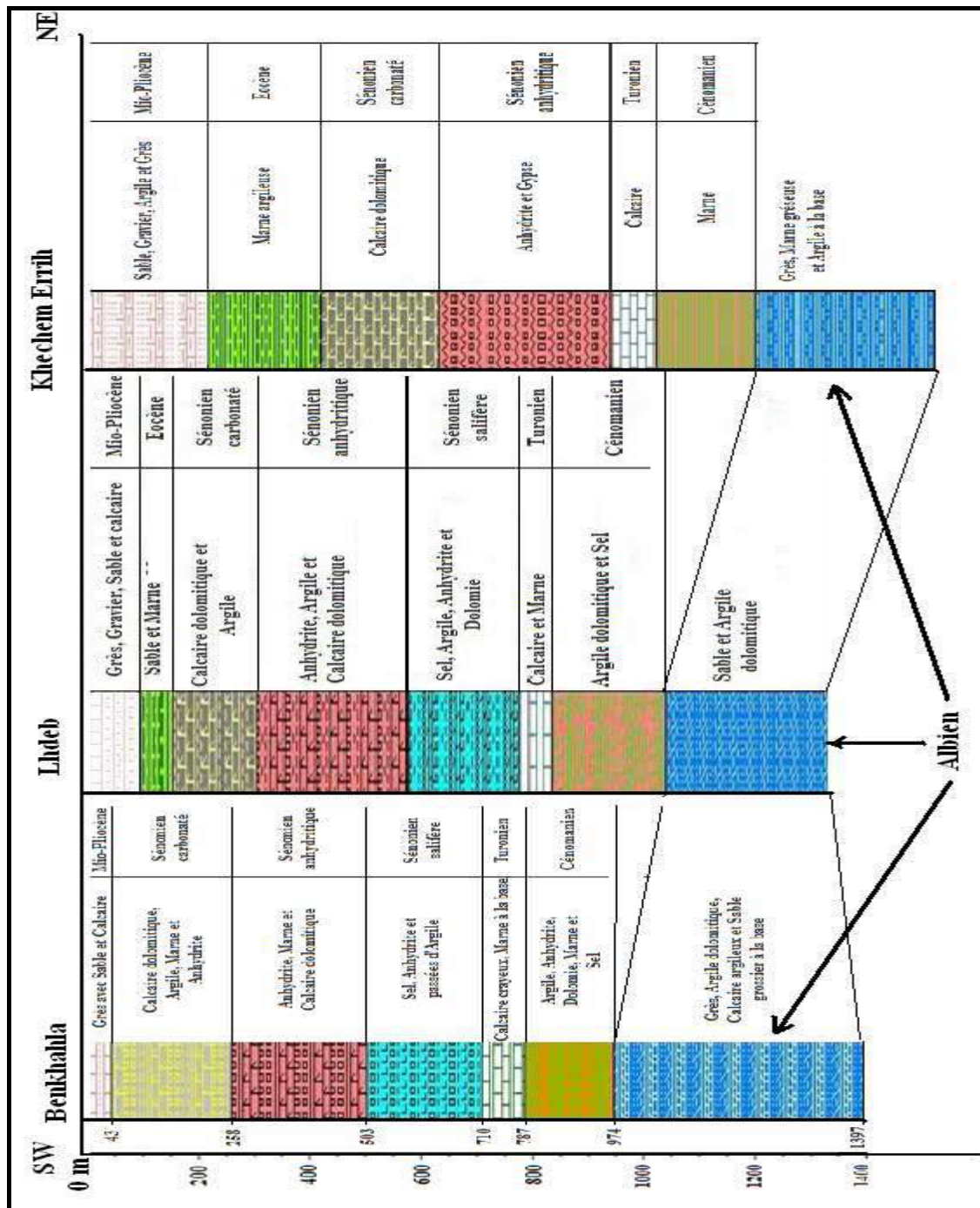


Fig.17. Colonne litho-stratigraphiques du CI dans zone d' Ouargla. [(HOUARI I et al., 2014)].
 Quant à la zone nord le continental intercalaire est récapitulé lithos- stratigraphiquement dans la figure18 suivante :

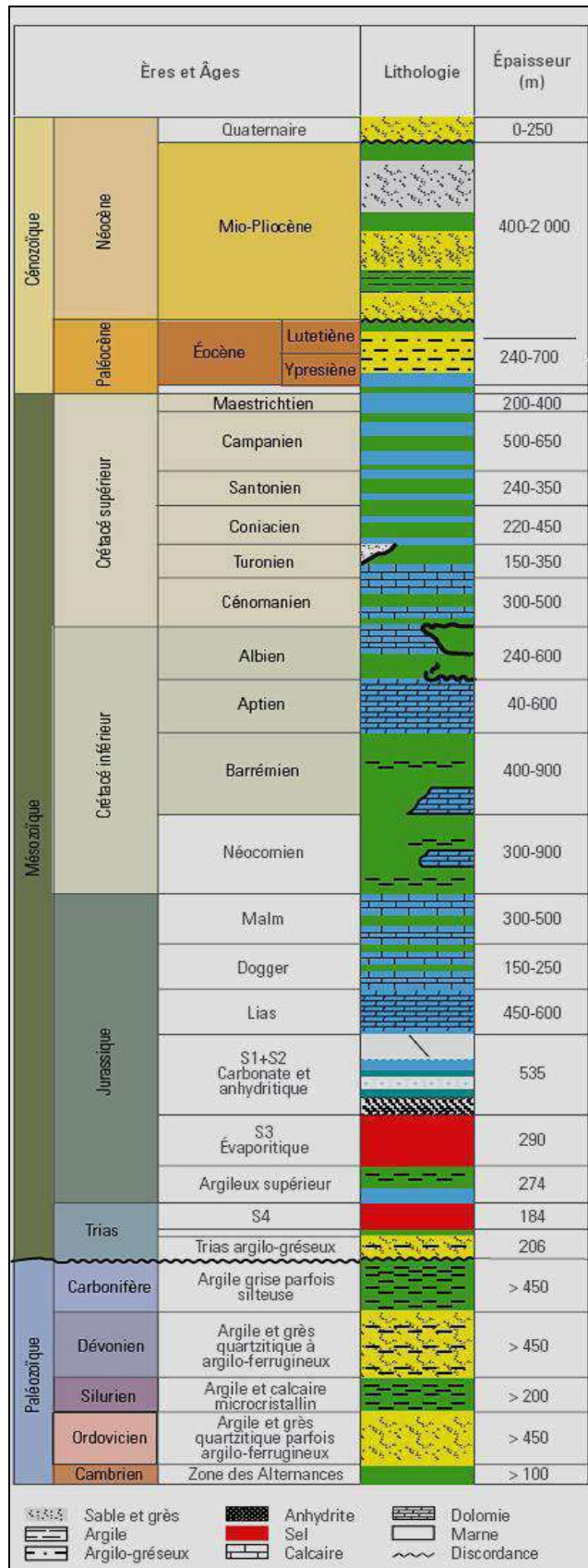


Fig.18. Coupe stratigraphique synthétique du chott Melrhir [(Schlumberger et al, 2007)] In [(ZATOUT, 2017)].

1-2-Nappe du complexe terminal

Le terme de Complexe Terminal désigne les formations les plus récentes déposées au Bas Sahara, en opposition avec les formations du Continental Intercalaire. Dans le bassin oriental, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal sont séparés par la transgression Cénomaniennne. Le Complexe Terminal au sens strict englobe : le Sénonien, l'Éocène, le Miocène, et le Plio-Quaternaire. Alors que le Complexe Terminal au sens large comprend en plus le Turonien.

La nappe du Complexe Terminal s'étend sur la majeure partie du sous bassin oriental mais aussi en Tunisie et Libye. Il est compris entre la dorsale du M'Zab à l'ouest, le plateau de Tinrhert au Sud, la région des Chotts au Nord et les frontières Tunisienne et Libyenne à l'est.

Les formations peu perméables n'existant pas partout permettent une drainage et une mise à niveau des pressions hydrostatiques des différentes nappes. Ceci a justifié le regroupement des nappes du Crétacé supérieur et de l'Éocène et celles du Tertiaire continental comme un seul et même ensemble hydraulique appelé Complexe Terminal [(Unesco, 1972)] [(OSS, 2003)].

Cette nappe peut circuler dans l'une ou les trois formations litho stratigraphiques suivantes : [(GUENDOZ, 1985)]

-Sénonien et Éocène carbonatés

- Miopliocène sableux

- Quaternaires

La limite du toit du substratum du Complexe Terminal (figure 19) reste assez confuse, du fait de la variation des faciès de l'Eocène inférieur. Ce dernier étant généralement évaporitique (marno- gypseux), il est rattaché aux formations du Cénomaniennne qui constitue le substratum continu du Complexe Terminal. À cela s'ajoute la formation du Turonien carbonaté et à forte perméabilité par endroit.

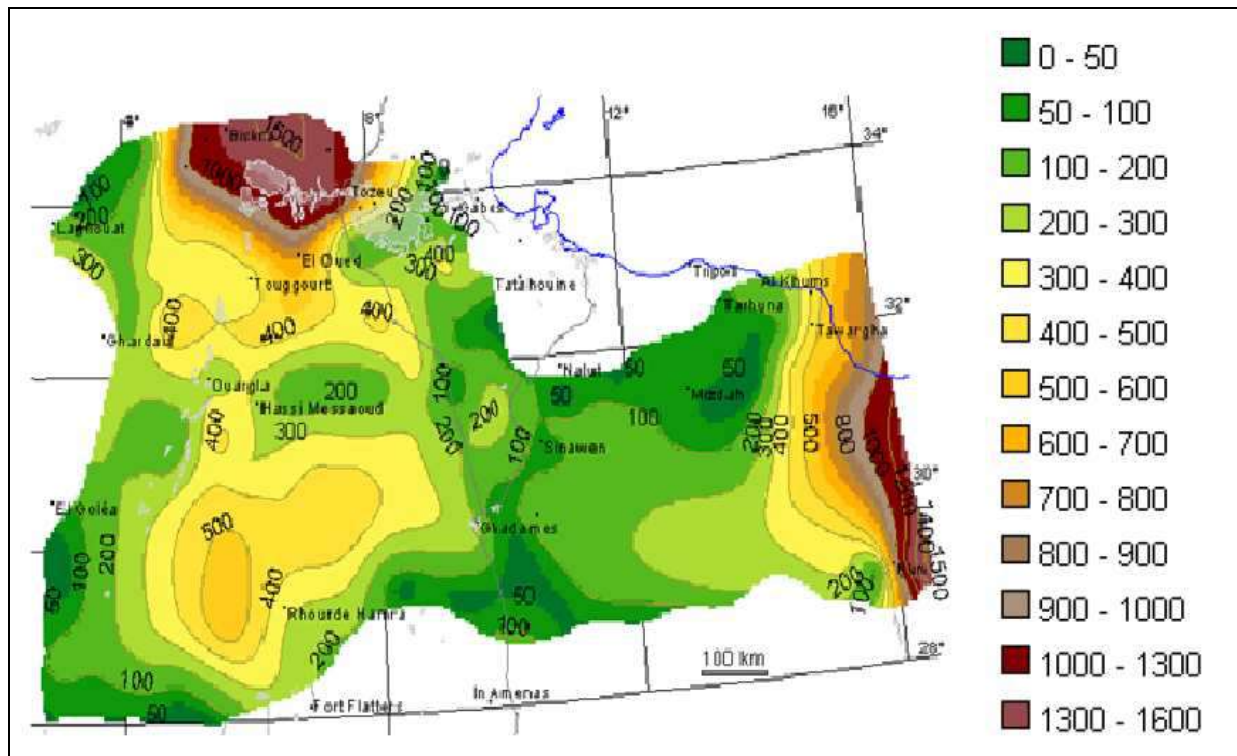


Fig.19. Carte des épaisseurs du CT [(OSS, 2003)].

1-2-1-Piézométrie

Depuis les travaux de Cornet en 1964 [(CORNET, 1964)] , plusieurs cartes ont été établies et réactualisées[(Unesco, 1972)]. La plus récente [(OSS, 2003)], la carte (figure 20) montre, un écoulement qui se fait vers l'exutoire tunisien, situé dans la région de Tozeur. Dans la partie Nord du Bas Sahara le sens d'écoulement est de L'Ouest (avec un niveau piézométrique d'environ 700 mètres au niveau de Laghouat) vers l'Est (où le niveau piézométrique atteint les 50 mètres au niveau de Tozeur). Un autre sens d'écoulement se fait du Sud vers le Nord.

Il faut, cependant, noter que du fait de l'hétérogénéité spatiale et des différents aquifères, l'écoulement se fait en relais, par transfert d'un système à un autre.

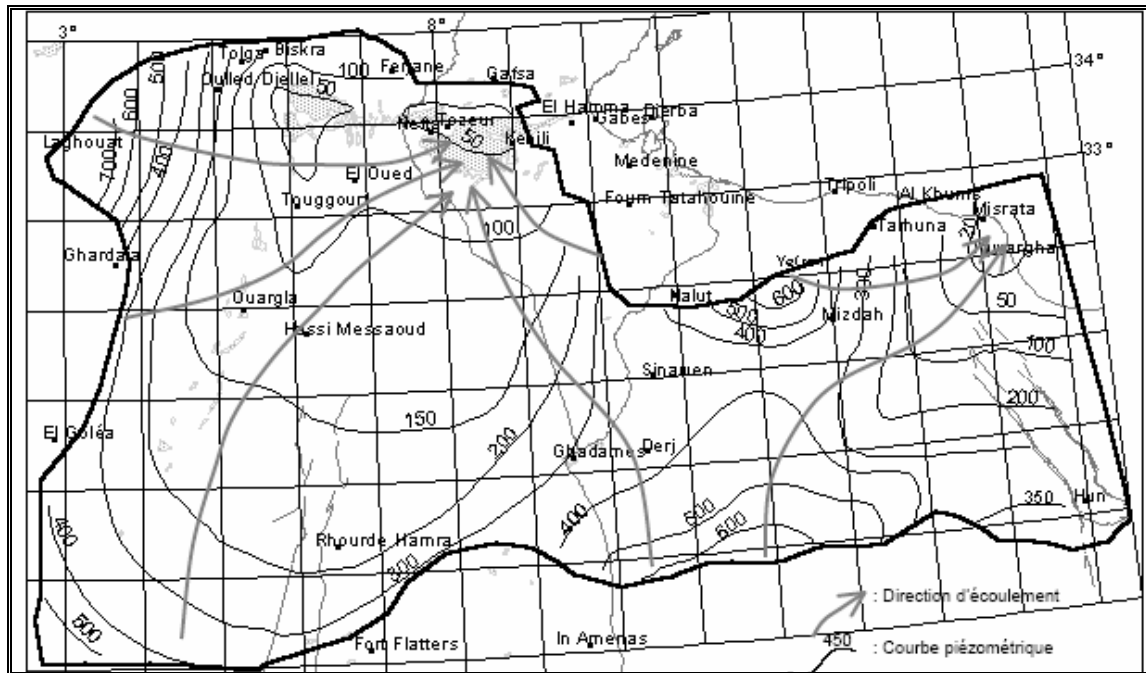


Fig.20. Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal [(OSS, 2003)].

1-2-2-Le complexe terminal à la région d'étude

Dans la partie sud -cuvette d'Ouargla et ses environs -de la région d'étude le CT est composé des formations litho stratigraphiques(figure 21) reconnues à l'échelle du bassin à savoir : [(Guendouz et al, 1996)].

- Les sables argileux du Mio-Pliocène
- Les formations carbonatées du sénonien.

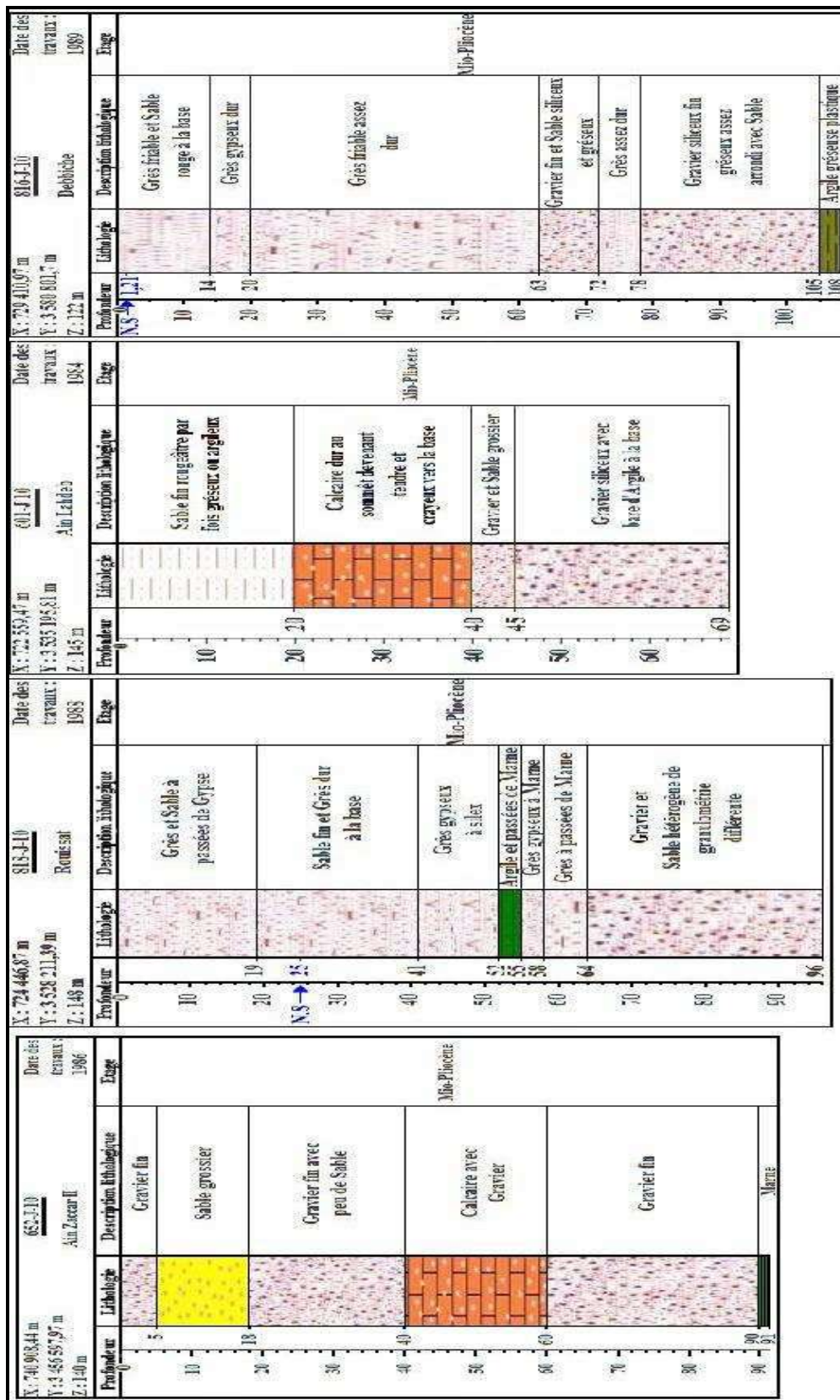


Fig.21. Colonne litho stratigraphiques du CT dans la région d'étude –zone de Ouargla[(HOUARI I et al., 2014)].

Dans la partie nord de notre région d'étude le complexe terminal se résume généralement par cette colonne (figure 22).

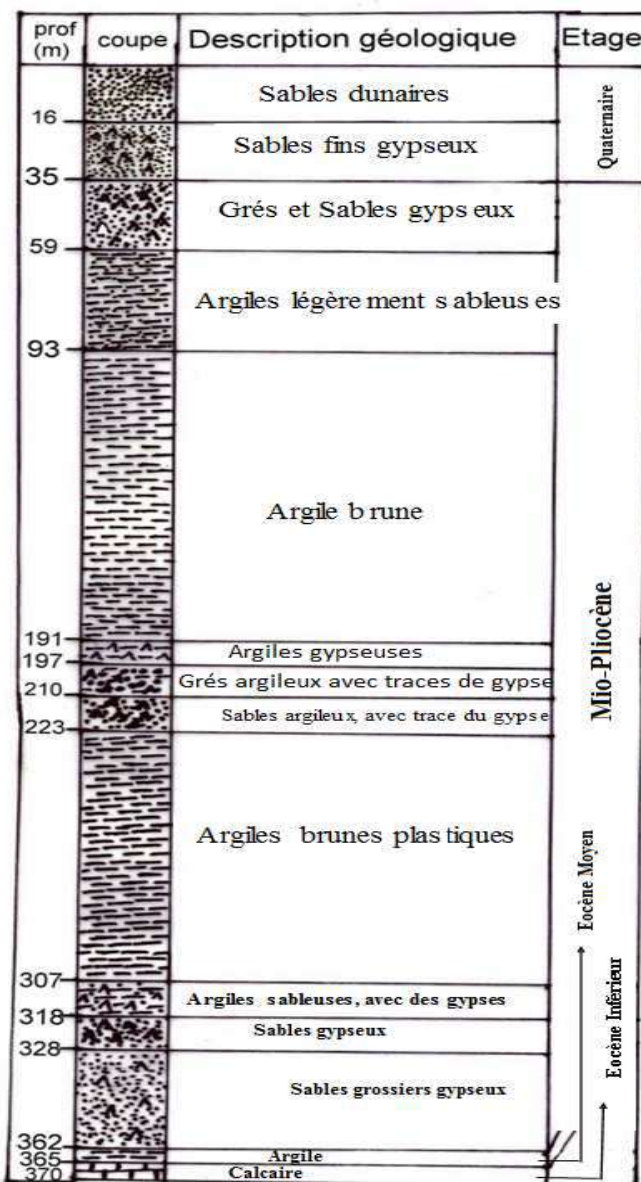


Fig.22. Colonne litho stratigraphique de CT à Oued Souf [(BOUSELSAL, 2007)].

La piézométrie de nappe du complexe terminal montre un écoulement du Sud-ouest vers le Nord-est comme reconnu à l'échelle du bassin, La carte piézométrique dressée à l'échelle de la cuvette [(BELLAOUER, 2008)] montre les principaux axes d'écoulement suivants :

- Un écoulement Sud-Nord, du centre ville de Ouargla -Rouisset vers la zone de N'Goussa;
- Un écoulement SW-NE, de la ville de Ouargla vers la zone des Chotts (Oum-Eraneb).

Les paramètres hydrodynamiques au niveau de la zone d'étude sont définis comme ce suit

- 8.10^{-3} à 9.10^{-2} m²/s pour la transmissivité.

- 5.10^{-3} à 3.10^{-2} m²/s pour le coefficient d'emmagasinement.

Et pour la piézométrie de CT à Touggort "le sens principal de l'écoulement dans la région de l'Oued Righ est orienté vers le chott Merouane (exutoire naturel). Dans la région d'Oum Thiour au Nord le sens d'écoulement est également orienté vers le chott de direction NO-SE. Dans la partie sud, au niveau des localités de Sidi Amrane, djamaa, Tendla, Sidi khilil et Meghaier, le sens d'écoulement est de direction Sud-Nord" [(BELKSIER, 2007)] In [(OSS, 2003)].

Quant à oued Souf Les formations du complexe terminal englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Miopliocène, et elles sont représentées par trois ensembles aquifères principaux; les calcaires et dolomites du Sénonien, des sables l'Éocène inférieur, et des grès et des graviers du Pontien, et par les sables du Miopliocène. La profondeur du Complexe Terminal est comprise entre 100 et 600 m, et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m [(BOUSELSAL, 2007)].

Chapitre 4

Matériels et méthodes

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail consiste à déterminer des paramètres hydro chimiques et isotopiques des différents aquifères de la région d'étude ainsi faire ressortir les caractéristiques chimiques et isotopiques de chaque masse d'eau, ces derniers nous guideront de connaître l'origine de ces eaux et de déduire les zones de mélange

En fait, on peut subdiviser les différentes masses d'eau comme suivant

Les eaux de la nappe de CI, celles de CT, la nappe phréatique (eaux de surface, chott, sebkha, zone non saturée), les eaux de pluie.

Donc sur terrain on a prélevé les échantillons en faisant quelques mesures in situ comme le pH, conductivité, dosage du carbonate....etc. Puis les échantillons d'eaux prélevées sont acheminés vers les laboratoires dans lequel; on fait les analyses isotopiques et les analyses chimiques.

Dans le but de faciliter le travail on a subdivisé notre région d'étude en zone (figure 23)

Zone 1 ; c'est la cuvette d'Ouargla et ses environnements

Zone 2 ; c'est la zone de Hdjira et ses environnements

Zone 3 ; c'est la zone de Taibet

Zone 4 ; zone de Melrhir

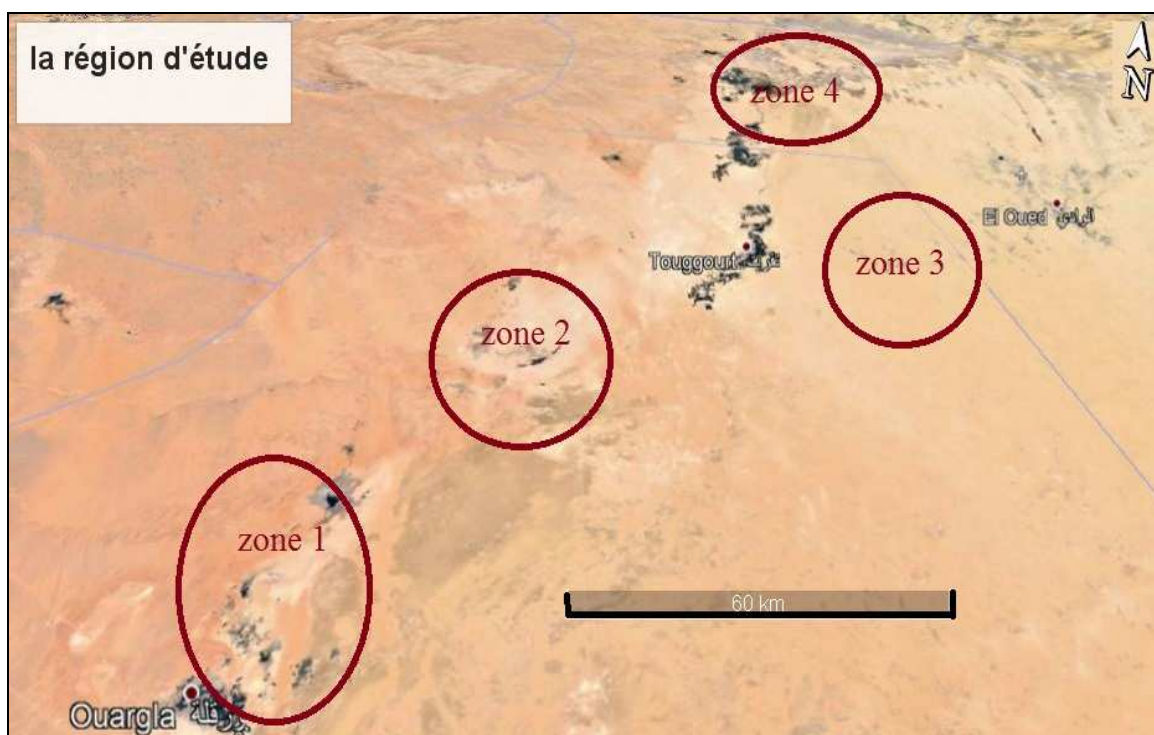


Fig.23. Représentation schématique montrant les zones de la région d'étude. [(Google earth, 2018)]

1-Le travail au terrain

1-1-Campagnes d'échantillonnage

1-1-a-Campagne 2017 Une campagne d'échantillonnage a été faite dans la région d'étude, nous avons ramené neuf 09 échantillons (figure 24), on a ciblé les nappes profondes de CI et de CT ainsi la nappe superficielle. L'analyse chimique a été faite au laboratoire de géologie du Sahara LGS à l'université d'OUARGLA (Algérie) et l'analyse isotopique ^{18}O , et le ^2H ont été faites au laboratoire d'hydro-science lama Montpellier (France).

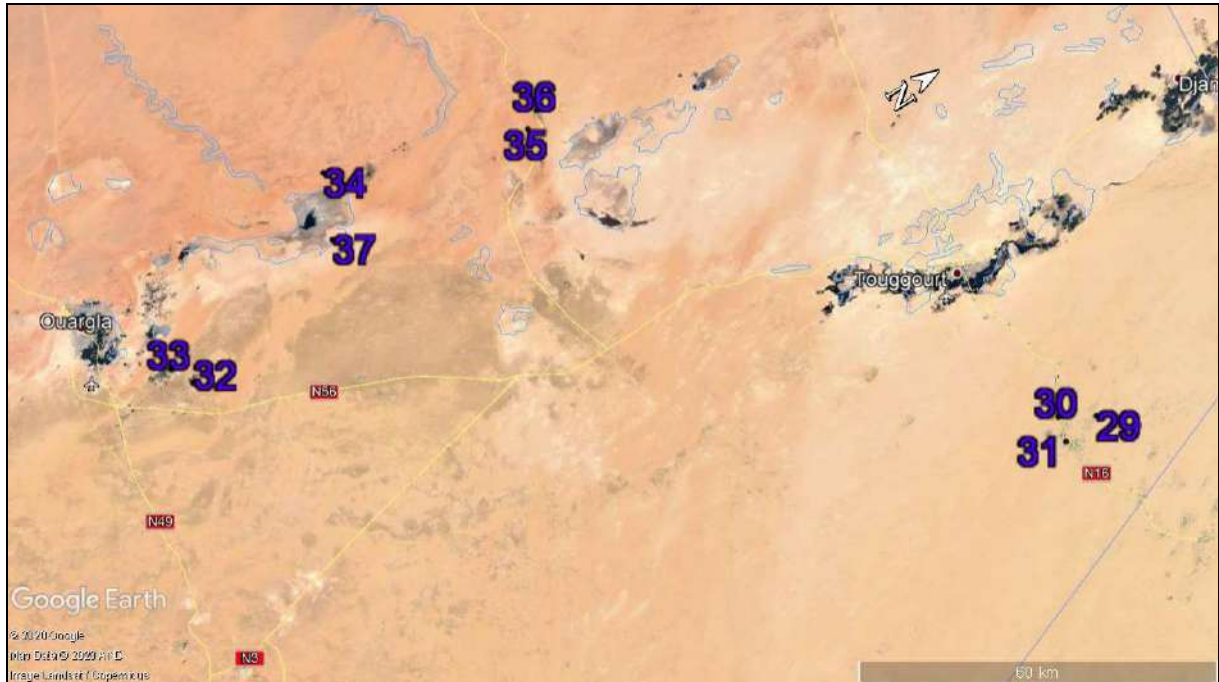


Fig.24. Localisation des points d'eau(campagne 2017)[(Google earth, 2018)].

1-1-b-Campagne 2018-2019

Cette campagne(figure 25) a été effectuée en mois de mars 2018 et janvier 2019, elle couvre presque toute la région d'étude zone 1 zone 2 zone 3 et zone 4 ,en ciblant les nappes profondes de CI et de CT ainsi les nappes superficielles , sebkha, chott et les eaux de pluie.En fait, les échantillons sont acheminés vers les laboratoires d'analyse chimique et isotopique à l'université d'Almeria (Espagne).

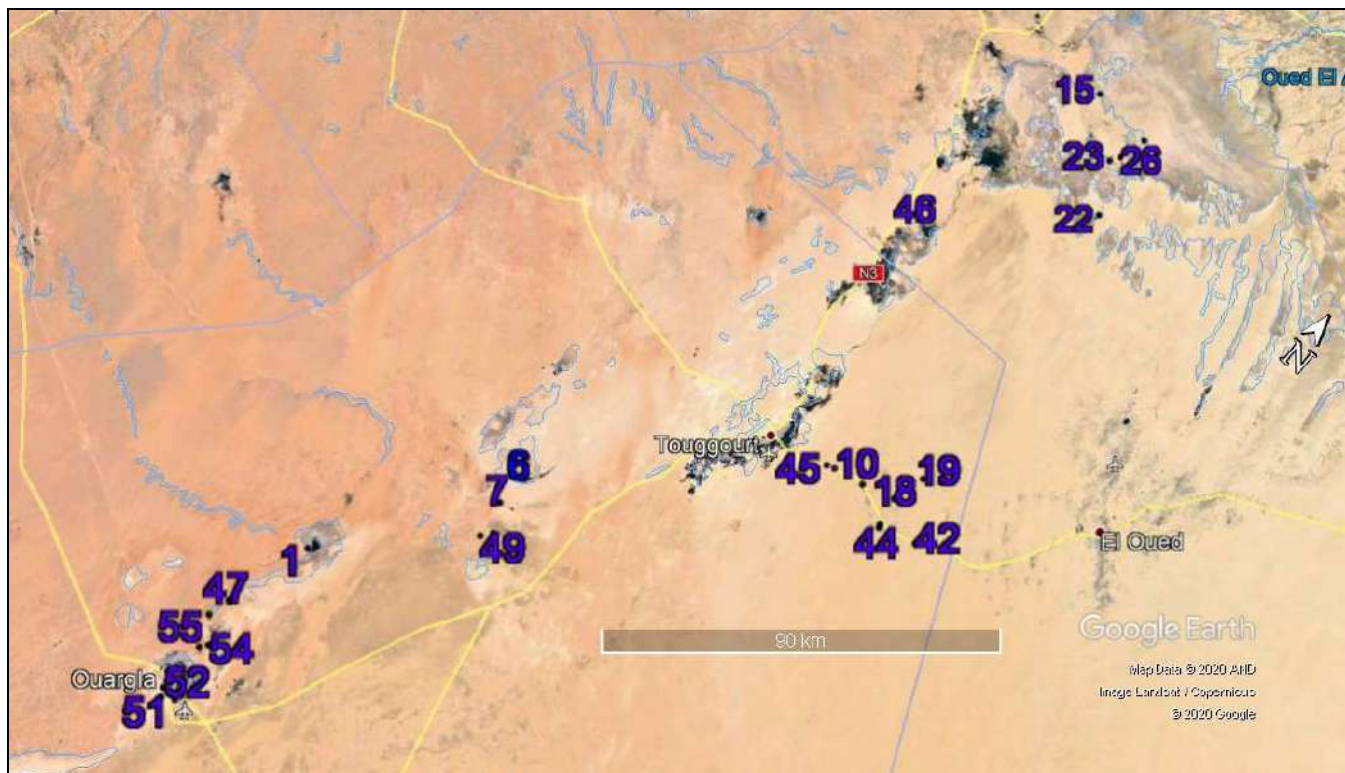


Fig.25. Localisation des points d'eau de campagne 2018-2019

1-1-c-Eau de pluie

Connaître les caractéristiques géochimiques des eaux de pluies dans notre région d'étude n'est pas du tout facile, dû à l'absence de stations des mesures et de collecte d'eau ; ainsi la présence de pluie d'elle-même qui il pleut très rarement. La pluviométrie ne dépasse pas 50 mm par an (voire le chapitre de climatologie). En effet, nous avons utilisé nos propres moyens –très simples-pour la collecte d'eau de pluie (figure 26) : dès le début de la pluie on attend un peu, afin que les gouttelettes rincent un peu l'atmosphère, puis on installe le petit récipient en plastique, tout en le rinçant par les eaux de pluie deux ou trois fois. Au cours des heures pluvieuses, on remplit la bouteille (échantillon) d'eau progressivement afin d'obtenir un échantillon bien représentatif de la pluie.

Les échantillons d'eau collectés sont représentés dans le tableau (4) suivant

Tab.4. Les échantillons collectés lors des précipitations à Taibet.

Sample	Mois	Année
ALG TA 38	DÉCEMBRE	2017
ALG TA 56	MARS	2019
ALG TA 60	AOUT	2019
ALG TA 61	SEPTEMBRE	2019



Fig.26. Matériel simple utilisé pour la collecte d'eau de pluie.

Les mesures in-situ

lors des campagnes d'échantillonnage nous avons utilisé un multi-paramètre de type WTW (figure 27) pour des mesures in situ tels que la température T° , la conductivité électrique, le pH, Eh, la salinité, le %Na Cl et la densité.

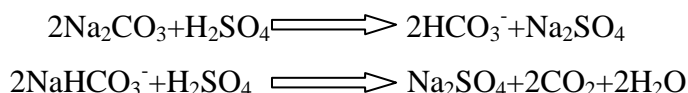


Fig.27. Multi-paramètre type WTW.

Dosage du carbonate in situ

Le dosage des ions bicarbonate HCO_3^- se fait au terrain. Les carbonates n'existent qu'à $\text{pH} > 8.3$, et les bicarbonates si $4.4 < \text{pH} < 8.3$ il est facile de savoir au cours d'un dosage de l'acidimétrie doublée d'une mesure de pH , à quel moment ces ions sont encore ou non présents dans l'échantillon.

Lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent en deux étapes :



On prélève une prise d'essai de 100ml de l'eau à analyser V_{PE} (ml) et on fait le titrage par H_2SO_4 (0.01N) goutte à goutte jusqu'à ce que le pH mètre indique un $\text{pH} = 4.4$ noter le volume V (ml) versé ou le changement de la couleur (virage) à l'aide d'une solution colorée (rouge de méthyle)

$$\text{HCO}_3^- \text{ (méq/l)} = V(\text{ml}) \cdot 0.01 \cdot 1000 / V_{\text{PE}}(\text{ml})$$

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/l)} = \text{HCO}_3^- \text{ (méq/l)} \cdot 61$$

Avec : V_{PE} = volume de la prise d'essai. V = volume de H_2SO_4 versé.

2- Travail au laboratoire

2-1-Analyses chimiques des eaux

2-1-1 Laboratoire géologie du Sahara LGS

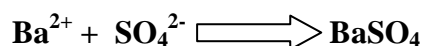
Toutes les analyses chimiques ont été faites après filtration des échantillons. La plupart des ions majeurs ont nécessité de fortes dilutions qui atteignent parfois 20000 fois pour les eaux de chott. Les différentes méthodes utilisées sont les suivantes.

Gravimétrie

Les ions sulfates SO_4^{2-} sont déterminés par gravimétrie qui consiste à précipiter, en milieu acide et à chaud, l'ion sulfate par l'ion baryum. La teneur en sulfate est déterminée en mesurant la masse du précipité de sulfate de baryum formé, préalablement séché à l'étuve.

Dosage de sulfates

La méthode gravimétrique présentée est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum.



Mode opératoire (figure 28)

- Prélever 10 à 50 ml de l'eau à analyser et le transférer dans un bécher de 250 ml.
- Porter à douce ébullition à 60-65 °C dans un bain- marie ou sur un bain de sables.

- Faire précipiter les sulfates à chaud en ajoutant aux gouttes-à-gouttes à la pipette de la solution de chlorure de baryum . Quand il ne se forme plus de précipités, ajouter quelques gouttes de chlorure de baryum en excès.
- Laisser les béchers dans le bain- marie jusqu'à ce que les sulfates soient complètement déposés.
- Filtrer le surnageant en utilisant du papier filtre sans cendre.
- Ajouter 30 à 40 ml d'eau distillée bouillante , laisser les béchers dans un bain- marie jusqu'au dépôt des sulfates.
- Filtrer le surnageant et répéter cette opération trois fois.
- Faire passer le précipité sur le filtre à l'aide d'eau bouillante.
- Laver le précipité à l'eau bouillante jusqu'à l'élimination complète des chlorures (faire le test à AgNO_3).
- Transférer le filtre contenant le précipité dans une capsule tarée.
- Faire sécher à l'étuve à 105°C pendant 1 heure.
- Transférer la capsule dans un four à moufle, calciner à 500°C pendant 1 heure.
- Laisser refroidir la capsule dans le four, ensuite dans un dessiccateur. Peser après refroidissement.

SO_4^{2-} (en mEq/l) = $B.8,56.1000.A/V$ avec : B = poids de BaSO_4 précipité. V = volume de la prise d'essai. A = inverse du facteur de dilution.



Fig.28. Dosage des ions sulfate par gravimétrie.

Spectrométrie d'émission atomique à flamme

L'appareil utilisé est le photomètre à flamme de marque Jenway (Figure 29). C'est un photomètre à flamme d'émission à basse température, destinée à la détermination simultanée du Sodium Na^+ , du Potassium K^+ , Calcium Ca^{++} .



Fig.29. Photomètre de flamme Jenway.

L'établissement du courbe d'étalonnage est nécessaire avant de passer l'échantillon à l'appareil, on prépare une gamme d'étalons ou l'intensité émise est proportionnelle à la concentration, en fait, pour la concentration faible l'absorbance est proportionnelle à la concentration selon la loi de Beer-Lambert en obtenant finalement une droite représentée dans la figure (30).

Nous avons analysé les éléments suivant : Sodium, Na^+ , du Potassium K^+ , et calcium Ca^{++} .

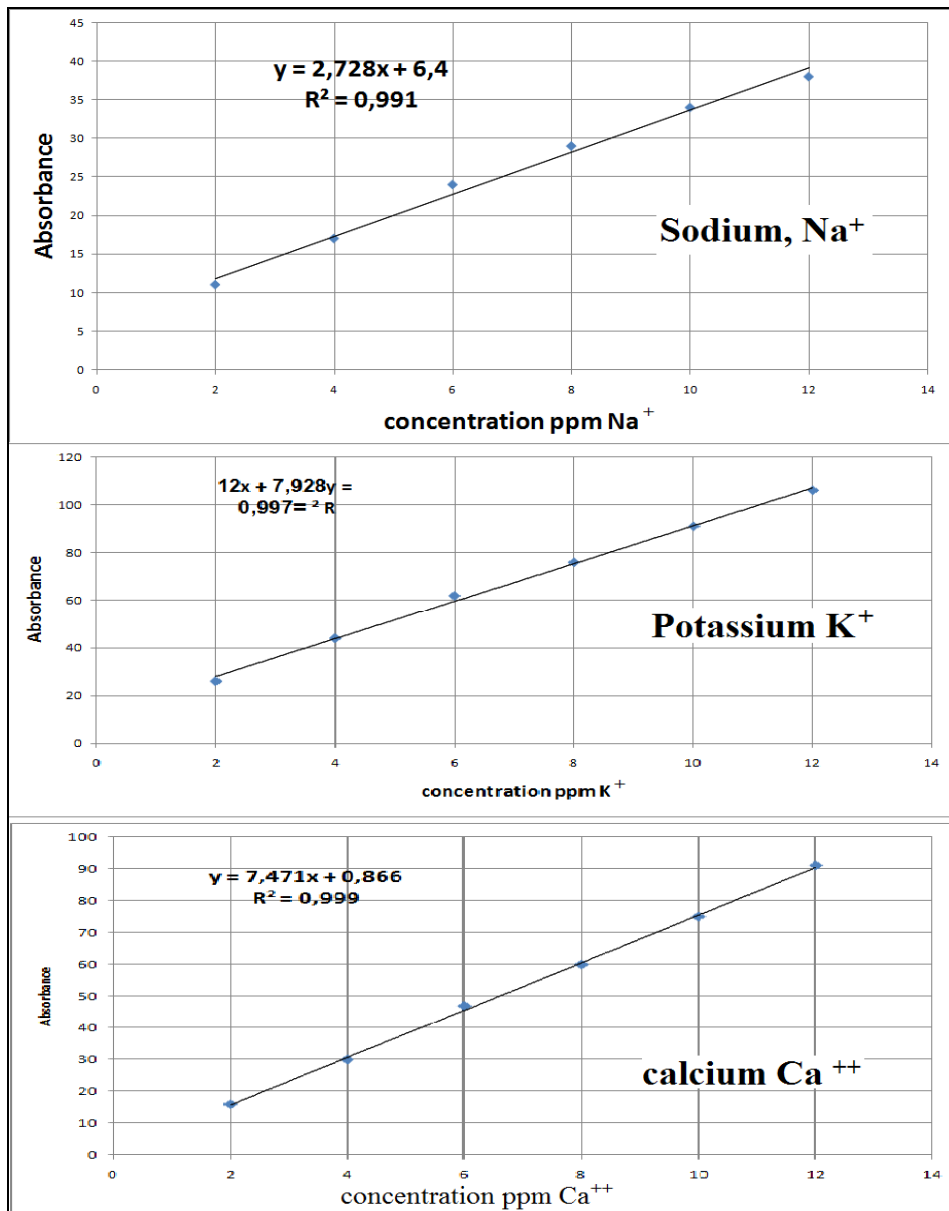


Fig.30. Courbes d'étalonnage pour photomètre de flamme Jenway.

Méthode potentiométrique

Pour les ions de chlorure Cl⁻ on utilise cette méthode par appareil Titrino 716 (figure 31). Le chlore est précipité par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. L'appareil doit être calibré et on le laisse fonctionner automatiquement et à la fin, il affiche la concentration en Chlorure.



Fig.31. Potentiomètre Titrino 716 Metrohm.

2-1-2- Laboratoire de l'université d' Almería

Les échantillons d'eaux de la deuxième campagne 2018-2019 ont été analysés au laboratoire de l'université d' Almeria par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (figure 32).



Fig.32. Spectrométrie de fluorescence des rayons X Almería Espagne.

Les ions contenus dans l'échantillon sont séparés parce qu'ils se déplacent à différentes vitesses dans la colonne, le tout dépendant de leur affinité pour la résine échangeuse d'ions. La séparation des ions est en fonction de leur charge et de leur taille ; plus les ions sont petits, moins ils seront retenus et plus les ions sont chargés, plus ils seront retenus.

L'éluant et l'échantillon passent à travers un suppresseur, un module permettant d'augmenter la sensibilité du détecteur en soustrayant la conductivité électrique spécifique à l'éluant et en diminuant les bruits de fond.

Un détecteur mesure la conductivité électrique de chaque ion séparé contenu dans l'échantillon et un signal est envoyé à l'ordinateur.

Les ions des solutions électrolytiques ont des conductivités électriques spécifiques qui peuvent être quantifiées. Le dosage est possible en comparant le signal obtenu pour un échantillon avec le signal d'une solution de concentration connue. L'identification des ions est possible grâce à leur temps de rétention particulier, obtenus préalablement lors de la préparation des courbes de calibration tracées à partir de solutions témoins.

2-2- les analyses isotopiques (isotopes stables de l'eau ^{18}O et ^2H)

2-2-1-LAMA Montpellier, France

Toutes les eaux de la campagne 2017 ont été acheminées vers ce laboratoire afin de faire les analyses isotopiques ^{18}O et ^2H , l'appareil utilisé est le Spectromètre de Masse pour Rapports Isotopiques Isoprime (figure 33), capacité de travail en injection double (Dual Inlet) et en flux continu. Instrument dédié entièrement à la mesure des isotopes stables de l'eau. Mesure des rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sur la molécule CO_2 après équilibration

Mesure des rapports $2\text{H}/1\text{H}$ en flux continu, après réduction de H_2O en H_2 sur un réacteur de Cr à 1070°C sous flux d'He.



Fig.33. Spectromètre de Masse pour Rapports Isotopiques Isoprime.

2-2-2 Laboratoire : université d'Almeria Espagne

Toutes les eaux de la campagne 2018-2019 ont été acheminées vers ce laboratoire pour les analyses isotopiques ^{18}O et ^2H , l'appareil utilisé est Spectromètre de masse L2140-i Picarro

(figure 34) dont les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène ont été mesurés simultanément par Cavity Ringdown Spectrometry (CRDS) à l'aide d'un analyseur d'isotopes d'eau L2140-i Picarro (Steig et al., 2014) In (Gazquez et al., 2015) avec une interface d'un vaporisateur de haute précision A0211 (Picarro, Santa Clara, Californie, États-Unis). L'instrument utilise l'"Air ZERO" comme gaz vecteur. Chaque échantillon est injecté dix fois dans le vaporisateur, et chauffé à 110°C. Les effets de mémoire d'échantillons précédents ont été évités en rejetant les trois premières analyses. Les valeurs des 7 dernières injections ont été obtenues avec les précisions suivantes : ± 0.02 ‰ pour $\delta^{17}\text{O}$, ± 0.03 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de ± 0.19 ‰ pour $\delta^2\text{H}$. comme observé à partir de l'analyse répétée d'eau étalon inhouse water standard (n = 54) avec les échantillons d'eau. Les résultats ont été normalisés par rapport à V-SMOW en analysant les étalons internes avant et après chaque série de quinze à vingt (15 à 20) échantillons [26].



Fig.34. Spectromètre de masse L2140-i Picarro Almería Espagne.

À cette fin, trois étalons d'eau internes (JRW, BOTTY, SPIT) ont été calibrés par rapport à V-SMOW et SLAP, en utilisant respectivement; $\delta^{17}\text{O}$ de 0.0‰ et -29.69865‰ et $\delta^{18}\text{O}$ de 0.0‰ and -55.5‰, (Schoenemann et al., 2013) In (Gazquez et al., 2015).

Toutes les valeurs d'excès en $\delta^{17}\text{O}$ sont données en unités par méga (0,001 ‰). Le $\delta^2\text{H}$ de l'étalon interne a été calibré par rapport à V-SMOW, GISP et SLAP. La dérive en cours de fonctionnement de l'instrument a été contrôlée en analysant un étalon d'eau toutes les 6 échantillons. L'excès de $\delta^{17}\text{O}$ a été calculé pour chaque injection en utilisant les valeurs normalisées de $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$. Les excès de $\delta^{17}\text{O}$ des 7 analyses répétées ont ensuite été

moyennés. Les précisions typiques d'excès en $\delta^{17}\text{O}$ et l'excès en ^2H dans les étalons d'eau étaient de 13 par méga et 0,2 ‰. Aucune valeur excès en ^{17}O n'a été rejetée.

L'appareil est capable de séparer des atomes ou des ions de masses différentes et de mesurer leurs abondances relatives où un gaz contenant différents isotopes d'un élément (^{12}C et ^{13}C du CO_2 , par exemple) est ionisé dans une source d'ions. Les ions positifs sont accélérés par une haute tension et entrent ensuite dans un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique. La trajectoire des ions devient alors circulaire de par la force de Lorentz. Le rayon du cercle dépend de la masse de l'ion: les ions les plus lourds suivront un cercle plus grand. De cette façon, les ions se séparent et peuvent donc être collectés. Dans les collecteurs, les ions perdent leur charge électrique, produisant ainsi de faibles courants électriques qui peuvent être mesurés.

Expérimentation sur les essais d'évaporation au laboratoire des eaux de CI et celles de pluie

C'est au laboratoire de l'université d'Almería a été faite cette expérimentation (figure 35) qui consiste à suivre l'évolution des teneurs isotopiques (isotopes stables de l'eau ^{18}O et ^2H) au cours d'évaporation des eaux et de les comparer par les teneurs isotopiques réelles des eaux de surface de la région.



Fig.35. Expérience d'évaporation des eaux au laboratoire.

Le procédé de cette expérience consiste à évaporer l'eau à une température constante (dans notre cas : 35°C) et à la pression atmosphérique. Nous avons choisi les eaux de la nappe profonde CI et les eaux de pluie; le CI car c'est le plus exploité d'une part et d'autre part les teneurs isotopiques des eaux de CT sont enrichies par rapport à celles de CI .

Le principe est de mettre les eaux à l'étuve et on les mis dans une étuve à température constante et suivre systématiquement (Tableau 5) l'évolution de signal isotopique après chaque taux précise d'évaporation.

Tab.5. Représente les suivis d'essais d'évaporation au laboratoire.

SMPL	% Eva	w wgh in(gr)	w wgh out(gr)	temp	wgh loss	% (lossed)	% (saved)
Pluie	0						
CI	0						
Pluie	6	74,1	71,8	45	2,3	3	97
CI	6	78,7	76,4	45	2,3	3	97
Pluie	32	142,2	115,3	45	26,9	19	81
CI	25	150,4	126,6	45	23,9	16	84
Pluie	42	78,8	61,9	45	16,9	21	79
CI	48	70,4	52,4	45	18,0	26	74
Pluie	74	98,8	60,9	45	37,9	38	62
CI	75	100,2	61,0	45	39,2	39	61
Pluie	87	75,8	38,5	45	37,3	49	51
CI	89	77,1	39,4	45	37,7	49	51

3-les données et les logiciels utilisées

Données de L'ANRH 2018: l'agence nationale des ressources hydrauliques de la région Ouargla réalise d'une année à autre des campagnes d'échantillonnage et des mesures; afin de suivre la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe superficielle, et de préciser le sens d'écoulement, ainsi que faire ressortir les paramètres physico-chimiques des eaux, tel que, la température, le pH, la conductivité électrique.....

Données de ONM (Office National de Météorologie) pour le traitement des composants climatiques.

Programme informatique Phreeqc , version 3.3.7 est un programme écrit en C par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo . Il est diffusé par l'USGS (United States Geological Survey). Il est utilisé pour simuler des réactions chimiques et du transfert dans des eaux naturelles et polluées. Les premières versions remontent à 1980. Aujourd'hui, il dispose d'une interface interactive sous Windows et Mac. La version finale est la III.3.3.7 et c'est celle-ci que nous avons utilisé pour bénéficier de ses innombrables améliorations et services. Il nous a permis de déterminer la spéciation des espèces chimiques, de calculer les indices de saturation des minéraux In [(ZATOUT, 2017)].

Programme DIAGRAMME : (Développé par l'Université d'Avignon, France):(SIMLER, 2019)

il permet

-de calculer les âges radiométriques des eaux.

-de représenter graphiquement:

-diagrammes triangulaires de piper qui définit le facies chimique de la solution étudiée

-diagrammes verticales de Sholler-Berkaloff qui permet de comparer la composition chimique des solutions provenant de différents aquifères.

-les corrélations entre les ions afin de distinguer leurs origines.

Chapitre 5

Géochimie isotopique

1-Généralité

On appelle **isotopes**, des éléments chimiques, dont les atomes comportent le même nombre de protons (électriquement positifs); mais un nombre de neutrons (sans charge électrique) différents (figure 36). Ils ont donc le même numéro atomique, (c'est le nombre de leurs protons) mais des masses atomiques différentes (c'est le total de leurs nucléons : protons et neutrons). Comme les propriétés chimiques de ces éléments sont liées aux nombres de leurs protons, les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques. Mais comme la masse de leurs atomes n'est pas la même, ils ont des propriétés physiques légèrement différentes. L'identité des propriétés chimiques faites qu'ils sont inclus indistinctement dans des composés les contenant; la différence des propriétés physiques faites qu'eux, ou leurs composés, sont affectés différemment par des transformations physiques telles que fusion, cristallisation, évaporation, etc. [(Foucault et al., 2009)] Par exemple, la vapeur d'eau H_2O , comporte une moindre proportion de ^{18}O que l'eau liquide dont elle est issue.

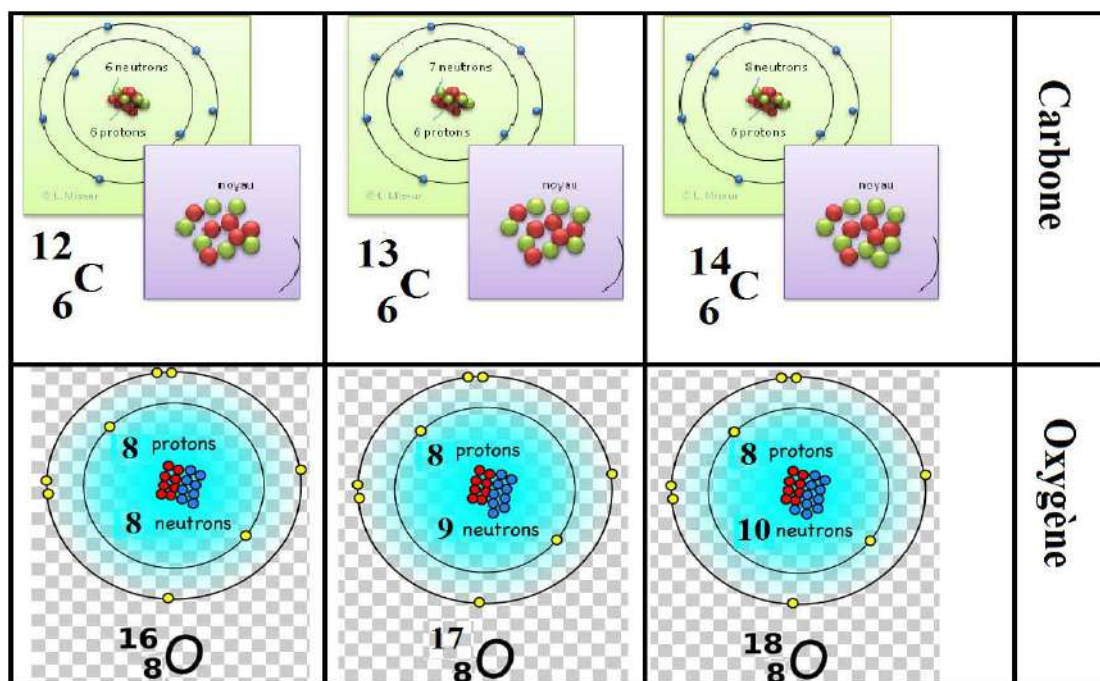


Fig.36. Schéma explicatif de l'isotope (Carbone et Oxygène).

Certains isotopes sont radioactifs et se transforment, au cours du temps, en d'autres isotopes ou en d'autres éléments, d'autres sont stables.

Toutes les études concernant les isotopes nécessitent l'utilisation de rapports isotopiques, c'est-à-dire des proportions de deux isotopes d'un même élément. Généralement, on utilise ces rapports par référence à un standard, qui est un échantillon de composition connue avec une grande précision et qui est distribué entre différents laboratoires, ce qui a l'intérêt de rendre leurs mesures à coup sûr comparables.

2-Historique

Henri Becquerel (figure 37) découvrit en 1886 que l'uranium et ses composés émettent continuellement un rayonnement comme les rayons X, traverse d'assez grandes épaisseurs de matière, noircit la plaque photographique, ionise l'air, et rend de nombreuses substances lumineuses. Il apparut de plus, que l'intensité de ce rayonnement ne peut être modifiée, ni par voie chimique, ni par voie physique. Pierre et Marie Curie, réussirent un peu plus tard à séparer de l'uranite, un élément, le radium (ce qui leur a valu le prix Nobel) dont l'intensité d'émission dépassait celle de l'uranium de plusieurs ordres de grandeur. Aujourd'hui, Il est bien établi que ce rayonnement résulte d'une transformation spontanée de noyaux atomiques instables d'un élément en noyaux d'autres éléments: c'est le phénomène de la radioactivité naturelle. Elle peut bien être provoquée dans les éléments légers par bombardement de noyaux de ces éléments: la radioactivité ainsi observée est dite artificielle. Grâce aux travaux de Pierre et Marie Curie, Becquerel, et Rutherford, il a été établi que ce rayonnement renferme trois catégories de rayons qui se distinguent par leur pouvoir pénétration et d'ionisation: Alpha, Bêta et Gamma

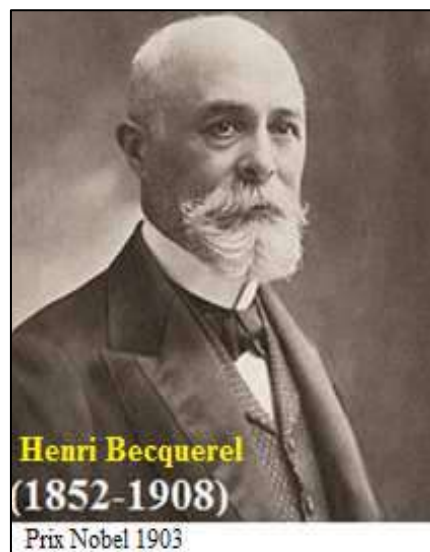


Fig.37. Henri Becquerel.

Depuis ces découvertes de nouvelles voies ont été ouvertes à la science en général et à la science de la terre en particulier. Martin Kanem et Samuel Ruben en 1940 ont découvert l'isotope ^{14}C en étudiant le rayonnement cosmique met en évidence sa composante neutronique.

Le chimiste Libby (1947) pose les hypothèses de bases de la méthode de datation par le radiocarbone: existence de ^{14}C dans la stratosphère, et participation de ^{14}C au cycle général du carbone. Ces deux hypothèses furent rapidement vérifiées par Libby. Des auteurs dont Arnold et Libby (1949) furent les premiers essais de datation par le radiocarbone sur du bois provenant de nécropoles égyptiennes calées chronologiquement, et les premières datations confirmèrent les âges historiques prouvant ainsi l'efficacité de la méthode de datation au radiocarbone.

La mise en évidence des isotopes naturels et artificiels, la mise au point du spectromètre de masse et le scintillateur liquide, ont contribué à l'émergence d'une discipline dénommée: *Hydrologie Isotopique*.

Actuellement l'utilisation de ces techniques en hydrologie est largement développée en sa méthodologie analytiquement et théoriquement détaillée. Il en a été mis en place à travers le monde, un réseau de stations de collecte des eaux de précipitations pour définir des niveaux de référence notamment pour le deutérium, l'oxygène-18, et le tritium. Il a été de même pour le radiocarbone dont l'exploitation a servi à la mise en évidence des différentes variations climatiques dénommées: **Paléoclimat**.

Les explosions thermonucléaires au cours des années 1950 à 1960 ont eu pour conséquence un accroissement très important des teneurs en tritium dans les précipitations, jusqu'au moratoire sur les essais nucléaires aériens en 1963, date à partir de laquelle les teneurs ont commencé à diminuer.

L'estimation de la recharge par la localisation du pic de tritium des années soixante a été efficacement employée dans la zone non saturée pendant une vingtaine d'années.

3-Techniques isotopiques

Les traceurs naturels isotopiques permettent d'obtenir des informations concernant l'âge, l'origine des eaux, et leur vitesse d'écoulement. Ces traceurs isotopiques donnent en particulier accès à des indications sur l'origine et le temps de résidence des eaux souterraines, c'est-à-dire, en termes de gestion, sur les sources d'alimentation du réservoir et sur le taux de renouvellement de l'eau dans ce réservoir.

Les isotopes constitutifs de la molécule d'eau (^{18}O ; ^2H ; ^3H) sont caractérisés par le fractionnement isotopique. Ce fractionnement est régi par des phénomènes tels que: l'évaporation, la condensation, et la diffusion d'une part, et par les réactions d'échanges isotopique et cinétique d'autre part. Ces réactions obéissent aux lois d'action de masse. Le degré de fractionnement est une fonction complexe de la température, la pression partielle de la vapeur d'eau au dessus de la phase liquide, et de la salinité.

4-Isotopes stables de l'eau (^{18}O ^2H)

La molécule d'eau est constituée de deux éléments (O et H) possédant chacun trois isotopes stables ou radioactifs. L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs facteurs, dont le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance de l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, les échanges avec les minéraux, le mélange avec l'eau magmatique, etc.

L'abondance relative moyenne de ces isotopes [(IAEA, 2008)] est:

^{16}O : 99,76% ^{17}O : 0,038% ^{18}O : 0,205% ^2H : 0,015% ^1H : 99,985%

4-1-Variation isotopique naturelle

Lorsque l'eau de mer s'évapore, la molécule légère $H_2^{16}O$ passe plus rapidement - préférentiellement par le poids (figure 38)- dans la phase vapeur que la molécule lourde $H_2^{18}O$. L'eau s'évapore essentiellement dans les régions tropicales les plus chaudes. Dès le processus d'évaporation, la vapeur d'eau contient environ 1% d' ^{18}O en moins par rapport à l'eau des océans. Ce déficit est exprimé en référence à une composition standard proche de celle de l'océan mondial, cette masse d'air humide est ensuite transportée vers les plus hautes latitudes et se précipitent sous forme de pluies (neiges) plus appauvries en ^{18}O par rapport aux masses d'aires initiales.

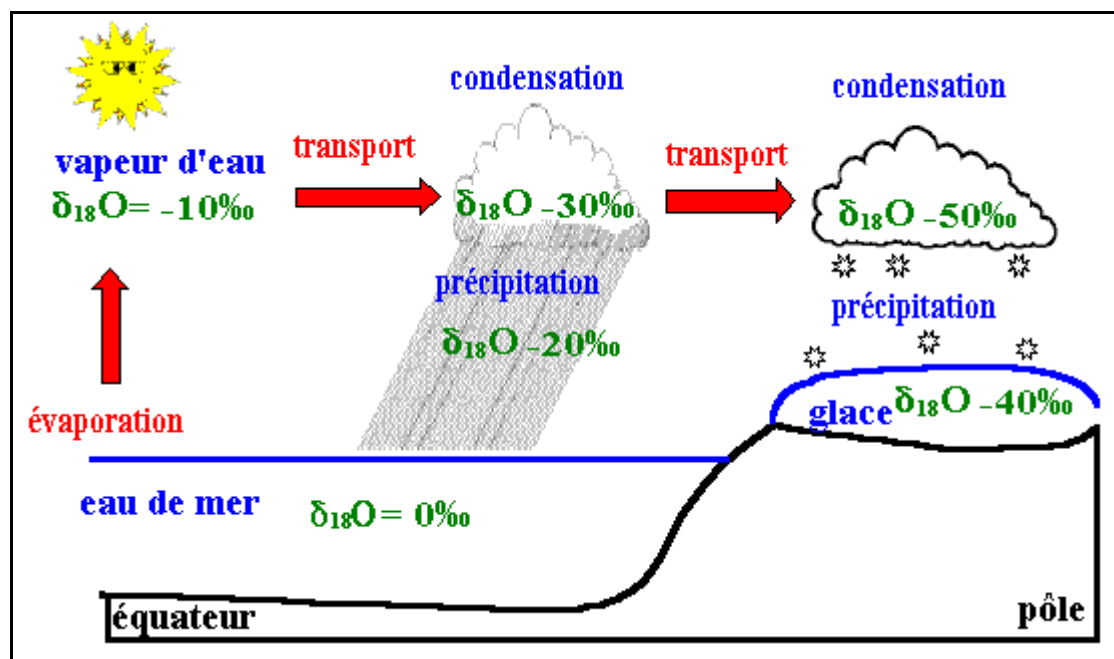


Fig.38. Processus de fractionnement isotopique au cours de l'évaporation et condensation (Greffion, 2020).

Les isotopes rares obéissent aux mêmes lois de la thermodynamique chimique que les isotopes banales. Lors de changement de phase, il se produit des transferts isotopiques entre phases, par exemple, entre les phases liquides et vapeur:



4-2-Abondance isotopique ou notion Delta pour mille ($\delta \text{‰}$)

Notation δ : On utilise cette notion pour faciliter de manipuler les variations relatives du rapport isotopique r

car les chiffres de ces rapports ne différant que par la 3^e, 4^e voire 5^e décimale. On le définit ainsi par la formule suivante:

$$\delta = (r / r_0) - 1$$

ou $\delta = (R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}} - 1) * 10^3$ pour exprimer en mille

Ou, r , R (échantillon), est le rapport isotopique de l'échantillon ou teneur en isotope lourd, ou concentration de l'espèce isotopique rare, et r_0 , R (standard), le rapport isotopique du standard.

Ces valeurs, sans dimension, sont généralement de l'ordre de quelques millièmes ou dix millièmes, et donc exprimées en ‰ ou plus. Par exemple, pour les isotopes de l'oxygène :

Le rapport de $H_2^{18}O / H_2^{16}O$ est de l'ordre 1/500 ; ce rapport varie très peu et en raison de difficulté de comparaison numérique, il est préférable, d'utiliser la notion de delta pour mieux exprimer ces petites variations, donc, ça sert à comparer la valeur de l'échantillon par rapport à un standard.

$$\delta^{17}O = \frac{(^{17}O/^{16}O)}{(^{17}O/^{16}O)_{SMOW}} - 1 \text{ et } \delta^{18}O = \frac{(^{18}O/^{16}O)}{(^{18}O/^{16}O)_{SMOW}} - 1 \dots\dots\dots 3$$

Le standard classiquement utilisé est l'eau océanique moyenne définie à Vienne en 1968 (notée SMOW, pour *Standard Mean Ocean Water*).

4-3-Standards internationaux

Toute espèce chimique est exprimée par rapport à un standard approprié conventionnellement admis. L'étalon utilisé pour le deutérium (2H) et l'oxygène-18 (^{18}O), est le **SMOW** ou le Vienna SMOW: une eau océanique moyenne.

Les teneurs en espèces chimiques du SMOW ou VSMOW, sont des standards fixés d'après l'analyse d'un échantillon moyen d'eau de l'océan Atlantique, prélevé à la verticale d'un lieu situé à 0° de latitude et 0° de longitude, et dont la composition isotopique est: $\delta^{18}O = 0 \text{ ‰}$ et $\delta^{2}H = 0 \text{ ‰}$ Le standard, VSMOW, est distribué par l'AIEA aux différents laboratoires qui sont appelés à exprimer les résultats d'analyses par rapport au VSMOW [(Gonfiantini, 1938)].

Les rapports isotopiques de l'eau VSMOW sont définis comme suit

- $^2H/^1H = 155,76 \pm 0,1 \text{ ppm}$
- $^{18}O/^{16}O = 2\,005,20 \pm 0,43 \text{ ppm}$ [(IAEA, 2008)]

4-4-Composition isotopique lors d'échange de base

4-4-1-Condensation

La condensation est une réaction qui a lieu à l'équilibre. Le fractionnement isotopique entraîne un enrichissement en isotopes lourds de la phase liquide au détriment de la phase vapeur

[(CRAIG, 1961)] [(Fontes, 1976)] . Dans le cas de précipitation, la masse de vapeur qui leur donne naissance est soumise à ce processus de condensation chaque fois qu' au voisinage de la saturation, la température s'abaisse, ou la pression augmente. Le paléoclimatologue Dansgaard, montra que la teneur en isotopes lourds des précipitations diminue avec la température de condensation.

Toutefois, cette relation n'est en générale pas vérifiée à l'échelle locale et en particulier pour les stations très continentales ou celles de moyenne et basses latitudes à saison contrastées. Cette dépendance entre les teneurs en isotopes lourds des précipitations et les températures est importante puisqu' elle conduit à des variations de la composition isotopique des précipitations en fonction des paramètres géographiques ou paléogéographiques suivants: La latitude, l'altitude, la saison et la période climatique [(Fontes, 1976)].

À l'échelle du globe, les teneurs en ^{18}O et ^2H des précipitations d'origine océaniques (figure 39) qui sont corrélées linéairement à la température de condensation sont donc corrélés entre elles de façon également linéaire, selon l'équation de droite météorique mondiale suivante:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \dots \dots \dots [(\text{CRAIG}, 1961)] [(\text{Dansgaard}, 1964)] \dots \dots \dots 4$$

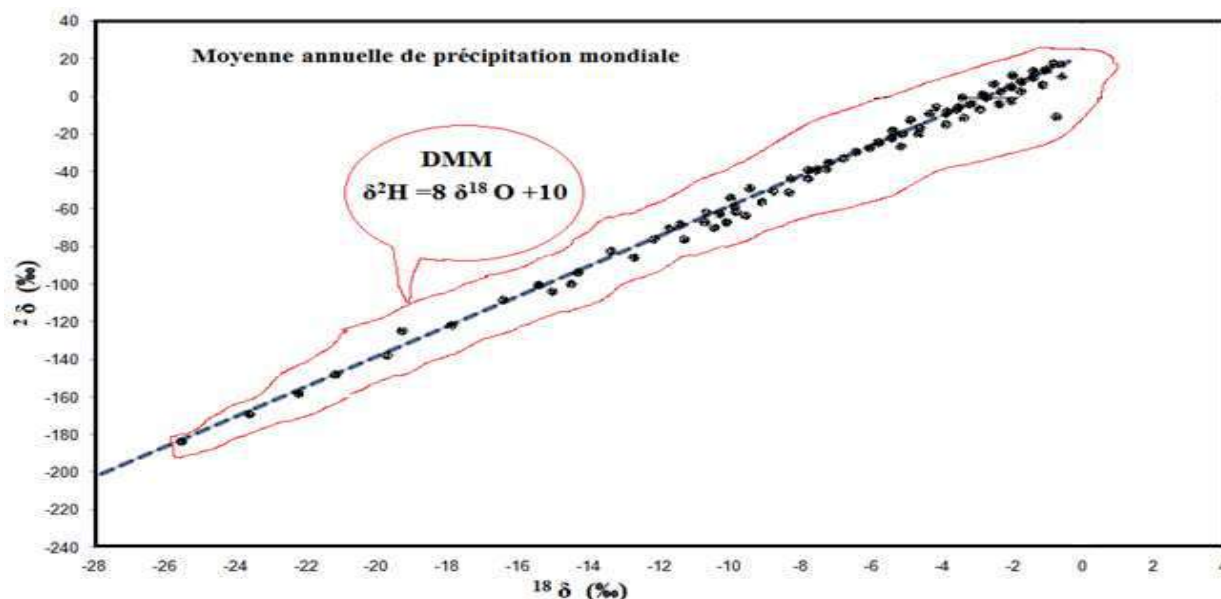


Fig.39. Relation $\delta^2\text{H}$ avec $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations mondiales [(CRAIG, 1961)] [(Dansgaard, 1964)].

Cette relation est en général acceptée pour les précipitations d'origine océanique et à l'échelle globale. La constance de la pente 8 de cette relation montre que la condensation est un phénomène qui a lieu à l'équilibre. Toutefois, des variations locales de pentes peuvent avoir lieu; elles seraient dues à des effets d'évaporation cinétique en cours de précipitation.

L'excès en deutérium $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$5

ou ordonné à l'origine de la corrélation des précipitations d'origine océanique est $d = +10 \text{ ‰}$. Cependant cette valeur peut devenir plus élevée, $d = 22 \text{ ‰}$ en méditerranée orientale [(NIR et al., 1966)] $d = +13,4 \text{ ‰}$ à Alexandrie, Egypte [(YURTSEVER et al., 1981)].

La valeur du paramètre (d) est liée à l'humidité relative de l'air et à la température de l'interface océan-atmosphère dans les zones de formation des masses de vapeur atmosphérique [(JOUZEL et al., 1984)].

4-4-2-Évaporation

L'évaporation est une réaction qui a lieu dans des conditions de non équilibre. Les variations isotopiques engendrées au cours de l'évaporation d'une masse d'eau, consistent en un enrichissement de la fraction restante du liquide en isotope lourd. Le fractionnement isotopique est alors régi non seulement par le partage à l'équilibre mais aussi par des effets cinétiques dus à des vitesses de diffusion différentes des molécules d'eau dans l'air humide. L'ensemble des résultats obtenus expérimentalement (IAEA, 2008) montrent que les enrichissements en ^{18}O et en ^2H causés par l'évaporation des masses d'eau sont un phénomène complexe qui fait intervenir différents paramètres: température, vitesse d'évaporation et teneur en eau de l'atmosphère. Il est bien établi que ce processus d'évaporation hors d'équilibre est caractérisé par une droite de pente variable et inférieure à 8.

4-5-Application de la relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$

Les applications de cette corrélation sont multiples en hydrologie: les teneurs en deutérium et oxygène-18 des eaux continentales, de surface ou souterraines, résultent des teneurs isotopiques des précipitations dans les zones de recharge.

L'étude des isotopes stables ^{18}O et ^2H des eaux de pluies et souterraines permet de retrouver l'origine des masses humides (figure 40) qui ont engendré les précipitations. Cependant, localement et notamment dans les mers fermées et sur les continents où le recyclage de la vapeur est important, l'excès en deutérium ($d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$) peut être plus grand que 10 [(NIR et al., 1966)]. Celle des eaux de la Méditerranée orientale présente un excès en deutérium de 22 ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 22 \text{ ‰ SMOW}$): [(YURTSEVER et al., 1981)]

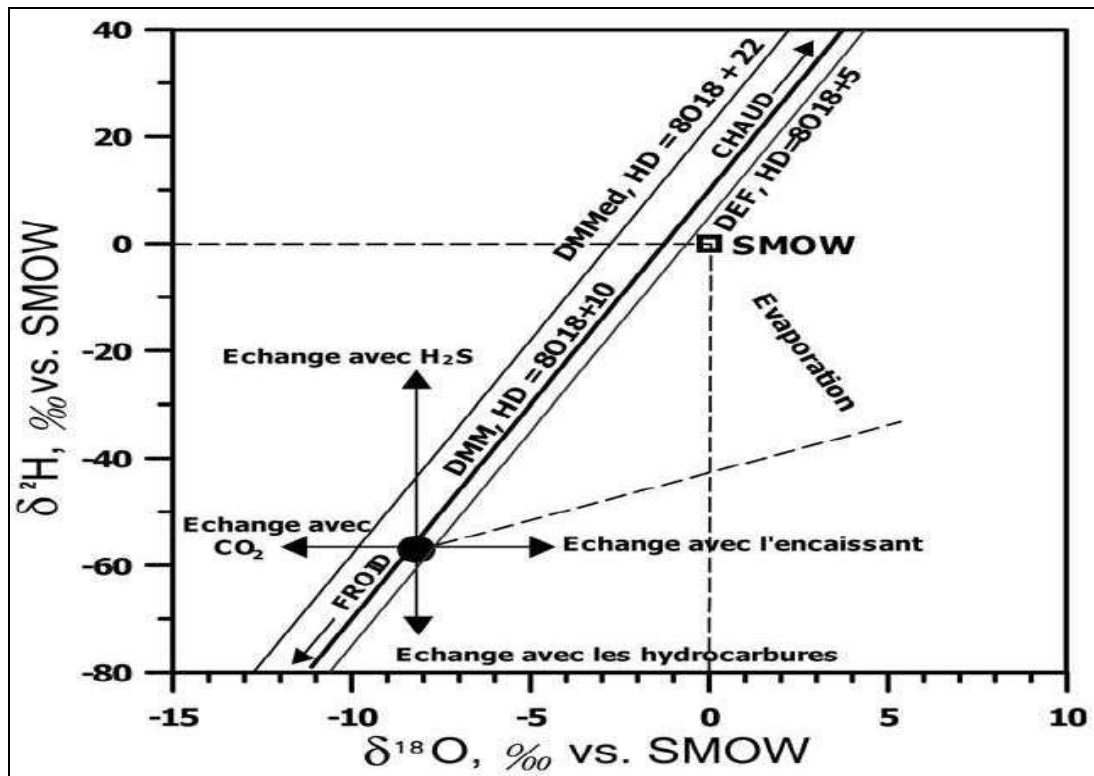


Fig.40. Domaine de répartition des eaux naturelles sur diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ [(MOULLA, 2005)].

La pente est inférieure à 8, ceci traduit une ré-évaporation des gouttes de pluie en cours de chute, en milieu non saturé. Cette diminution de la pente est due à l'effet de fractionnement cinétique, lui-même, lié à la différence entre les taux de diffusivité des isotopes. La tendance horizontale d'enrichissement en ^{18}O indiquerait un processus d'échange avec l'encaissant rocheux. Dans la zone non saturée du sol, qui est le siège d'un fractionnement de type cinétique entre l'eau et la vapeur du sol, Barnes et Allison en 1988) [(BARNES et al., 1988)] montrent que les teneurs isotopiques des eaux des sols sont également corrélées selon des droites décalées par rapport à la DMM, dont la pente varie de 2 à 5.

Dans les zones humides, les eaux souterraines ont pratiquement le même contenu isotopique que celles des précipitations, ce qui atteste d'une recharge récente. En revanche, en zones arides et semi- arides, le contenu isotopique diffère quelques fois de celui des précipitations actuelles. D'autre part, la présence de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ très appauvris suggèrent des précipitations témoignant d'un climat plus froid; il s'agit alors d'une Paléorecharge [(Fontes, 1976)] c'est le cas des eaux souterraines de la nappe Continentale intercalaire en Algérie, Tunisie, et la Lybie dont les eaux de cette nappes sont généralement homogènes et ont des teneurs en isotopes (^{18}O , ^2H) appauvris.

Chapitre 6

Résultats et discussion

1- Étude hydrochimique

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques des eaux. Pour cela l'hydrochimie se sert essentiellement de la chimie, mais aussi de la biologie et de la géologie. Elle met en place des modèles propres tels les modèles de la dissolution du dioxyde de carbone, la précipitation et la dissolution des minéraux (oxydes, dioxydes, carbonates, etc.), la spéciation des métaux, les interactions solides-liquides. On peut également ranger dans l'hydrochimie les techniques et protocoles d'échantillonnage des eaux, l'étude de la pollution des milieux aquatiques et de nombreuses autres applications qui sont devenues des sciences à part entière au vu de leur complexité.

L'étude hydrochimique des eaux de la région d'étude a été menée sur la base des analyses chimiques réalisées sur les campagnes d'échantillonnage, nous disposons ainsi des analyses des éléments majeurs (cations et anions), qui nous ont permis d'examiner l'évolution spatiotemporelle des eaux des aquifères et connaître l'origine de la minéralisation. Et pour cela nous avons traité les données de l'ensemble des campagnes d'échantillonnage effectuées sur la nappe phréatique, la nappe du complexe terminal et la nappe de continental intercalaire, sur les zones d'étude.

Les paramètres physico-chimiques caractéristiques mesurés pour tous les prélèvements sont les suivants: la température ($^{\circ}\text{C}$), le potentiel d'hydrogène pH, la conductivité électrique (ms/cm), la minéralisation (mg/l), le résidu sec (mg/l), les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} et K^{+}), les anions (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} et Cl^{-}) et la dureté totale (ΔHT).

Dans ce chapitre, les résultats des analyses chimiques de différentes campagnes sont représentés sous forme de graphes et de diagrammes, dont le but est de :

- Déterminer la répartition quantitative des différents éléments chimiques majeurs.
- D'apprécier les différents paramètres ayant une influence sur l'évolution de la qualité des eaux du secteur étudié.
- Déterminer les principaux faciès chimiques des eaux et l'origine de la salinité

1-1-Résultat d'analyse chimiques

En lisant, les résultats d'analyses chimiques et isotopiques des différentes campagnes d'échantillonnage qui ont été faites dans la région d'étude couvrant les quatre zones (Tableau 6) pendant 2017-2019, nous avons constaté l'homogénéité des eaux des nappes profondes et surtout les eaux de continentale intercalaire même à l'aspect isotopique, qui est appauvris.

Tab. 6. les résultats d'analyses chimiques des eaux de différentes nappes de la région d'étude de la campagne 2018-2019

ZONE		Aquifer	Min/Max	meq /L						
				Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄
1	la cuvette	Phréatique	min	10,0	11,5	32,2	0,1	1,0	28,5	22,3
			max	61	218	1109	31	11	1011	331
		CT	min	14,5	3,8	17,0	0,1	1,2	14,6	15,1
			max	21,9	14,8	43,5	0,9	2,5	40,7	27,6
		CI	min	9,1	4,0	15,7	0,6	2,9	13,0	10,0
			max	10,2	9,0	17,0	0,7	3,0	18,0	13,0
2	Hdjira	Phréatique	min	14,5	4,0	20,9	0,7	2,0	13,0	18,2
			max	34	1044	3635	204	2	4017	533
		CT	min	17,2	5,2	20,0	0,4	2,0	16,1	20,8
			max	27,8	11,5	23,5	0,6	3,0	21,5	32,4
		CI	min	10,1	5,3	16,0	0,8	2,7	11,0	12,8
			max	11,3	8,2	16,1	0,9	4,0	14,0	13,9
3	Taibet	Phréatique	min	7,0	4,1	7,0	0,5	1,2	6,8	10,3
			max	83	95	326	6	4	350	123
		CT	min	18,9	9,9	30,9	0,5	2,2	31,6	25,4
			max	30,0	11,5	47,8	0,8	4,0	38,1	30,2
		CI	min	12,7	6,5	16,5	0,3	2,4	15,0	36,8
			max	20,3	15,6	22,6	1,1	2,5	15,1	14,6
4	Melrir	Phréatique	min	22	294	974	18	1	1307	124
			max	174	1135	3439	136	4	4034	459
		CT	min	14,0	11,5	22,6	0,3	2,1	15,0	23,6
			max	20,3	15,6	78,3	0,5	3,4	57,3	36,8
		CI	min	11,6	7,3	22,0	0,9	4,0	20,0	13,9
			max							

1-1-1-La zone 1: La cuvette d'Ouargla Nappe de CI

Les eaux de cette nappe sont homogènes à l'échelle du bassin et notamment dans notre région d'étude. Les cations dominants sont présentés par le Sodium Na dont les concentrations varient de 15.7 à 17 meq/l, par le Calcium Ca dont les teneurs présentent une valeur moyenne de 10 meq/l, par le Magnésium Mg dont les teneurs oscillent de 4 à 9 meq/l, et par le Potassium K dont les teneurs sont autour de 0.7 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont les plus élevées avec des valeurs de 13 à 18 meq/l ; Par contre, les ions sulfates SO₄ prennent des valeurs variant de 10 à 13 meq/l, et les ions bicarbonates HCO₃ ont une teneur moyenne de 3 meq/l.

Nappe de CT

Les cations dominants sont présentés par Sodium Na dont les concentrations varient de 17 à 43 meq/l, suivi par le calcium Ca dont les teneurs oscillent de 14 à 22 meq/l, le magnésium Mg dont les teneurs vont de 3.8 à 14.8 meq/l, et par K dont les teneurs sont autour de 0.5 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont les plus élevées avec des valeurs de 14.6 à 40.7 meq/l; Par contre, les ions sulfates SO_4 prennent des valeurs variant de 15 à 27.6 meq/l et les ions bicarbonates HCO_3 ont une teneur de 1.2 à 2.5 meq/l.

La comparaison des eaux de cette nappe avec les eaux de la nappe de CI montre que les eaux des échantillons 39 et 47 dont les emplacements sont respectivement, Bour Elhaicha et Ngoussa, ont des caractéristiques chimiques identiques et semblables aux eaux de la nappe de CI, ce qui laisse supposer la possibilité d'une communication entre ces deux nappes par la remontée verticale d'eaux de CI en suivant un rejet de faille et/ou par la voie des tubages détériorés des puits.

Nappe phréatique

Cette nappe a des eaux dont les teneurs en cations et anions sont très dispersées. Les cations dominants sont dominés par Na dont les concentrations varient de 33meq/l (Bour Elhaicha) à 1109 meq/l (Sebkha Safioune), par le calcium Ca dont les teneurs oscillent de 10 à 60 meq/l(eau de surface Bour Elhaicha), par le magnésium Mg dont les teneurs vont de 11.5 à 218meq/l, et par le potassium K dont les teneurs varient de 0.1 à 31 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont les plus élevées avec des valeurs de 28.5 à 1011 meq/l(Sebkha Safioune) ; Cependant, les ions sulfates SO_4 prennent des valeurs variant de 22.3 à 331 meq/l, et les ions bicarbonates HCO_3 ont une teneur de 2.3 à 11.2 meq/l.

C'est bien clair, l'influence de l'évaporation qui contrôle le processus de minéralisation des eaux de cette nappe ; Plus les teneurs isotopiques sont enrichies, plus la minéralisation est élevée.

1-1-2-La zone 2: Hdjira

Nappe de CI

Les cations dominants sont présentés par Na dont les concentrations sont autour de 16 meq/l, suivi par le calcium Ca dont les teneurs sont autour de 10.7 meq/l, le magnésium Mg dont les teneurs oscillent de 5.3 à 8.2 meq/l, et le potassium K dont les teneurs sont en moyenne de 0.7 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en ions sulfates SO_4 sont les plus élevés avec des valeurs de 12.8 à 13.9 meq/l. Les teneurs en chlorure Cl prennent une valeur moyenne de 12.5 meq/l. Les ions bicarbonates HCO_3 ont une teneur qui varie de 2.7 à 4 meq/l.

Nappe de CT

Pour les cations, les teneurs en calcium Ca oscillent de 17.2 à 28 meq/l, et les concentrations de Na varient de 20 à 23.5 meq/l. Les teneurs en Mg prennent des valeurs variant de 5.2 à 11.5 meq/l, et les teneurs en Potassium K sont autour de 0.5 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en sulfates SO₄ sont les plus élevées avec des valeurs de 20.8 à 32.4 meq/l. Cependant, les ions chlorure Cl prennent des valeurs variant de 16.1 à 21.5 meq/l et les ions bicarbonates HCO₃ ont une teneur autour de 2.5 meq/l.

Nappe phréatique

Des teneurs très dispersées pour les cations et anions dominants sont enregistrées à Chott Bagdad.

Pour les cations, les concentrations en Na varient de 20.9 (Hassi Lekhfif) à 3635 meq/l (Chott Bagdad). Les teneurs en calcium Ca oscillent de 14.5 à 34 meq/l. Les teneurs en magnésium Mg vont de 4 à 1044 meq/l, et les teneurs en K varient de 0.7 à 204 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont les plus élevées bien que variables puisqu'une valeur de 4017 meq/l a été enregistrée à Chott Bagdad et qu'une valeur de 13 meq/l a été enregistrée à Hassi Lekhfif. Les ions sulfates SO₄ présentent une concentration de 533 meq/l pour les eaux du Chott Bagdad et une valeur de 18.2 meq/l à Hassi Lekhfif. Les ions bicarbonates HCO₃ ont une teneur moyenne de 2.1 meq/l.

Nous signalons, ici, que les eaux de la nappe phréatique de Hassi Lekhfif ont comme origine les eaux des nappes profondes, car leur chimisme est contrôlé par celui des deux nappes profondes; cela est aussi le cas pour les signatures isotopiques des isotopes stables.

Sur le site de Hassi Lekhfif où nous avons prélevé l'échantillon ECH-05 dans un puits traditionnel de profondeur 8m, on trouve des forages destinés à l'irrigation qui exploitent le Cl et CT.

1-1-3-La zone 3: Taibet

Nappe de Cl

Cette zone exploite les eaux de cette nappe par deux forages. En fait, les eaux sont homogènes à l'échelle du bassin. Les cations dominants sont présentés par le Ca dont les concentrations varient de 12.7 à 20.3 meq/l, par le Na dont les teneurs varient de 16.5 à 20.6 meq/l, par le Mg dont les teneurs oscillent de 6.5 à 15.6 meq/l, et par le K dont les teneurs se situent entre 0.3 et 1.1 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont autour 15 meq/l. Les ions sulfates SO₄ prennent des valeurs variant de 14.6 à 36 meq/l. Les ions bicarbonates ont une teneur égale 2.4 meq/l pour les deux forages.

Nappe de CT

Au niveau de cette localité, les eaux de cette nappe sont exploitées par plusieurs puits dont 4 ont été échantillonnés et présentent des faciès hydrochimiques homogènes. Les teneurs en éléments sont très comparables les unes aux autres. Les cations dominants sont présentés par le Na avec une teneur moyenne de 38.6 meq/l, par le calcium Ca dont la teneur est de 23.6 meq/l, par Mg dont la teneur est de 10.5 meq/l, et par le potassium K dont la teneur moyenne est autour de 0.7 meq/l. Pour les anions, les teneurs en chlorure Cl ont une moyenne de 35 meq/l, la teneur moyenne en sulfates SO₄ est de l'ordre 26.8 meq/l, et les ions bicarbonates HCO₃ ont une teneur moyenne 2.8 meq/l.

Nappe phréatique

Les teneurs des ions sont dispersées. La minéralisation prend une valeur minimale à Erg dbadib Bennaceur car cet endroit est éloigné d'eaux d'évacuation et d'irrigations issues des nappes profondes, et une valeur maximale enregistrée sur des eaux de surface près de la palmeraie de Chok. Les cations dominants sont présentés par Na dont les concentrations varient de 7 meq/l (Erg dbadib) à 325.7 meq/l, par le calcium Ca dont les teneurs oscillent de 7 à 83.1 meq/l, par le magnésium Mg dont les teneurs vont de 4.1 à 95.5 meq/l, et par le potassium K dont les teneurs varient de 0.5 à 5.8 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en chlorure Cl sont les plus élevées avec des valeurs comprises entre 6.8 et 350.3 meq/l. Les ions sulfates SO₄ prennent des valeurs variant de 10.3 à 123 meq/l et les ions bicarbonates HCO₃ ont une teneur de 1.2 à 4.4 meq/l.

1-1-4-La zone 4: Melrhir

Nappe de Cl

Les eaux de cette nappe ne se diffèrent pas des zones précédentes.

Nappe de CT

Les cations dominants sont Na avec des valeurs entre 22.6 et 78.3 meq/l, le calcium Ca variant de 14.6 et 20.3 meq/l, le magnésium Mg avec une teneur moyenne autour de 13 meq/l, et le Potassium K dont les teneurs sont autour de 0.4 meq/l. Pour les anions, les teneurs en chlorure Cl ont des teneurs comprises entre 15 et 57.3 meq/l, les teneurs en sulfates SO₄ varient de 23.6 à 36.8 meq/l, et les bicarbonates HCO₃ ont une teneur moyenne autour de 2.8 meq/l.

Par ailleurs, cette zone est caractérisée par la présence d'un grand chott : Chott Melrhir dans lequel les eaux de surface ont une salinité très élevée.

Nappe phréatique

Les cations dominants sont présentés par le Na dont les concentrations sont de 974 meq/l dans un puits traditionnel à 3439 meq/l (chott), suivi par le calcium Ca dont les teneurs sont de 22 à 174 meq/l, le magnésium Mg dont les teneurs oscillent de 294 à 1135 meq/l, et le potassium K, dont les teneurs variant de 17.8 à 136 meq/l. En ce qui concerne les anions, les teneurs en ions sulfates SO_4^- sont de 124.3 à 459.5 meq/l. Les teneurs en chlorure Cl prennent une valeur dépassant 4030 meq/l. (chott) Les ions bicarbonates HCO_3^- ont des teneurs qui varient de 1.4 à 4 meq/l.

1-2-Facies chimique des eaux

Les eaux analysées sont représentées sur le diagramme de piper (Figure 41), ce diagramme permet de comparer plusieurs analyses chimiques, d'établir une classification des eaux, et de préciser les différents facies chimiques. Les eaux de trois nappes ont un facies chimique presque homogène qui est chloruré sodique calcique et magnésien.

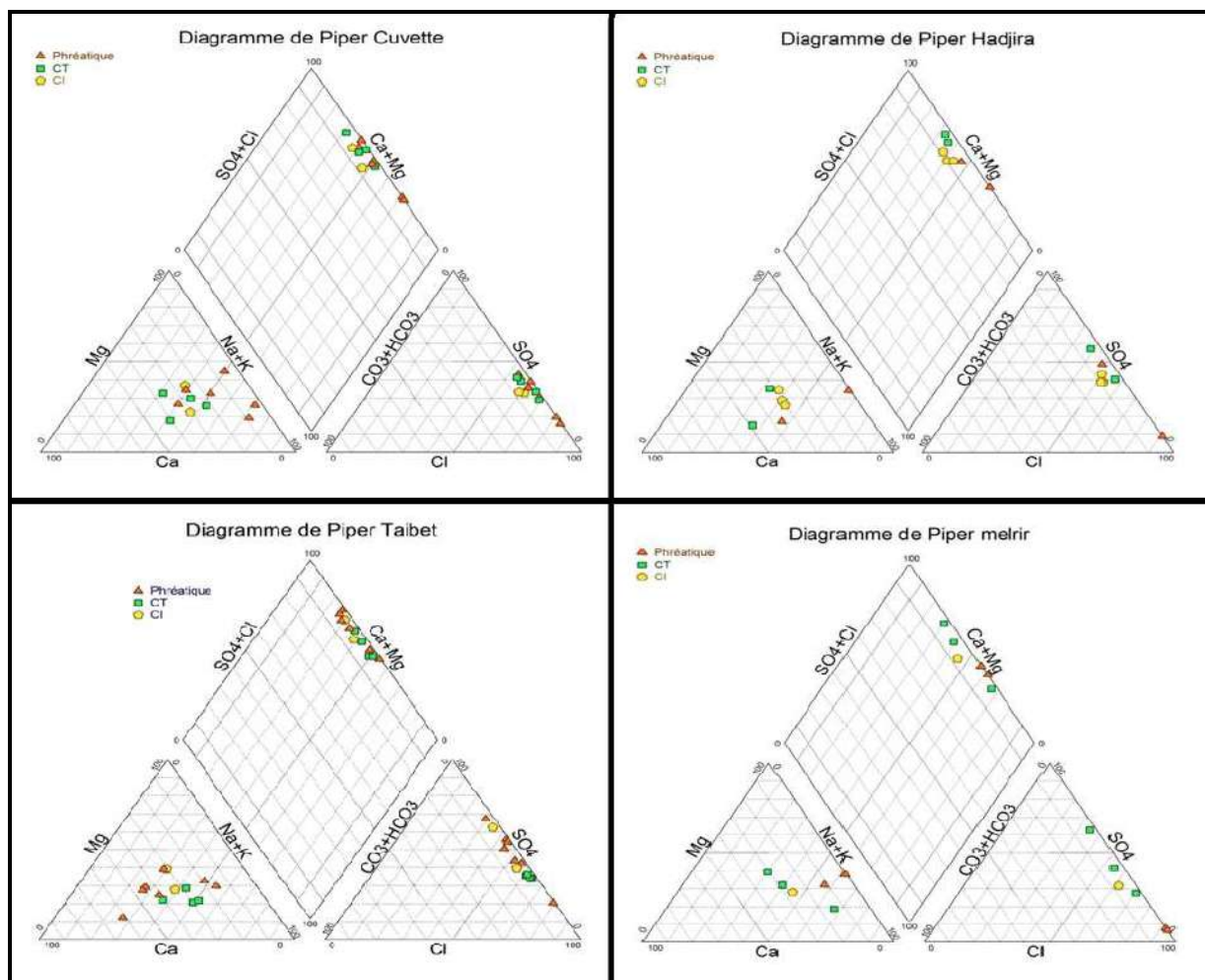
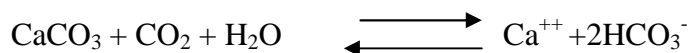


Fig.41. Facies chimiques des eaux.

1-3-Origine de la minéralisation

Calcium Ca⁺²

Les ions de calcium existants dans l'eau proviennent de la dissolution des carbonates et de roches gypseuses. Pour les roches carbonatées, l'apparition du calcium résulte de la dissolution des formations (CaCO₃) par l'attaque chimique des eaux en présence du gaz carbonique (CO₂).



Les valeurs de concentration en Ca⁺² est variable, elles prennent une valeur autour de 10 meq/L pour la nappe de continentale intercalaire à l'échelle de la région étudiée cela confirme encore l'homogénéité de cette nappe en question, cet élément est d'origine de la dissolution des formations carbonatées gypseuses (CaSO₄) qui sont présentes dans le contenu lithologique de CI.

En ce qui concerne les eaux du complexe terminal, les teneurs en Ca⁺² ont une moyenne de 14.3meq/L pour la cuvette, on voit que ces valeurs sont plus proches de la nappe de CI, ici, elles ont des valeurs oscillent de 17 à 27 meq/L pour Hdjira, et pour les zones de Taibet, Melrhir les teneurs sont de 14 à 25meq/L, cet élément est présent par la dissolution des formations carbonatées et gypseuses qui caractérisent cette nappe. Les eaux des nappes phréatiques ont généralement des origines d'eaux des nappes profondes et les valeurs extrêmes de cet élément sont dûes à l'intensité de l'évaporation.

Magnésium Mg⁺²

L'existence du magnésium dans les eaux résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations dolomitiques, c'est-à-dire la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, ou bien par les formations salifères riches en magnésium MgSO₄. La réaction chimique est accentuée par la présence de l'acide carbonique présente dans l'eau.

Pour nos campagnes, les résultats d'analyses chimiques montrent une valeur moyenne de 8 meq/L pour les eaux de CI à l'échelle de secteur étudié, et pour la nappe de CT, les teneurs varient de 4 à 12 meq/L à la cuvette, de 5 à 11meq/L à Hdjira, de 9 à 15meq/L pour le reste. L'origine de Mg⁺² dans ces eaux est identique à celle de Ca⁺², est devenu par la dissolution des formations carbonatées et les formations salifères riche en Magnésium.

Sodium et Potassium Na⁺ + K⁺

La présence de ces ions (Na⁺ + K⁺) dans l'eau est due au lessivage des formations riches en Na⁺, Cl⁻ (Argiles- marnes) et des eaux à usage agricole ou domestique. La présence du sodium et potassium est dû à l'influence des eaux de Sebkhah et les formations argileuses et marneuses.

Les résultats de nos campagnes montrent des valeurs moyennes respectivement en Na^+ et K^+ de 24meq/L, et 0.7meq/L pour les eaux de CI à l'échelle de notre région, et pour les eaux de CT les valeurs Na^+ varient de 17 à 47meq/L, le K^+ prend une moyenne de 0.5meq/L

Pour les nappes superficielles, les teneurs sont très élevées dûes à l'influence des eaux de Sebkhah et à la présence des formations argileuses et marneuses.

Chlorures Cl^- et Sulfates SO_4^{2-}

Tous ces ions sont présents à des teneurs importantes comme on peut les voir dans les analyses de nos campagnes; les chlorures qui sont des éléments conservés en solution. Ils ne subissent aucune interaction physique ou chimique avec les autres phases solides ou gazeuses ne sont pas dégradées en solution, il a plusieurs origines à savoir :

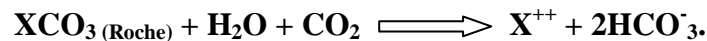
- La dissolution des sols naturels et le lessivage des terrains salifères ;
- Les engrais chimiques et les pesticides utilisés en agriculture et les rejets des eaux usées d'origines domestique et industrielle cela pour les nappes de surface.

Les fortes concentrations en chlorure dans la région d'étude s'expliqueraient par soit une évaporation intense et/ ou une dissolution et lessivage des niveaux évaporitiques qui caractérisent les aquifères profondes. Les valeurs enregistrées de chlorure pour la nappe de CI est de l'ordre 15 meq/L comme moyenne, et de valeurs oscillant de 14 à 47 meq/L pour la nappe de CT.

Pour les ions sulfates, leur présence dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses. Les concentrations sont autour de 14meq/L pour la nappe de CI et de 15 à 36meq/L pour la nappe de CT. Les sulfates contenus dans l'eau sont fournis par la dissolution du gypse existant à la formation lithologique de ces nappes.

Bicarbonates HCO_3^-

Les ions bicarbonatés résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon la relation suivante :



Avec :

X : désigne un élément chimique de la roche.

En d'autres termes, la teneur en (HCO_3^-) dans l'eau dépend d'un certain nombre de paramètres physico-chimiques à savoir :

- la température de l'eau.
- la concentration du (CO_2) dissous.
- la concentration de l'eau en sels ainsi que la nature lithologique des terrains traversés.

Leur présence dans les eaux est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique. Les concentrations en ions bicarbonatés sont relativement élevées, et les teneurs maximales sont enregistrées dans les sebkhas et les chotts et elles prennent une moyenne de 2.11 meq/L pour la nappe de CT et de 2.5 meq/L pour les eaux de CI.

1-4-Rapports caractéristiques

On appelle rapport caractéristique, le rapport des teneurs de certains éléments chimiques, Ces rapports donnent des indications sur la zone d'alimentation, le contact des eaux avec le milieu solide, ainsi que l'évolution des eaux pendant leur trajet souterrain.

-Couple Na-Cl

On a une bonne corrélation entre, Na et Cl dans toutes les zones de la région d'étude, (figure 42) et si la teneur en Na augmente, la concentration en Chlorure aussi augmente, la majorité des points (nuage des points) sont alignés avec la droite de la dissolution de l'halite (pente 1) ce qui implique que les deux éléments ont peut être la même origine et nous supposons que leur source est principalement due à la dissolution de l'halite. Les teneurs en chlorure et sodium dans les eaux proviennent par lessivages et dissolutions du NaCl contenu dans les niveaux gypseux et anhydritiques existants dans cet aquifère.

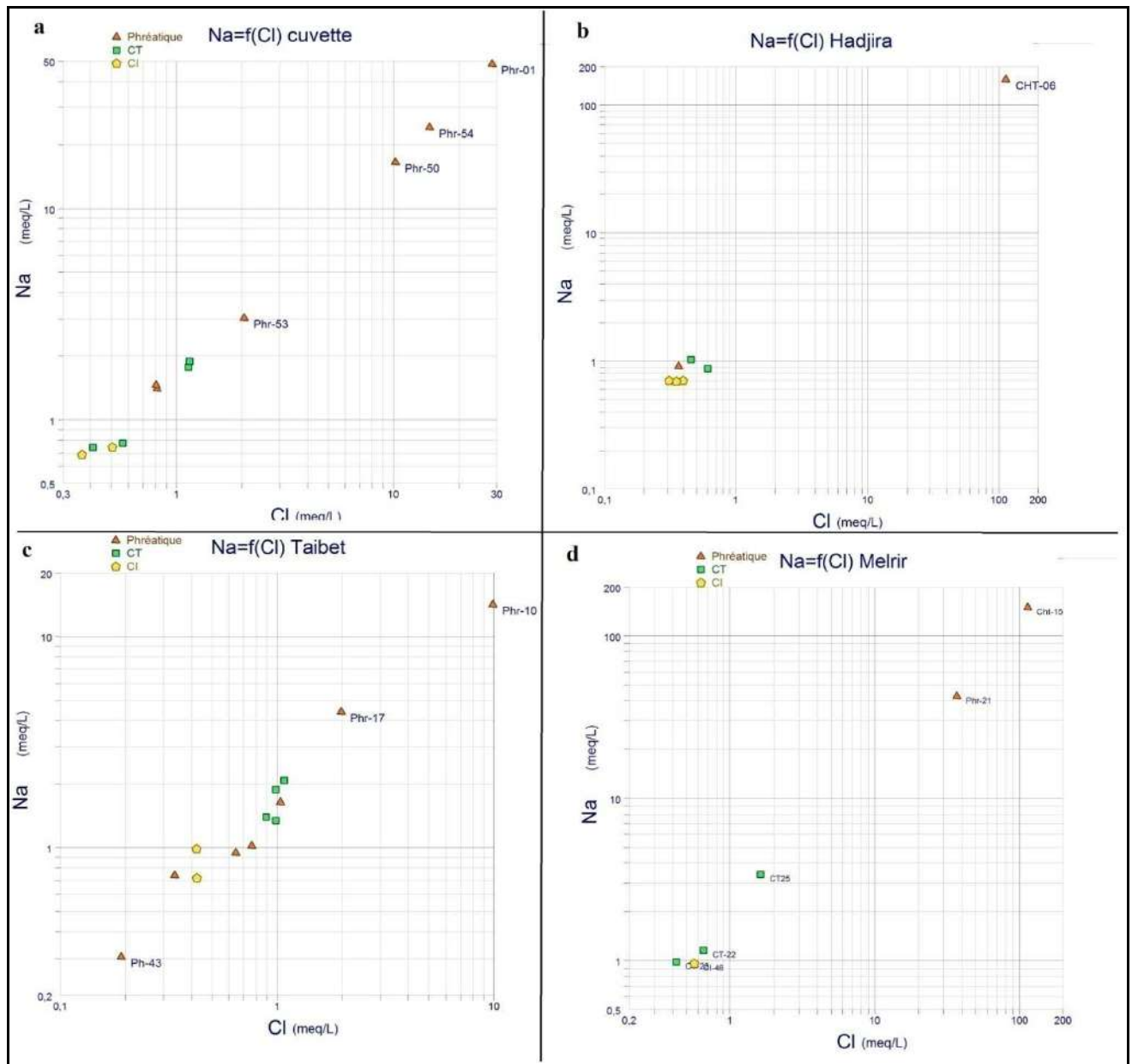


Fig.42. Rapport de Na et Cl dans les zones d'étude.

-Couple Ca- SO_4

On remarque un lien qui existe entre Ca^{++} et SO_4^- , (figure 43), cette corrélation met en évidence que la source principale de ces ions est les sulfates est confirmé par les teneurs de SO_4^- dû aux dissolutions et lessivage des terrains sulfatés ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4).

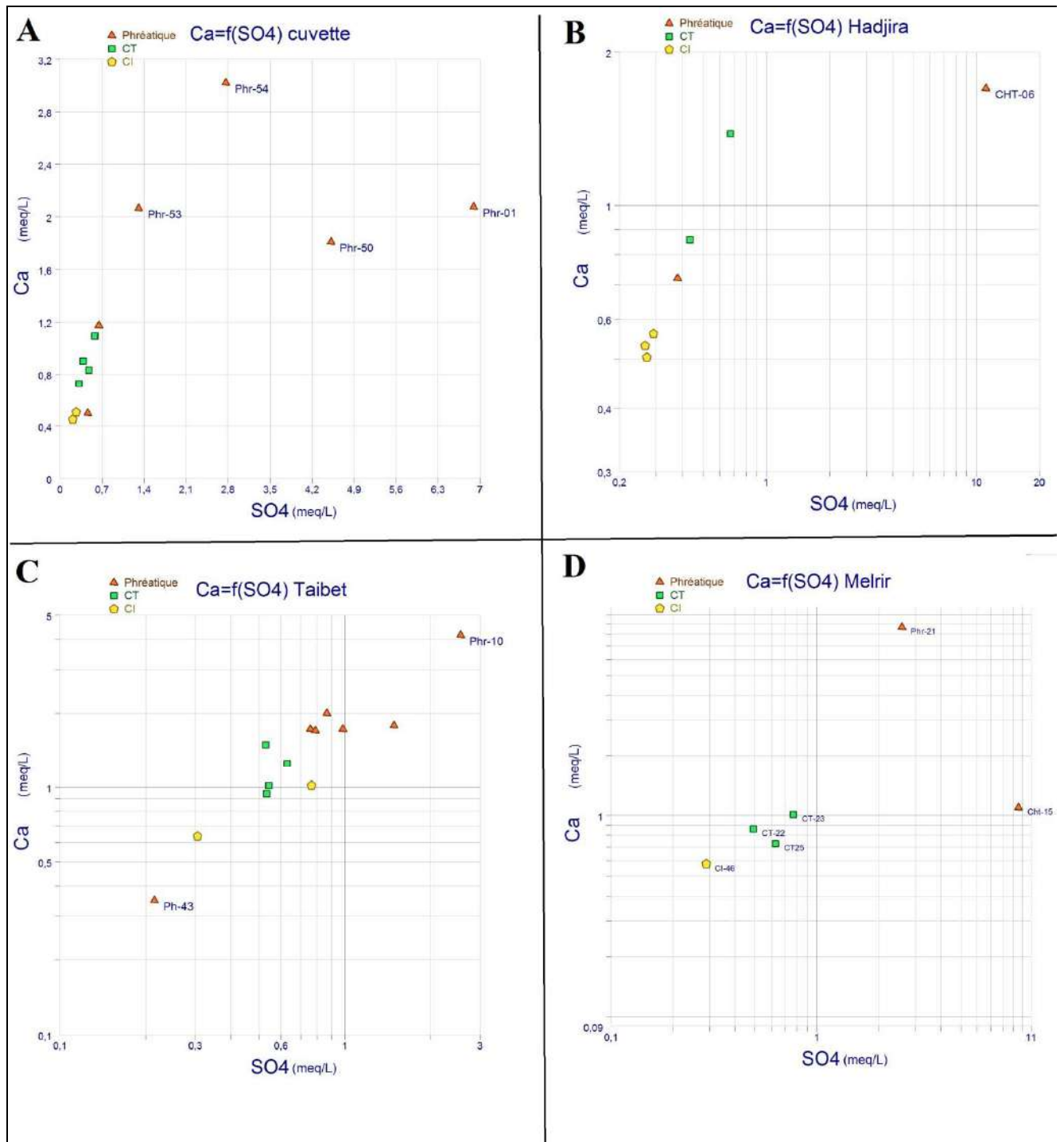


Fig.43. Rapport de Ca en fonction de SO4 des eaux de la région d'étude.

-Ca-HCO₃

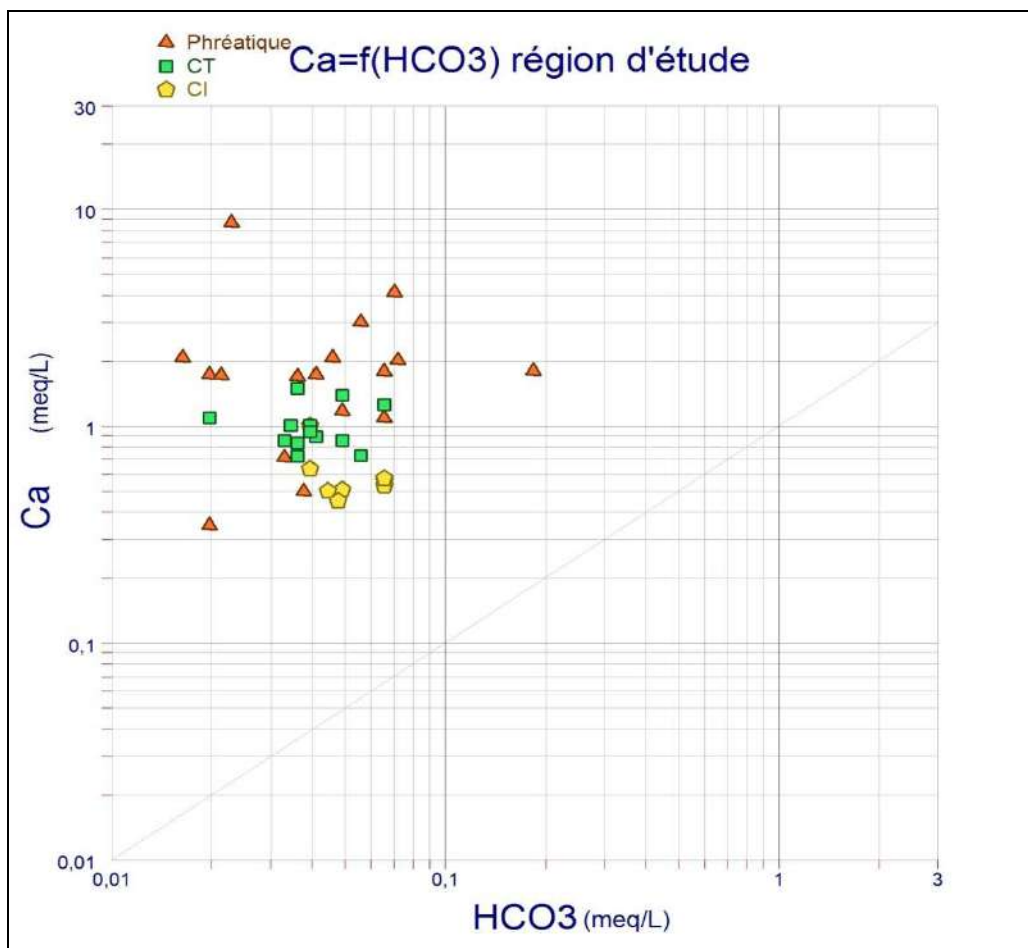


Fig.44. Couple Ca²⁺ en fonction HCO₃ des eaux.

Le graphique (Figure 44) montre que le Calcium dissous dans les eaux des nappes est d'origine évaporitique et s'est fait, par la dissolution des sels et des gypses, les points représentent la majorité des échantillons prélevés qui sont tous au-dessus de la droite de la pente 1 qui sépare l'origine évaporitique de celle carbonatée. Ce dernier est confirmé par l'abondance des sebkhas et chotts et aussi par les conditions climatiques qui caractérisent la région tel que l'évaporation intense, la température élevée, l'insolation, etc.

TDS -- Cl⁻

Nous avons une très bonne corrélation entre la somme des cations et anions et la concentration en chlorures, donc à chaque somme (cation + anions) on a une augmentation de Cl (Figure 45); cela nous laisse supposer que la roche mère dans laquelle l'eau s'écoule est de type évaporitique et ces eaux sont dites des eaux évaporées et nous allons les voir par les isotopes stables dans la partie isotopique.

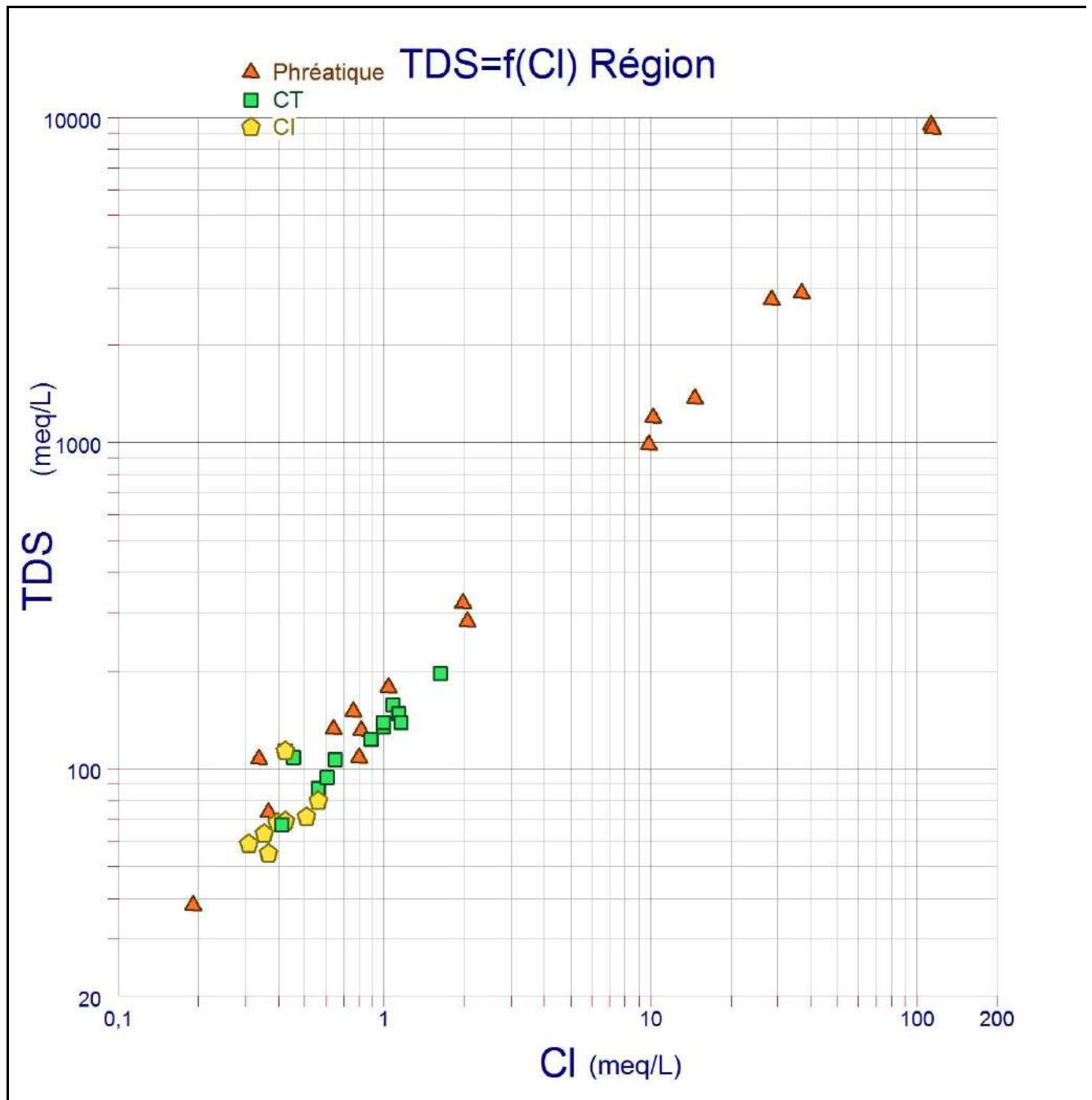


Fig.45. TDS en fonction de Cl des eaux de la région d'étude.

1-5-Simulation de mélange et évaporation par PhreeqC

PhreeqC est un logiciel de calcul géochimique de systèmes triphasique (liquide, solide, gaz) développé par l'USGS. C'est un logiciel libre. Les calculs chimiques peuvent être couplés avec des équations de transfert de matière par advection et/ou diffusion. La modélisation du transport s'effectue sous une dimension. Par ailleurs, le logiciel permet également de prendre en compte la cinétique des réactions. Les systèmes d'études sont fermés ou constitués d'un ensemble de systèmes fermés.

La simulation d'un système nécessite deux types de renseignements.

Tout d'abord, une base de données référençant les données thermodynamiques des espèces chimiques. Plusieurs bases de données sont utilisables pour le logiciel. Le choix dépend, de la complexité de la simulation à effectuer, mais aussi de l'objectif de la simulation. En exemple, la banque de données "iso.dat" renseigne des informations sur les isotopes les plus courants et sera utilisée en cas d'étude isotopique d'un système ou d'une réaction.

Le second renseignement consiste en les instructions qui permettent de réaliser les réactions recherchées.

1-5-1-Simulation de mélange

Nous tentons de faire des mélanges entre les eaux de CI et les eaux de CT puis le résultat sera comparé avec les eaux de la nappe phréatique, le tableau (6) suivant montre les résultats de ce mélange et affiche les proportions de chaque type d'eaux.

Tab.7. Simulation de mélange par PhreeqC.

Ech mg/L		Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	HCO3
ALG-51 a		181	48,6	360	24,2	460,2	480	176,9
ALG-52 b		333	140	1000	32,2	1440	1107	134,2
Mélange de ALG51 et ALG52	a%5+b%95	326	136	972	32	1395	1079	142
	a%10+b%90	318	131	940	31	1346	1048	144
	a%20+b%80	303	122	876	30	1247	985	148
	a%50+b%50	257	95	683	28	952	796	161
	a%75+b%25	219	72	522	26	706	638	171
	a%90+b%10	196	58	425	25	559	544	178
	a%95+b%5	189	53	393	25	509	512	180
hadjira		Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	HCO3
CI a		213	80	369	34	444	634	218
CT-49 b		344	140	460	25	760	999	122
Mélange de CI Hadjira et CT ALG49	a%5+b%95	338	137	457	26	745	983	135
	a%10+b%90	331	134	452	26	729	965	140
	a%20+b%80	318	128	443	27	698	928	151
	a%50+b%50	279	110	416	30	603	818	184
	a%75+b%25	246	95	393	32	524	726	212
	a%90+b%10	226	86	379	33	476	672	228
	a%95+b%5	220	83	374	34	460	653	234
taibet		Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	HCO3
CI a		452	129	826	26	1134	1285	170
CT b		303	99	509	20	674	950	121
Mélange	a%5+b%95	466	129	870	26	1205	1291	173

de CI Taibet	a%10+b%90	459	129	848	26	1170	1288	172
	a%20+b%80	444	130	804	26	1099	1283	169
et CT Taibet	a%50+b%50	402	132	672	27	887	1265	160
	a%75+b%25	366	134	562	27	710	1252	153
	a%90+b%10	345	135	496	27	604	1243	149
	a%95+b%5	337	135	474	27	569	1240	148
Melrhir ALG-CI*46 a		Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	HCO3
		231	89	506	33,2	708	666	244
ALG-CT*25 b		292	140	1800	13,2	2030	1446	207,4
Mélange de ALG46	a%5+b%95	290	138	1746	14	1972	1414	218
	a%10+b%90	287	136	1681	15	1906	1375	220
	a%20+b%80	281	130	1551	17	1773	1296	225
et		262	115	1159	23	1374	1061	240
ALG25	a%75+b%25	247	102	834	28	1041	864	252
	a%90+b%10	237	94	638	31	842	746	259
	a%95+b%5	234	92	573	32	775	707	261

1-5-2-Simulation d' évaporation

Les résultats de simulation d'évaporation sont représentés dans le tableau (7) suivant:

Tab.8. Simulation d' évaporation par PhreeqC.

ech mgIL		Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	HCO3
ALG- 50	ALG-50	725	2210	8730	300	12800	10410	683
	ALG-51 initiale	181	49	360	24	460	480	177
	5,55 moles évaporés	201	54	401	27	512	534	202
	11,1 moles évaporés	226	61	451	30	575	601	227
	16,65 moles évaporés	258	70	515	35	657	686	260
	22,2 moles évaporés	302	81	601	40	767	801	303
	24,98 moles évaporés	329	88	656	44	1010	874	330
	27,75 moles évaporés	362	97	722	48	920	961	363
	30,52 moles évaporés	402	108	802	54	1023	1068	404
	33,3 moles évaporés	452	122	902	60	1151	1201	454
	40 moles évaporés	648	174	1291	87	1648	1720	650
	50 moles évaporés	1824	491	3636	244	4641	4844	1832
60 moles évaporés	2167	1231	8455	4532	48073	18048	6466	
ALG- CT49	initiale	344	140	460	25	760	999	122
	évap 10 mol	420	171	563	31	928	1221	155
	évap 20 mol	538	219	722	39	1190	1565	199
	évap 30 mol	749	305	1004	55	1656	2179	277
	évap 40 mol	1232	502	1652	90	2724	3584	456
	évap 50 mol	3471	1415	4653	254	7671	10090	1283
	évap 60 mol	10432	4051	17965	31691	6907	74746	3792

ALGCI-48	initiale	202	64	370	31	390	621	165
	évap 10 mol	246	78	452	38	476	758	248
	évap 20 mol	316	100	580	49	610	972	317
	évap 30 mol	440	139	807	68	849	1353	442
	évap 40 mol	723	229	1328	112	1397	2225	727
	évap 50 mol	2036	646	3738	314	3933	6268	2046
ALG-CI30	initiale	330	135	450	27	533	1235	146
	évap 10 mol	496	232	637	12	650	2162	181
	évap 20 mol	636	298	816	16	833	2771	231
	évap 30 mol	885	415	1136	22	1160	3856	322
	évap 40 mol	1456	682	1869	37	1996	6344	530
	évap 50 mol	4100	1921	5262	103	5374	17866	1493
	évap 60 mol	8020	3866	10332	7898	29046	35405	3201
ALG-CT29	initiale	502	130	1100	31	1350	1449	244
	évap 10 mol	614	159	1349	38	1652	1775	309
	évap 20 mol	787	204	1729	49	2118	2274	396
	évap 30 mol	1096	284	2406	68	2948	3166	552
	évap 40 mol	1802	467	3958	112	4850	5208	908
	évap 50 mol	5076	1316	11148	315	13654	14669	2556
	évap 60 mol	***	***	***	***	***	***	***
ALG-CT 40	initiale	600	120	710	19	1239	1221	134
	évap 10 mol	733	147	870	23	1515	1495	170
	évap 20 mol	940	188	1115	30	1942	1915	217
	évap 30 mol	1308	262	1552	42	2703	2666	303
	évap 40 mol	2152	431	2553	69	4446	4385	498
	évap 50 mol	6060	1214	7190	194	12521	12346	1402
	évap 60 mol	16924	3234	22158	21536	10592	92026	4774
ALG-CT25	initiale	292	140	1800	13	2030	1446	207
	évap 10 mol	358	172	2210	16	2487	1773	264
	évap 20 mol	458	220	2831	21	3188	2272	338
	évap 30 mol	638	306	3942	29	4436	3163	470
	évap 40 mol	1049	504	6484	47	7299	5203	774
	évap 50 mol	2955	1419	18262	133	20553	14650	2180
	évap 60 mol	16308	7798	15422	24188	30922	61219	36332
ALG-CI46	initiale	231	89	506	33	708	666	244
	évap 10 mol	282	109	619	40	864	814	3040
	évap 20 mol	361	139	793	52	1108	1043	390
	évap 30 mol	503	194	1104	72	1542	1452	542
	évap 40 mol	827	319	1817	119	2537	2388	892
	évap 50 mol	2330	899	5115	335	7144	6726	2513

L'échantillon de ALG-51; la simulation par PhreeqC montre que les eaux de surface ont une origine des nappes profondes et dans ce cas les eaux de CI avec un peu de quantité des eaux de pluie et les eaux de ruissellement à sebkha Safioune.

Cette comparaison entre les eaux de surface de sebkha Safioune et les eaux évaporées par la simulation de PhreeqC montre un taux d'évaporation d'ordre 40 à plus de 60 moles par litre d'eau de CI.

On constate que le Na et Mg ne concorde pas avec les valeurs trouvées par la simulation ce qui nous laisse penser l'existence d'autres apports des ces deux éléments et, à priori, les facteurs anthropiques que se soit par les additifs utilisées pour l'agriculture ou des déchets domestiques évacués par la canalisation jusqu'à sebkha Safioune.

Pour les échantillons da ALG-54 les eaux de surface Bour elhaicha-Ngoussa , c'est bien clair ces eaux sont d'originelles de la nappe de CI qui ont subi une évaporation de l'ordre de 50mole /l d'eau selon les résultats de simulation.

Reste à signaler qu' il y a un excès en Na existe dans les eaux de surface , l'origine de cet excès est probablement provient depuis autre source ; les pesticides utilisé en agriculture ou les eaux usées.

L'échantillon ALG-53 qui concerne le puits traditionnel dont la nappe phréatique est proche de surface (- 2m) trouve aussi son origine depuis les eaux de CI ayant exploité pour différents besoins , ces eaux rejoignent la nappe phréatique après avoir évaporé un peu au cours de leur trajet d'infiltration ou même dans la nappe, car le pouvoir évaporatoire affecte l'eau même elle est contenue dans la matrice rocheuse à faible sachant que le seuil d'évaporation dans la zone non saturée est de l'ordre de -1.7 m [(EL FERGOUGUI, 2017)].

La simulation montre approximativement une évaporation d'ordre 40 à 50 mole /l d'eau de CI l'échantillon ALG-04N qui concerne les eaux de la nappe phréatique trouvent aussi leur origine de CI dont un taux d'évaporation est de l'ordre 27mole à 33 mole /l ce qui est confirmé par les résultats de simulation faite par PhreeqC.

la zone de hdjira est caractérisée par chott de Bagdad , nous avons fait une simulation d'évaporation par le programme PhreeqC sur les échantillons ALG-48 et ALG -49 qui correspondent respectivement le CI et le CT nous avons obtenu des résultats différents de ceux d'eau de surface.

S'ajoute à cela le non –équilibre dans le flux d'apport d'eau qui alimente le chott et le phénomène d'évaporation qui permet de donner lieu de sel à se précipiter la surface et c'est pour cette raison nous ne pouvons pas voir des valeurs proches ou pareilles entre la simulation et la réalité car ces concentration élevées des minéraux est ajoutées aux eaux de surfaces du chott qui n' a pas le cas pour les eaux simulées

pour la zone de Taibet l'évaporation de ALG-40 correspond à la nappe de CT donne des résultats proches des eaux de surface Oum elkabch et montre une évaporation d'ordre 50 mole /l.

pour l'échantillon ALG-17 qui est situé à proximité de la zone d'agglomérations dans lequel une exploitation de CT de façon continue, il montre un taux d'évaporation d'ordre 30 à 4 mole /l.

l'échantillon ALG-18 de Djuini qui est très éloigné d'apport issue de CI et de CT montre un chimisme particulier et diffère de ces eaux , si on compare les résultats de simulation de PhreeqC, on ne voit pas une concordance , par ailleurs , nous voyons dans le tableau une ressemblance entre les résultats de simulation de PhreeqC avec le taux d'évaporation de 10 mole /l pour les cations de Ca et le SO₄ de cet échantillon alors dans ce cas nous proposons une origine autre que les eaux de CI , nous pensons que cet excès en deux ions est dû à la dissolution de gypse ou anhydrite contenue dans la matrice rocheuse de la nappe phréatique autre question se pose ici ; d' où viennent les eaux de cette nappe phréatique si elle n'est pas alimentée par les nappes profondes ?

Ce problématique exige beaucoup de recherche en utilisant des outils commodes pour connaître exactement les origines de la nappe phréatique, mais devant nos données il est possible que cette masse d'eau soit un mélange entre les eaux d'infiltration de CI et de CT et les quantités d'eaux de pluie accueillies dans les lentilles de cette nappe sinon les eaux de la nappe phréatique proviennent directement de la pluviométrie même cette dernière est rare!

nous signalons ici une remarque concerne l'échantillon ALG-43 ; l'eau du nappe phréatique de Erg Debadib , en effet, le chimisme des eaux entre cet échantillon et ceux des eaux profondes sont très différents et ALG-43 montre une facies chimique proche de la potabilité même pas faire la simulation et le mélange par PhreeqC.

l'origine de ces eaux est probablement les eaux de pluie et elles acquièrent leur minéralisation à travers son séjour et transit dans cette nappe , car la nappe phréatique est caractérisée par une lithologie connue surtout l'existence de minéraux évaporitiques et les minéraux argileux

l'échantillon de ALG-41 montre une origine de CI et c'est mis en évidence par les résultats isotopiques car les valeurs de ¹⁸O et de ²H sont identiques de ceux de la nappe de CI en plus de ça le puits dans lequel l'échantillon a été prélevé se situe dans l'agglomération de Taibet où il ya d'énorme exploitation d'eau de CI causant une remontée des eaux de la nappe phréatique au cours des années passées et jusqu'à nos jours, la légère différence en facies chimique entre ALG-41 et les eaux de CI est interprétée par le contact eau roche dans la nappe superficielle,

mais dans les profondeurs plus de 2 m car ceci est la seuil de pouvoir évaporatoire des eaux de la nappe phréatique.

La zone de Melrhir dont la simulation d'évaporation des eaux ne donne pas des résultats proches de la réalité qui existe dans le chott car la simulation montre une évaporation plus et dépasse 60mole/l

Le chott de Melrhir est l'exutoire naturel de beaucoup d'apports d'eau; les eaux de CT et les eaux de ruissèlement en provenance du flanc nord et les eaux de pluie.

2- Étude isotopique

2-1-Cuvette d' Ouargla

2-1-1-Campagnes 1992-1994 de CRNA

Cette campagne [(CRNA(CDTN avant), 1992)] a été faite au niveau de la cuvette d'Ouargla, plusieurs échantillons sont collectés ciblant les nappes profondes de continental intercalaire, complexe terminal et la nappe phréatique (piézomètres et les puits traditionnels). La répartition des teneurs en ^{18}O sur la cuvette d'Ouargla de différentes nappes est représentée sur la carte suivante (Figure 46) Pour la nappe phréatique les teneurs sont très dispersées et enrichies en ^{18}O , et pour les nappes du CT et du CI, les valeurs sont plus appauvries et homogène à l'échelle de la cuvette ce que nous donne une impression préliminaire que la masse d'eau de CT proviennent de la nappe de CI car elles prennent presque les mêmes caractéristiques.

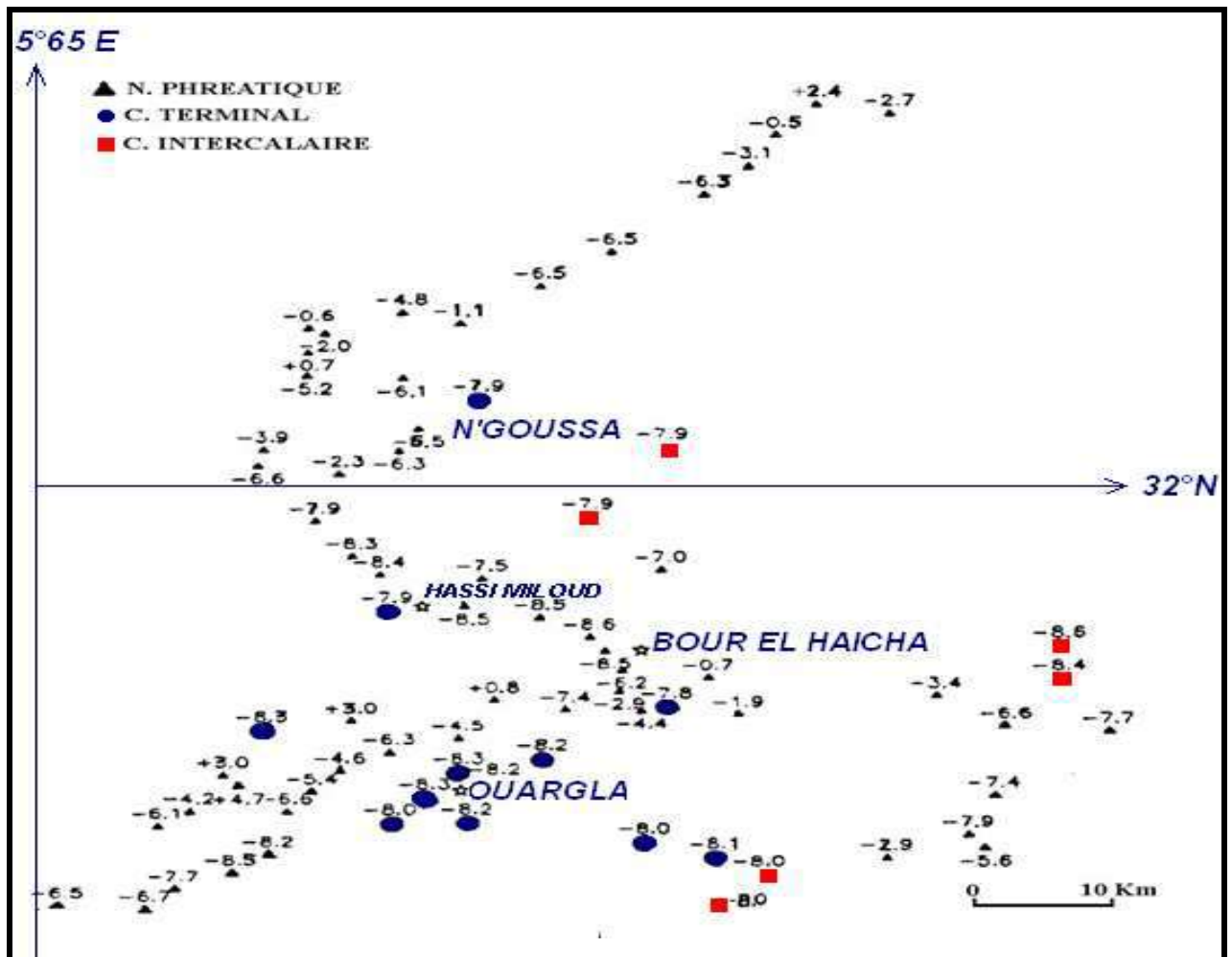


Fig.46. Répartition des teneurs en ^{18}O des eaux de la cuvette d'Ouargla [(CRNA 1992)].(TOUAHRI, 2013)

Nappe du continental intercalaire CI

Les teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe du continental intercalaire sont homogènes et prennent le caractère appauvri en cet isotope. Les valeurs varient entre -7,88 et -8,02 ‰ Vs SMOW avec une moyenne de -7,9 ‰ Vs SMOW [(TOUAHRI, 2013)].

Nappe du complexe terminal CT

Les teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe de Mio-Pliocène et celle du calcaire montrent de faibles variations, pour les forages échantillonnés, les teneurs varient de -8,23 à -7,85 ‰ VS SMOW pour la première nappe et de -8,32 à -7,88 ‰ VS SMOW pour la deuxième nappe.(TOUAHRI et al., 2018)

Nappe phréatique

Les teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla montrent une grande dispersion, elles oscillent entre -8,84 et +3,42% Vs SMOW. Elles montrent un caractère assez enrichi en isotopes stables ce qui témoigne de leur caractère évaporé et confirment ainsi le processus d'acquisition de la minéralisation qui se fait conjointement par dissolution et évaporation, comparée aux eaux de pluie sur la région Ouargla, ces eaux reflètent le caractère évaporé des eaux de pluie, mais aussi une origine différente qui pourrait correspondre à des eaux de mélange entre différentes masses d'eau.(TOUAHRI et al., 2018)

2-1-2- Campagne 2018-2019

Les résultats d'analyses sont représentés dans le tableau 9 et graphique (figure 47), on constate que les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs très variables en isotopes stables de l'eau, pour ^{18}O elles oscillent de -7.9 à 0.2‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -63 à -22.7 ‰ VS SMOW. Les eaux de la nappe complexe terminale ont des teneurs en ^{18}O variant de -8.4 à -8.6 ‰ VS SMOW et ^2H les teneurs sont variant de -62.8 à -65.1 ‰ VS SMOW.

Tab. 9. Résultats d'analyses isotopique 2018-2019

ZONE		Aquifer	Min/Max	% VS SMOW	
				^2H	^{18}O
I	la cuvette	Phréatique	min	-62,90	-8,41
			max	-22,70	0,25
		CT	min	-65,12	-8,60
			max	-62,85	-8,40
		CI	min	-64,20	-8,65
			max	-64,10	-8,64

Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.60 VS SMOW et les valeurs en ^2H sont autour de -64 VS SMOW.

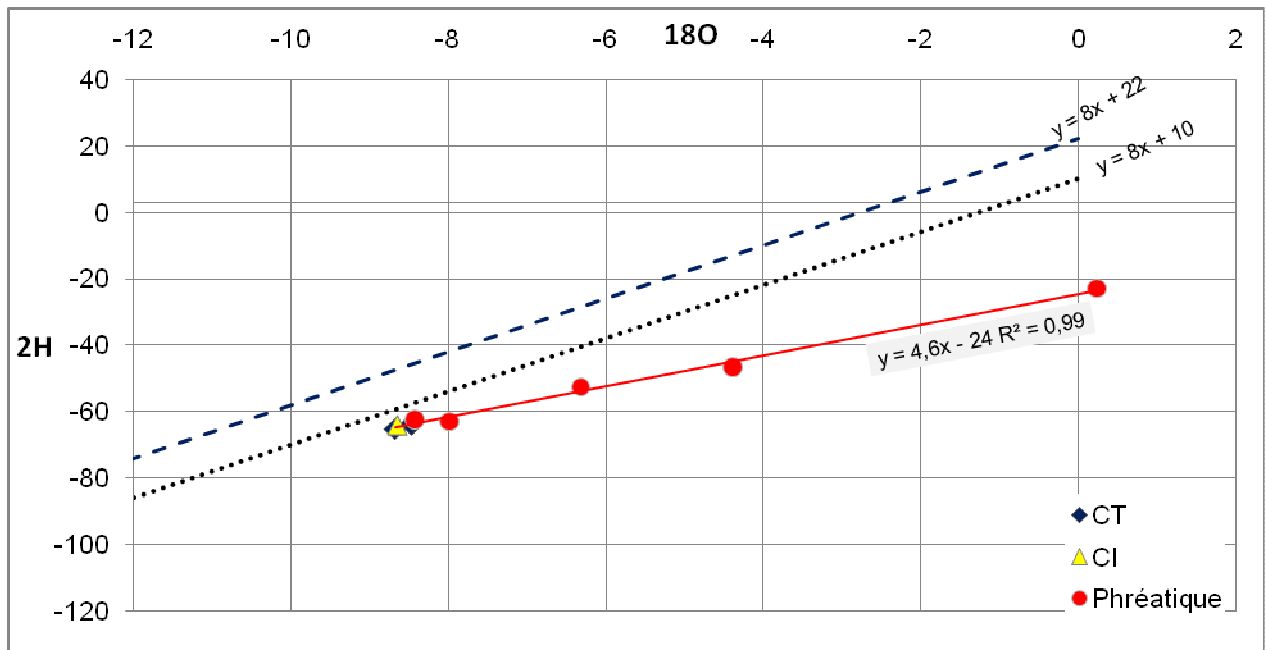


Fig.47. Relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ des eaux dans cuvette d'Ouargla.

Les échantillons des eaux de différents aquifères s'alignent sur une droite d'évaporation d'équation $Y=4.6*X-24$ sachant que $R^2=0.99$ et se coïncident avec DMMT droite météorique de méditerrané en donnant un point d'origine de masse d'eau initiale (^{18}O autour de -9 VS SMOW et ^2H autour de -60 à -65 VS SMOW).

Les eaux de CI sont des eaux anciennes rechargées pendant des périodes humides anciennes (pléistocène) car les teneurs isotopiques des eaux de pluie de notre région d'étude montre des teneurs enrichies ce qui ne correspondent pas avec les eaux de CI.

En lisant les résultats isotopiques de ^{18}O et ^2H , on constate la ressemblance des valeurs entre les eaux de CI, CT et en général il y a deux pôles d'eau la première correspond les nappes profondes (CI+CT) et le deuxième correspond la nappe phréatique dont les valeurs sont variables; les valeurs enrichies sont celles représentant les eaux de surface (sebkha, chott, ou les eaux qui sont en contact direct avec l'aire ce qui donne lieu de fractionnement isotopique dû à l'évaporation).

D'autres valeurs comprises entre -4 et -6.3 VS SMOW pour ^{18}O et -47 à -52 VS SMOW ^2H représentent probablement :

-les eaux de CI soumises à une évaporation (figure 48) avant leur infiltration à la nappe phréatique dans sa partie protégée et exempte. Si on suppose ce scénario qui est fortement acceptable on peut suggère que cet enrichissement par rapport aux eaux originelles de CI est survenue au cours de leur infiltration dans la nappe de surface, c'est-à-dire il ya un

fractionnement isotopique pendant l'infiltration des eaux dans la zone non saturée c'est à dire dans la trajectoire; depuis la surface jusqu' à la profondeur où le pouvoir évaporant est nul.

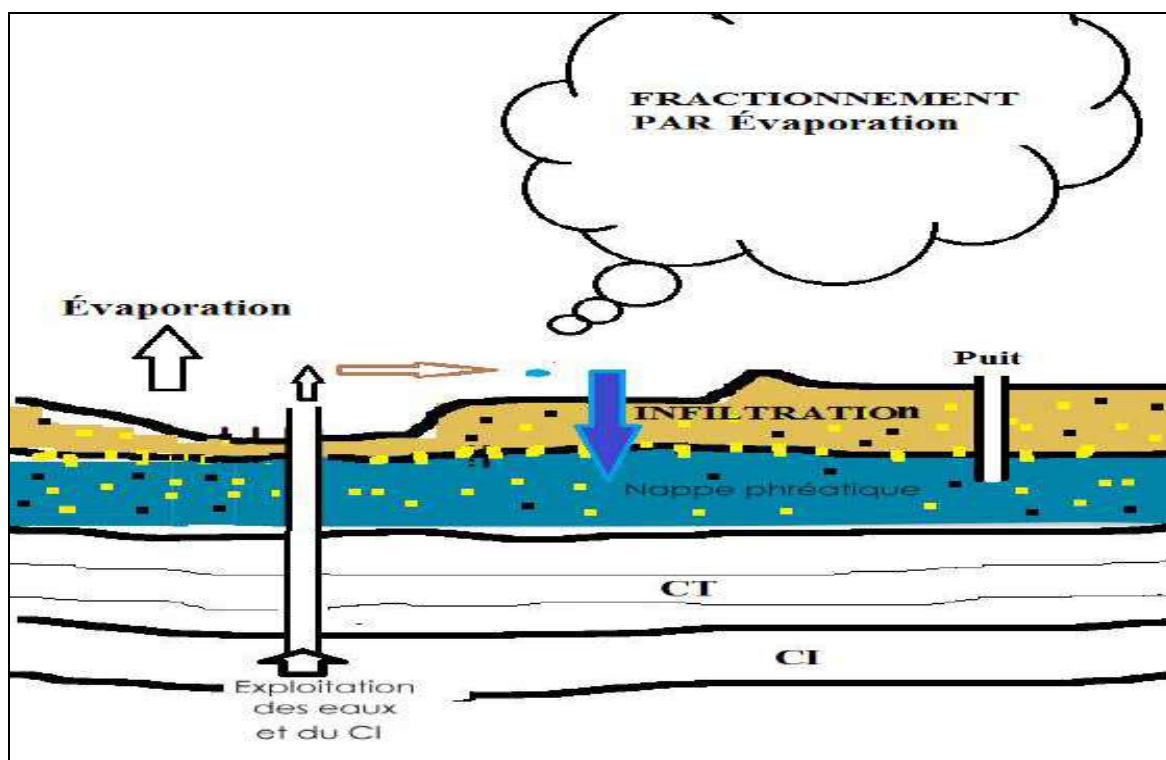


Fig.48. Fractionnement isotopique des eaux de CI avant leur infiltration à la nappe de surface.

Sinon, un mélange entre différentes masses d'eaux ayant des origines différentes ; certainement une origine de nappes profondes ;CI et CT et d'autres origines, ce dernier peut être les eaux d'oued ou ruissellement , les eaux de pluie- qui sont très rare que ne dépasse pas 45mm/an-. Au niveau de la cuvette, le nombre de puits exploitant les nappes profondes montrent une énorme quantité d'eau pompée continuellement depuis des années.

Pour les eaux de CT, On remarque que ces eaux sont identiques aux eaux de CI à l'échelle de la cuvette, la figure (49) montre cette intéressante remarque en affichant les teneurs en 18O dans les eaux de forages captant le CT à la cuvette, ces teneurs sont en général autour de -8 VS SMOW pareil aux eaux de CI, à ce stade ,la question qui se pose, c'est pourquoi cet ressemblance toujours existe uniquement au niveau de la cuvette et non pas les autres zones étudiées de notre région (Taibet, Melrhir) sachant que ces deux nappes sont séparées entre eux par une immense couverture sédimentaire imperméable ?

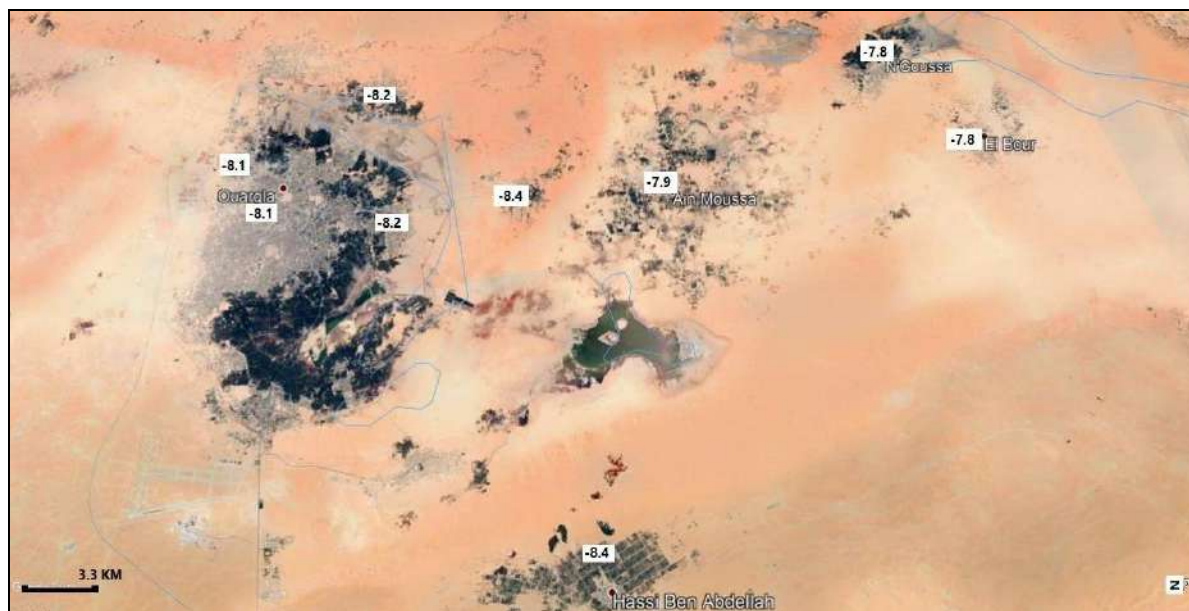


Fig.49. Teneurs de ^{18}O des eaux de forage de CT.

En premier lieu nous allons proposer les possibilités suivantes :

Le CT est alimenté par l'infiltration des eaux de CI

Cette proposition est possible si on parle de ressemblance entre les eaux de la nappe phréatique libre (nappe de surface) et la nappe de CI ; mais, ce n'est pas le cas pour la nappe de CT car, nous pensons qu'avant les masses d'eau de CI sont achevées à la nappe de CT il est clairement que sa trajectoire d'infiltration passe par la nappe de surface tout en formant un mélange ayant une caractéristique différente de deux nappes quoi que ce soit, mais ce n'est pas le cas parce que toutes les eaux de CT de la campagne récente 2018 et celle de l'ancienne ont montré une similarité entre les eaux.

Les caractéristiques lithologiques, hydrogéologiques, et hydrodynamiques témoignent d'une discontinuité hydraulique entre les nappes du Complexe Terminal et celle du Continental intercalaire. Cette nappe de CT a un toit et mur bien précis connus et on sait bien qu'il y a un niveau argileux et évaporitique sépare la nappe de surface à celle de CT, le niveau statique mesuré en 2018 (Tableau 8) confirme la captivité /artésianisme à quelques endroits dont nous citons; Hassi Iekfif au nord de la cuvette (figure 50), forage proche de sebkha Safioune, forage Ngoussa, et à Rouissat par ailleurs les niveaux statiques au sud Ouargla est proche de la surface (4 à 5 m). La figure 47 a été faite à partir des données de mesure fournies par direction hydraulique de la wilaya de Ouargla en 2018.

Tab.10. Caractéristiques géométriques de CT (cuvette d'Ouargla) [(DHW, 2019)].

lieu	nom du Forage	NAPPE	Toit (m)	Mur (m)	Prof (m)	Niveau Statique (m)
N'GOUSSA	D6 F67	CT	121	135	135	ARTÉSIEN
N'GOUSSA	D6 F87	CT	77	108	108	ARTÉSIEN
N'GOUSSA	D6 F107	CT	70	86.5	86.5	ARTÉSIEN
OUARGLA	D1 F138	CT	55	68	68	ARTÉSIEN
OUARGLA	D2 F68	CT	61	79	79	ARTÉSIEN
ROUISSAT	D3 F7	CT	35	62	62	ARTÉSIEN
ROUISSAT	D4 F98	CT	35	67.92	67.92	ARTÉSIEN
SIDI KHOULED	D9 F16	CT	46	55	55	ARTÉSIEN
ngoussa	D6 F71	CT	121	150	150	7,87
Rouisat	D3 F12	CT	18	32	32	4,47
Rouisat	D3 F14	CT	65	98	98	5.20

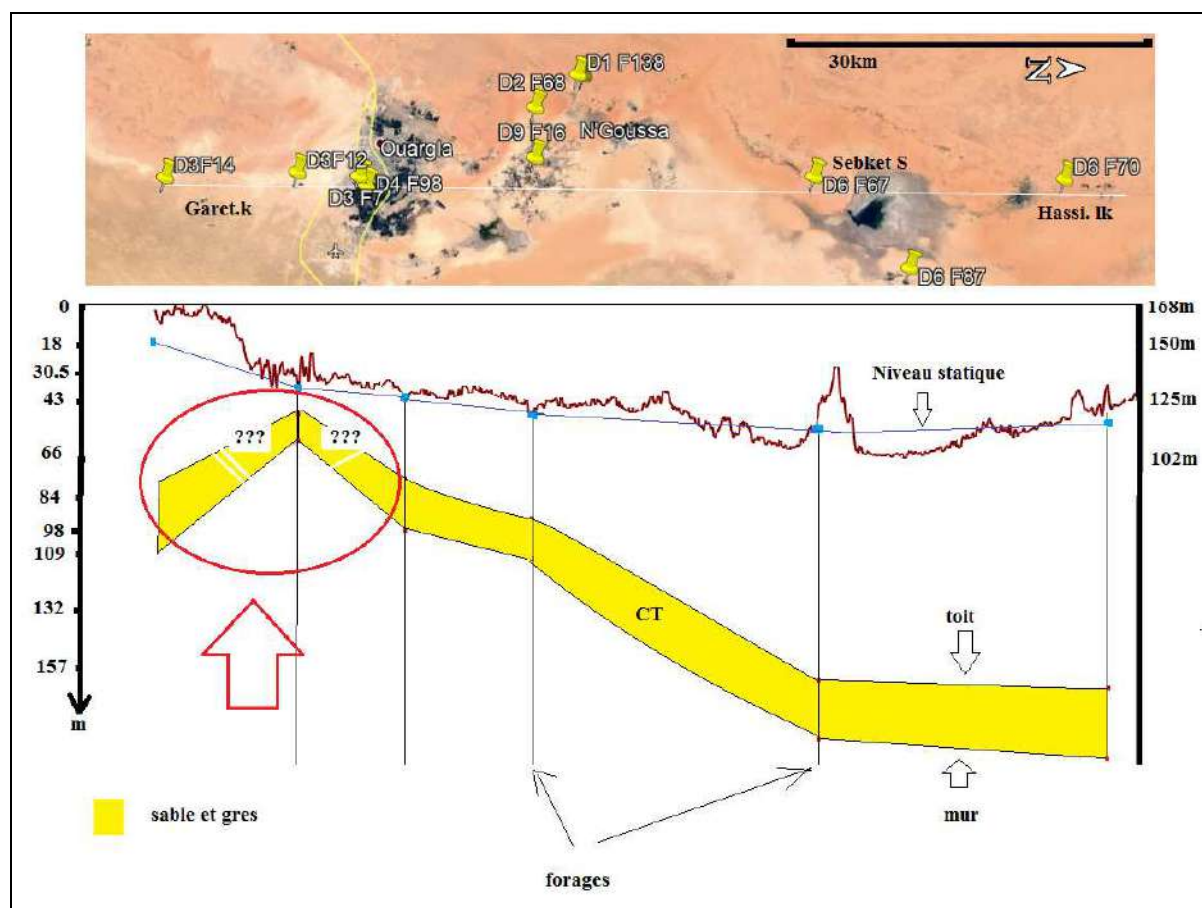


Fig.50. Représentation schématique de toit et mur de CT par corrélation (zone d'Ouargla).

Vue que les eaux de nappes profondes sont anciennes , il est convenable de voire ces eaux avec les autres techniques isotopiques et cette fois-ci par le radiocarbone , c'était le cas des travaux de base de dont nous citons ; GUENDOZ [(GUENDOZ, 1985)] , BABA SY[(OULD

BABA SY, 2005)], et récemment TOUAHRI[(TOUAHRI, 2013)], et SLIMANI [(SLIMANI, 2016)]. En effet, les données isotopiques radioactive du ^{14}C montre que l'activité en Carbone 14 de ces eaux de CT sont variant de 6 à 11 pmC reflètent une période de recharge ancienne (pléistocène) et pour les eaux de CI, l'activité est beaucoup plus bas oscillent de 0.5 à 3 pmC, montre une période de recharge très ancienne par rapport à celle de CT. l'activité très faible; voire nulle en carbone 14 dans les eaux de la nappe de CI rend une difficulté à l'estimation.

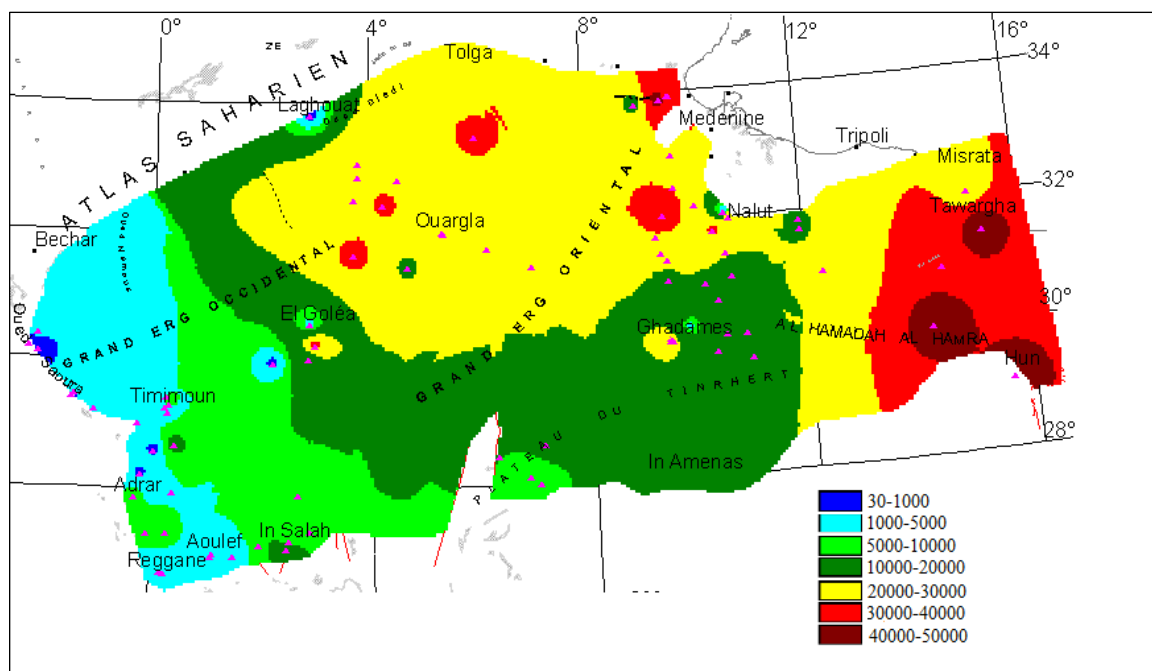


Fig.51. Cartographie des âges d'eaux de CT [(OULD BABA SY, 2005)].

d'âge par radiocarbone ; c'est-à-dire hors la portée de ^{14}C ce qui fallait d'utiliser autre élément radioactif qui dépasse cette portée; des chercheurs ont utilisé le chlore 36 [(Guendouz et al., 2006)] afin de préciser bien l'âge des eaux de CI car dans quelques échantillons; ils ont trouvé que les eaux de CI sont très anciennes par rapport à la nappe de CT.

Une carte des âges des eaux de CI [(OULD BABA SY, 2005)] a été établie en employant les données d'activité en carbone 14 dans un support cartographique (figure 51).

Revenons aux isotopes stables de l'eau; la comparaison de la cuvette de Ouargla avec le reste des zones montre cette ambiguïté de ressemblance entre les eaux de deux nappes, chaque nappe a ces propres teneurs caractéristiques, à Taibet (figure 52) et à Melrhir (figure 53) les teneurs en ^{18}O des eaux de CT sont autour de -6 à -5 par contre les eaux de CI les teneurs sont autour de -8.

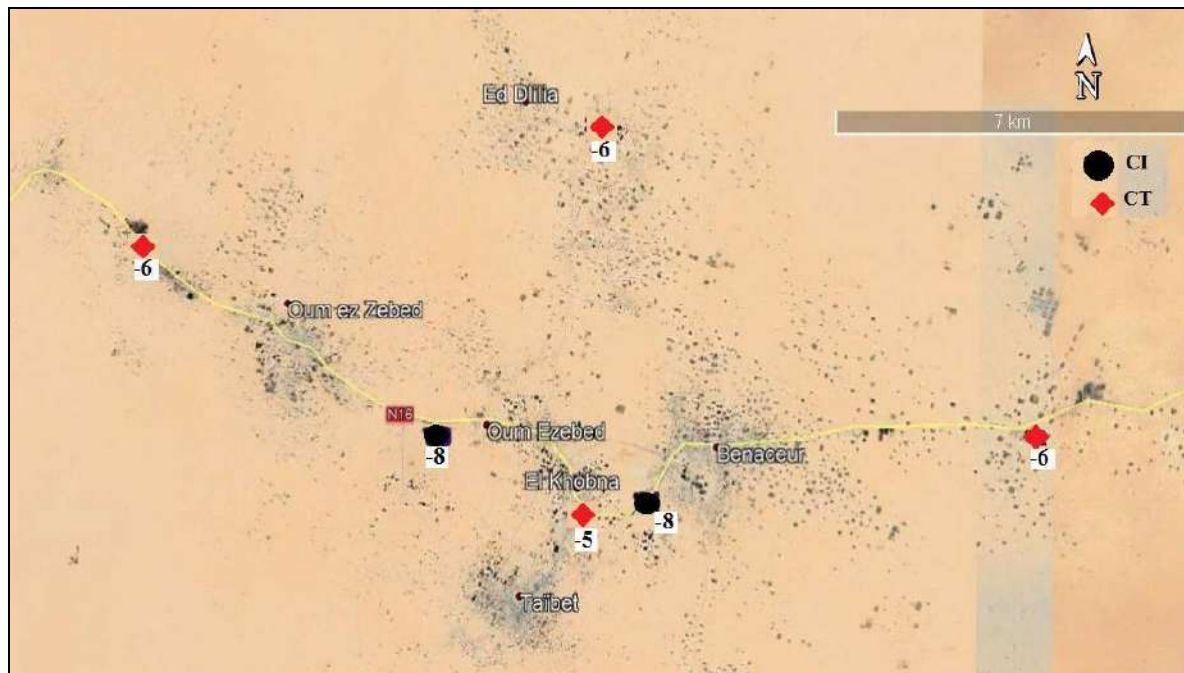


Fig.52. les teneurs de ^{18}O des eaux de CT et CI à la zone de Taibet (2018).

On ne voit pas que les eaux de forages captant le CT sont pareilles aux eaux de CI dans cette zone malgré que ces deux nappes trouvent continuités lithologiques jusqu'à chott Melhrir.

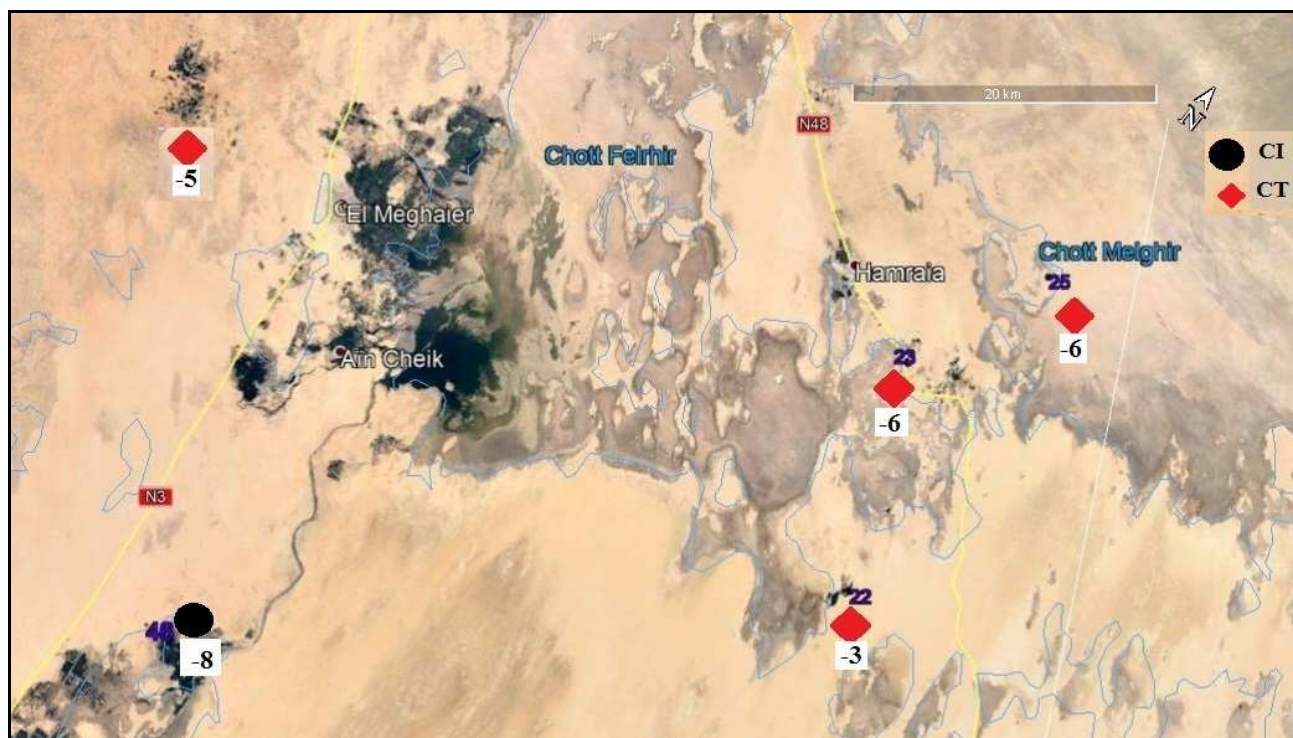


Fig.53. Les teneurs en ^{18}O des eaux de CT et CI à Melhrir (2018).

Afin de simplifier ce problème nous avons proposé cette coupe transversale (figure 54) en montrant les deux nappes et le sens d'écoulement des eaux et les teneurs isotopiques de ^{18}O à chaque zone de notre région d'étude.

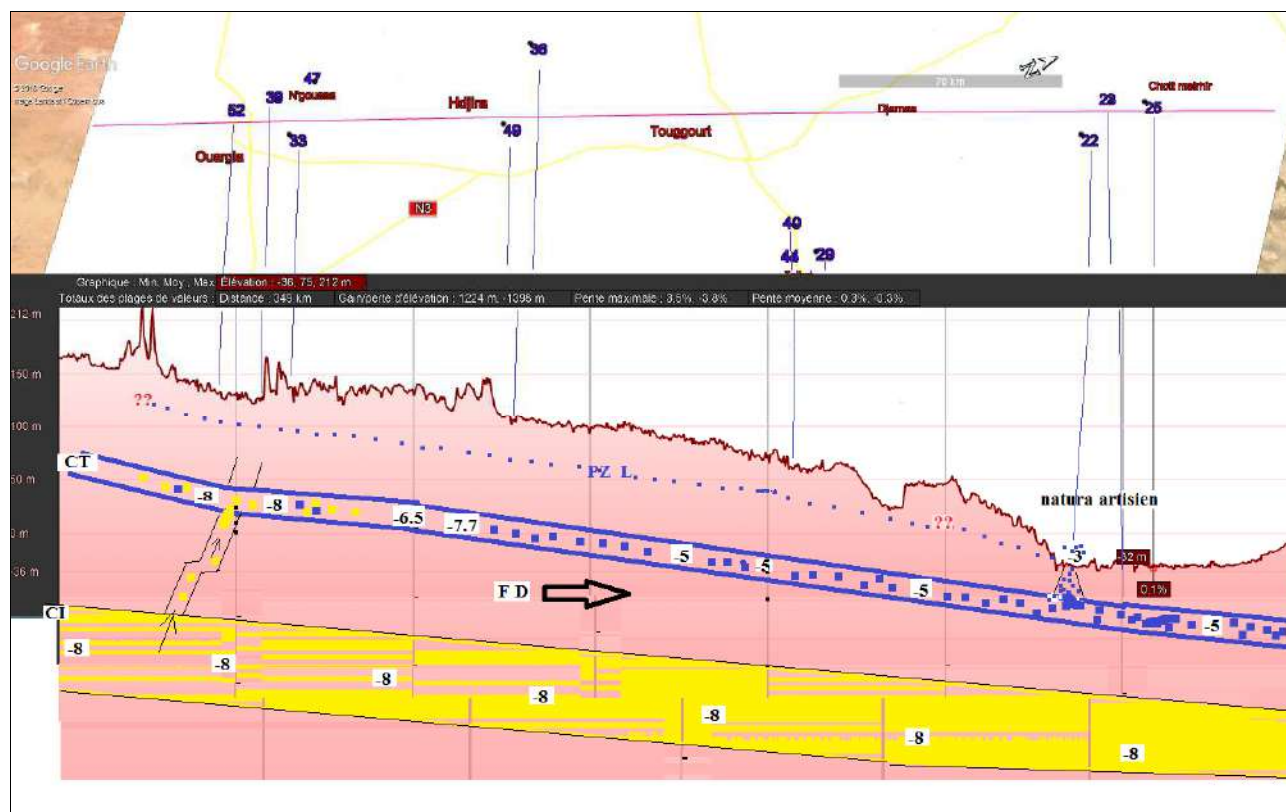


Fig.54. Schéma simplifié le mélange des eaux entre le CT et CI à la zone d'étude.

-La possibilité d'une drainage verticale (rejet de faille)

Cette proposition a été signalée par:

-le géologue minier français Georges ROLLAND ça fait plus d'un siècle , exactement en 1866 [(ROLLAND, 1866)] lors de son parcours traversant le Sahara algérien dans le cadre de mission inclus en projet chemin de fer transsaharien.

*(...L'analyse d'un échantillon de travertin de Ouargla a été donnée par Ville L
Ce sont des calcaires concrétionnés, grisâtres ou brunâtres, compacts et vacuolaires. On pourrait distinguer plusieurs niveaux, les couches inférieures étant généralement tufacées. Au microscope, ces calcaires se montrent finement cristallins; ils englobent le plus souvent de petits grains de quartz roulés. Notons d'ailleurs que les travertins en question ne diffèrent pas des calcaires concrétionnés qui constituent la carapace supérieure des terrains d'atterrissement ancien. A l'époque où les travertins de Ouargla se sont déposés, il existait des sources naturelles dans le bas-fond, et les eaux*

artésiennes jaillissaient d'elles-mêmes en certains points de la surface. Aujourd'hui leur niveau hydrostatique s'est abaissé, et même, dans la plupart des puits indigènes, elles n'arrivent pas tout à fait jusqu'à la surface naturelle du sol.))

-Adnan Moulla Soufi et Abdelhamid Guendouz

((...Pour simplifier la compréhension des phénomènes auxquels est soumis le système aquifère en question, les résultats obtenus sont interprétés selon la direction d'écoulement principale. Pratiquement, il est fort possible qu'un flux quelconque puisse pénétrer cette ligne d'écoulement de la dorsale du M'Zab à l'ouest. De plus, il est aussi probable qu'il y ait une contribution à partir du CI sous-jacent à la faveur des failles d'Amguid El-Biod au sud...))(Guendouz et al., 1996)

et TOUAHRI en sa thèse de magistère en 2013 qui propose la possibilité d'une drainance verticale à l'aide des données isotopiques stables (TOUAHRI, 2013), R SLIMANI en 2016 dans sa thèse de doctorat [(SLIMANI, 2016)]et récemment HADJ kouider 2019 [(HADJKOUIDER, 2019)]

Dans ce cas et pour simplifier le scénario de drainance verticale on voit bien qu' uniquement dans la cuvette que cette ressemblance remarquable existe entre les eaux de CT et les eaux de CI par rapport aux restes des zones de la région.

Dans la cuvette il est fort possible l'existence d'une faille cachée responsable de ce contact. À grande échelle, le schéma structural du bassin oriental montre l'existence d'une faille importante au sud d'Ouargla de direction NNE-SSW (faille Amguide Labiod). Des travaux récemment publiés montrent la possibilité d'extrapolation de cette faille en touchant (figure 55) la cuvette d'Ouargla en causant les interactions entre les deux nappes [(HADJKOUIDER, 2019)].

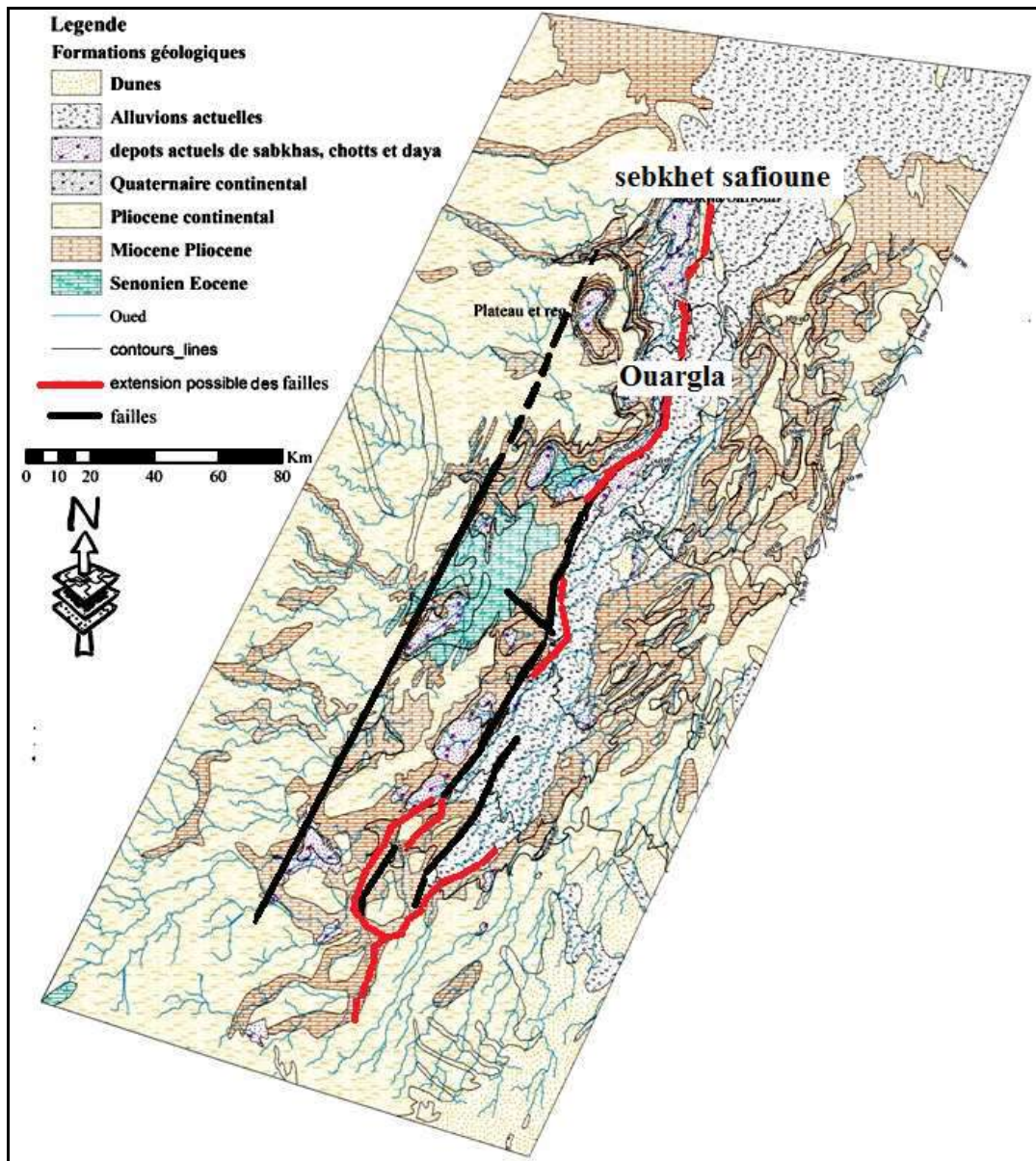


Fig.55. Carte géologique de Oued M'ya présentant les failles et leurs extensions possibles [(HADJKOUIDER, 2019)].

2-2-Hdjira

Son chef-lieu est situé sur la commune éponyme d'El Hdjira. Une artère principale, au fond de laquelle se trouve la petite oasis de El-Hdjira et l'ancienne oasis de Bagdad. Cette artère est dirigée du Sud-Ouest au Nord-Est, et communique, du côté Sud, avec la dépression de Ouargla : c'est donc là, à proprement parler, le prolongement du lit de l'Oued Mya. Mais, en réalité, le bas-fond allongé qui s'y trouve encaissé entre deux lignes discontinues constitue un bassin fermé, dont le chott de Bagdad occupe le point le plus bas: un seuil le sépare, au Sud-Ouest, du bas-fond qui va de la Sebkha Safioune à Ouargla; au Nord-est, la gouttière perd sa netteté, se bifurque, et un seuil entremêlé de saillies rocheuses la sépare de la dépression de l'Oued Rir'.

Mise à part gouttière de Bagdad (chott Bagdad) cette région est constituée par le plateau supérieur d'atterrissement ancien, raviné en tous sens, mais peu profondément.

D'une manière générale, le plateau est recouvert d'une carapace gypso-calcaire blanc bleuâtre, qui a été entaillée par les érosions quaternaires et couronne les bordures des ravinements; cette croûte concrétionnée sert souvent de gangue à des silex noirs, jaunes, rouges, aux angles émoussés, et parfois aussi à des cailloux roulés de calcaires crétacés. Au-dessous apparaissent, sur les lianes des terrasses, des alternances de couches de gypse blanc et de sables ou grès quartzo-gypseux, avec quelques niveaux accidentels de marnes rouges ou vertes, également gypsifères.

Ces bancs de gypse sont farineux, ou cristallins, ou compacts, ils contiennent généralement une certaine proportion de carbonate de chaux et de silice, et présentent çà et là des concrétions calcaires ou opalines. Parfois ils renferment des lits lenticulaires de calcédoine vacuolaire et mamelonnée, dont on trouve à la surface des débris et des plaquettes à angle vif, provenant de leur rupture sur place. Hydro-géologiquement cette zone fait partie du bassin régional dont il englobe des nappes phréatiques en surface, le complexe terminal et le continental intercalaire, les eaux de ces nappes sont en général salées à trop salées.

Le nombre de forages exploitant la nappe de continental intercalaire est 5 et ce de complexe terminal 34 selon un bilan de service hydraulique de la willaya d'Ouargla (2018).

Teneurs isotopiques des eaux

Les teneurs isotopiques de cette zone sont représentés dans le tableau 11

Tab. 11. Résultats d'analyses isotopique des eaux 2018-2019 Hdjira.

ZONE		Aquifer	Min/Max	%o VS SMOW	
				² H	¹⁸ O
2	Hdjira	Phréatique	min	-65,00	-8,00
			max	-12,00	2,00
		CT	min	-60,00	-7,70
			max	-55,00	-6,50
		CI	min	-59,00	-8,10
			max	-58,00	-7,80

Nappe phréatique: Les données des isotopes stables des eaux de cette nappe sont variées, en fait, il ya uniquement deux échantillons, celle de Hassi Lekhfif qui a une valeur -8,39 ‰ VS SMOW pour ¹⁸O et une valeur de -64,9-8,39 ‰ pour deutérium, l'autre échantillon représente les eaux enrichi du chott de Bagdad dont les teneurs en ¹⁸O et ²H sont respectivement 2 ‰ VS SMOW et -15.93 ‰ VS SMOW.

Nous avons constaté que les eaux de puits traditionnel à Hassi Lekhfif (ALG TA 34) est appauvris en isotopes lourds de l'eau ce qui ne correspond pas aux eaux évaporées reconnues à l'échelle du secteur étudié, malgré que la profondeur de 9 m représentant les nappes phréatiques cela nous laisse poser la question D'où viennent ces eaux ?(figure 56).

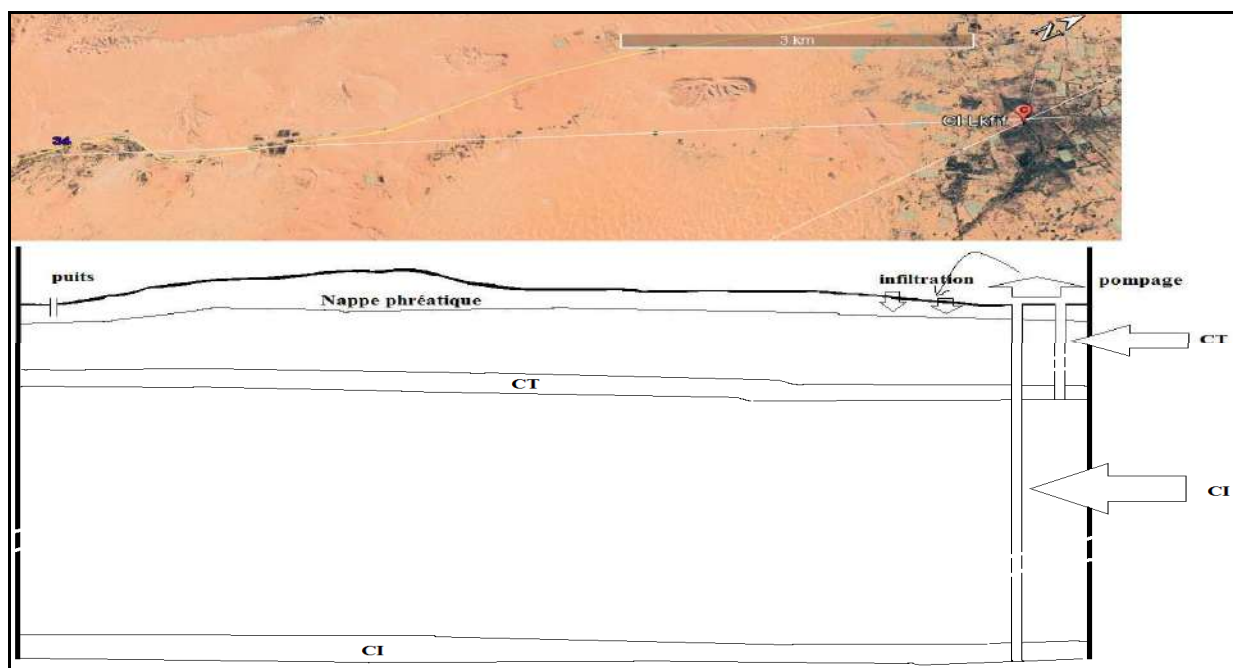


Fig.56. Localité de Hassi lekfid.

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de se baser sur les nombres de points d'eaux des nappes profondes surtout la nappe de continental intercalaire dont les eaux sont généralement homogènes et prennent une valeur autour de -8 ‰ VS SMOW pour 18 O et -60 ‰ VS SMOW, nous pouvons dire que juste un mélange entre les eaux de la nappe phréatique et les eaux infiltrées provenant de forage de CI utilisées pour l'irrigation de palmeraie et des jardins à Hassi Lekhfif.

Ce mélange a des concentrations similaires à celles des eaux de la nappe CI. Les eaux du chott Bagdad sont tout à fait normale vu le processus d'évaporation intense, elles prennent des valeurs positives en ^{18}O +2‰ VS SMOW et -16 ‰ VS SMOW pour ^2H .

Complexe terminal (CT)

Les teneurs en ^{18}O des eaux de cette nappe oscillent -6.5 à -7,7 ‰ VS SMOW et de -55,36 à -60 ‰ VS SMOW pour deutérium on remarque ici que l'échantillon ALG TA 36 de la zone d'el Alia prend une valeur qui se coïncide avec l'aspect général de la nappe du complexe terminal, mais l'autre échantillon ALG TA 49 prend des valeurs appauvris semblables aux eaux de CI!

Le forage de CT Hassi Mamer (ALG TA 49) (figure 57) se situe dans une zone d'agriculture à une distance d'environ 2.7 km du forage ciblant la nappe de CI nommé Albien de Gueddachi

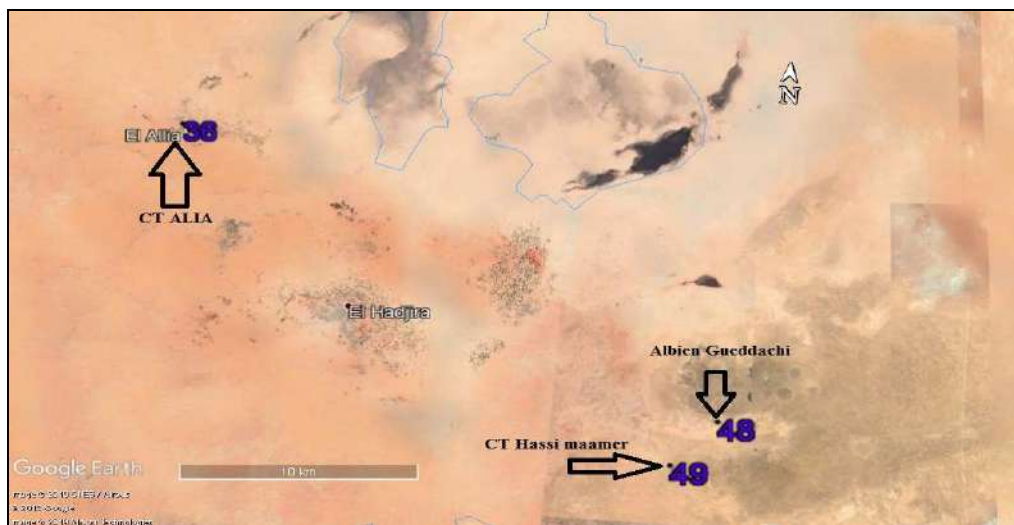


Fig.57. Le forage de CI Gueddachi à Hassi maamer, (Hdjira).

Pour mettre en évidence cette ressemblance, les possibilités suivantes sont proposées:

1- le mélange avec une grande proportion des eaux de CI est dû avec interaction entre les eaux c'est-à-dire les eaux de CI jaillissent le CT que se soit à travers le tubage détérioré de ce puits et les autres qui sont alentour ou naturellement par le biais d'un rejet de faille comme le scénario proposé à la cuvette, et dans ce cas, on suppose l'extrapolation de la faille proposée

vers le Nord-est en touchant cet endroit causant aussi ce mélange CT et CI. En effet, on peut dire que les deux cas peuvent se survenir en même temps c'est-à-dire le biais d'un faille et les tubages détériorés.

2-le mélange dans cet endroit se fait par la ré-infiltration des eaux d'irrigation de CI !!Ce dernier est moins possible par rapport aux premiers, car les logs litho-stratigraphiques des forages qui ont été faits à cette emplacement montrent un toit imperméable d'une tranche de marne et /ou argile de plus de 10 à 15 m qui fait un obstacle pour le passage des eaux de surface vers le bas, en plus, existe des forages qui sont encore artésiens captant cette nappe (CT) ce qui montrent qu'il n'ya pas de possibilité d'infiltration des eaux par gravité.

Continental intercalaire (CI)

les valeurs sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8 +/- VS SMOW pour les eaux de forage captant cette nappe , cette nappe contient des eaux anciennes type fossile, d'après ces teneurs appauvris on peut dire que la recharge est ancienne pendant des périodes humides.

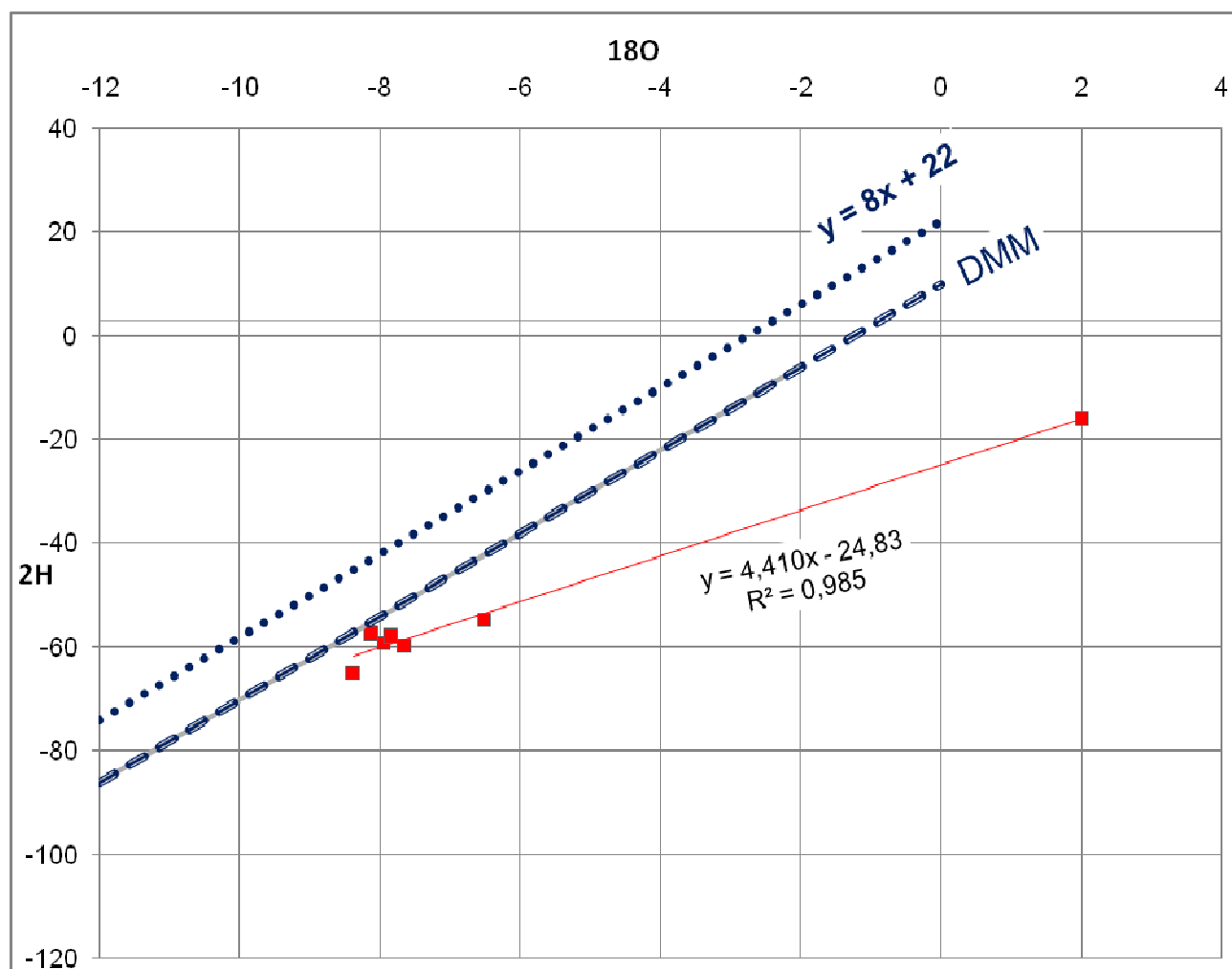


Fig.58. Relation $\delta^2H-\delta^{18}O$ des eaux (Hdjira).

La représentation graphique (figure 58) des teneurs des isotopes lourds de l'eau selon un relation ^{18}O versus ^2H montre un droite de pente 4 d'évaporation $\delta^2\text{H} = 4.4\delta^{18}\text{O} - 24.8$, l'intersection avec droite météorique mondiale ou DMM est donné l'origine de l'eau , les teneurs originales sont autour de -8 à -9 de ^{18}O et de -60 à -65 , ces eaux reflètent à des eaux anciennes, car les teneurs des eaux de précipitation récentes sont enrichies en ces isotopes (voir pluies Ouargla et Taibet).

2-3-Taibet

Cette daïra fait partie de la willaya de Ouargla (figure 59) avec oued Souf elles forment la limite Nord du grand Erg Oriental. Cette zone est limitée au Nord par les chotts Merouane, à l'Est par la région de l'Oued Souf, et au Sud par l'extension de l'Erg Oriental et par la ville de Touggourt à l'ouest. Au point de vue administratif, elle englobe trois communes (Taibet. EL'Mnagueur. Ben Nasseur).

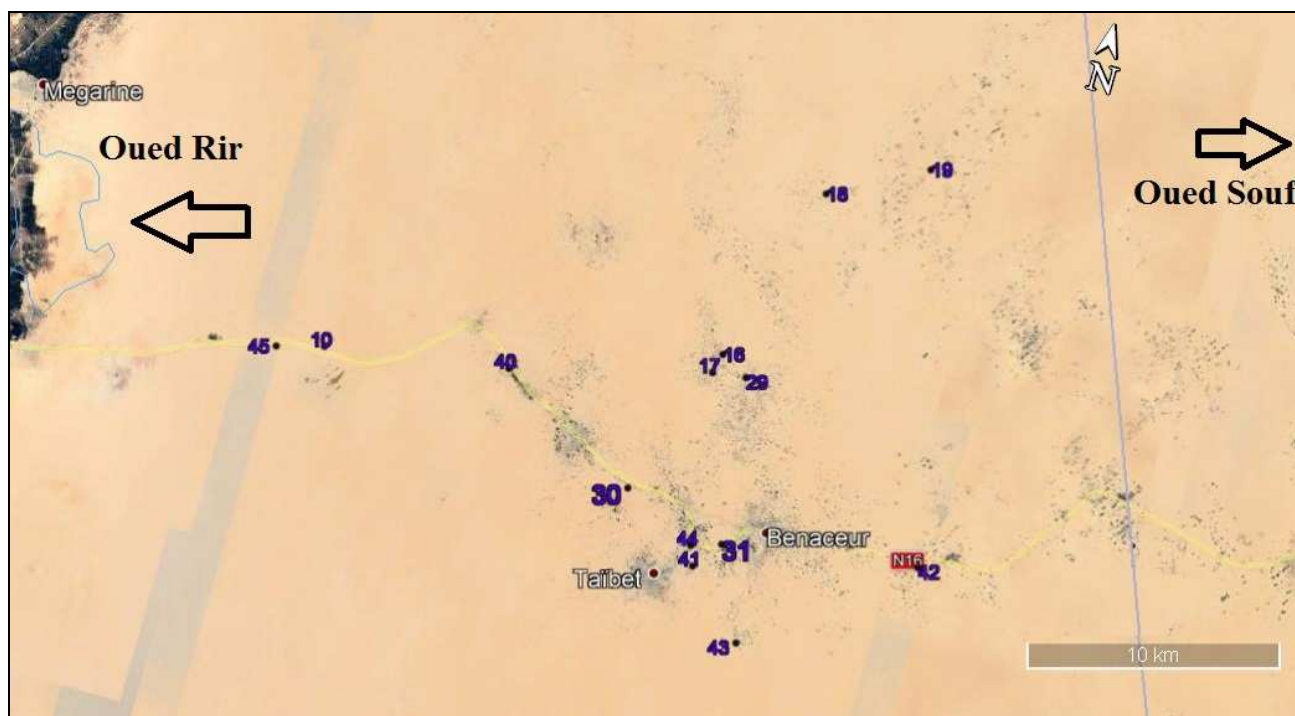


Fig.59. Localisation des points d'eau échantillonnés.

La zone de Taibet est une zone saharienne, connue par la morphologie des dunes ou les accumulations des sables en surface répartis essentiellement par des chaînes des dunes ,surtout la partie nord , ataigne 200m d'hauteur et repose sur une formation quaternaire de plusieurs dizaines de mètres de sable fin éolien , compact , homogène et uniforme avec l'existence d'un nombre important de cratère creusé par l'homme (Ghouts) et des acquêtes (vide entre les dunes :hous) Dans le sud de Taibet, on rencontre des dunes immenses et bien différenciées, ataignant parfois 200m d'hauteur on les appelle les Ghroudes La différence fondamentale à

faire dans la topographie de Taibet est celle qui existe entre l'Erg et Sahane Quant au climat , il se diffère peu de la zone d'Ouargla et un taux moyenne annuelle de précipitation d'ordre de 75 mm été (enregistré pendant la dernière décade).

2-3-1-Teneurs isotopiques des eaux

Les résultats isotopiques des eaux sont affichés dans le tableau 12 et représentés dans le diagramme (figure 60), montrent que les eaux de pluie ont des teneurs très variables en isotopes stables de l'eau , pour ^{18}O elles oscillent de -9.36 à +2.14‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -55,77 à 9.94 ‰ VS SMOW, la majorité sont enrichies mise à part cet événement montrant une teneur appauvri , nous allons le discuter après .

Tab. 12. Résultats des analyses isotopiques des eaux 2018-2019 Taibet.

ZONE		Aquifer	Min/Max	% VS SMOW	
				^2H	^{18}O
3	Taibet	Phréatique	min	-55,70	-7,17
			max	-19,45	1,97
		CT	min	-54,70	-5,80
			max	-50,40	-4,80
		CI	min	-59,80	-8,29
			max	-59,40	-8,15
		Pluie	min	-67	-9,36
			max	9.64	2.14

Les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs très variables en isotopes stables de l'eau , pour ^{18}O elles oscillent de -7.18 à +1.97‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -55,77 à -19 ‰ VS SMOW cet enrichissement enregistré est tout à fait normal vu le processus d'évaporation, signalons que les points qui ont des teneurs appauvris est probablement les eaux de CI très exploitées surtout dans l'agglomération.

Les eaux de la nappe CT ont des teneurs en ^{18}O variant de ; -4.86 à -5.86 ‰ VS SMOW.et de -50.4 à -54.7 ‰ VS SMOW à l'échelle de cette zone cette nappe est en général homogène.

Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.20 VS SMOW comme moyenne.les valeurs en ^2H sont atour de -59.7 VS SMOW pour les eaux de forage captant cette nappe ,

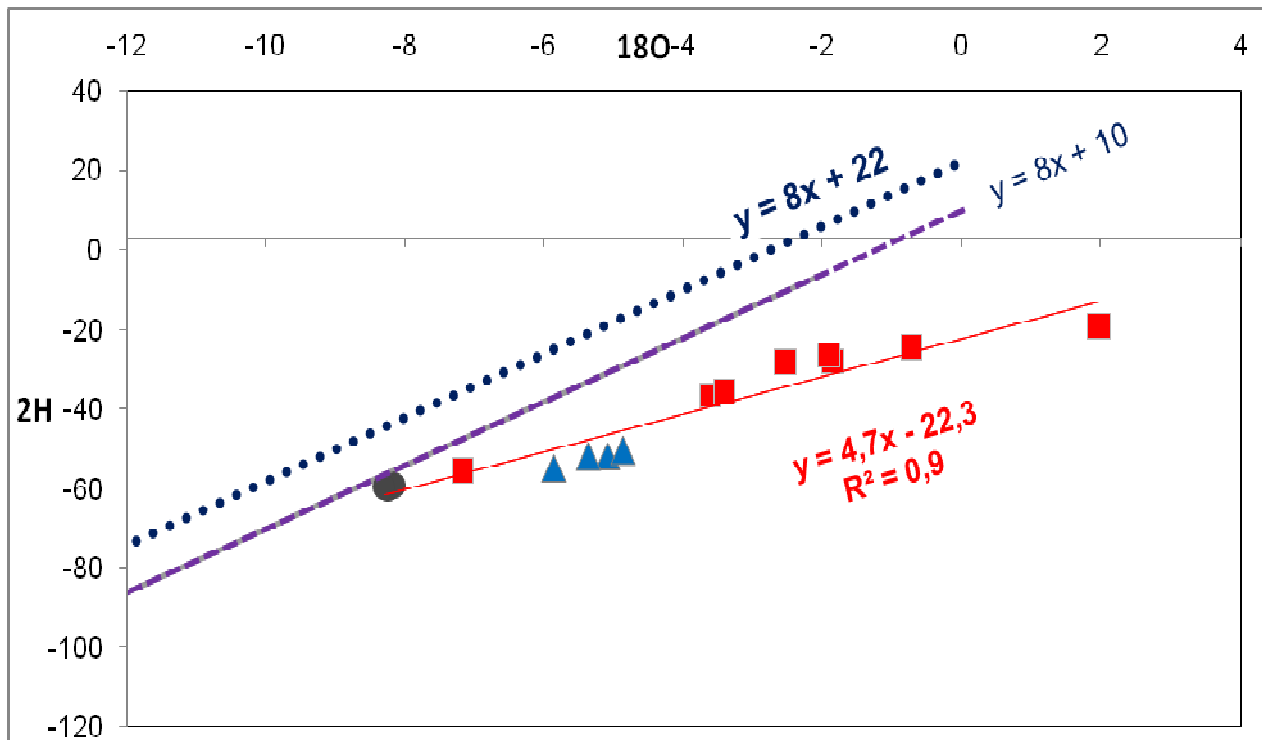


Fig.60. Relation 2H -18O des eaux à Taibet.

Discussion

La nappe phréatique

Cette nappe est contenue dans les niveaux sableux et argilo-évaaporites du Quaternaire. Elle se présente sous forme pelliculaire par rapport à la nappe des sables qui lui succède en profondeur et dont elle est généralement séparée par un niveau imperméable du Mio-Pliocène. Elle est contenue dans les sables fin à moyens d'âge Quaternaire, sa puissance moyenne est d'une vingtaine de mètres. Elle est caractérisée par des eaux de fortes salinités ;

les analyses des eaux de cette nappe montrent qu'elles sont très salées, actuellement et à quelques endroits. La nappe phréatique est « remontée » par l'excès de l'eau d'irrigation et des pompages du CI et du CT et la gestion irrationnelle de ces ressources .

Les eaux de la nappe phréatique ou les eaux superficielle qui ont des teneurs très variables en isotopes stable de l'eau , pour ^{18}O elles oscillent de -6 à +2‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -40 à -8 ‰ VS SMOW; ces valeurs montrent un mélange entre différentes masses d'eau. Les valeurs de -6 en ^{18}O et de -50‰ VS SMOW en ^2H sont probablement les eaux de la nappe de continental intercalaire ayant subi une évaporation en surface et en cours de leurs infiltrations dans la tranche supérieure de surface (de 0 à -2m) / et ou les eaux infiltrées de la nappe de complexe terminal.

-le point(ALG TA 41) est une eau prélevée de la nappe phréatique au centre d'agglomération , ce point est très identique d'eau de CI parce que les gents utilisent beaucoup les eaux de CI par les deux forages qui existent , la profondeur de ce puits est de -9 m.

Complexe terminal

Dans cette partie nous intéressons par le niveau supérieur de cet ensemble, car en réalité , le CT est l'ensemble des formations les plus récentes allant du Sénonien supérieur au Mio-Pliocène (figure 61; bloc lithologique réalisé par ROKWORKS) , il contient trois niveaux de couches aquifères séparées entre eux par des dépôts évaporitiques et argileux. Cette nappe est la moins profonde. Elle est constituée de sable fin à moyen, sable argileux et grès, d'âge Mio-pliocène. Le faciès sableux varie largement, latéralement. Un niveau d'argiles constitue, le toit et le mur sont formés par des argiles et des évaporites.

C'est une nappe captive qui était jadis exploitée, les niveaux statiques des eaux en montrent, car des mesures récentes (2018) ont été faites à quelques puits dont ; (ALG TA29 à 40m, ALGTA44 à 35m, ALGTA42 à 38m). Cependant, à cause de la salinité élevée de l'eau, les forages qui captent sont actuellement moins utilisés.

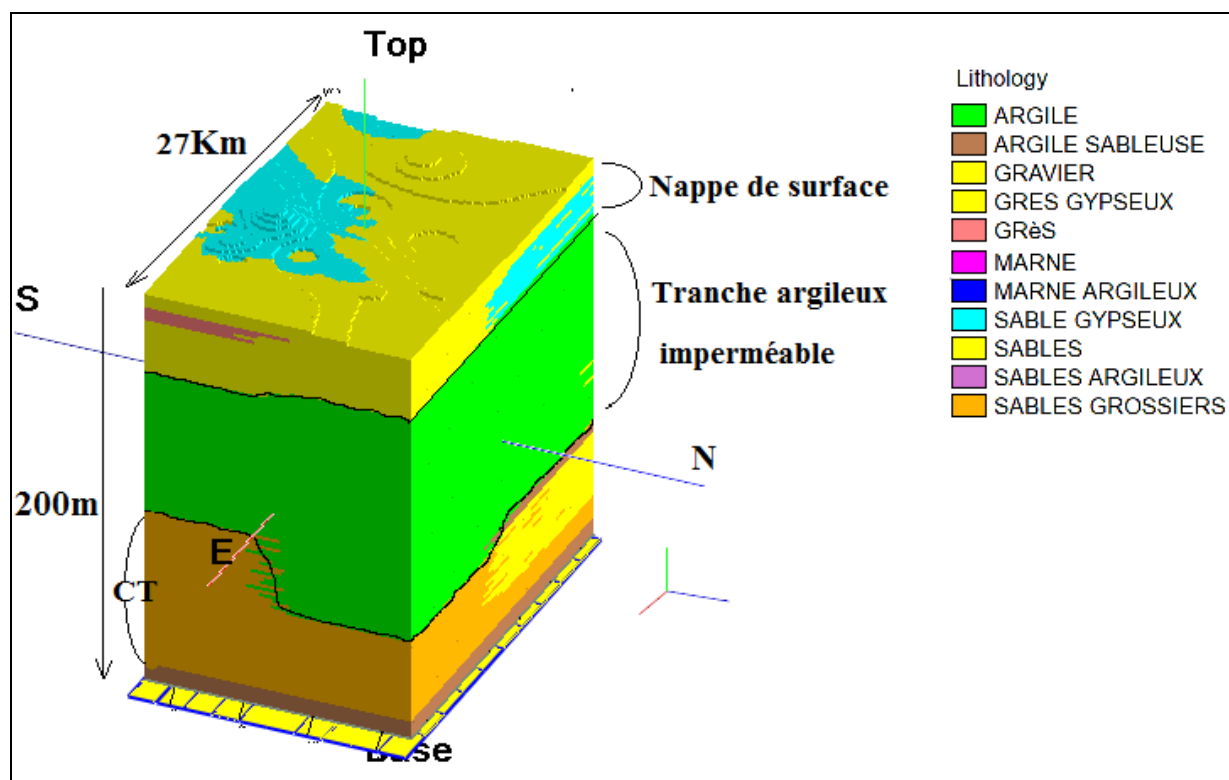


Fig.61. Complexe terminal dans la zone de Taibet(2020).

Les eaux de la nappe complexe terminal ont des teneurs moyennes -5.29 à -‰ VS SMOW pour ¹⁸O et de -50.4 à -52.2 ‰ VS SMOW pour ²H. à l'échelle de cette zone, cette nappe est

en général homogène et exempt de contact des nappes sous-jacente et de la nappe de surface .
Ce sont des eaux fossiles.

Continental intercalaire

Les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.20 VS SMOW comme moyenne et aussi pour ^2H qui sont atour de -59.7 VS SMOW pour les eaux de forage captant cette nappe contient des eaux anciennes type fossile, d'après ces teneurs appauvris on peut dire que la recharge est ancienne pendant des périodes humides.

Eaux de pluies

Tout d'abord, pour les eaux de pluies, on ne peut pas se prononcer sur ces échantillons limités , il faut une longue série de suivi pour établir un signal correct, mais avec l'absence des données nous allons utiliser quand-même nos résultats de la campagne discutée plus haut (voire Chp- Moyen et méthode).

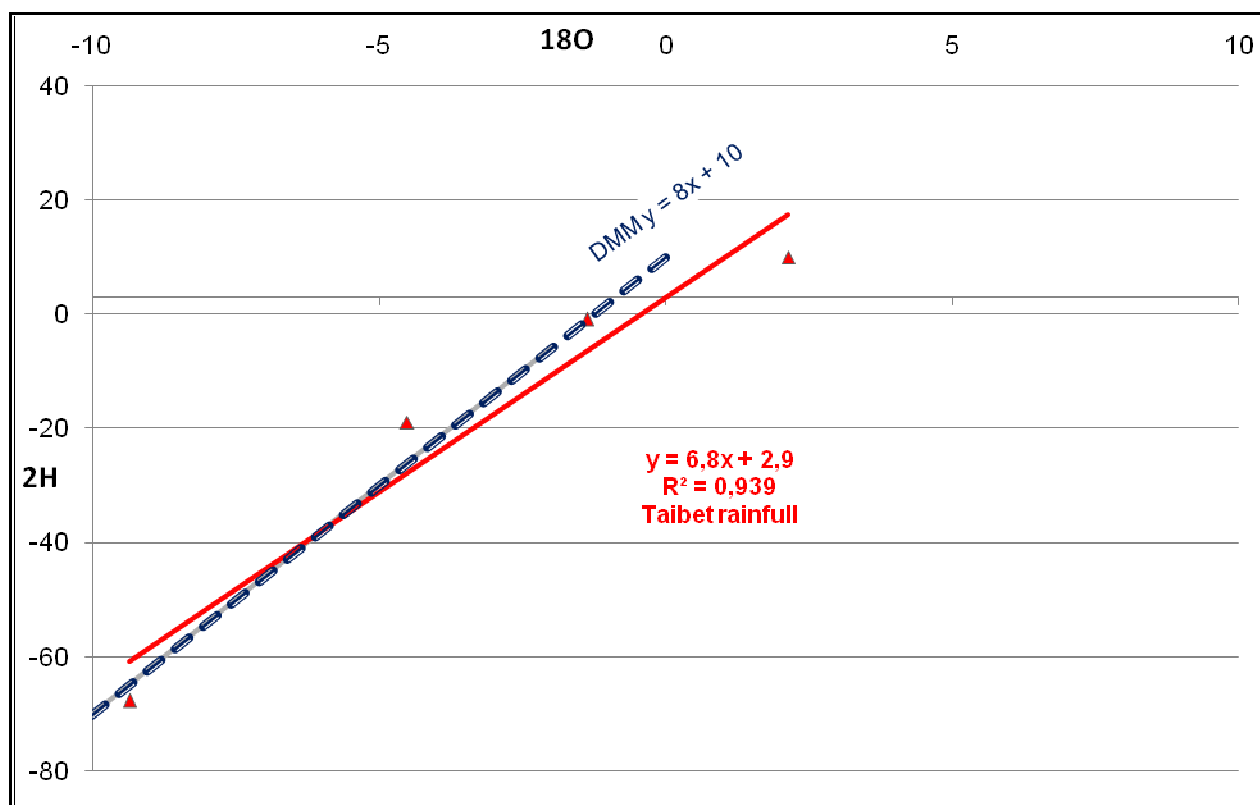


Fig. 62. Relation 2H Vs 18O ; les eaux de pluie à Taibet 2019

Les résultats de cette campagne sont représentés en (figure 62), par ailleurs, il semblerait que les points qui correspondent à une pluie saharienne évaporée en isotope, sont ceux qui ont des teneurs en ^{18}O allant de -4 à 2 ‰ VS SMOW alors que l'autre point ;celui qui est appauvri

en isotopes(-9 ‰ VS SMOW pour ^{18}O) est masse d'eau issu d'un événement très rare !! au Sahara en provenance de zones subpolaires

Les événements pluvieux et les origines des masses nuageuses (trajectoires)

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

La National Oceanic and Atmospheric Administration (en abrégé NOAA), en français l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique, est l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère. La NOAA [(wikipedia,NOAA 2020)] est fondée le 3 octobre 1970 à la suite d'une proposition du président Richard Nixon dans le but de créer un service national « afin de mieux protéger la vie et la propriété des catastrophes naturelles, de mieux comprendre l'environnement, et pour l'exploration et le développement vers une utilisation intelligente des ressources marines » La vision stratégique de la NOAA est « d'informer le public du rôle et du fonctionnement des océans et de l'atmosphère afin de faire des choix éclairés dans leurs interactions avec ceux-ci ». Sa mission est donc de comprendre et prévoir les changements à l'environnement, d'administrer les ressources marines et côtières et de rencontrer les besoins économiques, sociaux et environnementaux des États-Unis dans ces domaines.

Pour atteindre ces buts, la NOAA regroupe des services d'assimilation des données météorologiques, océaniques et sur les éco-systèmes; de distribution d'informations dans ces domaines; ainsi que de recherche scientifique. Il regroupe plusieurs services ; National Weather Service (NWS), National Ocean Service (NOS), Office of Oceanic and Atmospheric Research (OAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS) ...etc.

NOAA fournit dans son site web l'accès à plusieurs options de connaître /et faire la reconstitution de l'historique des masses nuageuses et le déplacement à l'échelle du globe. Nous utilisons ça pour reconstituer les événements pluvieux à notre zone d'étude pour connaître l'origine de précipitation ayant surtout les teneurs appauvries en isotope stable de l'eau

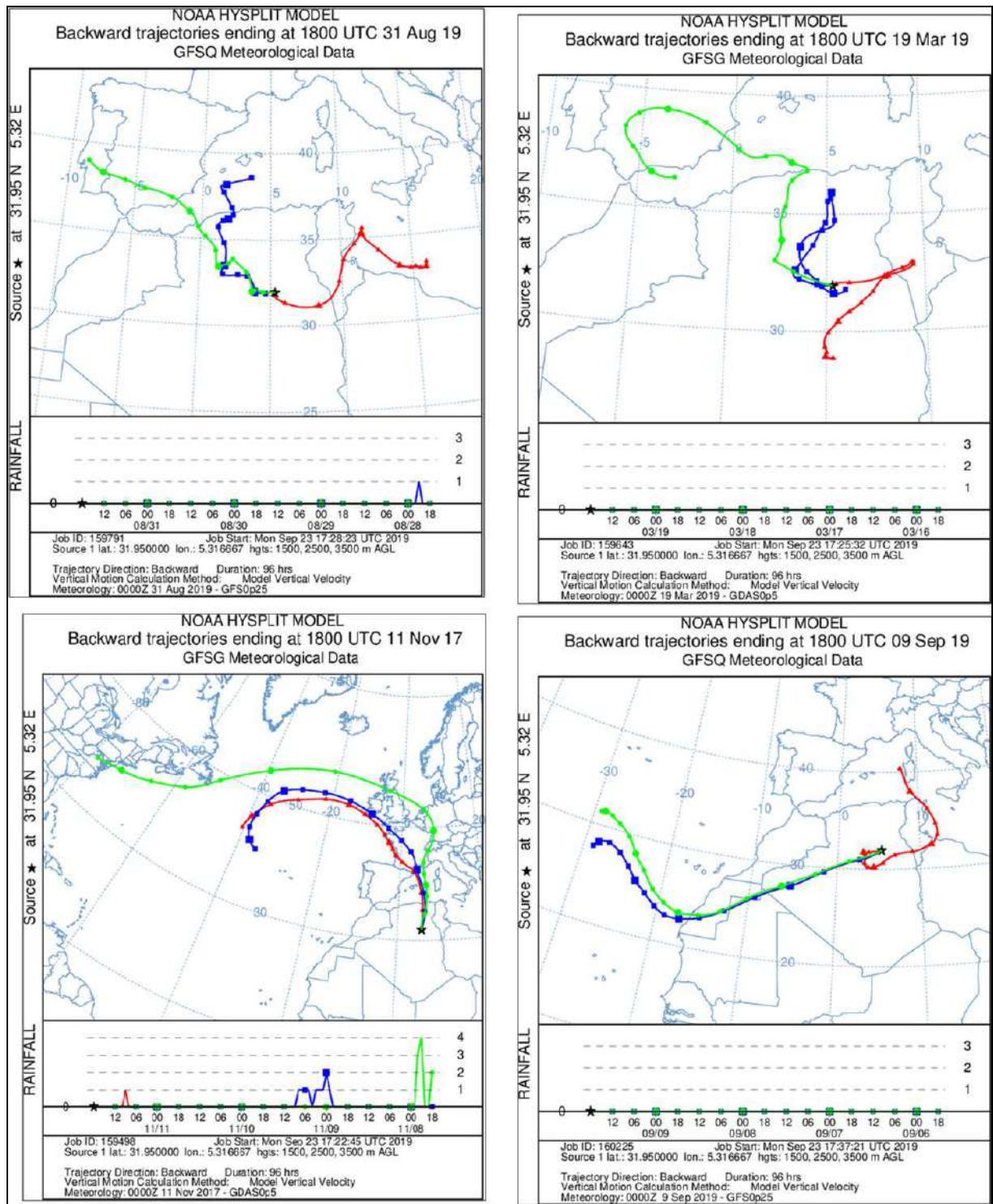


Fig.64. Résultat de programme NOAA des eaux de pluies à Taibet.

À l'aide de cette page NOAA (figure 63 et figure 64) et ce logiciel/Programme doté pour la reconstitution des masses atmosphériques nous avons obtenu les résultats qui sont sous forme des images montrant les différentes trajectoires des masses atmosphériques nuageuses donnant lieu des précipitations à Taibet. Par ailleurs on constate que les événements d'échantillon de ALG TA 56 (19/03/2017) ALG TA 60 (29/08/2017) ALG TA 61 (09/09/2017) ont des

origines presque pareilles (origine méditerranéenne, océan atlantique (figure 63) par contre l'échantillon ALG TA 38 (11/11/2017) c'est évident que la trajectoire de ce dernier vient d'une zone subpolaire avec un appauvrissement fort d'oxygène-18 et un excès de deutérium qui est 'normal', mais le reste des échantillons sont d'origine méditerranéenne (excès de 2H élevé mais parfois affectée par des processus évaporatifs, particulièrement TA61). La difficulté est l'interprétation de l'évaporation pendant la déposition de la pluie. En général, on assume qu'un taux fort de pluies est associé avec des gouttes lourdes, qui sont moins susceptibles à l'évaporation pendant leur chute. Au contraire les pluies faibles dont particulièrement le fractionnement des gouttes pendant leur chute dans une colonne atmosphérique sèche est très probable.

Néanmoins pour dessiner une droite locale fiable il faut que tous les événements pendant plusieurs années soient prélevés en plus de nos échantillons récents il y avait des tentatives anciennes ayant pu initier peu de données météorologiques concernant les eaux de pluie à Ouargla ; les données veilles GNIP des années 1960 qui ne dépassent pas les 5 résultats isotopiques, et AIEA en 1985 [(GUENDOOUZ, 1985)].

Des mesures en isotopes de l'eau sont faites à Ouargla [(GUENDOOUZ, 1985)]. sur des échantillons collectés par la station d'Ouargla, (Figure 65). lors de la mise en place des stations de mesure des teneurs en isotopes stables par OMM (organisation météorologique mondiale) et AIEA ont permis de tracer le diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ suivant :

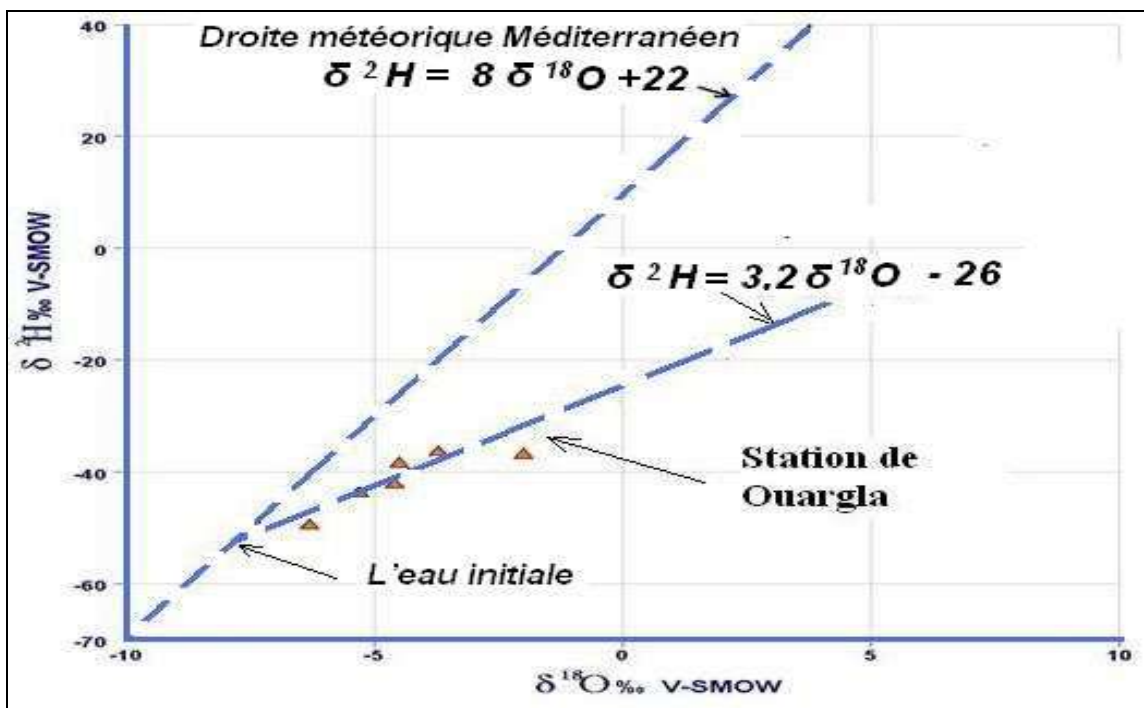


Fig.65. Relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ des précipitations [(GUENDOOUZ, 1985)]. modifiée

Les points représentatifs s'alignent sur une droite d'évaporation dans un diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$
 l'équation de ce droit est: $\delta^2\text{H} = 3,2\delta^{18}\text{O} - 26$.

4-Melrhir

Les résultats sont représentés dans le tableau 13 et représentés en graphique (figure 66).

Tab. 13. Résultats des analyses isotopiques des eaux 2018-2019 Melrir.

ZONE		Aquifer	Min/Max	%o VS SMOW	
				² H	¹⁸ O
4	Melrir	Phréatique	min	-22,50	0,72
			max	-20,58	1,26
		CT	min	-49,40	-6,00
			max	-41,20	-3,00
		CI	min	-56,00	-8,00

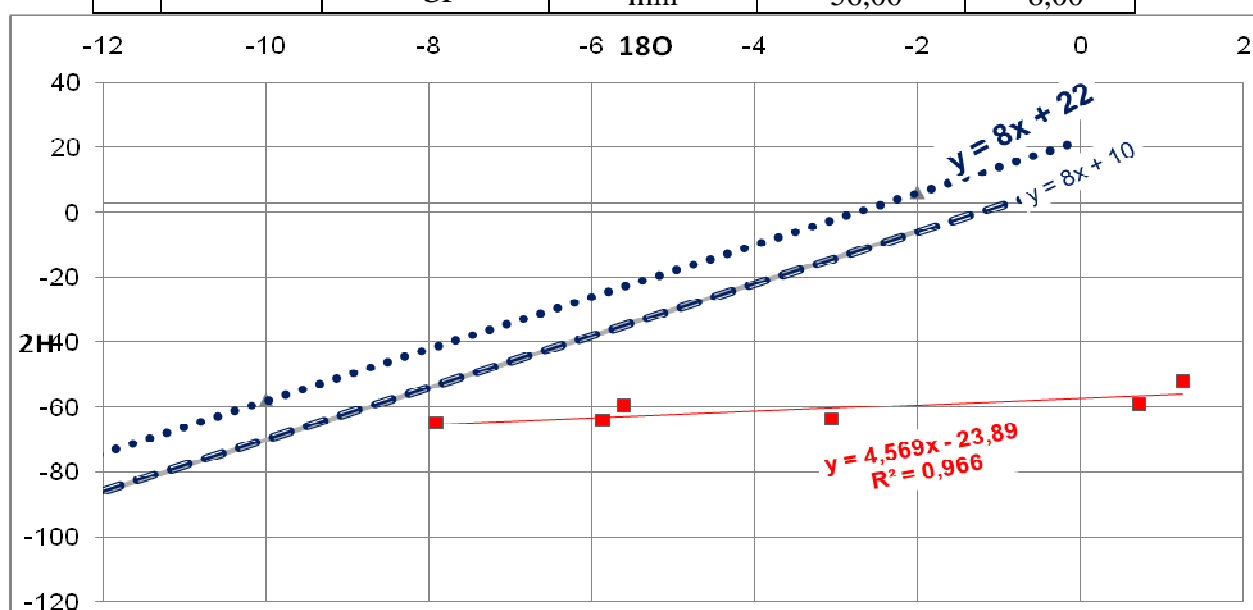


Fig.66. Relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux de Melrir.

elles montrent que toutes les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs enrichies en isotopes stables de l'eau, pour ^{18}O elles sont autour de 0.72 à +1,26 ‰ VS SMOW et pour ^2H , les valeurs sont autour de -21 ‰ VS SMOW cet enrichissement enregistré est tout à fait normal vu le processus d'évaporation connu dans cette zone.

Les eaux de la nappe complexe terminale, les teneurs en ^{18}O prennent des valeurs reconnues à l'échelle du bassin elles sont donc autour de -5.7 ‰ VS SMOW pour ^{18}O et sont autour de -46 ‰ VS SMOW pour ^2H à l'échelle de cette zone cette nappe est en général homogène. Par ailleurs il ya un point un peu différent qui trouve son signal isotopique enrichie c'est l'échantillon de ALGTA22.

Nous supposons ici qu'un mélange est formé entre les eaux de la nappe de CT et les eaux de la nappe phréatique proche du chott, donc il y a naissance de deux masses d'eaux, l'une représente la nappe de CT généralement homogène à l'échelle de ce bassin ayant une valeur moyenne de -5 ‰ VS SMOW de ^{18}O avec une autre masse d'eau représentée par les eaux de surface ou bien chott très enrichie en ^{18}O . Le mécanisme de ce mélange est interprété d'une voie hydrodynamique car cette nappe et exactement à cet endroit Sief Lemnadi est artésienne c'est-à-dire l'eau jaillit à la surface par la charge de la nappe et en cours de sa remontée, elle se mélange avec les eaux de la nappe phréatique donnant finalement une masse de mélange avec des proportions différentes (CT+nappe surface), signalons ici que ce n'est pas du tout facile de connaître la proportion d'eau de chaque masse d'eau.

Lors de notre campagne on a confirmé que le forage en ce point Sief lemnadi est artésien car sa surface topographique est -20 à -25 m au-dessous de niveau de la mer (figure 67).

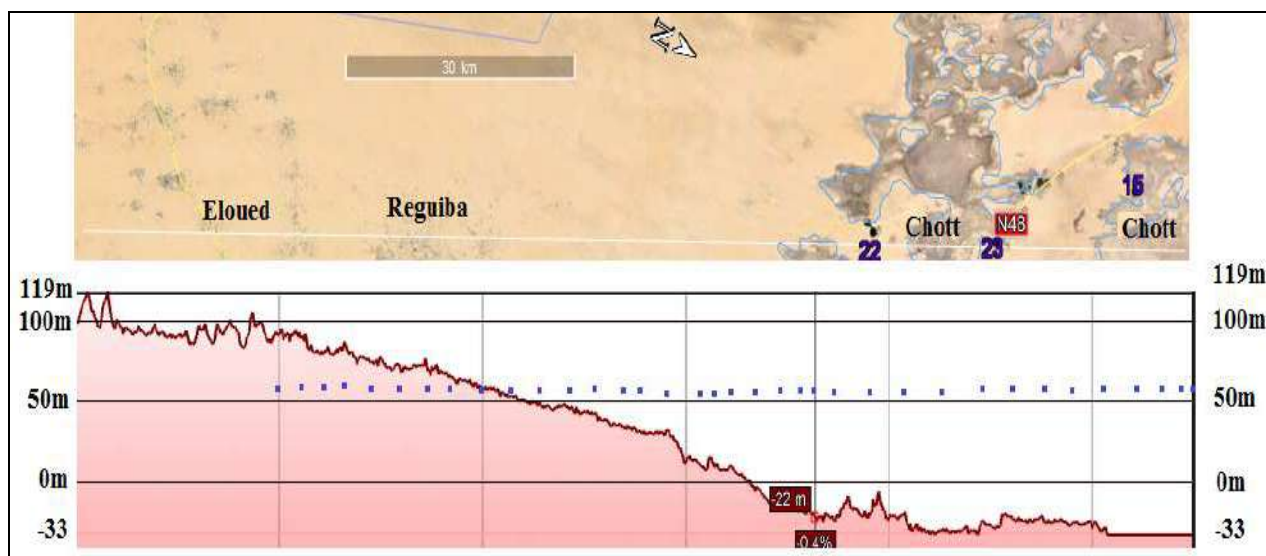


Fig.67. CT à Sief Lemnadi

Pour les eaux de la nappe les plus profondes CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.20 VS SMOW en moyenne.les valeurs en 2H sont atour de -59.7 VS SMOW pour les eaux de forage captant cette nappe

2-5-Expérimentation d'évaporation au laboratoire

L'objectif de cette expérimentation est d'avoir une idée sur le processus d'évaporation dont les eaux naturelles ont subi, en fait, ce qui caractérise la région saharienne est le taux d'évaporation fort et les températures extrêmes et aussi l'amplitude thermique ,

Cette expérience a été faite au laboratoire de l'université d'Almeria et s'est déroulée comme suivant (figure 68).

-on collecte un échantillon d'eau de pluie et d'eau de CI

- on fait le dosage de ^{18}O et de ^2H directement sur ces échantillons bruts
- on met des quantités égales dans 5 pécher pour les deux types d'eau et on le mettre dans le four convenable à une température constante dans ce cas elle est 35°C , il est important de noter que la mesure des poids et de volumes est nécessaire
- on va suivre le processus d'évaporation survenu en ces eaux par mesure des poids et de volume et faisant le dosage de ^{18}O et ^2H de chaque échantillon pendant cette expérience.
- les différentes stade de mesure qui correspondent à la quantité d'eau restante après l'évaporation sont 75% 50 % 25 % 10% sachant que le dosage au début correspond 100%.

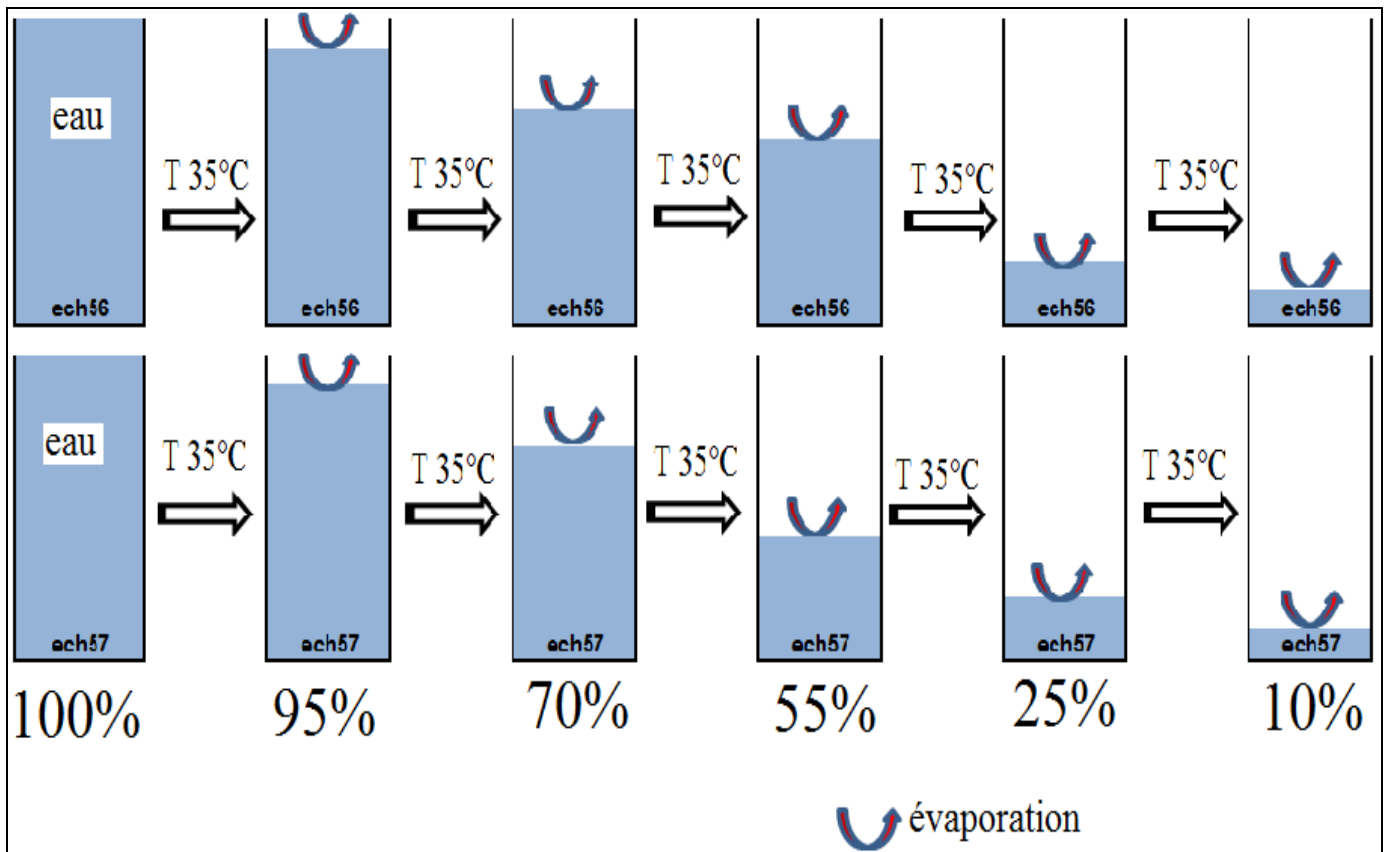


Fig.68. Expérimentation d'évaporation des eaux au laboratoire

Discussions des résultats

Cette expérience au laboratoire (groupe de recherche et investigation à l'université d' Almeria) pour les eaux de pluie et celles de CI donne les résultats isotopiques présentés en graphique (figure 69).On constate qu' il ya une relation proportionnelle entre le taux d'évaporation et la tendance d'enrichissement en isotopes stables de l'eau restant.

En fait, le contrôle de degré de l'évaporation a été fait par la durée de la température

Les isotopes stables légers de l'eau s'échappent en premier c'est exactement semblable avec ce qui se passe aux eaux de surface ou bien les eaux dans la zone non saturée dont leur profondeur ne dépasse pas 2.7 m[(EL FERGOUGUI, 2017)].

Malgré que cette expérience au laboratoire avec l'utilisation de l'étuve ne reflète pas réellement aux paramètres naturels climatiques tel que l'humidité de l'air, la vitesse des vents, l'amplitude thermique, l'intensité de rayonnement solaire au surface de l'eau ...etc, mais elle nous a donné un résultat valable sur l'influence de l'évaporation dans notre zone d'étude et d'après ces résultats isotopiques de ^{18}O et de ^2H on constate les mêmes tendances en graphique qui confirme pour l'oxygène ^{18}O les valeurs et le deutérium.

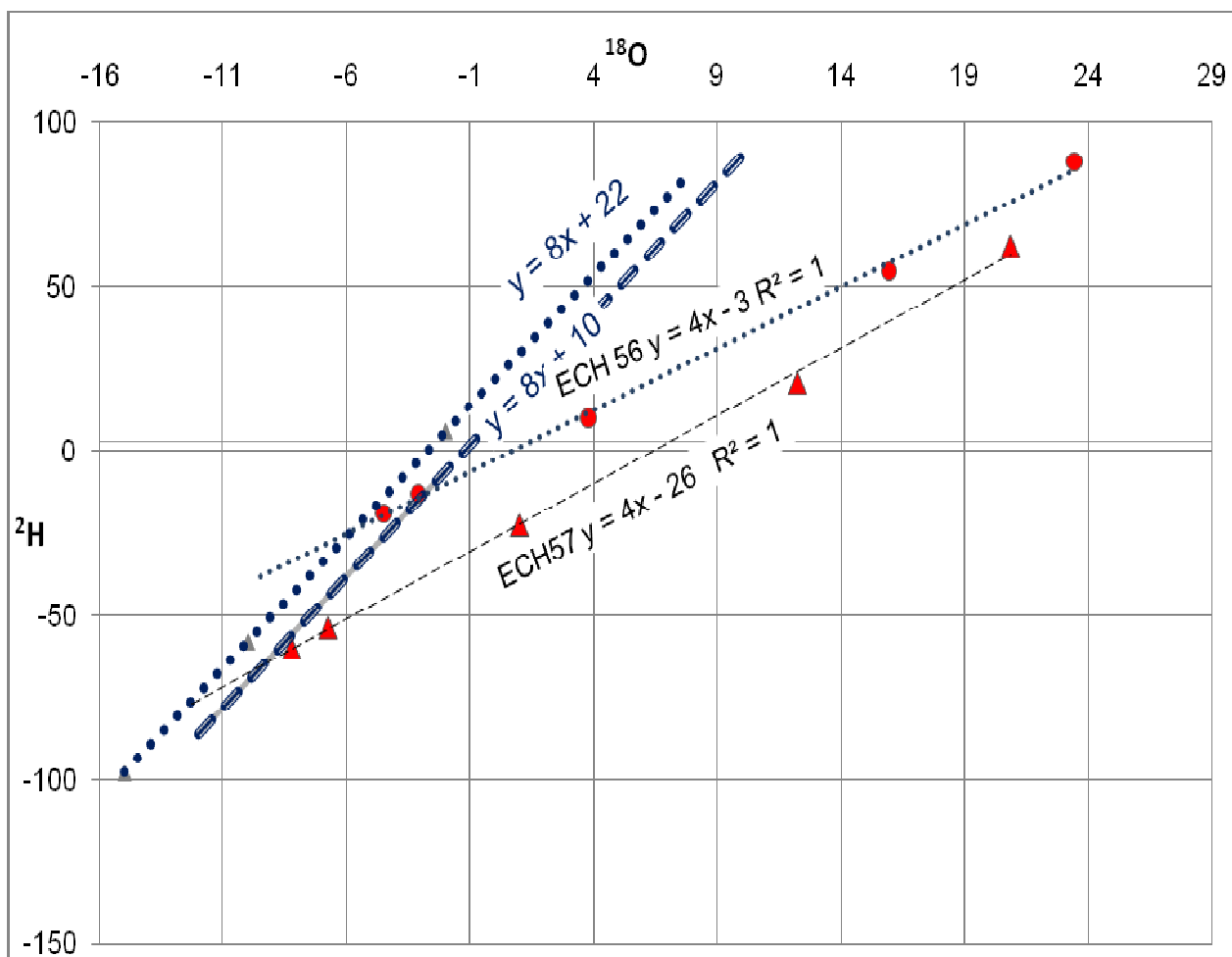


Fig.69. Relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ des eaux utilisées pour l'évaporation Ech 57 et Ech 56.

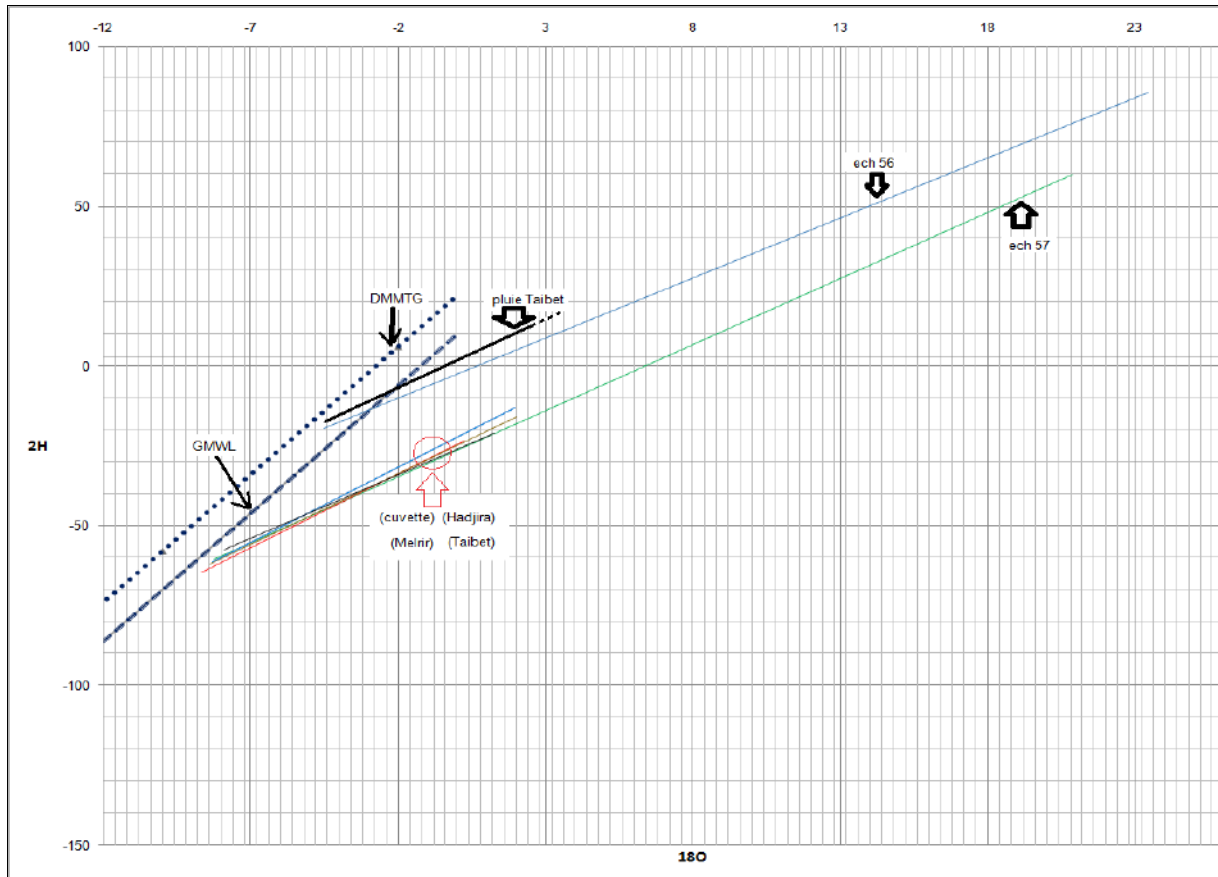


Fig.70. Comparaison entre les eaux des zones d'étude

En finalisant les discussions des résultats isotopiques stables de la région étudiée par un graphique (figure 70) qui récapitule toutes les eaux de toutes les zones ; on constate

-une similarité entre ce qui trouvé au laboratoire par cette expérimentation et ce qui est réel et dans ce cas on parle de la tendance d'évaporation des eaux de CI qui suit une droite d'évaporation :

$${}^2\text{H} = 4 * {}^{18}\text{O} - 26$$

pour le résultat de laboratoire et les résultats réels de l'ensembles des eaux des zones de la région soit individuelle ou collective montrent l'équation globale suivant :

$${}^2\text{H} = 4.5 * {}^{18}\text{O} - 24$$

- les eaux ont toujours le même tendance à l'évaporation et c'est bien clair que les valeurs s'alignent avec cette droite d'évaporation .

-dans cette région on voit bien la prédominance des eaux des nappes profondes notamment la nappe de CI.

Conclusion générale

La région d'étude fait partie du grand Erg oriental du Sahara septentrional, est située dans la partie nord du système aquifère du Sahara septentrional SASS, les reconnaissances géologiques faites sur cette région montrent une série stratigraphique représentée par dépôts paléozoïques souvent érodés, le mésozoïque qui repose en discordance sur le paléozoïque, ce dernier renferme une série sédimentaire de Trias, Jurassique et Crétacé terminée par le Cénozoïque englobant le Tertiaire et le Quaternaire.

Quant au climat; cette région est caractérisée par un climat désertique, aride, sec, et chaud, et des amplitudes thermiques importantes, une pluviométrie très faible et aléatoire ayant une valeur de 44mm/an pour la zone de Ouargla et 71 pour Souf, et une forte évaporation qui dépasse 3000 mm/an à l'échelle de la région étudiée.

L'aspect hydrogéologique faite sur cette région a permis de distinguer trois niveaux aquifères qui sont ; le continental intercalaire, le complexe terminal et la nappe superficielle parmi la présence des sebkha et chott, et hydro-chimiquement, ces eaux ont généralement des faciès chimiques homogènes ; le faciès dominant est de type Chloruré sodique calcique et magnésien. Les eaux de la nappe phréatique sont caractérisées par une salinité forte liée à l'évaporation intense dans cette région. La simulation de mélange par phreeqC montre généralement à l'échelle de cette région que les eaux de surface ont une origine des nappes profondes de CI et de CT, par ailleurs, cette simulation montre à la cuvette d'Ouargla une origine en provenance des eaux de CI presque -la majorité- pour les eaux de surface sous une profondeur plus de 2m, limite dans lequel le pouvoir évaporant d'eau est nul. Le cas de simulation d'évaporation, les résultats montrent que les eaux de sebkha sont des eaux de CI évaporées de taux considérable. L'étude isotopique faite sur les eaux de la cuvette montre les résultats suivants:

Les isotopes stables ^{18}O , ^2H

La zone de la cuvette d' Ouargla

les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs très variables pour ^{18}O elles oscillent de -7.9 à 0.2‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -63 à -22.7 ‰ VS SMOW. Les eaux de la nappe complexe terminale ont des teneurs en ^{18}O variant de -8.4 à -8.6 ‰ VS SMOW et ^2H les teneurs sont variant de -62.8 à -65.1 ‰ VS SMOW. Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.60 VS SMOW et les valeurs en ^2H sont autour de -64 VS SMOW.

Les remarques intéressantes ici se déroulent sur la possibilité d'une drainance verticale des eaux de la nappe de CI par un rejet de faille (a priori) qui est l'effet d'extrapolation de grande faille reconnu au sud de la zone de Ouargla (Faille d'Amguid-Labioud) vu les ressemblances en teneurs isotopiques des eaux de trois nappes.

la zone de hdjira

les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs très variables pour ^{18}O elles oscillent de -8.4 à 2‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -65 à -16‰ VS SMOW . Les eaux de la nappe complexe terminale ont des teneurs en ^{18}O variant de -6.5 à -7.7‰ VS SMOW et de -55 à -60‰ VS SMOW ^2H les teneurs sont variant de . Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.60 VS SMOW alors que les valeurs de ^2H sont atour de -64 VS SMOW

la zone de Taibet

les eaux de pluie ont des teneurs très variables en isotopes stables de l'eau , pour ^{18}O elles oscillent de -9.36 à $+2.14\text{‰}$ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de $-55,77$ à 9.94‰ VS SMOW ces valeurs enrichies dû l'évaporation des gouttes d'eau au cour de leur chute (Guendouz). Les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs aussi très variables, pour ^{18}O , elles oscillent de -7.18 à $+1.97\text{‰}$ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de $-55,77$ à -19‰ VS SMOW cet enrichissement enregistré dû au processus d'évaporation des eaux des nappes profondes. Les eaux de la nappe complexe terminal ont des teneurs variant de -4.86 à -5.86‰ VS SMOW pour ^{18}O et de -50.4 à -54.7‰ VS SMOW pour ^2H . Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8.20 VS SMOW comme moyenne et les valeurs en ^2H sont atour de -59.7 VS SMOW.

Les résultats de reconstitutions des trajectoires des masses d'eau montrent que les évènements de trois d'échantillons ont des origines méditerrané, et l' océan atlantique, par contre un échantillon seul qui a une origine des front polaire descendu du nord (événement pluvial rare au Sahara.

La zone de Melrhir

les eaux de la nappe phréatique et chott ont des teneurs très variables pour ^{18}O elles oscillent de -0.7 à 1.2‰ VS SMOW et pour ^2H les valeurs oscillent de -22 à -20‰ VS SMOW . Les eaux de la nappe complexe terminale ont des teneurs en ^{18}O variant de -3 à -6‰ VS SMOW et ^2H les teneurs sont variant de -48 à -41‰ VS SMOW. Pour les eaux de la nappe plus profonde CI; les valeurs ^{18}O sont beaucoup plus homogènes et sont autour de -8 VS SMOW et de -57 VS SMOW ^2H .

Références bibliographiques

- BARNES, C., ALLISON, G., 1988. Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of Hydrogen and Oxygen. *Journal of hydrology*.
- BELKSIER, M.S., 2007. Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux. (Thèse de doctorat). université Badji-Mokhtar Annaba.
- BELLAOUER, A., 2008. Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région d'Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives (thèse de magistère). Université de Batna, Batna.
- BG, 2004. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique (rapport interne). Ouargla.
- BOUDJEMAA, A., 1987. Evolution structurale du bassin pétrolier triasique du Sahara algérien Nord oriental (Thèse de doctorat). Université de Paris Sud, centre d'Orsay. Paris. France
- BOUSELSAL, B., 2007. Etude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe Aquifère libre d'El-Oued Souf. (Thèse de Magistère). université Badji-Mokhtar Annaba.
- CHABOUR, N., 2006. Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie (Thèse de doctorat). Université de Constantine, Constantine.
- CORNET, A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. *Rev. Géogr.Phys. & Géol. Dyn.*, Vol. VI.
- CRAIG, H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and Oxygen18 in natural waters, *Science.*, 133.
- CRNA(CDTN avant), 1992. Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla . (Rapport interne). COMENA, Alger.
- Dansgaard, w, 1964. Stable isotopes in précipitation. *Tellus*, XVI, p. 436-468.
- DHW, 2019. Suivi périodique des forage AEP et irrigation de la wilaya de Ouargla (Document interne). Direction hydraulique de la wilaya, Ouargla.
- DJIDEL, M., 2008. Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla -Sahara septentrional, Algérie) (Thèse de doctorat). université Badji-Mokhtar, Annaba.
- Dubief, J., 1959. Le climat du Sahara (mémoire hors série). Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes.
- EL FERGOUGUI, M.M., 2017. Étude de l'évaporation de la nappe phréatique de la région de Ouargla (Thèse de doctorat). Uiversité de Kasdi Merbah Ouargla.
- ENAGEO, 1993. Etude géophysique et hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (rapport interne). Ouargla.
- Fontes, J.C., 1976. Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles. Quelques aspects. (Thèse de doctorat ès Sciences). Université de Paris VI, Paris.
- Foucault, A., Raoult, J.-F., 2009. Dictionnaire de Géologie, 7e édition. édition. Dunod.,
- Gazquez, F., MATHER, I., ROLFE, J., P. Evans, N., Herwartz, D., Staubwasser, M., A. Hodell, D., 2015. Simultaneous analysis of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^2\text{H}/^1\text{H}$ of gypsum hydration water by cavity ring-down laser spectroscopy.

- Gonfiantini, R., 1938. Stable isotopes reference Samples for geochemical and hydrological Investigation (Report Adv). group meeting IAEA, Vienna.
- Google earth, 2018. URL www.google.com > intl > earth (téléchargé 10-12-2018)
- Greffion, J.-M., 2020. Les isotopes de l'Oxygène. institut français de l'éducation. URL <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/indicateurs-paleoclimatiques/isotopes-oxygene> (consulté 27/05/2020 à 09:45 pm GMT).
- GUENDOUZ, A., 1985. Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-est septentrional (Algérie). (Thèse de doctorat ès Sciences). Nancy, Nancy France.
- Guendouz, A., Michelot, J.L., 2006. Chlorine-36 dating of deep groundwater from northern Sahara. *Journal of hydrology*,.
- Guendouz, A., MOULLA SOUFI, A.S., 1996. Drainance de la nappe profonde du continental intercalaire vers les aquifères superficielles à Ouargla: argument isotopiques. Presented at the Colloque internationale sur l'application des techniques isotopique dans les sciences de l'eau et du sol, Mahdia, Tunisie.
- HADJKOUIDER, M., 2019. Géochimie et minéralogie des formations et des eaux de la nappe superficielle de Ouargla (Thèse de doctorat). université de Ouargla, Ouargla.
- HOUARI IDIR, M., Nezli, I.E., BOUREGAA, S., 2014. Description géologique et géométrique des formations aquifères de la cuvette de Ouargla. *Algerian Journal of Arid And Environment (AJAE)*.
- IAEA, 2008. Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique. VIENNE.
- JOUZEL, J., MERLIVAT, L., 1984. Deuterium and Oxygen-18 in precipitation : modeling of the isotopic effects during snow formation. *Journal of Geophys.*
- MOULLA, A.S., 2005. "Les Ressources en Eau Souterraine au Sahara." Presented at the "Les Ressources en Eau Souterraine au Sahara," ABH, Ouargla.
- NEZLI, I.E., 2009. Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla) (Thèse de doctorat). université de Biskra, Biskra.
- NIR, A., KRUGER, S., LINGENFELTER, R., FLAMM, E., 1966. Natural Tritium. *Rev. Geophysics.*, 4 n° 4. p441-456 illus.
- NOAA, 2019. Air resources laboratory . NOAA HYSPLIT Trajectory Model. URL: <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive> (consulté 10/01/2019).
- OSS, 2003. projet SASS. Système Aquifère du Sahara Septentrional, gestion commune d'un bassin transfrontière. observatoire du Sahara et du Sahel.
- OULD BABA SY, M., 2005. Recharge et paleorecharge du système aquifère du Sahara septentrional (Thèse de doctorat). Université de Tunis El manar, Tunis.
- ROLLAND, G., 1866. Géologie du Sahara Algérien et aperçu géologique sur Le Sahara de l'océan atlantique à la mer rouge (Extrait de document). Imprimerie nationale, Paris.
- Schlumberger, SONATRACH, 2007. Well evaluation conference. Alger.
- Schoenemann, S.W., Schauer, A.J., Steig, E.J., 2013. Measurement of SLAP and GISP $\delta^{17}\text{O}$ and proposed VSMOW-SLAP normalization for ^{17}O excess. *Rapid Commun. Mass Spectrom Rapid Commun.*

- SIMLER, R., 2019. logiciel diagramme. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. URL <http://www.lha.univ-avignon.fr/> (accessed 6.1.20).
- SLIMANI, R., 2016. Etude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d'un aquifère au climat aride méditerranéen : cas de la cuvette de Ouargla. (Thèse de doctorat) Université de Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla.
- SONATRACH, 2010. rapport d'implantation de forage - partie géologie bassin de oued mya : berkaoui (Document interne). SONATRACH Hassi Messaoud.
- Steig, E.J., Gkinis, V., Schauer, A.J., Schoenemann, S.W., Samek, K., Hoffnagle, J., Dennis, J., Tan, S.M., 2014. Calibrated high-precision ¹⁷O-excess measurements using laser current tuned cavity ring-down spectroscopy Atmos. Meas. Tech., 7, 2421–2435, 2014
- SWEZEY, C.S., 2009. Cenozoic stratigraphy of the Sahara, Northern Africa. Journal of African Earth Sciences 53(3):89-121.
- TOUAHRI, A., 2013. datation des eaux de nappe de complexe terminal et la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla (Thèse de Magistère). université kasdi merbah Ouargla, Ouargla.
- TOUAHRI, A., HADJKOUIDER, M., HACINI, M., 2018. Origine and Age of the surface water and groundwater of the Ouargla basin -Algeria.
- Unesco, 1972. (Projet ERESS) Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet. UNESCO, Paris.
- wikipedia, 2020. National Oceanic and Atmospheric Administration . wikipedia. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/National_Oceanic_and_Atmospheric_Administration (consulté 27/05.2019).
- wikipedia, 2020. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Chott_Merouane+Chott_Melrhir . (consulté 02/03/2019)
- wikipedia, 2019. URL: <https://fr.wikipedia.org/wiki:ouargla> (consulté15/05/2019).
- YURTSEVER, Y., GAT, J.R., 1981. Atmospheric water ; Staple isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle (Technical report 210). IAEA, Vienna.
- ZATOUT, M., 2017. Géochimie et potentiel minier du Lithium dans les chotts Sud Algériens : Cuvette de Ouargla, Melghir et Merouane. (Thèse de doctorat). Université de Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla.

ANNEXE 1

1-Données climatologique (les paramètres climatiques mesurées et fournies par ONM Station Ouargla)

Année	Mois	TN en °C	TX en °C	UN en %	UX en %	FX en m/s	RR en mm	EVA en mm	INS en Heure
2007	Janvier	4,8	20,0	37	85	10	0	93,0	260,9
	Février	9,2	22,7	28	69	15	Trace	163,7	217,3
	Mars	10,1	24,3	22	62	18	Trace	256,2	287
	Avril	14,9	28,6	26	69	25	3,52	283,4	198,5
	Mai	19,8	35,0	19	50	23	0,3	418,4	224,7
	Juin	25,5	42,0	14	41	15	0	499,8	270,1
	Juillet	26,5	41,4	17	42	14	0	469,3	366,4
	Août	27,6	42,6	17	44	14	2,9	517,5	316,7
	Septembre	25,6	39,1	21	51	14	0	395,8	268,6
	Octobre	18,4	32,1	25	60	27	0,31	276,9	267,9
	Novembre	9,2	23,9	30	70	10	0,01	130,5	275,0
	Décembre	4,8	18,2	38	79	12	6,1	108,7	211,9
2008	Janvier	5,5	18,3	44	86	7,1	5,7	75,5	254,3
	Février	6,1	21,3	31	79	7,0	Trace	136,6	248,9
	Mars	10,9	26,3	26	64	9,0	1,2	210,4	263,2
	Avril	15,7	31,9	19	49	10,0	0	291,8	300,6
	Mai	21,1	36,0	19	48	10,8	Trace	323,4	243,6
	Juin	23,9	39,1	21	49	10,1	0,4	286,4	292,0
	Juillet	29,0	44,9	16	38	9,2	0	428,1	306,9
	Août	28,0	43,3	19	45	8,0	Trace	322,7	308,1
	Septembre	24,6	38,5	25	55	9,8	14,2	312,6	243,1
	Octobre	18,7	30,1	39	79	8,8	24,1	174,8	209,9
	Novembre	9,8	22,1	39	85	7,7	0,2	113,8	261,0
	Décembre	5,4	18,6	38	85	7,3	0,6	78,1	192,0
2009	Janvier	6,8	17,8	48	91	9,1	54,1	80,9	196,1
	Février	7,2	20,3	32	80	8,3	1,5	115,3	253,8
	Mars	10,1	24,7	27	74	8,5	10,6	151,8	267,4
	Avril	12,1	27,5	25	67	8,5	0,8	172,6	321,1
	Mai	18,5	34,4	24	60	8,5	0,0	152,7	338,1
	Juin	25,4	40,9	17	45	9,0	2,5	333,0	270,5
	Juillet	28,7	44,6	15	39	8,3	0,0	417,3	336,5
	Août	27,2	43,0	16	43	3,9	0,0	384,4	343,6
	Septembre	22,1	36,1	28	69	8,7	6,3	222,0	256,8
	Octobre	15,7	30,8	28	67	6,6	0,1	166,5	312,9
	Novembre	9,4	25,5	36	79	5,7	0,0	110,2	275,1
	Décembre	7,7	22,9	30	72	6,9	0,0	111,1	254,9
2010	Janvier	6,6	21,6	31	75	8,4	4,4	109,0	248,8
	Février	9,6	25,4	30	66	9,3	Trace	131,4	197,8
	Mars	12,9	28,1	23	57	10,1	Trace	186,6	219,3
	Avril	17,1	31,3	26	60	9,8	0,7	211,0	262,8

	Mai	18,7	33,6	21	53	10,4	1,7	279,4	311,4
	Juin	25,3	41,3	19	45	11,2	3,0	410,4	218,6
	Juillet	28,4	43,9	18	42	9,2	2,2	425,9	313,1
	Août	28,2	43,6	20	46	8,8	Trace	388,3	352,1
	Septembre	22,8	36,9	29	63	8,9	7,7	221,3	273,7
	Octobre	16,2	30,7	26	68	8,1	3,9	176,6	259,2
	Novembre	9,7	24,9	34	74	8,5	0,0	117,1	257,4
	Décembre	6,6	21,3	29	67	7,4	0,0	109,4	247,6
	Janvier	4,8	20,5	40	80	7,0	0,0	81,0	261,2
	Février	5,6	20,5	33	72	8,6	0,0	80,0	257,1
	Mars	9,7	23,9	30	76	9,5	11,1	159,6	265,5
	Avril	14,8	30,7	24	62	10,7	1,7	215,2	306,2
2011	Mai	18,6	33,7	24	55	9,5	0,0	262,5	332,8
	Juin	23,2	38,3	23	51	9,3	0,0	347,7	244,5
	Juillet	27,7	44,0	18	45	8,7	0,0	438,5	319,7
	Août	26,3	42,3	20	44	8,9	0,0	386,4	357,7
	Septembre	25,1	40,3	21	49	9,3	0,1	245,2	270,1
	Octobre	15,1	29,1	37	78	7,8	5,0	125,9	265,1
	Novembre	10,2	24,3	36	80	8,3	Trace	105,8	259,1
	Décembre	5,2	19,7	47	90	6,7	0,0	62,4	229,8
	Janvier	3,5	18,0	44	86	8,8	16,2	61,6	249,0
	Février	3,4	17,3	38	79	9,6	5,5	80,8	273,0
	Mars	8,8	24,5	33	74	8,5	1,0	132,4	252,8
	Avril	14,5	30,4	24	59	10,8	3,5	209,1	293,4
2012	Mai	19,6	35,5	19	47	10,2	0,0	312,3	328,1
	Juin	27,4	43,2	17	43	8,9	0,0	353,6	231,5
	Juillet	28,6	44,8	15	37	8,9	1,3	382,3	320,8
	Août	27,0	43,1	15	41	9,0	0,3	367,6	349,2
	Septembre	21,7	38,2	18	48	8,7	4,6	332,9	285,5
	Octobre	18,2	33,4	22	55	8,1	Trace	278,3	258,9
	Novembre	11,9	26,3	33	74	7,7	0,0	146,8	236,2
	Décembre	3,7	19,9	35	80	6,8	0,0	90,6	239,7
	Janvier	4,9	20,2	35	80	8,1	3,6	100,9	246,6
	Février	5,3	21,2	30	70	8,8	0,0	112,9	267,5
	Mars	11,9	28,6	29	70	9,8	0,2	166,9	277,3
	Avril	15,4	30,9	21	58	11,1	6,3	191,8	268,2
2013	Mai	19,1	35,5	11	39	10,6	0,0	227,8	330,7
	Juin	23,4	39,8	11	35	9,3	0,0	317,3	226,1
	Juillet	27,8	43,5	10	30	9,1	0,0	414,4	315,9
	Août	26,1	40,7	13	36	9,4	2,4	319,1	340,8
	Septembre	23,2	38,3	16	47	9,2	Trace	287,1	279,4
	Octobre	19,5	35,8	16	44	7,0	0,0	276,7	268,5
	Novembre	10,0	23,4	26	66	7,6	4,6	147,5	245,9
	Décembre	6,3	17,3	47	92	7,3	24,5	55,9	205,0
	Janvier	6,2	19,4	34	81	7,4	0,0	87,0	246,7
	Février	8,2	22,8	21	63	8,9	0,0	138,4	244,4
	Mars	10,1	23,8	22	58	11,0	0,4	157,8	252,5
	Avril	15,1	31,4	13	42	8,7	0,0	223,3	309,5
2014	Mai	20,2	35,2	14	43	10,7	14,1	329,1	316,9
	Juin	23,8	39,7	11	40	10,2	2,0	337,9	225,3

2015	Juillet	28,5	44,6	10	27	9,2	0,0	488,9	298,5
	Août	27,9	44,1	10	33	8,9	0,0	397,1	320,8
	Septembre	25,8	40,6	13	39	9,9	0,0	287,6	259,5
	Octobre	17,0	32,9	16	48	8,3	2,0	213,2	288,3
	Novembre	12,1	25,7	24	68	7,8	6,8	88,8	224,2
	Décembre	5,9	19,0	33	79	7,5	5,8	85,9	249,8
	Janvier	4,0	18,3	26	72	8,4	0,8	93,0	259,0
	Février	6,9	18,8	26	63	9,9	24,5	91,0	218,9
	Mars	10,1	24,6	17	59	8,6	4,7	158,9	299,4
	Avril	16,3	32,1	12	41	9,3	0,0	256,5	272,1
	Mai	20,7	37,0	11	33	9,1	0,0	334,1	347,5
	Juin	24,7	39,8	10	33	9,0	0,0	365,4	239,0
2016	Juillet	26,5	42,0	10	32	6,9	0,0	346,7	339,0
	Août	29,1	42,8	13	39	9,7	Trace	366,6	310,8
	Septembre	23,9	37,9	17	50	8,3	1,3	233,8	226,2
	Octobre	17,6	31,8	22	56	7,9	Trace	158,5	259,0
	Novembre	10,9	24,3	30	72	6,8	0,0	98,2	270,8
	Décembre	4,8	20,0	34	81	4,7	0,0	75,2	253,9
	Janvier	6,5	21,2	25	63	6,6	Trace	135,8	259,8
	Février	8,1	22,7	20	57	7,7	0,0	187,0	249,0
	Mars	9,7	25,7	14	45	8,3	2,0	259,4	302,0
	Avril	16,7	32,8	14	49	10,3	1,0	288,6	285,6
	Mai	21,3	36,0	11	35	12,3	0,0	388,3	259,8
	Juin	24,9	41,0	11	32	10,5	0,0	479,6	190,7
2017	Juillet	27,4	42,6	10	30	8,9	0,0	486,1	322,1
	Août	26,9	41,3	12	32	9,0	0,0	473,1	352,1
	Septembre	24,3	38,0	17	49	8,7	4,6	301,9	282,0
	Octobre	19,4	34,2	19	56	8,3	4,3	278,9	251,0
	Novembre	10,5	24,5	25	67	3,8	0,7	157,7	228,8
	Décembre	8,1	19,5	41	87	6,6	4,5	85,3	211,0
	Janvier	3,4	17,5	27	72	8,7	0,3	110,7	263,2
	Février	8,5	23,1	22	58	10,0	0,0	172,6	204,2
	Mars	11,5	26,1	18	57	9,9	20,7	239,2	285,1
	Avril	15,2	29,9	17	50	11,7	0,8	283,9	272,1
	Mai	22,9	37,5	12	37	11,8	Trace	464,9	283,9
	Juin	25,5	40,4	12	35	11,7	0,2	433,3	205,3
2018	Juillet	27,3	43,1	11	27	9,9	0,0	505,1	325,3
	Août	27,1	42,9	10	32	10,5	0,0	439,3	366,1
	Septembre	21,9	36,6	18	56	10,3	12,8	270,4	266,0
	Octobre	16,1	29,4	25	68	8,0	22,6	187,2	296,4
	Novembre	9,4	22,9	29	76	8,5	14,6	129,2	240,1
	Décembre	5,4	18,2	33	80	9,4	2,6	80,3	226,0
	Janvier	5,5	20,7	25	71	9,2	0,0	118,6	253,4
	Février	6,9	19,7	26	73	10,9	5,3	97,5	208,6
	Mars	11,9	26,8	14	49	13,1	0,0	193,6	246,9
	Avril	16,4	30,6	15	47	11,8	0,0	261,4	262,3
	Mai	20,2	34,9	14	48	12,5	4,8	275,0	313,3
	Juin	24,5	39,7	12	37	10,3	0,0	290,6	241,5
Juillet	30,5	47,4	9	22	10,0	0,0	566,6	284,5	
Août	26,8	40,4	16	46	11,4	0,9	358,1	321,2	

Septembre	24,7	38,5	17	49	9,4	11,0	265,4	281,4
Octobre	16,9	30,1	22	56	8,6	0,0	214,3	247,9
Novembre	10,4	24,1	27	68	7,8	0,8	143,7	244,5
Décembre	4,9	20,5	30	75	6,1	0	105,6	272,1

2-Données climatologique (les paramètres climatiques mesurées et fournies par ONM Station oued souf)

Températures moyennes mensuelles à la station ONM d'El oued (1985/2014)

mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
°C	33,87	28,87	21,79	15,76	15,07	17,87	22,46	27	31,98	36,2	37,82	37,6

Précipitations moyenne mensuelles à la station ONM d'El oued (1985/2014)

mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
mm	6.3	6.7	7.5	7.3	17.6	2.5	7.5	7.5	4.8	1.4	0.3	1.8

Humidité moyenne mensuelle en (%) de l'ONM (1985/2009).

mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
en%	45.45	53.54	60	66	64.4	55.9	48.8	43.3	38.8	34.23	32	34.

Vitesses moyennes des vents mensuels en de l'ONM (1985/2009).

mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
m/s	3.21	2.31	2.16	2.33	2.18	2.73	3.38	4.15	4.27	4.06	3.6	3.17

l'évaporation moyenne mensuelle en (mm) de l'ONM (1985/2009)

mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
mm	198	148	99	73	76	101	148	196	248	276	309	274

ANNEXE 2

Protocole d'analyse chimique au laboratoire Géologie du Sahara

Dilution d'échantillon

L'échantillon est obtenu en prélevant la saumure, prélever à l'aide d'une pipette volumétrique selon le nombre de dilution ;

Diluer 50-100 fois le cas où le °Be des saumures sont inférieur à 18.

100-500 fois (°Be de la saumures est supérieur à 18).

500-2500 fois (°Be de la saumures est supérieur à 25).

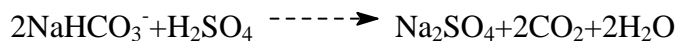
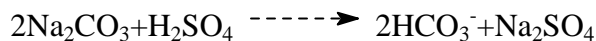
Dosage des anions

Dosage des carbonates et bicarbonates

Principe

Les carbonates n'existent qu'à pH >8.3, et les bicarbonates si 4.4 < pH < 8.3 il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrie doublé d'une mesure de pH, à quel moment ces ions sont encore ou non présents dans l'échantillon.

Lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent en deux étapes :



Préparation de H₂SO₄:

Donc on a obtenu 1L de H₂SO₄ de 0.1N on va la diluer 10 fois pour obtenir 0.01N

Réactifs

- Solution d'acide sulfurique H₂SO₄ 0.01N.
- Solutions tampons pH = 4 et pH = 8.

Mode opératoire

-Prélever une prise d'essai de 100ml de l'eau à analyser V_{PE} (ml)

-Ajouter du H₂SO₄ (0.01N) goutte à goutte jusqu'à ce que le pH mètre indique un pH = 4.4 noter le volume V (ml) versé.

(tout les échantillons ne contiennent pas de carbonates et OH⁻ (pH < 8.3), on passer alors au dosage des bicarbonates directement.

Calculs

$$\text{HCO}_3^- (\text{méq/l}) = V(\text{ml}) \cdot 0.01 \cdot 1000 / V_{\text{PE}}(\text{ml})$$

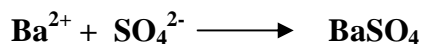
$$\text{HCO}_3^- (\text{mg/l}) = \text{HCO}_3^- (\text{méq/l}) \cdot 61$$

Avec : V_{PE} = volume de la prise d'essai. V = volume de H₂SO₄ versé.

Dosage de sulfates

1.Principe

La méthode gravimétrique présentée est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum.



Réactifs

-Solution de chlorure de baryum à 10 % (dissoudre 25 g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dans 200 ml d'eau distillée , ajouter 12.5 ml d'HCl concentré, compléter au volume à l'eau distillée).

Matériel :

-Filtres sans cendres.-Entonnoirs.-Etuve de séchage.-Four à moufle.-Bechers de 250 ml.
Capsules en porcelaine résistantes à la calcination à 500 °C.

Mode opératoire

-Prélever 10 à 50 ml de l'eau à analyser et le transférer dans un bêcher de 250 ml.

-Porter à douce ébullition à 60-65 °C dans un bain- marie ou sur un bain de sables.

Faire précipiter les sulfates à chaud en ajoutant aux gouttes à gouttes à la pipette de la solution de chlorure de baryum . Quand il ne se forme plus de précipités, ajouter quelques gouttes de chlorure de baryum en excès. Laisser les bechers dans le bain- marie jusqu'à ce que le sulfates soient complètement déposés.

Filtrer le surnageant en utilisant du papier filtre sans cendre.

Ajouter 30 à 40 ml d'eau distillée bouillante , laisser les bechers dans un bain- marie jusqu'au dépôt des sulfates.

Filtrer le surnageant et répéter cette opération 3 fois.

Faire passer le précipité sur le filtre à l'aide d'eau bouillante.

Laver le précipité à l'eau bouillante jusqu'à l'élimination complète des chlorures (faire le test à AgNO_3).

Transférer le filtre contenant le précipité dans une capsule tarée.

Faire sécher à l'étuve à 105°C pendant 1 heure.

Transférer la capsule dans un four à moufle, calciner à 500 °C pendant 1 heure.

Laisser refroidir la capsule dans le four, ensuite dans un dessiccateur. Peser après refroidissement.

Calculs

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ (en mEq/l)} = \text{B} \cdot 8,56 \cdot 1000 \cdot \text{A} / \text{V}$$

Avec : B = poids de BaSO_4 précipité. V = volume de la prise d'essai. A = inverse du facteur de dilution.

Dosage du chlore

Principe

La méthode de MOHR est présentée ici : Le chlore est précipité par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition d'un précipité rouge de chromate d'argent.

Réactifs

Nitrate d'argent AgNO_3 0.1N.

Solution de chromate de potassium K_2CrO_4 saturée à 5 %.

Matériel

Burette de précision. Capsules en porcelaine. Baguettes d'agitation.

Mode opératoire

Prélever une prise d'essai de 10 à 50 ml de l'échantillon d'eau et les transférer dans une capsule en porcelaine.

Ajouter de 5 à 10 gouttes à la solution saturée de chromate de potassium.

Titrer avec AgNO_3 0.1N jusqu'à l'apparition d'une couleur rouge due à la précipitation de Ag_2CrO_4 .

Effectuer un essai témoin avec de l'eau distillée.

Dosage du sodium et de potassium par la photomètre de flamme

Principe

Pour le dosage de deux éléments on utilise le même appareil (voir le principe de spectrophotomètre à flamme); Ce qui change, selon les conditions spectrales, les réactifs (solution étalon).

Réactifs Solution mère de Na^+ et K^+ . Solution étalons en Na^+ et K^+ .

Mode opératoire

Préparation des gammes d'étalonnage

Préparer une dilution de deux solutions de K^+ et Na^+ de 1000 ppm à 100 ppm : prélever de solutions à 1000 ppm 25 ml et les transférer dans deux fioles de 250 ml, compléter au volume à d'eau distillé, on obtient deux solutions à 100 ppm de K^+ et Na^+ .

Préparer une série de solutions d'étalonnage de K^+ et Na^+ : dans des fioles de 250 ml, introduire, à partir des solutions à 100 ppm de K^+ et Na^+ , les volumes respectifs suivants : 2 ; 4 ; 6 ; 8 et 10 ml. On obtient les gammes d'étalonnage suivantes : 25 ; 58 ; 94 ; 123 et 25 ppm de K^+ et Na^+ .

Dosage par spectrophotomètre d'émission

-faire passer les solutions de la gamme d'étalonnage.

-Pour la solution à analyser, faire la passer au spectrophotomètre à flamme

Calculs

Les courbes étalons construites, à partir des solutions étalons, donnent directement les gammes puis les teneurs en Na^+ et K^+ sont exprimées en ppm d'échantillon

Dosage du calcium et du magnésium

Dosage complexométrique par EDTA

Principe

Les complexes sont certains acides aminopolycarboxylique ou les sels de ces acides. Parmi eux, on utilise particulièrement souvent le complexons III, sel sodique à double substitution de l'acide Ethylène Diamine Tétra Acétique (EDTA).

Le complexons III, comme les autres complexons, forme avec Ca^{++} et Mg^{++} des complexes internes qui sont très stables et solubles. Dans ce cas, le métal se substitue aux atomes d'hydrogène des groupes carboxyles COOH et se lie par une liaison de coordinence avec les atomes d'azote. On détecte la fin du dosage par l'apparition du noire erichrome qui vire du rouge vin au bleu lorsque tous les Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été complexes.

Réactifs

Solution du EDTA 0.01 mole/l. Solution tampon $\text{pH} = (8 \text{ à } 10)$. Indicateur coloré noire erichrome T. Solution d'oxalate d'ammonium saturé $(\text{NH}_3)_2\text{C}_2\text{O}_2$.

Dosage

On prépare les échantillons par séries dans un bêcher de 50 ml, ajoute 5 ml de solution tampon pour 10 ml et suivre les étapes suivant :

Etape I :

Le mode opératoire de cet étape est le suivant:

-Ajouter de 7 à 8 gouttes d'indicateur coloré. Après avoir versé V ml de la solution d'EDTA jusqu'à ce qu'elle vire du rouge vin au bleu.

Cette opération fait à l'aide de température égale à 40°C dans un bain-marie.

Etape II :

-Prélever la solution obtenu de la 1^{er} étapes

-Faire précipiter l'oxalate de calcium en ajoutant gouttes à gouttes à la solution d'oxalate d'ammonium saturé jusqu'à la formation de précipités

-Filtrer le surnage en utilisant du papier filtre.

On obtient une solution filtrée

Etape III :

Prélever la solution obtenu (10 ml) de la 2^{ème} étape et suivez les mêmes dans la 1^{er} étape (vers V_1 de l'EDTA jusqu'à la fin du dosage).

Calculs

$$N_{\text{Mg}^{++}} \text{ (méq/l)} = 1000.0.02.\text{nbs}.V_1/V_{\text{PE}}$$

$$N_{\text{Ca}^{++}} \text{ (méq/l)} = 1000.0.02.\text{nbs}.(V-V_1)/V_{\text{PE}}$$

Avec : V_1 = volume verse de l'EDTA. V_{PE} = volume de prise d'essai. V = volume verse totale.
nbs = nombre du dilution.

Indicateur noir eirochrome

Cet indicateur à également une dénomination « chromogène noir spécial T ». L'eirochrome noir T donne avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des complexes solubles de couleur rouge vin. Ces complexes sont moins stables, c-à-d qu'ils ont des valeurs de K_{inst} plus élevées que les complexes des mêmes métaux contenant le complexon III ($K_{\text{inst}}=3.9.10^{-6}$ pour Ca^{2+} et $K_{\text{inst}}=1.10^{-7}$ pour Mg^{2+}).

Préparation de l'indicateur

On dissout 0.5 g d'eirochrome noir T dans 10 ml de mélange tampon ammoniacal et on amène, à l'aide de l'alcool éthylique, le volume jusqu'à 100 ml. En règle générale la solution T ne doit pas être conservée plus de 10 jours.