



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de l'Ecologie et d'Environnement



N° d'ordre :
Série :

THESE

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de
DOCTORAT L.M.D.

Option : Eau, Environnement et Energies Renouvelables

Par

Mr. SEDRATI Abdenour

Intitulé

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et
isotopique des eaux de la nappe du
complexe terminal - zone sud Khenchela –
Algérie**

Soutenue publiquement le : 20/02/2018

Devant le jury composé de :

Présidente :	KADI Kenza	MCA, Université de Khenchela
Directeur de thèse :	HOUHA Belgacem	Professeur, Université de Khenchela
Examineur :	KACHI Slimane	Professeur, Université de Guelma
Examineur :	HOUHAMDI Moussa	Professeur, Université de Guelma
Examineur :	GOUIDIA Layachi	Professeur, Université de Tébessa
Examineur :	FEHDI Chemseddine	Professeur, Université de Tébessa

Année universitaire 2017/2018

Dédicace

A mes chers parents

A ma sœur Ibtissem

A mes frères Abdou et Btita

A la mémoire de mes grands-parents

A mes amis

A tous les membres de ma grande famille

Et à tous ceux que j'aime

Je dédie ce travail.

* NOUR *

Remerciements

Que dire de la miséricorde de Dieu et de sa bénédiction ; je n'ai qu'à m'incliner et à me prosterner devant sa puissance pour le remercier vivement ; Remercier **Allah** , le tout puissant qui m'a accompagné durant toute ma vie, m'avoir donné de la bonne santé, la force et la volonté d'achever ce travail et de concrétiser ainsi, mes rêves, le rêve de mes parents, de mes enseignants, de mes amis, voire de toute une génération.

Tous mes remerciements vont au **Professeur HOUHA Belgacem**, d'avoir bien voulu encadrer cette thèse car son soutien scientifique et psychologique me sont d'un grand apport pour la réalisation de ce travail. Je ne peux pas décrire le respect et la gratitude que j'ai pour vous, vous étiez comme un père et un ami plus qu'un encadrant, donc merci encore une fois.

Si j'ai la joie d'écrire ces lignes aujourd'hui, c'est bien aussi grâce aux membres du jury qui ont évalué ce travail malgré leurs grandes occupations et qui leurs remarques, me seront d'une grande utilité.

Je remercie vivement **Docteur KADI Kenza**, d'avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ma soutenance de thèse.

Mes remerciements vont également au **Professeur KACHI Slimane**, de l'université de Guelma qui a accepté de faire part du jury de ma soutenance.

C'est avec ma profonde gratitude, que, je remercie **Professeur HOUHAMI Moussa**, de l'université de Guelma, d'avoir examiné ma thèse.

Mes vifs remerciements iront aussi au **Professeur GOUAIDIA Layachi**, de l'université de Tébessa, qui a évalué mon travail.

Au **Professeur FEHDI Chemseddine**, de l'université de Tébessa ; pour qu'il trouve mes sincères remerciements de juger ce modeste travail.

Le **Professeur ROMANESCU Gheorge**, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire de géographie et hydrologie en Roumanie. Je n'oublierai pas non plus son aide, sa disponibilité, l'intérêt qu'il a manifesté à suivre cette étude et ses précieux conseils scientifiques.

Pr, BENAABIDATE Lahcen, de l'université Sidi Mohamed Ben Abdallah a Fès, pour son accueil au sein du laboratoire et ces conseils précieux dans la réalisation du plan de travail.

Mes remerciements vont également au **Professeur SIAB Rachid**, Recteur de l'université de Khenchela, qui était à l'écoute des étudiants, soucieux de leur intérêt et attentif aux appels des doctorants, de l'université de Khenchela, et des problèmes rencontrés pour

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

finaliser leur thèse de doctorat. Il a fait de nos doléances une priorité absolue et une affaire personnelle en ordonnant, ainsi, des directives et en proposant des solutions immédiates et concrétisables. Il n'a épargné aucun effort pour nous aider, à chaque fois que le besoin se faisait sentir pour y aller de l'avant, notamment en matière de réalisation des analyses isotopiques.

C'est au **Dr. KHENBTANE Abdelhamid**, Doyen de la faculté de la biologie, que j'adresse aussi mes vifs remerciements pour sa rigueur, son sérieux, sa sympathie, ses conseils et sa modestie ; il était toujours au service des doctorants.

Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants, primaire, moyen, secondaire graduation et post-graduation.

Je remercie également **Mr, CHERCHALI Mohammed**, chercheur à l'unité hydrochimie et hydrologie isotopique du centre de la recherche nucléaire d'Alger (CRNA) et à toute l'équipe du CRNA. Il a fait de son mieux et comme il y pouvait pour m'apporter aide et soutien; qu'il en soit remercié.

Que dire de cette thèse?

Tant de kilomètres parcourus dans la zone des parcours sud de Khenchela, qu'on appelle **Sahara d'El-Meita**, pour effectuer l'échantillonnage d'eau et les mesures de terrain, les laboratoires que j'aie fréquentés et dans lesquels j'ai réalisé des analyses d'eau; à commencer par la laboratoire de l'université de Khenchela, laboratoire des analyses chimiques d'Ain M'Lila (LACIP) et enfin celui de l'université Alexandru Ioan Cuza en Roumanie, Quelle aventure incroyable, au cours de laquelle on apprend tout d'abord à : se familiariser et à charioter entre les paillasses, manipuler des analyses, traiter des données, partager des connaissances et échanger des expériences avec beaucoup de collègues et enfin, interpréter les résultats..

C'est l'aboutissement de tout travail de recherche qui n'était qu'un mirage, un prélude une ébauche à la recherche, au savoir, à la science et enfin la thèse commence à poindre.

Quelle apothéose !!!

quatre ans, de joie, de bonheur, de déception mais aussi de galères et pas mal de sacrifices, de concession et de privation, d'attente et de stress, pour arriver aujourd'hui à finir, haut la main, cette thèse, et à rédiger, aujourd'hui, cette page de remerciements ; à tous les acteurs passifs ou actifs qui ont contribué à la réussite de ce mémoire, qui est loin d'être un travail individuel, je dirais que la **quintessence de ce travail vous y est offerte.**

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Que dire de mes parents, de leur : soutiens indéfectible, sacrifices, altruismes, affection ; **Tous les mots restent faibles et impondérables pour vous dire Merci.**

Avec beaucoup de larmes et d'émotion je les remercie, parce qu'ils m'ont tout donné ; ils ont su ancré en moi : l'éducation, la religion, le sérieux, le courage, beaucoup de valeurs humaines et spirituelles, l'instruction, la détermination et les études, le respect d'autrui....

Ma famille, mes parents, ma sœur **Ibtissem** et mes frères **Abdou** et **Mohamed**, n'ont épargné aucun effort pour me soutenir durant ces quatre ans. Pour que vous trouviez ici mes remerciements et mon grand respect pour tout ce que vous avez fait pour me permettre de réaliser mes rêves.

Je tiens à remercier également mes chers amis **Cheikh, Taha, Mostafa et Omar** pour leurs participation et soutien durant les travaux de terrain.

J'adresse également mes remerciements à tous mes amis ; **Chacha, Houda, Redha, Yacine, Badrou, Ihdj, Amine, Ayoub Amir et Fayçal** qui m'ont aidé énormément avec leurs conseils et leurs encouragements durant toute cette période.

Enfin, je remercie toutes les personnes, qui de près ou de loin, ont aidé à la réalisation de ce travail.

- SEDRATI Abdelouh -

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Résumé :

Cette étude est une contribution à la caractérisation des aquifères de la plaine d'El-Meita-Khenchela par le traçage chimique et isotopique. Nous sommes en présence de deux importants aquifères, les calcaires du crétacé au nord et les sables de l'Albien au sud. Ces aquifères sont soumis aux conditions climatiques sévères.

L'aridité du climat, l'effet d'altitude, la géomorphologie du relief, Atlas saharien au Nord avec ses altitudes surélevées marqué par le sommet de Ras Keltoum (2326 m) sur le massif de Chélia et son relief imposant, le bas Sahara et ses vastes plaines d'extension illimitées et d'altitude très vaste notamment, à Chott Melghigh (-35 m), la géologie et la géométrie de l'aquifère, le contraste climatique entre le Nord et le sud et l'activité anthropique, sont autant de facteurs qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux.

Les outils chimique et isotopique nous ont permis dans une large mesure, l'identification des systèmes aquifères et de l'existence d'éventuelles relations souterraines, de discriminer et de hiérarchiser les processus et les mécanismes responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, et enfin, l'identification de la source de l'alimentation des aquifères existants.

Une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux, a été dressée par la méthode de GOD, dans la région d'El-Meita, afin de tester les sols sensibles à une infiltration de surface. La réponse de l'aquifère de l'Albien nous interpelle pour dresser des périmètres de protection de la nappe.

Mots clés : El-Meita, complexe terminal, Minéralisation, Isotopes, Vulnérabilité, Khenchela.

Contribution to the hydrogeochemical and isotopic study of the aquifer of the terminal complexe - South of Khenchela – Algeria

Abstract :

This study is a contribution to the characterization of the aquifers of El-Meita- plain in the south of Khenchela by chemical and isotopic tracing. We have two important aquifers, the Cretaceous limestones in the north and the sand aquifer of Albian in the south. These aquifers are subject to severe weather conditions.

The aridity of the climate, the effect of altitude, the geomorphology of the relief, the Saharan Atlas in the North with its raised altitudes marked by the summit of Ras Keltoum (2326 m) on the massif of Chelia, the low Sahara and its vast plains of unlimited extension and very low altitude, including, in Chott Melghigh (-35 m), the geology and geometry of the aquifer, the climatic contrast between North and South and the anthropogenic activity, are factors that are at the origin of the mineralization of the water.

The chemical and isotopic tools allowed us, to identify the aquifer systems and the existence of any underground relations, to discriminate and to hierarchize the processes and the mechanisms responsible for the acquisition of the mineralization of the underground waters, and finally, the identification of the recharge source of the existing aquifers.

A water pollution vulnerability map was developed by the GOD method in El-Meita area to test soils sensitive to surface infiltration. The response of the Albian aquifer challenges us to establish protection perimeters of the water table.

Keywords : El-Meita, Saharan Atlas, Mineralization, isotopics, vulnerability, Khenchela.

المساهمة في دراسة الهيدروجيوكيميائية والنظيرية للمياه الجوفية

- المنطقة الجنوبية خنشلة - الجزائر

الملخص :

تعتبر هاته الدراسة مساهمة في تحديد خصائص المياه الجوفية لسهل الميتة بجنوب ولاية خنشلة, من خلال الخصائص الكيميائية و النظيرة. يوجد بالمنطقة خزانين مهمين هما : الطبقة الجوفية الكلسية من العهد الطباشيري بالشمال و الخزان الرملي الألبني بالجنوب, تخضع هذه الطبقات الجوفية لظروف جوية قاسية.

جفاف المنطقة, تأثير الارتفاع, هيئة التضاريس الجيولوجيا, الأطلس الصحراوي بالشمال بارتفاعاته الشاهقة التي تصل ل 2326 م بأعلي راس كلثوم بمرتفعات ثلية. الصحاري المنخفضة و سهولها اللامتناهية, مع الفارق الكبير في الارتفاع ب-35 م ب شط ملغنيغ, الجيولوجيا و حجم الخزان المائي, التنوع المناخي و النشاط الفلاحي بالمنطقة, كلها تمثل العناصر المساهمة في تمعدن المياه.

وقد أتاحت لنا الأدوات الكيميائية والنظائر, إلى حد كبير, تحديد نظم طبقات المياه الجوفية ووجود أي علاقات بينها تحت الأرض, وتمييز, وتسلسل العمليات والآليات المسؤولة عن تمعدن المياه وأخيرا, تحديد مصدر تزويد الطبقات الجوفية بالمياه.

تم تطوير خريطة حساسية المياه للتلوث بواسطة طريقة (جود) في منطقة الميتة لاختبار التربة الحساسة لتسلسل المركبات الملوثة. حساسية الخزان الرملي الألبني للتلوث تحتنا على إنشاء محيط حماية لهذا الخزان المائي.

كلمات دلالية : الميتة, الأطلس الصحراوي, التمعدين, النظائر, حساسية المياه للتلوث, خنشلة.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Abstract	
ملخص	

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

Chapitre 01 : Présentation du site d'étude

1- Cadre Naturel et situation géographique	4
1.1 - Situation géographique	4
1.2 - Evolution de la population	5
1.3 – Le cadre économique	5
1.4 – Aperçu géomorphologique	7
1.5 – Occupation du sol et pédologie	10
1.5.1 - Occupation du sol	10
1.5.2 – Pédologie	12
1.6 - Tourisme	16
Conclusion	16
2- Contexte géologique	17
2.1 – cadre géologique générale	17
2.2 – étude litho-stratigraphique	17
2.3 – Tectonique régionale	21
2.4 – Paléographie	22
Conclusion	24
3- Etude géophysique	25
3.1 – Introduction	25
3.2 – principe de la mesure de la résistivité	25
3.3 – objectifs des travaux de terrain	26
3.4 – Interprétation des résultats	26
3.4.1 – les coupes transversales	26
3.4.2 – les cartes de la résistivité	28
a) - carte de résistivité AB= 400m	28
b) - carte de résistivité AB= 1000m	31

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

c) - carte de résistivité AB= 3000m	31
d) - carte de résistivité AB= 4000m	31
Conclusion	31
4- Typologie des aquifères	33
4.1- Introduction	33
4.2- Le continentale intercalaire	34
4.3- Le complexe terminal	35
4.4- Le complexe terminal dans la région d'El-meita	37
4.4.1- Etude piézométrique	38
4.4.2- Alimentation et exutoires	38
Conclusion	40
5- Cadre hydro-climatique	41
5.1- hydrologie	41
5.2- cadre climatique	43
5.2.1- introduction	43
5.2.2- climat de l'Algérie	43
5.2.3- climat de la région	44
a) – le régime pluviométrique	44
b)- le régime thermique	47
c)- l'humidité	48
d)- le vent	49
5.2.4- synthèse climatique	50
a)- Diagramme ombrothermique	50
b)- la méthode d'Euverte	51
c)- Indice d'aridité de De Martonne 1926	51
c)- Diagramme d'Emberger	52
5.2.5- Bilan hydrique	53
a) ETP	54
b) ETR	54
c) RFU	55
Conclusion	56

Chapitre 02 : Matériel et méthodes

Introduction	59
1- Méthodologie	59
1.1. Missions de terrain	59
a) Mission de reconnaissance	59
b) Prélèvement de l'eau	59
c) Mesure in situ	61
2. Etude des processus hydrogéochimiques	62
2.1. L'étude hydrochimique et isotopiques des eaux de la région	62
2.1.1 Faciès chimique des eaux de la nappe	62
a) Diagramme de Piper	62
b) Diagramme de Schoëller et Berkloff	62
2.1.2 Les diagrammes binaires	63
3.1.3 Indice d'échange de base (i e b)	64
2.1.4 Indice de saturation	64
2.1.5 Traitement statique des données	65
3. Géochimie isotopique	
3.1 Approche méthodologique	65
3.2 L'apport des isotopes de l'environnement en hydrogéologie	68
3.3 Les isotopes stables (^{18}O et ^2H) et la notation delta (δ)	69
3.4 Les isotopes stables de la molécule d'eau	70
3.5 Corrélation des isotopes stables deutérium (^2H) et l'oxygène 18 (^{18}O)	71
4. Etude des éléments de la pollution	72
4.1. Aptitude des eaux a l'irrigation	72
a) Selon de Richard (SAR)	72
b) Selon Wilcox	73
4.2. Pollution agricole	73
4.2.1 Cartographie des nitrates et nitrites	73
a) – les nitrates	73
b) - Les nitrites	73
c) - L'ammonium	73
d) – métaux lourds	74

4.3. Vulnérabilité et pollution des eaux souterraines	74
4.3.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque	74
4.3.2 La méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères	74

Chapitre 03 : résultats et discussion

I – Etude hydrochimique et isotopique	77
Introduction	77
1- Les paramètres physico-chimiques	77
1.1- La température	77
1.2- Le potentiel d'hydrogène (pH)	77
1.3- La conductivité électrique (CE)	78
1.4- Solides dissous totaux (TDS)	79
2- Faciès chimiques des eaux de la nappe d'El-Meita	80
2.1 – diagramme de Piper	81
2.2- Diagramme de Scholler-Berkaloff	82
3- Diagramme binaire (ions – chlore)	84
4- Relation $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ et SO_4^{2-}	85
5- Indice d'échange de base (i e b)	86
6- Indice de saturation	87
7- Etude statistique	88
Introduction	88
7.1- Matrice de corrélation	89
7.2- Analyse en composantes principales (ACP)	90
II- Géochimie isotopique	92
1- Relation entre ^{18}O- 2H dans les eaux souterraines du bassin d'El-Meita	92
2- Interprétation du Diagramme $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$	92
III – Etude des éléments de la pollution et de la vulnérabilité	93
1- Aptitude des eaux a l'irrigation	93
2- Pollution agricole	94
2.1- les nitrates (NO_3^-)	97

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

2.2- Les nitrites (NO_2^-)	97
2.3- Les métaux lourds	97
2.4- l'ammonium NH_4^+	98
3- La vulnérabilité de la nappe	99
3.1- Préparation des données	99
3.2 - Digitalisation	99
3.3- Profondeur de la nappe	100
4.3- la nature de la zone non saturée	101
5.3- Indice de la nappe	102
6.3- Carte de la vulnérabilité GOD	103
Conclusion générale et perspective	105
Référence	108
Article	110

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

Liste des figures :

01	Carte de la situation géographique ville de Khenchela et la zone d'étude	05
02	Carte morpho-dynamique de la commune de Babar.	10
03	Cartes de l'occupation du sol	14
04	Cartes géologiques de la région d'étude	19
05	Coupe géologique interprétative (IFES)	20
06	Log litho-stratigraphique du forage G12-140	21
07	Carte de situation des sondages électriques	27
08	Coupes transversales Est- Ouest (IFES)	28
09	Carte des résistivités en AB= 400 m	30
10	Carte des résistivités en AB= 1000 m	31
11	Carte des résistivités en AB= 3000 m	32
12	Carte des résistivités en AB= 4000 m	33
13	Limite géographique des systèmes aquifères (CT et CI) (UNESCO, 1972)	37
14	Carte piézométrique de référence du Continentale intercalaire (OSS, 2003)	38
15	Coupe hydrogéologique transversale du CT 5 (UNESCO, 1972)	39
16	Carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003)	40
17	Carte piézométrique de la nappe du plio-quadernaire(CT) -EL-meita- (IFES, 2011)	43
18	Bassin versant du chott MELRHIR.	46
19	Carte pluviométrique pour l'Algérie du nord (ANRH , 1993)	49
20	Variations des précipitations moyennes mensuelles (station biskra 2003-2013)	51
21	Variations des températures moyennes mensuelles (station biskra 2003-2013)	52
22	Variations de l'humidité moyenne mensuelle (station biskra 2003-2013)	53
23	Variations de la vitesse moyenne mensuelle du vent (station Biskra 2003-2013)	54
24	Climagramme d'Emberger pour la station de Biskra (2003-2013)	56
25	Positions des points prélevés (carte géologique)	63
26	Techniques du prélèvement de l'eau	64
27	Diagramme de Piper	68
28	Diagramme de Schoëller et Berkloff	68
29	Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987)	78
30	Variation spatiale de la température des eaux de la plaine d'El-Meita.	80
31	Variation spatiale du ph des eaux de la plaine d'El-Meita	81

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

32	Variation spatiale de la CE des eaux de la plaine d'El-Meita	82
33	Variation des TDS pour chaque échantillon	83
34	Diagramme de piper pour l'ensemble des échantillons	85
35.a	Diagramme de Scholler-Berkaloff	86
35.b	Diagramme de Scholler-Berkaloff	87
35.c	Diagramme de Scholler-Berkaloff	87
36	Relations entre Ca, Mg, SO ₄ , Na et Cl des eaux souterraines et l'eau de pluie – eau de mer.	88
37	Relation entre SO ₄ ²⁻ et Ca ²⁺ + Mg ²⁺	89
38	Valeurs des indices d'échange de base.	90
39	Variation de l'indice de saturation dans les eaux de la plaine d'El-meita	91
40	Distribution spatiale des variable – facteur F1, F2 et F1, F3.	94
41	Relation 2H vs 18O des eaux des aquifères du massif des Aurès et la plaine d'El-Meita par rapport à la droite de (Craig, 1961) et (Helene Celle, 2000).	96
42	Diagramme de Riverside et Wilcox des eaux de la plaine d'El-Meita (SAR)	98
43	Carte de concentration du NO ₃ ⁻	99
44	Carte de concentration des nitrites NO ₂ ⁻	101
45	Méthode utilisé pour la réalisation de la carte de vulnérabilité	102
46	Carte des indices de la profondeur de la nappe	104
47	Carte des indices de la lithologie de la zone non saturée	105
48	Carte des indices de la nature de la nappe.	106
49	Carte de la vulnérabilité de la zone par la méthode GOD.	107

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

Liste des tableaux :

01	Répartition de la surface agricole utile (S.A.U)	06
02	Répartition de superficies par unité d'occupation du sol	11
03	Répartition de la ressource en eau souterraine	41
04	Données climatiques moyenne mensuelles de la station de Biskra (2003-2013)	50
05	Méthode d'Euverte période 2003 – 2013 station de biskra	54
06	Les indices d'aridité de De Martonne de la station Biskra (2003-2013)	55
07	Bilan hydrique selon la méthode de C.W Thornthwaite de la station de Biskra 2003-2013	59
08	Isotopes du milieu de l'oxygène et de l'hydrogène : traceurs intimes de la molécule de l'eau.	72
09	Goût de l'eau avec différentes concentrations du TDS	83
10	Faciès hydrochimiques et environnements géologiques	84
11	Matrice de corrélation	92
12	Corrélation entre les variables et les facteurs	93
13	Résultats des analyses des indicateurs de pollution	100
14	Indice des paramètres calculés selon GOD	103

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

Liste des abréviations :

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique.

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques.

BTP : Bâtiments et travaux publiques.

CI : Continental intercalaire.

CRNA : Centre de la recherche nucléaire d'Alger

CT : Complexe terminal

DHWK : Direction hydraulique de la wilaya de Khenchela.

DSA : Direction des services agricoles

GNIP : Global network for isotopes in precipitation.

OMS : Organisation mondiale de la santé

SASS : Système aquifère du Sahara septentrionale.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Introduction générale :

Les eaux souterraines constituent en général des réserves naturelles de bonne qualité qui nécessitent peu de traitement par rapport aux eaux de surface cette ressource doit être bien gérée car elle n'est ni inépuisable, ni insensible aux agressions de l'environnement. Il est indispensable d'assumer une gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines, afin de satisfaire la demande par les points de production les mieux adaptés. Une exploitation rationnelle est indispensable, car une exploitation mal maîtrisée des nappes pourrait avoir des conséquences très néfastes et peut être irréversible sur la qualité de l'eau.

Le Sahara Algérien étant un des déserts les plus parfaits au monde, dont la présence de l'eau est disponible à la survie des hommes, des animaux et des végétaux. Le bassin saharien est une grande entité sédimentaire multicouche. Hydrauliquement, c'est le système aquifère du Sahara septentrionale SASS qui se présente sous la forme de trois niveaux aquifères superposés, séparés ou communiquant à travers des formations semi perméables : la nappe du continental intercalaire (CI), la nappe du turonien plus localisée et la nappe du complexe terminal (CT).

La zone sud de la ville de Khenchela appartient au domaine de la plateforme saharien, elle est située au nord du Sahara septentrionale et au sud de l'Atlas Saharien, c'est ainsi aux richesses contenues dans son sous-sol, qu'elle est devenue une importante région à vocation essentiellement agricole.

Dans notre zone d'étude les nappes du Complexe Terminal deviennent de plus en plus exploitées malgré un manque de connaissance parfait des réserves, du fonctionnement des caractéristiques hydrauliques, du taux de renouvellement etc...

Chaque année, sont implantés de nouveaux forages qui captent ces nappes. Celles-ci se sont révélées, au cours du temps d'un intérêt agricole de plus en plus considérable. Soucieux de ne pas exploiter inconsidérément cette ressource, les responsables du domaine hydraulique sont penchés sur des études de reconnaissance et des projets visant une meilleure gestion de la dite nappe.

La détermination des flux d'eau, actuels et passés s'appuie sur la détermination des paramètres hydrodynamiques qui servent de base aux modélisations, et la connaissance de la géochimie des eaux au sein du milieu géologique considéré qui renseigne sur la dynamique et l'évolution du système. Ainsi, les deux approches, hydrogéologique sens strict et hydrogéochimique sont indissociables dans les études de caractérisation hydrogéologique des sites, à cela nous rajoutons les deux isotopes de l'eau l'oxygène 18 et le deutérium pour

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

identifier et évaluer les zones de recharges, évaluer les mélanges entre différents types d'eaux et identifier les eaux anciennes.

A la fin nous avons trouvé que l'étude de la vulnérabilité de la nappe est une mission très importante, donc on a décidé d'étudier, la vulnérabilité de la nappe par la méthode GOD et de mesurer la concentration des polluants qui sont issus généralement de l'activité agricole.

Nous allons donner les perspectives et les recommandations nécessaires pour exploitation durable et rationnelle de la nappe du complexe terminal dans la région d'El-Meita.

Chapitre I :

Présentation

du site d'étude

1- Cadre Naturel et situation géographique

1.1 - Situation géographique

La wilaya de Khenchela est située à l'est de l'Algérie et s'étend sur une superficie de 9.715,6 km². Elle est composée de 08 daïras et de 21 communes et compte 399.200 habitants (estimation 2009).

La diversité climatique de la wilaya de Khenchela lui confère un attrait touristique certain en plus de ses nombreuses sources thermales (Hammam Essalihine, Hammam elknif ...) et sites archéologique de l'époque romaine. L'agriculture et l'élevage constituent l'essentiel des ressources avec 84.6 % du territoire de la wilaya affecté à l'agriculture.

Notre zone d'étude appartient administrativement a la commune de Babar en même temps chef-lieu de daïra d'une très grande superficie de l'ordre de 355000 Ha soit 3550 Km², elle occupe à elle seule quelque 36% (plus du 1/3) de la surface totale de la wilaya de Khenchela.

Sur le plan administratif, la Daïra de Babar englobe sous sa tutelle uniquement la commune de Babar. Elle est délimitée (**fig. 1**):

- à l'Est par la commune de Kheirane, Chachar et la wilaya de Biskra.
- à l'Ouest par la commune d'El mahmel, Ouled Rechache et la wilaya de Tebessa.
- au Nord par la commune de Nsigha.
- au Sud par la wilaya d'El Oued.

Son chef-lieu est distant de 40 Km du chef-lieu de la wilaya de Khenchela. C'est une commune qui se caractérise par un relief complexe où dominant deux types de relief: une zone montagneuse au Nord et au centre (monts des Nememcha et de Zoui) et une zone de plaine alluviale au Sud sur la zone d'épandage de crue du plateau présaharien.

L'absence de voies de communication rapide couvrant le vaste territoire de la commune, pour assurer les liaisons avec les principales agglomérations qui lui sont proches, surtout avec la partie Sud de la commune qui est moins desservie, et vu l'état de dégradation du réseau existant, d'une part et de la grande surface qu'elle occupe de l'autre part, on considère que cette commune est en situation d'enclavement, notamment sa partie Sud (zone de notre étude).

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

1.2- Evolution de la population :

La population de la commune de Babar est passée de 28 185 habitants en 1998 à 35510 habitants en 2009 soit un taux de croissance moyen annuel de 1,82 %, taux inférieur à la moyenne nationale (2,34%). La population agglomérée représente 55,6 % de la population communale dont 16 790 habitants en chef-lieu, et 2930 habitants en agglomération secondaire. La population des zones éparses est de 15790 habitants soit 44,4 %.

Elle se caractérise aussi par sa faible densité de peuplement qui ne dépasse pas les 09 Hab/Km², concentré dans la zone Nord autour du chef-lieu de la commune.

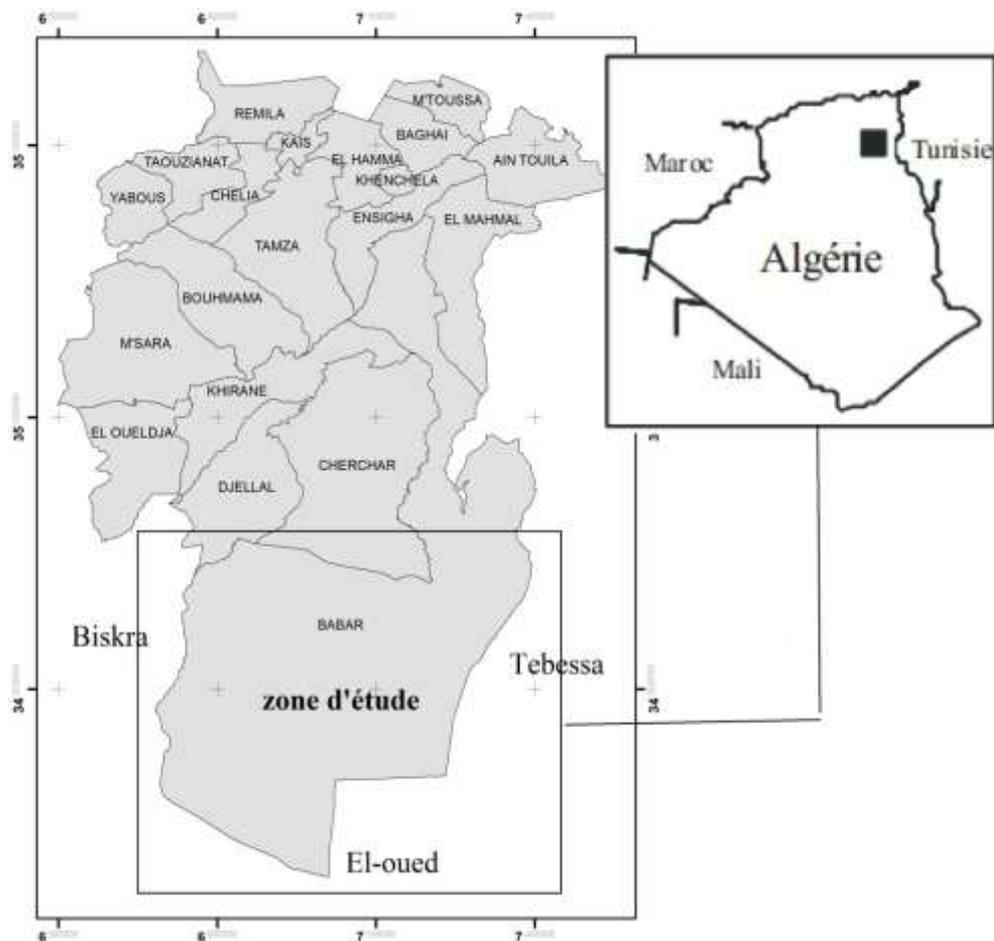


Figure. 1 Carte de la situation géographique ville de Khenchela et la zone d'étude

1.3- Le cadre économique

Dans la région de Babar, comme la plupart des régions Sahariennes les activités économiques principales sont liées à l'agriculture et à l'élevage (**Tab. 1**). Avec une population

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

occupée de 64% de la population active totale. La structure de l'emploi a Babar est marquée par (DSA, 2013):

- Prédominance du nombre d'emplois créés dans le secteur de l'agriculture (avec 56%), suivi des services avec 35%.
- Le BTP et l'industrie ne représentent que 9% de la population employée.

Au niveau de la commune de Babar on relève 2175 exploitations agricoles, réparties comme suit :

- 2150 exploitations de type privé.
- 24 exploitations de type (Exploitation agricole individuelles).
- 01 exploitation de type (Exploitation agricole collective).

La Surface agricole utile déclarée par le service de la D.S.A de Khenchela occupe environ 10 % de la S.A.T et 9.78 % de la superficie totale dont 6570.25 ha en irrigué soit 17.08 %. Ce sont donc les parcours qui occupent le plus gros de la surface communale avec 88.47 % de la S.A.T et 86.72 % du total de la commune. Cet état confère à la commune une vocation agropastorale. La répartition de cette S.A.U par groupe de cultures se fait comme suit :

Tableau 1 : répartition de la surface agricole utile (S.A.U)

Groupes	Superficie (Ha)	%	Observation
Céréales	13250	34.42	Dont 5000 ha en irrigué
Cultures maraichères	1370	03.56	Dont 1354 ha plantée
Cultures fruitières	341.55	0.9	Dont 211 ha de palmier dattier
Vignobles	02	00	//
Jachère	23530.45	61.12	//
Total	38494	100	//

Source : D.S.A Khenchela

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Sur la base des productions et superficies déclarées, on considère que les niveaux des rendements obtenus sont faibles.

Avec l'agriculture la deuxième activité au niveau de la région d'étude est l'élevage. L'espèce ovine est la plus pratiquée, et les sources principales de l'alimentation du cheptel sont constituées des parcours montagneux au Nord, les parcours sahariens au Sud et les zones d'épandage de crue (ENFIDA) au Sud sur le plateau présaharien. Les troupeaux sont abrités dans des locaux précaires.

1.4- Aperçu géomorphologique

Huit unités topographiques caractérisent la commune de Babar (**fig. 2**), elles se présentent comme suit:

• La zone montagneuse :

Localisée dans la partie nord de la commune sur les monts de Zoui et Nememcha, elle englobe les djebels de Dj salkr, Dj Fouara, Dj Tikniouine, Ach el Rhrab. ..Etc. Les altitudes varient de 800 à 1500m. Le point culminant est 1515m. La pente est comprise entre 12.5 - 25 % et >25 %.

La couverture végétale se limite aux parcours, composé d'Alfa et d'espèces steppiques. Le substrat est dominé par les marnes et marno-calcaire au centre de la commune et par le calcaire au nord. L'érosion est très active et se manifeste sous différentes formes, du diffus au stade ultime BadLands. Cette zone occupe une surface de 75520 ha soit 21.27 % de la surface totale de la commune.

• Les hauts piémonts :

Localisés en contrebas de la précédente unité ; Au nord de Ras Bou Fiss, au sud de Madjêr, près de Ouilel Etc. Les altitudes varient de 1000 à 1200m. Les pentes de cette unité sont comprises entre 12.5-25%. Le substrat dominant est tendre à très tendre (marnes et marno-calcaires), donc susceptibles à l'érosion, cette dernière s'est manifestée de façon très remarquable (Bad-lands, ravinement) ; Cette zone est occupée par une végétation très clairsemée composée surtout d'Alfa. La surface de cette unité s'élève à 14 620 ha soit 4.12 % de la surface totale de la commune.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

• Les Bas piémonts :

Situés à la limite nord de la zone pré saharienne et constituent le commencement du plateau saharien. Les altitudes varient de 170 à 200m. Cette zone est très entaillée par l'érosion, elle est aussi très chargée en surface. La surface de cette unité est de 16 908ha soit 4.76 % de la surface communale.

• Hautes Plaines :

Située au Nord du chef-lieu de la commune. L'altitude moyenne varie de 1000 à 1100m. Les eaux de ruissellement ont comme collecteur les Oueds el Halib et bou Trid. Cette plaine englobe Fiden Ndjil et Mrah Rhilène. Les pentes dominantes sont celles comprises entre 3 et 12.5 %. La couverture végétale est composée de céréales et de végétation steppique. La surface de cette unité s'élève à 13904 ha soit 3.92 % de la commune.

• Glacis d'épandage :

Localisés à l'aval des bas piémonts ; ils constituent le début de la zone d'épandage des crues. Ils sont traversés par les différents oueds, Ouezerne, el Haz, Mezdour Deba.....etc. l'altitude varie de 80 à 170m. Quant aux pentes, c'est la classe 0 – 3 % qui domine. La zone est entaillée par des ravins et ravines. La surface de cette zone s'élève à 22504 ha soit 6.34 % de la surface communale.

• Glacis d'accumulation :

Ils constituent la partie centrale de la zone saharienne. L'altitude varie de 120 à 10m, les pentes sont douces, c'est la zone la plus prisée en terme d'agriculture. C'est la zone de dépôts ou d'accumulation des éléments fins issus d'épandage de crues. Cette zone est traversée par les grands Oueds des Enfidas. La surface de cette zone est d'environ 126 334 ha soit 30.74 % de la surface communale.

• Plaine dépressionnaire :

Elle constitue la zone d'atterrissement des différents oueds. Elle s'étend d'El Khelga à l'est et ez zebbar à l'Ouest. Les altitudes varient de 60 à 17m, elles diminuent d'Est vers l'Ouest, les pentes sont très douces. La surface occupée par cette zone s'élève à 98624 ha soit 27.78 % de la surface totale communale.

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

• **Chott :**

C'est la zone la plus basse et la plus déprimée. C'est le début de chott Melghir. Elle occupe une surface d'environ 3804 ha soit 1.07 % de la commune.

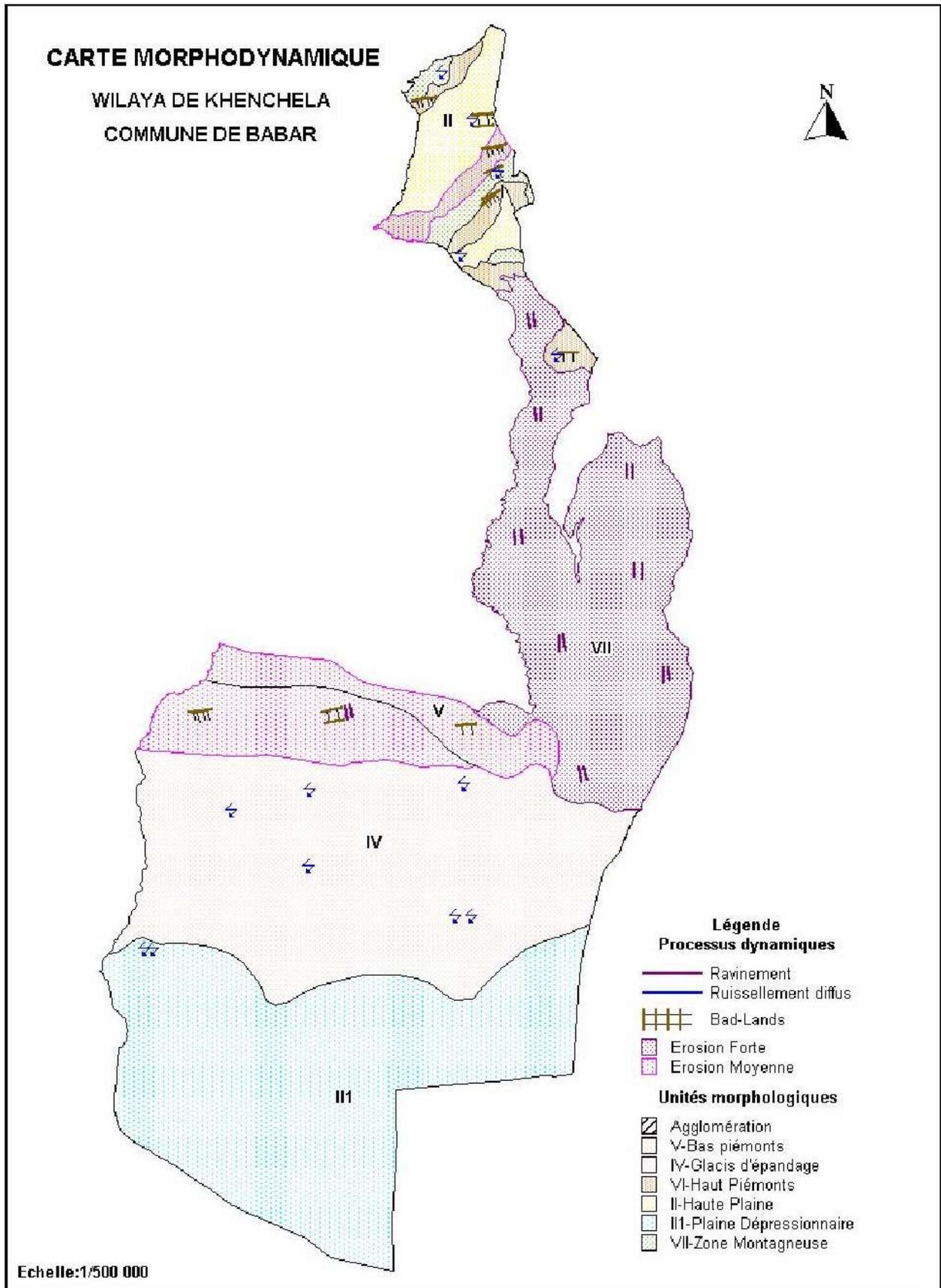


Figure. 2 carte morpho-dynamique de la commune de Babar.

1.5 - Occupation du sol et pédologie :

1.5.1 – Occupation du sol

L'occupation du sol est basée sur les données issues du planimétrage de la carte l'occupation du sol (**fig. 3**) réalisée lors de sorties sur terrain, pour vérification, correction et actualisation de la carte issue de l'image satellite par les services du D.S.A.

Les résultats de la planimétrie sont représentés dans le tableau ci-après (**Tab. 2**), selon les grandes unités d'occupation suivantes :

Tableau. 2 : Répartition de superficies par unité d'occupation du sol

Occupation	Reboisement		Terres Cultivées		Parcours		Terres Improductives		Agglom.		Total	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Babar	120	0.03	71362	20.10	237920	67.02	45568	12.84	30	0.01	355000	1000

Source : D.S.A Khenchela

• Reboisement :

Les formations forestières qui sont représentées uniquement par les reboisements de pin d'Alep n'occupent qu'une toute petite surface qui ne dépasse guère les 0.03 % de la surface totale de la commune. Le taux de boisement au niveau communal est très faible. Le patrimoine forestier peut être amélioré par le renforcement du taux de recouvrement à cause de l'existence des terrains aptes à recevoir des reboisements. En effet 38605 ha soit 10.88 % du total des terres de la commune sont situées sur des pentes comprises entre 12.5 % à 25 % et +25 % et peuvent être recouvertes d'espèces forestières surtout au Nord de la commune. Le caractère plat de la commune avec 89% des terres se situent sur des pentes inférieures à 12% ne confèrent guère à la commune une vocation sylvicole (forestière).

• Terres cultivées :

Elles correspondent aux parcelles de terres travaillées et cultivées par les exploitants agricoles ou susceptibles d'être cultivées. Elles occupent 20.10 % de la surface totale de la commune. On y trouve:

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Les périmètres de concession agricole : Ils sont au nombre de trois périmètres localisés au Sud de la commune, sur le plateau présaharien. Ce sont les périmètres de : - Goudjil de 120 ha - Oglat el baâra de 200 ha - Touam de 200 ha. Ils sont mis en valeur en irrigué par le biais de forages à base de maraichage, phœniciculture, arboriculture fruitière et céréalicultures.

Les périmètres de mise en valeur : Il s'agit des périmètres de mise en valeur en irrigué créés dans le cadre du programme de l'A.P.F.A. Ce sont 15 périmètres qui ont été créés pour une superficie initiale de 70.000 ha à travers les trois communes de Babar, Mahmel et Ouled Rechache couvriront le territoire du Sahara de Khenchela. Par manque de délimitation de ces périmètres, on a pu cartographier quelques-uns seulement d'une surface totale planimétrie de 9006 ha.

• Parcours :

Ils occupent le plus gros de la surface communale avec 67.02 % du total. Ils sont localisés sur tout le territoire de la commune du Nord au Sud. De part leur importance, ils offrent à la commune la vocation pastorale. Ils sont composés de plusieurs espèces pastorales et sont de deux types. - Les parcours du Nord, à charge caillouteuses et à affleurement rocheux, - Les parcours du Sud sur les vastes plaines et plateaux pré saharien. Les espèces dominantes sont : - l'alfa, qui se trouve au Nord sur les monts de Zoui et ceux des Nememcha.

Elle se trouve sous forme de nappes alfatières pures ou en association avec d'autres espèces fourragères, en état de dégradation. - l'armoïse (*Artemisia herba alba*). - L'adjram (*Anabasis articulata*). - Diss (*Ampelodesma mauritanica*). - L'Atriplex (*Atriplex halimus*). Quant au parcours saharien se trouvant au Sud de la commune, il se caractérise par des espèces steppiques s'adaptant aux conditions édapho climatiques de la zone telle que les espèces psammophiles et les espèces halophytes près du chott.

Les parcours se caractérisent par leur dégradation car on constate la présence des phénomènes érosifs et même les signes de la désertification.

• Terres improductives :

Elles correspondent aux terres de bad-lands (dernier stade de l'érosion), de dunes de sables, de bras dunaires et la zone du chott toutes incultes. Les bads-lands occupent la zone centrale de la commune sur les monts de Nememcha, quant aux dunes de sables et le chott ils occupent le bas de la commune. Ils couvrent une surface totale de 45568 ha soit 12.84 % Du total. Ils sont instables à cause du déplacement des particules de sable et du transport des

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

cristaux de sel du chott qu'il faut stabiliser. La plantation de cordons végétaux séparant l'extrême Sud et la partie centrale s'avère nécessaire. Ces écrans végétaux doivent comporter des plantes basses couvrant le sol, qui jouent le rôle de peigne vis à vis du vent.

• L'agglomération :

Représentée par l'agglomération du chef-lieu de commune de Babar se situant au piémont de Djebel Bou Zendeg. Elle occupe 0.01% seulement de la surface totale.

Conclusion :

A la lumière de la carte d'occupation du sol, les constats pouvant être établis sont les suivants: - Plus de la moitié de la surface étudiée est constituée de parcours généralement dégradés, offrant à la commune le caractère pastoral.

- Les terres cultivées occupent la deuxième place et sont dominées par les zones d'épandage de crues et de céréales.

- Les formations forestières sont presque inexistantes et doivent occuper une place plus importante.

1.5.2 – pédologie :

Les sols et leurs aptitudes ont été appréhendés à travers l'élaboration d'une carte morpho pédologique. La description des sols s'arrête aux niveaux supérieurs de la classification classe et groupes (**fig. 3**).

• **Les sols minéraux bruts litho-Régosols : (L.R)** Ces sols sont caractéristiques des zones accidentées, ils correspondent à l'affleurement de la roche mère, ils sont localisés au Nord et au centre de la commune et représentent environ 36104 ha, soit 10,17 % de la surface totale communale. En termes de potentialité, ils n'ont aucune valeur agricole, la seule utilisation possible reste le parcours.

• **Sols minéraux bruts lithosols : (L)** Ils sont comparables aux sols précédents, seulement la roche mère affleurante est dure, ainsi ils correspondent aux escarpements rocheux des différents Djebels cités dans la zone montagneuse. Leur valeur agricole est nulle et la surface couverte par ces sols est de l'ordre de 5612 ha soit 1,58 % de la commune.

• **Sols minéraux bruts xériques organisés d'ablation : (Mb xe oab)** Insérés entre Rheirane bou doukhane au Nord et Guerguit Bel Aizer au sud, localisés à limite sud de la zone montagneuse, le substratum de ces sols est de type marneux à marno-calcaire. L'érosion est très active.

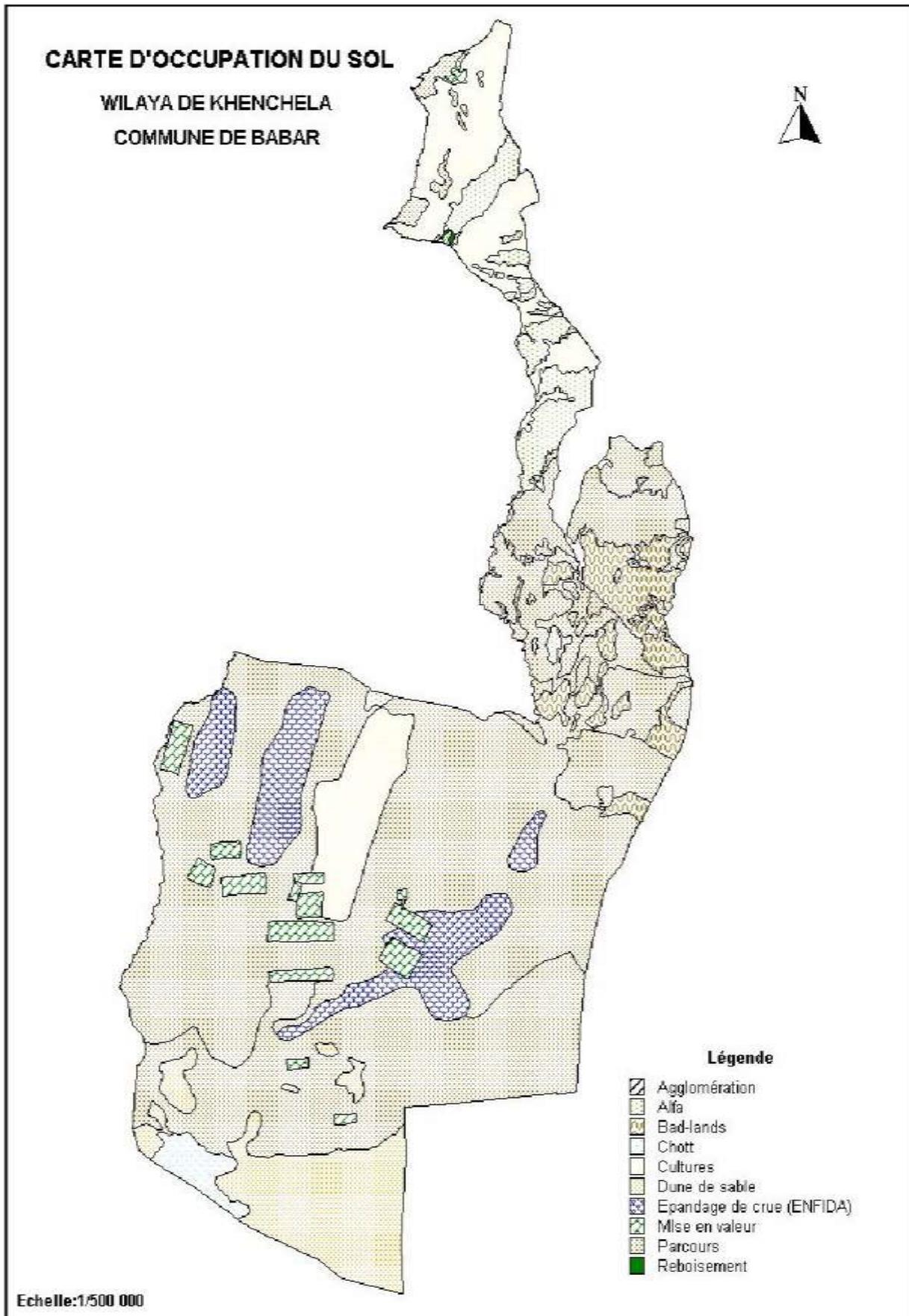


Figure. 3 cartes de l'occupation du sol

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

A cause de la sécheresse sévissant, ils sont xériques, leur évolution est inhibée. Ils constituent la source de départ des particules fines vers les Enfidas (zones d'épandage de crues). En plus de l'érosion hydrique prépondérante, il y a intervention de l'érosion éolienne différentielle. La surface couverte par ces sols s'élève à 33804 ha soit 9,52 % de la surface communale. Leur utilisation est limitée aux parcours extensifs.

• **Sols minéraux bruts xérique Inorganisés d'apport : (Mbxela)** Ce sont les sols de dunes diverses de toutes dimensions, localisés dans l'extrême sud de la commune, ils sont plus au moins stabilisés, profonds et très perméables, leur texture est très grossière. La surface couverte par ces sols est de 24824 ha soit 6,99 % de la surface totale de la commune.

• **Sols peu évolués d'apport xériques sub-désertiques : (SPExe)** Ce sont des sols peu évolués à cause de la sécheresse, ils sont pauvres en matière organique, à structure peu développée. Ils sont développés sur le glaciis d'épandage tout au début des Enfidas, ils sont moyennement profonds et sont chargés en éléments grossiers. Ils occupent une surface de 22504 ha soit 6,34 % de la commune.

• **Sols peu évolués d'apport xérique subdésertiques faiblement salés : (SPExe fs)** Ils sont identiques aux sols précédents à la différence qu'ils sont faiblement salés. Ils sont localisés au centre de la zone sud (saharienne). Ce sont des sols profonds, à texture équilibrée à fine et irrigable. Ils occupent une surface d'environ 109116 ha soit 30,74 % de la commune. Ils ont un potentiel agricole élevé s'ils sont irrigués.

• **Sols halomorphes à structure non dégradée salés : (Shs)** Ce sont des sols très riches en sels solubles de sodium. La structure du sol n'est pas dégradée, ils sont profonds, leur texture est fine surtout en profondeur. Ils sont irrigables et peuvent être cultivés par des espèces tolérantes en sels. Ils occupent une surface de 73800 ha soit 20,79 % de la commune.

• **Sols halomorphes à structure dégradée sodique : (Shd)** Ils correspondent aux sols du chott ; ils sont localisés à l'extrême sud de la commune et n'ont aucune valeur agricole. Ils occupent une surface de 3804 ha soit 1,07 % de la commune.

• **Sols calcimagnésiques carbonatés xérendzines : (Cs xe Rz)** Ils tapissent les hauts piémonts de la commune, localisés dans la partie Nord montagneuse. Ce sont des sols comparables aux rendzines, de couleur claire, de structure particulière poudreuse, très riches en carbonates de calcaire fins, et en sels solubles en particulier le gypse. Ils sont développés sur du marno-calcaire et des marnes gypseuses. La végétation qui couvre ces sols est limitée

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

et clairsemée. L'utilisation de ces sols reste les parcours. La surface de ces sols s'élève à 31528 ha soit un 8,88 % de la surface communale.

• **Sols calcimagnésiques carbonatés bruns calcaires xériques : (CSbcxe)** Ils tapissent les plaines, localisées au Nord et au sud du chef-lieu de la commune. Ils sont profonds, riches en CaCo₃, leur profil est de type A(B) C. Ils représentent 13905 ha soit 3,92 % de la surface totale de la commune. Ces sols conviennent aux céréales et aux cultures maraîchères s'ils sont irrigués.

1.6- Tourisme :

Pour les atouts touristiques de la wilaya on peut citer :

- Des sites naturels (forêts, oasis, gorges, cantors, voies panoramiques, ...),
- Des ruines romaines et historiques (175 sites répartis à travers les communes de M'sara - Kheirane - Mahmel - Chechar- R'mila- Yabous),
- Des sources thermales (Hammame Salhine, Hammame K'nif),
- Quatre autres sources thermales ne sont pas exploitées.

Conclusion :

A la lumière de l'étude pédologique, les constats établis sont les suivants :

- Il existe une grande diversité pédologique dans la région d'étude.
- 50 % des sols ont un potentiel agricole important pour les espèces tolérantes au sel.
- Le reste des terres sont des sols qui sont généralement utilisés pour le parcours.

Une richesse touristique caractérise la région, la ville de Khenchela est connue par son patrimoine touristique depuis l'ancienne époque. Mais tous ces atouts restent non exploités.

2- Contexte géologique

On abordera dans cette partie les aspects géologiques de la zone d'étude, qui nous permettra par la suite de comprendre la relation entre la minéralisation de l'eau et la nature géologique du substratum. Les travaux géologiques réalisés sur le Sahara septentrional sont nombreux : **(Fabre, 1976), (Bel et Cuche, 1969)** à ça se rajoute les études pétrolière et du service de l'hydraulique. Les études universitaires non jamais touché cette région.

2.1- Cadre géologique générale :

Lorsqu'on aborde le Sahara par le Nord, on est surpris par la rapidité avec laquelle on passe des montagnes et plateaux de l'Atlas à la plate-forme désertique saharienne. Ce passage souligné par des affleurements de calcaires blancs sub-verticaux, correspond à l'accident sud atlasique, qui est selon les endroits un pli, un pli-faille, ou une flexure. Au sud de cet accident qui va d'Agadir au Golfe de Gabès, s'étend le bouclier africain formé de roches éruptives et métamorphiques où se sont déposés plusieurs milliers de mètres de terrains sédimentaires allant du Cambrien au Quaternaire **(Cornet, 1964)**.

Au point de vue géologique le secteur d'étude est localisé au sud de l'Atlas Saharien dans une zone effondrée par la flexure sud atlasique correspondant au Sahara septentrional.

Le passage de l'Atlas Saharien à la plateforme saharienne se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de plis-failles et de failles correspondant à la flexure saharienne ou flexure sud-atlasique qui s'est développée lors de la phase paroxysmale alpine et ce suite à la surrection de l'Atlas saharien **(fig.4)**

2.2- Etude litho-stratigraphique :

La carte géologique n'a fait apparaître qu'une couverture tabulaire de terrains tertiaires, et de sédiments détritiques quaternaires. Au point de vue litho-stratigraphique **(IFES, 2011)**, les formations effleurant au niveau de la région **(fig.5 et fig. 6)** ou ayant été recoupées par les différents forages sont représentées de la base au sommet par la succession litho-stratigraphique suivante :

- L'éocène inférieur :

L'éocène inférieur est représenté par de affleurements assez circonscrits et faillés inclus dans des plis anticlinaux au Nord-Ouest du secteur d'étude sur le versant sud de l'Atlas saharien ou il correspond à une formation calcaro-marneuse fossilifère (Gastéropodes, Lamellibranches, Alvéolines et Miliolidés).

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Les terrains correspondant ont été recoupés par le forage de l'Oasis de Khangat sidi-nadji situé au-delà du coin nord-Ouest de la région, ou ils sont constitués par 295 m de calcaire gris à silex fracturés surmontant des calcaires gris argileux avec des intercalations de marnes.

- L'éocène moyen :

Cette série faillée, d'une puissance d'environ 200 m, affleure au nord de la région où elle est formée à la base par des intercalations de calcaires et de marnes gypseuses et au sommet par des argiles grises avec de petits bancs de calcaires et marnes gypseuses.

- Le mio-pliocène :

Le Mio-Pliocène affleure sur une grande étendue au nord de la flexure sud atlasique et du secteur d'étude, où il est constitué à la base par des argiles, des sables, des conglomérats rougeâtres à ciment gréseux admettant quelques passées argilo – sableuses et au sommet par des marnes et de petits bancs calcaires lacustres.

La série Mio-pliocène se termine par des marnes brunes ou rougeâtres gypseuses.

- Le Plio-Quaternaire :

Le Plio-Quaternaire a été traversé par plusieurs forages sur toute l'étendue de la zone étudiée, au Sud de la flexure Sud atlasique. Comme exemple nous citerons les forages : R'tim, Rouidjel, Oglat El Meita, Ouzzern etc...

Il est représenté par une série assez épaisse dépassant les 600 m constituée de la base au sommet par :

- des conglomérats, sables et argiles.
- des alluvions sableuses et argileuses.
- de la croûte calcaire
- des alluvions actuelles et récentes.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

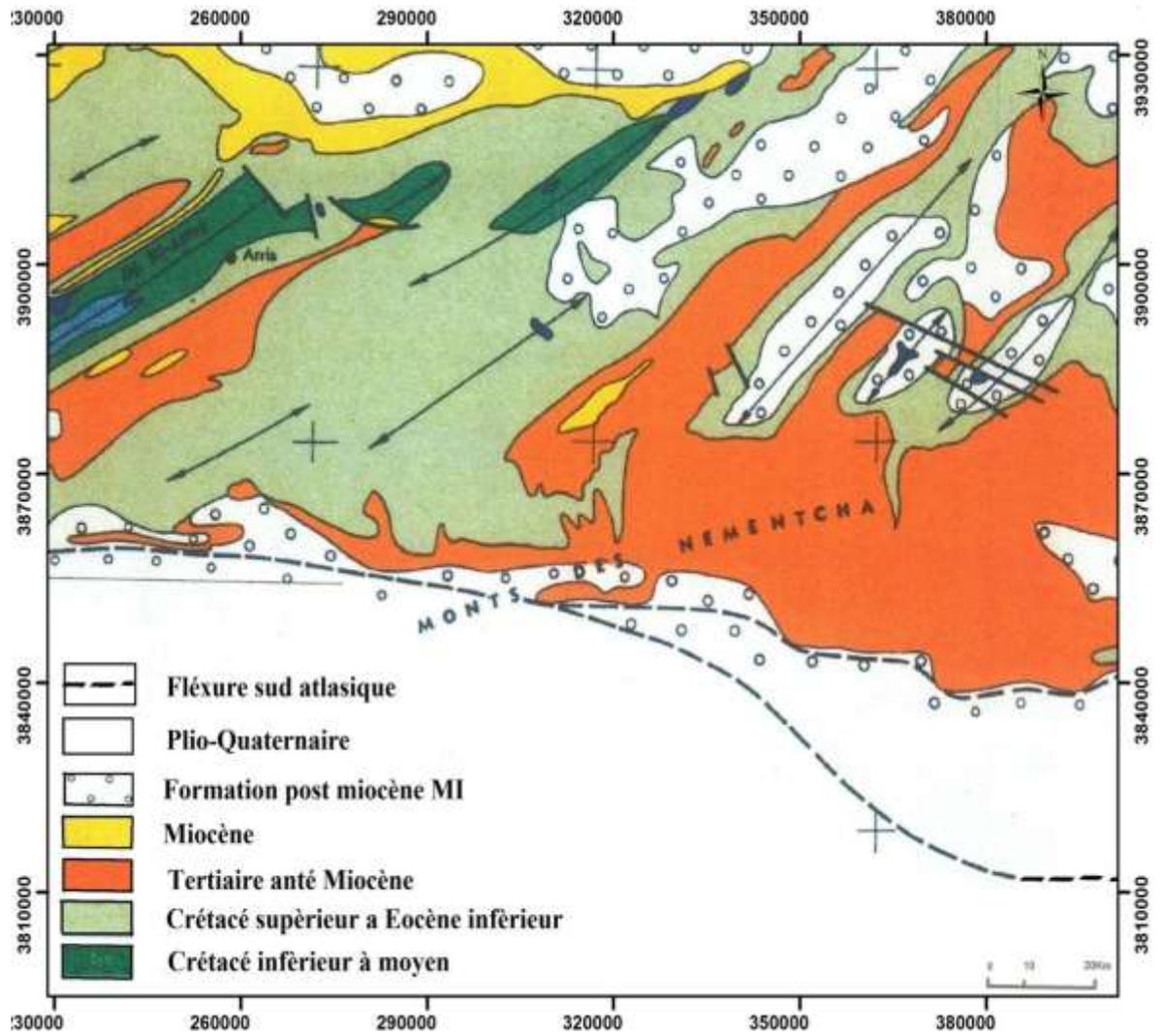


Figure. 4 cartes géologiques de la région d'étude

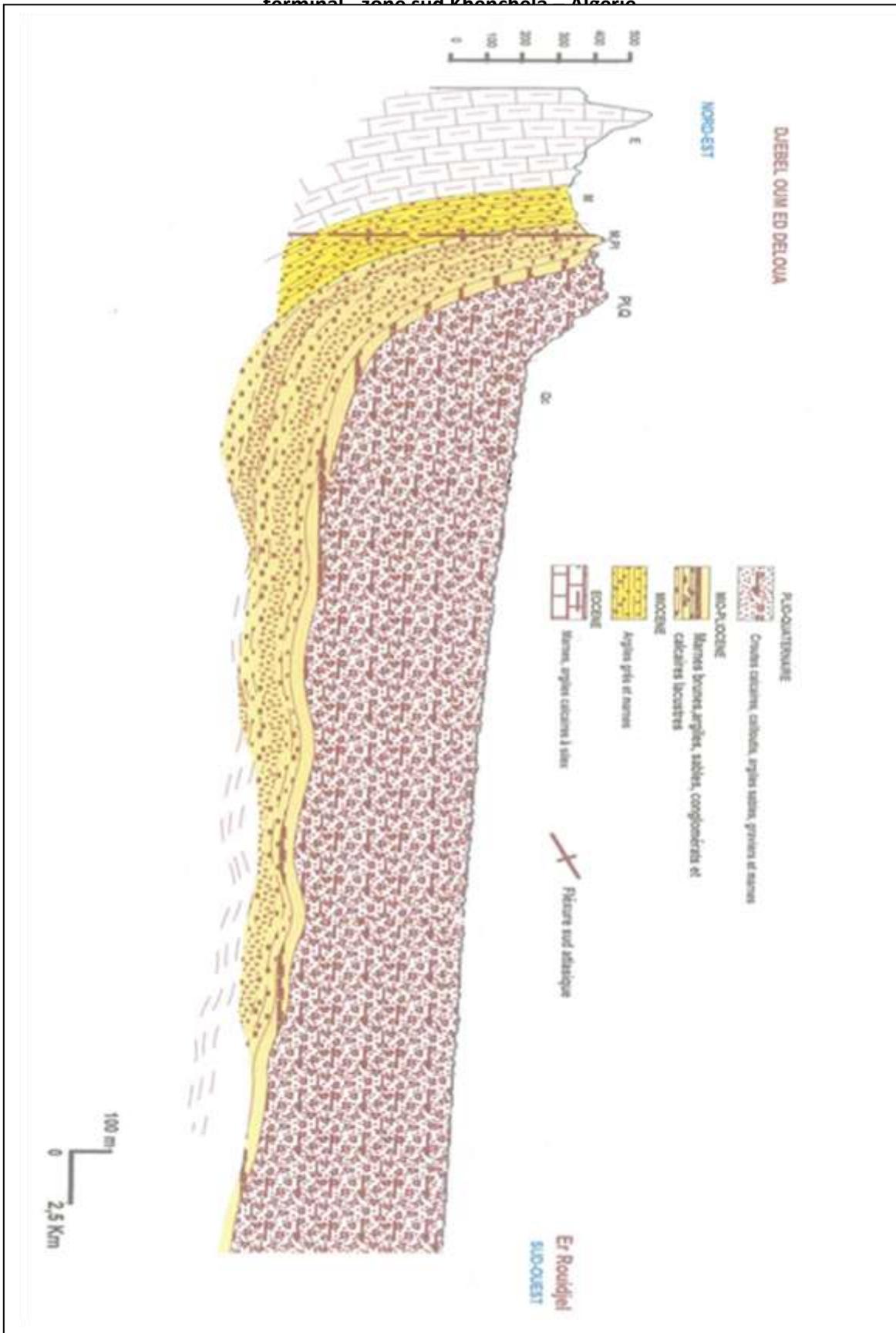


Figure 5 : coupe géologique interprétative (IFES)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

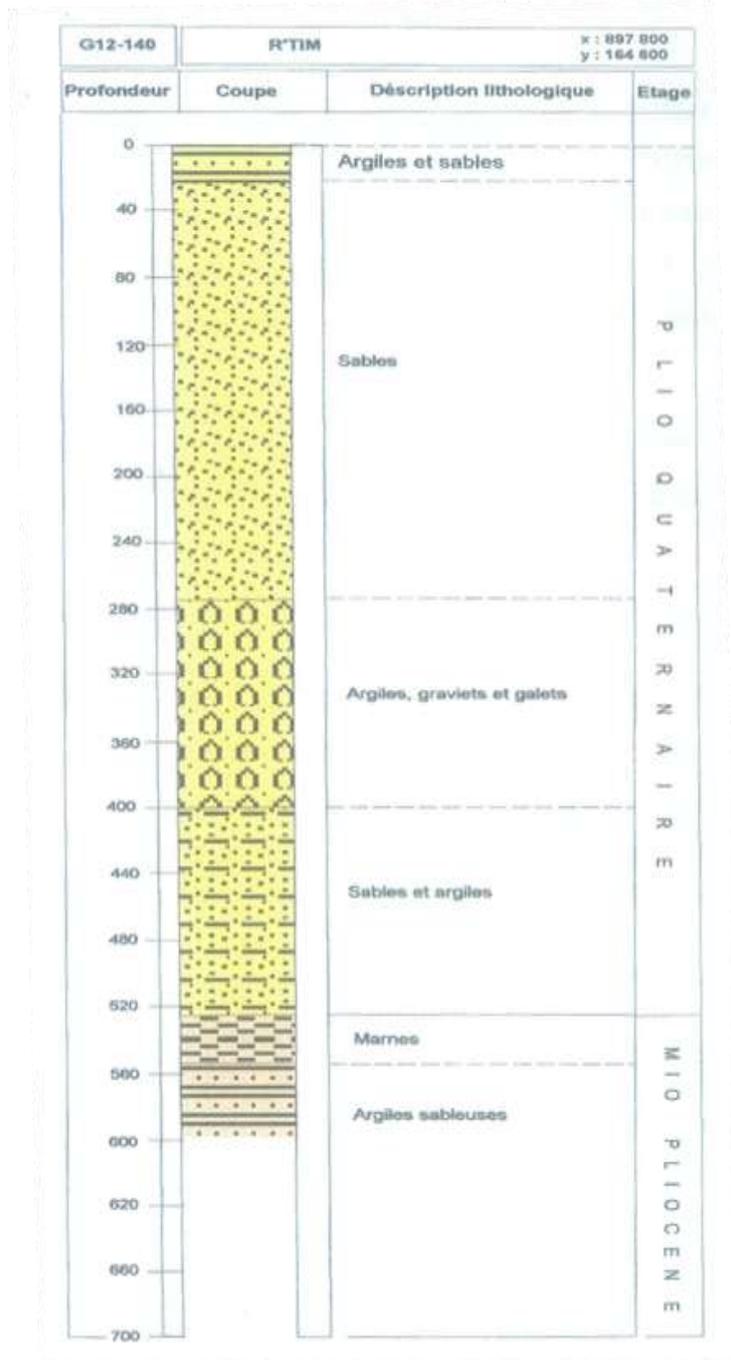


Figure 6. log litho-stratigraphique du forage G12-140

2.3 - Tectonique régionale :

L'Atlas Saharien est un sillon mésozoïque qui s'est formé à la périphérie sud de la plateforme épi hercynienne (Wildi, 1983), sa structure tectonique actuelle est due au plissement alpin.

Au cours du Secondaire, le Sahara algérien oriental subissait des mouvements verticaux d'ensemble. Pendant que de véritables chaînes de montagnes se formaient plus au

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Nord, dans le géosynclinal de l'Atlas saharien, la zone saharienne tendait plutôt à un effondrement progressif de sa partie centrale, suivant un axe passant sensiblement par la vallée de l'Oued R'hir et par le tronçon supérieur de la vallée de l'Oued Mya. (**Fabre, 1976**).

La géométrie actuelle des formations du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal du Sahara est caractérisée par l'absence des déformations tectoniques importantes. La chaîne des Maghrébides qui a subi plusieurs phases orogéniques au Tertiaire, va avoir des contrecoups sur la plateforme saharienne (**Houari, 2012**) :

- Les mouvements de l'Eocène moyen à supérieur, sont bien nets, la phase du Miocène inférieur qui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès,

- Enfin, la phase plio-quadernaire qui s'insère avec les précédentes dans la phase alpine; d'où l'apparition des fractures de direction Est-Ouest, forment la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie Sud « sillon sud Aurésien », ces fractures régissent l'écoulement des eaux souterraines d'où la naissance des chotts tels que chott Merouane et chott Melghir. La flexure sud atlasique de direction Est-Ouest qui sépare deux domaines distincts, c'est ainsi qu'on, peut avoir au Nord des points culminant « monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés.

2.4 - Paléogéographie :

Cette reconstitution paléogéographique est tirée des travaux de Bel et Dermagne, 1966, elle s'applique à l'ensemble du Bas Sahara (**Houari, 2012**).

Pendant la première moitié de l'ère secondaire, la sédimentation dans tout le Sahara oriental a été de type continental. En effet, du Trias à l'Albien, se sont déposés des argiles, des sables et des évaporites d'origine éolienne ou fluviale. On note cependant, quelques rares incursions marines, en particulier en Jurassique et à l'Albien. Ces dépôts constituent « le continentale intercalaire » et contiennent la plus importante ressource aquifère du Sahara.

Durant la seconde moitié du secondaire, d'autres phénomènes se sont succédé :

- Au-dessous des grès continentaux albiens viennent en transgression les calcaires marins du Cénomaniens. Ces calcaires qui s'intercalent avec les argiles et les évaporites. Cette alternance est l'indice d'un régime marin peu profond, évoluant vers un régime lagunaire responsable du dépôt des évaporites et des argiles gypsifères.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- Au Turonien, le régime marin s'est stabilisé, permettant le dépôt d'une barre calcaire homogène, atteignant parfois plus de 100 mètres dans le Sahara oriental. La stabilisation du régime marin durant le Turonien n'est que temporaire.
- En effet, dès le début du Sénonien, se dépose en alternance de l'anhydrite, des argiles, des dolomies ainsi que quelques bancs calcaires. Le dépôt parfois d'un banc de sel massif à la base dans le Bas Sahara témoigne particulièrement du régime lagunaire qui s'était installé sur le Sahara oriental durant tout le Sénonien inférieur.
- Au Sénonien supérieur, le régime marin réapparaît une nouvelle fois déposant ainsi la seconde série calcaire. Cette transgression Sénonienne semble moins importante que celle du Turonien. En effet, on note la présence de petites intercalations d'évaporites dans les calcaires Sénoniens, ce qui n'est pas le cas des dépôts turoniens.
- Au début de l'Eocène inférieur, la mer recouvre toujours le Sahara oriental, c'est le dépôt des calcaires à Nummulites.
- Durant l'Eocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Eocène inférieur sont peu à peu remplacés par des dépôts lagunaires où alternent les argiles, les évaporites et les calcaires. La faible extension de ce golfe marin localisé dans le Bas Sahara marque les dernières manifestations de la mer saharienne dont la disparition définitive se situe vers la fin de l'Eocène.
- A la fin de l'Eocène, le Sahara oriental se présente sous l'aspect d'une plateforme calcaire émergée qui sera exposée à l'érosion durant tout l'Oligocène.
- Au Mio-pliocène, suite à l'épirogénèse alpine, des sédiments argileux et sableux continentaux se déposent sur l'ensemble du Sahara oriental. Cette sédimentation continentale se poursuit durant le Quaternaire. C'est donc aux époques Tertiaires et Quaternaire que le Sahara oriental a pris la configuration que nous lui connaissons aujourd'hui.

**Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe
terminal - zone sud Khenchela – Algérie**

Conclusion :

L'étude litho stratigraphique et structurale montre qu'au niveau du secteur étudié les formations susceptibles d'être aquifères et représentant un intérêt hydrogéologique sont représentées essentiellement par :

- l'ensemble détritique Plio-quadernaire.
- le complexe Mio-pliocène.
- les calcaires et calcaires argilo-marneux de l'Eocène inférieur.

3- Etude Géophysique

3.1 - Introduction :

La région sud de Khenchela a fait l'objet entre 2009 et 2011, d'une étude géophysique réalisée par la compagnie de géophysique **I.F.S (Icosium forage engineering service)** à la demande de l'hydraulique de Khenchela. En effet 48 profils perpendiculaires aux plissements atlasiques, d'orientation NE-SW distant entre eux de 1km ont été réalisés. Dans le but de déterminer l'épaisseur et de l'extension des différentes formations susceptibles d'être aquifères, la détermination de la structure tectonique, Les sondages réalisés ont permis la détermination des valeurs des résistivités selon des profils, chaque profil va renseigner sur la répartition des formations et des couches de manière verticale et horizontale, la répartition des valeurs des résistivités reste un bon indicateur pour la délimitation des zones aquifères.

3.2 - Principe de la mesure de la résistivité :

Cette méthode est fondée sur la mesure de la résistivité des terrains en fonction de la profondeur pour préciser leur géométrie et leur nature lithologique. Dans ce cas, on peut procéder soit à l'aide :

- Du sondage électrique, qui permet d'obtenir les variations de la résistivité en fonction de la profondeur.

- Du profil électrique, permettant de déterminer les variations latérales de la résistivité pour préciser la structure tectonique par la mise en évidence des accidents tectoniques.

La résistivité ρ d'un milieu est la propriété qui détermine l'aptitude de ce milieu à s'opposer au passage du courant électrique, elle peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R : résistance d'un cylindre (en Ohm) de section S(m²) et de longueur L (m)

ρ : résistivité en ohm.m

3.3 - Objectifs et travaux de terrain :

Dans le cadre de cette prospection électrique qui a démarré le 15 novembre 2009, la région a fait l'objet de 48 profils perpendiculaires aux plissements atlasiques, d'orientation NE-SW distants entre eux de 1km (**fig. 7**).

La ligne d'émission choisie est de $AB = 4000$ m et ce dans le but de déterminer la nature et la géométrie des formations litho stratigraphiques du Mio-plio-quadernaire et dans la mesure du possible celles des terrains sous-jacents.

3.4 - interprétation des résultats :

3.4.1 - les coupes transversales :

Les coupes géo-électriques transversales réalisées (**fig. 8**) permettent de mettre en évidence des variations de faciès des terrains plio-quadernaires et mio-pliocènes d'Est en Ouest et du Nord vers le Sud en effet on remarque au niveau :

- De la coupe transversale **I**, que dans la partie Ouest entre les sondages électriques A5 et P5 on a affaire principalement à des formations conductrices correspondant aux argiles sableuses plio-quadernaires dont la résistivité croit légèrement dans la partie centrale entre les sondages électriques verticales P5 et AK5 ou cette horizon devient plus sableux. Dans la partie Est de la coupe les terrains plio-quadernaires deviennent plus résistants et ce probablement à cause des intercalations graveleuses déposées à cet endroit.
Dans ce cas le mio-pliocène est formé en général par des argiles sableuses, sauf entre les sondages électriques verticales P5 et AA5 ou les terrains résistants correspondent probablement aux conglomérats et calcaires lacustres.
- De la coupe transversale **II** qu'entre les sondages électriques verticales A15 et Q15 on a affaire à un horizon conducteur correspondant aux argiles sableuses plio-quadernaires dont la résistivité croit vers l'Est du fait probablement des intercalations sableuses qui deviennent plus importantes.

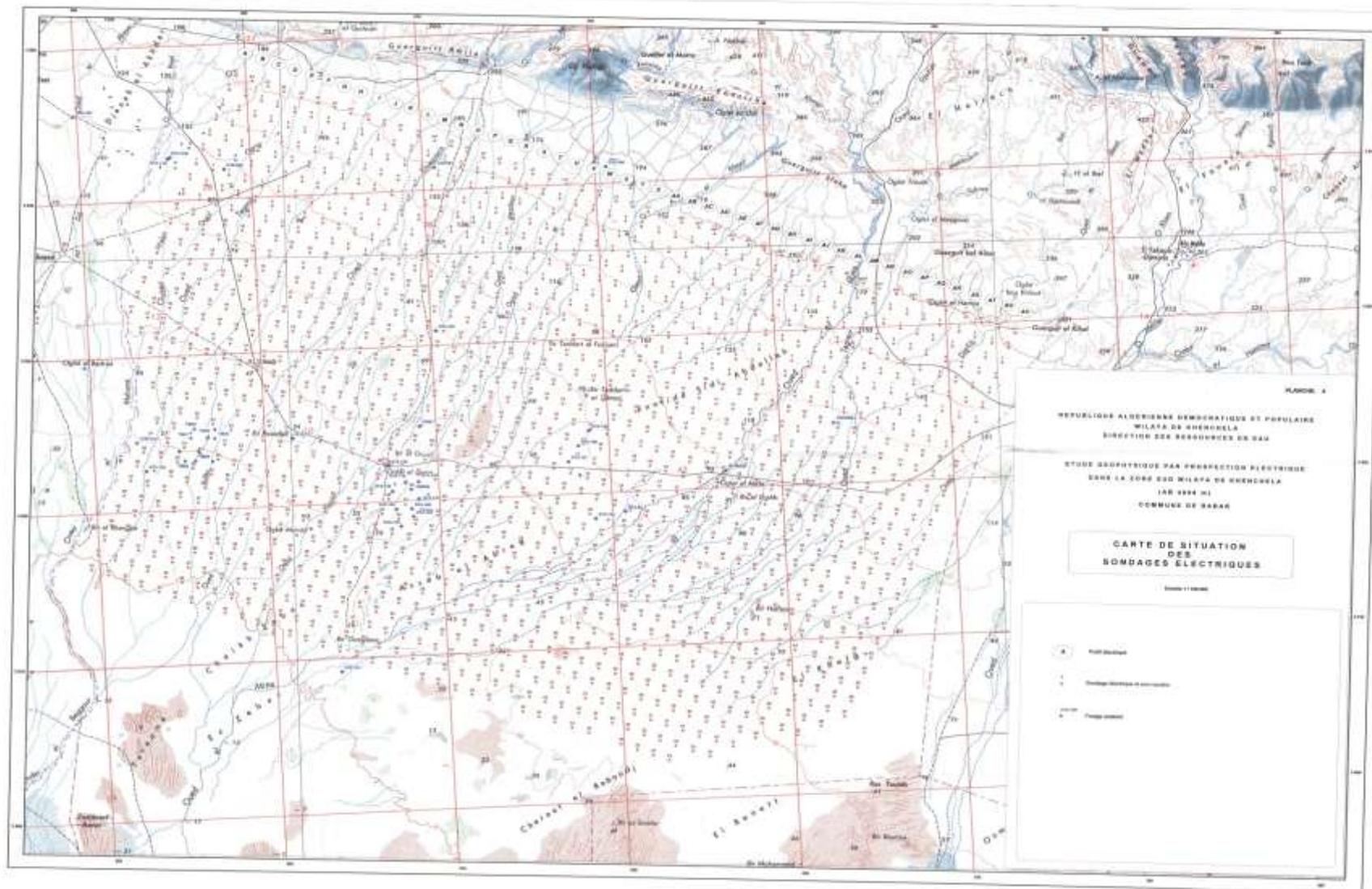


Fig. 7 : Carte de situation des sondages électriques

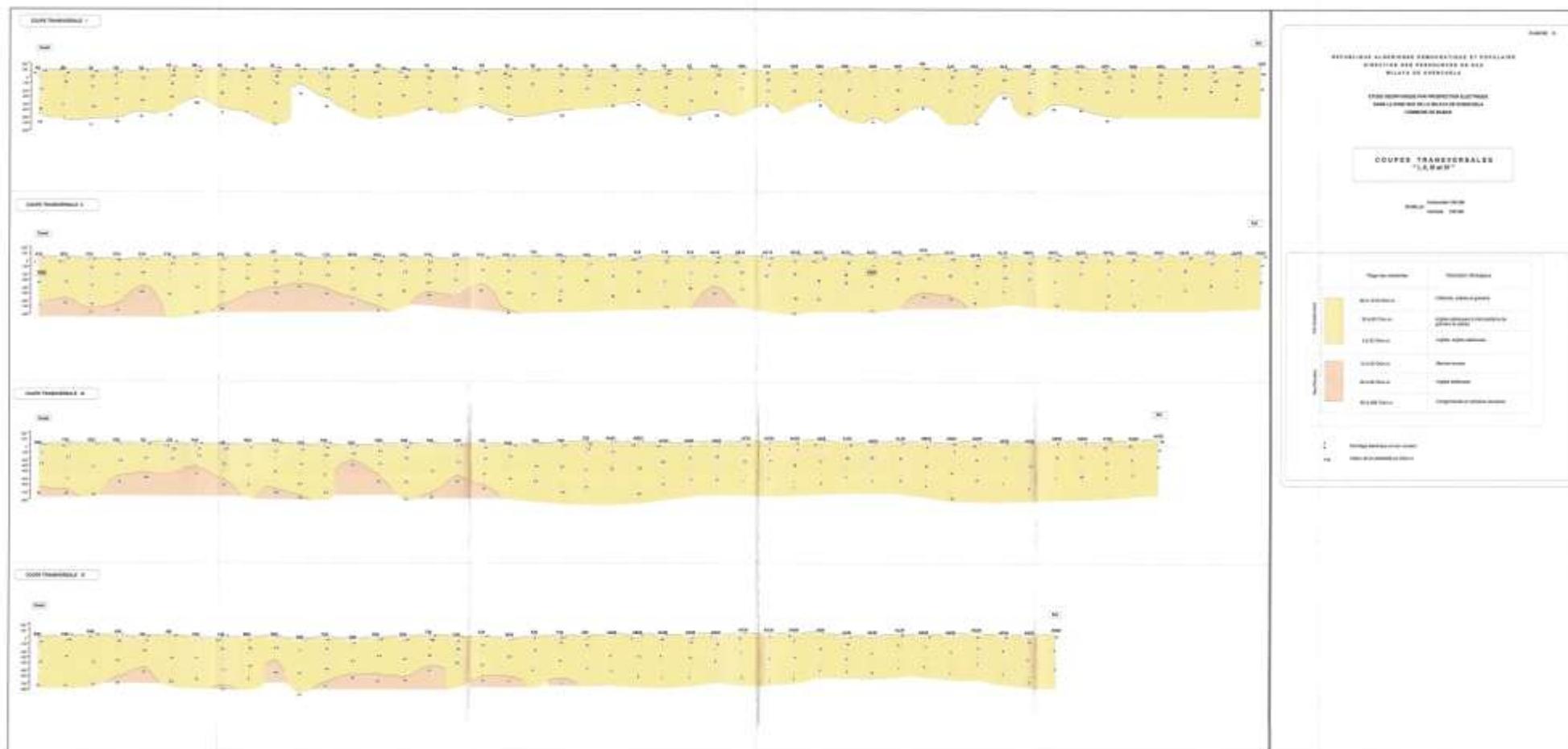


Figure 8 : coupes transversales Est- Ouest (IFES)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Le moi-pliocène quant à lui présente une diminution des résistivités de l'Ouest vers l'Est ou il est formé entre les sondages électriques verticales B15 et X15 par des argiles sableuses et entre les sondages électriques verticales Y15 et AV15 par des marnes brunes.

- De la coupe transversale III que le plio-quadernaire est représenté par des terrains conducteurs entre les sondages électriques verticales E22 et U22 correspondant à des argiles sableuses qui passent vers l'Est à un horizon légèrement plus résistant donc plus sableux. Le moi-pliocène n'a été recoupé que dans la partie Est entre les sondages électriques verticales E22 et V22 où il est constitué par des argiles sableuses et parfois des conglomérats d'une résistivité comprise entre 16 et 169 ohm.m.
- De la coupe transversale IV que les formations plio-quadernaire deviennent plus conductrices d'Ouest en Est et par conséquent plus argileuses. Les terrains moi-pliocène ont été traversés entre les sondages électriques verticales H30 et Y30 où ils sont constitués par des argiles sableuses.

3.4.2 - les cartes de résistivité :

a) Carte des résistivités AB= 400m :

La figure (**fig. 9**) des résistivités dont la profondeur d'investigation est comprise entre 40 et 100 m permet d'individualiser au niveau de la zone d'étude, deux zones bien distinctes, il s'agit :

- De la zone située au Nord-est où les résistivités apparentes comprises généralement entre 50 et 250 ohm.ù correspondant à des graviers et sables plio-quadernaire résistants dont l'extension diminue en allant vers la partie Nord-ouest. Dans la partie SSE les résistivités de 50 à 100 ohm.m peuvent être attribuées à des changements de faciès du au passage des graviers et sables à des argiles sableuses.
- De la partie centrale et SSW où la résistivité passant de 50 ohm.ù à 10 ohm.m représentent des argiles sableuses et argiles saturées en eau minéralisée du fait de la faible perméabilité des terrains et l'évaporation.

La diminution des résistivités apparentes du NNE vers le SSW est due à un changement de faciès de terrains plio-quadernaire du fait du mode de leur dépôt fluvial.

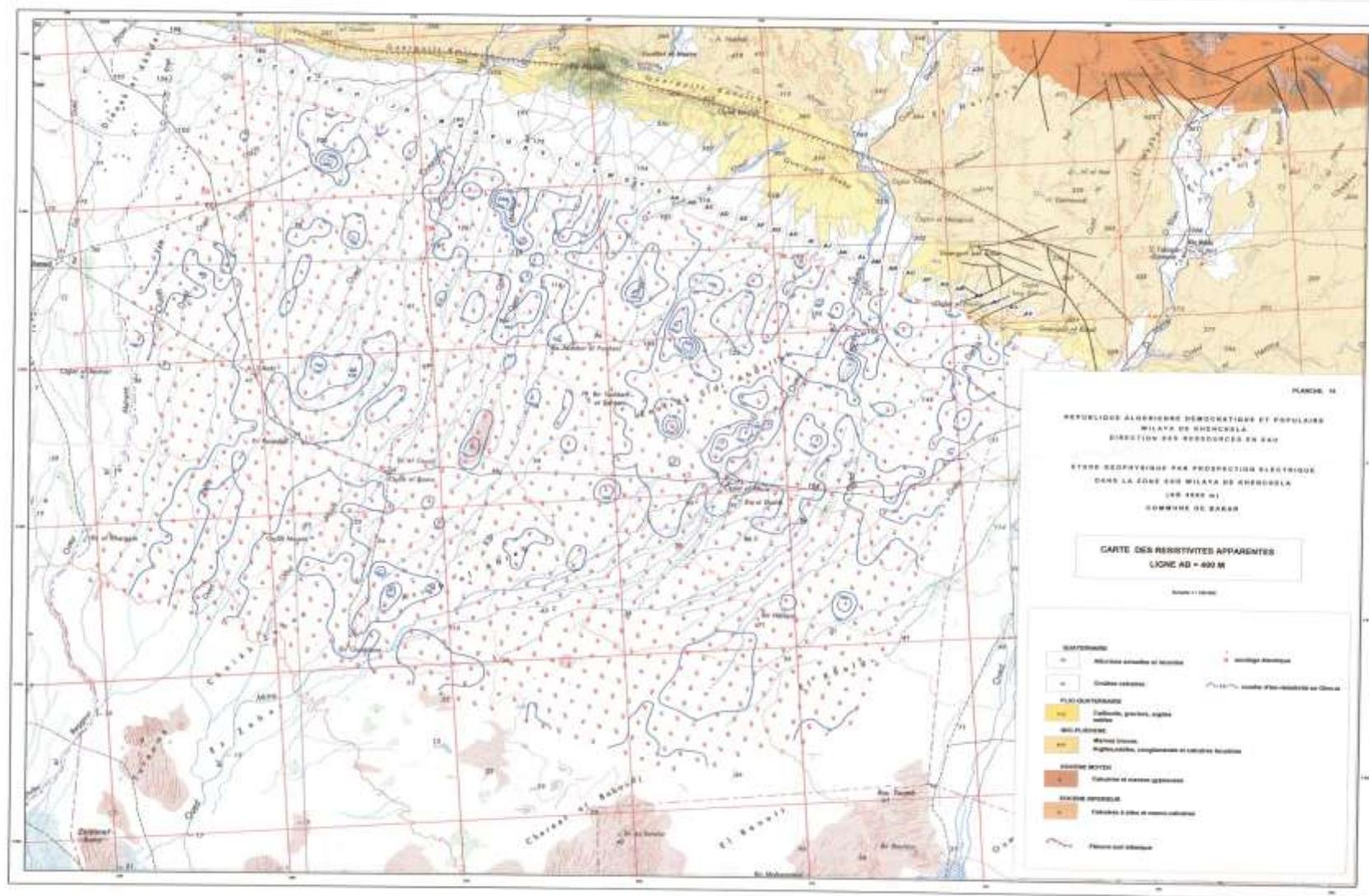


Figure 9 : carte des résistivités en AB= 400 m

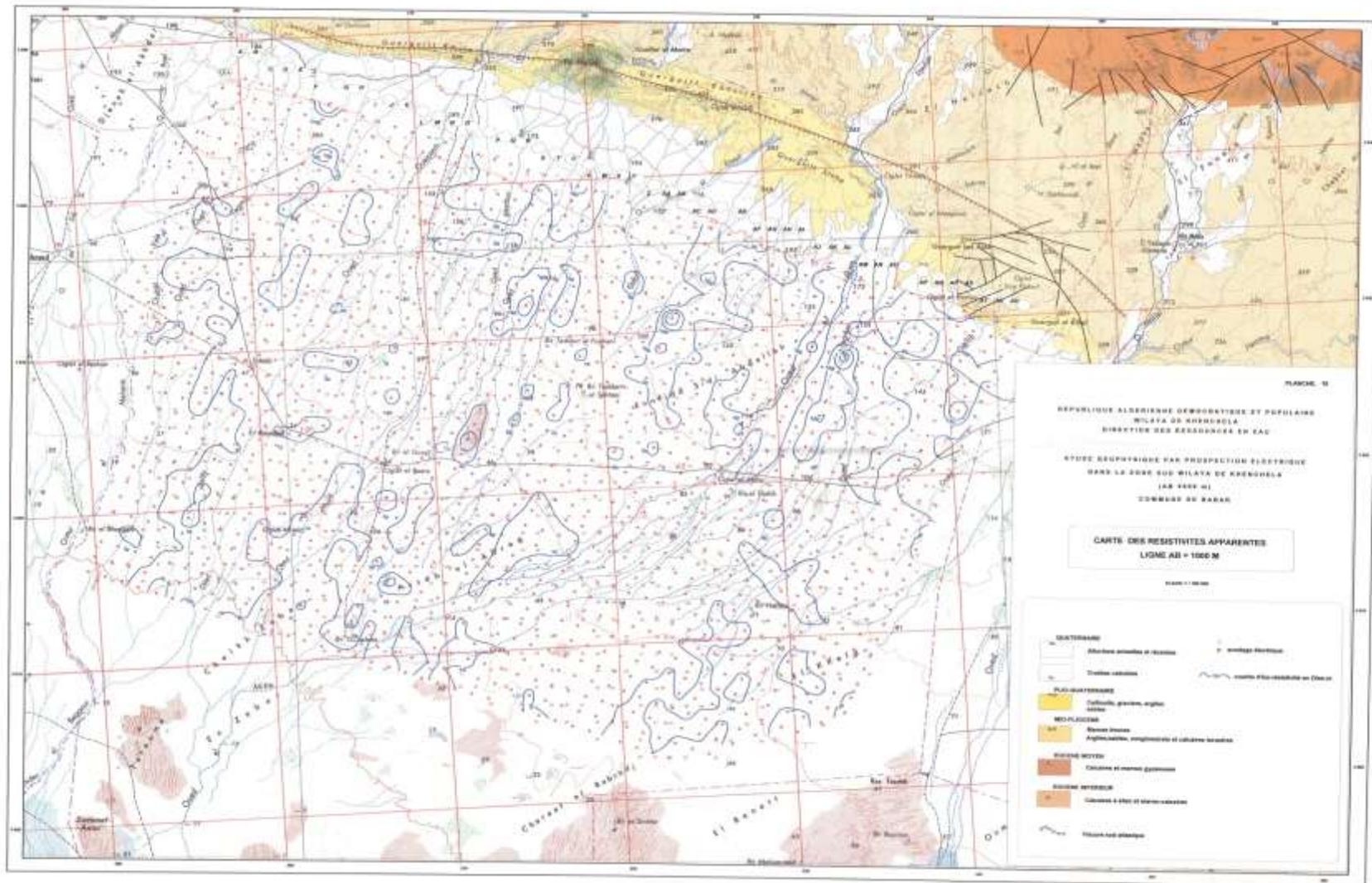


Figure 10 : carte des résistivités en AB= 1000 m

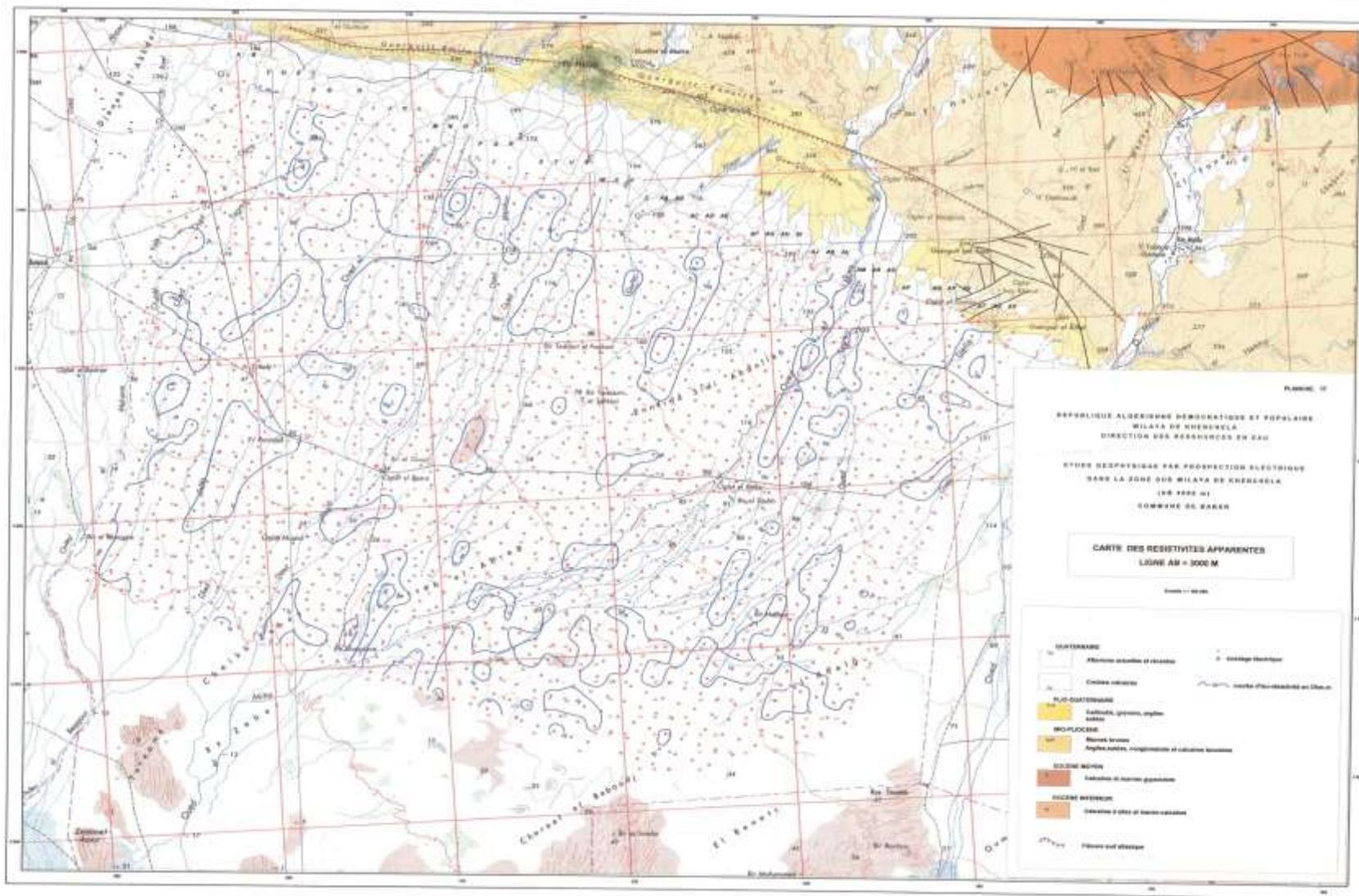


Figure 11 : carte des résistivités en AB= 3000 m

b) Carte des résistivités AB= 1000m :

Cette carte (**fig. 10**) dont la profondeur d'investigation est plus importante que la précédente montre que les résistivités apparentes supérieures à 100 ohm.m s'observent au niveau des profils AD, AE, AL, AN, AJ, AT et AU ainsi que G, H et V ou elles présentent les graviers et sables plio-quaternaires résistants.

Comme pour la carte précédente la partie centrale et SW de la zone d'étude sont caractérisées par des résistivités apparentes comprises entre 10 et 50 ohm.m correspondant à des argiles sableuses et argiles plio-quaternaires.

c) Carte des résistivités AB= 3000m :

La figure (**fig. 11**) montrent que les résistivités au niveau des profils AD et AN diminuent légèrement 50 à 100 ohm.m à cause de l'influence des argiles sableuses et argiles plio-quaternaires constituant le sous bassement des graviers et sables résistants. Pour le reste de la zone d'étude les résistivités sont généralement inférieures à 50 ohm.m et diminuent du NNE vers le SSW et de l'Est vers l'Ouest ou elles atteignent 10 ohm.m.

Il est à noter qu'en AB= 3000m les résistivités diminuent pour le profil AU et atteignent 50ohm.m et augmentent au profil G ou sont de l'ordre de 150 ohm.m.

d) Carte des résistivités AB= 4000 m :

Dans cette carte la profondeur d'investigation peut atteindre 1000 m (**fig. 12**), elle montre que les résistivités supérieures a 50 ohm.m mises en évidence au niveau des profils F, G, P, S, V, AD et AL, peuvent être attribuées à un horizon résistant correspondant aux conglomérats et calcaires lacustres moi-pliocène.

Les résistivités comprises entre 50 et 100 ohm.m peuvent correspondre soit aux sables, argiles ou aux marnes brunes moi-pliocène ou aux argiles sableuses et argiles plio-quaternaires.

Conclusion :

L'investigation multiforme de l'étude géophysique réalisée par I.F.S, nous a permis de mettre en évidence deux horizons aquifères bien distincts :

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- L'ensemble détritique Plio-quadernaire dans la partie septentrionale de la zone d'étude est constitué essentiellement par des graviers et des sables à matrice argileuse, termes du point de vu géophysique résistants et dont la résistivité varie de 100 ohm.m à 250 ohm.m. l'épaisseur maximale mise en évidence au des coupes géoélectriques est de 1000 m.

Dans la partie méridional et du fait d'un changement latéral de faciès progressif, grossièrement N-S la séquence argileuse devient prépondérante et c'est un faciès à argiles et sables plus conducteur qui prédomine. Les résistivités sont de 10 ohm.m à 50 ohm.m.

- Le complexe mio-pliocène se caractérise par son terme sommital marneux franc qui le sépare du plio-quadernaire. Il repose sur des marnes et de petits bancs de calcaire lacustre. Sa base quant à elle est constitués d'argiles, de sables, de conglomérats à ciment gréseux à passées argilo-sableuses.

L'ensemble plio-quadernaire et le complexe moi-pliocène sont séparés par un mio-pliocène sommital marneux, ce qui rend l'horizon mio-pliocène basal captif à artésien.

4- Typologie des aquifères :

4.1 - Introduction :

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) (**fig. 13**) désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : la formation du Continental Intercalaire (CI) et celle du Complexe Terminal (CT), très sollicitée dans la région des Chotts algéro-tunisiens et dans le golfe de Syrte en Libye. Sur chacune de ces nappes souterraines s'exercent des contraintes qui limitent la faculté d'exploiter leur potentiel. Ces contraintes sont d'ordre économique d'abord mais les risques environnementaux liés à l'exploitation et à la vulnérabilité des nappes sahariennes constituent aujourd'hui les contraintes les plus déterminantes. Ce Système recouvre une étendue de plus de un Million de km², dont 70% se trouvent en Algérie, un peu moins de 6% en Tunisie, et 24% en Libye. Ce bassin possède une envergure de 1800 km E-W et de 900 km N-S. sa réserve est estimée à 31.000×10⁹ m³ (**Ould Baba, 2005**).

Il s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements de Tidikelt et du rebord méridional de Tinrhert et d'Ouest en Est depuis la vallée de Guir-Saoura jusqu'au graben de Hun en Lybie. En Algérie, ce système aquifère couvre une surface de 700 000 Km², et est d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (**Cornet, 1964**).

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

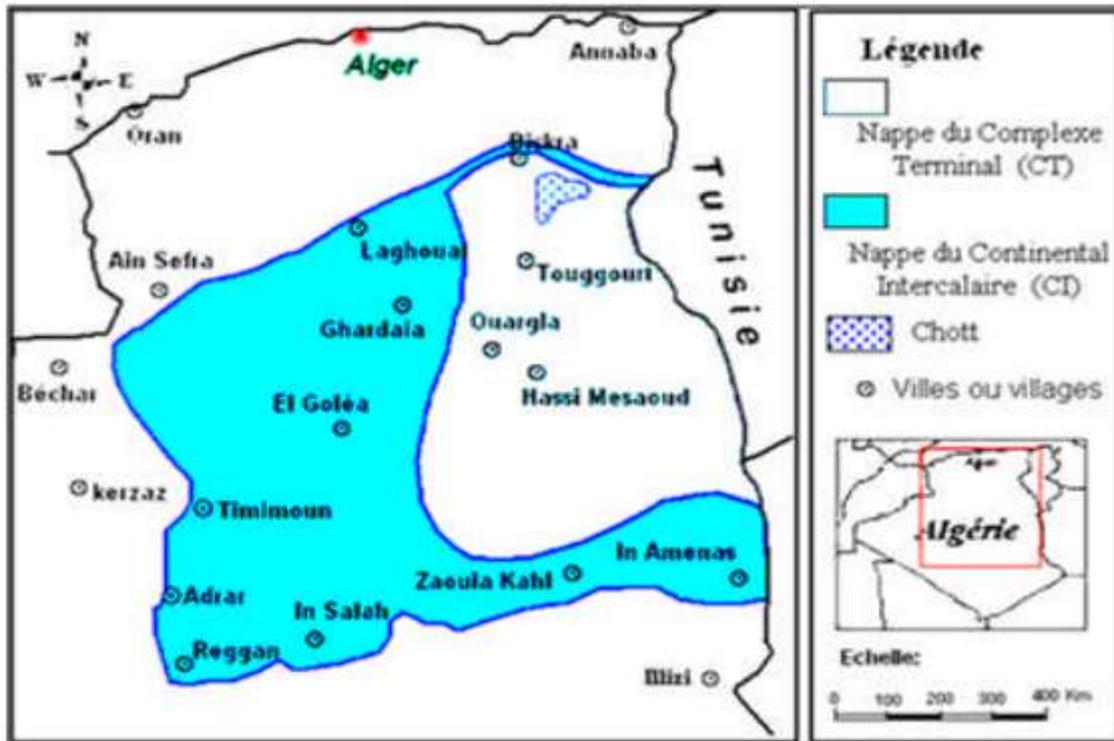


Figure. 13 : limite géographique des systèmes aquifères (CT et CI) (UNESCO, 1972)

4.2 - Continentale intercalaire :

Le «Continental Intercalaire» désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne.
- au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomaniennne.

Il occupe les formations sableuses et argilo gréseuses du Néocomien, Barrémien, Aptien, et de l'Albien (Cornet, 1964; Gouscov, 1952). L'aquifère est continu du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar, et d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen. Le toit de l'aquifère, constitué d'argiles et d'évaporites du cénomanien, est connu sur tout le bassin (UNESCO, 1970) et le débit d'alimentation du Continental intercalaire provenant du piémont de l'Atlas saharien est de 7.7 m³/s, (Ould Baba, 2005)

La profondeur augmente du sud au nord, de 1000 m au bas du Sahara à 2000 m sous les chotts, provoquant ainsi une forte charge de la nappe sur tout le bassin oriental (fig. 14). Le substratum est constitué de formations argilo-sableuses et argileuses ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du sud vers le nord (Guendouz, 1985).

Le Projet (ERESS, 1972), (Levassor, 1975), (Mamou, 1990), (Armines-Enit, 1984), (Srivastava, 1983), (Idrotecneco, 1981), (Gefli, 1978), (Pallas, 1978), (Geomath,

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

1994). L'ensemble de ces travaux a permis de dresser une carte piézométrique « initiale » ou encore peu influencée (fig. 14), à l'échelle de toute la région du SASS (OSS, 2003), met en évidence les zones d'alimentation suivantes :

- le piedmont sud atlasique (au nord-ouest – Laghouat),
- le plateau de tinrhert au sud,
- le plateau du Dahr.

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, Touat et Tidikelt), et l'autre partie s'écoule suivant une direction Ouest-Est vers le golfe de Gabès qui constitue son exutoire naturel. Les eaux en provenance du plateau du Tinrhert s'écoulent vers le nord-est sous l'Erg oriental en direction de l'exutoire tunisien. Sur la région d'El-meita le continentale intercalaire se trouve à de très grande une profondeur et il n'est pas exploité.

Son eau est chaude (57°C), la salinité de cette eau est de l'ordre de 2 g/l et elle est essentiellement utilisée pour l'alimentation et l'excès pour l'irrigation (Zeddouri, 2010).

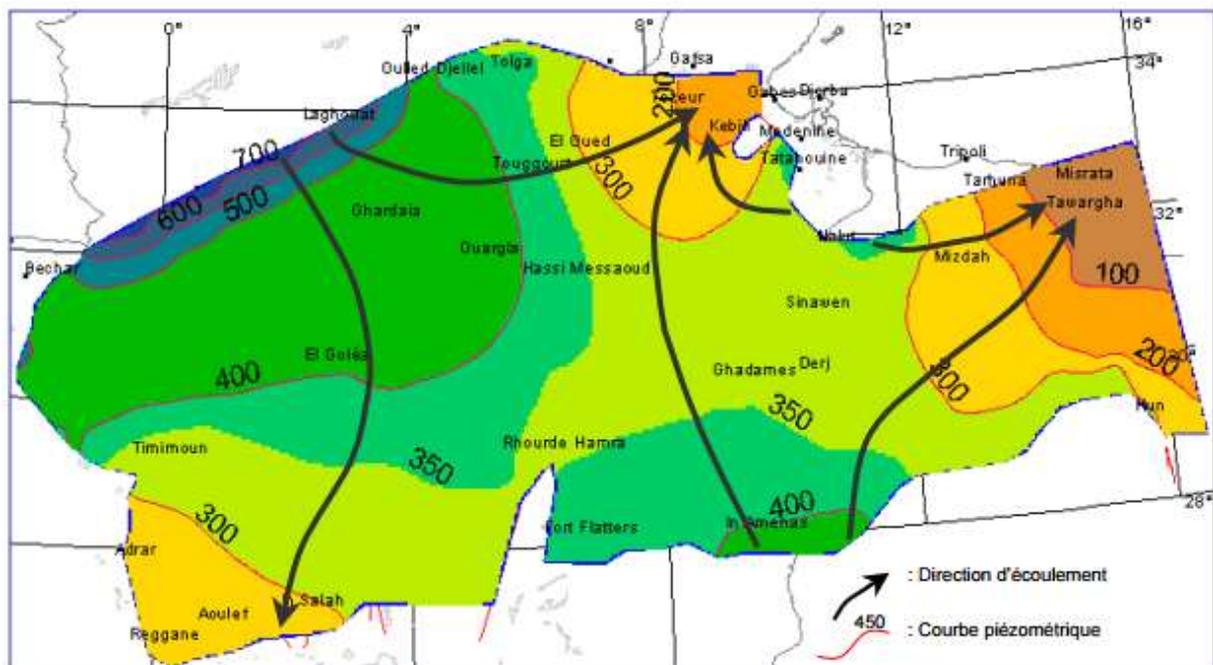


Fig. 14 carte piézométrique de référence du Continentale intercalaire (OSS, 2003)

4.3 - Complexe terminal :

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Le complexe terminal ou continental terminal est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du crétacé supérieur et des épisodes du tertiaire, principalement miocène (**Busson, 1970 ; fabre, 1976**).

Le système aquifère du "Complexe Terminal" couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350 000 km². Le terme de "nappe du Complexe Terminal" qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique. Cette nappe peut circuler essentiellement dans l'une ou encore dans les deux formations litho-stratigraphiques suivantes : (**UNESCO, 1972 ; Guendouz et Moula, 1995**) (**fig. 15**).

- le sénonien et l'Eocène carbonatés.
- le Moi-pliocène sableux.

La profondeur du "CT" est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m.

Le "Complexe Terminal" affleure aux endroits suivants:

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens.
- A l'Est, le long du flanc oriental du Dahar.
- Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït.
- A l'Ouest, sur la dorsale de M'zab

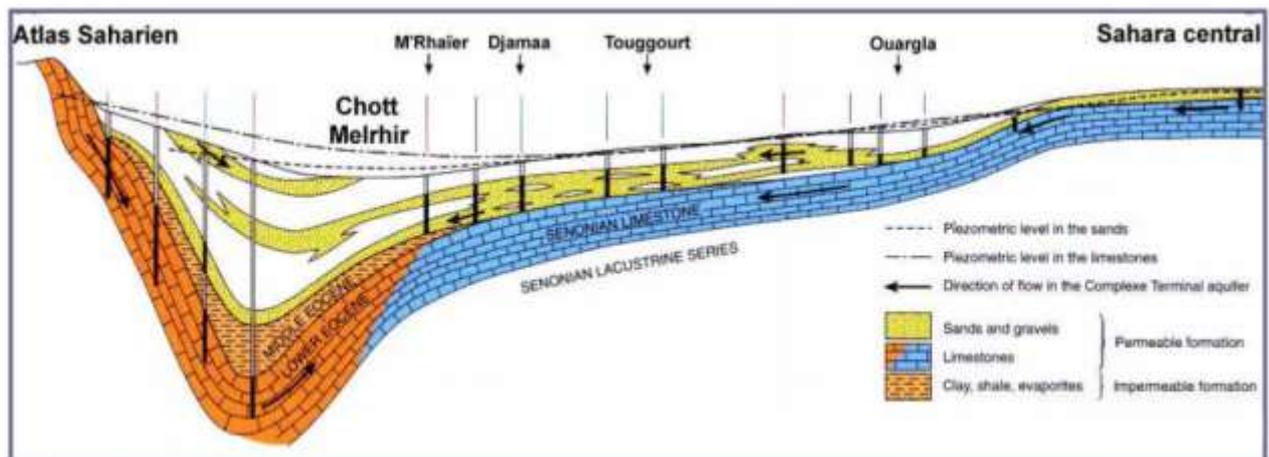


Fig. 15 : coupe hydrogéologique transversale du CT 5 (UNESCO, 1972)

La carte piézométrique de la nappe du complexe terminal établie par OSS en 2003 à partir des études antérieures et de l'étude des ressources en eau du Sahara algérien réalisé par UNESCO en 1972 (**fig. 16**) montre que les axes et les directions d'écoulement des eaux de cette nappe.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

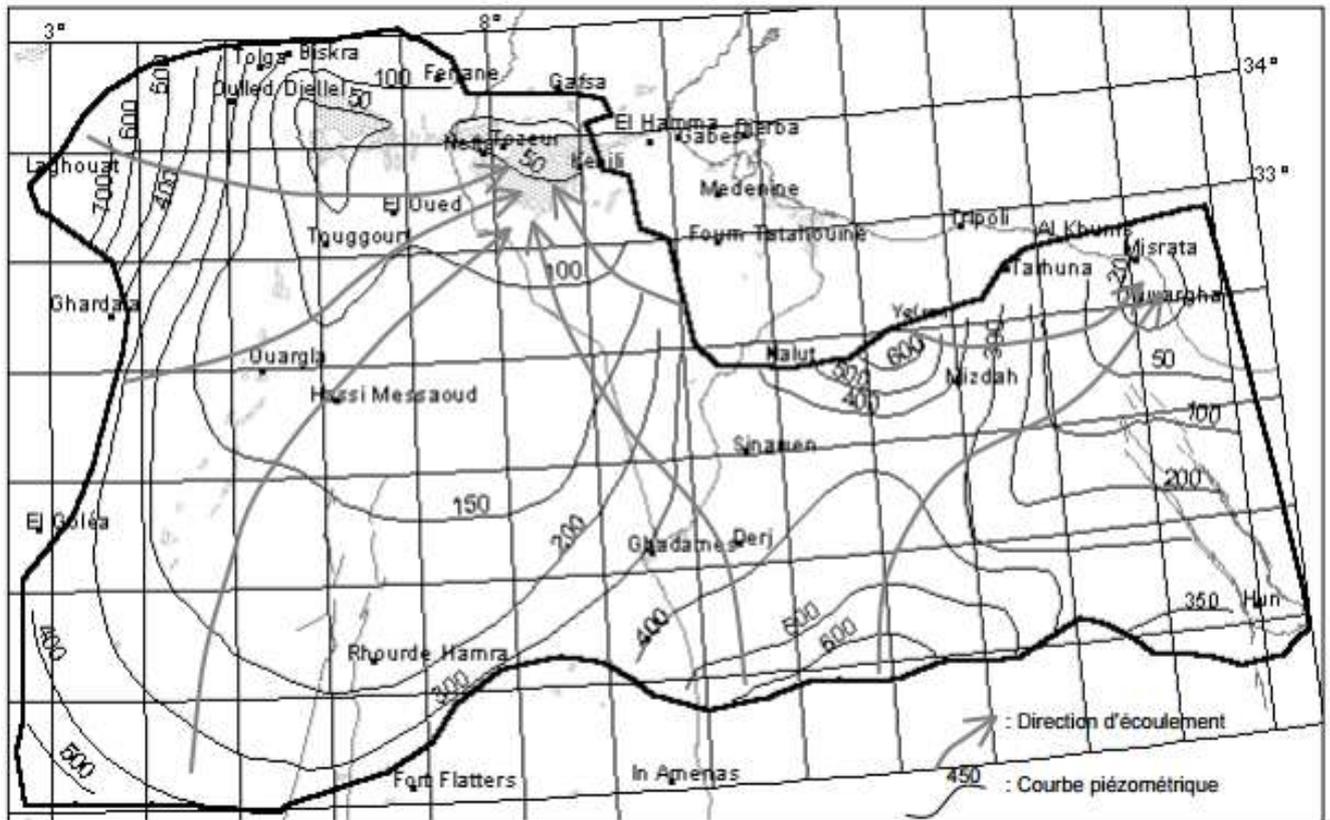


Fig. 16 : carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003)

La nappe peut être alimentée par les zones suivantes :

- à partir de l'atlas saharien : au sud de l'atlas saharien de Biskra en Est jusqu'au frontière tunisienne, soit à travers les flexures sud atlasique ou par l'infiltration des crues des oueds en aval de l'accident atlasique.
- A partir de la dorsale du M'zab, où l'ensemble de l'écoulement converge vers les zones des chotts. Le versant du M'zab joue un rôle important dans l'alimentation de la nappe des sables Mio-pliocène lors du cures exceptionnels.
- L'alimentation à partir du sud au plateau du Tadmaït et Tinrhirt, les eaux s'infiltrent et s'écoulent vers le Nord jusqu'à l'exutoire principale les Chotts Melghir et Merouane.

4.4- le complexe terminal dans la région d'El-Meita :

Les logs litho-stratigraphiques correspondant aux forages montrent au niveau du complexe terminal de la zone sud de Khenchela El-Meita, on a affaire à deux nappes bien distincts séparés par des marnes imperméables mio-pliocènes d'une épaisseur de 25 m au log du forage G12-140 (**fig. 6**) il s'agit :

- D'un premier horizon fait de graviers, sables et argiles a porosité d'interstices correspondant à une nappe généralement libre mais parfois captive. Son épaisseur

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

totale traversée, par exemple au forage G12-140 est de 525m. C'est la nappe Plio-Quaternaire généralement à usage agricole avec un débit moyen de 20 l/s.

- D'un second horizon constitué d'un matériel fait d'argiles et de sables à la base surmonté de conglomérats à ciment gréseux et a passées argilo-sableuses, le sommet étant marneux à petit bancs de calcaires lacustres.

C'est la nappe Moi-pliocène captive dont le sommet a été recoupé sur environ 520 m au forage G12-140 laissant apparaître des marnes et des argiles sableuses.

L'exploitation de la nappe moi-pliocène a débuté au 14^{ème} siècle et puis elle s'est multiplié au 19^{ème} siècle. Le nombre de forages existant à l'heure actuelle est difficile a limité vu le nombre des forages privés non-déclarés (**tab. 3**) :

Tableau. 3 : Répartition de la ressource en eau souterraine

	Nombre	Profondeur (m)	Débit (l/s)	Affectation	Superficie (Ha)
Forages	650	100 – 200	10	Irrigation	6000
Puits	183	10 – 30	01	//	200
Sources	14	-	0.7	//	08

Source DHW Khenchela

L'inventaire ci-dessus concerne uniquement les forages déclarés ou réalisés par les services concernés (DHW –ANRH – DSA – etc...) par contre les forages privés non déclarés sont dix fois plus nombreux et sont localisés principalement dans la partie Sud. On constate donc une surexploitation de la ressource en eau souterraine du sud de la commune, par les forages et par les puits, d'où la nécessité de mettre au point un fichier de tous les points d'eau avec les cartes iso-piézométriques et de calculer les bilans précis pour éviter la surexploitation. Le relief accidenté montagneux au Nord favorise l'accumulation des eaux au sud et se caractérise aussi par l'émergence de sources naturelles à faible débit. Il convient bien sûr de procéder à l'aménagement de ces sources et à leur traitement afin de couvrir les besoins en eau potable des populations et du cheptel.

4.4.1 - étude piézométrique :

Dans le but d'approcher les directions générales d'écoulement des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire, une carte piézométrique (**fig. 17**) synthétique correspondant à l'année 2002 a été établie en se basant sur les hauteurs piézométriques estimées par l'entreprise ENRGOPROJECT.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Les courbes hydro-isohypses relatives à la nappe plio-quadernaire montrent que nous sommes en présence d'une nappe radiale convergence dans l'écoulement générale a lieu du nord-est vers le sud-ouest.

4.4.2 - Alimentation et exutoires :

L'alimentation de la nappe plio-quadernaire a lieu à partir de la surface par infiltration directe des eaux provenant des précipitations et par les différents cours d'eau. L'alimentation de la nappe mio-pliocène quant à elle s'effectue essentiellement à partir du versant sud de l'Atlas saharien ou affleurent les terrains mio-pliocènes.

Les exutoires de la nappe plio-quadernaire sont représenté par les différents pompages aux niveaux des forages et par l'évaporation au niveau des chotts Melghir qui consiste la zone de drainage principale.

Les exutoires du réseau piézométrique de la nappe mio-pliocène sont représenté par les "ponctions" au niveau des forages qui l'atteignent (artésianisme ou pompage)

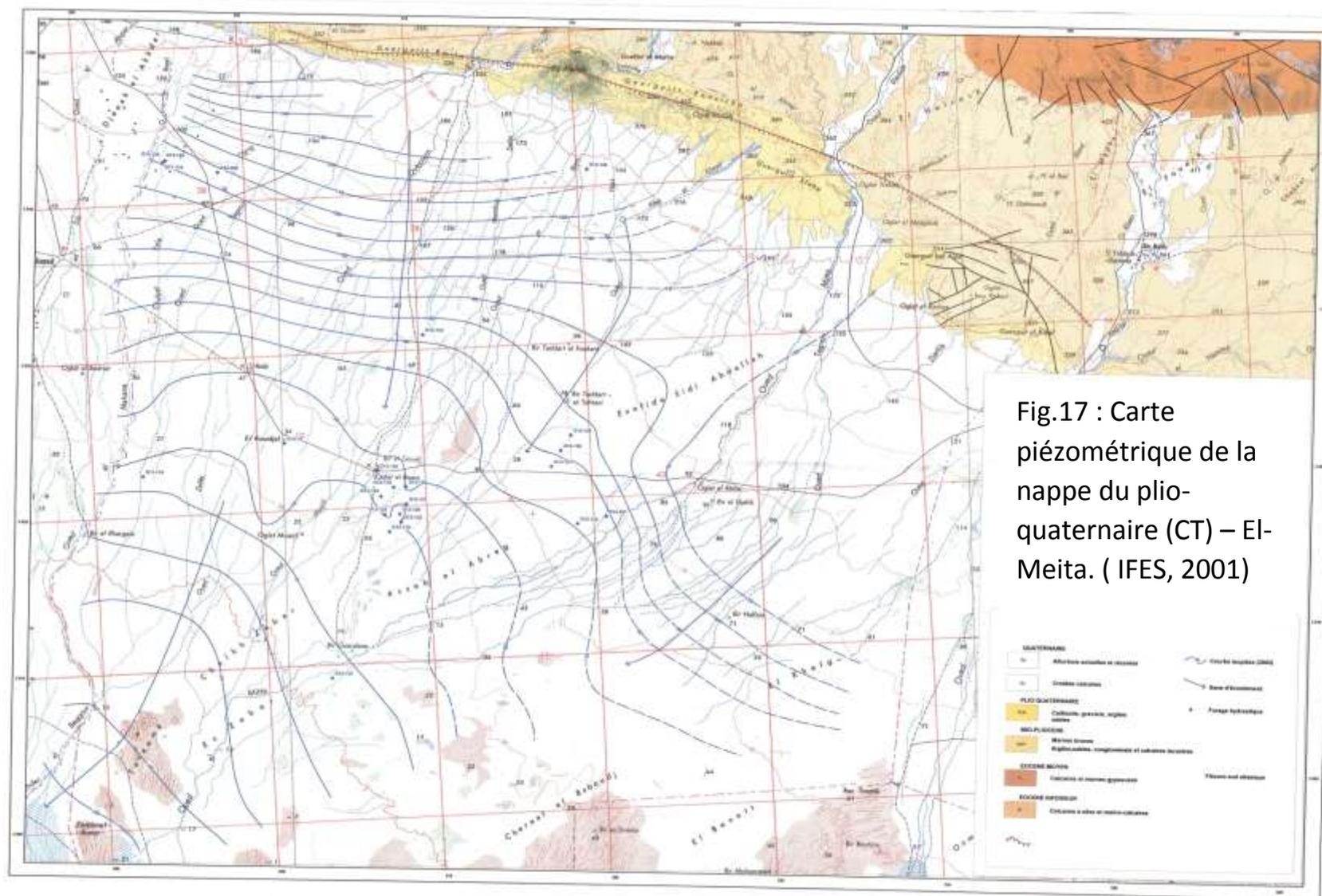


Fig. 17 : Carte piézométrique de la nappe du plio-quaternaire (CT) -EL-meita- (IFES, 2011)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Conclusion :

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) regroupe deux énormes réservoirs d'eaux souterraines ; le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

A l'échelle d'El-Meita les deux réservoirs existent, mais le continental intercalaire est très profond (2000 m a chott Melghir) donc il reste non exploité. Les formations du complexe terminal sont hétérogènes. On compte deux types d'aquifère, la nappe Plio-Quaternaire généralement libre mais parfois captive, elle est surtout à usage agricole avec un débit moyen de 20 l/s avec une épaisseur de 525m. La deuxième nappe est celle du Mio-pliocène captive dont le sommet a été recoupé sur environ 520 m qui reste non-exploitée vue l'existence de la première nappe, la grande profondeur et le cout élevé des forages.

La recharge actuelle du CT peut se réaliser lorsque certaines conditions climatiques (des précipitations exceptionnelles) et infiltration à partir de la flexure sud atlasique. La baisse du niveau piézométrique qui subit cet aquifère est inquiétant, une sensibilisation des paysans et un système de surveillance doivent être effectué.

5- Cadre hydro-climatique :

5.1 – Hydrologie :

La commune de Babar est entièrement inscrite dans le bassin versant n°06 de chott Melghir (**fig. 18**) et les sous bassins versants suivants :

- Sous bassin versant de Oued el Arab
- Sous bassin versant de Oued Ouezzern
- Sous bassin versant de Oued Mezdour Deba
- Sous bassin versant de Oued Elmeita

L'écoulement donc est de type endoréique vers le chott Melghir. Elle est traversée par un réseau hydrographique important, dont les principaux Oueds sont, par sous bassins :

- S.B.V Oued El Arab (150Km) : Oued El Hatiba et ses affluents l'Oued El Abiod et l'Oued el-Arab.

- S.B.V Ouezzern : Oued Ouezzern et ses deux grands affluents: - Oued Ferroudj - Oued Ben derradj.

- S.B.V Oued Mezdour Deba (55 Km) : Oued Mezdour Deba et ses trois principaux affluents: Oued Er R'tim - Oued El Hazz - Oued Aleb el Khezil.

- S.B.V Oued EL Meitta (140Km) : Oued El Meitta et ses trois principaux affluents qui sont : Oued Tagrert - Oued Djellib - Oued Mekloukra.

Au niveau de la commune de Babar, le principal Oued est Oued El Meitta. La commune de Babar n'a bénéficié que d'un seul ouvrage de mobilisation des eaux de surface représenté par la retenue collinaire de Boutride d'une capacité initiale de 25.000m³, réalisée en 1985, mais envasée et elle nécessite donc des travaux de réhabilitation. Il faut signaler que le barrage qui porte le nom de la commune à savoir Babar, se situe en dehors du territoire de la commune et qu'elle ne bénéficie nullement de ses eaux. En effet, d'une capacité totale de 41.3 Hm³ et un volume régularisé de 12 Hm³, il est destiné pour l'irrigation de 750 ha, situés sur les communes de Tamza, Ensigna et Kheirane.

Il existe aussi six (06) prises d'eau établies sur l'Oued El Hatiba avec un débit total de 100 l/s utilisées pour l'irrigation, pendant les périodes de crues, des cultures maraîchères et arboricoles. Toujours concernant les potentialités hydriques surface, on note la présence de 14 sources naturelles débitant au total 10l/s (soit un débit très faible par source de 0.72 l/s). Elles sont destinées à l'irrigation (maraîchages et Arboriculture) et à l'abreuvement du cheptel.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Afin de mettre en valeur ces Oueds, plusieurs sites peuvent être retenus pour l'implantation de retenues collinaires ou barrages permettant la mobilisation de quantité d'eau appréciable durant les périodes de crues. Deux sites sont proposés: Sur l'Oued Ouzzern : $x = 891.200$ $y = 171.000$ et Sur l'Oued El-Meita : $x = 914.300$ $y = 162.800$.

5.2 - Cadre climatique :

5.2.1 - Introduction :

Les paramètres hydro-climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères. La zone d'étude appartient au grand bassin de chott Melghir, qui fait partie du système aquifère du Sahara septentrionale (SASS) et il est caractérisé par un climat aride. L'aridité s'exprime non seulement par les températures élevées en été et par la pénurie des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air et qui pose un grand problème à l'agriculture dans la région.

5.2.2 - Climat de l'Algérie :

Les pays nord africains connaissent déjà les effets dramatiques du changement climatique, qui risque d'entraîner des vagues de chaleur plus longues et plus étendues si aucune mesure n'est prise pour le diminuer, rendant certaines régions invivables et certains sols impropres à l'agriculture. L'effet d'îlot thermique sera ressenti de plus en plus nettement dans la région du Sahara septentrionale, et la plupart des grandes villes du sud qui pourraient connaître des vagues de chaleur d'une durée de 4 mois en moyenne. Cette hausse des températures exercera une pression intense sur les cultures et des ressources en eau déjà rares, deux phénomènes qui pourraient accroître les migrations et les risques de conflit.

En Algérie, au nord le climat est typiquement méditerranéen. Les étés sont chauds et secs, les hivers doux et humides (400 mm à 1 000 mm de pluie par an). Les températures moyennes (25 °C en août et 12 °C en janvier à Alger) varient en fonction de l'altitude (**fig. 19**).

En été, le sirocco, un vent extrêmement chaud et sec, souffle du Sahara. Sur les Hauts Plateaux et dans l'Atlas saharien, les précipitations sont peu abondantes (200 mm à 400 mm par an). Dans le Sahara qui présente notre région, elles sont inférieures à 130 mm par an. L'amplitude thermique y est très importante (de 49 °C le jour à moins de 10 °C la nuit). L'aridité du climat est accentuée par des vents de sable parfois très violents.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Sur la (**fig. 19**) nous voyons clairement les différents climats qui caractérisent le nord de l'Algérie. Des climats influencés par la situation géographique par rapport à la mer, aux hauts plateaux, à l'atlas saharien et au Sahara. Les précipitations variées de 80 à 1800 mm/an.

5.2.3 - Climat de la région :

Il convient de signaler au préalable l'inexistence de station climatique dans le sud de la ville de Khenchela. Du fait que la commune s'étend sur une grande surface, du Nord de la wilaya, Jusqu'au sud (limite avec la wilaya d'oued).

Il a été fait référence à la station météorologique professionnelle du réseau O.N.M, station de Biskra suivant une période de mesures de **11 ans** entre **2003** à **2013**, cette station est la plus proche à notre aire d'étude et caractérisée par les mêmes conditions géographique que celles de la région étudiée (**tab. 4**) .

a) le régime pluviométrique :

La pluviosité est défini, comme étant le facteur primordial qui permet de déterminer le type du climat. Elle conditionne le maintien et la répartition du tapis végétal, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosions d'une part, elle a un rôle social et économique d'autre part. (**Djebaili., 1984**).

Les précipitations exercent une action prépondérante pour la définition de la sécheresse globale du climat et joue un rôle prépondérant dans l'hydrochimie par le lessivage des terrains. Plus la pluviométrie est forte, plus la dilution des sels restant passant en solution est grande.

L'étude climatologique est une importance non négligeable, car elle permet d'analyser des facteurs importants comme la température et les précipitations qui conditionnent le bilan hydrologique et la recharge des aquifères.

Les précipitations annuelles n'ont qu'une valeur indicatrice, le plus important c'est leur répartition mensuelle et saisonnière. Les pluviométries mensuelles (**fig. 20**) montrent la répartition des hauteurs moyennes sur la période (2003-2013).

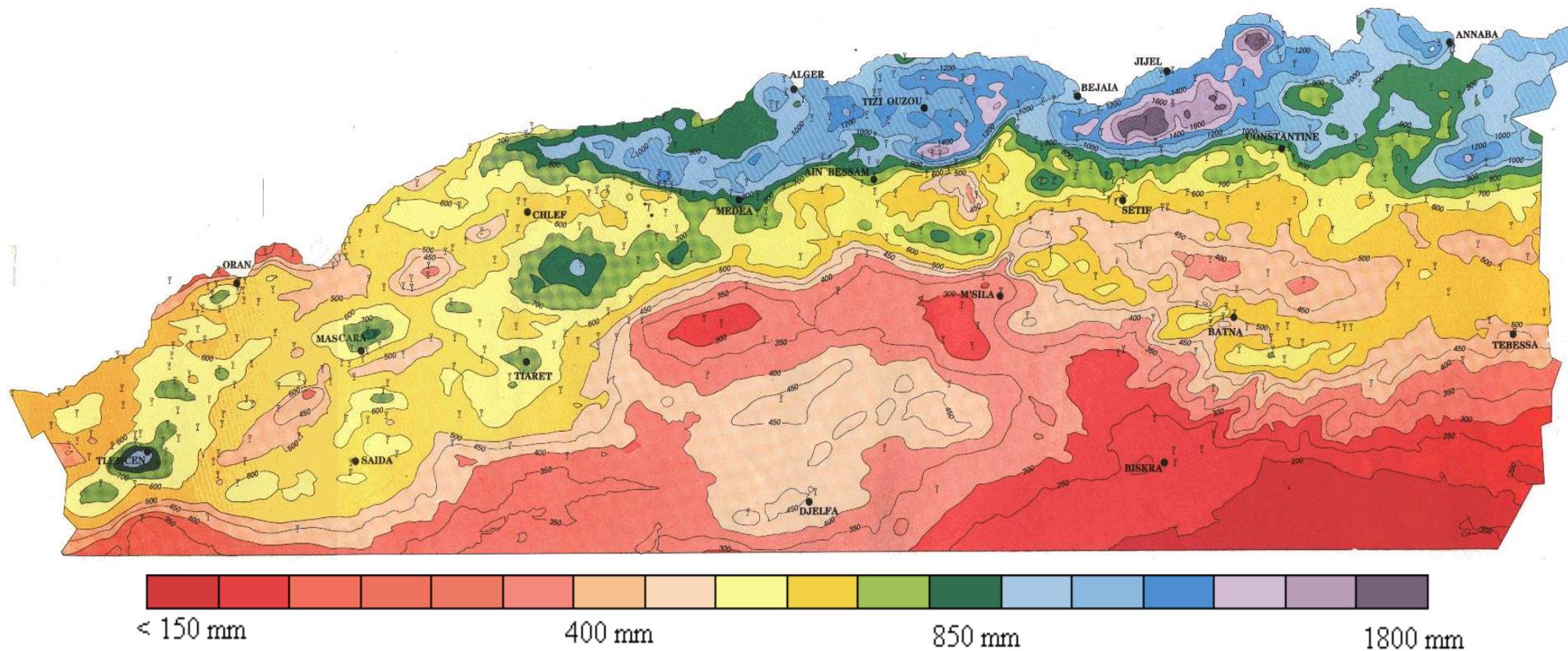


Figure 19 : carte pluviométrique pour l'Algérie du nord (ANRH, 1993)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Tableau 4 : données climatiques moyenne mensuelles de la station de Biskra (2003-2013)

Mois	Moy m °C	Moy M °C	Moy °C	P (mm)	V (km/h)	H%
Janvier	6.79	17.56	11.89	19.40	12.96	55.54
Février	7.59	18.61	12.96	7.23	14.30	48.95
Mars	11.27	23.14	17.32	25.79	16.02	42.85
Avril	15.10	27.38	21.49	18.73	18.52	39.04
Mai	19.63	32.37	26.27	12.10	17.51	33.05
Juin	24.60	37.83	31.65	7.71	14.23	28.03
Juillet	28.19	41.52	35.22	0.92	11.73	25.18
Aout	27.82	40.54	34.26	3.00	11.00	28.45
Septembre	23.01	34.61	28.89	15.29	11.49	39.60
Octobre	18.33	29.55	23.91	26.81	10.47	46.20
Novembre	12.25	32.09	17.32	15.54	11.32	53.11
Décembre	7.77	17.70	12.39	12.15	12.44	59.04
Moyenne	16.86	28.66	22.80	164.7	13.49	41.59

Sur une période de 11 ans (2003-2013), on a calculé la moyenne annuelle des précipitations, elle est de l'ordre de 164,7 mm/an. On a remarqué que les mois le plus pluvieux sont Octobre 26,81 mm et janvier 19,40 mm et ceux les plus secs sont juillet et aout avec des précipitations inférieur à 5 mm.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

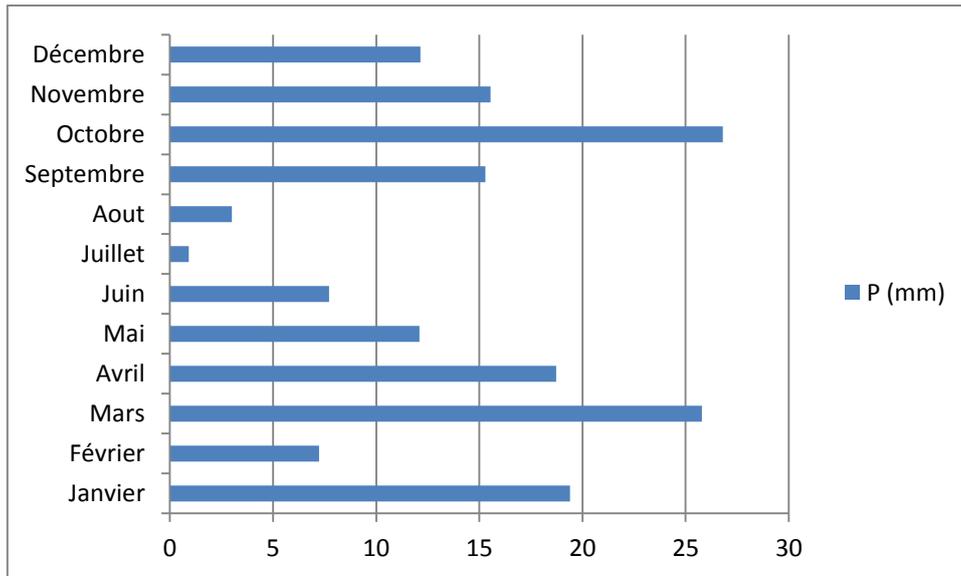


Fig. 20 variations des précipitations moyennes mensuelles (station biskra 2003-2013)

On remarque une grande irrégularité des précipitations ; faible pendant l'hiver et presque nulle en été. Leur provenance en hiver est due aux dépressions accompagnants la migration vers le sud des fronts polaires, en été elles sont dues aux dépressions de mousson, alors que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont dues aux dépressions Soudano-sahariennes du sud vers le nord. **(Dubief, 1963. Zeddouri, 2010)**

b) le régime thermique :

La température représente un facteur limitant de toute première importance car, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère **(Ramade, 2002)**. Pour la caractérisation de ce paramètre il faut connaître plusieurs variables: la moyenne des maxima (M), la moyenne des minima (m) la moyenne mensuelle $(M+m)/2$ et l'amplitude thermique $(M-m)$.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

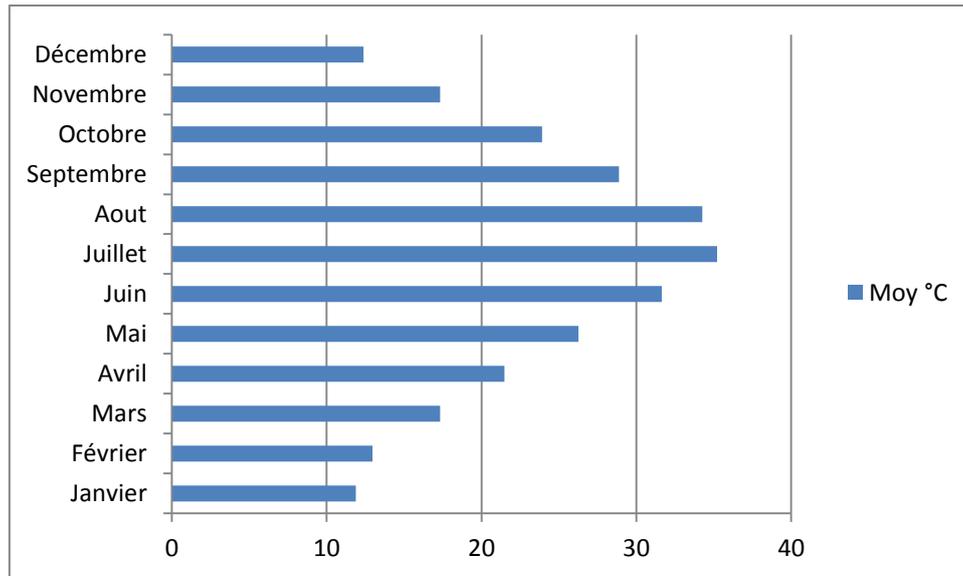


Fig. 21 variations des températures moyennes mensuelles (station biskra 2003-2013)

La courbe des variations des températures moyennes mensuelles (**Fig. 21**) montre que le mois de Janvier est le mois le plus froid avec **11.89 °C** et le mois de Juillet est le plus chaud avec **35.22 °C**, la moyenne annuelle de température est de **22,8 °C**.

La grande amplitude thermique entre le mois le plus chaud et celui plus froid (**23.33 °C**), cela montre que la région d'El-meita a un hiver doux et un été très chaud.

c) L'humidité :

L'humidité est la vapeur d'eau contenue dans l'air. Dans notre atmosphère, l'eau est omniprésente (même dans les déserts arides, il y a de l'humidité). L'air qui nous entoure renferme toujours une proportion d'eau sous forme de vapeur ; on qualifie cet air "d'air humide". En météorologie, il est important de connaître le taux d'humidité dans l'air : il nous renseigne sur la possibilité de formation de nuages et de précipitations.

Dans les études climatiques on utilise généralement l'humidité relative (ou le degré hydrométrique) exprimée le plus souvent en %, est une mesure du rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air et la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air à une température et une pression données.

Les données de l'humidité moyenne mensuelle durant la période (**2003-2013**) sont représentées sur (**fig. 22**).

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

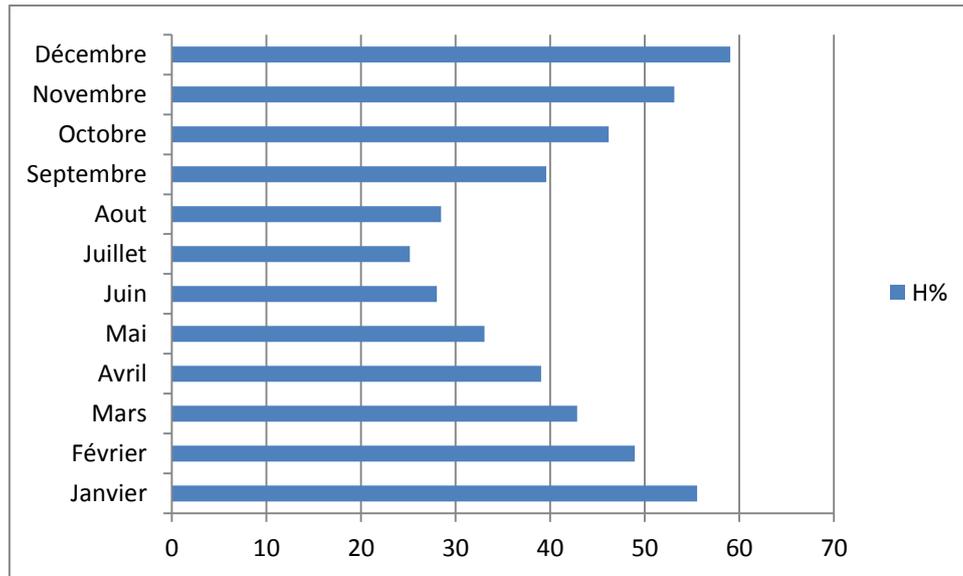


Fig. 22 variations de l'humidité moyenne mensuelle (station biskra 2003-2013)

Les valeurs de l'humidité enregistrées montrent que l'humidité a une variation inversement proportionnelle à la température car on observe des valeurs maximales pendant la période d'octobre à janvier et des valeurs très faibles entre juin et aout. Donc on peut dire que l'humidité dépend de la température et l'insolation. L'humidité moyenne annuelle est de l'ordre de 41.59%.

d) Le vent :

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux de l'évapotranspiration et par conséquent le climat de la région. (Fekrachi, 2015).

On remarque que les vents les plus forts se produisent durant les mois mars, avril et mai avec un maximum de 18,52 km/h en avril (fig. 23), les plus faibles sont enregistrés entre aout et octobre avec un minimum de 10,47 km/h en mois d'octobre. Usuellement, les vents sont de provenance sud-nord avec une vitesse moyenne annuelle de 13,49 km/h.

Il a noté qu'il existe un type de vent spécifique à cette région le sirocco, un vent sec et poussiéreux provenant du Sahara vers le nord le plateau saharien favorisant l'érosion éolienne.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

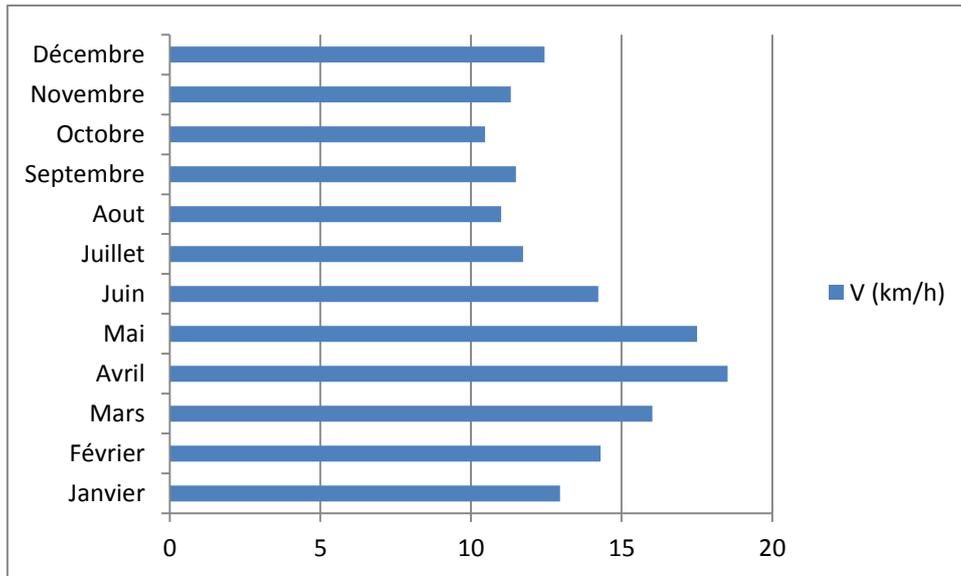


Fig. 23 variations de la vitesse moyenne mensuelle du vent (station Biskra 2003-2013)

5.2.4 - Synthèse climatique :

a) - la méthode d’Euverte :

Cette méthode est basée sur le rapport des précipitations sur les températures mensuelles et qui permet de définir quatre types de régimes.

- Un régime très sec avec : $P/T < 1$
- Un régime sec avec : $1 < P/T < 2$
- Un régime subhumide avec : $2 < P/T < 3$
- Un régime humide avec : $P/T > 3$.

Tableau. 5 : méthode d’Euverte période 2003 – 2013 station de biskra

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P(mm)	19,4	7,23	25,7	18,7	12,1	7,71	0,92	3	15,2	26,8	15,5	12,1
T (C°)	11,8	12,9	17,3	21,4	26,2	31,6	35,2	34,2	28,8	23,9	17,3	12,3
P/T	1,63	0,55	1,49	0,87	0,46	0,24	0,02	0,08	0,52	1,12	0,89	0,98

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Le rapport P/T de la méthode d'Euverte appliquée dans le tableau (**Tab. 5**) ; montre que le régime de la zone sud de Khenchela est très sec $P/T < 1$ entre avril et septembre et sec entre octobre et mars.

b) - Indice d'aridité de DE Martonne 1926 :

Il est calculé à partir des moyennes des précipitations et des températures. Déterminer par l'équation suivante :

Indice d'aridité annuelle : $A = \frac{P}{T+10}$

Indice d'aridité mensuelle : $a = \frac{12.p}{t+10}$

P : total des précipitations annuelles (mm)

p : total des précipitations mensuelles (mm)

T : température moyennes annuelles (C°)

t : températures moyennes mensuelles (C°)

Tableau. 6 : Les indices d'aridité de De Martonne de la station Biskra (2003-2013)

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	annuel
P(mm)	19,4	7,23	25,79	18,73	12,1	7,71	0,92	3	15,29	26,81	15,54	12,15	164,7
T (C°)	11,89	12,96	17,32	21,49	26,27	31,65	35,22	34,26	28,89	23,91	17,32	12,39	22,8
Indice d'aridité	10,63	3,78	11,32	7,13	4	2,22	0,24	0,81	4,47	9,48	6,82	6,51	5,02

Les valeurs sont d'autant plus faibles que le climat est aride (**Tab. 6**). Un indice supérieur à 20 indique un climat humide, la tendance à la sécheresse s'affirme entre 10 et 20 et en dessous de 10 c'est l'aridité (**Fekrache, 2015**). L'indice d'aridité mensuelle de De Martonne de notre région varié entre 0,25 et 11,32 indiquant que l'aridité est très forte et s'étale sur toute l'année à l'exception de janvier et mars. L'indice d'aridité annuelle (A) est de 5,02 ce qui correspond à un climat aride.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

c) Climagramme d'Emberger :

Afin de déterminer l'étage bioclimatique de la région d' El-Meita, nous avons calculé le quotient pluviométrique d'Emberger (**Q**) avec des données climatiques calculées durant la période 2003 - 2013.

Le quotient pluvio-thermique d'Emberger est déterminé selon la formule suivante (**Stewart, 1968**):

$$Q = 3,43 \frac{P}{M - m}$$

Q : quotient pluviométrique

P : pluviométrie annuelle (mm)

M : moyenne maximale du mois le plus chaud (°C)

m : moyenne minimale du mois le plus froid (°C).

D'après les données climatiques de notre région nous avons :

La pluviométrie annuelle **P** = 164,7 mm.

La moyenne maximale du mois le plus chaud **M** = 35,22 °C.

La moyenne minimale du mois le plus froid **m** = 11,89 °C.

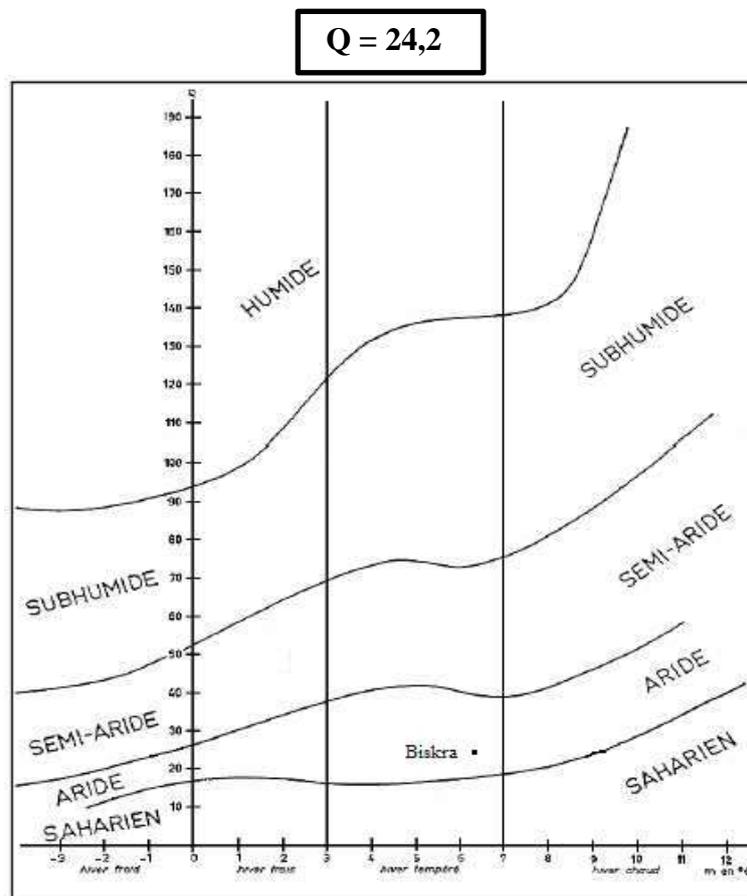


Figure 24. : Climagramme d'Emberger pour la station de Biskra (2003-2013)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Le diagramme d'Emberger a montré que la région étudiée appartient à l'étage bioclimatique aride inférieur avec un hiver tempéré. (Fig. 25)

5.2.5 - Bilan hydrique :

Le bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition entre les différentes composantes du bilan hydrique : l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

L'établissement du bilan hydrique nous permet de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, Déficit agricole, Excédent) qui nous aide à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface. Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement. Dès que, la RFU diminue, il y a un épuisement du stock au point où la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA).

a) Evapotranspiration potentielle :

L'évapotranspiration correspond à la somme de la quantité d'eau évaporée par suite d'un déficit hydrométrique de l'air et de la quantité d'eau transpirée par la végétation. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour le calcul de ce paramètre.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle il existe plusieurs méthodes (méthode de Turc, méthode de Sarlin et méthode de penman). Pour notre cas, nous allons utiliser la formule de Thornthwaite.

• Formule de Thornthwaite :

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, température (T°C), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i)) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation ci-dessus.:

$$ETP = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^a \quad - \quad ETP_{\text{corrigée}} = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^a \times K$$

Avec :

I : indice thermique annuel: $I = \sum i$

i : indice thermique mensuel : $i = (T/5)1.514$

T : température moyenne mensuelle en (°C).

a : coefficient, tel que : $a = 0.016.I + 0.5$.

K : coefficient d'ajustement mensuel.

b) Evapotranspiration réelle :

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évapotranspiration et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitation. Trois cas peuvent se présenter :

1- $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

2- $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.

3- $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$.

c) Réserve facilement utilisable :

La RFU est la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique et qui est facilement utilisable par les plantes, pour son bon fonctionnement physiologique. Richard en 1979 a proposé une formule pour le calcul de la RFU, dans la partie Nord- Est de l'Algérie qui est la suivante:

$$RFU = \frac{1}{3} D_a H_e P$$

Avec :

RFU: réserve facilement utilisable en (mm).

P: Profondeur de la terre parcourue par les racines en (m) (notre cas $p = 0.3m$)

Da: densité apparente du sol, (Hallaire propose de prendre $D = 0,9$).

He: Capacité de rétention :

He = 5 % pour un sol sablo limoneux

He= 10 % pour un sol limoneux

He=20 % pour un sol argilo limoneux

Pour notre cas et vu la nature du sol, on a adopté le dernier cas

He = 20 % soit He = 0,2 %

Le RFU calculé pour notre région est négligeable il avoisine le 0 dans tous les mois.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Le bilan hydrique de la région sud de Khenchela est déficitaire (**tab. 7**), l'ETP atteint son maximum entre juin et août les mois les plus chauds de l'année le RFU est négligeable vu la faiblesse des précipitations. Un déficit agricole de 100 mm par an remarque l'étude climatique de cette région.

Tableau 7 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W Thornthwaite de la station de Biskra 2003-2013

Mois	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	totale
T °C	28,89	23,91	17,32	12,39	11,89	12,96	17,32	21,49	26,27	31,65	35,22	34,26	22,8
I	14,09	9,99	6,17	4	3,55	4,58	6,42	8,48	11,91	15,82	18,25	17,87	121,14
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP (mm)	133,3	84,0	38,2	16,9	15,2	18,8	38,2	64,7	105,7	166,6	216,3	202,1	1100,7
ETP c (mm)	137,3	81,5	32,9	14,3	13,3	16,0	39,4	70,6	127,9	201,6	266,0	234,5	1235,8
P (mm)	15,29	26,81	15,54	12,15	19,4	7,23	25,79	18,73	12,1	7,71	0,92	3	164,7
ETR (mm)	15,29	26,81	15,54	12,15	13,3	7,23	25,79	18,7	12,1	7,71	0,92	3	158,6
RFU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DA	122,1	54,7	17,3	2,2	0	8,8	13,6	51,8	115,8	193,9	265,1	231,5	101,5

Conclusion :

La zone d'étude appartient au bassin versant de chott Melghir au sud de l'atlas saharien, la station météorologique la plus représentative de la région est celle de Biskra.

Le climat de la région est de type aride connu par les faibles précipitations et les températures élevées surtout pendant l'été, qui produisent des amplitudes thermiques très grandes.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

La moyenne annuelle des précipitations, elle est de l'ordre de 164,7 mm/an. On a remarqué que les mois le plus pluvieux sont Octobre 26,81 mm et janvier 19,40 mm et ceux les plus secs sont juillet et aout avec des précipitations inférieur à 5 mm.

La température est très élevée en été, avec des moyennes mensuelles entre 31,65 et 28,89 °C entre les mois de juin à septembre et un maximum de 35,22 °C au mois de juillet.

Les températures les plus faibles sont pour les mois de janvier et février avec respectivement 11,89 et 12,96 °C.

L'humidité de la région dépend principalement de la température et l'insolation.

L'humidité moyenne annuelle est de l'ordre de 41.59%.

Usuellement, les vents sont de provenance sud-nord avec une vitesse moyenne annuelle de 13,49 km/h, les vents les plus forts se produisent durant les mois mars, avril et mai avec un maximum de 18,52 km/h en avril. La région est marquée par les siroccos provenant du Sahara vers le nord.

Le diagramme ombrothermique montre que la saison sèche domine pendant toute l'année dans la zone sud de Khenchela. Ainsi que L'indice d'aridité annuelle de De Martonne (A) est de l'ordre de 5,02 ce qui correspond à un climat aride.

Le climagramme d'Emberger place la région d'El-Meita à l'étage bioclimatique aride inférieur avec un hiver tempéré. La région appartient à un climat aride avec été très chaud et hiver chaud avec des précipitations très faibles et irrégulières. Le bilan hydrique de la région est déficitaire.

Chapitre II :

Matériel et

Méthodes

Introduction

Pour étudier la plaine d'El-Meita, nous avons effectué des sorties de reconnaissance du site au cours desquelles nous avons sélectionné les points à étudier, ces dernières sont choisies de manière à représenter fidèlement la plaine (**fig. 25**). Une campagne de prélèvement des échantillons a été effectuée le mois de Avril 2016 et elle consiste à prélever des échantillons d'eaux et parallèlement aux prélèvements, des mesures physico-chimiques ont été effectuées in situ (la température (T), le pH, la conductivité électrique (CE)), pour les cations (Ca, Mg, Na, K), les anions (Cl, SO₄, HCO₃, NO₂, NO₃) et les métaux lourds (Zn, Cu, Cd, Pb, Hg), les analyses ont été effectuées au laboratoire d'Analyse Environnementales et d'Essais Chimiques sur les Matériaux (Ain M'Lila) et le Laboratoire de l'université Abbes Laghrour Khenchela. Les analyses isotopiques (O₁₈ et deutérium) sont établies au centre de la recherche nucléaire d'Alger (CRNA).

1. Méthodologie

La méthodologie suivie est les visites d'observation de la zone d'étude entre janvier et avril 2015, elle consiste en missions de terrains, travaux de laboratoires, traitement et analyse des données recueillies avec notamment des logiciels appropriés (Diagramme, Excel, Xlstat, Arcmap).

1.1. Missions de terrain

d) Mission de reconnaissance

La reconnaissance de la plaine a été effectuée en début 2015, elle nous a permis de délimiter la zone d'étude dans l'espace, de choisir les points de prélèvements des échantillons d'eau, les limites de la zone d'étude sont les limites administratives de la plaine.

e) Prélèvement de l'eau

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.).

Le mode de prélèvement variera suivant l'origine de l'eau.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

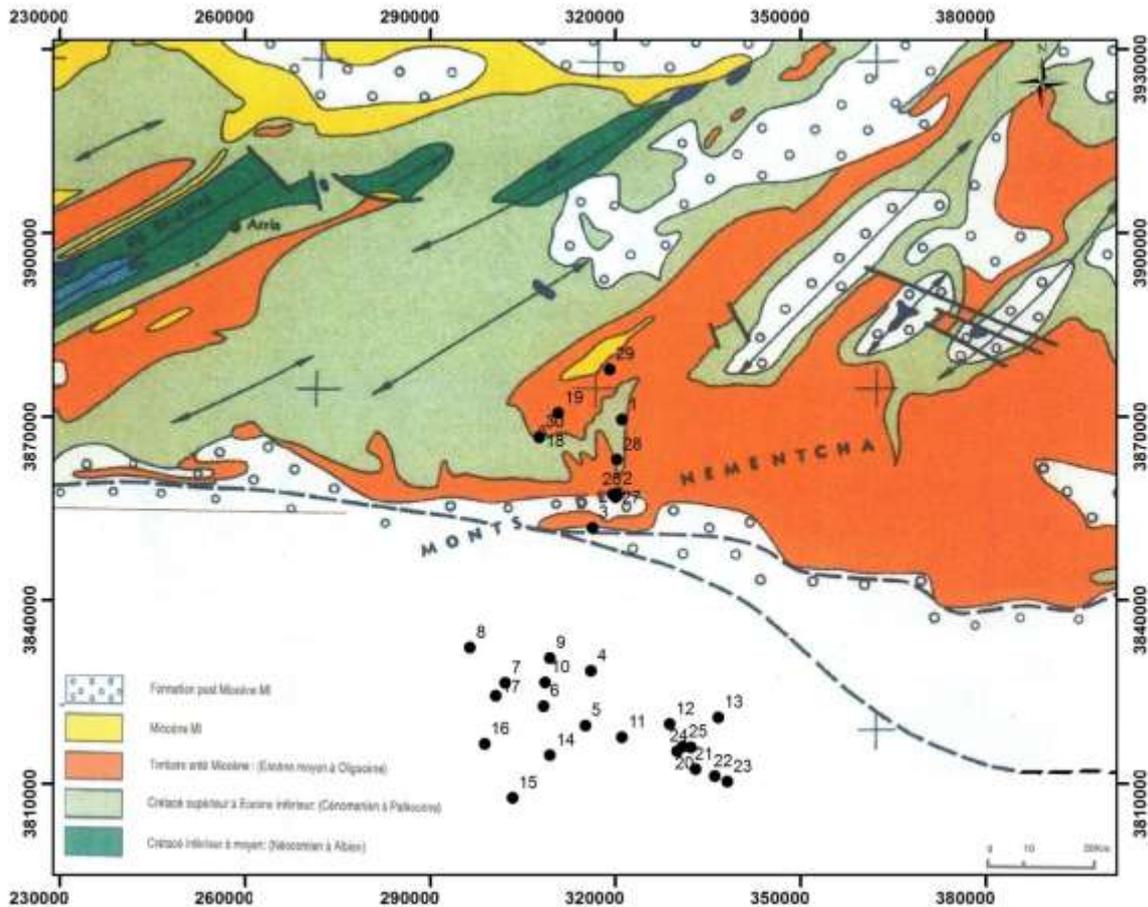


Figure 25 : Positions des points prélevés (carte géologique)

- Dans le cas d'une eau souterraine, deux cas très différents peuvent se présenter. S'il s'agit d'un captage ou d'un puits équipé d'une pompe, les prélèvements se situeront normalement au terme d'une épreuve de pompage ininterrompue d'une durée totale de l'ordre de 30 heures ou, tout au moins à la fin de la dernière journée d'une série de trois journées consécutives de pompage de 10 heures. S'il s'agit d'une source non aménagée, effectuer le prélèvement au trop plein, sinon il convient de procéder à un aménagement provisoire.
- Dans le cas du prélèvement à partir d'un robinet, il sera indispensable de faire couler l'eau pendant un certain temps (10 mn au moins) (**fig. 26**).

Les porte-échantillons sont des bouteilles en plastique, d'un demi litre de volume. Elles sont rincées trois fois avec de l'eau distillée et une fois avec l'eau prélevée avant les prélèvements. Les échantillons ainsi prélevés sont conditionnés dans un lieu à l'abri de la lumière et à une basse température. Pour cela nous avons effectué les prélèvements en profondeur et en utilisant des bouteilles en plastique (0,5L) afin d'éliminer toute interaction entre la matière et l'échantillon. En ce qui concerne la conservation des

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

échantillons nous avons utilisé une glacière gardant la température à 4°C et les analyses physico-chimiques ont été effectuées dans les premières 24 heures au laboratoire et cela pour ne pas altérer l'échantillon.



Figure 26 : techniques du prélèvement de l'eau

f) Mesure in situ :

A chaque campagne d'échantillonnage, des mesures physico-chimiques ont été effectuées, il s'agit de la température, du pH et de la conductivité électrique, le total des solides dissous (TDS) et la salinité, ont été mesurés à l'aide d'un multi-paramètre de type « CONSORT C931 ».

- **Mesure de la température T (°C)**

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissolution des sels dissous donc sur la conductivité, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc. (Rodier, 1996)

- **Mesure de potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est l'une des mesures que l'on doit effectuer le plus fréquemment, il est relié à la teneur en ions H⁺ et aussi à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

- **Mesure de la conductivité électrique (CE)**

La mesure de la conductivité électrique, est probablement l'une des plus simples et plus importantes pour le contrôle de la qualité des eaux. Valeur inverse de la résistivité, paramètre très largement utilisé en hydrochimie, la conductivité est fonction de la concentration en espèces ionisés, principalement de nature minérale.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

• Mesure du Total des Solides Dissous (TDS) et la salinité (SAL)

- **TDS** : signifie total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques.
- **La salinité** : Théoriquement, la salinité désigne la masse totale de substances solides dissoutes dans un kilogramme d'eau, ainsi selon Sorensen (1902), la salinité est définie comme la masse exprimée en grammes des composés solides contenus dans un kilogramme d'eau. La salinité était alors notée « S » et s'exprimait en g/kg ou en %.

2. Etude des processus hydrogéochimiques :

2.1. L'étude hydrochimique et isotopiques des eaux de la région :

2.1.1 Faciès chimique des eaux de la nappe :

L'interprétation des analyses chimiques reposent sur plusieurs logiciels d'analyse :

- la cartographie hydro-chimiques pour illustrer le faciès chimique des eaux et remonter leur origine. Cette représentation utilise des diagrammes puisés dans le logiciel qui s'appelle **DIAGRAMME** initié par le docteur Roland SIMMLER du laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon.

Le recours à des diagrammes et graphiques divers est donc assez fréquent et utile en hydrochimie.

b) - Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper (**fig. 27**) permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux.

Il est composé de deux triangles équilatéraux à la base surmontés d'un losange au milieu permettant de représenter le faciès hydro-chimiques des eaux par rapport à la concentration relatives des cations et des anions (**PIPER, 1953**). Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons. (**Valles, 2007**).

b)- Diagramme de Schoëller et Berkloff

Le diagramme de Schoëller et Berkloff (**fig. 28**) permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.



Figure 27 : Diagramme de Piper

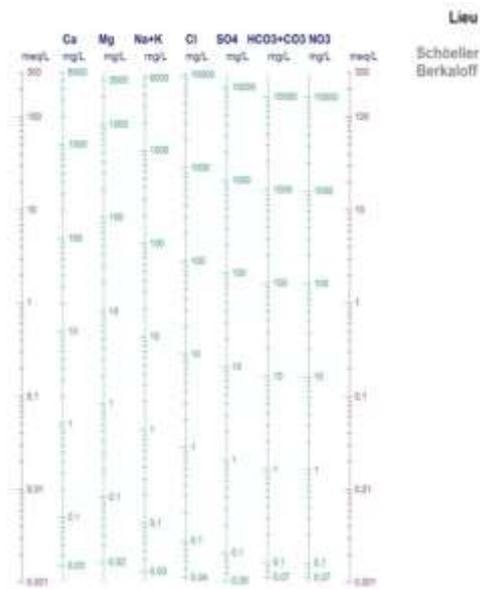


Figure 28 : Diagramme de Schoëller et Berkaloïf

Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

Il est ainsi possible de visualiser le faciès chimique, comme pour le diagramme de Piper, mais aussi la minéralisation de l'eau, ce qui est appréciable. Toutefois, la visualisation du faciès est moins aisée qu'avec le diagramme de Piper. (Valles, 2007)

2.1.2 Les diagrammes binaires :

La représentation des concentrations en éléments majeurs sous forme de diagrammes binaires peut faire apparaître plusieurs éléments utiles pour l'identification des sources de salinité.

Ces genres de diagrammes permettent de visualiser l'évolution des teneurs en cations et anions majeurs en fonction des teneurs en chlore considéré comme élément conservatif. Les axes du graphique représentent les teneurs élémentaires souvent exprimées en mg/l. Cette approche permet d'illustrer plusieurs phénomènes géochimiques ayant lieu au sein de sebkha (zone fermée). Les cations et anions majeurs reflètent alors les interactions des eaux salines

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

avec les formations géologique d'entourage et encaissante pour la nappe phréatique (échanges ioniques, dissolution, précipitation, sorption). (Lamini, 2012)

2.1.3 Indice d'échange de base (i e b) :

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants (Scheller, 1943). L'eau au cours de son séjour souterrain entre en relation avec différentes substances ayant la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenues dans les eaux ; parmi ces substances nous avons les minéraux, l'hydroxyde ferrique, les substances organiques.

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterrain entre en relation avec différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenues dans les eaux parmi ces substances nous avons minéraux, l'hydroxyde ferrique, les substances organiques (Belksier, 2009).

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

$$\text{i.e.b.} = [\text{rCl} - \text{r}(\text{Na} + \text{K})] / \text{rCl}$$

Les valeurs de l'indice d'échange de base expliquent selon (Hamzaoui, 2012) ce qui suit :

- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

2.1.4 Indice de saturation :

Pour calculer l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau nous avons utilisé le logiciel Diagramme.

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997). La

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

connaissance des saturations des eaux vis-à-vis de certains minéraux permet de dire sous quelles formes chimiques certains minéraux sont transportés dans la solution.

Un indice de saturation nul signifie que l'eau est en équilibre avec le minéral étudié. L'eau sera sous saturée si $IS < 0$ (dissolution du minéral) et sursaturée si $IS > 0$ (précipitation du minéral) (Peter-Borie et al, 2009).

2.1.5 Traitement statique des données :

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physicochimiques étaient significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du chimisme, la plupart du temps une/ou plusieurs liaisons plus ou moins fortes entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse en multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'Analyse en Composantes principales (ACP) fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Ces méthodes qui sont apparues au début des années 30. Elle propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables (C. Duby, S. Robin, agroparitech).

3. Géochimie isotopique :

Introduction :

Les techniques isotopiques ont été très vite introduites dans les études hydrogéologiques tout juste après la fin de la 2ème guerre mondiale et suite aux développements décisifs qu'a connus la spectrométrie de masse (spectromètre de Nier). Dès 1955 en effet, le laboratoire d'Ottawa commença à émettre les 1ères analyses en isotopes stables ($\delta^{18}O$ et δ^2H). Il allait être suivi par d'autres laboratoires dont celui de l'AIEA, celui de Pretoria et de Thonon-les-Bains (1963). Ce dernier ayant malheureusement fermé ces portes que récemment en 2005 pour faute de budget.

En fait et dès le début, les sciences de l'eau allaient non plus s'appuyer sur les moyens de l'hydrogéologie physique et sur l'analyse hydrochimique mais également sur les moyens qui allaient être mis en œuvre par cette nouvelle technique et qui se devaient d'être différents des techniques ordinaires. Les grandeurs à mesurer seront pour les isotopes stables les très légères différences de masse (IRMS), pour les isotopes instables, la radioactivité totale

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

(compteurs à gaz, spectromètres à scintillation liquide), les désintégrations radioactives (spectrométrie alpha ou gamma) ou alors les rapports absolus (TIMS). Le principe de l'introduction et de l'utilisation des techniques isotopiques dans les sciences de l'eau était de pouvoir s'adresser à n'importe quel milieu sans pour autant être limité dans l'espace et le temps (*Fontes, 1976*). Ainsi, grâce aux isotopes de l'environnement, on pouvait on étudier tout type d'aquifère, de surface, souterrain (englobant les systèmes poreux, fissuré et karstique), les circuits géothermiques. La connaissance des eaux souterraines passant par la compréhension des phénomènes contrôlant les eaux de précipitation, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, AIEA a, pour se faire, initié le GNIP, *Global Network for Isotopes in Precipitation*. Le « *Gnip* » consiste en un programme de surveillance des eaux de précipitation à l'échelle mondiale et ce par l'intermédiaire de 5 stations de référence dispersées à travers les cinq continents.

Aussi, la mise en application des techniques isotopiques est rapidement devenue une nécessité et s'est vite répandue dans l'étude de grands aquifères en particulier pour les pays situés en zone aride. On citera parmi ces études :

1. L'étude du grand bassin artésien d'Australie,
2. L'étude de l'aquifère des grès de Nubie qui est partagé par l'Egypte, le Soudan, le Tchad et la Libye,
3. L'étude du système aquifère du Sahara Septentrional (SASS) commun à l'Algérie, la Tunisie et la Libye.

En Algérie différentes études faisant intervenir les techniques isotopiques ont été effectuées ou sont en cours d'exécution. Elles seront maintenant intégrées dans ce qui est appelé le Schéma Directeur de l'Eau, récemment développé par le Ministère des Ressources en Eau. Ce schéma a pour but la généralisation de l'utilisation de l'outil isotopique pour une meilleure appréciation des phénomènes régissant l'écoulement des eaux souterraines en zone aride et semi-aride. Depuis leur introduction à la fin des années 1940 début des années 1950, le nombre de laboratoires utilisant les techniques isotopiques se sont multipliés, et les techniques les plus utilisées dans les études des ressources en eau sont ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{13}C , ^{14}C , ^{15}N , ^{34}S , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Par ces techniques on doit être en mesure de pouvoir :

1. -Identifier et évaluer les zones de recharges,
2. -Identifier les eaux anciennes (utilisées comme eaux potables en régions arides).
3. -Evaluer les mélanges entre différents types d'eaux.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

4. -Evaluer les échanges entre l'eau et la matrice.
5. -Identifier les climats anciens (coquilles, eaux).
6. -Remonter aux paléo températures.
7. -Détecter l'origine de la pollution.
8. -Déterminer l'origine de la salinisation.

Les méthodes d'application les plus courantes font appel au deutérium, à l'oxygène 18 et au tritium de la molécule d'eau, ainsi qu'aux isotopes du carbone des carbonates dissous

3.1 - Approche méthodologique

La gestion des eaux souterraines, c'est à dire leur exploitation, nécessite une bonne connaissance des circuits souterrains empruntés par l'eau. Un circuit se caractérise généralement par deux facteurs : l'espace et le temps. La connaissance de ces deux paramètres est donc fondamentale.

Les différents isotopes utilisés en hydrogéologie sont d'une part les isotopes de la molécule d'eau (l'oxygène 18, le tritium et le deutérium) et d'autre part les isotopes des espèces dissoutes (le carbone 14 et le carbone 13) du carbone inorganique.

Les isotopes stables nous permettront de connaître une caractéristique spatiale (altitude, ...) et les isotopes instables, un facteur temporel (âge, ...).

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 à l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, des échanges avec les minéraux...

L'abondance relative moyenne de ces isotopes dans la nature (Fritz et Fontes, 1980) est 1H : 99,984 % ; 2H : 0,015 % ; 3H : 10⁻¹⁶ à 10⁻¹⁴ % ; 16O : 99,76 % ; 17O : 0,037 % ; 18O : 0,10 %.

Par exemple, l'atome d'hydrogène peut se présenter sous la forme 1H (aucun neutron), 2H (aussi appelé deutérium *D*, avec un neutron) ou 3H (aussi appelé tritium *T*, avec deux neutrons). L'atome d'oxygène peut se présenter sous la forme 16O, 17O ou 18O. L'eau est composée en majorité de molécules ***d'H₂¹⁶O***, mais contient aussi quelques molécules plus lourdes ***d'H₂¹⁷O*** (0.004%), ***d'H₂¹⁸O*** (0.2005%), ***d'HDO*** (0.0155%,) et ***d'HTO*** (en quantité très faible actuellement). Ces différentes molécules sont appelées isotopologues, ou, par abus de langage, simplement "***isotopes de l'eau***".

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

En hydrologie, l'utilisation des isotopes repose sur leurs qualités de traceurs des espèces chimiques auxquelles ils sont intrinsèquement liés.

Dans la présente étude, nous avons utilisé une catégorie d'isotopes :

- les isotopes stables (^{18}O et ^2H).

3.2 - L'apport des isotopes de l'environnement en hydrogéologie

Dans l'eau naturelle (océan, lac, vapeur, glace, etc.), le rapport $\text{H}_2^{18}\text{O} / \text{H}_2^{16}\text{O}$ est de l'ordre de 1/500 (0.002).

Ce rapport varie extrêmement peu, 1 à 2 % à nos latitudes, 3-4 % aux hautes latitudes.

On utilise la notation "delta" qui permet d'exprimer ces petites variations. On exprime ces variations en "pour mille", Ainsi et pour des raisons pratiques on ne mesurera pas l'abondance isotopique absolue mais l'abondance isotopique relative qui peut être mesurée à l'aide d'un spectromètre de masse

3.3 - Les isotopes stables (^{18}O et ^2H) et la notation delta (δ) :

Dans l'eau, l'abondance relative des isotopes stables ^2H et ^{18}O est exprimée par rapport à celle existant dans l'eau océanique moyenne standard V-SMOW (SMOW, *standard mean ocean water*). Les rapports isotopiques de ces différentes molécules, $^2\text{H}/^1\text{H}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, s'appelle la *composition isotopique* et sont alors représentés par les variations delta (δ) telles que :

$$\delta = (R_{\text{sample}} / R_{\text{SMOW}} - 1) / 1000$$

Avec R_{sample} le rapport du nombre de molécules lourdes sur le nombre de molécules totales dans l'échantillon et R_{SMOW} ce même rapport dans une référence internationale correspondant à une eau de surface océanique moyenne: Standard **Mean Ocean Water (SMOW)** ; Par convention il est entendu que la valeur du SMOW sera $\delta^{18}\text{O} = 0$; $\delta^2\text{H} = 0$

Le δ s'exprime en ‰. On définit ainsi le $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ et δD pour quantifier la richesse en H_2^{17}O , H_2^{18}O et HDO respectivement.

Tableau 8 : Isotopes du milieu de l'oxygène et de l'hydrogène : traceurs intimes de la molécule de l'eau.

Élément	Isotope	Abondance naturelle moyenne %	Propriétés
Hydrogène	1H	99,985	stable
	2H = D (Deutérium)	0,015	stable
	3H = T (Tritium)	10-18	radioactif (période T = 12,43 ans)
Oxygène	16O	99,76	stable
	17O	0,04	stable
	18O	0,20	stable

Dans le langage courant, on dit qu'une eau est plus *“riche”* ou *“enrichie”* lorsqu'elle possède une plus grande concentration en isotopes lourds. Inversement, une eau est plus *“pauvre”* ou *“appauvrie”* quand la concentration en isotopes lourds est plus faible.

Exemple pour l'eau H₂O : L'isotope de l'oxygène le plus commun est 16O, puis 18O et 17O. L'isotope de l'hydrogène le plus abondant est 1H puis 2H (Deutérium) puis 3H (Tritium). On distingue ainsi les isotopes abondants et les isotopes rares, les isotopes légers et les isotopes lourds.

3.4 - Les isotopes stables de la molécule d'eau :

Les isotopes stables de la molécule d'eau oxygène -18 (¹⁸O) et deutérium (²H) sont utilisés en hydrogéologie comme traceurs de milieu. Ils permettent de suivre l'évolution des eaux depuis l'infiltration jusqu'à l'exutoire, d'apporter des renseignements sur l'origine de l'eau, de déterminer l'aire de recharge des aquifères, leur taux de renouvellement ainsi que les relations éventuelles entre les aquifères.

La composition isotopique d'une eau est donnée en partie pour mille de différence par rapport à un standard international de référence, le SMOW (Standard Mean Ocean Water), exprimé en unité δ (delta) et définissant la composition isotopique moyenne théorique de la masse océanique.

$$\delta = \frac{R(\text{échantillon}) - R(\text{standard})}{R(\text{standard})} 1000 \quad \text{(Craig, 1961)}$$

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Avec : $R = \frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}$ et $\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}$

Le standard a une composante isotopique $\delta \approx 0 \text{ ‰}$

Si le rapport de l'échantillon est inférieur ou égal au standard le δ (delta) est négatif, D'après la relation ci-dessus, les valeurs de δ positives indiquent que l'échantillon est enrichi vis à vis de l'étalon correspond à la composition isotopique moyenne des eaux océaniques. Dans la nature, les variations isotopiques de la plupart des éléments sont faibles.

Rappelons que les deux principaux phénomènes responsables de la modification des compositions en ${}^{18}\text{O}$ et ${}^2\text{H}$ de l'eau sont la condensation et l'évaporation. Ces phénomènes sont thermo dépendants ; la condensation est un phénomène d'équilibre thermodynamique tandis que l'évaporation s'opère dans des conditions hors d'équilibre à cause de l'effet cinétique lié au processus de diffusion moléculaire (**Craig et al., 1963 ; Ehalt et al., 1963 ; Dansgaard, 1964**).

En zone aride ou semi-aride, le facteur dominant est le profil d'humidité de l'atmosphère qui conditionne l'évaporation, mais les caractères propres à la précipitation elle-même interviennent également : granulométrie des gouttelettes, intensité de la précipitation (**Fontes, 1976**).

Comme le principe de l'utilisation des techniques isotopiques est de tracer le cycle de l'eau, on conçoit bien que toute étude hydrogéologique aura pour but de comparer les eaux souterraines à celles des précipitations. De cette manière on pourra avoir une idée sur la recharge ou non de l'aquifère de la même manière que l'on pourra discerner si une eau a un cachet évaporé ou non, ou si elle a échangé longtemps avec la matrice. On pourra donc indirectement apprécier un temps de résidence.

3.5 - Corrélation des isotopes stables deutérium ($\delta 2\text{H}$) et l'oxygène 18 ($\delta 18\text{O}$)

L'étude de la co-variation en 2H et 18O est réalisée par un graphique de $\delta 2\text{H}$ en fonction de $\delta 18\text{O}$. A l'échelle du globe, les teneurs en oxygène-18 et en deutérium des précipitations mondiales qui n'ont pas subi d'évaporation sont corrélées entre elles par une droite d'équation des eaux météoriques (DMM) :

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{ de la forme } \delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} + d \quad (\text{Craig, 1961})$$

La pente de la droite météorique mondiale (8), caractérise le phénomène de condensation produit à l'équilibre ; et, d (10), l'ordonnée à l'origine ou excès en deutérium. L'excès en deutérium est variable en fonction de l'humidité relative et de la température de l'interface océan-atmosphère, lors de la formation des masses de vapeur atmosphérique (Jouzel et Merlivat, 1979).

Ainsi, d, prend la valeur de +10 lorsque les précipitations sont d'origine océanique (Craig, 1961), mais peut avoir aussi des valeurs supérieures ou inférieures à 10, notamment :
- +22, pour les précipitations du bassin oriental de la méditerranée (Nir, 1967) ;
- +6, pour les précipitations des stations continentales d'Amérique du Nord (Yurtsever et Gat, 1981).

Les eaux se plaçant sur la ligne des eaux météoriques sont ainsi supposées avoir pour origine les précipitations et n'avoir pas subi aucun processus isotopique.

Les eaux situées au-dessus ou en dessous de cette ligne reflètent respectivement la perte ou l'enrichissement en l'un ou l'autre des isotopes sous l'effet de différents processus.

4. Etude des éléments de la pollution :

4.1. Aptitude des eaux à l'irrigation

Une étude chimique détaillée des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présentent certains éléments chimiques pour les plantes.

a) Selon de Richard (SAR)

Classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau : méthode de Wilcox. Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

Le sodium absorption ratio (SAR) est calculé par la formule suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Na^+ : concentration de l'eau en ions sodium en méq/l

Ca^{2+} : concentration de l'eau en ions calcium en méq/l

Mg^{2+} : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Il existe trois classes de risque alcalin en relation avec le SAR :

- $SAR \leq 10$ Risque faible
- $10 \leq SAR \leq 18$ Risque moyen
- $SAR \geq 18$ Risque élevé

b) Selon Wilcox

Le diagramme de Wilcox est une représentation graphique du pourcentage du sodium (%Na) en fonction de la conductivité électrique, permettant de déterminer le risque de salinité des eaux. La classification définit cinq classes d'eau excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. L'augmentation de la charge en Na^+ influence négativement le développement des plantes,

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

Na^+ : concentration de l'eau en ions sodium en méq/l

Ca^{2+} : concentration de l'eau en ions calcium en méq/l

Mg^{2+} : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

K^+ : concentration de l'eau en ions potassium en méq/l

4.2. Pollution agricole :

4.2.1 Cartographie des nitrates et nitrites :

Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques, nous avons choisi l'outil cartographique qui constitue un outil très appréciable dans la vision de l'évolution spatiale d'un polluant quelconque.

a) – les nitrates :

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés chimiques naturellement présents dans l'environnement. Ils proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique et de la décomposition de matière organique par des microorganismes. On les trouve ainsi, à l'état naturel, à de faibles concentrations dans les sols et dans les eaux superficielles et souterraines. Indispensables à la croissance des végétaux, ils sont également fabriqués de manière industrielle sous la forme d'engrais et peuvent constituer des apports non négligeables dans certaines régions. Les nitrates sont très solubles dans l'eau; ils migrent donc aisément dans la

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

nappe phréatique lorsque les niveaux excèdent les besoins de la végétation (**Santé Canada, 1992**).

Les nitrates sont répertoriés parmi les principales catégories de polluants chimiques rencontrés dans l'eau (**Morlon, 1998**), ils sont des éléments chimiques nécessaires à la croissance des végétaux. Cependant, leur présence excessive dans l'eau soulever des préoccupations pour la sante de l'homme et de l'animal. En effet, les nitrates sont des polluants facilement lixiviables et atteignent la nappe aquifère sans subir des modifications. (**Idrissi Alami, 2007**)

b) - Les nitrites :

Les nitrites (NO_2^-) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+), présent dans l'eau et le sol, qui est oxydé en nitrites par les bactéries du genre *Nitrosomonas*, puis en nitrates par les bactéries du genre *Nitrobacter* (**Santé Canada, 1992**).

c) - L'ammonium :

L'ammonium peut être un signe d'activité micro bactériologique dans l'eau et peut être le résultat de la fertilisation, de la contamination, ou parfois d'origine géologique. L'ammonium est transformé en nitrite et en nitrate grâce à un processus de nitrification biologiquement conditionné.

Le processus engendre une importante demande en oxygène et nécessite suffisamment de matériaux filtrants, constitués de sable de quartz ou de média à base de calcium poreux.

d) – métaux lourds :

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5g/cm^3 . Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure (Rodier, 2009).

4.3. Vulnérabilité et pollution des eaux souterraines :

A l'échelle des mesures, la migration d'un polluant est régie par deux parcours : l'un vertical, traversant les couches superficielles de la nappe (zone non saturée), l'autre horizontal suivant le sens d'écoulement de la nappe (zone saturée).

On distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (**Schnebelen, 2002**). On peut noter que les deux types de vulnérabilité d'une façon générale, ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. De plus, nous avons considéré qu'il était préférable de faire la différence entre les caractéristiques propres du milieu et l'existence de sources de pollutions. (Baali, 2007)

4.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque :

La vulnérabilité des nappes à ces diverses pollutions est conditionnée par plusieurs facteurs, parmi lesquels il y a le pouvoir filtrant, l'épaisseur de la zone non saturée et la nature du réservoir (captif ou libre). La vitesse d'écoulement des eaux souterraines joue aussi un certain rôle en favorisant cette vulnérabilité.

4.3.2. La méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b) pour notre étude nous avons utilisé seulement la méthode de GOD pour sa simplicité et l'homogénéité du caractéristique de la région.

- La méthode de GOD :

Ce système a été développé par Foster, il est illustré par la (Fig. 30). Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence).
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class).
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. L'indice de vulnérabilité est obtenu selon l'équation suivante : $I = CG * CO * CD$ où CG = cote du type d'aquifère, CO = cote de la lithologie, CD = cote de la profondeur à la nappe. La vulnérabilité augmente avec l'indice et la classification, elle se fait en cinq classes allant de 0 à 1 comme montre la figure suivante :

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

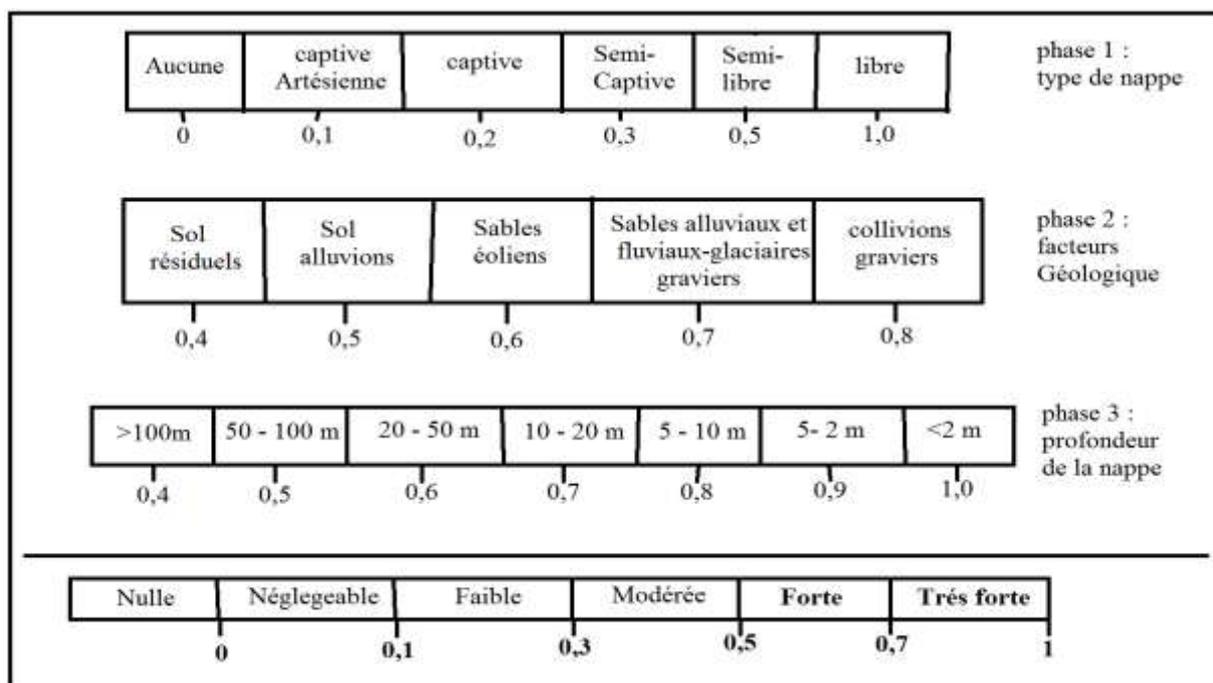


Figure 29 : Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987)

Chapitre III :

Résultats et

Discussion

I – Etude hydrochimique et isotopiques des eaux de la région d'El-Meita :

Introduction :

1- Les paramètres physico-chimiques

1.1- La température :

La température a été mesurée systématiquement au cours des prélèvements des échantillons, la précision est de l'ordre du dixième du degré Celsius. Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision car elle régit tous les équilibres comme elle joue un rôle primordiale dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique et c'est un paramètre de diagnostic hydrogéologique.

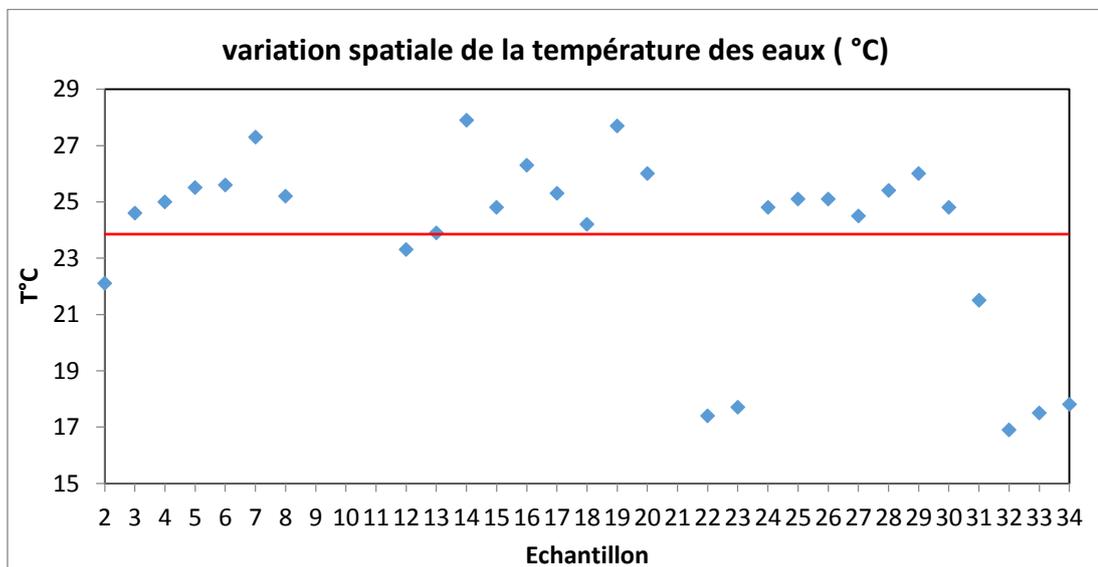


Figure 30 : variation spatiale de la température des eaux de la plaine d'El-Meita.

Les températures varient entre 16.90 °C comme valeur minimale mesurée dans les eaux de sources prélevées sur les massifs de l'Atlas et un maximum de 27.90 °C mesuré sur les eaux du bas Sahara et autour d'une moyenne de 23.77 °C.

En traçant la droite de la moyenne des températures nous pouvons discriminer deux groupes de température bien distincts: le premier groupe regroupe les eaux de l'Atlas qui émergent dans les Calcaires du Crétacé, et varie autour d'une moyenne de 19.2 °C. Le second groupe rassemble les eaux qui émergent dans la nappe albienne autour d'une moyenne de 25°C. Ces valeurs sont fortement influencées par la température de l'air. 41% des échantillons dépassent la norme de potabilité établie par l'OMS pour la température 25 °C (OMS, 2008).

1.2- Le potentiel d'hydrogène (pH) :

La valeur de pH nous renseigne sur l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Le pH d'une solution aqueuse est une mesure de l'équilibre acido-basique réalisé par différents composés dissous ; dans la plupart des eaux naturelles, il est contrôlé par l'équilibre pCO_2 , le mécanisme d'équilibre d'anhydride carbonique-bicarbonate-carbonate.

Les valeurs des pH mesurées tendent vers l'alcalinité, avec une moyenne de 7.49 (fig. 31). Ces valeurs sont en accord avec le pH des eaux souterraines, qui sont pauvre en CO_2 , les valeurs ne dépassent pas la norme algérienne requise pour les eaux de consommation (6.5-8.3).

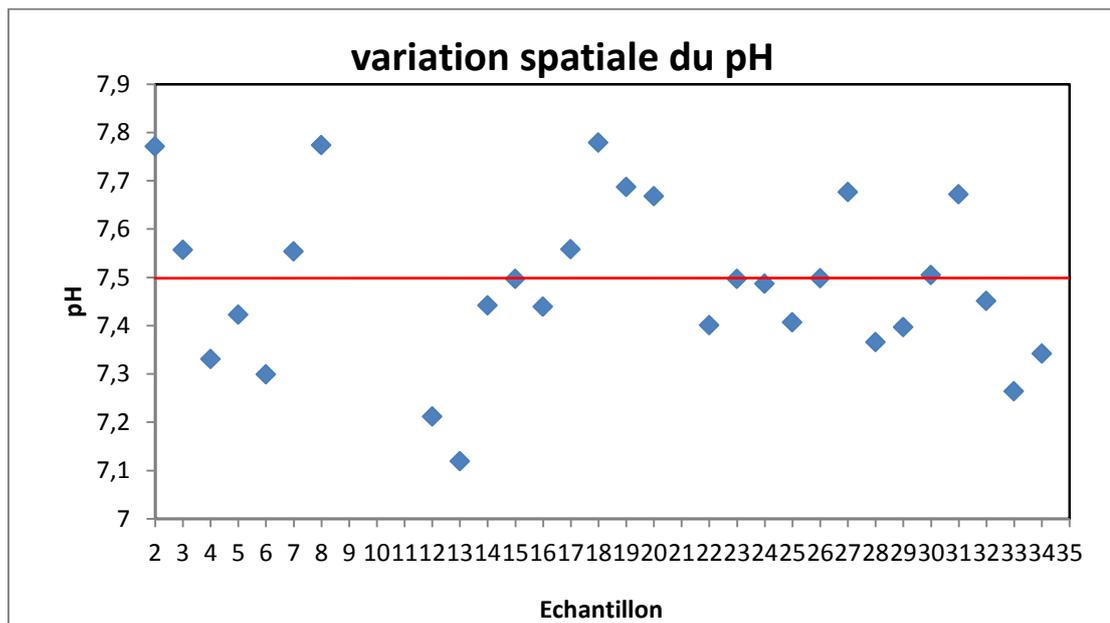


Figure 31 : variation spatiale du pH des eaux de la plaine d'El-Meita

1.3- La conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique est une mesure du contenu de l'eau en substances dissoutes ions et électrolytes. Une variation de la conductivité électrique peut avoir une cause aussi bien anthropique (pollution de l'eau) que naturelle (dissolution et concentration par évaporation, dilution par les eaux météoriques, infiltration d'eau de surface peu minéralisée, drainance verticale, etc. (valles, 2007).

Elle mesure la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Sa variation permet de suivre l'évolution d'une pollution chimique. La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La conductivité varie

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

proportionnellement avec les fluctuations de la température. Ce paramètre renseigne aussi sur les zones de mélange ou d'infiltration. Elle s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

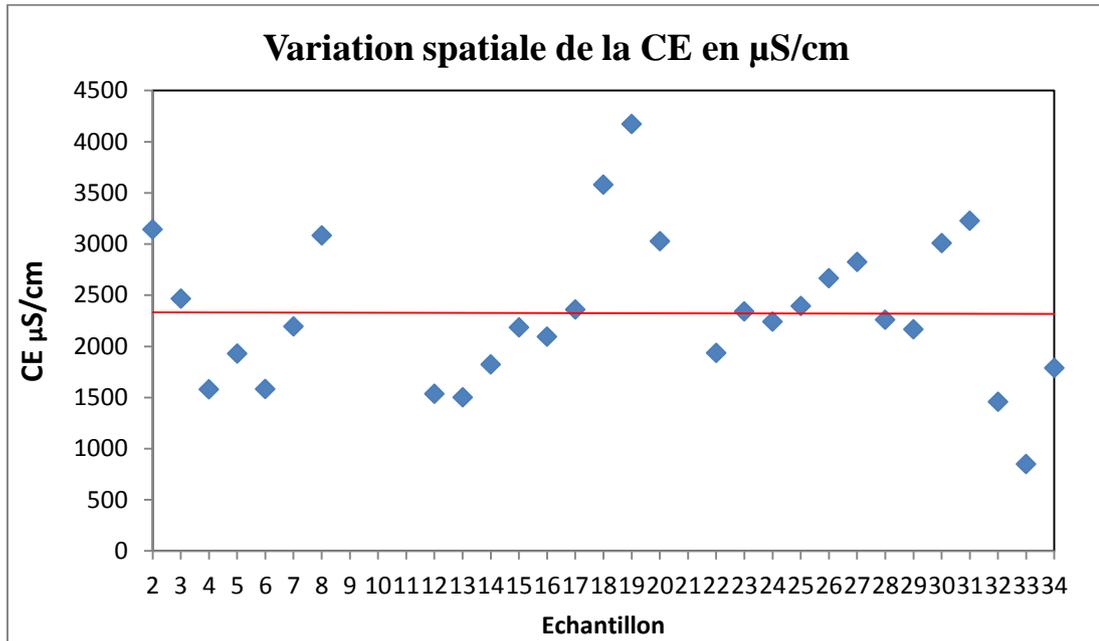


Figure 32 : variation spatiale de la CE des eaux de la plaine d'El-Meita

La conductivité électrique (CE) des eaux analysées est supérieure à la valeur de la norme OMS 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la majorité des échantillons sauf les eaux prélevées en amont de la zone d'étude. Les valeurs de la conductivité électrique augmentent du nord vers le Sud suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines avec une moyenne de 2324 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur maximale 4173 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est enregistrée pour P19, plus on se rapproche du Chott plus la conductivité des eaux augmentent et tend vers sa valeur maximale. Il semblerait que ce périmètre est le siège à d'intenses activités agricoles (céréaliculture, maraichage et élevage intensif et extensif). Le contraste climatique entre le jour et la nuit laisse supposer que les eaux d'irrigation contribuent à la salinité des eaux par un retour vers la nappe.

1.4- Solides dissous totaux (TDS)

Dite aussi minéralisation des eaux, la TDS (Total Dissolved Solids) est déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent. (Rodier, 2009).

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Les mesures du TDS de ces sources nous permettent de les classer selon le goût car dans une étude réalisée par l'Organisation Mondial de la Santé (OMS), un jury de dégustateurs sont venu à la conclusion sur la quantité de TDS préférable dans l'eau :

Tableau 09. Goût de l'eau avec différentes concentrations du TDS

Niveau du TDS en (mg/l)	Évaluation
Moins de 300	Excellent
300 – 600	Bien
600 – 900	Passable
900 – 1200	Faible
Plus de 1200	Inacceptable

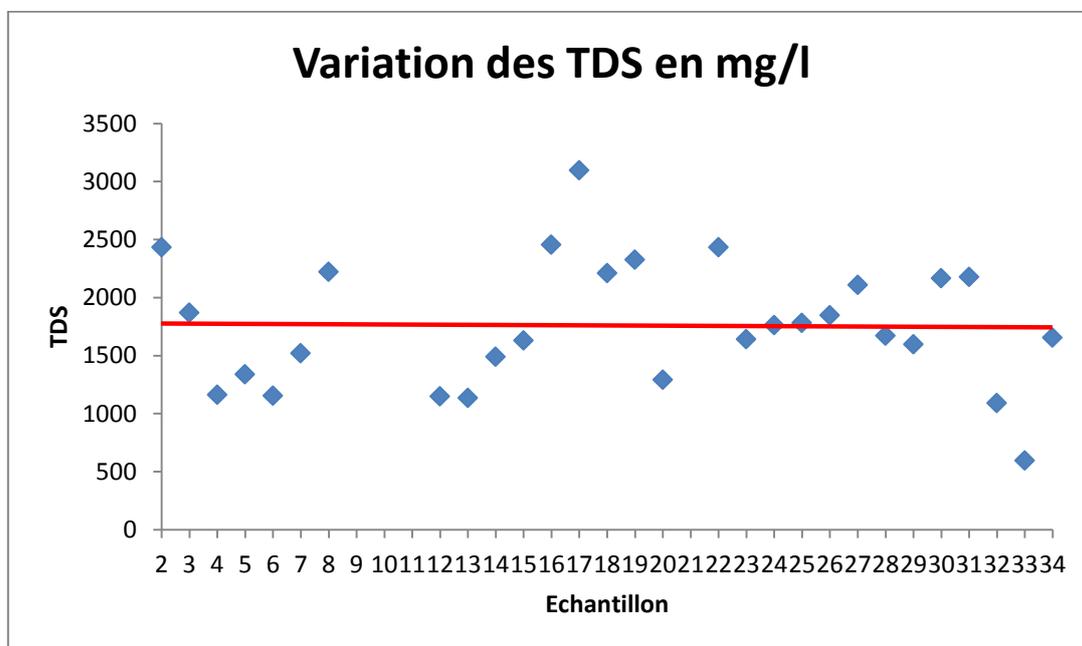


Figure 33 : Variation des TDS pour chaque échantillon

La majorité des échantillons ont un goût évalués inacceptable selon le classeur établie par l'OMS, mais au Sahara, les gens consomment l'eau salée jusqu'à 3 g/l de sel, ce qui n'est pas le cas pour les habitants des zones Nord qui sont moins adaptés et vulnérables aux eaux salées (Sedrati, 2017). Le reste des échantillons sont classés, de qualité passable à faible, il s'agit des eaux de sources et des puits situés sur l'Atlas.

Les TDS des eaux de la plaine d'El-Meita mesurés sont pour la majorité supérieure à la norme de consommation de l'OMS, la moyenne tourne autour de 1758 mg/l, la valeur maximale est de 3797 mg/l pour P17 situé au sud de la région, là où l'activité agricole est très développée.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

2- Faciès chimiques des eaux de la nappe d'El-Meita :

Afin de mieux comprendre le chimisme des eaux souterraines d'El-Meita, nous avons fait appel à différentes représentations graphiques. Le tableau suivant montre la relation entre le faciès chimique et l'environnement géologique et géochimique (**Banton et Bongoy, 1999**) :

Tableau 10. Faciès hydrochimiques et environnements géologiques

Faciès hydrochimique	Environnement géologique et géochimique
Bicarbonaté-calcique et/ou magnésien	Faciès fréquents dans les eaux douces continentales et dans les environnements calcaires. La présence de formations dolomitiques est à l'origine de la tendance magnésienne.
Bicarbonaté-sodique et/ou potassique	Faciès fréquents dans les environnements riches en formations volcaniques. Un faciès bicarbonaté sodique se trouve aussi dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange Ca^{++} contre Na^+ sur des argiles).
Sulfatée	Faciès fréquents dans les environnements riches en minéraux évaporitiques (gypse) ou minéraux sulfurés (pyrite [FeS_2]).
Chloruré-sodique	Faciès fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite [$NaCl$]). Faciès rencontrés également dans les secteurs pétrolifères et certaines zones d'activités volcaniques. L'eau de mer et les eaux salines issues des intrusions marines sont de faciès $Na^+-Mg^{++}-Cl^-$ mais peuvent évoluer dans les aquifères côtiers, vers un faciès alcalino-terreux chloruré par échange cationique.
Chloruré-calcique	Faciès rencontrés dans des milieux riches en minéraux argileux contaminés par une solution saline de type Na^+-Cl^- (dissolution d'halite ou intrusion marine).

2.1 – diagramme de Piper

Le diagramme de Piper (**Fig. 34**) montre un faciès mixte, il s'agit pour le triangle des cations d'une domination du pôle calcique alors que pour les anions nous avons un pôle mixte avec une tendance vers le pôle sulfaté. Il semblerait que les eaux sont influencées par un certain nombre de facteurs exogènes, tels que, la pollution et l'aridité du climat qui ont contribué à la modification de la composition chimique des eaux pour aboutir au faciès chloruré sulfaté calcique.

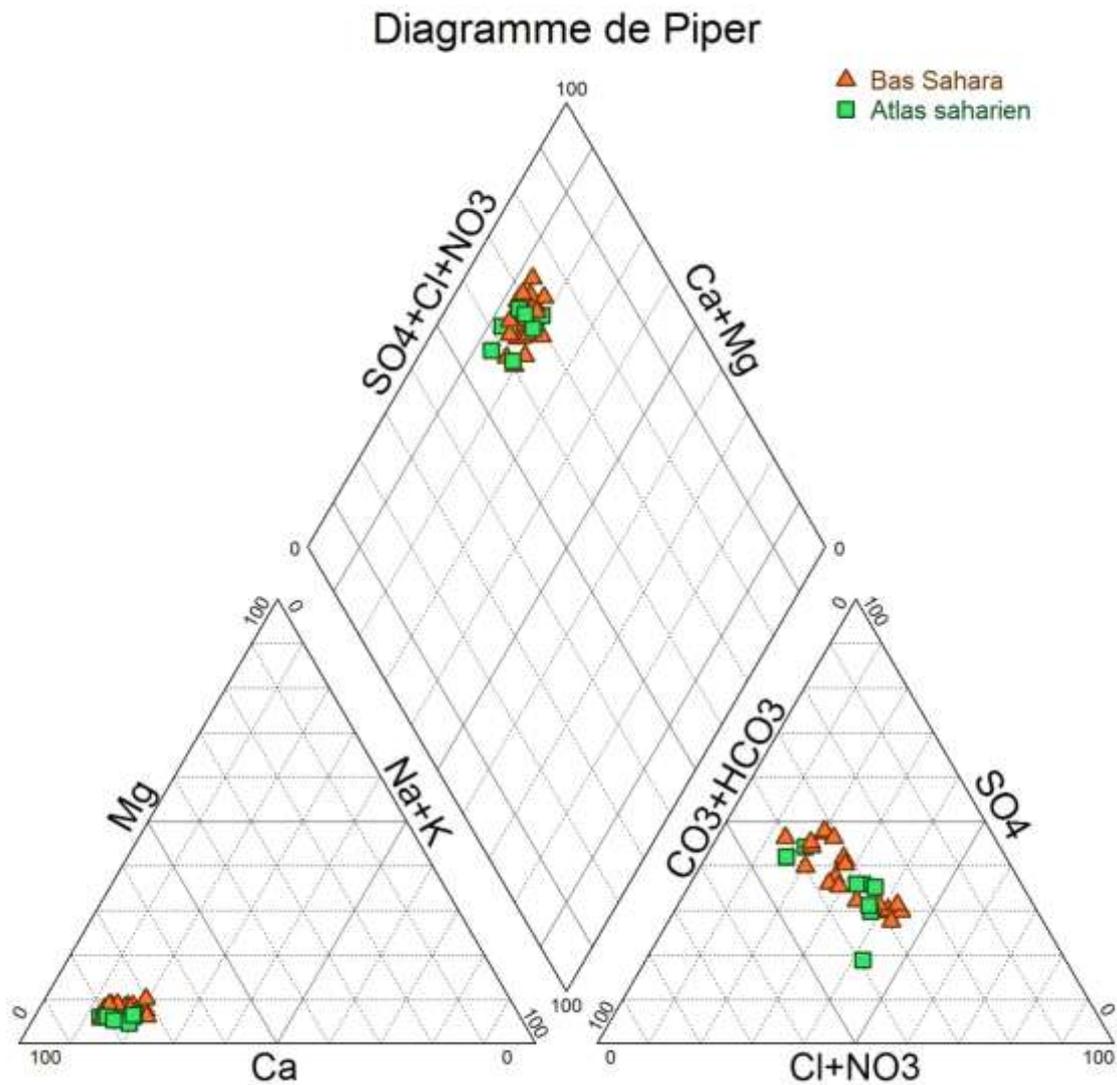


Figure 34 : Diagramme de piper pour l'ensemble des échantillons

2.2- Diagramme de Scholler-Berkaloff

On a même procédé à la représentation des résultats sur le diagramme de Scholler - Berkaloff, (fig.35a, 35b, 35c) pour connaître la dominance des éléments majeurs.

Dans la plaine d'El-Meita la dominance des cations majeurs dans les eaux souterraines et celles des sources est $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ et $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ pour les anions majeurs ; une dominance du faciès chloruré sulfaté calcique est remarqué pour l'ensemble de la plaine avec une augmentation de la minéralisation avec le sens de l'écoulement de l'amont vers l'aval traduisant l'interaction eau-roche associé à l'activité anthropique.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

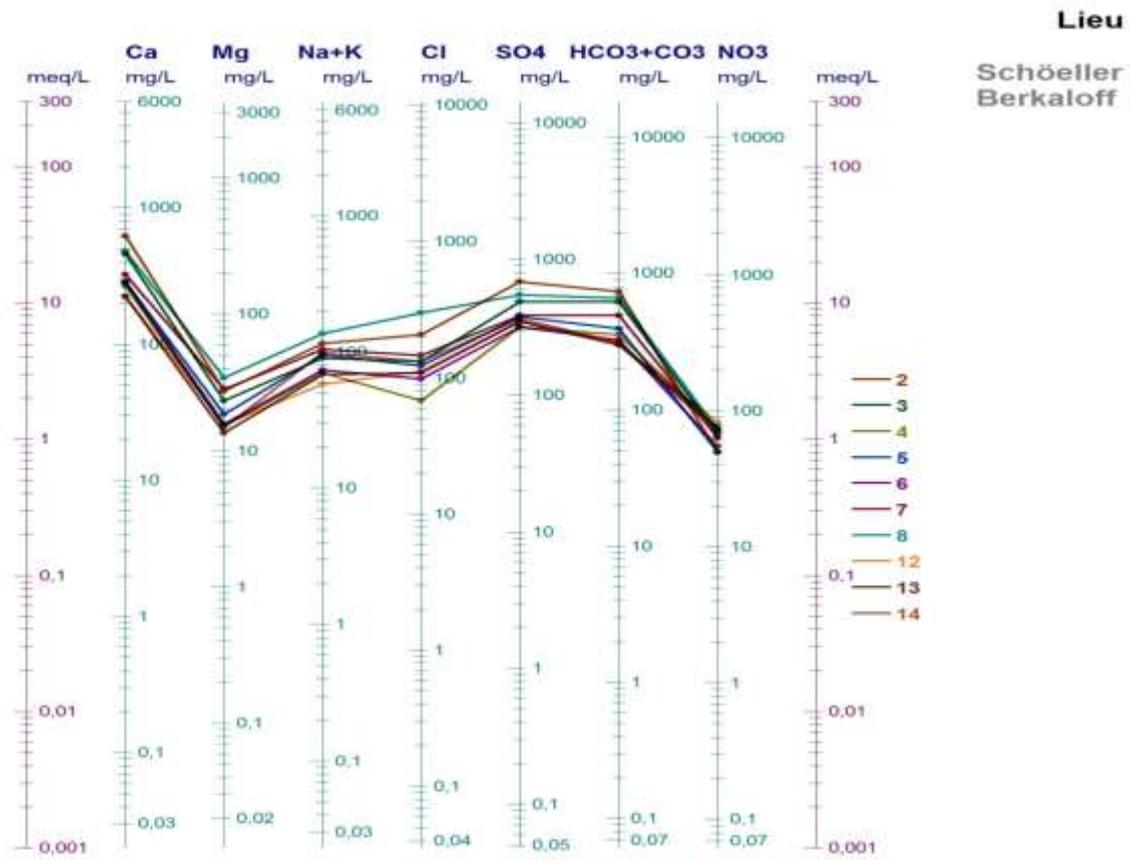


Figure 35a. Diagramme de Scholler-Berkaloff

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

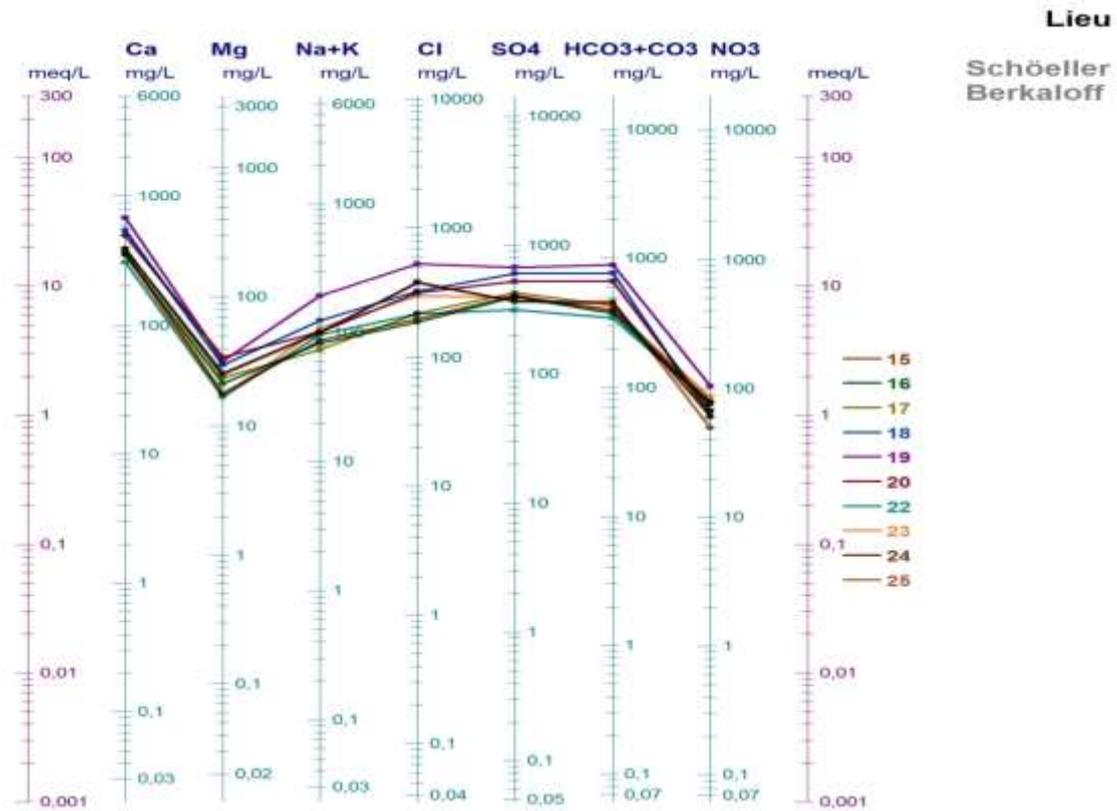


Figure 35b. Diagramme de Scholler-Berkaloff

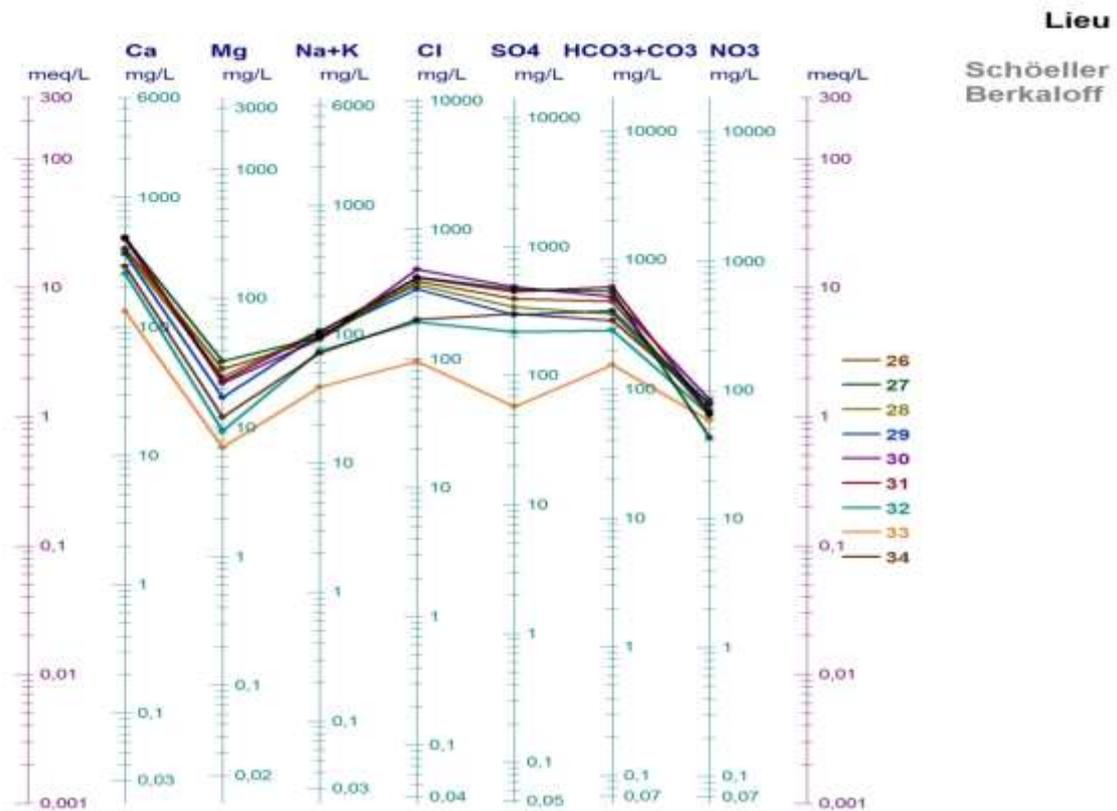


Figure 35c Diagramme de Scholler-Berkaloff

3- Diagramme binaire (ions – chlore) :

Ce diagramme sert surtout à l'identification de l'origine de la salinité des eaux.

L'établissement de diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif. Ces genres de diagrammes permettent de visualiser l'évolution des teneurs en cations et anions majeurs en fonction des teneurs en chlore considéré comme élément conservatif (**Kloopmann, 2011**). La disposition des différents points par rapport à la ligne de mélange eau de pluie-eau de mer peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange.

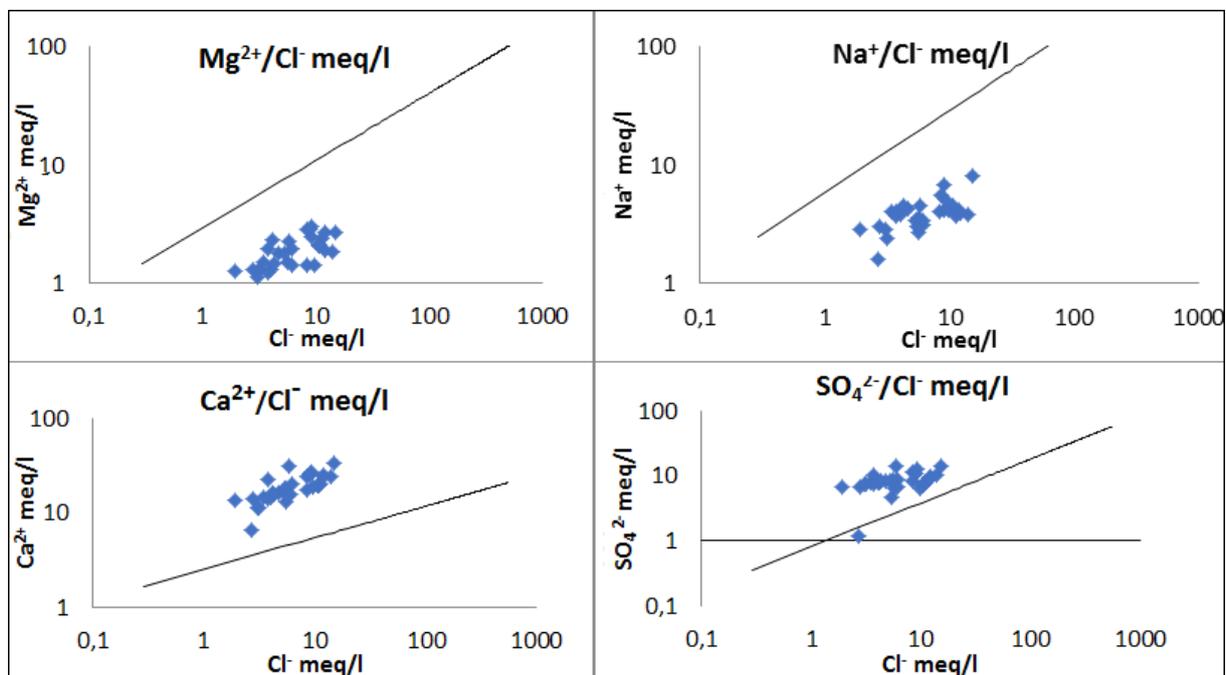


Figure 36 : Relations entre Ca, Mg, SO₄, Na et Cl des eaux souterraines et l'eau de pluie – eau de mer.

Dans les aquifère carbonaté l'enrichissement simultané en Ca²⁺ et l'appauvrissement en Mg²⁺ s'explique essentiellement par l'interaction eau – roche comme la dolomitisation, dissolution et précipitation. La réaction d'échange Ca²⁺ – Mg²⁺ par dolomitisation a été signalée comme cause principale de diminution du rapport Mg/Ca (**Fehdi, 2009**), le rapport Mg/Ca dans notre cas est très faible et confirme l'hypothèse citée ci-dessus.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Etant donné que la teneur en Na^+ devrait équilibrer la teneur en Cl^- , dans le diagramme Na^+ et Cl^- la totalité des points se trouve sous la droite d'eau douce - eau salée ce qui montre un déficit en Na^+ , qu'on interprète par le phénomène d'échange de base inverse eau-aquifère, le Na^+ est fixé par l'encaissant et libérant le Ca^{2+} (Nadher, 1980), ce qui est en conformité avec le diagramme Ca^{2+} - Cl^- qui montre un apport important en calcium.

La relation SO_4^{2-} et Cl^- montre que la majorité des points se trouve au-dessus de la droite eau douce – eau salée et marque un enrichissement en ions sulfates dont l'origine remonte à l'association de plusieurs facteurs ; géologie, pollution et climat.

Seul un point, P33, fait l'exception et émerge du lot, il s'agit d'eau de source située en altitude loin de toute contamination agricole.

Les sels dans les eaux d'El-Meita retrouvent leur origine dans l'interaction eau-roche, par dissolution et précipitation minérale, phénomène d'échange de base, par adsorption et désorption minérale grâce à la capacité d'échange cationique, la contamination par de nouveaux sels due à la pollution agricole et enfin à l'aridité du climat induisant des concentrations par évaporation.

4- Relation $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et SO_4^{2-} :

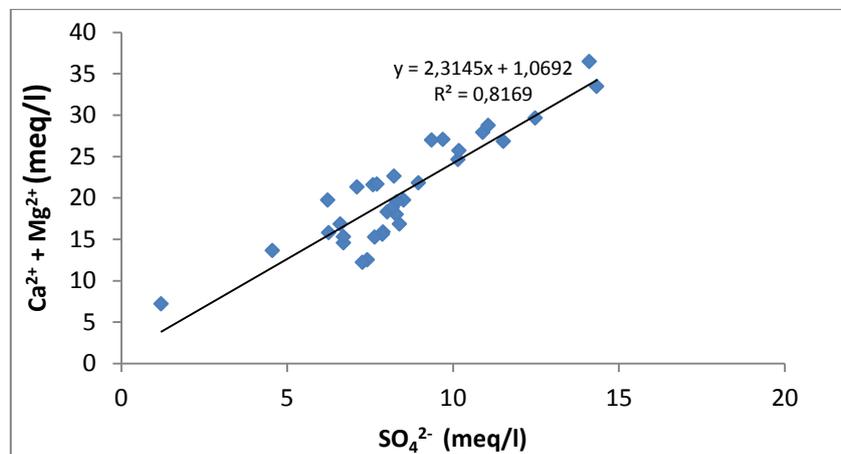


Figure 37 : Relation entre SO_4^{2-} et $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

Il existe une grande corrélation entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et SO_4^{2-} (fig. 37) avec un coefficient de détermination de l'ordre de ($R^2 = 0,81$) ; cette tendance des éléments chimiques par rapport à la droite, de corrélation laisse supposer que ces éléments ont une même origine et proviennent de la même roche, à savoir, la dissolution des roches évaporitiques : gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et Bloedite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

5- Indice d'échange de base (i e b) :

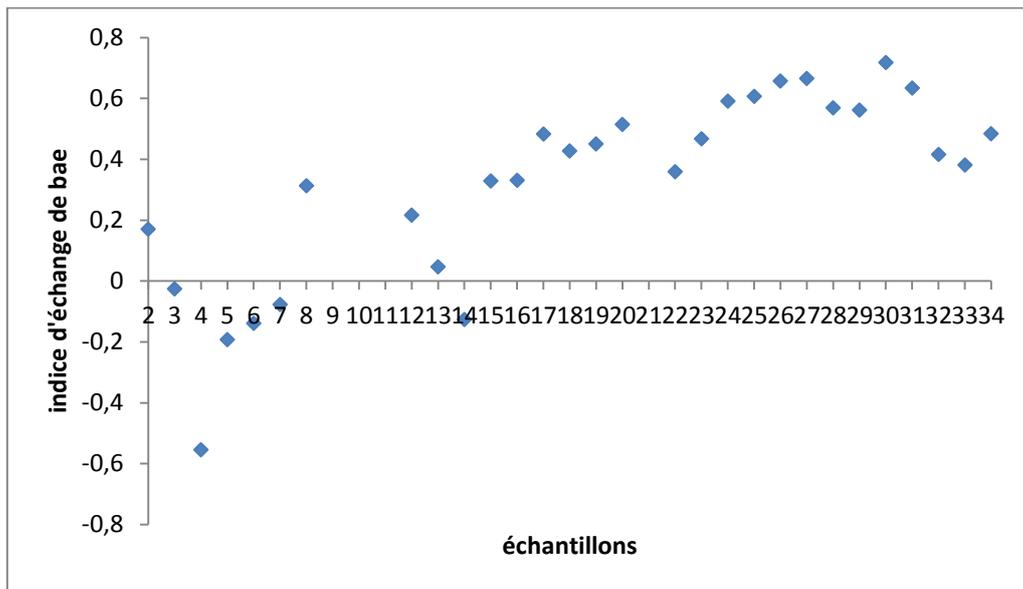


Figure 38 : Valeurs des indices d'échange de base.

Pour la nappe du complexe terminale dans la région d'El-Meita les eaux ont des indices d'échange de base qui varient entre -0,554 et 0,717.

La majorité des échantillons ont des valeurs positives de l'i e b indiquant alors que les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes. Cela confirme les résultats trouvés en étudiant les diagrammes binaires élément et chlorure.

6- Indice de saturation :

L'étude thermodynamique est réalisée à l'aide du logiciel Diagramme pour calculer l'indice de saturation (SI) de l'anhydrite, l'aragonite, la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite, qui sert à évaluer les processus géochimique qui sont à l'origine de la minéralisation (**fig. 39**), il utilise l'équation définie par (**Chapelle, 2001**) :

$$\text{IS} = \log \left(\frac{\text{IAP}}{\text{K}} \right)$$

Ou : IAP : le produit de l'activité ionique de la solution.

K : constante d'équilibre thermodynamique

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

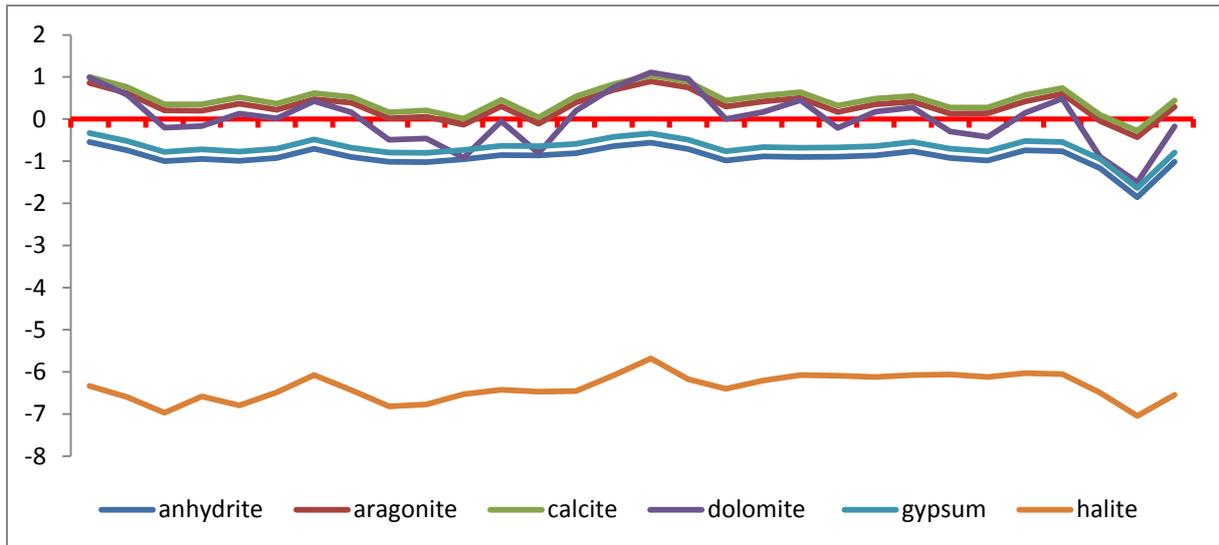


Figure 39 : Variation de l'indice de saturation dans les eaux de la plaine d'El-Meita

Les eaux d'El-Meita sont saturées à sursaturées par rapport aux minéraux carbonatés (calcite, dolomite et aragonite) avec précipitation du calcium et sous saturées par rapport aux minéraux salifères avec dissolution de minéraux évaporitiques et apport de sulfates et sodium.

Le calcium et le magnésium augmentent surtout avec le sens d'écoulement des eaux du fait de l'enrichissement de l'écoulement en minéraux carbonatés et de l'apport des alcalino-terreux par fixation des alcalins.

Nous pouvons suggérer que les minéraux carbonatés tendent à précipiter, alors que les minéraux évaporitiques salifères tendent à la dissolution.

7. Etude statistique :

Introduction

Comme déjà expliqué dans la partie méthode de travail, l'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des « variables » quantitatives (température, CE, pH, TDS, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- et NH_4^+) disposées en colonnes.

L'analyse des composantes principales (ACP) des données chimiques est établie à l'aide du logiciel XLSTAT pour l'ensemble des 29 échantillons sur 14 variables.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

7.1- Matrice de corrélation :

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations (**Fekrache, 2015**).

Des corrélations fortes entre la minéralisation (CE) et le calcium, les bicarbonates et les sulfates (**Tab, 11**), qui signifient que ces éléments participent fortement dans la minéralisation des eaux. Ces données nous mènent à dire que si la minéralisation est estimée par un seul élément il sera le calcium, si on veut rajouter un deuxième ils seraient les sulfates après le calcium.

Tableau 11. Matrice de corrélation

Variables	T °C	CE	Ph	TDS	K	Na	Ca	Mg	HCO3	NO3	Cl	SO ₄	NO ₂	NH ₄
T °C	1													
EC	0,387	1												
Ph	0,273	0,829	1											
TDS	0,052	0,624	0,568	1										
K	-0,410	0,194	0,194	0,329	1									
Na	0,584	0,812	0,660	0,351	0,132	1								
Ca	0,359	0,970	0,830	0,648	0,186	0,768	1							
Mg	0,591	0,848	0,766	0,494	0,000	0,734	0,829	1						
HCO3	0,406	0,955	0,829	0,527	0,142	0,810	0,954	0,842	1					
NO3	0,206	0,175	-0,028	0,023	0,222	0,364	0,092	-0,004	0,112	1				
Cl	0,169	0,765	0,518	0,485	0,131	0,580	0,721	0,623	0,597	0,138	1			
SO ₄	0,448	0,891	0,751	0,597	0,161	0,747	0,902	0,783	0,925	0,156	0,463	1		
NO ₂	0,174	0,480	0,218	0,208	0,060	0,620	0,454	0,258	0,484	0,454	0,398	0,406	1	
NH ₄	0,057	0,337	0,311	0,126	0,399	0,347	0,372	0,241	0,452	0,151	-0,102	0,532	0,283	1

Les valeurs en gras ont des corrélations significatives

Le calcium présente de corrélation positive avec les sulfates, les bicarbonates, le magnésium, le chlore et le sodium, la corrélation entre ces éléments indiquent l'existence des réactions d'échange ionique entre la solution et le complexe adsorbant (argile généralement)

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

7.2- Analyse en composantes principales (ACP)

Le tableau suivant montre la corrélation entre les variables et les facteurs :

Tableau 12. Corrélation entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4
T °c	0.462	-0.677	0.322	0,237
CE	0.981	0.003	-0.072	-0,087
pH	0.839	0.019	-0.301	0,102
TDS	0.629	0.251	-0.378	-0,240
K	0.197	0.873	-0.066	-0,057
Na	0.870	-0.102	0.324	-0,011
Ca	0.968	0.020	-0.136	-0,026
Mg	0.874	-0.285	-0.165	0,086
HCO₃	0.963	-0.011	-0.039	0,122
NO₃	0.207	0.218	0.788	-0,263
Cl	0.696	-0.073	-0.134	-0,596
SO₄	0.921	0.035	-0.015	0,241
NO₂	0.523	0.121	0.587	-0,254
NH₄	0.411	0.494	0.228	0,669
% variability	53.698	12.059	10.954	8,233
Cumulated %	53.698	65.757	76.710	84,943

Dans tableau (**Tab. 16**) les résultats indiquent 4 facteurs significatifs qui représentent 85 %, le premier facteur F1 compte 53,7 % de la variance totale, le facteur 2 avec 12,06 %, le troisième facteur avec 10,95 % et le quatrième facteur avec 8,23 %.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

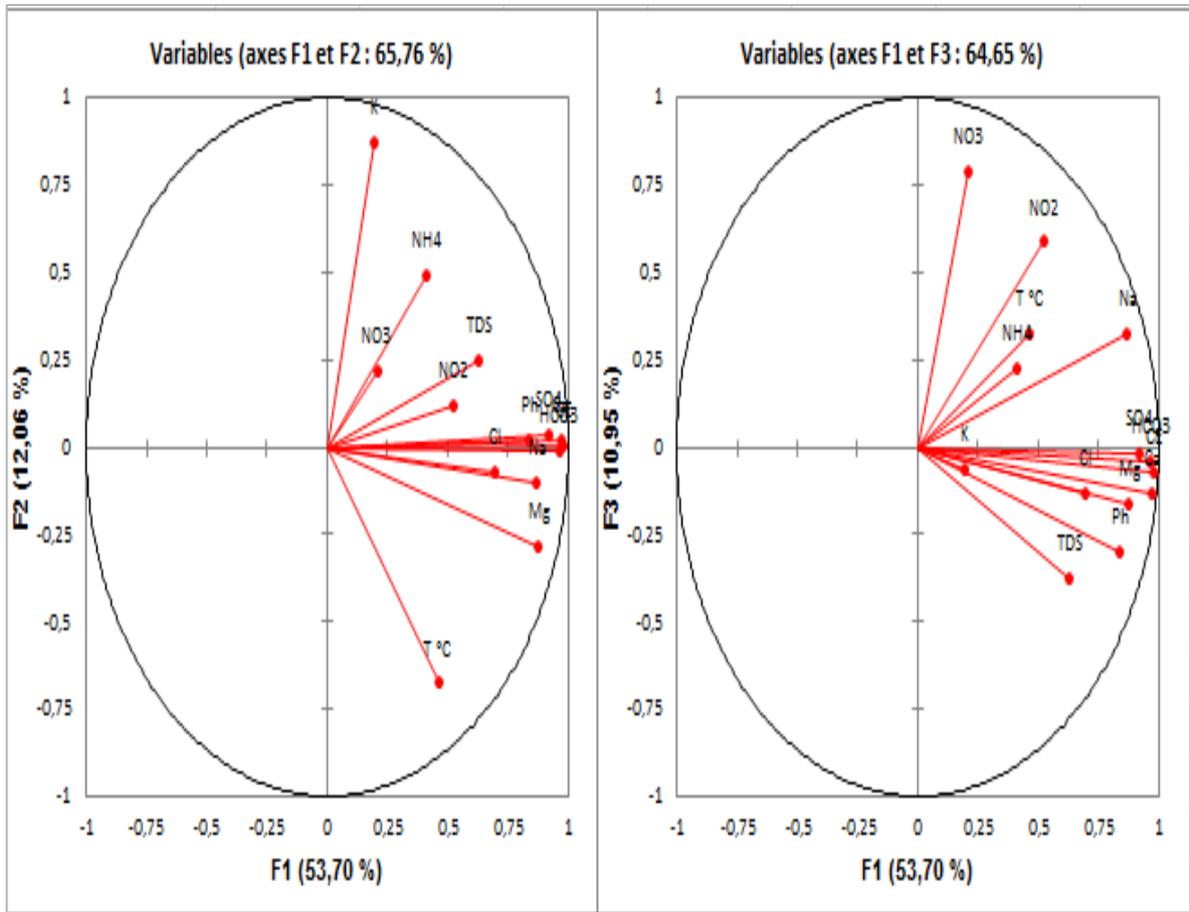


Figure 40 : Distribution spatiale des variable – facteur F1, F2 et F1, F3.

L'axe F1 apparait comme axe de minéralisation, il est défini par la salinité et les éléments Ca, Na, Mg, Cl, HCO₃ et SO₄ qui participent dans la minéralisation des eaux de la plaine et qui provient des évaporites. L'axe F2 montre que les eaux riches en K et NH₄ s'opposent avec les eaux à forte température, cela signifie que ces éléments proviennent principalement de l'apport anthropique et non par la dissolution des minéraux et que la pollution ne touche pas les eaux profondes.

Le troisième axe F3 est interprété comme facteur de contamination, il contient les nitrites (NO₂) et nitrates (NO₃) qui s'opposent à la salinité. Ces éléments sont présent dans l'eau par le bais des phénomènes de dénitrification et nitrification. Ces éléments n'ont aucune influence sur la minéralisation des eaux souterraines de la plaine. Le quatrième axe F4 montre que le Chlore est opposé à l'ammonium ; cela indique que la présence du Chlorure est due à la dissolution de l'halite alors que l'ammonium est un élément de pollution.

II - Géochimie isotopique :

1- Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ dans les eaux souterraines du bassin d'El-Meita

Pour cette étude, nous avons repris et utilisé les résultats des analyses isotopiques des travaux de recherche des études antérieures menés, dans le massif des Aurès, dans l'Atlas saharien (Houha, 2016), et dans le bassin sédimentaire du Sahara nord-est septentrional dans la zone des Chotts Melghigh-Merouan (Moulla, 2002 et 2005). Les teneurs en isotopes stables présentent une large gamme de variation compte tenu du contraste climatique dans la région d'étude, Atlas saharien au nord avec son relief élevé et son extension, au sud, vers le bas Sahara, de la grande superficie du bassin et des variations lithologiques de la formation aquifère.

Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^2\text{H}$ varient respectivement entre $-5,9$ et $-4,9\text{‰}$ et entre -49 et -47‰ vs SMOW (Moulla, 2005) dans l'aquifère du Complexe Terminal au sud, et entre -9 et $-7,56\text{‰}$ vs SMOW pour $\delta^{18}\text{O}$ et entre $-55,9$ et $-50,5 \text{‰}$ vs SMOW pour $\delta^2\text{H}$ (Houha, 2016) dans les affleurements calcaire de l'aquifère du Crétacé au nord du bassin. L'écart des teneurs isotopiques pourrait bien résulter du contraste climatique et de l'effet d'altitude, relief-Sahara (en parcourant 100 km à vol d'oiseau, dans notre terrain d'étude, nous passons de l'altitude 2328 m (Dj. Chélia, massif des Aurès) au nord, à -35 m d'altitude aux abords des Chotts, Melghigh et respectivement, d'un climat tempéré neigeux à un climat aride et sec).

2- Interprétation du Diagramme $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$

Sur le diagramme $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ (fig. 41), On a reporté les résultats des analyses isotopiques (Moulla, 2005) et (Houha, 2016), où on a positionné la droite météorique mondiale des précipitations d'origine océanique (DMM) d'équation : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961), et la droite des eaux météoriques pour la Méditerranée occidentale (DMMO), d'équations $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 13.7$ (Helene Celle, 2000).

Deux groupes de points bien individualisés, distincts et discontinus se dégagent de cette représentation.

Le premier groupe de points représentatifs des eaux souterraines des calcaires Crétacé prélevées dans le massif des Aurès, appauvris en isotopes lourds, s'alignent à proximité des droites, DMM et DMMO, Ce qui laisse présager que les eaux souterraines ont pour origine les précipitations qui n'ont subi aucun fractionnement isotopique après les condensations qui les ont générés et ce sont directement infiltrées durant la période humide froide à la faveur

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

d'intenses fracturation des affleurements calcaires (Houha, 2016). Le caractère appauvri des eaux de la source de Chélia est bien significatif et serait induit par l'effet d'altitude (Bahir et al., 2007 et Houha 2016). ; Puisque, la composition isotopique des précipitations devient de plus en plus appauvrie en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ avec l'élévation du relief. L'effet d'altitude concorde assez bien avec le relief des Aurès dont Dj. Chélia culmine à 2328 m.

La disposition des points à proximité des deux droites, DMM et DMMO, suggère que ces précipitations sont générées par des nuages par vaporisation mixte des eaux, méditerranéenne et océanique.

Le deuxième groupe de points s'écartent de façon significative de la DMM et rassemble les eaux souterraines ayant subi un enrichissement très important en $\delta^{18}\text{O}$. Ces eaux sont représentées par les échantillons recueillis au sud du bassin et prélevées dans l'aquifère du complexe terminal aux abords du Chott Melghigh. En climat semi-aride ou aride, il y a de fortes chances qu'elles s'évaporent. Le caractère homogène et évaporé des eaux du C.T. peut être expliqué par une alimentation ancienne à partir des eaux de pluies ayant subi des modifications de leur composition isotopique au cours de l'aridité du Sahara Nord-est septentrional (Moula, 2002).

On peut en déduire de cette étude que l'origine des eaux est différente et qu'il s'agit de deux systèmes hydrogéologique différents et discontinus : Dans le premier groupe l'alimentation est assurée par les eaux de pluie récentes sans fractionnement isotopique et dans le second groupe, il s'agit d'eau ancienne qui n'a subi aucun renouvellement.

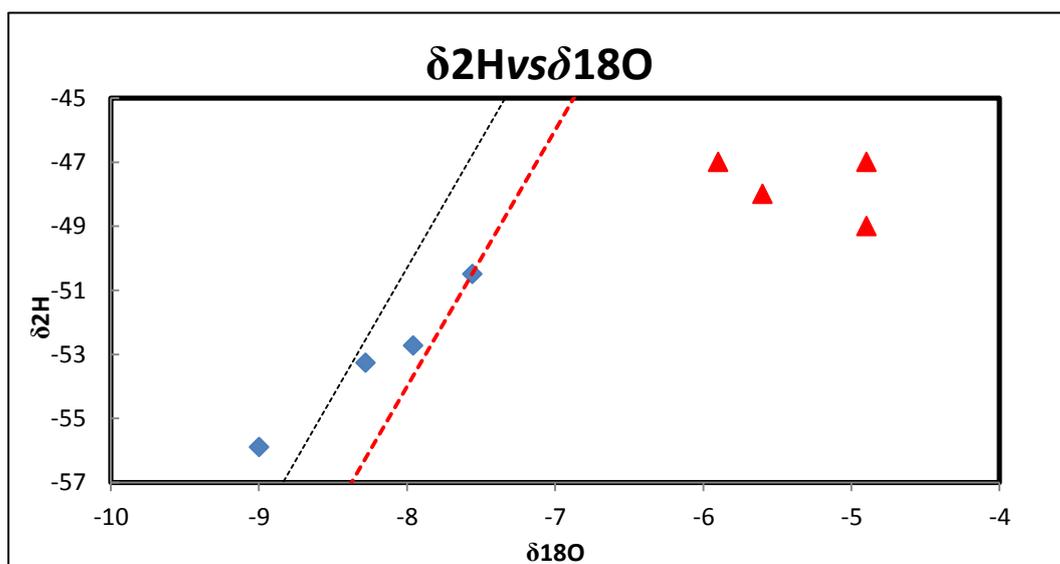


Figure 41: Relation 2H vs 18O des eaux des aquifères du massif des Aurès et la plaine d'El-Meita d'après les résultats de Moula 2005 et Houha 2016

III – Etude des éléments de la pollution et de la vulnérabilité:

1- Aptitude des eaux a l'irrigation

Dans la région d'El-Meita l'irrigation est assurée par les forages de la nappe plio-quaternaire, la salinisation et l'alcalinisation des eaux sont les principaux risques qui peuvent encourir les eaux destinées à l'irrigation. Pour cela nous avons utilisé le diagramme de Riverside and Wilcox (**Ricchards, 1957**) qui combine entre la conductivité électrique et le SAR (Sodium Absorption Ratio) pour évaluer ces deux derniers risques (**fig. 42**). Le sodium absorption ratio (SAR) est calculé par la formule suivante :

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

- 1- Les résultats obtenus dans les deux diagrammes Riverside et Wilcox montrent que les eaux de la région d'El-Meita sont classées dans deux groupes :
 - 1- C3S1 : des eaux de qualité médiocre suite à leurs concentrations élevées en CE regroupe les eaux qui se trouvent à l'amont de la région, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. Le contrôle de la conductivité doit être permanent dans le centre de la plaine et les eaux de sources.
 - 2- C4S1 : des eaux de mauvaise qualité, ça concerne les eaux de la région sud en aval et la région d'affleurement à la limite nord de la plaine ou les concentrations en conductivité électrique sont très importantes. Ces eaux pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux de la région ne conviennent qu'à l'irrigation de certaines plantes tolérantes au sel.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

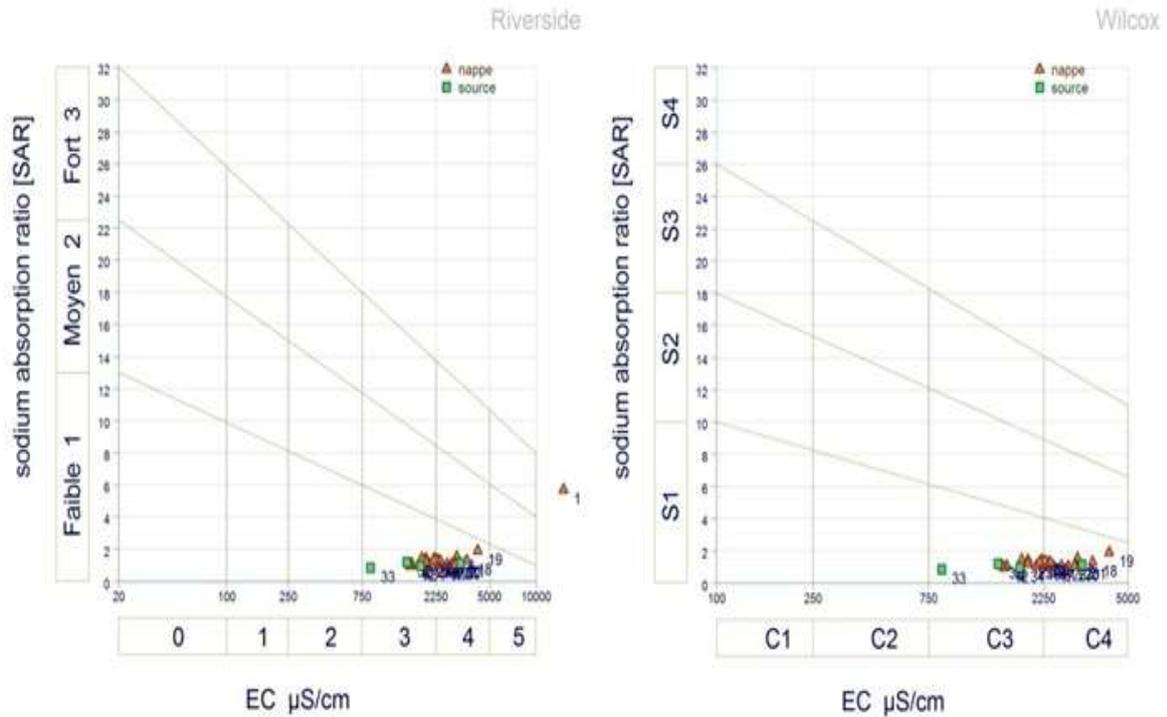


Figure 42 : Diagramme de Riverside et Wilcox des eaux de la plaine d'El-Meita (SAR)

2- Pollution agricole

Chaque année une quantité importante d'engrais est utilisée dans la zone d'El-Meita, 16000 quintaux de TSP 46 % et 20000 quintaux de l'Urée 46% sur une superficie irriguée de 70500 ha d'après (DSA Khenchela, 2015). 30 – 70 % d'engrais azoté sont perdu sous forme de ammoniac(NH₃) et oxyde nitreux (N₂O) dans l'atmosphère (Silvan, 2002) et sous forme de nitrate (NO₃) dans la surface et dans les eaux souterraines. Cette nappe est très vulnérable à la pollution vue ça texture sableuse très filtrante à l'alimentation par les eaux superficielles (pluies, retour d'eau d'irrigation et par les oueds temporaires).

Les métaux lourds, plus particulièrement le Plomb, le Zinc et le Cuivre, font partie des cas de pollution représentant un problème environnemental majeur. Ils peuvent migrer dans les eaux souterraines, s'accumuler dans la chaîne alimentaire et présenter des risques pour la santé humaine (Jourdan, 2005). Les sources anthropiques d'émissions de substances métalliques sont principalement dues à l'intensification des activités urbaines, agricoles ou industrielles (Gremion, 2003). Des fortes concentrations en métaux lourds et des polluants organiques dans le sol peuvent être alors accumulés par l'organisme humain qui provoque le cancer, dans notre étude la majeure source des métaux lourds c'est les engrais chimiques.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

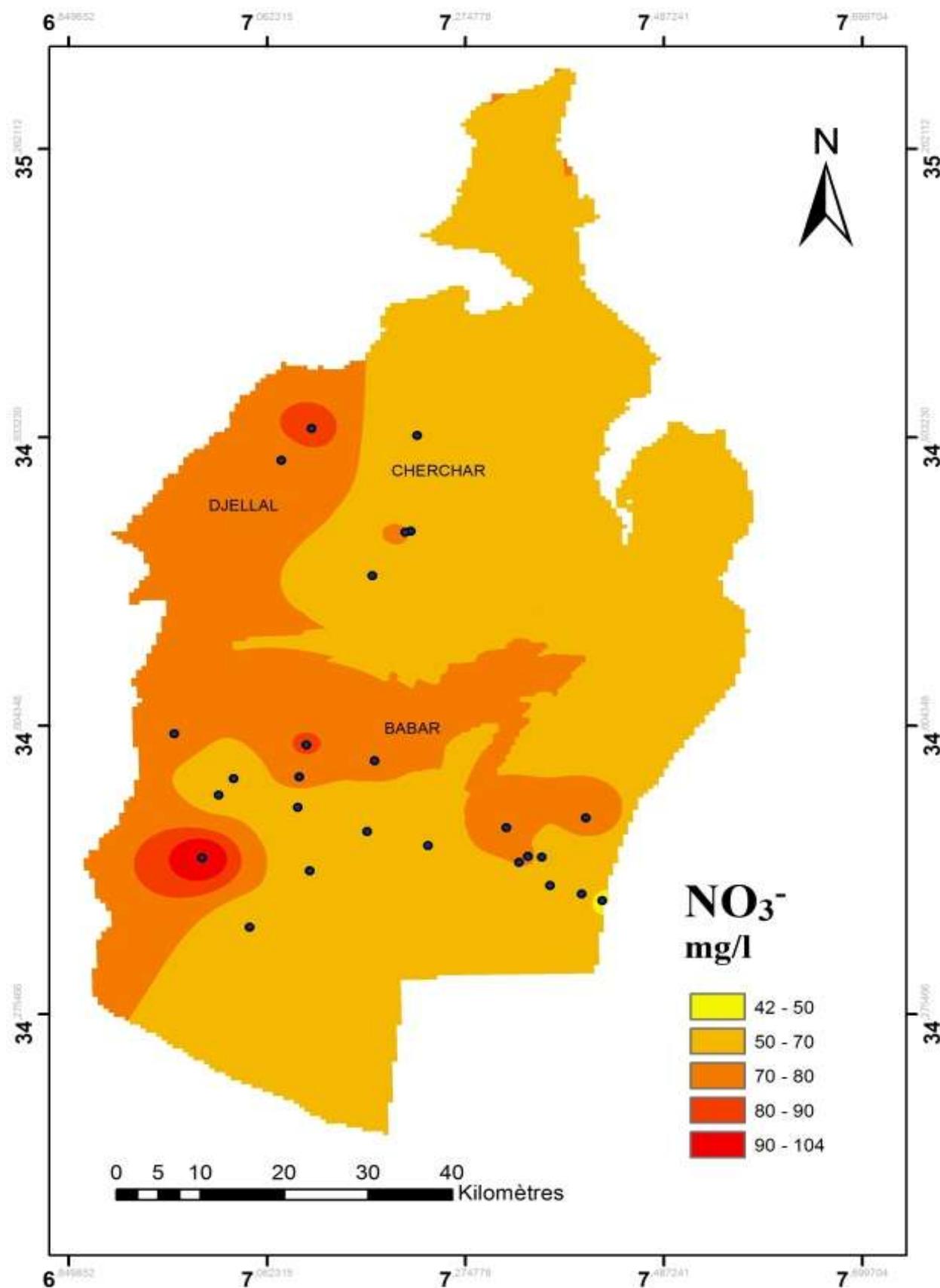


Figure 43 : Carte de concentration du NO₃⁻

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

2.1- les nitrates (NO₃⁻):

L'origine de la contamination par les nitrates est l'utilisation excessive des engrais chimiques et favorisé par la nature sableuse du sol, la concentration augmente suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines du nord-est vers le sud-ouest ou la concentration atteint son maximum 103,53 mg/l (**fig. 43**). Les concentrations élevées qui dépassent les normes pour les eaux de source localisées au nord de la zone d'étude au pied du des montagnes sont le résultat d'une contamination par des polluant agricoles. Cette contamination est dû au maraichage, à l'arboriculture et à l'élevage intensif sur des parcelles d'extension limitée, en altitude, ou les paysans utilisent des engrais chimiques.

2.2- Les nitrites (NO₂⁻)

L'ion nitrite est le résultat de la dénitrification de l'azote minérale, par réduction des nitrates en nitrites grâce aux bactérie hétérotrophes anaérobie, selon la séquence : NO₃-NO₂-N₂O, peut être présent à l'état de trace dans les eaux souterraines ou se former dans les canalisations où la corrosion est importante, pour les échantillons mesurés la concentration est entre 0,005 et 0,917 mg/l avec une moyenne de 0,05 mg/l (**fig. 44**), l'anomalie s'observe juste pour le point P16 avec une concentration de 0,917 mg/l qu'on explique par la corrosion des canalisations remarqué lors de la collecte de cet échantillon.

2.3- Les métaux lourds :

Comme indiqué dans le tableau (**Tab, 13**), les métaux lourds analysés dans cette étude sont Pb, Zn, Cd, Cu et Hg. Les concentrations obtenus sont divisés par 2 groupes, le premier du Plomb avec des concentrations qui dépassent les normes fixés par l'OMS 10 µg/L dans la majorité des échantillons (8.68 à 32.57 µg/l) ces fortes concentrations sont généralement dû à l'activité industrielle, aux rejets domestiques et a l'élevage intensive. Le deuxième groupe englobe le reste des éléments (Zn, Cd, Cu et Hg) ou les concentrations sont toujours au-dessous de normes recommandées par l'OMS.

Tableau 13. Résultats des analyses des indicateurs de pollution

Parameters	Units	Minimum	Maximum	Mean	SD (écart type)	oms normes
Pb	(µg/L)	8.68	32.57	15.87	4.99	10
Zn	(µg/L)	19.23	70.71	49.97	13.13	3x10 ³
Cd	(µg/L)	ND	0.21	0.15	0.04	3
Cu	(µg/L)	12,59	102,21	62.15	21.5	2x10 ³
Hg	(µg/L)	ND	0,06	0.033	0.015	1

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

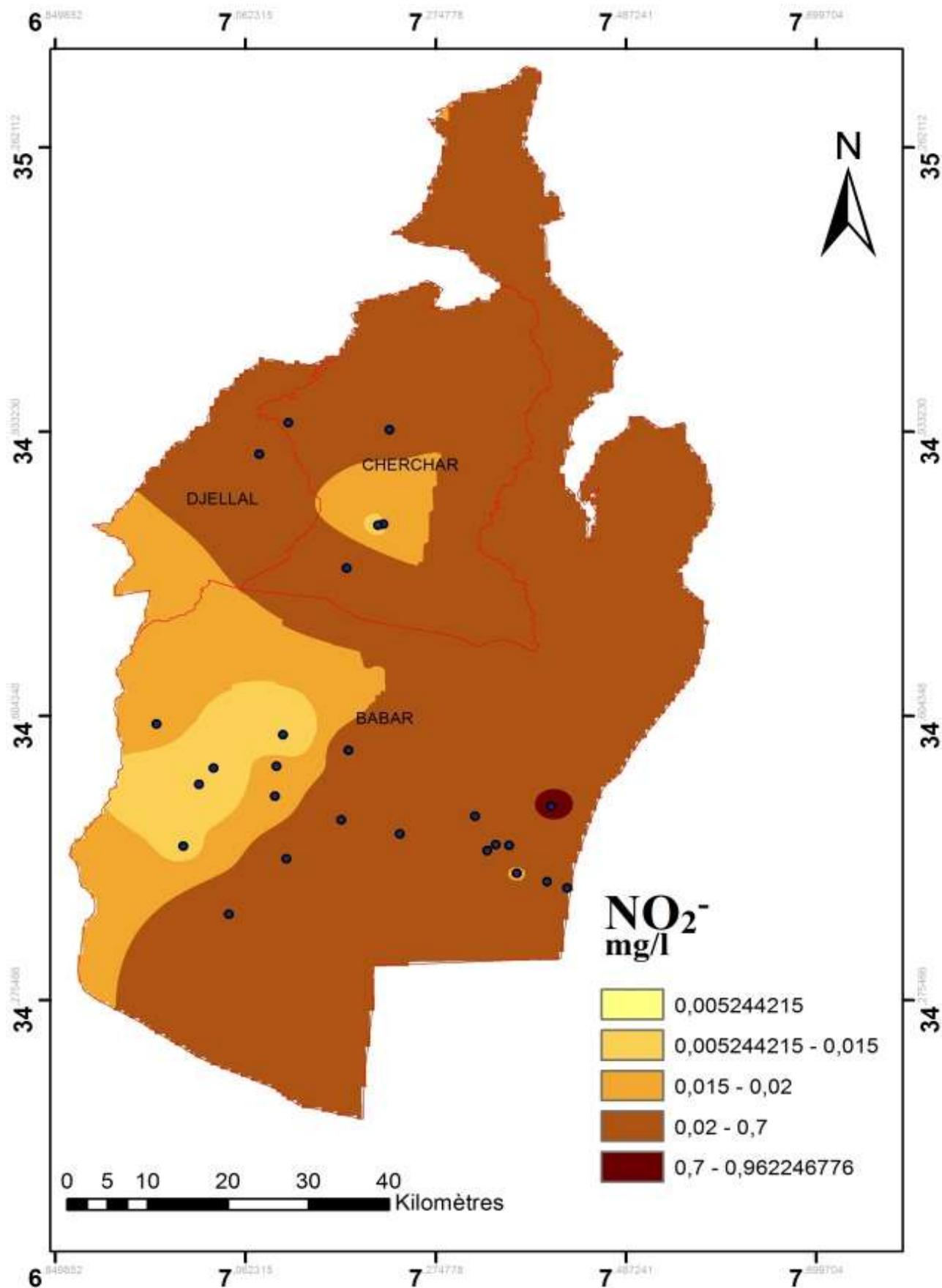


Figure 44 : Carte de concentration des nitrites NO_2^-

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

2.4- l'ammonium NH_4^+

L'ensemble des mesures enregistrées pour l'ammonium présentent des valeurs faibles et ne dépassent pas la concentration recommandée par l'OMS 0,2 mg/l, les concentrations sont entre 0,013 et 0,099 mg/l.

3- La vulnérabilité de la nappe :

3.1- Préparation des données :

Les cartes des différents paramètres pris en compte pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité verticale à la pollution de la nappe ont été choisies à la même échelle.

3.2 - Digitalisation :

Chaque paramètre a été digitalisé (Arcmap 10.3) et sauvegardé, l'ensemble des données digitalisées constitue la base de données nécessaire pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité

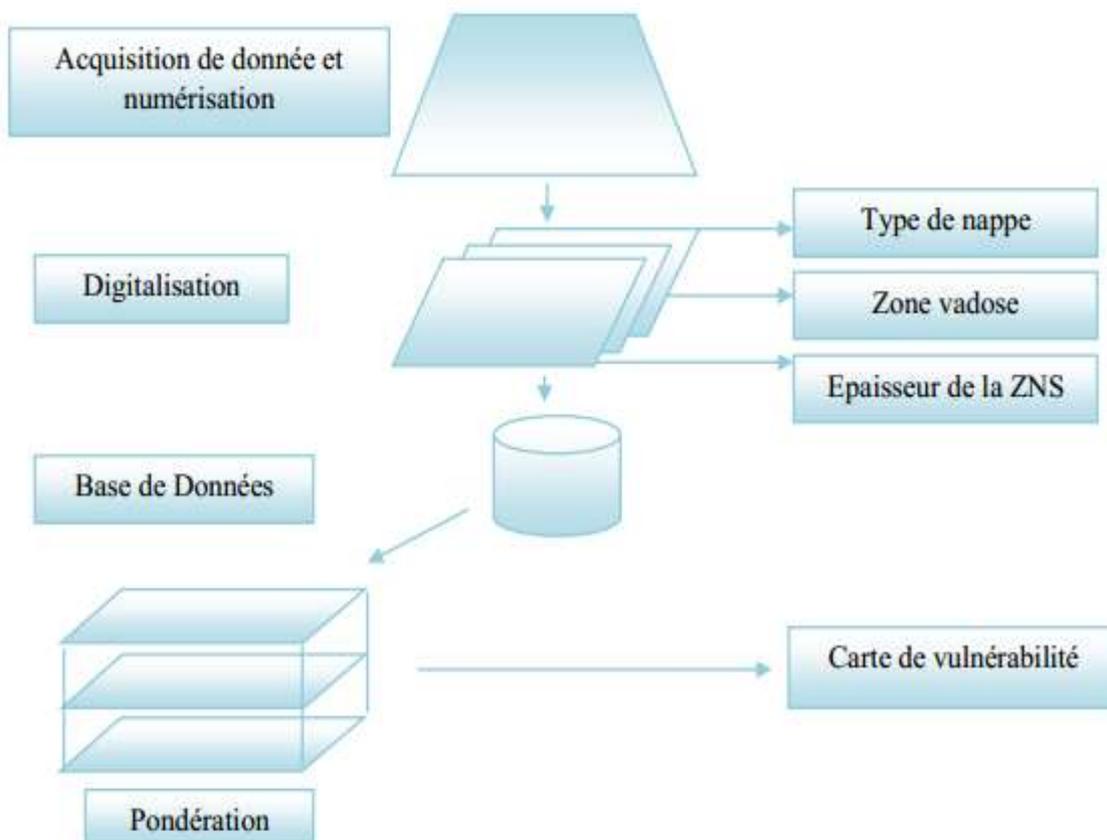


Figure 45 : méthode utilisée pour la réalisation de la carte de vulnérabilité

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

3.3- Profondeur de la nappe :

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique. Pour la nappe d'El-Meita, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés piézométriques. Les résultats pour les indices de la méthode GOD sont présentés dans le tableau (Tab. 14).

Tableau 14 : indice des paramètres calculés selon GOD.

N = °	Type de l'aquifère	Indice de nappe	Facteurs géologiques	Indice de profondeur	GOD
2	Semi libre	0,5	0,5	0,6	0,15
3	Semi libre	0,5	0,5	0,5	0,125
4	Libre	1	0,6	0,4	0,24
5	Libre	1	0,6	0,4	0,24
6	Libre	1	0,6	0,4	0,24
7	Libre	1	0,6	0,4	0,24
8	Libre	1	0,6	0,4	0,24
12	Libre	1	0,6	0,5	0,3
13	Libre	1	0,6	0,4	0,24
14	Libre	1	0,6	0,4	0,24
15	libre	1	0,6	0,4	0,24
16	Libre	1	0,6	0,4	0,24
17	Libre	1	0,6	0,5	0,3
18	Libre	1	0,6	0,5	0,3
19	libre	1	0,6	0,4	0,24
20	Libre	1	0,6	0,4	0,24
22	Semi libre	0,5	0,4	0,4	0,08
23	Semi libre	0,5	0,4	0,4	0,08
24	Libre	1	0,6	0,4	0,24
25	Libre	1	0,6	0,4	0,24
26	Libre	1	0,6	0,4	0,24

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

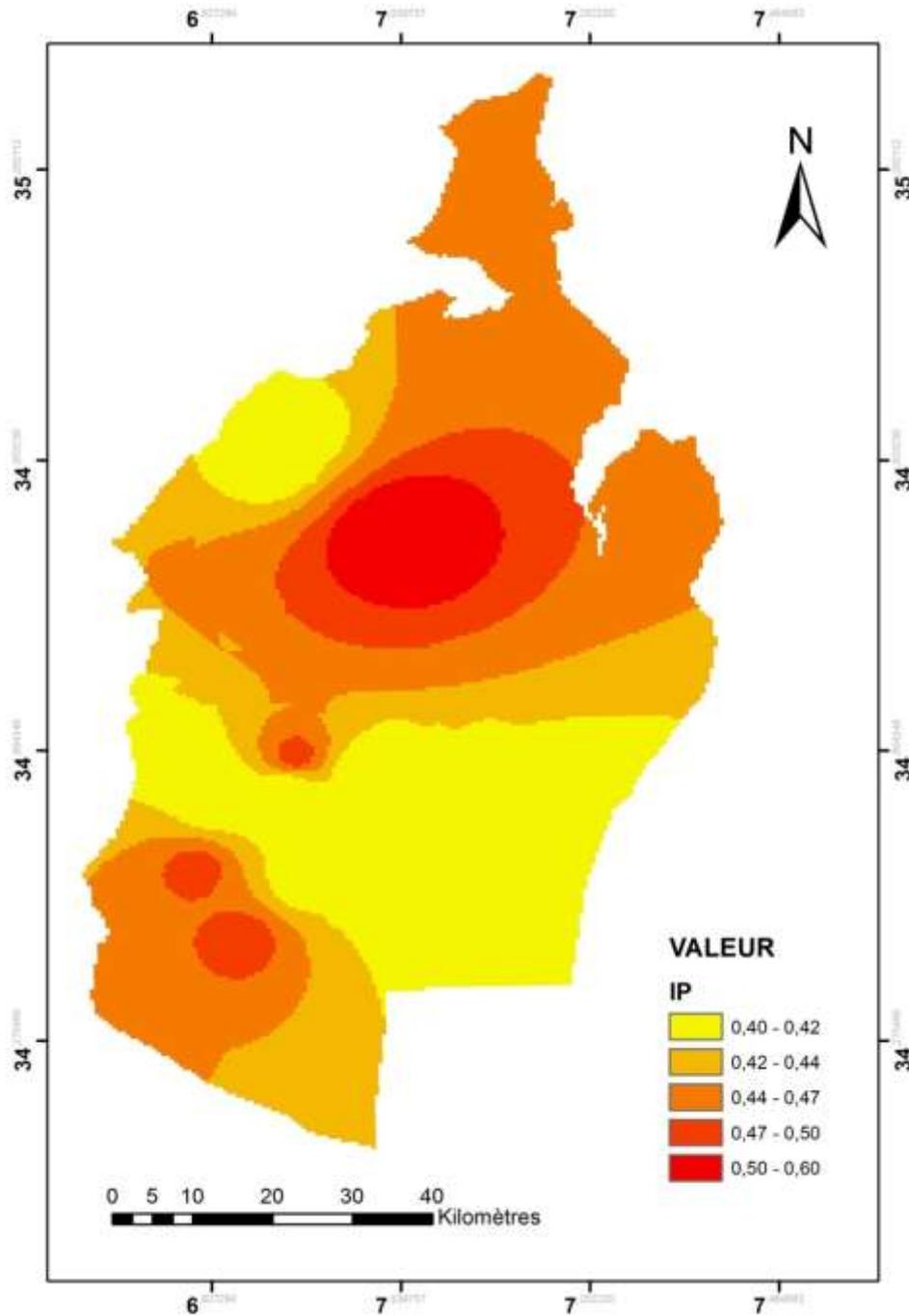


Figure 46 : carte des indices de la profondeur de la nappe

La carte des indices de la profondeur de la nappe d'El-Meita (**fig. 46**) ; montre que la profondeur de la nappe augmente du nord au sud. La profondeur est entre 50 et 200 mètres, ces profondeurs ont un indice faible dans le système empirique d'évaluation de GOD qui est entre 0,4 et 0,6. On observe aussi une profondeur faible au sud-ouest à proximité du Chott.

4.3- la nature de la zone non saturée :

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants. Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent. La percolation des contaminants jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette lithologie est favorable (Zair nadjjet, 2014).

Pour la nappe d'El-Meita, la zone non saturée est composée essentiellement des siltés alluvions et des sables alluvions. L'indice de la nature géologique est moyen pour ces sols ; ces derniers permettent un passage plutôt facile pour les pollutions vers la nappe.

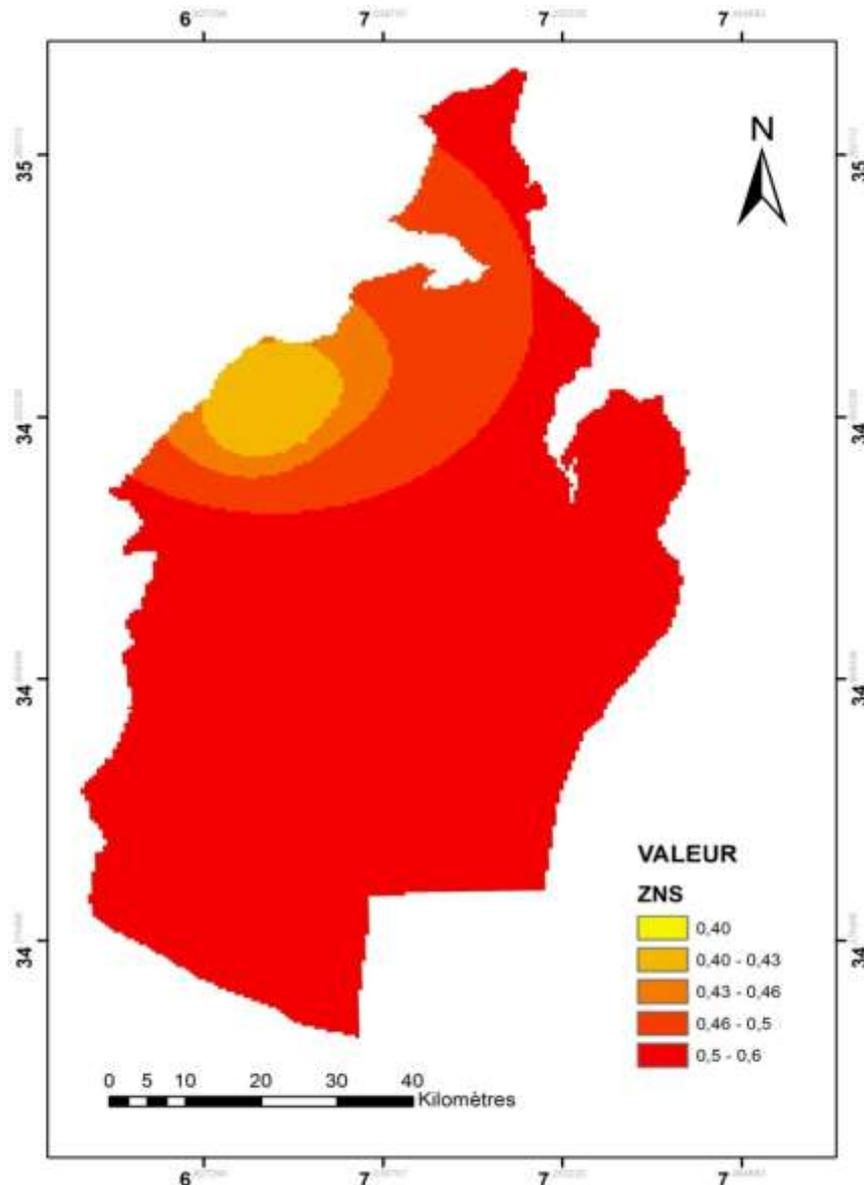


Figure 47 : carte des indices de la lithologie de la zone non saturée

5.3- Profondeur de la nappe :

Ce paramètre désigne le type de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe.

L'observation de la carte d'indice de la nappe montre que les indices les plus faibles se situent au sud dans la plaine (**Fig, 48**), la nappe est libre (indice de nappe égale à 1). Pour la région nord la nappe est semi-libre.

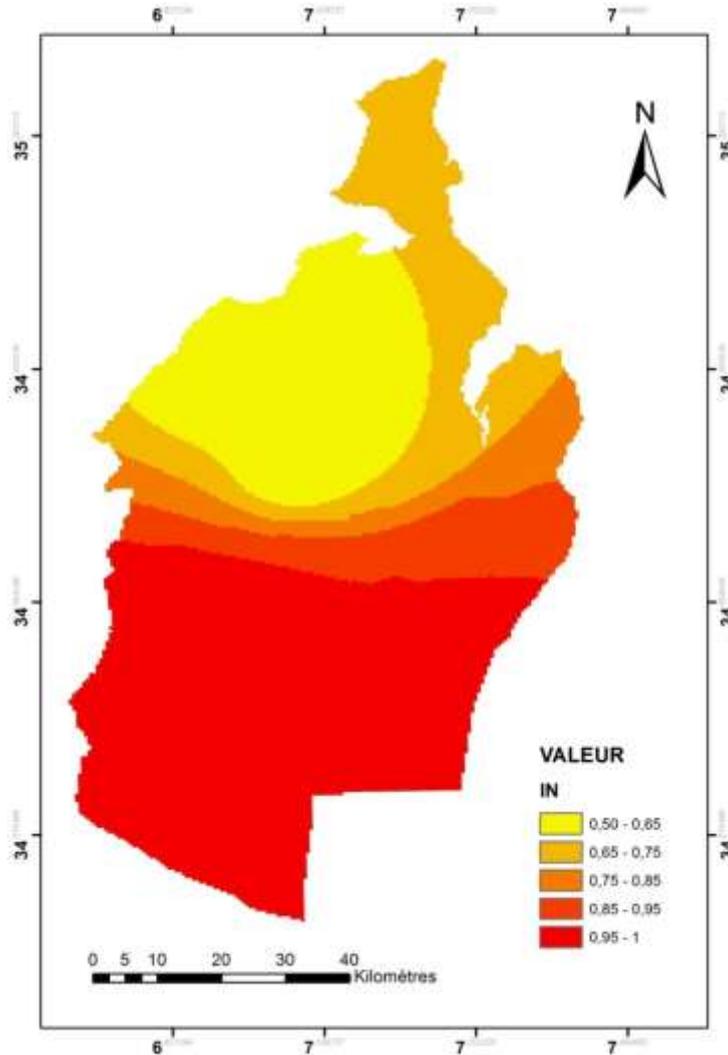


Figure 48 : carte des indices de la nature de la nappe.

6.3- Carte de la vulnérabilité GOD :

L'analyse de la carte de vulnérabilité (**Fig, 49**), établie à l'aide du modèle GOD, a permis de distinguer deux classes de vulnérabilité différente . Cet indice de vulnérabilité est compris entre 0,08 et 0,3. Ces deux zones répartissent dans la zone comme suit :

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- La première zone de vulnérabilité négligeable qui représente 3,2 % de la zone, elle occupe le nord-ouest de la zone en bas des montagnes de l'Atlas saharien. Ceci correspond à la nature lithologique de la nappe semi captive.
- La deuxième partie à faible vulnérabilité s'étend du nord-est au sud de la plaine et représente 96,8 % de la région. Cela est expliqué par la nature libre de la nappe sableuse et la profondeur élevée.

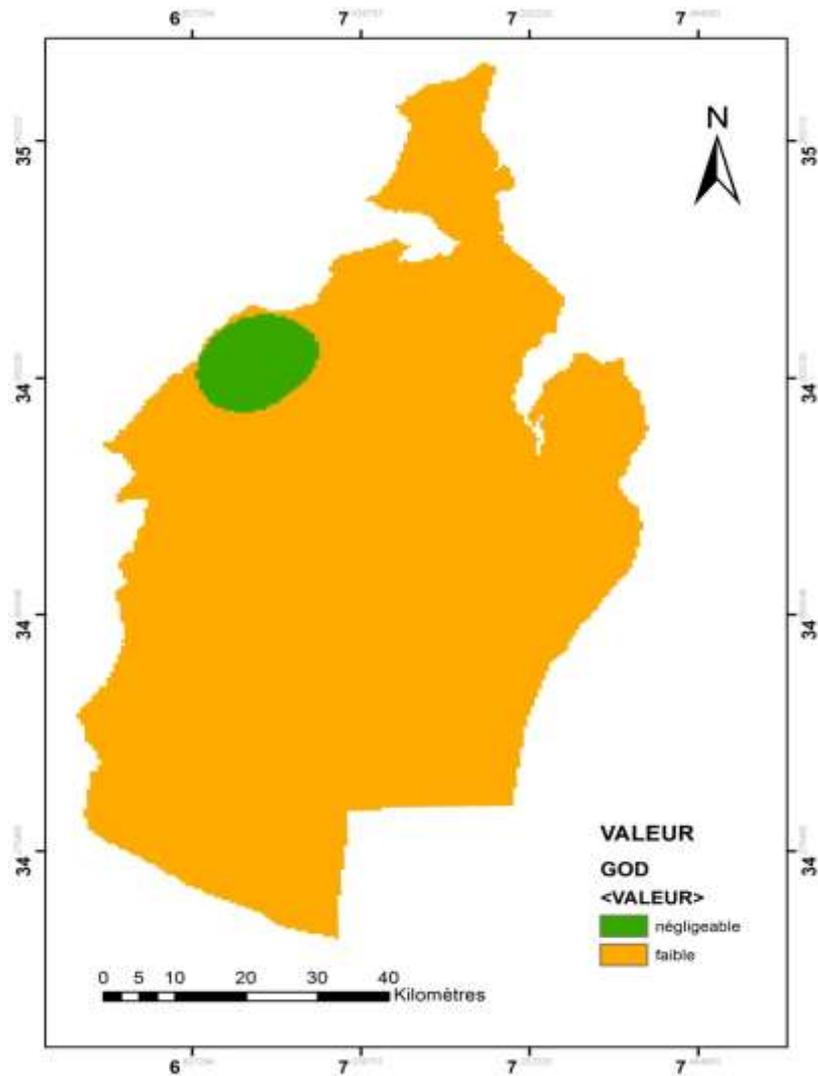


Figure 49 : carte de la vulnérabilité de la zone par la méthode GOD.

On comparant les résultats obtenus par la méthode de GOD, pour la vulnérabilité de la plaine d'El-Meita avec la carte de distribution spatiale du nitrate. Nous concluons que la méthode de God ne représente pas vraiment la réalité de la pollution de la nappe, qui est contaminer par les nitrates provenant de l'activité agricole. Nous recommandons l'utilisation d'une autre méthode plus significative pour mettre le point sur la vulnérabilité de la nappe du complexe terminal d'El-Meita.

Conclusion générale et perspective

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

La plaine d'El-Meita localisé dans le sud de la wilaya de Khenchela au nord-est de l'Algérie, se trouve approximativement entre les latitudes 34°30' à 35°00' N altitude et 6°78' a 7°30' E longitude, au sud de l'atlas saharien et au nord du Chott Melghigh. La plaine d'El-Meita couvre environ 2350 km². Avec des latitudes qui varient entre 1248 et -12 m du nord-est ou sud-ouest.

La zone étudiée a un climat aride à semi-aride, les températures maximales sont enregistrés entre Mai et Octobre et les plus faible en hiver atteignent 5°C et avec une moyenne annuelle de 22°C. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 200 mm (climat semi-aride) au nord et 60 mm au sud (climat aride).

Les principaux oueds qui drainent la plaine sont : oued Mehane, oued Ouzzern et oued El-Meita. D'aspect temporaire, ils prennent naissance dans le nord pour se jeter dans la la plaine sous forme de Nfidha. L'activité principale de la région est l'agriculture spécialement la culture des céréales (blé, orge et farine) qui utilise les eaux souterraines comme unique source d'irrigation.

Les forages utilisés pour l'irrigation ont des profondeurs qui variées entre 30 et 200 m, ils sont implanté tous dans la nappe du complexe terminal du plio-quadernaire. L'étage plio-quadernaire qui est composé d'alluvions constitué de graviers, sables et argiles avec une épaisseur qui atteint 525 m constitue la première nappe du complexe terminal repose sur une couche de marne imperméable.

L'investigation multiforme de l'étude géophysique réalisée, nous a permis de mettre en évidence deux horizons aquifères bien distincts :

- L'ensemble détritique Plio-quadernaire dans la partie septentrionale de la zone d'étude est constitué essentiellement par des graviers et des sables à matrice argileuse. l'épaisseur maximale mise en évidence des coupes géo-électriques est de 1000 m.
- Le complexe mio-pliocène se caractérise par son terme sommital marneux franc qui le sépare du plio-quadernaire.

L'ensemble Plio-quadernaire et le complexe Mio-pliocène sont séparés par un mio-pliocène sommital marneux, ce qui rend l'horizon mio-pliocène basal captif a artésien.

Les mesures effectuées pour le paramètre in-situ ont montré la température et le pH reste toujours sous les normes recommandées de l'OMS, pour la conductivité électrique et le

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

TDS les valeurs dépassent les normes dans la majorité des eaux ce qu'est en accord avec le faciès chimique chlorurée et sulfatée calcique qui représente les eaux hautement minéralisées.

Les diagrammes binaires élément-chlorure ont été réalisés dans le but de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux ; les résultats ont montrés que les eaux d'El-Meita retrouvent leur origine dans la dissolution et précipitation minérale, phénomène d'échange de base, la contamination par la pollution agricole et enfin à l'aridité du climat induisant des concentrations par évaporation.

Le calcul de l'IS des minéraux indiquent que les minéraux carbonatés (dolomite, calcite et aragonite) tendent à précipiter, alors que les minéraux évaporitiques salifères tendent à la dissolution.

L'étude isotopique des eaux du massif des Aurès et les eaux du bassin sédimentaire du complexe terminale a montré que l'origine des eaux est différente : Dans le premier groupe l'alimentation est assurée par les eaux de pluie récentes sans fractionnement isotopique et dans le second groupe, il s'agit d'eau ancienne qui n'a subi aucun renouvellement.

Les résultats obtenus après l'analyse en composante principale (ACP) montrent, la participation de plusieurs éléments dans la minéralisation des eaux de la plaine d'El-Meita spécialement le calcium, F2 et F3 sont interprétés comme facteur de contamination et F4 a montré que la présence du chlorure est due à la dissolution de l'halite.

L'analyse de tous les paramètres caractérisant la qualité des eaux a révélé que l'utilisation des engrais chimiques, l'irrigation excessive et la nature sableuse du sol ont facilité l'infiltration des polluants vers les eaux souterraines. Les résultats ont montré une contamination de la nappe phréatique par les NO_3^- et le Pb issus de l'activité industrielle. Le calcul du SAR a classé ces eaux en deux groupes ; i) eaux de qualité médiocre ii) eaux de très mauvaise qualité. Ces eaux parviennent à l'irrigation de certaines espèces qui résistent à la salinité. Selon GOD la vulnérabilité de la nappe est négligeable à faible.

Nous recommandons, un suivi permanent de la qualité des eaux de la région et surtout que l'utilisation des engrais chimiques, doit encore être plus contrôlée pour éviter la détérioration de cette nappe, qui présente la seule source en eau dans la région et qui contribue au développement agricole national. Une étude de la vulnérabilité avec une autre méthode est nécessaire vu la non-conformité de la méthode GOD avec le degré de la contamination de la région par les nitrates.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Références bibliographiques :

- **ANRH. (2004) :** Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Khenchela. Agence Nationale des Ressources Hydriques. Ouargla, Algérie.
- **Armines, Enit. (1984) :** Modèle mathématique du complexe terminal Nefzaoua – Djerid ; Min. Agr. Tunisie.
- **Baali, F. (2007) :** Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi-aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.
- **Bahir, M. Silva, M.O. Carreira, P. (2007) :** Ressources En Eau En Zones Semi-Aride, Etat Des Lieux: Cas Du Bassin d'essaouira (Maroc Atlantique), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- **Banton, O. Bangoy, L.M. (1999) :** Hydrogéologie multi sciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec; 460 p.
- **Bel F, Cuhe D (1969)** Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal ; ERESS ; Ouargla. Algérie.
- **BELKSIER, M.S. (2009) :** Thèse de magister, Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évaluation de sa vulnérabilité, Département des sciences de la terre. Université d'Annaba, p. 82.
- **Busson, G. (1970) :** Le mésozoïque saharien. 2^{ème} partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edition (centre recherche des zones arides).
- **Celle, H. Daniel, M. Mudry, J. Blavoux, B. (2000) :** Earth Planet. Sci. 647650.
- **Chapelle, F. (2001) :** Groundwater Microbiology And Geochemistry. John Wiley & Sons, Inc. NY.
- **Cornet, A. (1964) :** Introduction à l'hydrogéologie saharienne; Revue de géogr. phys. et de géol. dyn. (2), vol. VI, fasc. 1; 5-72.
- **Craig, H. (1961) :** Standarts for reporting concentration of deuterium and oxygene 18 in natural waters. Science, 133, 1833-1834.
- **Dansgaard, W. (1964) :** Stables isotopes in precipitation. Tellus, 16(4) : 436-468
- **Deghiche-Diab, N., Porcelli, F., Belhamra, M., (2015) :** Entomofauna of Ziban Oasis, Biskra, Algeria. Journal of Insect Science 15, 1–7.
- **Djebaili, S., (1984) :** Steppe algérienne, phytosociologie et écologie. OPU, Alger 159.
- **Drever, J. F. (1997) :** "The geochemistry of natural waters". 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC, p. 379.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- **DSA. (2013)** : direction des services agricoles, plan d'aménagement de la commune de Babar.
- **DUBIEF, J. (1963)** : Le climat du Sahara. Mém. Hors série. Institut Recherche Saharien, 2275p.
- **Duby, C. Robin S.** : Analyse en Composantes Principales, agroparistech.
- **Ehhalt, D., Knott, K., Nagel, J.F., Vogel, J.C., (1963)** : Deuterium and oxygen 18 in rain water. Journal of Geophysical Research 68, 3775–3780.
- **ERESS. (1972)** : Nappe du complexe terminal. OSS. Algérie.
- **F. Gremion, (2003)** : Analysis of microbialcommunity structures and functions in heavy metal contaminated soils using molecular methods, thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, p. 122.
- **Fabre, J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara algérien. SNED, ALGER ; Algérie. P. 422.
- **Fehdi, C. Boudoukha, A. Rouabhia, A. Salameh, E. (2009)** : Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien) Afrique Science, 05, no. 2, 2009, p. 217.
- **FEKRACHE, F. (2015)** : Thèse de Doctorat, contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba, Département de biologie. Université d'Annaba.
- **Fontes, J.Ch. (1976)** : Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. Quelques aspects, thèse de Doc. Des Sciences. Uni. De Paris VI.
- **Foster, SSD. (1987)** : Fundamental concepts in aquifer vulnerability,pollution risk and protection strategy. Proceedings and information in vulnerability of soil and ground-water to pollutants, vol 38. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, pp 69–86.
- **Gefli, (1978)** : Survey for the development of the central Wadi zone and golf of Sirte ; groundwater resources ; final synthesis report ; p 152 -418.
- **Geomath, (1994)** : Hydrogeological modelling of aquifers and well fields, Western Jamahirya System ; General water authority. Ref : AW-MI-579.
- **GOUSCOV, N. (1952)** : Le problème hydrogéologique du bassin artésien de l'Oued Rhir. In « La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie ». XIXème congrès géologique international T.II, 16p.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- **Guendouz, A. (1985)** : Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3ème cycle. Université de ParisSud, 243p.
- **Hamzaoui azaza, F. Bouhlila, R. Gueddari, M. (2012)** : Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques Geo-Eco-Trop., 36, 2012, p. 55.
- **Houari, I. (2012)** : contribution à l'étude de l'évolution géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional. Thèse de Doc. Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- **Houha, B. (2016)** : Apport des isotopes stables (^{18}O et 2H) dans l'identification de l'origine de la recharge des sources de l'atlas algérien. cas du massif des Aurès. Algérie. terre et eau 2016.
- **Idriss-Alami, I. Zeraouli, M. Addou, M. Mokhtari, A. Soulaymani, A. (2007)** : Evaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone cotière du Gharb (M'nasra) entre 1993 et 2003, Morocco, Afrique Science, 3, pp. 378-390.
- **Idrotecneco, (1981)** : Hydrogeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. General water authority. Tripoli, Lybie. P 93.
- **IFES, Icosium Forage & Engineering Services (2011)** : Etude géophysique par prospection électrique dans la zone sud de la wilaya de Khenchela commune de Babar.
- **Jourdan, B. Piantone, P. Lerouge, C. Guyonnet, D. (2005)** : Atténuation des métaux à l'aval de sites de stockage de déchets - synthèse bibliographique, Rapport BRGM/RP-54417-FR, France, p. 11.
- **LAMINI, A. (2012)** : Etude Géochimique Et Minéralogique Des Chotts De La Région D'el Hadjira, Thèse de magister. Département des sciences de la terre. Université Kasdi Merbah Ouargla, p. 112.
- **Levassor, A. (1975)** : Etablissement d'un modèle de gestion et de mise en valeur des nappes aquifères du Complexe Terminal. Rapp. int. ENSMP-INRH.
- **Mamou, A. (1990)** : Caractérisation et évaluation des ressources en eau du sud tunisien. Thèse de Doc. Université Paris sur.
- **Merlivat, L., Jouzel, J., (1979)** : Global climatic interpretation of the deuterium oxygen 18 relationship for precipitation. Journal of Geophysical Research: Oceans 84, 5029–5033.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- **Morlon, P. Trouche, G. soulard, C. Maigrot, J. Guyard, P. (1998)** : Diagnostic de la pollution azotée de l'eau par approche historique multi-échelles: cas dans le département de l'Yonne, France, Cahiers Agricultures, 7, pp, 15-27.
- **Moulla S. A, (2005)** : Un aperçu de quelques résultats d'hydrologie isotopique importants obtenus au Sahara Algérien. Colloque international « Les Ressources en Eau Souterraine au Sahara» ABHS, Ouargla le 13-14/12/2005.
- **Moulla, A.S. Guendouz, A. Cherchali, M.E.H. (2002)** : Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eau souterraines transfrontalières en Algérie, Proceedings of the International Workshop Tripoli, Libya, 2– 4 June 2002.
- **Nadher, A. Magaritz, M. Mazor, E. (1980)** : Geochemistry Et Cosmo-chemistry. Acta, 44, pp. 879-886.
- **Nir, A., (1967)** : Development of isotope methods applied to groundwater hydrology. Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle 109–116.
- **OSS, Observatoire Du Sahara Et Du Sahel (2003)** : Système Aquifère Du Sahara Septentrional, Gestion commune d'un bassin transfrontière. 1ère édition, Rapport de Synthèse, janvier 2003.
- **Ould Baba. M, 2005:** Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de Doctorat. Université Tunis El-Manar.
- **Pallas, P. (1978)** : Wter resources of the socialist people's Arab Libayan Republic, The geology of libya ; Vol II.
- **Peter-borie, M., Lucassou, F., Aubie, S., (2009)** : Contexte Hydrogéologique Et Hydraulique Du Littoral Basique Français, BRGM, Observation De La Côte Aquitaine. France, p. 31.
- **Ramade, F., 2002.** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ed. Dunod, 1063 p.
- **Richards, L.A. (1954)** : Diagnosis and improvement of saline and alkalinesoils, Washington USA, Agrichandbook, 60, 1954, p. 160.
- **Rodier, J. Bazin, C. Chambon, P. Broutin, J.P. Champsaud H. Rodi L. 1996.** Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9ème édition. Edition DUNOD, Paris. 1579p.
- **Rodier, J. (2009)** : l'analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Dunod ; 1526 p.
- **Santé Canada, (1992)** : Rapport sur les maladies au Canada.

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

- **Schneblen, N. Platel, J.P. Le Nindre, Y. Baudry, D. (2002)** : Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise – Rapport BRGM/RP-51178-FR.
- **Sedrati, A. Houha B., Romanescu, G. Chenaker, H. (2017)** : Determination of the contamination level in groundwater in the sebkha of elmahmel area, north eastern of algeria. Conference; Air & Water components of the environment ; Romania, Cluj-Napoca le 17/03/2017.
- **Silvan, N. Regina, K. Kitnuen, V. Vasander, H. Laine, J. (2002)** : Gaseous nitrogen loss from a restored peatland buffer zone, Soil Biology and Biochemistry, 34(5), pp. 721-728.
- **Srivastava, ML. (1983)** : Report on regional hydrogéological study in Ghadames Derj 4- Sinawen area ; Tripoli. P 155.
- **Stewart, Ph. (1968)** : Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger, 59(1-4).
- **Unesco, (1927)** : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Algérie-Tunisie. Rapport interne.
- **Unesco, (1970)** : Atlas géologique du Monde.
- **Valles, V. (2007)** : Cours sur les eaux thermales. Lab. d'Hydrogéologie d'Avignon, Enseignement Terre et Eau, <http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr/eaux-thermales.html>.
- **Wildi, W. (1983)** : La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure stratigraphique et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. dyn. Et Géogr. Phys., n° sp., n°24, n° 3, p. 201-298.
- **Yurtsever, Y., Gat, J.R., (1981)** : Atmospheric waters. of: IAEA (ed), Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. Vienna: IAEA 103–142.
- **Zair, N, (2014)** : Problème de vulnérabilité des eaux souterraines de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérien), Mémoire de Master, Université d'El-Oued.
- **Zeddouri, A. Derradji, F. Hadj-Saïd, S. (2010)** : Origine de la salinité des eaux du complexe terminal dans la région d'Ouargla (sud-est algérien), Phys. Chem. News, 53, no 05, 2010, p. 62-69.

Impact of Agriculture Upon the Chemical Quality of Groundwaters within the Saharian Atlas Steppe *El-Meita (Khenchela-Algeria)*

ABDENOUR SEDRATI¹, BELGACEM HOUHA¹, GHEORGHE ROMANESCU^{2*}, IOAN GABRIEL SANDU^{3,4}, DANIEL CONSTANTIN DIACONU⁵, ION SANDU^{6*}

¹ University of Khenchela - PostBox 1252, Road of Batna - Khenchela 40004, Algeria

² Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, Faculty of Geography and Geology, 22 Carol I Blvd, 700506, Iasi, Romania

³ Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Faculty of Materials Science and Engineering, 64 D. Mangeron Blvd., 700050, Iasi, Romania

⁴ Romanian Inventors Forum, 3 Sf. Petru Movila St., Bl. L11, Sc. A., III/3, 700089, Iasi, Romania

⁵ University of Bucharest, Faculty of Geography, 1 Nicolae Balcescu Blvd., 010041, Bucharest, Romania

The El-Meita plateau is situated in the south of the city of Khenchela and it is delimited by the Saharian Atlas to the north and Chott Melghir to the south. The agricultural importance and the high productivity of this region are provided by the aggressive use of chemical fertilizers. For this reason, we have decided to conduct this study, considering that all water bodies – superficial waters and groundwaters – record significant amounts of NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn and Hg) and other major chemical elements. The campaign of collecting the 30 water samples took place in the month of May 2016. The chemical analyses were conducted in the Lacip ain-Mila laboratory in Algeria. Findings show a contamination of groundwater by nitrates and lead; values exceed the maximum limits approved by World Health Organization (WHO). TDS were also found in high concentrations, which limit the use of water for some agricultural cultures, but which can be admissible for certain salinity-resistant species.

Keywords: Aridity, Irrigations, Heavy metals, Nitrates, Pollution

Water represents the most resource of humankind. For this reason, studies concerning water quality are extremely numerous [1-5]. From this perspective, it is worth noting the works regarding: chemism [2-10], pollution [11-20], mineralization [3, 21-25], temperature [15, 26], irrigations [27-29], heavy metals [14, 16, 30, 31], piezometric level [12, 32], etc. Unfortunately, industrialization and agricultural development have entailed a high degree of pollution for all categories of water. Pollution in general affects the developing countries and the highly developed countries, though the latter benefit from means of defence. The most affected regions are the arid areas, with a hydric deficit. In these areas, the concentration of pollutants is higher in waters with a shorter period of regeneration [9].

Groundwaters in the south of Algeria represent the only drinking, industrial and mostly agricultural water supply source of the El-Meita plateau. The area studied here has an agricultural destination (culture of plants and pasturing). Grains represent the most important income source for local population, and the Algerian State takes into account the development of this activity, should the oil price drop dramatically. The need for irrigation water determines a permanent monitoring of groundwater quality, because surface resources are extremely scarce in this arid climate. At regional level, numerous problems regarding the pollution of groundwaters have been revealed [9, 19, 21]. Nitrates are listed among the most significant chemical pollutants of groundwater [18]. Nitrates represent, at the same time, the elements necessary for the development of plants. However, their massive presence within waters may lead to health problems for organisms, mostly for human beings. Consequently, nitrates are slightly lixiviant pollutants and they touch the water body without suffering any alterations [17].

Each year, a significant amount of chemical fertilizers is used in the El-Meita area: 16,000 quintals of TSP (46%) and 20,000 quintals of urea (46%) on an irrigated surface of 70,500 ha. Furthermore, 30-70% of azotized fertilizers are lost as ammonia (NH_3) and nitrous oxide (N_2O) in the atmosphere [16] or as nitrate (NO_3^-) at the surface of the soil or in groundwaters [13, 19, 21]. Hence, water table is highly vulnerable to pollution because the sandy texture facilitates the penetration of surface waters, (rainfall; return of irrigation waters; or through wadis).

Heavy metals – especially lead, zinc and copper – belong to the category of high pollutants. Heavy metals may migrate in groundwaters; they accumulate in the food chain and they entail major risks for human health [31]. Anthropogenic sources of metal substance emission are due to the intensification of urban, agricultural or industrial activities [30]. High concentrations of heavy metals and organic soil pollution may be taken over by the human body, thus producing cancer, (this study underscores the major influences of heavy metals induced by chemical fertilizers used in agriculture). Therefore, the present study analyzes the physical-chemical quality of waters within the water table of the El-Meita region and it points out the degree of pollution in terms of nitrates and heavy metals; it also assesses the extent to which these waters may be used in agriculture.

Experimental part

Study area

The study area is situated south from Wilaya de Khenchela, between 34°30'-35°00' N latitude and 6°78'-7°30' E longitude. The El-Meita plateau covers a surface of 2.350 km² and the altitudinal gap ranges between 1.248 m and 12 m (fig. 1).

* email: romanescugheorghe@gmail.com; ion.sandu@uaic.ro

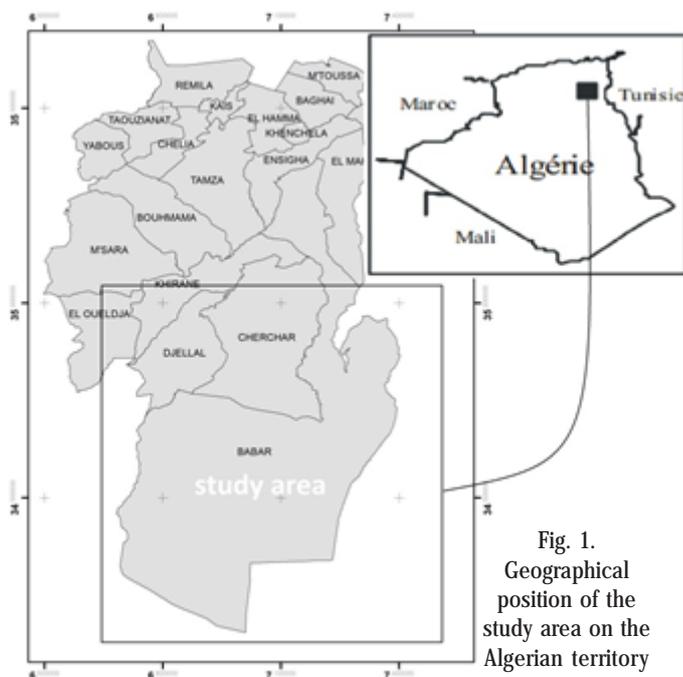


Fig. 1. Geographical position of the study area on the Algerian territory

The climate is arid and semiarid, with maximal temperatures recorded between the months of May and October and minimal temperatures during the winter (5°C). The annual average is 22°C. Mean annual precipitations range between 200 mm (semiarid climate) in the north and 60 mm (arid climate) in the south.

The main dry valleys (wadis) that dredge the plateau are as follows: Mehane, Ouzern and Elmeita. They spring from the north and they disappear in the endorheic depression of Chott Melghir in the south. The relatively even topographic surface favours the development of agriculture, mostly the cultures of wheat and barley. In order to increase productivity, irrigations based on groundwaters are used, especially the phreatic ones. Drills that capture groundwater are as deep as 30-200 m and they are implanted in the Pliocene-Quaternary water table. This geological layer comprises gravels, sands and clays up to 525 m thick (fig. 2). This represents the first layer, situated on top of an impermeable marl substrate. The Miocene-Pliocene depth layer is captive and it represents the second water body of the terminal complex.

Methodology

For a precise mapping of the area and for the localization of sampling points, several field campaigns were conducted between September 2015 and January 2016. The sampling took place in the period March-April 2016; 30 samples were taken, (4 sources and 26 drills). Some parameters were measured in situ using the Consort C931 multiparameter, version 2.4 (temperature, pH, TDS and electric conductivity) [24]. The other chemical analyses (major elements and heavy metals) were evaluated in the Lacip -Ain-Mlila Laboratory in Algeria (accredited at national level). The calculation of ionic balance resulted, in most cases, in values below 5% [7].

Results and discussions

Groundwater quality in the El-Meita area is relatively good for irrigations and for the supply of human settlements, which suffer from acute lack of water. However, it risks an alarming endangerment, considering that surface waters keep on transporting the chemical products within the fertilizers used in agriculture. The data obtained are related to the values provided by WHO (World Health Organization) (table 1).

The temperatures measured in situ were distributed into two groups. The first group is represented by P21, P22, S31, S32, S33 and S34 drills, which values range between 16.9°C and 21.5°C (low values due to the high altitude of sampling points, because they are situated in the submountainous sector). The second group encompasses the rest of drills, where temperatures range between 22.1°C and 27.9°C (points situated in lower altitudinal areas).

The pH value is situated around neutralization: 7.2-7.77. The value of electric conductivity increases on the north-south direction, namely of superficial waters and groundwaters runoff. In this case, the dissolution of salts throughout runoff leads to increased conductivity, (it records a maximum value in P16). The value of TDS increases similarly: it reaches the maximum value in P16, namely 3097 mg/L.

The Piper Diagram - also known as the triangle diagram - identifies the chemical features of ionic analyses [22, 28] (fig. 3). Concerning cations, we have noted a calcic dominance for all samples, (calcium sand substrate and calcareous rocks). Magnesium records low values. Anions are grouped in the centre of the triangle, with slight

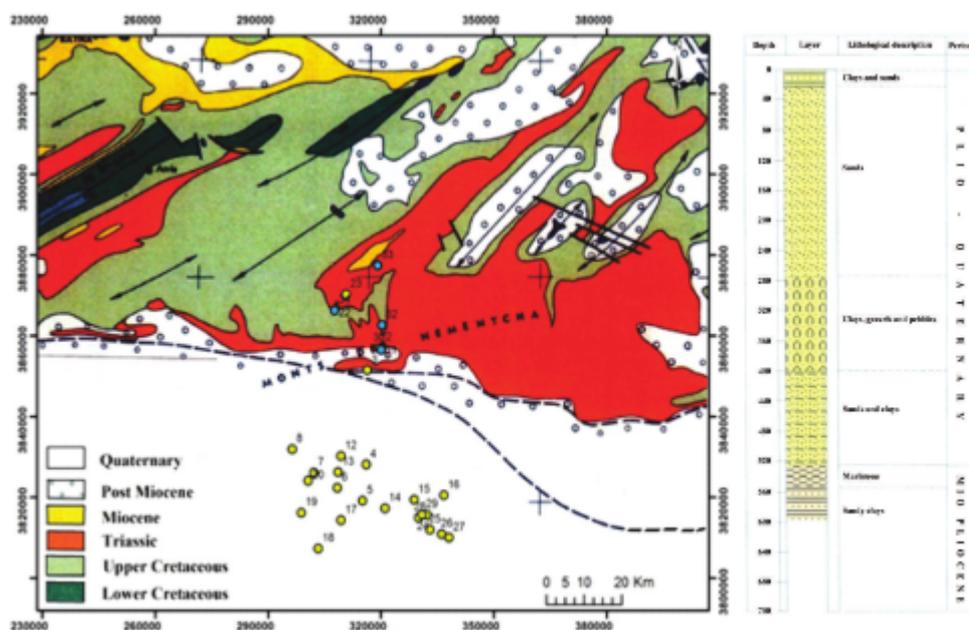


Fig. 2. Geological map of the region and distribution of the sampling points

Parameters	Units	Minimum	Maximum	Mean	SD (écart type)	WHO for drinking water
EC	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1502	4173	2324	725	2500
pH	-	7.2	7.77	7.48	0,17	6.5-9.5
TDS	mg/L	1134	3097	1758	544	1000
K ⁺	mg/L	3	18.8	5.89	3.7	-
Ca ²⁺	mg/L	221,61	623.5	380.1	123.4	200
Mg ²⁺	mg/L	14.76	34.12	21.61	7.42	150
Na ⁺	mg/L	55.9	186.2	89.3	26.6	200
HCO ₃ ⁻	mg/L	297.21	897.55	464.47	169.45	-
Cl ⁻	mg/L	67.9	532.5	255.8	131.4	250
SO ₄ ²⁻	mg/L	57.7	688	403.5	128.5	500
NO ₃ ⁻	mg/L	42.66	103.53	68.3	12.93	50
NO ₂ ⁻	mg/L	0.005	0.917	0.05	0.166	3
NH ₄ ⁺	mg/L	0.013	0.099	0.049	0.023	0.20
Pb ²⁺	($\mu\text{g}/\text{L}$)	8.68	32.57	15.87	4.99	10
Zn ²⁺	($\mu\text{g}/\text{L}$)	19.23	70.71	49.97	13.13	3×10^3
Cd ²⁺	($\mu\text{g}/\text{L}$)	ND	0.21	0.15	0.04	3
Cu ²⁺	($\mu\text{g}/\text{L}$)	12,59	102,21	62.15	21.5	2×10^3
Hg ²⁺	($\mu\text{g}/\text{L}$)	ND	0,06	0.033	0.015	1

Table 1
CHEMICAL
PARAMETERS OF
GROUNDWATERS
WITHIN THE EL-MEITA
FIELD (ALGERIA)

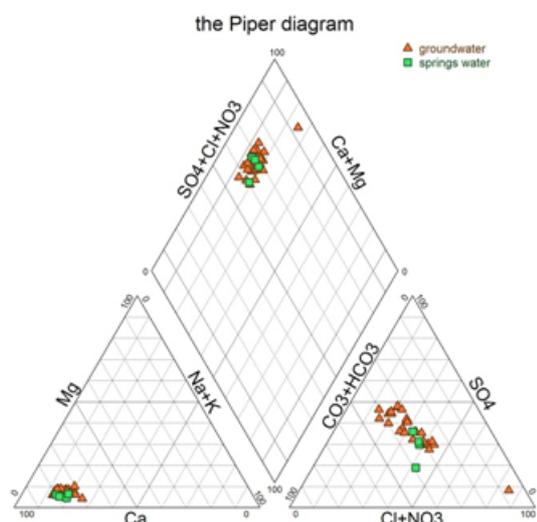


Fig. 3. The Piper diagram for all analyzed samples

tendencies towards sulphates. The chemical features of the samples are similar to chlorinated-sulphated-calcic waters.

Nitrates emerge due to the excessive use of chemical fertilizers. The sandy nature of the soil favours their concentration on the north-south alignment, according to the direction of groundwater runoff. The maximum value is 103.53 mg/L. High concentrations - exceeding the European norms - have been recorded for the spring waters situated in the north of the area, at the foot of mountains. This contamination is due to swampy areas situated at high altitudes, where local inhabitants use both chemical fertilizers and natural fertilizers (manure) (fig. 4).

Nitrate ion may be present in groundwaters from sewerage or from corroded pipes. The values range between 0.005 and 0.041 mg/L, with an average of 0.019 mg/L. An abnormality was pointed out in P16, where the concentration is 0.917 mg/L; this may be caused by the corrosion within the tubes of the sewerage system. Ammonia presents low values, which do not exceed the concentrations recommended by WHO (0.2 mg/L): 0.013-0.099 mg/L.

The heavy metals analyzed are represented by Pb, Zn, Cd, Cu and Hg. Concentrations are distributed into two groups: the first is represented by Pb, which concentrations exceed the norms provided by WHO (10 $\mu\text{g}/\text{L}$) 8.68-32.57 $\mu\text{g}/\text{L}$ (due to intensive use of chemical fertilizers). The

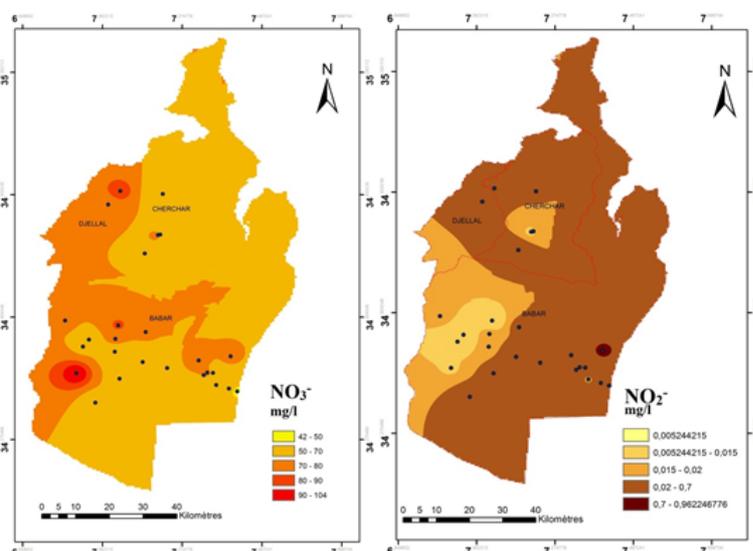


Fig. 4. Distribution of NO₃⁻ and NO₂⁻ concentrations

second group encompasses Zn, Cd, Cu and Hg, which values of concentrations are below the norms of WHO (table 1).

The drills within the Pliocene-Quaternary water body ensure irrigations. Water salinization and alkalization represent the main risks that may reduce agricultural use. The Richards Diagram [23] combines electric conductivity with SAR (Sodium Absorption Ratio) in order to assess the risk (fig. 5). SAR is calculated using the formula below:

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / 0.5 [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]^{1/2}$$

The results obtained in the Riverside and Wilcox Diagrams demonstrate that the waters within the El-Meita region are classified into two groups:

- C3S1: average quality waters, due to the high concentrations of polluting elements. They comprise the upstream waters used for the cultures that tolerate salts. They are used on well-dredged soils. Conductivity control must be permanent in the centre of the studied area and at the level of spring waters.

- C4S1: poor quality waters, situated in the downstream region (south) and at the northern limit of the plateau, where the values of electric conductivity are very high. Waters may be used in agriculture only for some species of plants, which tolerate high values of salts, and on very well dredged and washed soils.

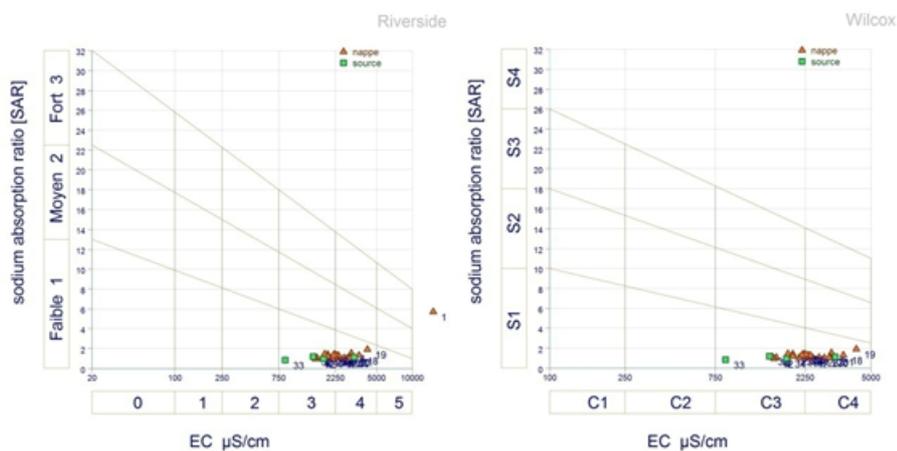


Fig. 5. Riverside Diagram (left) and Wilcox Diagram (right) for the waters of the El-Meita field (SAR)

Overall, the waters within the El-Meita region may be used only for plants that tolerate a relatively high degree of salts. For this reason, local population is specialized only in the culture of locally used plants.

Conclusions

The only water source for El-Meita is represented by the phreatic water body of the terminal complex of the Saharan Atlas. The analysis of all parameters that characterize the quality of waters has shown that chemical fertilizers, excessive irrigation and the sandy nature of the substrate facilitate the infiltration of pollutants towards groundwaters. Results demonstrate a contamination of water table with NO_3^- and Pb, from agricultural activities. For this reason, high values of electric conductivity were recorded for the entire area: 1502-4173 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (they exceed the irrigation threshold established by WHO because waters are highly mineralized).

Despite these parameters that lower water quality and mostly electric conductivity, the SAR (Sodium Absorption Ratio) calculation classifies the waters into two main groups: average quality and poor quality. Waters may be used only for plants that tolerate high degree of mineralization (e.g. wheat). It is recommended to monitor permanently the quality of groundwaters, particularly the use of chemical fertilizers that may lead to a dramatic decrease in water quality.

Acknowledgments: Our sincerest gratitude goes to the Geoarchaeology Laboratory within the Faculty of Geography and Geology from the Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, which provided the equipment and processed the data.

References

- ADOPO K.L., ROMANESCU G., N'GUESSAN A.I., STOLERIU C., Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, **9**, no. 4, 2014, p. 137.
- PAPADATU, C.P., BORDEI M., ROMANESCU, G., SANDU, I., Rev. Chim.(Bucharest), **69**, no. 9, 2016, p. 1728.
- ROMANESCU, G., PAUN, E., SANDU, I., JORA, I., PANAITESCU, E., MACHIDON, O., STOLERIU, C., Rev. Chim.(Bucharest), **65**, no. 4, 2014, p. 401.
- ADOPO, K.L., N'GUESSAN, M.Y., SANDU, A.V., ROMANESCU, G., SANDU, I.G., International Journal of Conservation Science, **7**, no. 2, 2016, p. 567.
- MIREL, I., FLORESCU, C., GIRBACIU, A., GIRBACIU, C., DUMITRU, P., DAN, S., POPOVICI, R.A., IONESCU, G.L., Mat. Plast., **52**, no. 4, 2015, p. 504.
- ADUMITROAEI, M.V., GAVRILOAIEI, T., SANDU, A.V., IANCU, G.O., Rev. Chim.(Bucharest), **67**, no. 12, 2016, p. 2530
- CHAIIEB, A., KHATTACH, D., Journal of Materials and Environmental Science, **7**, no. 11, 2016, p. 3973.
- CHAKRABARTI, S., PATRA, P.K., Rasayan Journal of Chemistry, **9**, no. 4, 2016, p. 627.

- CHAOUKI, M., ZEDDOURI, A., HADJ-SAID, S., Energy Procedia, **36**, 2013, p. 1043.
- CICAL, E., MIHALI, C., MECEA, M., DUMUTA, A., DIPPONG, T., Studia Universitatis Babeş Bolyai, Chemia, **61**, no. 2, 2016, p. 225.
- SHAIKH, K., GACHAL, G.S., MEMON, S.Q., SHAIKH, M.Y., International Journal of Conservation Science, **7**, no. 2, 2016, p. 579.
- ROMANESCU G., COJOCARU I., Environmental Engineering and Management Journal, **9**, no. 6, 2010, p. 795.
- CHAOUKI, M., ZEDDOURI, A., Siboukeur, H., Energy Procedia, **50**, 2014, p. 567.
- ABDULLAH, M.M.A., NORDIN, N., TAHIR, M.F.M., KADIR, A.A., SANDU, A.V., International Journal of Conservation Science, **7**, no. 3, 2016, p. 753.
- VASILACHE, V., CRETU, M.A., PASCU, L.F., RISCA, M., CIORNEA, E., MAXIM, C., SANDU, I.G., CIOBANU, C.I., International Journal of Conservation Science, **6**, no. 1, 2015, p. 93.
- LOCHAROENRAT, K., Mat. Plast., **53**, no. 2, 2016, p. 292.
- IDRISS-ALAMI, I., ZERAOULI, M., ADDOU, M., MOKHTARI, A., SOULAYMANI, A., Afrique Science, **3**, 2007, p. 378.
- MORLON, P., TROUCHE, G., SOULARD, C., MAIGROT, J., GUYARD, P., Cahiers Agricultures, **7**, 1998, p. 15.
- ROUABHIA, A., DJABRI, L., Larhyss Journal, **08**, no. 3, 2010, p. 55-67.
- SILVAN, N., REGINA, K., KITNUEN, V., VASANDER, H., LAINE, J., Soil Biology and Biochemistry, **34(5)**, 2002, p. 721.
- GOUADIA, L., GUEFAIFIA, O., BOUDOUKHA, A., HEMLA, M.L., Geo-Eco-Trop Journal, **37(1)**, 2013, p. 81.
- PIPER, A.M., A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis, USGS. Ground Water, 1953.
- RICHARDS, L.A., Agric Handbook, **60**, 1954, p. 160.
- RODIER, J., BEUFFR, H., BOURNAUD, M., BROUTIN, J.P., GEOFFRAY, CH., KOVACSIK, G., LAPORT, J., PATTEE, E., PLISSIER, M., RODI, L., VIAL, J., L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, (7th edition), Dunod, 1984.
- ROMANESCU G., CURCA R.G., SANDU I.G., International Journal of Conservation Science, **6**, no. 3, 2015, p. 261.
- PATROESCU, I.V., DINU, L.R., CONSTANTIN, L.A., ALEXIE, M., JINESCU, G., Rev. Chim. (Bucharest), **67** no. 8, 2016, p. 1433
- BURTEA, M.C., CIUREA, A., BORDEI, M., ROMANESCU, G., SANDU, A.V., Rev. Chim.(Bucharest), **66**, no. 8, 2015, p. 1222
- HUSSAIN, M., AHMED, S.M., ABDERRAHMAN, W., Journal of Environmental Management, **86**, no. 1, 2008, p. 297.
- MAHVI A.H., NOURI, J., BABAEL, A.A., NABIZADEH, R., International Journal of Environmental Science and Technology, **2**, no. 2, 2005, p. 41.
- GREMION, F., Analysis of microbial community structures and functions in heavy metal-contaminated soils using molecular methods, doctoral thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2003.
- JOURDAN, B., PIANOTONE, P., LEROUGE, C., GUYONNET, D., Atténuation des métaux à l'aval de sites de stockage de déchets - synthèse bibliographique, Rapport BRGM/RP-54417-FR, France, 2005.
- DIACONU D.C., PEPTENATU D., SIMION A.G., PINTILII R.D., DRAGHICI C.C., TEODORESCU C., GRECU A., GRUIA A.K., ILIE A.M., Urbanism. Architecture. Constructions, **8**, no. 1, 2017, p. 27

Manuscript received: 11.12.2016

HYDRO-GEOCHEMICAL AND STATISTICAL CHARACTERIZATION OF GROUNDWATER IN THE SOUTH OF KHENCHELA, EL MEITA AREA (NORTHEASTERN ALGERIA)

Abdenour SEDRATI^{1,2}, Belgacem HOUHA¹, Gheorghe ROMANESCU^{2*} & Cristian Constantin STOLERIU²

¹University of Khenchela – Post Box 1252, Road of Batna - Khenchela 40004, Algeria

²Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, Faculty of Geography and Geology, 22 Carol I Blvd, 700506, Iasi, Romania

*Corresponding author: romanescugheorghe@gmail.com

Abstract: The need of water is stringent in the arid regions, mostly in those belonging to North Africa. For this reason, numerous hydrogeological studies have been conducted in southern Algeria, which is under the influence of the Saharan climate. These studies have determined the hydro-chemical characteristics and the origin of the salinity belonging to the aquifer within the terminal complex of the El Meita region, situated in northeastern Algeria. The climate of the region is arid: precipitations of 164.7 mm/year and very high temperatures during the summer. The aspects emphasized on include the annual evolution of the piezometric surface, the chemical facies of the water, binary diagrams (chloride, base exchange index, saturation index, etc.). In the month of April 2016, 29 samples were collected. The water sheet is radially convergent and runoff manifests itself on the northeast – southwest direction. The major elements are dominated by chlorides and calcium sulphate. Water mineralization may have two causes: dolomitization and the dissolution of gypsum; ionic exchange of bases between the water and the solid frame of the aquifer. Saturation index demonstrates that carbonated minerals are oversaturated, while saliferous evaporite minerals are undersaturated. The Principal Component Analysis (PCA) shows a rich participation of several mineralization elements, mostly of calcium. Mineralization is also induced by the anthropic factor.

Keywords: aridity, terminal complex, hydrochemistry, salinity, statistics

1. INTRODUCTION

Algerian Sahara represents a typical desert area. The water need is extremely high and sources are limited. The Saharan basin represents, from a hydro-geological perspective, a great multi-layered sedimentary entity. From a hydraulic point of view, the aquifer system in the north of the Sahara Desert features three overlapped aquifer systems, (separate or which communicate through semi-permeable formations): the continental inter-calcareous aquifer; the Turonian aquifer; the terminal complex aquifer (OSS, 2003).

The chemical composition of waters in wells and sources is influenced by the environment and also the period of stay within the aquifer (Fehdi et al., 2009). It is directly related to the nature of geological formations, to the meteoric precipitations in the

analyzed area and in the surroundings, and to the value of evaporation (Zeddouri et al., 2010). The chemical composition of groundwater is important if the purpose is to use them in the agricultural, industrial or domestic field (Ishaku et al., 2015). The knowledge of hydro-chemical processes is fundamental to determine the origin of mineralization (Zeddouri et al., 2010). From this point of view, a great number of studies have been conducted throughout the world (Adopo et al., 2014; Beltrando, 2014; Brinis et al., 2014; Houha, 2007; Ghodbane et al., 2015; Nakayama & Maksyutov, 2014; Romanescu & Cojocar, 2010; Romanescu et al., 2014, 2015; Tabouche & Achour 2004; Vainu et al., 2014).

The groundwater has been used more and more intensely by the Maghreb countries (Siebert et al., 2010, Aouidane & Belhamra, 2017). Irrigations

in Algeria utilize the groundwater to a great extent (67%) (Zektser & Everett, 2004). The effective and sustainable management of water resources involves a great insight into the availability, quality and variability in space and time (Hamzaoui Azaza et al., 2012).

The Terminal Complex Aquifer has been increasingly used, despite low knowledge on its reserves, hydraulic functions and on regeneration capacity. Great attention should be paid to the permanent monitoring of the piezometric level and quality (mostly of the chemical composition). This aquifer constitutes the only water source for the El Meita Plain (Sedrati et al., 2017).

This study aims to determine the hydro-chemical characteristics of the aquifer in the El Meita region (Algerian Sahara) and of the sources used by the local population. Punctually, the elements targeting salinity and water quality are studied.

2. GEOGRAPHIC LOCATION

The El Meita Plain is situated in northeastern Algeria, in the south of the Khenchela region. It is limited by the Saharan Atlas to the north and by Chott Melghir to the south (Fig. 1). It belongs to the Melghir catchment basin situated in the south of the

Saharan Atlas. It is the field of the Saharan platform, which is used intensely for agricultural purposes. The climate is typically arid, with mean multiannual precipitations of 164.7 mm/year and very high temperatures during the summer. The mean annual temperature is 22°C. The maximum altitude is 1,248 m to the north and it drops to almost sea level, or even below that, in certain inland depression sectors. From an administrative perspective, the region comprises three communes: Chechar, Babar and Djelal.

3. MATERIALS AND METHODS

Field campaigns were conducted to choose the sampling places throughout the entire El Meita Plain (Fig. 2). The water sampling campaign took place during the month of July 2016. A number of 29 samples were collected, according to the method recommended by Rodier et al., (2009). Polyethylene cylinders that were used had a volume of 0.5 liters: beforehand, a 15-minute drilling was performed in order to eliminate the water stored along the pipes until the temperature was stabilized. The water passed through a membrane filter with pores that measuring 0.45 µm. All samples were stored in a lightproof container at a temperature of 4°C.

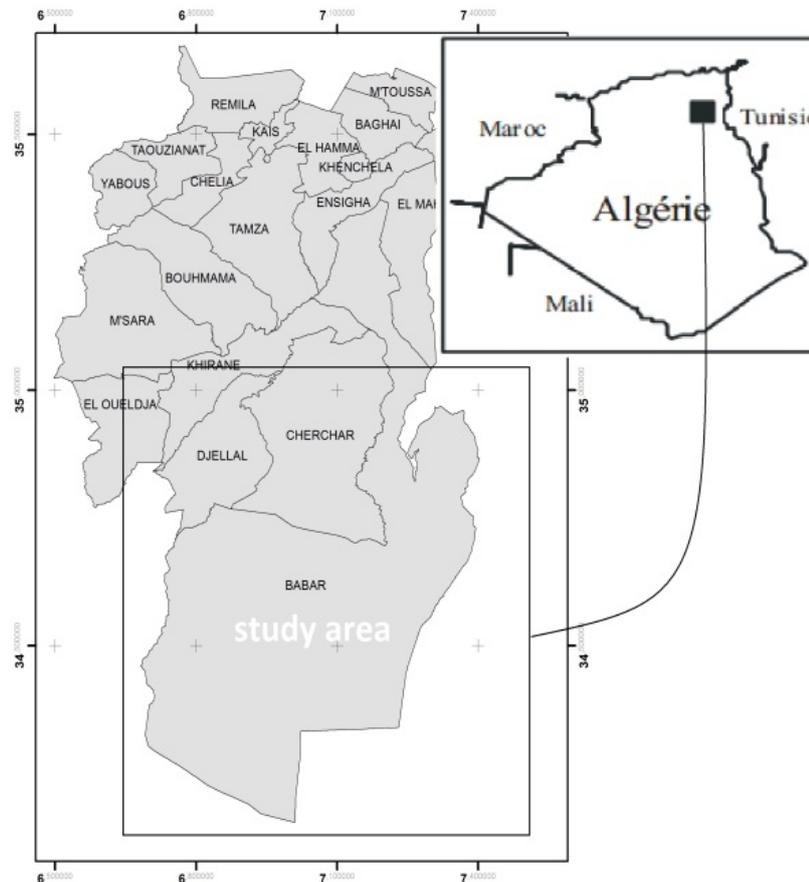


Figure 1. Geographical location of the El Meita Plain of Algeria

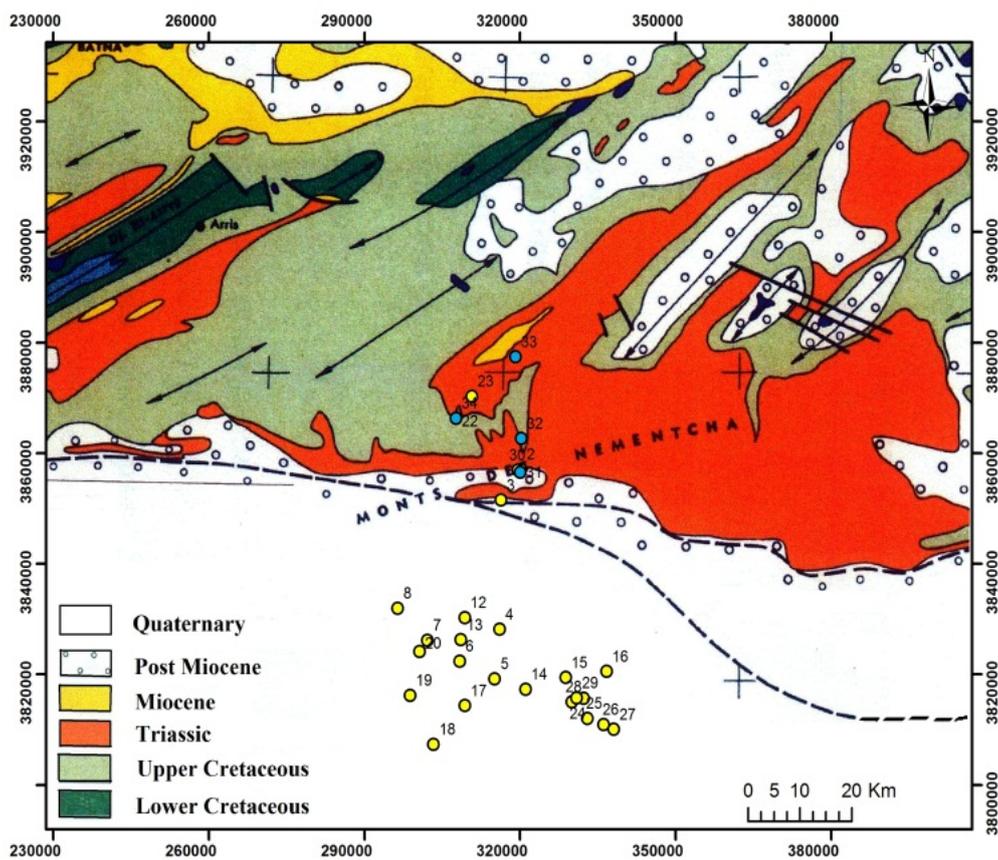


Figure 2. Geological map of the El Meita region and distribution of sampling points

In parallel with water sampling, physical-chemical measurements were conducted using the Consort C931 multiparameter analyzer: temperature - T°C, pH, electrical conductivity (EC). The ionic chromatography base was used for cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) and anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^-). The analyses were performed in the Laboratory of Environmental Analyses and Chemical Tests on Materials (Ain M'Lila). The ionic balance ranged under 5% in most samples.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1. Hydro-geological context

From the geological perspective, the El Meita Plain is situated in an area of immersion along the fault extended to the south of the Atlas Mountains. The geo-morphological landscape is represented by folds and faults that correspond to alpine paroxysm (Fig. 2). It comprises Quaternary sediments that make up the Saharan platforms. The stratigraphic series are represented by sand, gravels and clays that repose on marls and lacustrine limestones.

The main wadi dredging the El Meita Plain are Mehane, Ouzern and El Meita. These temporary flows of water spring from the north and discharge into

the endorheic depression of Melghir.

The drilling depths ranged between 30 and 200 m. The drills were placed on the surface of the entire Pliocene-Quaternary phreatic aquifer, made of gravels, sand and clays, with thicknesses reaching 525 m. This is the first sheet of the terminal complex that repose on an impermeable layer of marls. There is also a deeper aquifer, Miocene-Pliocene, which is captive. The piezometric map generated by ENERGOPROJECT in 2002 shows the presence of radially convergent sheets, the runoff of each manifests itself on the northeast – southwest direction.

The dominance of major ions in the groundwater is: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. A dominance of the ions such as Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Cl^- , which constitutes a facies, is observed in mineralized waters running off on the upstream-downstream direction. The mineralization concentration map (for total dissolved solids - TDS) was generated using ArcMap 10.3. It helped deciphering the hydrodynamic process that controls the movement of groundwater and the washing off occurring towards Chott (Fig. 3).

4.2. Binary diagram

Binary diagrams were used to identify the

origin of the chemical elements (salinity, in our case) (Fig. 4). This kind of charts are used to visualize the evolution of major cation and anion content based on chlorine levels, which is considered a conservative element (Kloppmann et al., 2010). The position of the various points of aquifers, in relation to the mixing exchanges, dissolution, precipitation, sorption, etc)

line between rainwater and seawater, may prove extremely useful to identify other phenomena that accompanying the mixing processes (Fehdi et al., 2009). The major cations and anions reflect the interactions of saline waters with the geological formations that they cross (ionic Lamini, 2012).

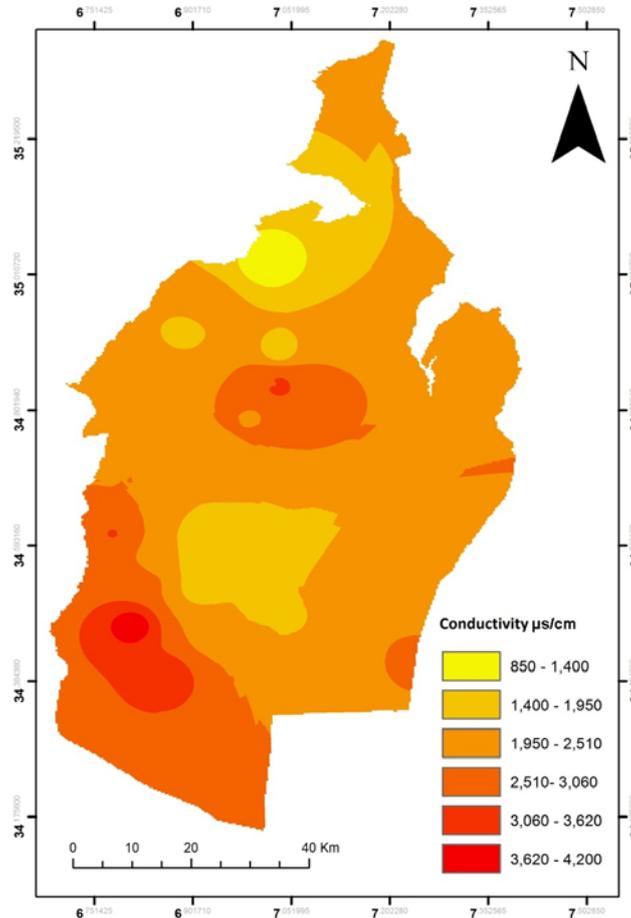


Figure 3. Spatial distribution of electrical conductivity in the aquifer of the El Meita Plain

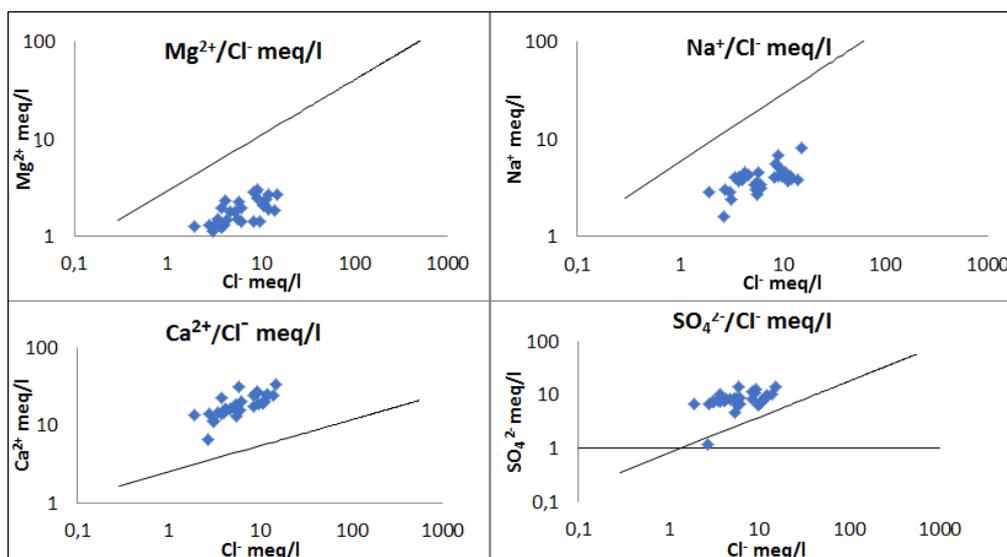


Figure 4. Relations between Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ and Cl^- of groundwater (blue points) and mixing line of rainwater-seawater

The carbonated aquifer, which is simultaneously enriched with Ca^{2+} and low in Mg^{2+} , is explained by the interaction between water and rock, where dolomitization, dissolution and precipitation are manifested. The $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ exchange through dolomitization was signaled as the main cause of the $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratio reduction (Fehdi et al., 2009). In this case, the $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratio is very low. The Na^+ contents must balance the Cl^- contents. As can be seen in figure 4, all Na^+ and Cl^- points are found under the mixing line of the rainwater-seawater, which demonstrates a Na^+ deficit. This phenomenon is explained by the reverse exchange of ionic bases between the water and the aquifer. Na^+ is fixed by the geological substrate, while it releases Ca^{2+} (Nadher et al., 1980). The explanation is validated by the existing relation between Ca^{2+} and Cl^- , where all points are situated above the mixing line of rainwater-seawater.

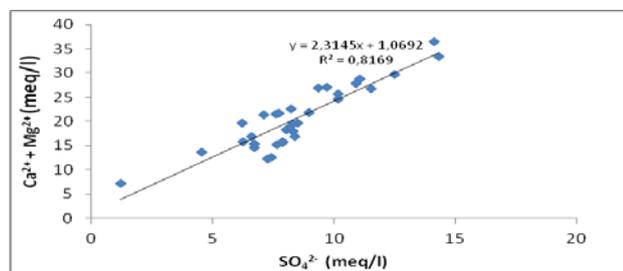


Figure 5 Relation between SO_4^{2-} and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

The relation between SO_4^{2-} and Cl^- shows that most points are situated above the mixing line of rainwater-seawater line, except for one point (P33 - source). P33 has very low TDS contents and it is very close to a state of balance. The enrichment of the other samples is explained by the presence of evaporites at the northern limit of the region and by the gypsum and marly substrate. Agricultural contamination also contributes to it by a lesser extent (Kouzana et al., 2009). In this region, sulphated fertilizers are intensely used, and it is known that they infiltrate easily due to the sandy substrate and to irrigations. The correlation between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and SO_4^{2-} is strong, with $R^2 = 0.81$ and a value of + 2.31 for slope), which demonstrates that water is in balance and the presence of Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} is provided by the dissolution of gypsum (Fig. 5). Consequently, the salt within the El Meita Plain has two sources: dolomitization and the reverse ionic exchange of bases between water and the substrate fixing the sodium while releasing calcium.

4.3. Base exchange index (BEI)

Base exchange index represents the ratio between exchangeable ions and primitive ions of the

same nature. Water, throughout its underground journey, reacts with different substances that have the property of changing ions against those contained in it, (minerals, iron hydroxide, organic substances) (Belksier, 2009). Base exchange index is expressed using the following formula:

$$\text{BEI} = [\text{rCl}^- - \text{r}(\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{rCl}^-$$

where r is milliequivalent

The values of the base exchange index interpreted as follows:

- If it is negative, then Ca^{2+} and Mg^{2+} ions in the water are exchanged for the K^+ and Na^+ ions inside the geological formations;
- If it is positive, then the Na^+ and K^+ ions are replaced by the Mg^{2+} and Ca^{2+} ions inside the geological formations;
- If it is 0, then there is a balance between the chemical composition of water and that of the geological formations (Hamzaoui Azaza et al., 2012) (Fig. 6).

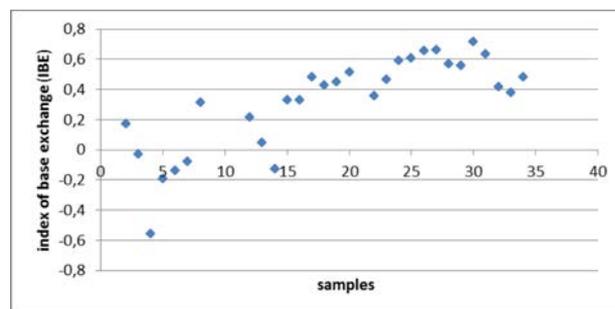


Figure 6 Values of the base exchange index

For the Terminal Complex Aquifer in the El Meita region, waters have a base exchange index ranging between -0.554 and 0.717. The points 3, 4, 5, 6, 7 and 14 have a base exchange index lower than 0. Most of them are close to 0 and they indicate a balance between the chemical composition of the water and the geological formations. Only point 4 has an index of -0.554, which stands to demonstrate a release of K^+ and Na^+ ions and a fixing of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions. This aspect indicates the presence of Na^+ -charged clay. The rest of the points have positive values of the exchange base index, which suggests a replacement of Na^+ and K^+ in the water by the Mg^{2+} and Ca^{2+} ions inside the geological formations.

4.4. Saturation index

Saturation index expresses the degree of chemical balance between water and mineral in the aquifer matrix, and it may be considered as a measure of the process of dissolution and/or precipitation concerning the water-rock interaction (Drever, 1997).

The knowledge of water saturation in relation to certain minerals explains the chemical form under which minerals are transported in solutions. The saturation index with the value 0 represents the existing balance between water and mineral. Water is under-saturated if the value is <0. Mineral dissolution is over-saturated if the value is IS>0 (mineral precipitation) (Peter-Borie et al., 2009).

The thermodynamic study was conducted using the Diagramme software. In this case, the saturation index is calculated for anhydrite, aragonite, calcite, dolomite, gypsum and halite. It serves to evaluate the geo-chemical processes underlying mineralization (Fig. 7). In this case, the following equation is used (Chapelle, 2001):

$$IS = \log (IAP/K).$$

Where: IAP=ion activation product;
K= thermodynamic equilibrium constant.

The groundwater in El Meita is saturated and over-saturated in relation to carbonated minerals (calcite, dolomite and aragonite) with calcium precipitation and under-saturated in relation to saliferous minerals with the dissolution of evaporite minerals and a contribution of sodium sulphate. Calcium and magnesium increase mainly with the direction of flow due to the presence of carbonate minerals in the aquifer. The calculation of the saturation index for minerals shows that carbonated minerals tend to precipitate while saliferous evaporite minerals tend to dissolve.

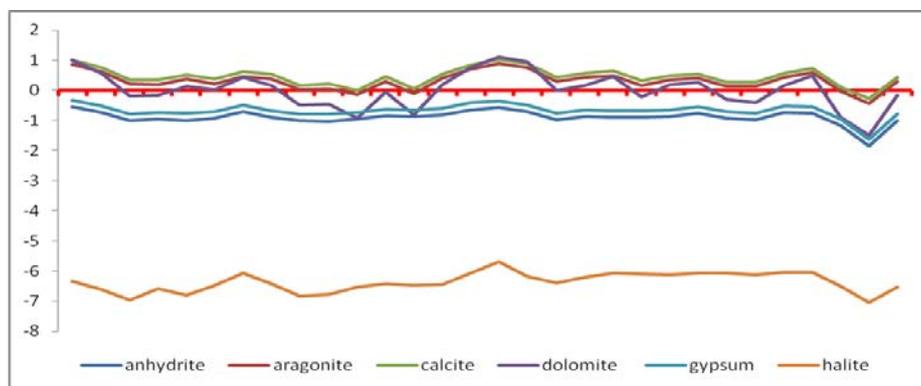


Figure 7 Variation of the saturation index in the groundwater of the El Meita Plain

Table 1 Physico-chemical parameters of the collected samples

No	°C	EC µS/cm	pH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
2	22.1	3143	7.11	2433	9.8	105.8	623.54	27.55	0.099	744.12	49.51	0.016	206.88	688.06
3	24.6	2465	7.03	1869	6.3	84.6	453.76	23.41	0.087	623.98	66.83	0.034	132.44	487.11
4	25	1578	7.01	1163	3.9	66.3	266.51	15.17	0.056	355.71	73.31	0.023	67.91	321.77
5	25.5	1929	6.95	1339	4.6	91.6	287.38	18.32	0.063	396.11	49.81	0.041	121.66	378.84
6	25.6	1582	7.2	1154	4	70	279.82	15.77	0.066	323.87	54.62	0.016	97.73	321.55
7	27.3	2193	6.85	1520	4.9	99.3	319.66	27.98	0.052	487.58	63.06	0.013	145.95	384.84
8	25.2	3084	6.86	2221	5.6	129.7	479.93	34.12	0.072	657.77	72.61	0.017	297.84	553.05
12	23.3	1536	6.96	1148	2.6	55.9	224.42	15.67	0.053	307.07	82.72	0.032	112.65	355.82
13	23.9	1502	7.02	1134	3.7	64.8	221.61	13.63	0.066	297.21	75.66	0.016	108.05	349.21
14	27.9	1821	6.72	1490	4.7	94.1	281.08	14.76	0.025	312.11	68.85	0.009	132.29	366.84
15	24.8	2183	6.98	1631	4.9	83.4	365.1	17.88	0.073	396.56	79.08	0.006	197.55	408.74
16	26.3	2093	6.58	2454	4.7	78.5	355.77	21.26	0.031	380.04	75.55	0.017	186.86	398.87
17	25.3	2358	7	3097	3.2	71.7	397.32	23.78	0.018	431.22	65.43	0.023	218.52	429.91
18	24.2	3578	6.97	2210	5.6	118.5	544.21	29.65	0.064	778.09	59.84	0.025	327.18	599.06
19	27.7	4173	7.06	2327	6.9	186.2	676.72	32.05	0.083	897.55	103.53	0.917	532.51	677.23
20	26	3027	7.11	1290	4.7	97	502.09	33.94	0.044	665.78	66.93	0.024	315.73	523
22	17.4	1935	7.07	2432	18.8	79	308.7	16.98	0.063	343.61	76.97	0.027	216.06	316.83
23	17.7	2342	7.1	1640	16.3	93.2	347.43	17.06	0.072	405.02	84.21	0.014	296.53	391.77
24	24.8	2241	7.09	1762	3.3	98.7	389.51	25.66	0.014	451.66	60.61	0.005	377.96	364.41
25	25.1	2394	6.75	1781	4.2	95.2	391.48	25.14	0.053	463.44	49.06	0.017	381.59	370.1
26	25.1	2666	6.91	1848	5.8	85.6	404.98	28.61	0.013	477.06	63.96	0.021	398.74	394.62
27	24.5	2824	6.84	2108	4.9	90.4	486.69	32.77	0.036	566.72	42.66	0.025	427.83	465.56
28	25.4	2258	6.79	1670	3	102.9	385.32	24.82	0.041	382.77	69.77	0.024	372.77	341.25
29	26	2166	6.78	1598	4.6	95.6	366.39	17.19	0.017	404.25	77.06	0.011	344.85	298.66
30	24.8	3009	6.9	2165	5.3	86.8	477.66	22.27	0.032	523.68	83.73	0.016	489.58	488.87
31	21.5	3228	6.98	2176	7.4	96.5	501.61	22.96	0.036	618.72	65.94	0.023	423.66	449.13
32	16.9	1457	6.85	1090	4.8	70.1	257.05	9.38	0.023	284.17	64.12	0.021	192.07	218.56
33	17.5	848	6.91	596	2.3	37	132.11	6.99	0.018	153.96	57.78	0.018	95.33	57.77
34	17.8	1789	7.08	1654	10.1	61.3	295.76	12.11	0.051	339.87	77.72	0.013	200.17	300.18

Table 2 Correlation matrix

Variables	T °C	EC	pH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
T °C														
EC	0.387													
pH	0.273	0.829												
TDS	0.052	0.624	0.568											
K ⁺	-0.410	0.194	0.194	0.329										
Na ⁺	0.584	0.812	0.660	0.351	0.132									
Ca ²⁺	0.359	0.970	0.830	0.648	0.186	0.768								
Mg ²⁺	0.591	0.848	0.766	0.494	0.000	0.734	0.829							
HCO ₃ ⁻	0.406	0.955	0.829	0.527	0.142	0.810	0.954	0.842						
NO ₃ ⁻	0.206	0.175	-0.028	0.023	0.222	0.364	0.092	-0.004	0.112					
Cl ⁻	0.169	0.765	0.518	0.485	0.131	0.580	0.721	0.623	0.597	0.138				
SO ₄ ²⁻	0.448	0.891	0.751	0.597	0.161	0.747	0.902	0.783	0.925	0.156	0.463			
NO ₂ ⁻	0.174	0.480	0.218	0.208	0.060	0.620	0.454	0.258	0.484	0.454	0.398	0.406		
NH ₄ ⁺	0.057	0.337	0.311	0.126	0.399	0.347	0.372	0.241	0.452	0.151	-0.102	0.532	0.283	

Values in bold express significant correlations

4.5. Statistical study

The Principal Component Analysis (PCA) is part of the group of multidimensional descriptive methods known as factorial methods. These methods emerged in the early 30s. PCA proposes, starting from the rectangular data table concerning the quantitative variable p values for n units, the geometrical representation of units and variables (Duby & Robin, 2006). The table is constituted, in line, by "individuals" (drills, springs) starting from which one measures the quantitative "variables" disposed as columns (T°C, EC, pH, TDS, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻ and NH₄⁺). The Principal Component Analysis (PCA) of chemical data is established using the XLSTAT software for all the 29 samples and 14 variables.

The correlation matrix

The linear correlations between relevant chemical elements allow seeking the origin of mineralization by assessing the degrees of dependence between various parameters. The assessment is conducted using the correlation coefficient determined by statistical calculations. The correlation between two parameters will be more significant when the correlation coefficient R is close to the value 1. Consequently, the correlations were established between all major elements taken in pairs. Hence, correlation binary diagrams were obtained (Fekrache, 2015) (Table 1).

A strong correlation between mineralization (EC) and calcium, bicarbonates and sulphates means

that the elements participate strongly to the mineralization of waters. These data lead us to say that, if the mineralization is estimated by a single element it will be calcium, if we want to add others it will be the sulphate ion then the calcium. The correlation between these ions indicates the existence of ionic exchange reactions between the solution and the absorbing complex (Table 2).

Principal Component Analysis (PCA)

Three important factors account for 85 % of the information: The F1 appears as the mineralization axis, it is defined by the salinity and the ions Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻ and SO₄²⁻ probably due to evaporite dissolution and participating in mineralization of groundwater in the plain of El Meita. The axis F2 shows that the waters rich in K⁺ and NH₄⁺ are opposed to the warm waters. This means that these ions come mainly from the anthropic contribution, thus not caused by the dissolution of the minerals. The pollution does not reaches the deep waters. The third axis F3 is interpreted as a contamination factor, containing nitrites (NO₂⁻) and nitrates (NO₃⁻) which are opposed to salinity; this means that these parameters have no influence on the mineralization of plain's groundwater of the plain. The fourth axis F4 shows that the Cl⁻ opposes with the NH₄⁺ this indicates that the presence of the Chloride is due to the dissolution of the halite and not by the anthropic activity. (Table 3).

Table 3 Correlation between variables and factors

	F1	F2	F3	F4
T °C	0.462	-0.677	0.322	0,237
EC	0.981	0.003	-0.072	-0,087
pH	0.839	0.019	-0.301	0,102
TDS	0.629	0.251	-0.378	-0,240
K⁺	0.197	0.873	-0.066	-0,057
Na⁺	0.870	-0.102	0.324	-0,011
Ca²⁺	0.968	0.020	-0.136	-0,026
Mg²⁺	0.874	-0.285	-0.165	0,086
HCO₃⁻	0.963	-0.011	-0.039	0,122
NO₃⁻	0.207	0.218	0.788	-0,263
Cl⁻	0.696	-0.073	-0.134	-0,596
SO₄²⁻	0.921	0.035	-0.015	0,241
NO₂⁻	0.523	0.121	0.587	-0,254
NH₄⁺	0.411	0.494	0.228	0,669
% variability	53.698	12.059	10.954	8,233
Cumulated %	53.698	65.757	76.710	84,943

5. CONCLUSION

The dominance of major elements in the groundwater of the El Meita plain is provided by the chloride and calcium sulphate within salt waters. Mineralization increases from northeast towards southwest, in the direction of the general runoff of groundwater. Binary diagrams of element-chloride were elaborated in order to understand water mineralization. Findings have shown two possible origins: dolomitization and the dissolution of gypsum or reverse ionic exchange base between water and the geological formation fixing sodium and releasing calcium (a hypothesis confirmed by exchange base index). Mineral saturation index indicates that carbonated minerals (dolomite, calcite and aragonite) tend to precipitate while saliferous evaporite minerals tend to dissolve.

The findings obtained after the interpretation of the Principal Component Analysis (PCA) demonstrate the participation of several elements to the mineralization of groundwater in the El Meita Plain (mostly of calcium). Results indicate three main factors: axis F1 for mineralization; axis F2 represented by K⁺ and NH₄⁺, which demonstrates that the elements are anthropic; axis F3 is a contamination factor, reason for which it does not participate to the mineralization process. Waters used for irrigations are fit for cultures that resist to certain values of salinization.

Acknowledgments

Our thanks go to the Geo-Archaeology Laboratory within the Faculty of Geography and Geology, "Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi (Romania), which provided the tools and carried out the data processing. The infrastructure was provided through the

POSCCE-O 2.2.1, SMIS-CSNR 13984-901, No. 257/28.09.2010 Project, CERNESIM.

REFERENCES

- Adopo, K.L., Romanescu, G., N'Guessan, A.I. & Stoleriu C.,** 2014. *Relations between man and nature and environmental dynamics at the mouth of the Komoé river, Grand-Bassam (Ivory Coast)*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 9(4), 137-148.
- Aouidane, L. & Belhamra, M.,** 2017. *Hydrogeochemical processes in the Plio-Quaternary Remila aquifer (Khenchela, Algeria)*. Journal of African Earth Sciences, 130, 38-47.
- Belksier, M.S.,** 2009. *Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évaluation de sa vulnérabilité*, 2009. Thèse de magister, Département des Sciences de la Terre, Université d'Annaba.
- Beltrando, G.,** 2014. *Groundwater in the plain of the Crau (south-east of France): between historical abundance and modern vulnerability*, In: *Water resources and wetlands, Conference Proceedings, 11-13 September 2014, Tulcea-Romania* (eds. Gastescu P., Marszelewski W. & Bretcan P.), Transversal Publishing House, Targoviste, p. 44-50.
- Brinis, N., Boudoukha, A. & Djaiz, F.,** 2014. *Case of aquifer of El-Outaya North-west of Biskra-Algeria*. International Journal of Environment & Water, 3(1), 44-51.
- Chapelle, F.,** 2001. *Groundwater Microbiology And Geochemistry*. John Wiley & Sons, Inc. NY.
- Drever, J.F.,** 1997. *The geochemistry of natural waters*. 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC.
- Duby, C. & Robin, S.,** 2006. *Analyse en Composantes Principales*. Institut National Agronomique Paris – Grignon, p. 1-54.
- Fehdi, C., Boudoukha, A., Rouabhia, A. & Salameh, E.,** 2009. *Caractérisation hydrogéochimique des*

- eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet, (Sud-Est algérien). *Afrique Science*, 5(2), 217-231.
- Fekrache, F.**, 2015. *Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba*, Département de biologie. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba.
- Ghodbane, M., Boudoukha, A. & Benaabidate, L.**, 2015. *Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria*. *Desalination and water treatment*, 1-11.
- Hamzaoui Azaza, F., Bouhlila, R. & Gueddari, M.**, 2012. *Characterization of the mineralization of the Triassic water table (South-East Tunisia) by geochemical and statistical methods*. *Geo-Eco-Trop*, 36, 49-62.
- Houha, B.**, 2007. *Étude du fonctionnement hydrogéochimique, salin et isotopique des eaux de Khenchela*. Doctoral Thesis, University of Annaba, Algeria.
- Ishaku, J.M., Ankidawa, B.A. & Abbo, A.M.**, 2015. *Groundwater Quality and Hydrogeochemistry of Toungo Area, Adamawa State, North Eastern Nigeria*. *American Journal of Mining and Metallurgy*, 3(3), 63-73.
- Kloppmann, W., Bourhane, A. & Asfirane, F.**, 2010. *Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau*. BRGM, action 3, Orléans-France.
- Kouzana, L., Ben Mammou A. & Sfar Felfoul, M.**, 2009. *Seawater intrusion and associated processes: Case of the Korba aquifer (Cap-Bon, Tunisia)*. *Académie des sciences Geosciences*, 341, 21-35.
- Lamini, A.**, 2012. *Étude Géochimique Et Minéralogique Des Chotts De La Région D'el Hadjira*, Département des sciences de la terre. Thèse de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Nadher, A., Magaritz, M. & Mazor, E.**, 1980. *Chemical reactions of seawater with rocks and freshwater: experimental and field observations on brackish waters in Israel*. *Geoch. Et Cosmoch. Acta*, 44, 879-886.
- Nakayama, T. & Maksyutov, S.**, 2014. *Surface - groundwater interaction and its effect on carbon cycle in terrestrial-aquatic continuum*, In: *Water resources and wetlands, Conference Proceedings, 11-13 September 2014, Tulcea-Romania* (eds. Gastescu P., Marszelewski W. & Bretcan P.), Transversal Publishing House, Targoviste, p. 44-50.
- OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel)**, 2003. *Gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière*. Système Aquifère du Sahara Septentrional, 1^{ère} édition, Projet SASS.
- Peter-Borie, M., Lucassou, F. & Aubie, S.**, 2009. *Contexte Hydrogéologique Et Hydraulique Du Littoral Basique Français, Observation De La Côte Aquitaine*. BRGM, 31, France.
- Rodier, J., Legube, B. & Merlet, N.**, 2009. *L'analyse de L'eau*. 9th Edition, Dunod, Paris.
- Romanescu, G. & Cojocaru, I.**, 2010. *Hydrogeological considerations on the western sector of the Danube Delta – a case study for the Caraorman and Saraturile fluvial-marine levees (with similarities for the Letea levee)*. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9(6), 795-806.
- Romanescu, G., Paun, E., Sandu, I., Jora, I., Panaitescu, E., Machidon, O. & Stoleriu, C.**, 2014. *Quantitative and Qualitative Assessments of Groundwater into the Catchment of Vaslui River*. *Rev. Chim. (Bucharest)*, 65(4), 401-410.
- Romanescu, G., Curca, R.G. & Sandu, I.G.**, 2015. *Salt deposits in the Romanian Subcarpathians - genesis, repartition and ethnomangement*. *International Journal of Conservation Science*, 6(3), 261-269.
- Sedrati, A., Houha, B., Romanescu, G., Sandu I.G., Diaconu, D.C. & Sandu, I.**, 2017. *Impact of Agriculture upon the Chemical Quality of Groundwaters within the Saharian Atlas Steppe El Meita (Khenchela-Algeria)*. *Rev. Chim. (Bucharest)*, 68(2), 420-423.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doll, P. & Portmann, F.T.**, 2010. *Groundwater use for irrigation – a global inventory*. *Hydrology Earth Syst. Sci.*, 14, 1863-1880.
- Tabouche, N. & Achour S.**, 2004. *Étude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien*, *Larhyss Journal*, 3, 99-113.
- Vainu, M., Terasmaa, J., Vaasma, T. & Vandel, E.**, 2014. *Groundwater seepage patterns in a closed-basin lake before and after an increase in groundwater pumping rates from an unconfined aquifer in the Kurtna Kame field, Estonia*, In: *Water resources and wetlands, Conference Proceedings, 11-13 September 2014, Tulcea-Romania* (eds. Gastescu P., Marszelewski W. & Bretcan P.), Transversal Publishing House, Targoviste, p. 189-196.
- Zeddouri, A., Derradji, F. & Hadj-Saïd, S.**, 2010. *Salinity origin of terminal complex water in Ouargla region (south east of Algeria)*. *Phys. Chem. News*, 53(5), 62-69.
- Zektser, I.S. & Everett, L.G.**, 2004. *Resources of The World And Their Use*. UNESCO, Paris.

Received at: 10. 08. 2017

Revised at: 20. 10. 2017
Accepted for publication at: 21. 12. 2017
Published online at: 28. 12. 2017

Mr SEDRATI Abdenour

Doctorat : Eau, Environnement et Energies Renouvelables

Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal - zone sud Khenchela – Algérie

Résumé

Cette étude est une contribution à la caractérisation des aquifères de la plaine d'El-Meita-Khenchela par le traçage chimique et isotopique. Nous sommes en présence de deux importants aquifères, les calcaires du crétacé au nord et les sables de l'Albien au sud. Ces aquifères sont soumis aux conditions climatiques sévères.

L'aridité du climat, l'effet d'altitude, la géomorphologie du relief, Atlas saharien au Nord avec ses altitudes surélevées marqué par le sommet de Ras Keltoum (2326 m) sur le massif de Chélia et son relief imposant, le bas Sahara et ses vastes plaines d'extension illimitées et d'altitude très vaste notamment, à Chott Melghigh (-35 m), la géologie et la géométrie de l'aquifère, le contraste climatique entre le Nord et le sud et l'activité anthropique, sont autant de facteurs qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux.

Les outils chimique et isotopique nous ont permis dans une large mesures, l'identification des systèmes aquifères et de l'existence d'éventuelles relation souterraines, de discriminer et de hiérarchiser les processus et les mécanismes responsable de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, et enfin, l'identification de la source de l'alimentation des aquifères existants.

Une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux, a été dressée par la méthode de GOD, dans la région d'El-Meita, afin de tester les sols sensibles à une infiltration de surface. La réponse de l'aquifère de l'Albien nous interpelle pour dresser des périmètres de protection de la nappe.

Mots clés : El-Meita, Atlas saharien, Salinité, Isotopes, Vulnérabilité, Khenchela

Devant le jury :

Présidente :	KADI Kenza	MCA, Université de Khenchela
Directeur de thèse :	HOUHA Belgacem	Professeur, Université de Khenchela
Examineur :	KACHI Slimane	Professeur, Université de Guelma
Examineur :	HOUHAMDI Moussa	Professeur, Université de Guelma
Examineur :	GOUIDIA Layachi	Professeur, Université de Tébessa
Examineur :	FEHDI Chemseddine	Professeur, Université de Tébessa